

Manual De Usuario  
De La Librería De Funciones  
De EES Aplicadas A  
La Transferencia De Calor

---

## *Índice*

---

1. Introducción.....	3
2. Instrucciones de uso de funciones y modules.....	4
3. Conducción.....	12
3.1.Placa.....	12
3.2.Cilindro.....	14
3.3.Esfera.....	14
3.4.Aletas.....	15
4. Convección.....	19
4.1.Convección forzada flujo externo.....	19
4.1.1 Placa plana.....	19
4.1.2. Cilindro circular.....	22
4.1.3. Esfera.....	23
4.1.4. Banco de tubos.....	23
4.2.Convección forzada flujo interno.....	25
4.2.1. Conducto circular.....	25
4.2.2. Conducto no circular.....	31
4.3. Convección libre flujo externo.....	32
4.3.1. Placa plana vertical.....	32
4.3.2. Placa plana horizontal.....	33
4.3.3. Placa plana inclinada.....	35
4.3.4. Cilindro vertical.....	36
4.3.5. Cilindro horizontal.....	36
4.3.6. Esfera.....	37
4.4. Convección libre flujo interno.....	38
4.4.1. Recinto rectangular.....	38
4.4.2. Recinto cilíndrico, horizontal o vertical.....	41
4.4.3. Recinto esférico.....	41
4.4.4. Recinto cilíndrico concéntrico.....	42
4.4.5. Recinto esférico concéntrico.....	42
4.5. Condensación.....	43
4.5.1. Placa plana vertical e inclinada: Flujo externo.....	43
4.5.2. Cilindro vertical e inclinado: Flujo externo.....	45
4.5.3. Cilindro horizontal: Flujo externo.....	46
4.5.4. Cilindro horizontal: Flujo interno.....	47
4.6. Ebullición.....	48

4.6.1. Ebullición en recipiente: Flujo externo.....	48
4.6.2. Ebullición convección forzada: Flujo interno.....	52
5. Radiación.....	55
5.1. Funciones de radiación de un cuerpo negro.....	55
5.2. Factores de forma.....	55
6. Intercambiadores de calor.....	63

---

## *1. Introducción*

---

En este manual de usuario se pretende dar la información necesaria para un correcto uso de las funciones de librería introducidas. Estas funciones recogen prácticamente todas las ecuaciones y ábacos utilizados en la transferencia de calor, desde los ábacos de la conducción, pasando por las correlaciones de la convección y los factores de forma de la radiación, hasta los intercambiadores de calor.

El uso de estas funciones es igual al de las construidas por el programa. Gracias a las características de EES, desarrollado en entorno Windows, lo que nos hace estar más familiarizado con su funcionamiento, es muy fácil llegar a un dominio suficiente para su manejo en poco espacio de tiempo.

Tener este programa y esta gama de funciones no significa que el ordenador resolverá todos nuestros problemas de transferencia de calor. Como cualquier programa resuelve las ecuaciones que le introducimos, pero estas ecuaciones tienen que representar la solución del problema porque si no la solución será errónea. Y otra cosa que nos obliga a tener un buen conocimiento de la materia es la estimación de unos valores iniciales de las variables sin los cuáles el programa no converge o no da una buena solución. No obstante, es obvio que nos facilita mucho el trabajo y nos da la posibilidad de hacer estudios paramétricos en pocos segundos que nos pueden ayudar a una mejor comprensión de los fenómenos de transferencia de calor.

En el siguiente apartado, instrucciones de uso de funciones y modules, se va a explicar con más detalle el manejo de estas funciones, cómo utilizarlas y con qué problemas nos podemos encontrar. En los siguientes apartados se dará la relación de funciones con los parámetros que toma y el valor que devuelve, así como las condiciones de su aplicación.

---

## 2. Instrucciones de uso de funciones y modules

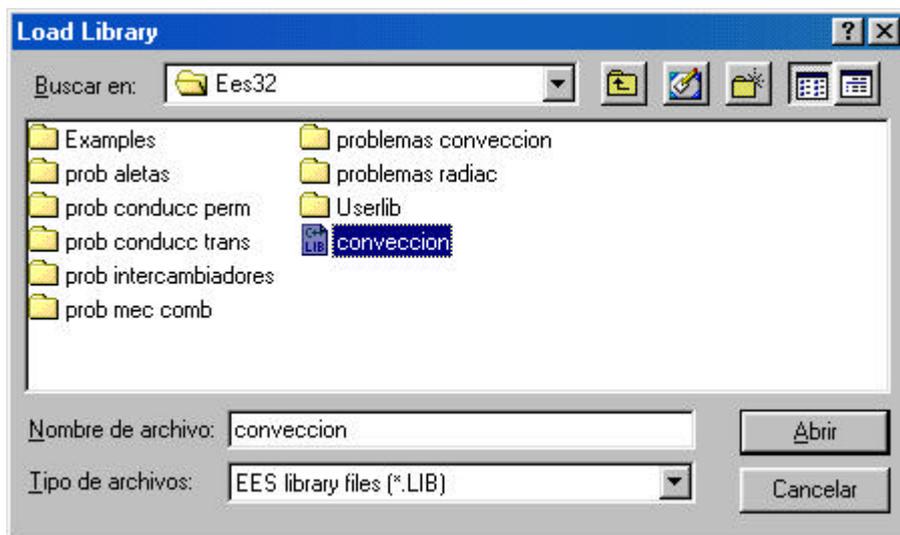
---

Vamos a ver los aspectos más importantes a la hora de trabajar con las funciones de librería, pero nada mejor para aprender bien el funcionamiento que unas cuantas horas delante del ordenador y jugar con las posibilidades que nos ofrece.

Al iniciar la sesión de EES el programa carga automáticamente las librerías que se encuentran en la carpeta **Userlib**. Todas las librerías deben estar en esa carpeta, pero si no están y no las cargamos previamente con el comando **Load Library** del menú **File**, nos saldrá un mensaje de error



Como se ha dicho, esto se soluciona haciendo clic en Load Library del menú File, y nos sale una ventana donde picamos en la función que queremos cargar.



Por comodidad se procurará que todas las funciones de librería estén colocadas en la carpeta **Userlib**.

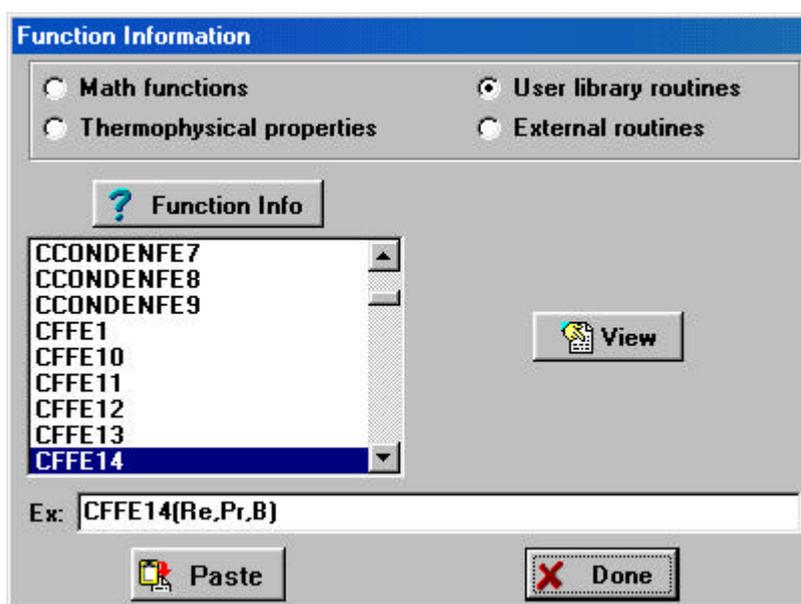
## ¿Cómo insertar la función en las ecuaciones?

Tenemos dos opciones para insertar las funciones en nuestra ventana de ecuaciones. La primera es escribiéndola desde el teclado

Ejemplo:  $Nusselt = CFFE14(Re,Pr,B)$

Esta forma requiere el conocimiento de la función y de los parámetros que toma, o bien leerlo desde este manual de usuario.

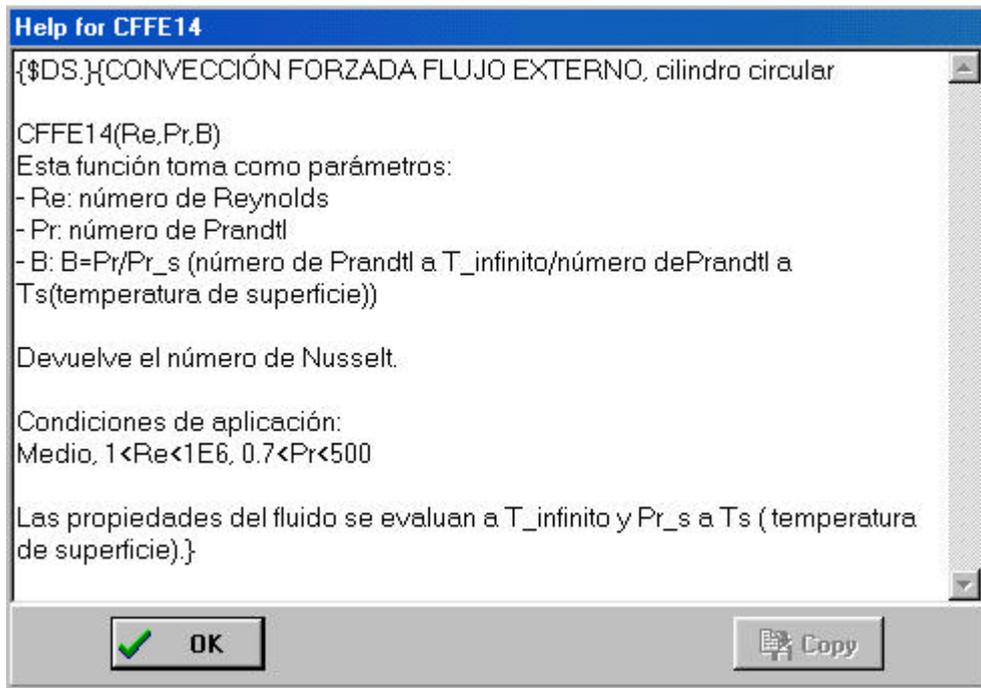
La segunda forma es más cómoda y se puede hacer sin necesidad de mirar este manual. En el menú **Options** hacemos clic en **Function Info**, y nos sale la siguiente ventana.



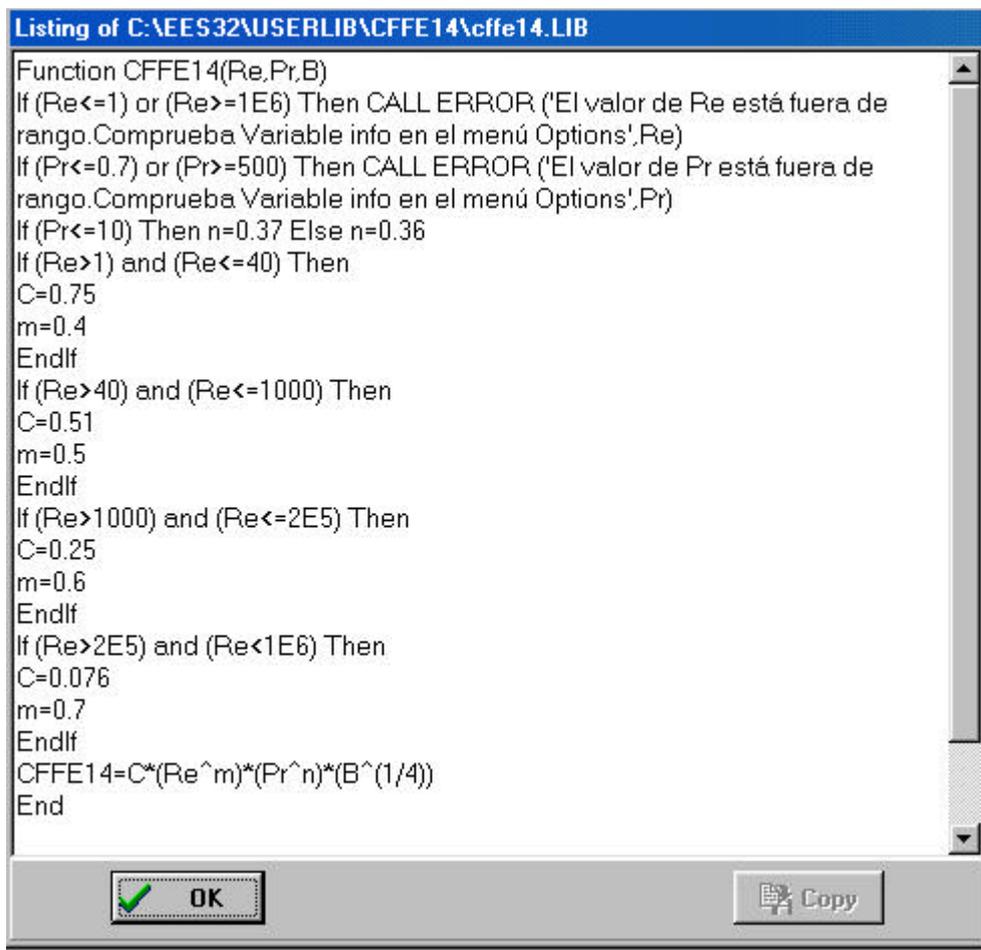
En esta ventana aparecen una serie de botones:

**User Library routines**, haciendo clic ahí nos aparece una lista donde están todas las funciones de librería que están cargadas, así que si hacemos una función o una que esté hecha y no se ha cargado debemos hacerlo previamente como se dijo en el punto anterior para que nos aparezca aquí y podamos elegirla. Cuando se programa una función aunque esté en la carpeta **Userlib** hay que volver a iniciar el programa EES para que se cargue o hacerlo con el comando **Load Library**. En el cuadro de abajo aparece la función con sus parámetros, y haciendo clic en **Paste** la función se coloca en la posición donde esté el cursor en **Equations Window**.

? **Function Info**, haciendo clic aquí obtenemos una ventana de ayuda donde nos aparece toda la información sobre la función, como en el caso del ejemplo los parámetros que toma, el valor que devuelve, las condiciones de aplicación, y la temperatura a la que se toman las propiedades, como vemos en la siguiente imagen.

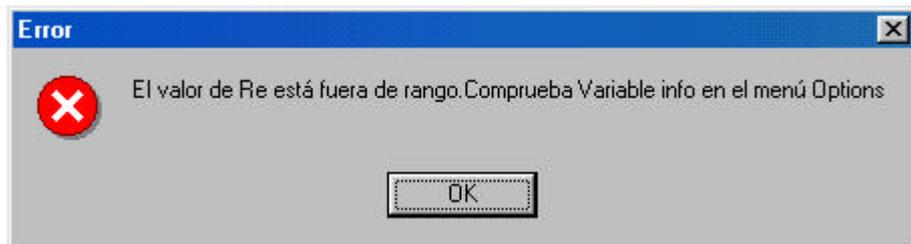


**View**, haciendo clic aquí obtenemos una ventana donde aparece el listado de programación de la función.



## Rangos de validez

La mayoría de las correlaciones de convección tienen unas condiciones de aplicación que afectan a los valores del número de Reynold ( $Re$ ), Prandtl ( $Pr$ ), Graetz ( $Gz$ ), Grashof ( $Gr$ ). En el desarrollo de las funciones se ha introducido un mensaje de error si estos parámetros nos están dentro de su rango de validez.



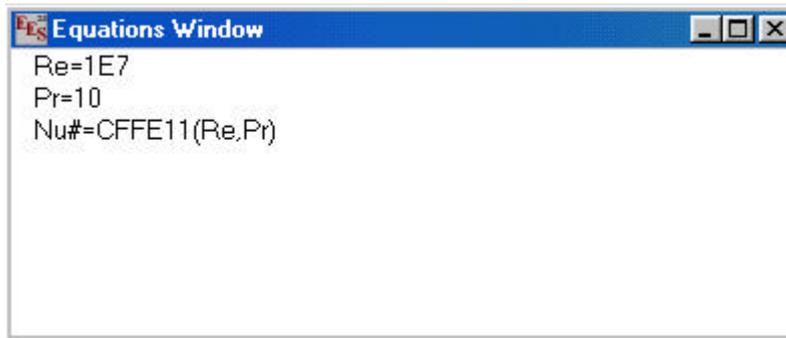
El mensaje da una orientación del posible problema, o bien el valor de  $Re$  introducido está fuera de rango y no es válida la correlación, o bien en una de las iteraciones que realiza el programa el valor de la variable  $Re$  alcanza un valor fuera de rango. Esto se puede solucionar picando en **Variable Info** en el menú **Options**, donde aparece una ventana en la que se le pueden dar valores iniciales a las variables. Esta operación se hace casi imprescindible en este tipo de problemas donde es necesario dar unos valores iniciales para dar con la solución.

Variable Information					
Module <span>Main</span>					
Variable	Guess	Lower	Upper	Display	Units
A_e	0.5341	-infinity	infinity	A 3 N	m <sup>2</sup>
A_i	0.4712	-infinity	infinity	A 3 N	m <sup>2</sup>
e	1	-infinity	infinity	A 3 X	m
e_2	1	-infinity	infinity	A 3 X	m
h_e	10	-infinity	infinity	A 3 N	Kcal/h·m <sup>2</sup> ·C
h_i	2000	-infinity	infinity	A 3 N	Kcal/h·m <sup>2</sup> ·C
k_a	0.048	-infinity	infinity	A 3 N	Kcal/h·m·C
k_t	15	-infinity	infinity	A 3 N	Kcal/h·m·C
q	1334	-infinity	infinity	A 3 X	Kcal/h·m
q_2	444.7	-infinity	infinity	A 3 N	Kcal/h·m
r_1	0.075	-infinity	infinity	A 3 N	m
r_2	0.085	-infinity	infinity	A 3 N	m

### ¿Qué valor devuelve?

Estas funciones devuelven un valor determinado, como el número de Nusselt, calor transferido, eficiencia de la aleta, pero también, y es la propiedad que las hace muy interesantes, puede ser conocido el valor que devuelve y desconocido uno de los parámetros que toma, y el programa nos va a determinar ese parámetro incógnita. Veamos esto con ejemplos para que quede mucho más claro.

El caso normal sería por ejemplo saber los parámetros Re, Pr y obtener mediante la función el número de Nusselt.

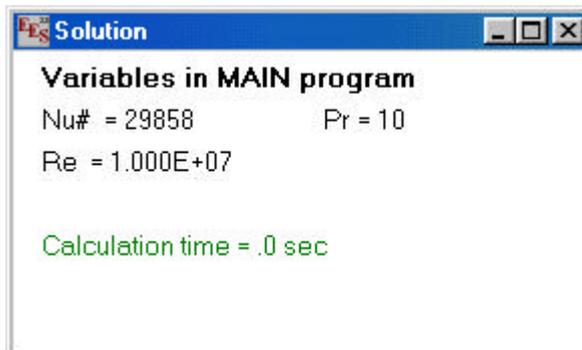


```

Equations Window
Re=1E7
Pr=10
Nu#=CFFE11(Re,Pr)

```

Y obtendríamos la solución

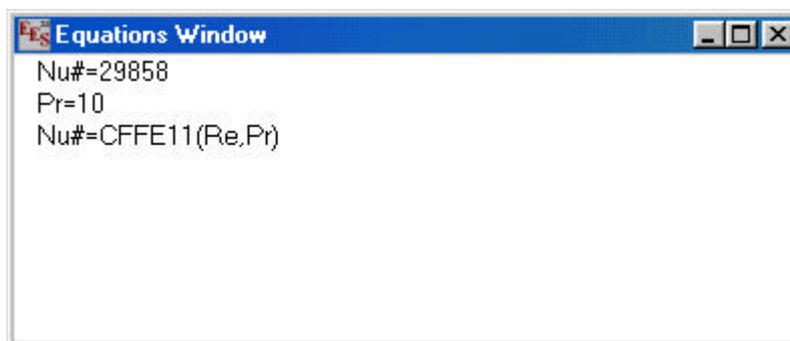


```

Solution
Variables in MAIN program
Nu# = 29858      Pr = 10
Re = 1.000E+07
Calculation time = .0 sec

```

Pero también podríamos saber Re teniendo como dato el número de Nusselt y el número de Prandlt.

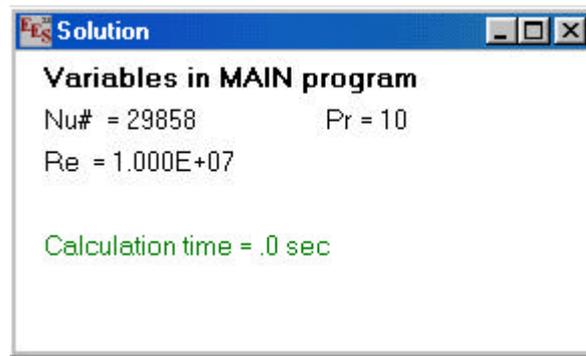


```

Equations Window
Nu#=29858
Pr=10
Nu#=CFFE11(Re,Pr)

```

Y dando un valor inicial dentro del rango de validez de la correlación a Re ( **Variable Info** en el menú **Options**), obtenemos el valor de Re.



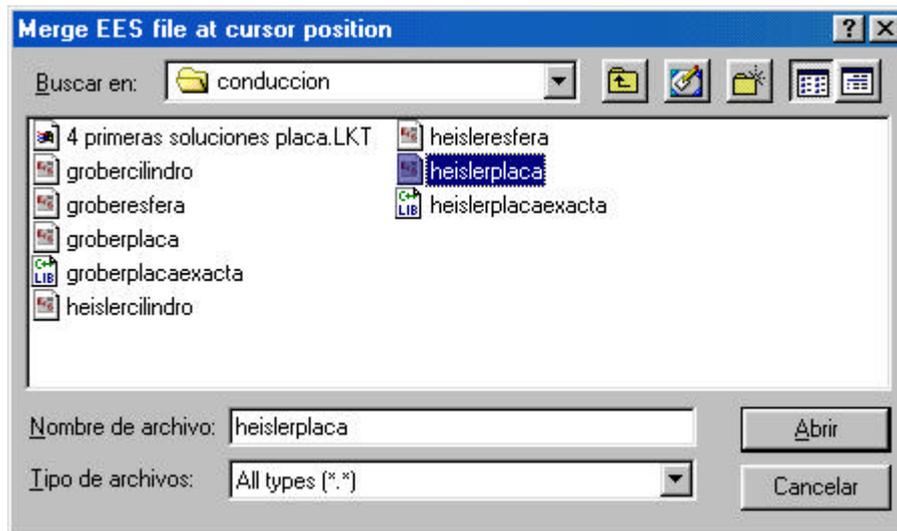
## Modules

Es otra variedad de función de librería que puede hacer el usuario pero trabaja más como un subprograma y puede devolver más de un valor. Puede resolver ecuaciones no lineales pero no admite los comandos de programación **Then, if...**

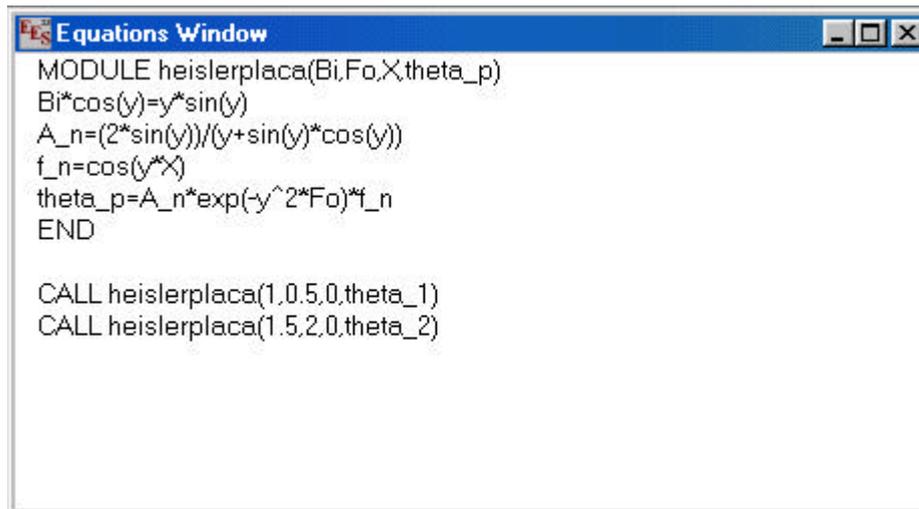
En la programación de las funciones sólo se pueden hacer asignaciones, no pueden resolver ecuaciones no lineales a menos que se utilicen métodos numéricos, pero no así con los **modules**, y es por esta características que lo hemos utilizado para los ábacos de Heisler y los ábacos de Gröber, por su facilidad de programación y en la obtención de resultados.

Se pueden almacenar también como librería, pero para dar menos problemas es mejor insertarlos al comienzo de resolución de un problema en el editor de ecuaciones (**Equations Window**), con el comando **Merge** en el menú **File**, y después se puede llamar al subprogramas las veces que se desee, tomando y devolviendo distintas variables.

Hacemos clic en **Merge**, del menú **File**, y nos sale una ventana donde picamos en el fichero donde esté nuestro **module**, éste se copiará en la posición del cursor en **Equations Window**.



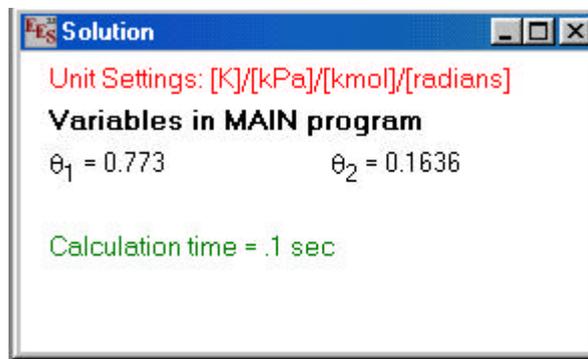
Vemos en la siguiente imagen cómo se inserta el subprograma en nuestra ventana de ecuaciones y llamamos dos veces al subprograma, obteniendo los valores  $\theta_1$  y  $\theta_2$ . Al igual que en las funciones puede tomar un valor conocido de  $\theta_1$  y devolver el número de Fourier ( $Fo$ ), y así poder obtener por ejemplo el tiempo que tarda un punto de una placa en alcanzar una determinada temperatura.



```
MODULE heislerplaca(Bi,Fo,X,theta_p)
Bi*cos(y)=y*sin(y)
A_n=(2*sin(y))/(y+sin(y)*cos(y))
f_n=cos(y*X)
theta_p=A_n*exp(-y^2*Fo)*f_n
END

CALL heislerplaca(1,0.5,0,theta_1)
CALL heislerplaca(1.5,2,0,theta_2)
```

Vemos las soluciones.



```
Solution

Unit Settings: [K]/[kPa]/[kmol]/[radians]
Variables in MAIN program
theta_1 = 0.773          theta_2 = 0.1636

Calculation time = .1 sec
```

---

### 3. Conducción

---

En los diferentes **modules** , están los ábacos de Heisler y de Göber. El corrector de posición no hace falta porque en los subprogramas de Heisler se ha introducido la variable espacial adimensional,  $X$ .

Está implementada la solución aproximada ( el primer término ), que es prácticamente igual a la exacta para valores de  $Fo > 0.3$  , y se incluye la solución exacta con cuatro términos para la placa plana.

#### 3.1. Placa Plana.

- *heislerplaca*( $Bi, Fo, X, theta\_p$ )

Module que toma como parámetros:

Bi: número de Biot.

Fo: número de Fourier.

X: posición adimensional.

Devuelve el valor de la temperatura adimensional  $theta\_p$  para una placa de espesor  $2L$ .

Importante: Este module da valores correctos cuando se utiliza en radianes, para eso seleccionar la opción de **Radians** en el comando **Unit system** del menú **Options**.

- *groberplaca*( $Bi, Fo, Q\#Q\_0p$ )

Module que toma como parámetros:

Bi: número de Biot.

Fo: número de Fourier.

Devuelve el valor del calor cedido por la placa respecto al calor máximo para una placa de espesor  $2L$ .

Importante: Este module da valores correctos cuando se utiliza en radianes, para eso seleccionar la opción de **Radians** en el comando **Unit system** del menú **Options**.

- *heislerplacaexacta*( $Bi, Fo, X$ )

Esta función toma como parámetros:

Bi: número de Biot.

Fo: número de Fourier.

X: posición adimensional.

Devuelve el valor de la temperatura adimensional con los cuatro primeros términos de la solución para una placa de espesor  $2L$ .

**Importante:** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**. También es necesario para su funcionamiento tener abierto el lookup table **4 primeras soluciones placa.LKT**, que se encuentra en la carpeta conducción. Para abrir el lookup table solo hay que hacer clic en el comando **Open Lookup Table** en el menú **Tables**, la función necesita tomar valores de la tabla.

- *groberplacaexacta(Bi,Fo)*

Esta función toma como parámetros:

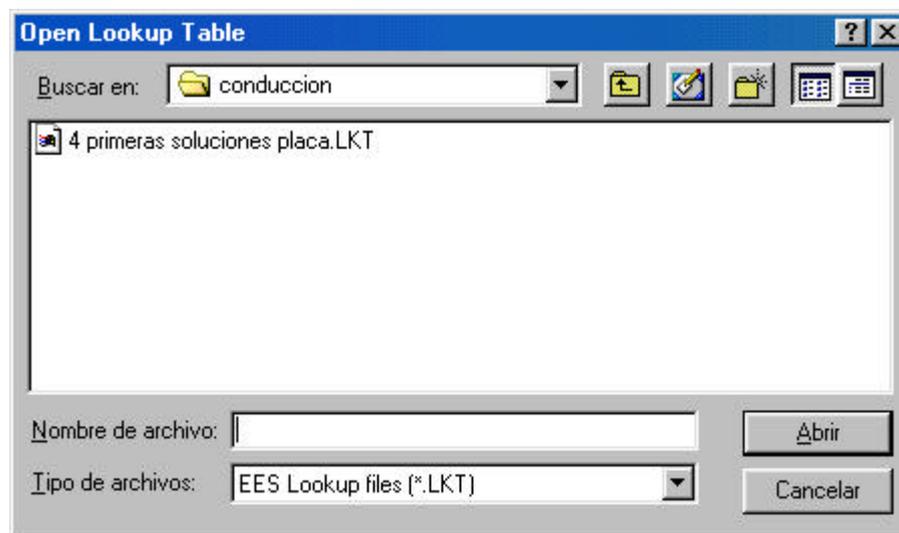
Bi: número de Biot.

Fo: número de Fourier.

Devuelve el valor del calor cedido por la placa respecto al calor máximo con los cuatro primeros términos de la solución para una placa de espesor  $2L$ .

**Importante:** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**. También es necesario para su funcionamiento tener abierto el lookup table **4 primeras soluciones placa.LKT**, que se encuentra en la carpeta conducción. Para abrir el lookup table solo hay que hacer clic en el comando **Open Lookup Table** en el menú **Tables**, la función necesita tomar valores de la tabla.

Para que esto quede más claro lo vemos en la siguiente imagen. Haciendo clic en **Open Lookup Table** en el menú **Tables**, nos sale un ventana donde buscaremos nuestro lookup table, **4 primeras soluciones placa.LKT**, que se encuentra en la carpeta conducción dentro a su vez de **Userlib**.



### 3.2. Cilindro.

- *heislercilindro* (*Bi,Fo,X,theta\_c*)

Module que toma como parámetros:

Bi: número de Biot.

Fo: número de Fourier.

X: posición adimensional.

Devuelve el valor de la temperatura adimensional  $\theta_p$  para cilindro de radio  $r$ .

- *grobercilindro*(*Bi,Fo,Q#Q\_0c*)

Module que toma como parámetros:

Bi: número de Biot.

Fo: número de Fourier.

Devuelve el valor del calor cedido por la placa respecto al calor máximo para cilindro de radio  $r$ .

### 3.3. Esfera.

- *heisleresfera*(*Bi,Fo,X,theta\_e*)

Module que toma como parámetros:

Bi: número de Biot.

Fo: número de Fourier.

X: posición adimensional.

Devuelve el valor de la temperatura adimensional  $\theta_p$  para una esfera de radio  $r$ .

Importante: Este module da valores correctos cuando se utiliza en radianes, para eso seleccionar la opción de **Radians** en el comando **Unit system** del menú **Options**.

- *groberesfera*(*Bi,Fo,Q#Q\_0e*)

Module que toma como parámetros:

Bi: número de Biot.

Fo: número de Fourier.

Devuelve el valor del calor cedido por la placa respecto al calor máximo para una esfera de radio  $r$ .

Importante: Este module da valores correctos cuando se utiliza en radianes, para eso seleccionar la opción de **Radians** en el comando **Unit system** del menú **Options**.

### 3.4. Aletas

#### *Aletas Rectas*

- **Ef\_aletrectrectang(h,k,L,t)**

Esta función toma como parámetros:

h: coeficiente de película.

k: conductividad térmica.

L: longitud de la aleta en la dirección perpendicular a la base de la aleta.

t: espesor de la aleta.

Devuelve el valor de la eficiencia de la aleta recta rectangular.

**Importante:** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**.

- **Af\_aletrectrectang(L,t,w)**

Esta función toma como parámetros:

L: longitud de la aleta en la dirección perpendicular a la base de la aleta.

t: espesor de la aleta.

w: longitud de la aleta en dirección longitudinal a la base de la aleta.

Devuelve el valor del área superficial de la aleta recta rectangular.

- **Ef\_aletrecttriang(h,k,L,t)**

Esta función toma como parámetros:

h: coeficiente de película.

k: conductividad térmica.

L: longitud de la aleta en la dirección perpendicular a la base de la aleta.

t: espesor en la base de la aleta

Devuelve el valor de la eficiencia de la aleta recta triangular.

- **Af\_aletrecttriang(L,t,w)**

Esta función toma como parámetros:

L: longitud de la aleta en la dirección perpendicular a la base de la aleta.

t: espesor en la base de la aleta.

w: longitud de la aleta en dirección longitudinal a la base de la aleta.

Devuelve el valor del área superficial de la aleta recta triangular.

- **Ef\_aletrectparabolic(h,k,L,t)**

Esta función toma como parámetros:

h: coeficiente de película.

k: conductividad térmica.

L: longitud de la aleta en la dirección perpendicular a la base de la aleta.

t: espesor en la base de la aleta

Devuelve el valor de la eficiencia de la aleta recta parabólica.

- **Af\_aletrectparabolic(L,t,w)**

Esta función toma como parámetros:

L: longitud de la aleta en la dirección perpendicular a la base de la aleta.

t: espesor en la base de la aleta.

w: longitud de la aleta en dirección longitudinal a la base de la aleta.

Devuelve el valor del área superficial de la aleta recta parabólica.

### *Aleta Circular*

- **Ef\_aletcirrectang(h,k,r\_1,r\_2,t)**

Esta función toma como parámetros:

h: coeficiente de película.

k: conductividad térmica.

r\_1: radio interior de la aleta.

r\_2: radio exterior de la aleta

Devuelve el valor de la eficiencia de la aleta circular rectangular.

- **Af\_aletcirrectang(r\_1,r\_2,t)**

Esta función toma como parámetros:

r\_1: radio interior de la aleta.

r\_2: radio exterior de la aleta.

t: espesor en la base de la aleta.

Devuelve el valor del área superficial de la aleta circular rectangular.

### *Aletas de punta*

- **Ef\_aleta\_de\_punta\_rectang(h,k,L,D)**

Esta función toma como parámetros:

h: coeficiente de película.

k: conductividad térmica.

L: longitud de la aleta en la dirección perpendicular a la base de la aleta.

D: diámetro de la aleta

Devuelve el valor de la eficiencia de la aleta de punta rectangular.

***Importante:*** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**.

- **Af\_aleta\_de\_punta\_rectang(L,D)**

Esta función toma como parámetros:

L: longitud de la aleta en la dirección perpendicular a la base de la aleta.

D: diámetro de la aleta.

Devuelve el valor del área superficial de la aleta de punta rectangular.

- **Ef\_aleta\_de\_punta\_triang(h,k,L,D)**

Esta función toma como parámetros:

h: coeficiente de película.

k: conductividad térmica.

L: longitud de la aleta en la dirección perpendicular a la base de la aleta.

D: diámetro en la base de la aleta

Devuelve el valor de la eficiencia de la aleta de punta triangular.

- **Af\_aleta\_de\_punta\_triang(L,D)**

Esta función toma como parámetros:

L: longitud de la aleta en la dirección perpendicular a la base de la aleta.

D: diámetro en la base de la aleta.

Devuelve el valor del área superficial de la aleta de punta triangular.

- **Ef\_aleta\_de\_punta\_parabolic(h,k,L,D)**

Esta función toma como parámetros:

h: coeficiente de película.

k: conductividad térmica.

L: longitud de la aleta en la dirección perpendicular a la base de la aleta.

D: diámetro en la base de la aleta

Devuelve el valor de la eficiencia de la aleta de punta parabólica.

- **Af\_aleta\_de\_punta\_parabolic(L,D)**

Esta función toma como parámetros:

L: longitud de la aleta en la dirección perpendicular a la base de la aleta.

D: diámetro en la base de la aleta.

Devuelve el valor del área superficial de la aleta de punta parabólica.

---

## 4. Convección

---

### 4.1. Convección forzada flujo externo.

#### 4.1.1. Placa plana.

##### - CFFE1(Re)

Esta función toma como parámetro:

Re: número de Reynolds.

Devuelve el coeficiente de fricción.

Condiciones de aplicación:

Laminar, local.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media de película.

##### - CFFE2(Re,Pr)

Esta función toma como parámetro:

Re: número de Reynolds.

Pr: número de Prandtl.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Laminar, local, Ts constante,  $Pr \geq 0.6$

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media de película.

##### - CFFE3(Re,Pr)

Esta función toma como parámetro:

Re: número de Reynolds.

Pr: número de Prandtl.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Laminar, local, qs constante

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media de película.

- **CFFE4(Re)**

Esta función toma como parámetro:  
Re: número de Reynolds.

Devuelve el coeficiente de fricción.

Condiciones de aplicación:  
Laminar, medio.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media de película.

- **CFFE5(Re,Pr)**

Esta función toma como parámetros:  
Re: número de Reynolds.  
Pr: número de Prandtl.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:  
Laminar, medio,  $T_s$  constante,  $Pr \geq 0.6$ .

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media de película.

- **CFFE6(Re,Pr)**

Esta función toma como parámetros:  
Re: número de Reynold.  
Pr: número de Prandtl

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:  
Laminar, medio,  $q_s$  constante.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media de película.

- **CFFE7(Re)**

Esta función toma como parámetros:  
Re: número de Reynolds.

Devuelve el coeficiente de fricción.

Condiciones de aplicación:  
Turbulento, local,  $Re \leq 1E8$ .

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media de película.

- **CFFE8(Re,Pr)**

Esta función toma como parámetros:

Re: número de Reynolds.

Pr: número de Prandtl.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Turbulento , local,  $T_s$  constante,  $Re \leq 1E8$ ,  $0.6 \leq Pr \leq 60$ .

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media de película

- **CFFE9(Re,Pr)**

Esta función toma como parámetros:

Re: número de Reynolds.

Pr: número de Prandtl.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Turbulento , local,  $1E5 < Re < 5.5E6$ ,  $0.7 < Pr < 380$ .

Las propiedades del fluido se evalúan a  $T_{\infty}$ .

- **CFFE10(Re)**

Esta función toma como parámetro:

Re: número de Reynolds.

Devuelve el coeficiente de fricción.

Condiciones de aplicación:

Turbulento , medio,  $Re_{cr} = 5E5$  (Reynolds crítico),  $5E5 < Re \leq 1E8$ .

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media de película.

- **CFFE11(Re,Pr)**

Esta función toma como parámetros:

Re: número de Reynolds.

Pr: número de Prandtl.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Turbulento , medio,  $T_s$  constante,  $5E5 < Re \leq 1E8$ ,  $0.6 < Pr < 60$ ,  $Re_{cr} = 5E5$  (Reynolds crítico).

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media de película.

- **CFFE12(Re,Pr,C)**

Esta función toma como parámetros:

Re: número de Reynolds.

Pr: número de Prandtl.

C:  $C = \mu / \mu_s$  (viscosidad a  $T_{\infty}$  / viscosidad a  $T_s$ )

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Turbulento, medio,  $1E5 < Re < 5.5E6$ ,  $0.7 < Pr < 380$ ,  $Re_{cr} = 5E5$ ,  $0.26 < \mu / \mu_s < 3.5$

Las propiedades del fluido se evalúan a  $T_{\infty}$  y  $\mu_s$  a  $T_s$  (temperatura de superficie).

**4.1.2. Cilindro circular.**

- **CFFE13(Re,Pr)**

Esta función toma como parámetros:

Re: número de Reynolds.

Pr: número de Prandtl.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Medio,  $0.4 < Re < 4E5$ ,  $Pr \geq 0.7$

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media de película.

- **CFFE14(Re,Pr,B)**

Esta función toma como parámetros:

Re: número de Reynolds.

Pr: número de Prandtl.

B:  $B = Pr / Pr_s$  (número de Prandtl a  $T_{\infty}$  / número de Prandtl a  $T_s$  (temperatura de superficie)).

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Medio,  $1 < Re < 1E6$ ,  $0.7 < Pr < 500$ .

Las propiedades del fluido se evalúan a  $T_{\infty}$  y  $Pr_s$  a  $T_s$  (temperatura de superficie).

- **CFFE15(Re,Pr)**

Esta función toma como parámetros:

Re: número de Reynolds.

Pr: número de Prandtl.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Medio,  $Re \cdot Pr > 0.2$ .

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media de película.

**4.1.3. Esfera.**

- **CFFE16(Re,Pr,C)**

Esta función toma como parámetros:

Re: número de Reynolds.

Pr: número de Prandtl.

C:  $C = \mu / \mu_s$  (viscosidad a  $T_{\infty}$  / viscosidad a  $T_s$  (temperatura de superficie)).

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Medio,  $3.5 < Re < 7.6E4$ ,  $0.71 < Pr < 300$ ,  $1 < \mu / \mu_s < 3.2$

Las propiedades del fluido se evalúan a  $T_{\infty}$  y  $\mu_s$  a  $T_s$  (temperatura de superficie).

**4.1.4. Banco de tubos.**

- **CFFE17(Re\_max,Pr,C\_1,C\_2,m)**

Esta función toma como parámetros:

Re\_max: número de Reynolds máximo.

Pr: número de Prandtl.

C\_1: constante que se toma de la tabla 1, para un haz de tubos con 10 o más hileras.

C\_2: constante que se toma de la tabla 2.

m: exponente que se toma de la tabla 1, para un haz de tubos con 10 o más hileras.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Medio,  $Pr \geq 0.7$ ,  $2E3 < Re_{\max} < 4E4$ .

Las propiedades del fluido se evalúan a la temperatura media de película.

Tabla 1. Constante  $C_1$  y exponente  $m$ , para un haz de tubos con 10 o más hileras.

		St/D							
Distribución.	Sl/D	1.25		1.50		2.00		3.00	
		$C_1$	$m$	$C_1$	$m$	$C_1$	$m$	$C_1$	$m$
En Línea	1.25	0.348	0.592	0.275	0.608	0.1	0.704	0.0633	0.752
	1.50	0.367	0.586	0.250	0.620	0.101	0.702	0.0678	0.744
	2.00	0.418	0.570	0.299	0.602	0.229	0.632	0.198	0.648
	3.00	0.290	0.601	0.357	0.584	0.374	0.581	0.286	0.608
Cruzada	0.6	-	-	-	-	-	-	0.213	0.636
	0.9	-	-	-	-	0.446	0.571	0.401	0.581
	1	-	-	0.497	0.558	-	-	-	-
	1.125	-	-	-	-	0.478	0.565	0.518	0.560
	1.25	0.518	0.556	0.505	0.554	0.519	0.556	0.522	0.562
	1.50	0.451	0.568	0.460	0.562	0.452	0.568	0.488	0.568
	2	0.404	0.572	0.416	0.568	0.482	0.556	0.449	0.570
	3	0.310	0.592	0.356	0.580	0.440	0.562	0.428	0.574

St: distancia entre tubos en dirección transversal al flujo.

Sl: distancia entre tubos en dirección longitudinal al flujo.

Tabla2. Factor de corrección  $C_2$ , para  $N < 10$ .

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
En línea	0.64	0.80	0.87	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	0.99
Cruzada	0.68	0.75	0.83	0.89	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99

#### - $CFE18(Re_{max}, Pr, Pr_s, C, m)$

Esta función toma como parámetros:

$Re_{max}$ : número de Reynolds máximo.

$Pr$ : número de Prandtl.

$Pr_s$ : número de Prandtl que se evalúa a la temperatura de superficie.

$C$ : constante que se toma de la tabla 3.

$m$ : exponente que se toma de la tabla 3.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Medio,  $0.7 < Pr < 500$ ,  $1E3 < Re_{max} < 2E6$ ,  $N \geq 20$ .

Las propiedades del fluido se evalúan a la temperatura  $T_{infinito}$ , salvo  $Pr_s$  que se evalúa a la temperatura de superficie.

Tabla 3. Coeficiente C y exponente m de la función CFFE18.

CONFIGURACIÓN	Re_max	C	m
En línea	10 – 100	0.8	0.40
Cruzada	10 – 100	0.9	0.40
En línea/Cruzada	100 – 1E3	Considerar como tubos aislados	
En línea	1E3 – 2E5	0.27	0.63
Cruzada (St/SI<=2)	1E3 – 2E5	$0.35*(St/SI)^{0.2}$	0.60
Cruzada (St/SI>2)	1E3 – 2E5	0.40	0.60
En línea	2E5 – 2E6	0.021	0.84
Cruzada (Pr>1)	2E5 – 2E6	0.022	0.84
Cruzada (Pr=0.7)	2E5 – 2E6	0.019	0.84

St: distancia entre tubos en dirección transversal al flujo.

SI: distancia entre tubos en dirección longitudinal al flujo.

## 4.2. Convección forzada flujo interno.

### 4.2.1. Conducto circular.

#### - CFFI1(D,Re,Pr)

Esta función toma como parámetros:

D:diámetro del conducto.

Re:número de Reynolds.

Pr: número de Prandtl.

Devuelve la longitud máxima de entrada térmica.

Condiciones de aplicación:

Laminar, región de entrada térmica.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura de masa Tm.

Las ecuaciones para Nusselt son válidas para tubos lisos. Para tubos rugosos se puede utilizar la analogía de Chilton-Colburn, función CFFI15, conjuntamente con el ábaco de Moody.

#### - CFFI2(Gz)

Esta función toma como parámetro:

Gz: número de Graetz.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Laminar, región de entrada térmica, local,  $T_s$  constante.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura de masa  $T_m$ .

Las ecuaciones para Nusselt son válidas para tubos lisos. Para tubos rugosos se puede utilizar la analogía de Chilton-Colburn, función CFFI15, conjuntamente con el ábaco de Moody.

- **CFFI3(Gz)**

Esta función toma como parámetro:

Gz: número de Graetz.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Laminar, región entrada térmica, local,  $q_s$  constante.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura de masa  $T_m$ .

Las ecuaciones para Nusselt son válidas para tubos lisos. Para tubos rugosos se puede utilizar la analogía de Chilton-Colburn, función CFFI15, conjuntamente con el ábaco de Moody.

- **CFFI4(Gz)**

Esta función toma como parámetro:

Gz: número de Graetz.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Laminar, región entrada térmica, medio,  $T_s$  constante.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura de masa  $T_m$ .

Las ecuaciones para Nusselt son válidas para tubos lisos. Para tubos rugosos se puede utilizar la analogía de Chilton-Colburn, función CFFI15, conjuntamente con el ábaco de Moody.

- **CFFI5(G,Pr,C)**

Esta función toma como parámetros:

Gz: número de Graetz.

Pr: número de Prandtl.

C:  $C = \mu / \mu_s$  (viscosidad a  $T_m$  / viscosidad a  $T_s$ (temperatura de superficie)).

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Laminar, región entrada térmica, medio,  $T_s$  constante,  $0.48 < Pr < 16700$ ,  $Gz^{(1/3)} * C^{0.14} \geq 2$ ,  $0.0044 < C < 9.75$ .

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura de masa  $T_m$ , salvo  $\mu_s$  que se calcula a la temperatura de superficie  $T_s$ .

Las ecuaciones para Nusselt son válidas para tubos lisos. Para tubos rugosos se puede utilizar la analogía de Chilton-Colburn, función CFFI15, conjuntamente con el ábaco de Moody.

- **CFFE6(Re,Pr)**

Esta función toma como parámetros:

Re: número de Reynold.

Pr: número de Prandtl.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Laminar, medio,  $q_s$  constante.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media de película.

- **CFFI7(Re)**

Esta función toma como parámetro:

Re: número de Reynolds.

Devuelve el factor de fricción.

Condiciones de aplicación:

Laminar, completamente desarrollado.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura de masa  $T_m$ .

Las ecuaciones para Nusselt son válidas para tubos lisos. Para tubos rugosos se puede utilizar la analogía de Chilton-Colburn, función CFFI15, conjuntamente con el ábaco de Moody.

- Las correlaciones para conducto circular, Laminar, completamente desarrollado,  $q_s$  constante y Laminar, completamente desarrollado,  $T_s$  constante están incluidas en la funciones CFFI19qs y CFFI19Ts respectivamente.

- **CFFI10(Re)**

Esta función toma como parámetro:

Re: número de Reynolds.

Devuelve el factor de fricción.

Condiciones de aplicación:

Turbulento, completamente desarrollado,  $Re < 10000$ .

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura de masa  $T_m$ .  
Las ecuaciones para Nusselt son válidas para tubos lisos. Para tubos rugosos se puede utilizar la analogía de Chilton-Colburn, función CFFI15, conjuntamente con el ábaco de Moody.

- **CFFI11(Re)**

Esta función toma como parámetro  
Re: número de Reynolds.

Devuelve el factor de fricción.

Condiciones de aplicación:

Turbulento, completamente desarrollado,  $1E4 < Re < 1E5$ .

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura de masa  $T_m$ .  
Las ecuaciones para Nusselt son válidas para tubos lisos. Para tubos rugosos se puede utilizar la analogía de Chilton-Colburn, función CFFI15, conjuntamente con el ábaco de Moody.

- **CFFI12(Re,Pr,B,Ts,Tm,estado)**

Esta función toma como parámetros:

Re: número de Reynolds.

Pr: número de Prandtl.

B:  $B=L/D$  (longitud del conducto dividido por su diámetro).

Ts: temperatura superficial.

Tm: temperatura de masa.

estado: debe ser 0 para líquidos y 1 para gases.

Devuelve el número de Nusselt, puede utilizarse para  $Nu$  local o  $Nu$  medio.

Condiciones de aplicación:

Turbulento, completamente desarrollado,  $B=L/D \geq 60$ ,  $Re > 10000$ ,  $0,6 \leq Pr \leq 100$ ,  $T_s - T_m < 5C$  (líquidos),  $T_s - T_m < 50C$  (gases).

Si el conducto no es circular puede utilizarse usando como diámetro equivalente,  $De = 4 \cdot A/P$ , siendo A el área de la sección y P el perímetro.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura de masa  $T_m$ .  
Las ecuaciones para Nusselt son válidas para tubos lisos. Para tubos rugosos se puede utilizar la analogía de Chilton-Colburn, función CFFI15, conjuntamente con el ábaco de Moody.

- **CFFI13(Re,Pr,A,B)**

Esta función toma como parámetros:

Re: número de Reynolds.

Pr: número de Prandtl.

A:  $A = \mu / \mu_s$  (viscosidad a  $T_m$  / viscosidad a  $T_s$  (temperatura de superficie)).

B:  $B = L/D$ , longitud del conducto dividido entre su diámetro.

Devuelve el número de Nusselt, puede utilizarse para  $Nu$  local y para  $Nu$  medio.

Condiciones de aplicación:

Turbulento, completamente desarrollado,  $Re > 10000$ ,  $B = L/D \geq 60$ ,  $0,6 \leq Pr \leq 16700$ .

Si el conducto no es circular puede utilizarse usando como diámetro equivalente,  $De = 4 * A/P$ , siendo A el área de la sección y P el perímetro.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura de masa  $T_m$ .

Las ecuaciones para Nusselt son válidas para tubos lisos. Para tubos rugosos se puede utilizar la analogía de Chilton-Colburn, función CFFI15, conjuntamente con el ábaco de Moody.

#### - **CFFI14(Re,Pr,B)**

Esta función toma como parámetros:

Re: número de Reynolds.

Pr: número de Prandtl.

B:  $B = L/D$ , longitud del conducto dividido entre su diámetro.

Devuelve el número de Nusselt, puede utilizarse para  $Nu$  local y para  $Nu$  medio.

Condiciones de aplicación:

Turbulento, completamente desarrollado,  $Re > 10000$ ,  $B = L/D \geq 60$ ,  $0,6 \leq Pr \leq 160$ .

Si el conducto no es circular puede utilizarse usando como diámetro equivalente,  $De = 4 * A/P$ , siendo A el área de la sección y P el perímetro.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura de masa  $T_m$ .

Las ecuaciones para Nusselt son válidas para tubos lisos. Para tubos rugosos se puede utilizar la analogía de Chilton-Colburn, función CFFI15, conjuntamente con el ábaco de Moody.

#### - **CFFI15(St,Pr,B)**

Esta función toma como parámetros:

St: número de Stanton.

Pr: número de Prandtl.

B:  $B = L/D$ , longitud del conducto dividido entre su diámetro.

Devuelve el factor de fricción.

Condiciones de aplicación:

Turbulento, completamente desarrollado,  $B = L/D \geq 60$ .

Si el conducto no es circular puede utilizarse usando como diámetro equivalente,  $De = 4 * A/P$ , siendo A el área de la sección y P el perímetro.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura de masa  $T_m$ .

Las ecuaciones para Nusselt son válidas para tubos lisos. Para tubos rugosos se puede utilizar la analogía de Chilton-Colburn, función CFFI15, conjuntamente con el ábaco de Moody.

- **CFFI16(Re,Pr,A,B)**

Esta función toma como parámetro:

Re: número de Reynolds.

Pr: número de Prandtl.

A:  $A = \mu / \mu_s$  (viscosidad a  $T_m$  / viscosidad a  $T_s$  (temperatura de superficie)).

B:  $B = L/D$ , longitud del conducto dividido entre su diámetro.

Devuelve el número de Nusselt medio.

Condiciones de aplicación:

Turbulento, completamente desarrollado,  $Re > 4000$ ,  $B = L/D \geq 60$ ,  $0,46 < Pr < 592$ .

Si el conducto no es circular puede utilizarse usando como diámetro equivalente,  $De = 4 * A/P$ , siendo A el área de la sección y P el perímetro.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura de masa  $T_m$ .

Las ecuaciones para Nusselt son válidas para tubos lisos. Para tubos rugosos se puede utilizar la analogía de Chilton-Colburn, función CFFI15, conjuntamente con el ábaco de Moody.

- **CFFI17(Re,Pr,B)**

Esta función toma como parámetros:

Re: número de Reynolds.

Pr: número de Prandtl.

B:  $B = L/D$ , longitud del conducto dividido entre su diámetro.

Devuelve el número de Nusselt medio.

Condiciones de aplicación:

Turbulento, región entrada térmica,  $Re > 10000$ ,  $10 < B = L/D < 400$ .

Si el conducto no es circular puede utilizarse usando como diámetro equivalente,  $De = 4 * A/P$ , siendo A el área de la sección y P el perímetro.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura de masa  $T_m$ .

Las ecuaciones para Nusselt son válidas para tubos lisos. Para tubos rugosos se puede utilizar la analogía de Chilton-Colburn, función CFFI15, conjuntamente con el ábaco de Moody.

- **CFFI18(NuD\_infinity,B)**

Esta función toma como parámetros:

NuD\_infinity: número de Nusselt calculado con las funciones desde cffi12 a cffe16.

B:  $B = L/D$ , longitud del conducto dividida por su diámetro.

Devuelve el número de Nusselt medio.

Condiciones de aplicación:

Turbulento, región entrada térmica,  $2 < B=L/D < 60$ .

Si el conducto no es circular puede utilizarse usando como diámetro equivalente,  $De=4 \cdot A/P$ , siendo A el área de la sección y P el perímetro.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura de masa  $T_m$ .

Las ecuaciones para Nusselt son válidas para tubos lisos. Para tubos rugosos se puede utilizar la analogía de Chilton-Colburn, función CFFI15, conjuntamente con el ábaco de Moody.

#### 4.2.2. Conducto no circular

##### - CFFI19qs(forma,relacion)

Esta función toma como parámetros:

forma: toma el valor 0 si es circular, 1 si es rectangular, 2 si es triangular equilátera.

relacion: el cociente entre la mayor y la menor longitud del conducto rectangular, este parámetro debe ser mayor o igual a uno si es rectangular y debe ser cero si no lo es.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Laminar, completamente desarrollado, qs constante.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura de masa  $T_m$ .

Las ecuaciones para Nusselt son válidas para tubos lisos. Para tubos rugosos se puede utilizar la analogía de Chilton-Colburn, función CFFI15, conjuntamente con el ábaco de Moody.

##### - CFFI19Ts(forma,relacion)

Esta función toma como parámetros:

forma: toma el valor 0 si es circular, 1 si es rectangular, 2 si es triangular equilátera.

relacion: el cociente entre la mayor y la menor longitud del conducto rectangular, este parámetro debe ser mayor o igual a uno si es rectangular y debe ser cero si no lo es.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Laminar, completamente desarrollado, Ts constante.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura de masa  $T_m$ .

Las ecuaciones para Nusselt son válidas para tubos lisos. Para tubos rugosos se puede utilizar la analogía de Chilton-Colburn, función CFFI15, conjuntamente con el ábaco de Moody.

### 4.3. *Convección libre flujo externo.*

#### 4.3.1. Placa plana vertical.

##### - **CLFE1(Ra)**

Esta función toma como parámetro:  
Ra: número de Rayleigh.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:  
Medio, Ts constante,  $1E4 \leq Ra \leq 1E13$ .  
También puede usarse para cilindro vertical si  $(L/D) * Gr^{(-1/4)} \leq 0.025$ .

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura  $Tr = (Ts + T_{\infty})/2$ .  
El coeficiente de dilatación volumétrica, beta, se evalúa a  $T_{\infty}$ .

##### - **CLFE2(Ra,Pr)**

Esta función toma como parámetros:  
Ra: número de Rayleigh.  
Pr: número de Prandtl.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:  
Laminar, medio, Ts constante,  $0,1 < Ra < 1E9$ .  
También puede usarse para cilindro vertical si  $(L/D) * Gr^{(-1/4)} \leq 0.025$ .

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura  $Tr = (Ts + T_{\infty})/2$ .  
El coeficiente de dilatación volumétrica, beta, se evalúa a  $T_{\infty}$ .

##### - **CLFE3(Ra,Pr)**

Esta función toma como parámetros:  
Ra: número de Rayleigh.  
Pr: número de Prandtl.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:  
Medio, Ts constante,  $0,1 < Ra < 1E12$ .  
También puede usarse para cilindro vertical si  $(L/D) * Gr^{(-1/4)} \leq 0.025$ .

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura  $Tr = (Ts + T_{\infty})/2$ .  
El coeficiente de dilatación volumétrica, beta, se evalúa a  $T_{\infty}$ .

- **CLFE4(GrNu,Pr,tipo)**

Esta función toma como parámetros:

$GrNu = g \cdot \beta \cdot q_s \cdot L^4 / k \cdot \nu^2$  .

Pr: número de Prandtl.

tipo: variable que vale 0 si es local y 1 si es medio.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Local, medio,  $q_s$  constante.

También puede usarse para cilindro vertical.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura  $T_r = (T_s + T_{\infty})/2$ .

El coeficiente de dilatación volumétrica,  $\beta$ , se evalúa a  $T_{\infty}$ .

**4.3.2. Placa plana horizontal**

- **CLFE5(Ra,orientacion)**

Esta función toma como parámetros:

Ra: número de Rayleigh.

orientacion: 0 si es superficie superior caliente o inferior fría, 1 si es superficie inferior caliente o superior fría.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Medio,  $T_s$  constante

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura  $T_r = (T_s + T_{\infty})/2$ .

El coeficiente de dilatación volumétrica,  $\beta$ , se evalúa a  $T_{\infty}$ .

La longitud característica se toma  $L = A/P$  , siendo A el área de la sección y P el perímetro.

- **CLFE6(Ra,orientacion)**

Esta función toma como parámetros:

Ra: número de Rayleigh.

orientacion: 0 si es superficie superior caliente o inferior fría, 1 si es superficie inferior caliente o superior fría.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Medio,  $q_s$  constante.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura  $T_r = T_s - 0.25 \cdot (T_s - T_{\infty})$ .

El coeficiente de dilatación volumétrica, beta, se evalúa a  $T_{\infty}$ .  
La longitud característica se toma  $L=A/P$ , siendo A el área de la sección y P el perímetro.

### 4.3.3. Placa plana inclinada.

#### - CLFE7(Ra,theta)

Esta función toma como parámetros:

Ra: número de Rayleigh.

theta: ángulo de la placa con la vertical ( en grados ).

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Medio, Ts constante.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura  $T_r=(T_s+T_{\infty})/2$ .

El coeficiente de dilatación volumétrica, beta, se evalúa a  $T_{\infty}$ .

**Importante:** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**.

#### - CLFE8(Ra,theta)

Esta función toma como parámetros:

Ra: número de Rayleigh.

theta: ángulo de la placa con la vertical ( en grados ).

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Medio,  $q_s$  constante, superficie superior caliente,  $\theta < 88$ ,  $1E5 < Ra < 1E11$ .

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura  $T_r=T_s-0.25*(T_s-T_{\infty})$ .

El coeficiente de dilatación volumétrica, beta, se evalúa a  $T_{\infty}+0.25*(T_s-T_{\infty})$ .

**Importante:** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**.

#### - CLFE9(Ra,theta,Pr)

Esta función toma como parámetros:

Ra: número de Rayleigh.

theta: ángulo de la placa con la vertical ( en grados ).

Pr: número de Prandtl.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Medio,  $q_s$  constante, superficie superior caliente,  $\theta < 88$ ,  $1E5 < Ra < 1E11$ ,  $Gr < Gr_c$ .

theta	15	30	60	75
Gr_c	5E9	1E9	1E8	1E6

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura  $T_r = T_s - 0.25 \cdot (T_s - T_{\infty})$ .

El coeficiente de dilatación volumétrica,  $\beta$ , se evalúa a  $T_{\infty} + 0.25 \cdot (T_s - T_{\infty})$ .

**Importante:** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**.

#### - CLFE10(Ra,theta,Pr)

Esta función toma como parámetros:

Ra: número de Rayleigh.

theta: ángulo de la placa con la vertical ( en grados ).

Pr: número de Prandtl.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Medio,  $q_s$  constante, superficie superior caliente,  $15 \leq \theta \leq 75$ ,  $Ra < 1E11$ ,  $Gr > Gr_c$ .

theta	15	30	60	75
Gr_c	5E9	1E9	1E8	1E6

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura  $T_r = T_s - 0.25 \cdot (T_s - T_{\infty})$ .

El coeficiente de dilatación volumétrica,  $\beta$ , se evalúa a  $T_{\infty} + 0.25 \cdot (T_s - T_{\infty})$ .

**Importante:** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**.

#### 4.3.4. Cilindro vertical.

Utilizar las mismas funciones que para la placa plana vertical.

#### 4.3.5. Cilindro horizontal.

##### - CLFE14(Ra)

Esta función toma como parámetro:

Ra: número de Rayleigh.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Medio,  $T_s$  constante.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura  $T_r=(T_s+T_{\infty})/2$ .  
El coeficiente de dilatación volumétrica, beta, se evalúa a  $T_{\infty}$ .

- **CLFE15(Ra,Pr)**

Esta función toma como parámetros:  
Ra número de Rayleigh.  
Pr número de Prandtl.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:  
Laminar, medio,  $T_s$  constante,  $1E-4 \leq Ra \leq 1E9$ .

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura  $T_r=(T_s+T_{\infty})/2$ .  
El coeficiente de dilatación volumétrica, beta, se evalúa a  $T_{\infty}$ .

- **CLFE16(Ra,Pr)**

Esta función toma como parámetros:  
Ra número de Rayleigh.  
Pr número de Prandtl.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:  
Medio,  $T_s$  constante,  $1E-5 < Ra < 1E12$ .

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura  $T_r=(T_s+T_{\infty})/2$ .  
El coeficiente de dilatación volumétrica, beta, se evalúa a  $T_{\infty}$ .

**4.3.6. Esfera.**

- **CLFE17(Ra,Pr)**

Esta función toma como parámetros:  
Ra número de Rayleigh.  
Pr número de Prandtl.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:  
Medio,  $T_s$  constante,  $1 < Ra < 1E5$ , Pr próximo a 1.

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura  $T_r=(T_s+T_{\infty})/2$ .  
El coeficiente de dilatación volumétrica, beta, se evalúa a  $T_{\infty}$ .

- **CLFE18(Ra)**

Esta función toma como parámetros:  
Ra número de Rayleigh.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:  
Medio, Ts constante,  $3E5 < Ra < 8E8$ ,  $10 \leq Nu \leq 90$ .

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura  $T_r = (T_s + T_{\infty})/2$ .  
El coeficiente de dilatación volumétrica, beta, se evalúa a  $T_{\infty}$ .

- **CLFE19(Ra,Pr)**

Esta función toma como parámetros:  
Ra número de Rayleigh.  
Pr número de Prandtl.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:  
Medio, Ts constante,  $Ra \leq 1E11$ ,  $Pr \geq 0.7$ .

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura  $T_r = (T_s + T_{\infty})/2$ .  
El coeficiente de dilatación volumétrica, beta, se evalúa a  $T_{\infty}$ .

#### **4.4. Convección libre flujo interno.**

##### **4.4.1. Recinto rectangular.**

- **CLFI1(Ra,Pr)**

Esta función toma como parámetros:  
Ra número de Rayleigh.  
Pr número de Prandtl.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:  
Medio, Ts constante,  $3E5 < Ra \leq 7E9$ ,  $\theta = 0$ .

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media  $(T_1 + T_2)/2$  de las superficies.

En recintos rectangulares con  $\theta = 0$ , como es este caso, corresponde al recinto horizontal con la superficie superior fría.

- **CLFI2(Ra,C)**

Esta función toma como parámetros:

Ra: número de Rayleigh.

C:  $C=H/L$ , dimensión mayor / dimensión menor ( de la sección del recinto).

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Medio,  $T_s$  constante,  $1E2 \leq Ra \leq 2E7$ ,  $\theta = 90$ ,  $5 \leq C \leq 110$ .

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media  $(T_1+T_2)/2$  de las superficies.

- **CLFI3(Ra,C,theta)**

Esta función toma como parámetros:

Ra: número de Rayleigh.

C:  $C=H/L$ , dimensión mayor / dimensión menor ( de la sección del recinto).

theta: ángulo que forma el recinto con la horizontal ( en grados ).

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Medio,  $T_s$  constante,  $100 \leq Ra \leq 2E7$ ,  $90 < \theta \leq 180$ ,  $5 \leq C \leq 110$ .

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media  $(T_1+T_2)/2$  de las superficies.

En recintos rectangulares con  $\theta = 180$ , como puede darse en este caso, corresponde al recinto horizontal con la superficie superior fría.

**Importante:** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**.

- **CLFI4(Ra,C,theta,theta\_crit)**

Esta función toma como parámetros:

Ra: número de Rayleigh.

C:  $C=H/L$ , dimensión mayor / dimensión menor ( de la sección del recinto).

theta: ángulo que forma el recinto con la horizontal ( en grados ).

theta\_crit: máximo ángulo.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Medio,  $T_s$  constante,  $100 \leq Ra \leq 2E7$ ,  $\theta_{crit} < \theta < 90$ ,  $5 \leq C \leq 110$

$C=H/L$       1      3      6      12      >12

theta\_crit    25      53      60      67      70

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media  $(T1+T2)/2$  de las superficies.

**Importante:** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**.

- **CLFI5(Ra;C;theta;theta\_crit,Pr)**

Esta función toma como parámetros:

Ra: número de Rayleigh.

C:  $C=H/L$ , dimensión mayor / dimensión menor ( de la sección del recinto).

theta: ángulo que forma el recinto con la horizontal, thetacrit: máximo ángulo.

theta\_crit: máximo ángulo.

Pr: número de Prandtl.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Medio, Ts constante,  $3E5 < Ra \leq 2E7$ ,  $0 < \theta < \theta_{crit}$ ,  $C \leq 10$

C=H/L	1	3	6	12	>12
-------	---	---	---	----	-----

theta_crit	25	53	60	67	70
------------	----	----	----	----	----

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media  $(T1+T2)/2$  de las superficies.

**Importante:** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**.

- **CLFI6(Ra,C,theta,theta\_crit)**

Esta función toma como parámetros:

Ra: número de Rayleigh.

C:  $C=H/L$ , dimensión mayor / dimensión menor ( de la sección del recinto).

theta: ángulo que forma el recinto con la horizontal.

theta\_crit: máximo ángulo.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Medio, Ts constante,  $0 < \theta < \theta_{crit}$ ,  $C > 10$

C=H/L	1	3	6	12	>12
-------	---	---	---	----	-----

theta_crit	25	53	60	67	70
------------	----	----	----	----	----

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media  $(T1+T2)/2$  de las superficies.

**Importante:** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**.

#### 4.4.2. *Recinto cilíndrico, horizontal o vertical.*

##### - **CLFI7(Ra,B)**

Esta función toma como parámetros:

Ra número de Rayleigh.

$B=L/D$  , cociente entre la longitud del conducto y su diámetro.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Medio, Ts constante,  $0,75 \leq B \leq 2$

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media  $(T1+T2)/2$  de las superficies.

#### 4.4.3. *Recinto esférico.*

##### - **CLFI8(Ra)**

Esta función toma como parámetro:

Ra: número de Rayleigh.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Medio, Ts constante,  $1E4 < Ra < 1E9$

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media  $(T1+T2)/2$  de las superficies.

##### - **CLFI9(Ra)**

Esta función toma como parámetro:

Ra: número de Rayleigh.

Devuelve el número de Nusselt.

Condiciones de aplicación:

Medio, Ts constante,  $1E9 \leq Ra < 1E12$ .

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media  $(T1+T2)/2$  de las superficies.

#### 4.4.4. *Recinto cilíndrico concéntrico.*

- **CLFI10(Ra\_l,De,Di,Te,Ti,k,Pr,L)**

Esta función toma como parámetros:

Ra\_l: número de Rayleigh siendo el parámetro de longitud  $(De-Di)/2$ .

De: diámetro exterior.

Di: diámetro interior.

Te: temperatura exterior.

Ti: temperatura interior.

k: conductividad térmica.

Pr: número de Prandtl.

L: longitud del cilindro.

Devuelve Q, el calor transferido en W, utilizando k en W/mC.

Condiciones de aplicación:

Medio, Ts constante,  $1E2 \leq Ra^* \leq 1E7$

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media  $(T1+T2)/2$  de las superficies.

#### 4.4.5. *Recinto esférico concéntrico.*

- **CLFI11(Ra\_l,De,Di,Te,Ti,k,Pr)**

Esta función toma como parámetros:

Ral: número de Rayleigh siendo el parámetro de longitud  $(De-Di)/2$ .

De: diámetro exterior.

Di: diámetro interior.

Te: temperatura exterior .

Ti: temperatura interior.

k: conductividad térmica.

Pr: número de Prandtl.

Devuelve Q, el calor transferido en W, utilizando k en W/mC.

Condiciones de aplicación:

Medio, Ts constante,  $1E2 \leq Ra^* \leq 1E4$ .

Las propiedades físicas del fluido se evalúan a la temperatura media  $(T1+T2)/2$  de las superficies.

## 4.5. Condensación.

### 4.5.1. Placa vertical e inclinada: Flujo externo.

- **CCONDENFE1(rho\_liq,rho\_vap,h\_gl,k\_l,mu\_liq,Tsat,Ts,Tv,Cpl,Cpv,x,Re,theta)**

Esta función toma como parámetros:

rho\_liq: densidad del líquido.

rho\_vap: densidad del vapor.

h\_gl: calor latente de cambio de fase.

k\_l: conductividad térmica del líquido.

mu\_liq: viscosidad del líquido.

Tsat: Temperatura de saturación.

Ts: Temperatura de la superficie.

Tv: Temperatura del vapor.

Cpl: calor específico del líquido.

Cpv: Calor específico del vapor.

x: posición local.

Re: número de Reynolds.

theta: ángulo que forma la placa con la vertical (theta=0 indica que la placa está en posición vertical).

Devuelve el valor del coeficiente de película local en la posición x.

Condiciones de aplicación:

Laminar, local, Ts constante,  $Re < 1800$  ( $Re = 4M/\mu_{liq}$ )

El número de Reynolds se define en función del caudal másico de condensado M en la parte inferior de la superficie de condensación por unidad de perímetro mojado.

Las propiedades físicas se evalúan a la temperatura media de película  $(T_{sat} + T_s)/2$  y las de fase vapor a  $T_{sat}$ . Si el vapor se encuentra recalentado se sustituye  $T_{sat}$  en la definición de temperatura media de película por la temperatura  $T_v$  del vapor.

El calor latente de cambio de fase se calcula a  $T_{sat}$  correspondiente a la presión de vapor.

***Importante:*** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**.

- **CCONDENFE2(rho\_liq,rho\_vap,k\_l,mu\_liq,Re,Pr,theta)**

Esta función toma como parámetros:

rho\_liq: densidad del líquido.

rho\_vap: densidad del vapor.

k\_l: conductividad térmica del líquido.

mu\_liq: viscosidad del líquido.

Re: número de Reynolds.

Pr: número de Prandtl.

theta: ángulo que forma la placa con la vertical (theta=0 indica que la placa está en posición vertical).

Devuelve el valor del coeficiente de película medio en régimen laminar.

Condiciones de aplicación:

Laminar, medio, Ts constante,  $Re < 1800$  ( $Re = 4M/\mu_{liq}$ ),  $Pr \geq 0.01$

El número de Reynolds se define en función del caudal másico de condensado M en la parte inferior de la superficie de condensación por unidad de perímetro mojado.

Las propiedades físicas se evalúan a la temperatura media de película  $(T_{sat} + T_s)/2$  y las de fase vapor a  $T_{sat}$ . Si el vapor se encuentra recalentado se sustituye  $T_{sat}$  en la definición de temperatura media de película por la temperatura  $T_v$  del vapor.

***Importante:*** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**.

- **CCONDENFE3(rho\_liq,rho\_vap,k\_l,mu\_liq,Re,theta)**

Esta función toma como parámetros:

rho\_liq: densidad del líquido.

rho\_vap: densidad del vapor.

k\_l: conductividad térmica del líquido.

mu\_liq: viscosidad del líquido.

Re: número de Reynolds.

theta: ángulo que forma la placa con la vertical (theta=0 indica que la placa está en posición vertical).

Devuelve el valor del coeficiente de película medio en régimen turbulento.

Condiciones de aplicación:

Laminar, medio, Ts constante,  $Re > 1800$  ( $Re = 4M/\mu_{liq}$ ).

El número de Reynolds se define en función del caudal másico de condensado M en la parte inferior de la superficie de condensación por unidad de perímetro mojado.

Las propiedades físicas se evalúan a la temperatura media de película  $(T_{sat} + T_s)/2$  y las de fase vapor a  $T_{sat}$ . Si el vapor se encuentra recalentado se sustituye  $T_{sat}$  en la definición de temperatura media de película por la temperatura  $T_v$  del vapor.

***Importante:*** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**.

#### 4.5.2. Cilindro vertical e inclinado: Flujo externo.

- **CCONDENFE4(rho\_liq,rho\_vap,h\_gl,k\_l,mu\_liq,Tsat,Ts,Tv,Cpl,Cpv,x,Re)**

Esta función toma como parámetros:

rho\_liq: densidad del líquido.  
rho\_vap: densidad del vapor.  
h\_gl: calor latente de cambio de fase.  
k\_l: conductividad térmica del líquido.  
mu\_liq: viscosidad del líquido  
Tsat: Temperatura de saturación.  
Ts: Temperatura de la superficie.  
Tv: Temperatura del vapor.  
Cpl: calor específico del líquido.  
Cpv: Calor específico del vapor.  
x: posición local.  
Re: número de Reynolds.

Devuelve el valor del coeficiente de película local en la posición x.

Condiciones de aplicación:

Laminar, local, Ts constante,  $Re < 1800$  ( $Re = 4M/\mu_{liq}$ ),  $D \gg \delta$

El número de Reynolds se define en función del caudal másico de condensado M en la parte inferior de la superficie de condensación por unidad de perímetro mojado.

Las propiedades físicas se evalúan a la temperatura media de película  $(T_{sat} + T_s)/2$  y las de fase vapor a  $T_{sat}$ . Si el vapor se encuentra recalentado se sustituye  $T_{sat}$  en la definición de temperatura media de película por la temperatura  $T_v$  del vapor.

El calor latente de cambio de fase se calcula a  $T_{sat}$  correspondiente a la presión de vapor.

**Importante:** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**.

- **CCONDENFE5(rho\_liq,rho\_vap,k\_l,mu\_liq,Re)**

Esta función toma como parámetros:

rho\_liq: densidad del líquido.  
rho\_vap: densidad del vapor.  
k\_l: conductividad térmica del líquido.  
mu\_liq: viscosidad del líquido.  
Re: número de Reynolds.

Devuelve el valor del coeficiente de película medio en régimen laminar.

Condiciones de aplicación:

Laminar, medio, Ts constante,  $Re < 1800$  ( $Re = 4M/\mu_{liq}$ ),  $D \gg \delta$ .

El número de Reynolds se define en función del caudal másico de condensado M en la parte inferior de la superficie de condensación por unidad de perímetro mojado.

Las propiedades físicas se evalúan a la temperatura media de película  $(T_{sat}+T_s)/2$  y las de fase vapor a  $T_{sat}$ . Si el vapor se encuentra recalentado se sustituye  $T_{sat}$  en la definición de temperatura media de película por la temperatura  $T_v$  del vapor.

**Importante:** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**.

- **CCONDENFE6(rho\_liq,rho\_vap,k\_l,mu\_liq,Re)**

Esta función toma como parámetros:

rho\_liq: densidad del líquido.

rho\_vap: densidad del vapor.

k\_l: conductividad térmica del líquido.

mu\_liq: viscosidad del líquido.

Re: número de Reynolds.

Devuelve el valor del coeficiente de película medio en régimen turbulento.

Condiciones de aplicación:

Laminar, medio,  $T_s$  constante,  $Re > 1800$  ( $Re = 4M/\mu_{liq}$ ),  $D \gg \delta$ .

El número de Reynolds se define en función del caudal másico de condensado  $M$  en la parte inferior de la superficie de condensación por unidad de perímetro mojado.

Las propiedades físicas se evalúan a la temperatura media de película  $(T_{sat}+T_s)/2$  y las de fase vapor a  $T_{sat}$ . Si el vapor se encuentra recalentado se sustituye  $T_{sat}$  en la definición de temperatura media de película por la temperatura  $T_v$  del vapor.

**Importante:** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**.

#### 4.5.3. Cilindro horizontal: Flujo externo.

- **CCONDENFE7(rho\_liq,rho\_vap,h\_gl,k\_l,mu\_liq,Tsat,Ts,Tv,Cpl,Cpv,N,D,Re)**

Esta función toma como parámetros:

rho\_liq: densidad del líquido.

rho\_vap: densidad del vapor.

h\_gl: calor latente de cambio de fase.

k\_l: conductividad térmica del líquido.

mu\_liq: viscosidad del líquido.

Tsat: Temperatura de saturación.

Ts: Temperatura de la superficie.

Tv: Temperatura del vapor.

Cpl: calor específico del líquido.

Cpv: Calor específico del vapor.

N: números de tubos en vertical en banco de tubos horizontal.

D: diámetro del cilindro.

Re: número de Reynolds.

Devuelve el valor del coeficiente de película medio en régimen laminar.

Condiciones de aplicación:

Laminar, medio,  $T_s$  constante,  $Re < 3600$  ( $Re = 4M/\mu_{liq}$ ).

El número de Reynolds se define en función del caudal másico de condensado  $M$  en la parte inferior de la superficie de condensación por unidad de perímetro mojado.

Las propiedades físicas se evalúan a la temperatura media de película  $(T_{sat} + T_s)/2$  y las de fase vapor a  $T_{sat}$ . Si el vapor se encuentra recalentado se sustituye  $T_{sat}$  en la definición de temperatura media de película por la temperatura  $T_v$  del vapor.

El calor latente de cambio de fase se calcula a  $T_{sat}$  correspondiente a la presión de vapor.

#### 4.5.4. *Cilindro horizontal: Flujo interno.*

- **CCONDENFI8(rho\_liq,rho\_vap,h\_gl,k\_l,mu\_liq,Tsat,Ts,Tv,Cpl,Cpv,D,Re\_v,theta)**

Esta función toma como parámetros:

rho\_liq: densidad del líquido.

rho\_vap: densidad del vapor.

h\_gl: calor latente de cambio de fase.

k\_l: conductividad térmica del líquido.

mu\_liq: viscosidad del líquido

Tsat: Temperatura de saturación.

Ts: Temperatura de la superficie.

Tv: Temperatura del vapor.

Cpl: calor específico del líquido.

Cpv: Calor específico del vapor.

D: diámetro del cilindro.

Re\_vap: número de Reynolds ( $Re_{vap} = (\rho_{liq} \cdot u_{vap} \cdot D) / \mu_{vap}$ ).

Devuelve el valor del coeficiente de película medio.

Condiciones de aplicación:

Medio,  $T_s$  constante,  $Re_{vap} < 35000$ .

Las propiedades físicas se evalúan a la temperatura media de película  $(T_{sat} + T_s)/2$  y las de fase vapor a  $T_{sat}$ . Si el vapor se encuentra recalentado se sustituye  $T_{sat}$  en la definición de temperatura media de película por la temperatura  $T_v$  del vapor. El  $Re_{vap}$  se evalúa a las condiciones del vapor en la sección de entrada.

El calor latente de cambio de fase se calcula a  $T_{sat}$  correspondiente a la presión de vapor.

- **CCONDENFI9(Re\_liq,Re\_vap,rho\_liq,rho\_vap,Pr\_liq)**

Esta función toma como parámetros:

Re\_liq: número de Reynolds del líquido ( $Re_{liq} = 4 \cdot M_{liq} / (\pi \cdot D \cdot \mu_{liq})$ ).

Re\_vap: número de Reynolds del vapor ( $Re_{vap} = 4 \cdot M_{vap} / (\pi \cdot D \cdot \mu_{vap})$ ).

rho\_liq: densidad del líquido.

rho\_vap: densidad del vapor.  
Pr\_liq: número de Prandlt del líquido.

Devuelve el valor del coeficiente de película medio.

Condiciones de aplicación:  
Medio, Ts constante, Re\_liq > 5000, Re\_vap > 20000.

Las propiedades físicas se evalúan a la temperatura media de película  $(T_{sat} + T_s)/2$  y las de fase vapor a  $T_{sat}$ . Si el vapor se encuentra recalentado se sustituye  $T_{sat}$  en la definición de temperatura media de película por la temperatura  $T_v$  del vapor. El Re\_liq y Re\_vap se evalúan en función del caudal másico de condensado  $M_{liq}$  y  $M_{vap}$  respectivamente.

El calor latente de cambio de fase se calcula a  $T_{sat}$  correspondiente a la presión de vapor.

## 4.6. Ebullición.

### 4.6.1. Ebullición en recipiente: Flujo externo.

- EBULLICION1(mu\_liq, h\_lg, rho\_liq, rho\_vap, sigma, Cpl, C\_s\_f, Pr\_l, n, DELTAT\_e)

Esta función toma como parámetros:

mu\_liq: viscosidad del líquido.

h\_lg: calor latente de cambio de fase.

rho\_liq: densidad del líquido.

rho\_vap: densidad del vapor.

sigma: tensión superficial (ver valores en tabla 2).

Cpl: calor específico del líquido.

C\_s\_f: coeficiente que depende de la combinación superficie-líquido (ver valores en tabla 1).

Pr\_l: número de Prandlt del líquido.

n: exponente que depende de la combinación superficie-líquido (ver valores en tabla 1).

DELAT\_e: exceso de temperatura.

Devuelve el calor transferido por unidad de superficie ( $W/m^2$ , utilizando SI en todos los parámetros).

Condiciones de aplicación:  
Ebullición nucleada,  $T_s$  constante.

Las propiedades físicas de la fase vapor se evalúan a la temperatura media de película  $(T_{sat} - T_s)/2$ . El calor latente  $h_{lg}$  y las propiedades físicas de la fase líquida se calculan a  $T_{sat}$ .

Tabla 1.

Valores de  $C_{s_f}$  y de n para varias combinaciones superficie-fluido:

Combinación líquido – superficie	$C_{s_f}$	n
Agua - cobre:		
Estriada	0.0068	1
Pulida	0.0130	1
Agua - acero inoxidable:		
Grabado químicamente	0.0130	1
Pulido mecánicamente	0.0130	1
Molido y pulido	0.0060	1
Agua - bronce:	0.0060	1
Agua - níquel:	0.0060	1
Agua - platino:	0.0130	1
n – Pentano - cobre:		
Pulida	0.0154	1.7
Sobrepuesta	0.0049	1.7
Benceno - cromo:	0.101	1.7
Alcohol etílico - cromo:	0.0027	1.7

Tabla 2.

Tensión superficial en la superficie de separación líquido-vapor:

Líquido	Temperatura de Saturación C	Tensión Superficial N/m
Agua	0	75.6
Agua	15.56	73.2
Agua	37.78	69.7
Agua	93.34	60.1
Agua	100	58.8
Agua	160	46.1
Agua	226.7	31.9
Agua	293.3	16.2
Agua	360	1.46
Agua	374.11	0
Sodio	881.1	11.2
Potasio	760	62.7
Rubidio	687.8	43.8
Cesio	682.2	29.2
Mercurio	357.2	39.4
Benceno (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	80	27.7
Alcohol etílico (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O)	78.3	21.9
Freón 11	44.4	8.5

- **EBULLICION2(h\_lg,rho\_liq,rho\_vap,sigma)**

Esta función toma como parámetros:

h\_lg: calor latente de cambio de fase.

rho\_liq: densidad del líquido.

rho\_vap: densidad del vapor.

sigma: tensión superficial (ver valores en tabla 2).

Devuelve el flujo de calor crítico (W/m<sup>2</sup>, utilizando SI en todos los parámetros). Esta función se aplica a una superficie de calentamiento experimental de extensión infinita, no hay longitud característica. En la práctica es aplicable si la longitud característica es grande comparada con el parámetro de diámetro medio de burbuja.

Condiciones de aplicación:

Ebullición nucleada, T<sub>s</sub> constante.

Las propiedades físicas de la fase vapor se evalúan a la temperatura media de película (T<sub>sat</sub>-T<sub>s</sub>)/2. El calor latente h<sub>lg</sub> y las propiedades físicas de la fase líquida se calculan a T<sub>sat</sub>.

- **EBULLICION3(h\_lg,rho\_liq,rho\_vap,sigma,L,geometria)**

Esta función toma como parámetros:

h\_lg: calor latente de cambio de fase.

rho\_liq: densidad del líquido.

rho\_vap: densidad del vapor.

sigma: tensión superficial (ver valores en tabla 2).

L: longitud característica, según la geometría representa una dimensión( ver valores en tabla 3).

geometria: parámetro que hace referencia a las diferentes geometrías, toma valores 1, 2, 3 y 4 dependiente de la geometría (ver valores en tabla 3).

Devuelve el flujo de calor crítico ( $W/m^2$ , utilizando SI en todos los parámetros). Se aplica si la razón de la longitud característica de calentamiento al parámetro de diámetro medio de burbuja ( que es el número de Bond) es menor que 3.

Condiciones de aplicación:

Ebullición nucleada,  $T_s$  constante.

Las propiedades físicas de la fase vapor se evalúan a la temperatura media de película  $(T_{sat}-T_s)/2$ . El calor latente h\_lg y las propiedades físicas de la fase líquida se calculan a  $T_{sat}$ .

Tabla 3.

Geometría calentador	Geometría	L
Placa plana infinita (hacia arriba)	1	Anchura
Cilindro horizontal	2	Radio del cilindro
Esfera	3	Radio de la esfera
Cuerpo infinito	4	Volumen/Superficie

- **MODULE**

**EBULLICION4(h\_lg,rho\_liq,rho\_vap,mu\_vap,k\_vap,T\_s,T\_sat,Cpv,epsilon,alpha,D,h)**

Module que toma como parámetros:

h\_lg: entalpía de vaporación.

rho\_liq: densidad del líquido.

rho\_vap: densidad del vapor.

mu\_vap viscosidad del vapor.

k\_vap: conductividad térmica del vapor.

$T_s$ : temperatura de la superficie.

$T_{sat}$ : temperatura de saturación.

Cpv: calor específico del líquido.

epsilon: emisividad del tubo.

alpha: absorptividad del líquido.

D: diámetro del tubo.

Devuelve el valor del coeficiente de película, h.

Las propiedades físicas de la fase vapor se evalúan a la temperatura media de película  $(T_{sat}-T_s)/2$ . El calor latente  $h_{lg}$  y las propiedades físicas de la fase líquida se calculan a  $T_{sat}$ .

#### **4.6.2. Ebullición convección forzada: Flujo interno.**

- EBULLICION6(mu\_liq,h\_lg,rho\_liq,rho\_vap,sigma,Cpl,C\_s\_f,Pr\_l,n,DELTAT\_e)

Esta función toma como parámetros:

mu\_liq: viscosidad del líquido.

h\_lg: calor latente de cambio de fase.

rho\_liq: densidad del líquido.

rho\_vap: densidad del vapor.

sigma: tensión superficial (ver valores en tabla 2).

Cpl: calor específico del líquido.

C\_s\_f: coeficiente que depende de la combinación superficie-líquido (ver valores en tabla 4).

Pr\_l: número de Prandlt del líquido.

n: exponente que depende de la combinación superficie-líquido (n=1 para el agua, n=1.7 para otros líquidos).

DELTAT\_e: exceso de temperatura.

Devuelve el calor transferido por unidad de superficie ( $W/m^2$ , utilizando SI en todos los parámetros).

Condiciones de aplicación:

Región ebullición subenfriada,  $T_s$  constante.

Las propiedades físicas de la fase vapor se evalúan a la temperatura media de película  $(T_{sat}-T_s)/2$ . El calor latente  $h_{lg}$  y las propiedades físicas de la fase líquida se calculan a  $T_{sat}$ .

Tabla 4.

Geometría	Combinación líquido-superficie	C_s_f
Tubo horizontal (14.9 mm DI)	Agua – Acero inoxidable	0.015
Tubo horizontal (2.39 mm DI)	Agua – Acero inoxidable	0.020
Tubo vertical (4.56 mm DI)	Agua – Níquel	0.006
Tubo vertical (27.1 mm DI)	Agua – Cobre	0.013
	Tetracloruro carbono – cobre	0.013
	Alcohol isopropílico – cobre	0.0022
	Alcohol n- butílico- cobre	0.003
	50% K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> - cobre	0.00275
	35% K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> - cobre	0.0054

- **EBULLICION7(D,DELTAT\_e,DELTAP\_sat,G,x,sigma,Cpl,h\_lg,rho\_liq,rho\_vap, mu\_liq,mu\_vap,k\_liq,Pr)**

Esta función toma como parámetros:

D: diámetro del conducto.

DELTAT\_e: exceso de temperatura.

DELTAP\_sat:  $P_{sat}(T_s) - P_{sat}(T_{sat})$ .

G: caudal másico por tubo y por unidad de superficie.

x: calidad del vapor.

sigma: tensión superficial (ver valores en tabla 2).

Cpl: calor específico del líquido.

h\_lg: calor latente de cambio de fase.

rho\_liq: densidad del líquido.

rho\_vap: densidad del vapor.

mu\_liq: viscosidad del líquido.

mu\_vap: viscosidad del vapor.

k\_liq= conductividad térmica del líquido.

Pr: número de Prandtl del líquido.

Devuelve el valor del coeficiente de película (en unidades del sistema internacional si utilizamos todos los datos con el SI ).

Condiciones de aplicación:

Región flujo bifásico, T\_s constante.

Las propiedades físicas de la fase vapor se evalúan a la temperatura media de película  $(T_{\text{sat}}-T_s)/2$ . El calor latente  $h_{\text{lg}}$  y las propiedades físicas de la fase líquida se calculan a  $T_{\text{sat}}$ .

---

## 5. Radiación.

---

### 5.1. Funciones de radiación de un cuerpo negro.

#### - Factor $F_{0\_lambda}(lambdaT)$

Esta función toma como parámetro:

$lambdaT$ : el producto de la longitud de onda ( $lambda$ ) por la temperatura (K).

Devuelve el factor  $F_{0\_lambda}$ .

*Importante:* para que esta función trabaje correctamente debe abrirse el lookup table, **funciones d radiacion d CN.LKT**, que se encuentra en la carpeta **Funcion de rad de CN**, y ésta a su vez dentro de **Userlib**. Esta función toma valores de dicho lookup table.

### 5.2. Factores de forma.

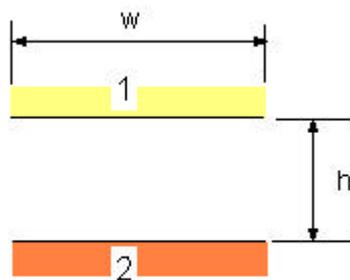
#### FFORMA2D1(h,w)

Devuelve el factor de forma  $F_{12} = F_{21}$  de dos placas infinitas rectangulares paralelas.

Esta función toma como parámetros:

$h$ : distancia entre placas.

$w$ : ancho de las placas.



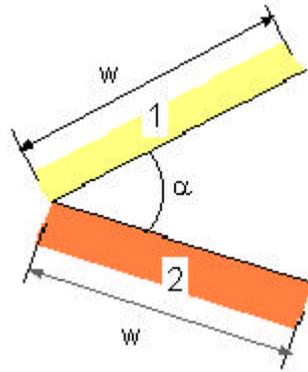
#### - FFORMA2D2(alpha)

Devuelve el factor de forma  $F_{12} = F_{21}$  de dos placas infinitas que forman un ángulo  $alpha$ .

Esta función toma como parámetro:

$alpha$ : ángulo que forman las placas.

**Importante:** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**.



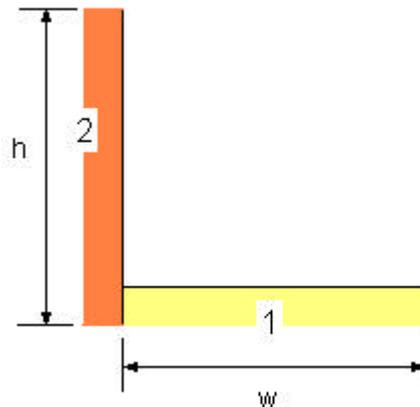
- **FFORMA2D3(h,w)**

Devuelve el factor de forma  $F_{12}$  de dos placas infinitas rectangulares perpendiculares.

Esta función toma como parámetros:

h: anchura de la placa 2.

w: anchura de la placa 1.



- **FFORMA2D4(S1,S2,S3)**

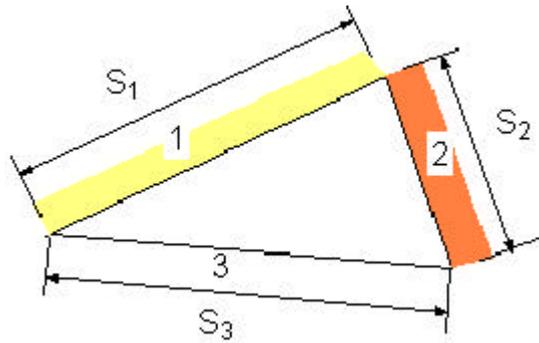
Devuelve el factor de forma  $F_{12}$  de tres placas infinitas que forman un triángulo.

Esta función toma como parámetros:

S\_1: anchura de la placa 1.

S\_2: anchura de la placa 2.

S\_3: anchura de la placa 3.



- **FFORMA2D5(a,b,c,r)**

Devuelve el factor de forma  $F_{12}$  de cilindro y rectángulo paralelo ( rectángulo el sólido 1, cilindro sólido 2)

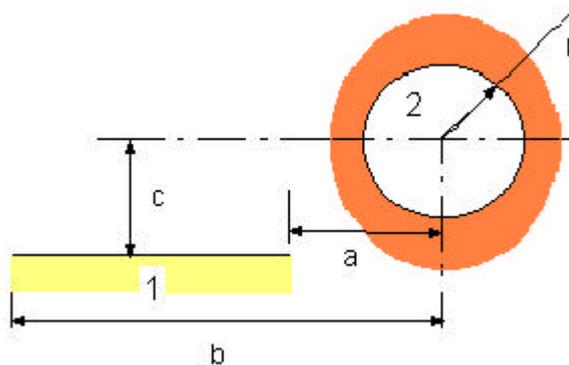
Esta función toma como parámetros:

a: distancia entre el lado más cercano del rectángulo y el centro del cilindro.

b: distancia entre el lado más lejano del rectángulo y el centro del cilindro.

c: altura del cilindro respecto de la placa.

**Importante:** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**.



- **FFORMA2D6(s,D)**

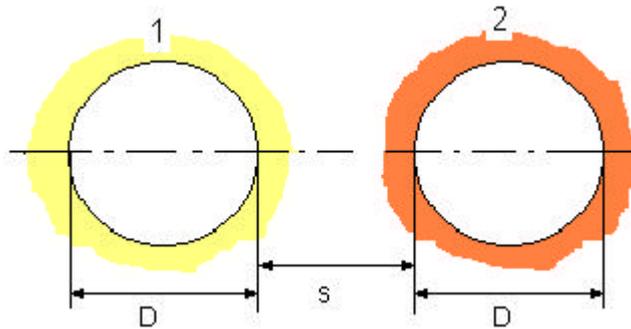
Devuelve el factor de forma  $F_{12}=F_{21}$  de cilindros infinitos paralelos.

Esta función toma como parámetros:

s: distancia entre las superficies exteriores de los cilindros.

D: diámetros de los cilindros.

**Importante:** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**.



- **FFORMA2D7(r1,r2,Fij\$)**

Devuelve el factor de forma  $F_{12}$ ,  $F_{21}$ ,  $F_{22}$  de dos cilindros concéntricos.

Esta función toma como parámetros:

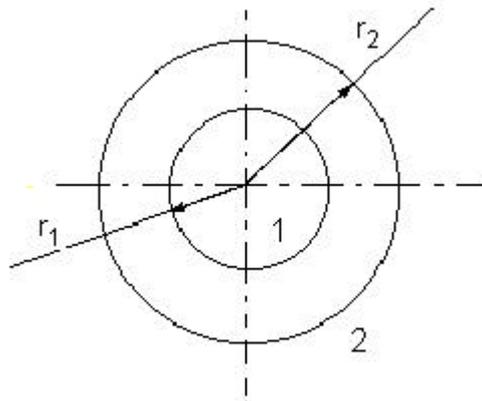
r1: radio del cilindro interior.

r2: radio del cilindro exterior.

Fij\$: tenemos que introducir este parámetro entre comillas simples, y puede tomar los valores 'F12', 'F21', 'F22'

Ejemplo:  $F_{21} = \text{FFORMA2D7}(1,2,'F_{21}')$

Obtenemos la solución:  $F_{21} = 0.5$



- **FFORMA3D8(a,b,c)**

Devuelve el factor de forma  $F_{12} = F_{21}$  de dos rectángulos paralelos alineados.

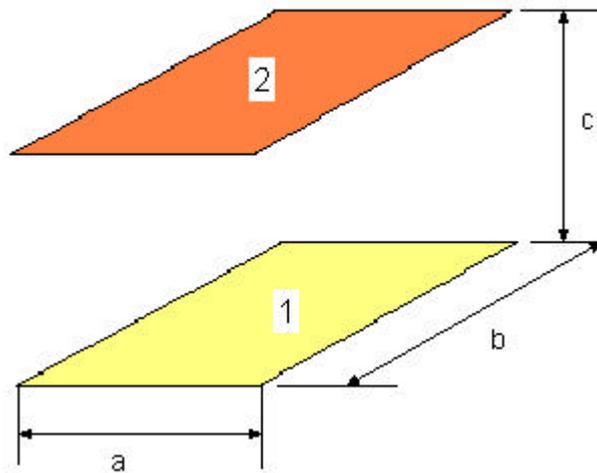
Esta función toma como parámetros:

a: ancho del rectángulo.

b: longitud del rectángulo.

c: separación entre los dos rectángulos.

**Importante:** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**.



- **FFORMA3D9(w,l,h)**

Devuelve el factor de forma  $F_{12}$  de dos rectángulos perpendiculares con una orilla común.

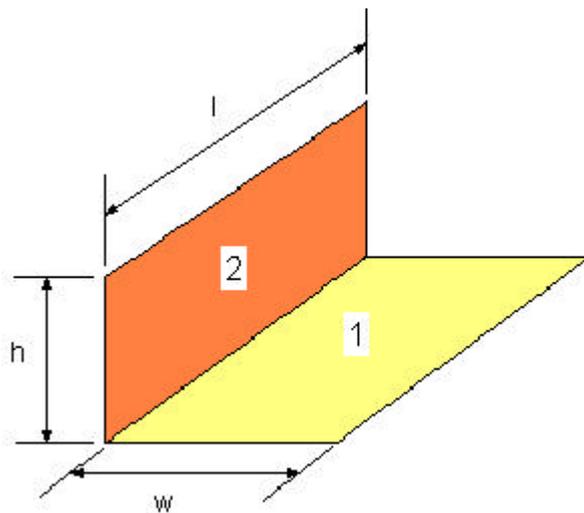
Esta función toma como parámetros:

w: ancho del rectángulo 1.

l: longitud de la orilla común.

h: ancho del rectángulo 2.

**Importante:** Debe utilizarse en la opción **Degrees**, puede seleccionarse en el comando **Unit system** del menú **Options**.



- **FFORMA3D10(r1,r2,h)**

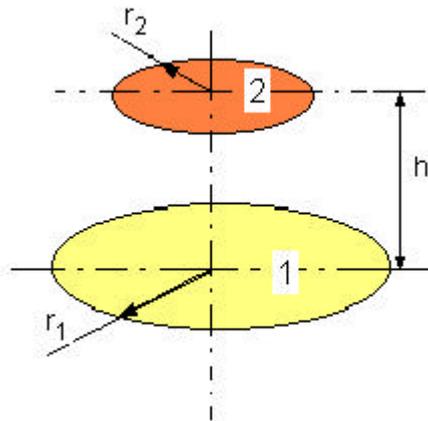
Devuelve el factor de forma  $F_{12}$  de dos discos coaxiales.

Esta función toma como parámetros:

r1: radio del disco 1.

r2: radio del disco 2.

h: distancia entre los discos.



- **FFORMA3D11(r1,r2,Fij\$)**

Devuelve el factor de forma  $F_{12}$ ,  $F_{21}$ ,  $F_{22}$  de dos esferas concéntricas.

Esta función toma como parámetros:

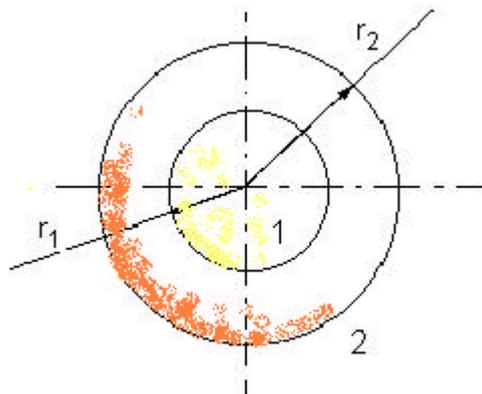
r1: radio de la esfera 1.

r2: radio de la esfera 2.

Fij\$: variable que toma los valores, 'F12', 'F21', 'F22'. Tenemos que introducir este parámetro entre comillas simples.

Ejemplo:  $F_{21} = \text{FFORMA3D11}(1,2,'F_{21}')$

Obtenemos la solución:  $F_{21} = 0.25$



- **FFORMA3D12(L1,L2,D)**

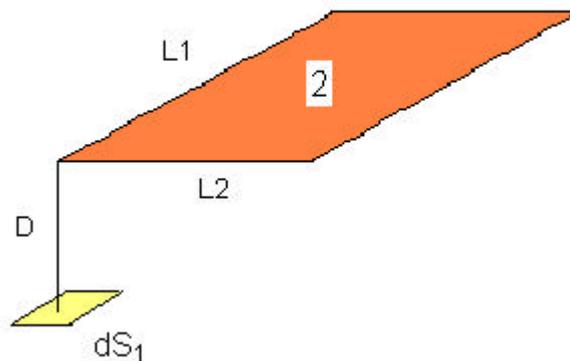
Devuelve el factor de forma  $F_{12}$  de dos rectángulos paralelos pero el rectángulo 1 es un diferencial de área.

Esta función toma como parámetros:

L1: ancho del rectángulo 2.

L2: longitud del rectángulo 2.

D: distancia del diferencial de área (sólido 1) a un vértice del rectángulo 2.



- **FFORMA3D13(L,H,D)**

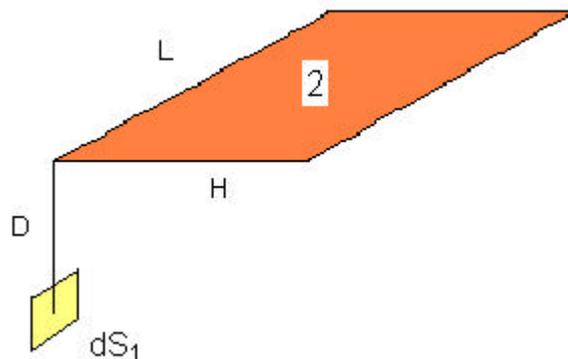
Devuelve el factor de forma  $F_{12}$  de dos rectángulos perpendiculares pero el rectángulo 1 es un diferencial de área.

Esta función toma como parámetros:

L: longitud del rectángulo 2.

H: ancho del rectángulo 2.

D: distancia del diferencial de área (sólido 1) a un vértice del rectángulo 2.



- **FFORMA3D14(L1,L2,D)**

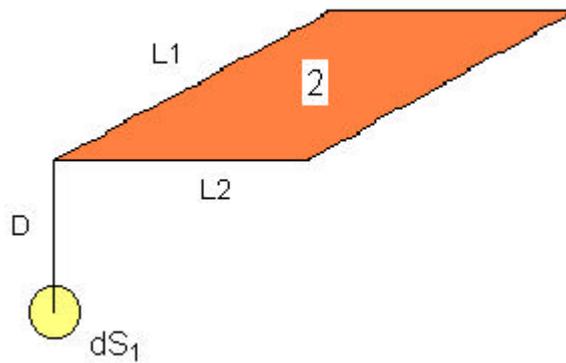
Devuelve el factor de forma  $F_{12}$  de una esfera diferencial (sólido 1) y un rectángulo que dista de una esquina de él  $D$ .

Esta función toma como parámetros:

L1: longitud del rectángulo 2.

L2: ancho del rectángulo 2.

D: distancia del diferencial de esfera (sólido 1) a un vértice del rectángulo 2.



---

## 6. Intercambiadores de calor.

---

- **DTLM\_FP(Tce,Tcs,Tfe,Tfs)**

Esta función toma como parámetros:

Tce: temperatura de entrada del fluido caliente.

Tcs: temperatura de salida del fluido caliente.

Tfe: temperatura de entrada del fluido frío.

Tfs: temperatura de salida del fluido frío.

Devuelve el valor de la DTLM para flujo paralelo.

- **DTLM\_FC(Tce,Tcs,Tfe,Tfs)**

Esta función toma como parámetros:

Tce: temperatura de entrada del fluido caliente.

Tcs: temperatura de salida del fluido caliente.

Tfe: temperatura de entrada del fluido frío.

Tfs: temperatura de salida del fluido frío.

Devuelve el valor de la DTLM para flujo en contracorriente.

- **FactordecorreccionDTLM(Tce,Tcs,Tfe,Tfs,C\_c,C\_f,tipo,n)**

Esta función toma como parámetros:

Tce: temperatura de entrada del fluido caliente.

Tcs: temperatura de salida del fluido caliente.

Tfe: temperatura de entrada del fluido frío.

Tfs: temperatura de salida del fluido frío.

C\_c: capacitancia térmica del fluido caliente.

C\_f: capacitancia térmica del fluido frío.

tipo: parámetros que toma diferentes valores en función de la tipología del intercambiador ( ver valores en tabla 1) .

n: parámetro que toma el valor del número de pasos por la carcasa. Si no es de múltiples paso por la carcasa siempre poner 1.

Devuelve el factor de corrección de la DTLM.

Tabla 1. Valores de la variable **tipo** para la función **FactordecorreccionDTLM**.

Tipología	Tipo
Carcasa y tubo:	
- Un paso de carcasa (2,4,..., pasos de tubo)	3
- n Pasos de carcasa (2n,4n,..., pasos de tubo)	4
Flujo cruzado (un solo paso)	
- Cmax (mezclado), Cmin (sin mezclar)	5
- Cmin (mezclado), Cmax (sin mezclar)	6

- **EFICIENCIA(C\_c,C\_f,NTU,tipo,n)**

Esta función toma como parámetros:

C\_c: capacitancia térmica del fluido caliente.

C\_f: capacitancia térmica del fluido frío.

NTU: número de unidades de transferencia.

tipo: parámetros que toma diferentes valores en función de la tipología del intercambiador ( ver valores en tabla 2) .

n: parámetro que toma el valor del número de pasos por la carcasa. Si no es de múltiples paso por la carcasa siempre poner 1.

Devuelve la eficiencia del intercambiador.

Tabla 2. Valores de la variable **tipo** para la función **EFICIENCIA**.

Tipología	Tipo
Tubos concéntricos:	
- Flujo paralelo	1
- Contraflujo	2
Carcasa y tubos:	
- Un paso por la carcasa (2,4,..., pasos por los tubos)	3
- n pasos por la carcasa (2n,4n,..., pasos por los tubos)	4
Flujo cruzado ( un solo paso ):	
- Ambos fluidos sin mezclar	5
- Cmax (mezclado), Cmin (sin mezclar)	6
- Cmin (mezclado), Cmax (sin mezclar)	7

- **NTU\_epsilon(C\_c,C\_f,epsilon,tipo,n)**

Esta función toma como parámetros:

C\_c: capacitancia térmica del fluido caliente.

C\_f: capacitancia térmica del fluido frío.

epsilon: eficiencia del intercambiador.

tipo: parámetros que toma diferentes valores en función de la tipología del intercambiador ( ver valores en tabla 3) .

n: parámetro que toma el valor del número de pasos por la carcasa. Si no es de múltiples paso por la carcasa siempre poner 1.

Devuelve el número de unidades de transferencia, NTU.

Tabla 3. Valores de la variable **tipo** para la función **NTU\_epsilon**.

Tipología	Tipo
Tubos concéntricos: - Flujo paralelo - Contraflujo	1 2
Carcasa y tubos: - un paso por la carcasa (2,4,..., pasos por los tubos)	3
- n pasos por la carcasa (2n,4n,..., pasos por los tubos)	4
Flujo cruzado (un solo paso) - Cmax (mezclado), Cmin (sin mezclar)	5
- Cmin (mezclado), Cmax (sin mezclar)	6