

# Engineering Equation Solver

## Aplicado A La Transferencia

### De Calor

Realizado por:  
D. Manuel Gómez Sánchez.

---

## *Presentación*

---

Este proyecto es básicamente académico. Partimos de un programa EES (Engineering Equation Solver), que resuelve sistemas de ecuaciones no lineales y nos permite construir nuevas funciones y subprogramas.

El objetivo es crear un librería de funciones con todas las relaciones y ábacos utilizados en los mecanismos de transferencia de calor, para así facilitar la resolución matemática de los problemas y poder enfocar mejor los conceptos. Evidentemente no es una receta mágica para resolver problemas, ya que como todo programa necesita que las ecuaciones y estimaciones iniciales estén bien introducidas, de ahí que se requiera el conocimiento de la materia de igual manera que si se hiciera con una simple calculadora.

El desarrollo del proyecto ha tenido dos fases, la primera la elaboración de todas las funciones de los diferentes mecanismos, conducción, convección, radiación y también se han incluido los intercambiadores. Cada función lleva incluido un archivo de ayuda que se puede leer desde el programa. La segunda fase ha sido la realización de una colección de problemas de transferencia de calor haciendo uso de estas funciones para que sirvan de ejemplo de aplicación y de resolución de problemas.

Estas dos fases se han ampliado a tres en la presentación de este documento:

- *Manual De Usuario De La Librería De Funciones De EES Aplicadas A La Transferencia De Calor.* Se recogen todas las funciones y subprogramas explicando los parámetros que toma y los valores que devuelve.
- *Listado De La Librería De Funciones.* Listado de todas las funciones y subprogramas en el lenguaje de programación.
- *Colección De Problemas De Transferencia De Calor Mediante EES.* Problemas resueltos de todos los mecanismos de transferencia y haciendo uso de las funciones y subprogramas.

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

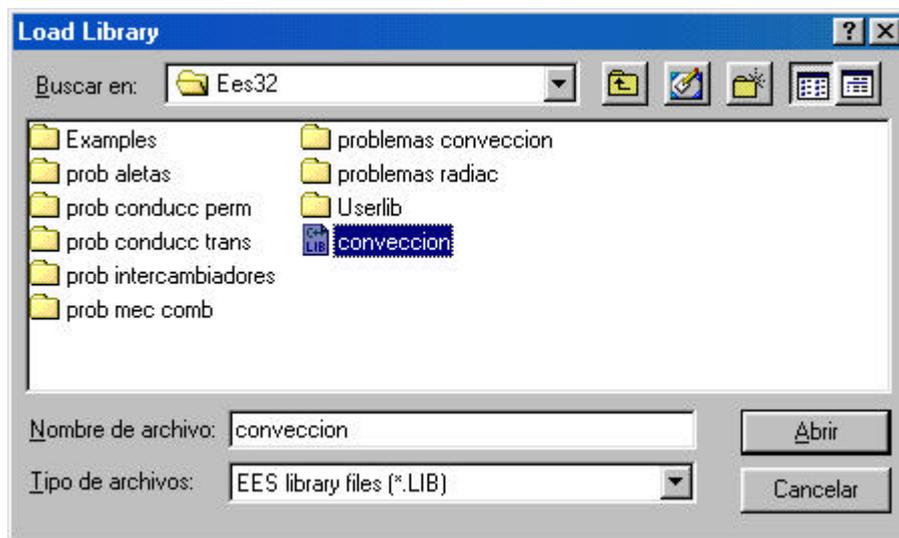
---

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**.

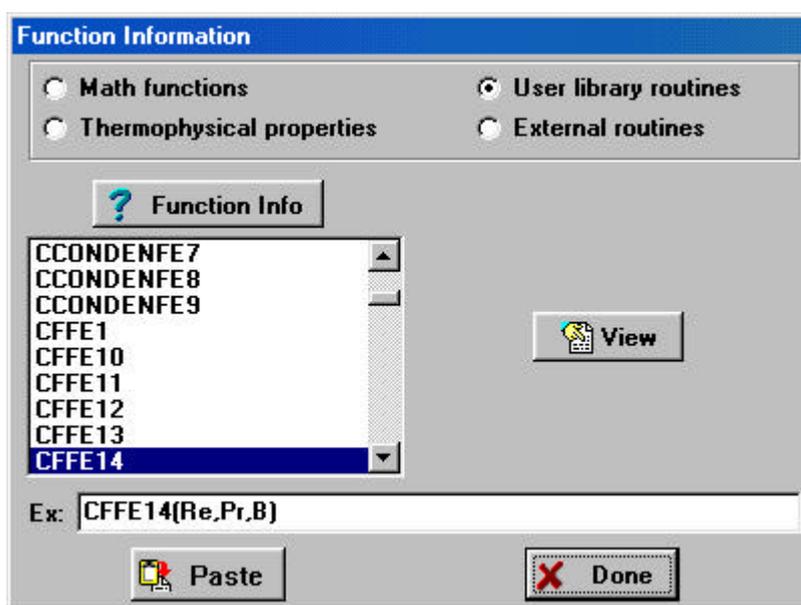
## ¿Cómo insertar la función en las ecuaciones?

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.

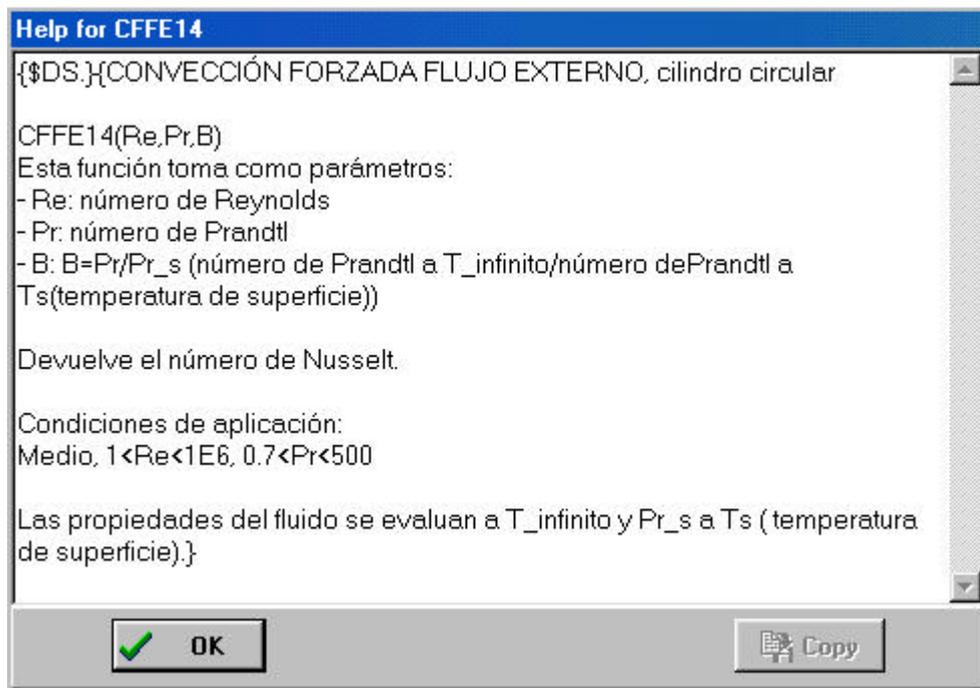
La segunda forma es más cómoda y se puede hacer sin necesidad de mirar este manual. En el menú **Options** hacemos clic en **Function Info**, y nos sale la siguiente ventana.



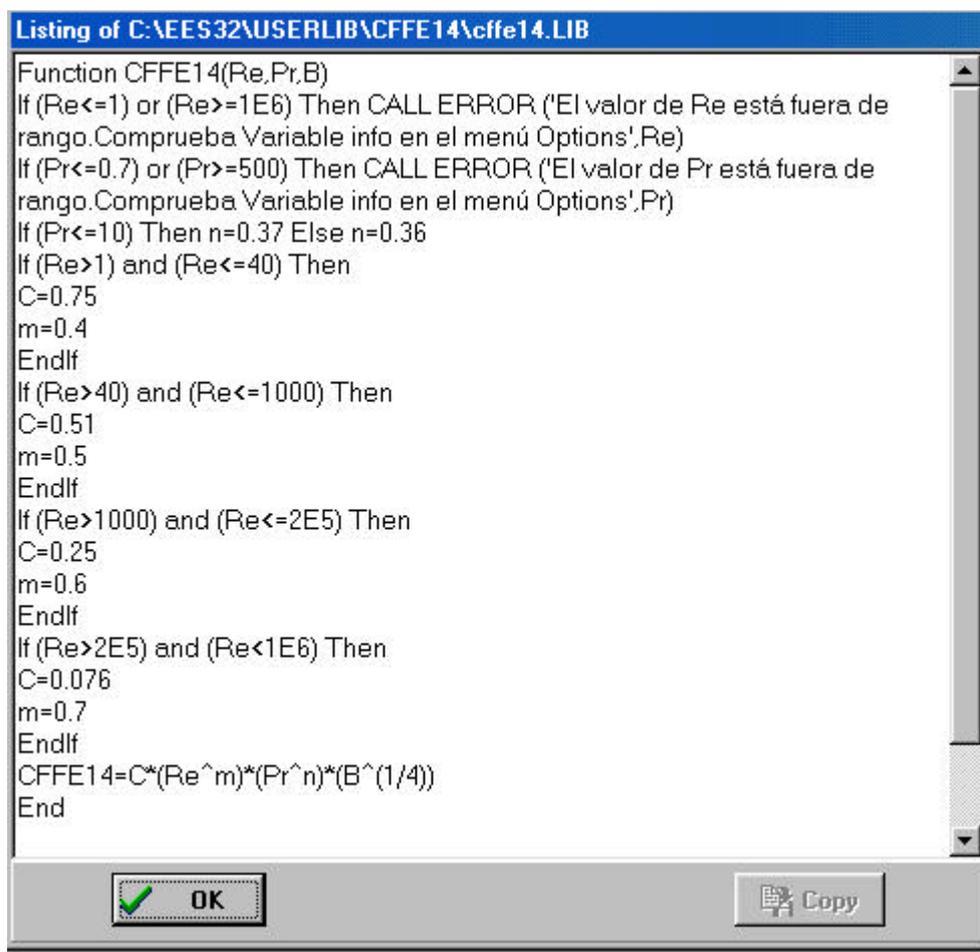
En esta ventana aparecen una serie de botones:

**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.

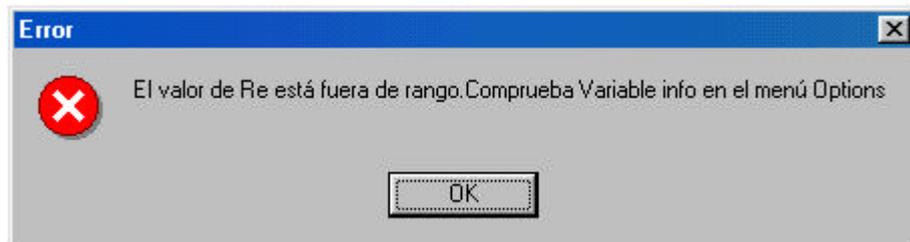


**View**, haciendo clic aquí obtenemos una ventana donde aparece el listado de programación de la función.



## Rangos de validez

La mayoría de las correlaciones de convección tienen unas condiciones de aplicación que afectan a los valores del número de Reynold ( $Re$ ), Prandlt ( $Pr$ ), 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.

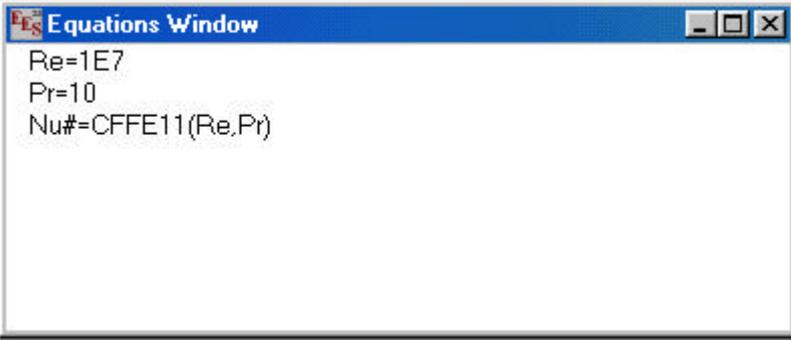
Variable Information						
Module <span>Main</span>						
Variable	Guess	Lower	Upper	Display		Units
A_e	0.5341	-infinity	infinity	A 3 N		m <sup>2</sup>
A_j	0.4712	-infinity	infinity	A 3 N		m <sup>2</sup>
e	1	-infinity	infinity	A 3 X		m
e_2	1	-infinity	infinity	A 3 X		m
h_e	10	-infinity	infinity	A 3 N		Kcal/h·m <sup>2</sup> ·C
h_j	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

Buttons:

### *¿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.

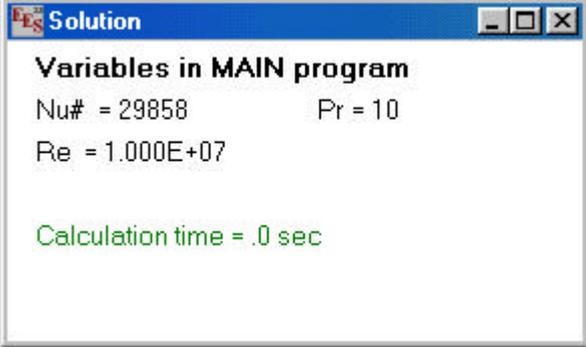


```

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

```

Y obtendríamos la solución



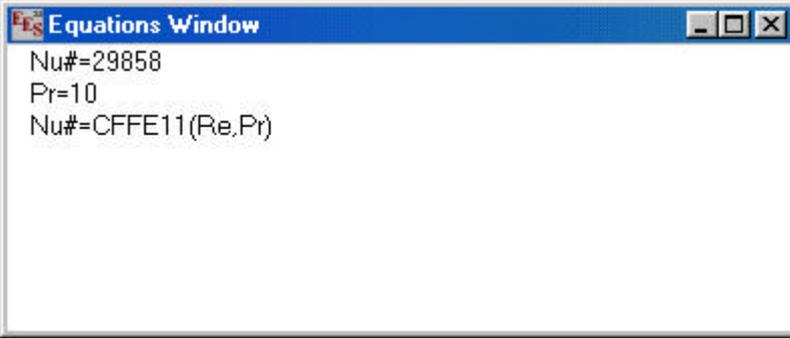
```

EES 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.

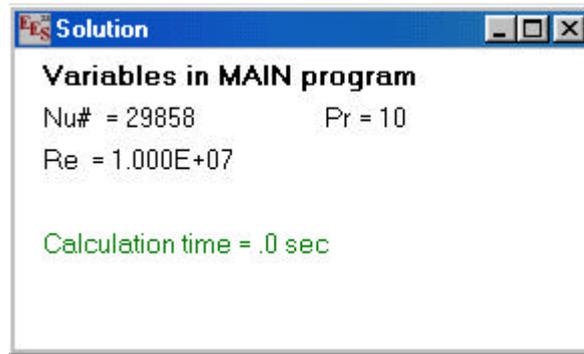


```

EES 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.



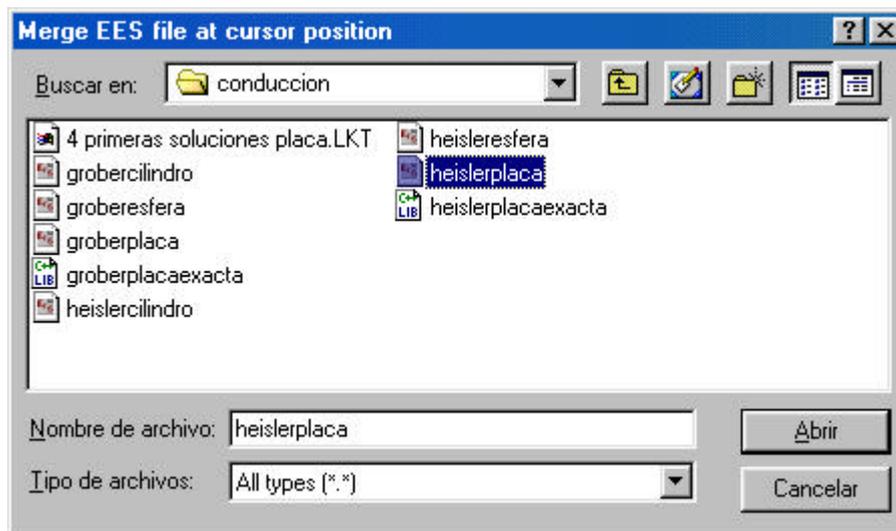
## Modules

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...**

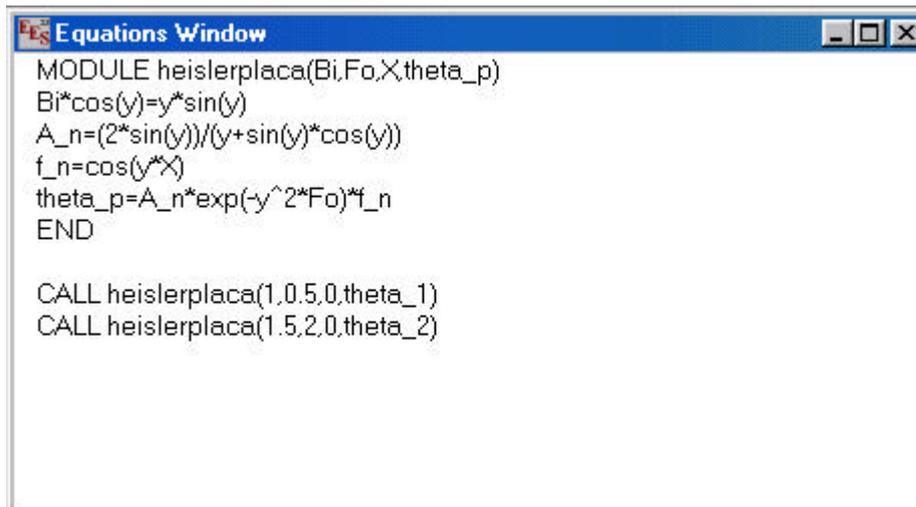
En la programación de las funciones sólo se pueden hacer asignaciones, no pueden resolver ecuaciones no lineales a menos que se utilicen métodos numéricos, pero no así con los **modules**, y es por esta características que lo hemos utilizado para los ábacos de Heisler y los ábacos de Gröber, por su facilidad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

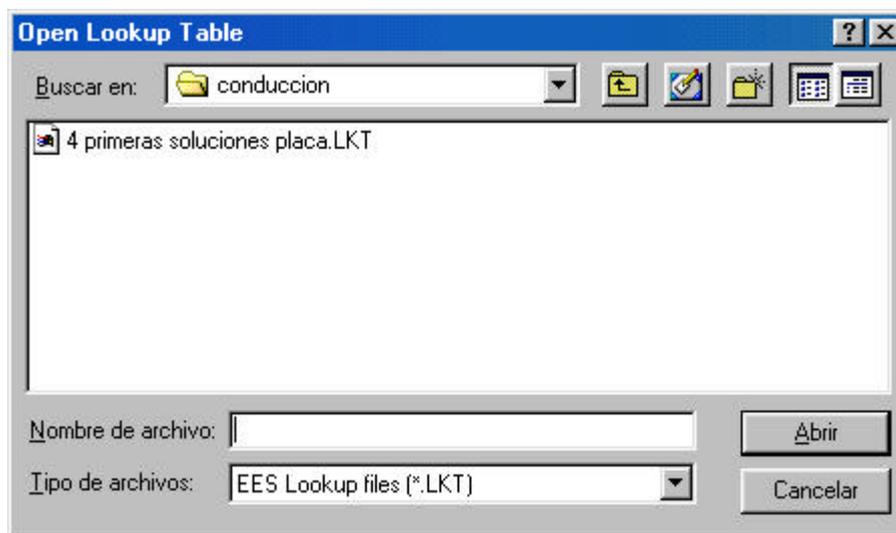
Bi: número de Biot.

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\_aletcircrectang(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\_aletcircrectang(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, Ts 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, Ts 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.		1.25		1.50		2.00		3.00	
	Sl/D	$C_1$	$m$	$C_1$	$m$	$C_1$	$m$	$C_1$	$m$
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

- **CFFE18(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 CFFI19 $q_s$  y CFFI19 $T_s$  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,  $De = 4 \cdot A/P$ , 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.

- **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,  $De = 4 \cdot A/P$ , 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.

- **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,  $De=4*A/P$ , 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, qs 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,  $3E5 < Ra < 8E8$ ,  $10 \leq Nu = 90$ .

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,  $T_s$  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,  $T_s$  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.

$T_{sat}$ : Temperatura de saturación.

$T_s$ : Temperatura de la superficie.

$T_v$ : 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).

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:  
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 dependiendo 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 Prandtl 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 Prandlt 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 $F_{0\_lambda}(lambT)$

Esta función toma como parámetro:

$lambT$ : 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.

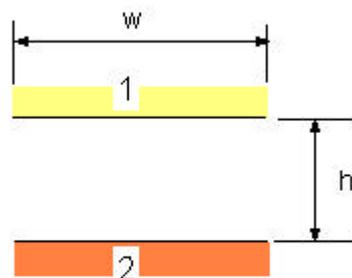
#### FFORMA2D1(h,w)

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.



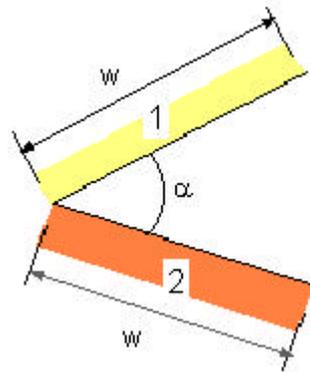
#### - FFORMA2D2(alpha)

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**.



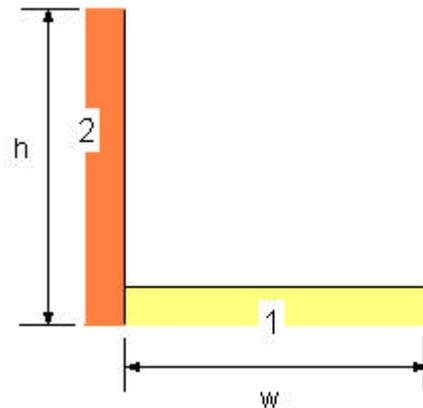
- **FFORMA2D3(h,w)**

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)**

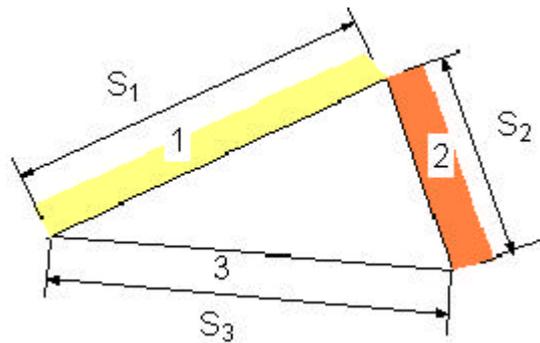
Devuelve el factor de forma  $F_{12}$  de tres placas infinitas que forman un triángulo.

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)

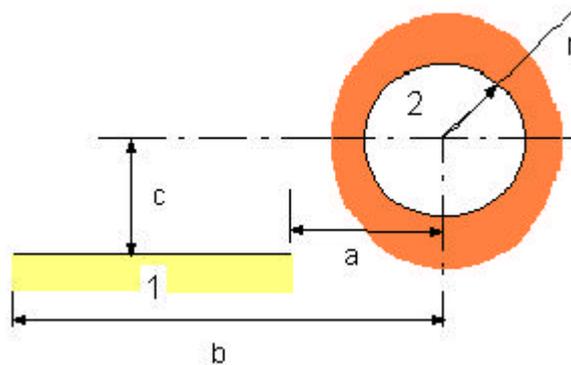
Esta función toma como parámetros:

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)**

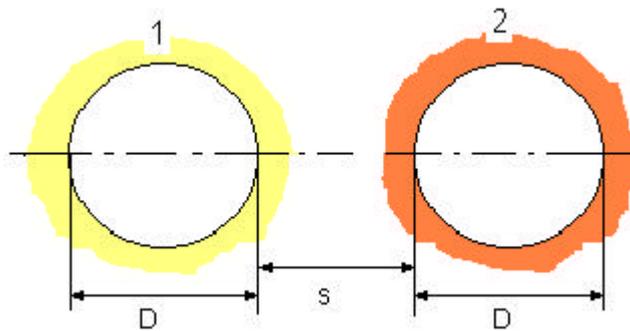
Devuelve el factor de forma  $F_{12}=F_{21}$  de cilindros infinitos paralelos.

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:

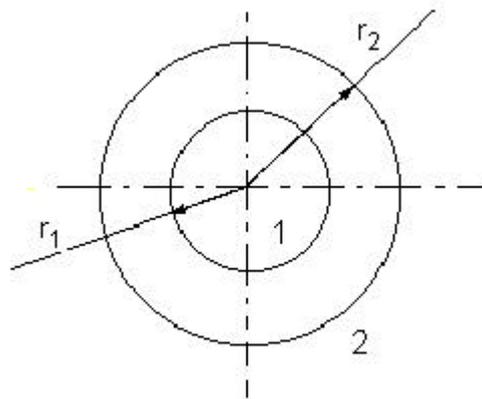
r1: radio del cilindro interior.

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.

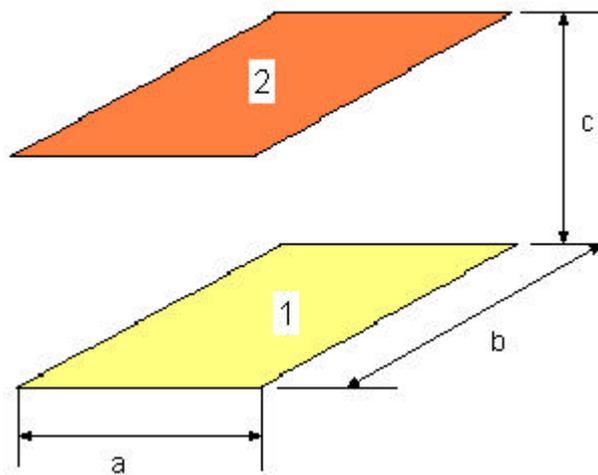
Esta función toma como parámetros:

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.

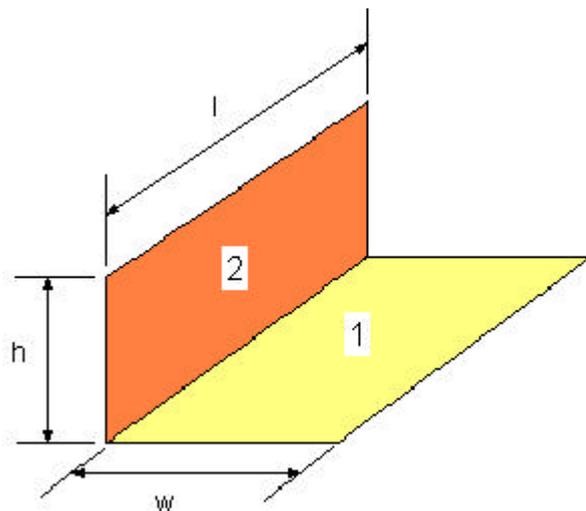
Esta función toma como parámetros:

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)**

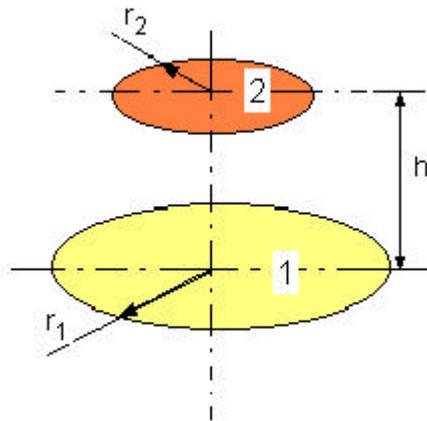
Devuelve el factor de forma  $F_{12}$  de dos discos coaxiales.

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:

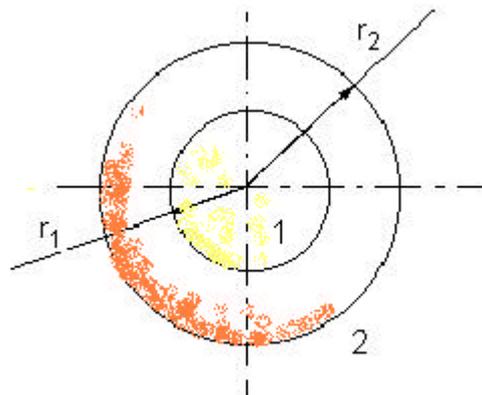
r1: radio de la esfera 1.

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)**

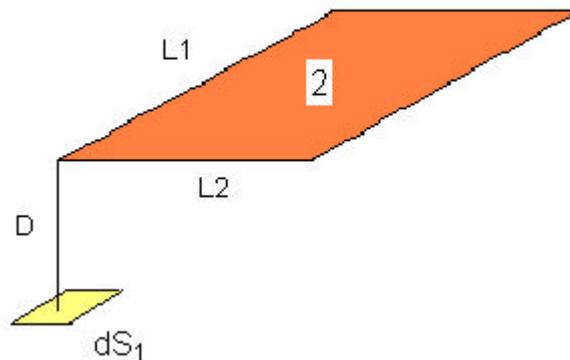
Devuelve el factor de forma  $F_{12}$  de dos rectángulos paralelos pero el rectángulo 1 es un diferencial de área.

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)**

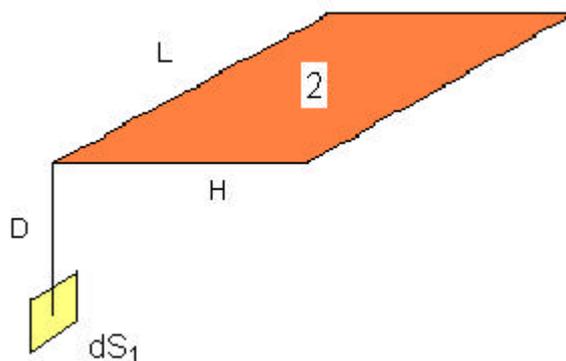
Devuelve el factor de forma  $F_{12}$  de dos rectángulos perpendiculares pero el rectángulo 1 es un diferencial de área.

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)**

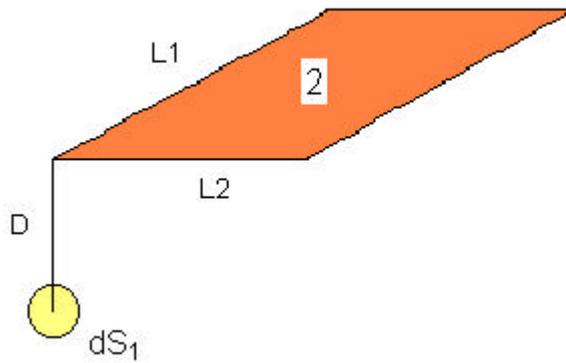
Devuelve el factor de forma  $F_{12}$  de una esfera diferencial (sólido 1) y un rectángulo que dista de una esquina de él  $D$ .

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

Listado De La Librería

*De*

*Funciones*

---

## Índice

---

1. Conducción.....	2
2. Aletas.....	4
3. Convección.....	6
4. Radiación.....	25
5. Intercambiadores de calor.....	29

---

---

## 1. Conducción

---

```

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

```

```

MODULE heislercilindro(Bi,Fo,X,theta_c)
y*Bessel_J1(y)=Bi*Bessel_J0(y)
A_n=(2*Bessel_J1(y))/(y*((Bessel_J0(y))^2+(Bessel_J1(y))^2))
f_n=Bessel_J0(y*X)
theta_c=A_n*exp(-y^2*Fo)*f_n
END

```

```

MODULE heislercilindro(Bi,Fo,X,theta_c)
y*Bessel_J1(y)=Bi*Bessel_J0(y)
A_n=(2*Bessel_J1(y))/(y*((Bessel_J0(y))^2+(Bessel_J1(y))^2))
f_n=Bessel_J0(y*X)
theta_c=A_n*exp(-y^2*Fo)*f_n
END

```

```

MODULE groberplaca(Bi,Fo,Q#Q_0p)
Bi*cos(y)=y*sin(y)
A_n=(2*sin(y))/(y+sin(y)*cos(y))
B_n=sin(y)/y
Q#Q_0p=1-(A_n*exp(-y^2*Fo)*B_n)
END

```

```

MODULE grobercilindro(Bi,Fo,Q#Q_0c)
y*Bessel_J1(y)=Bi*Bessel_J0(y)
A_n=(2*Bessel_J1(y))/(y*((Bessel_J0(y))^2+(Bessel_J1(y))^2))
B_n=(2*Bessel_J1(y))/y
Q#Q_0c=1-(A_n*exp(-y^2*Fo)*B_n)
END

```

```

MODULE groberesfera(Bi,Fo,Q#Q_0e)
y*cos(y)=(Bi-1)*sin(y)
A_n=(2*(sin(y)-(y*cos(y))))/(y-(sin(y)*cos(y)))
B_n=(3*(sin(y)-(y*cos(y))))/(y^3)
Q#Q_0e=1-(A_n*exp(-y^2*Fo)*B_n)
END

```

```

Function heislerplacaexacta(Bi,Fo,X)
y_1=Interpolate1(Biot,xi_1,Biot=Bi)

```

```

y_2=Interpolate1(Biot,xi_2,Biot=Bi)
y_3=Interpolate1(Biot,xi_3,Biot=Bi)
y_4=Interpolate1(Biot,xi_4,Biot=Bi)
A_1=(2*sin(y_1*Convert(rad,deg)))/(y_1+sin(y_1*Convert(rad,deg))*cos(y_1*Convert
(rad,deg)))
f_1=cos(y_1*X*Convert(rad,deg))
theta_1=A_1*exp(-y_1^2*Fo)*f_1
A_2=(2*sin(y_2*Convert(rad,deg)))/(y_2+sin(y_2*Convert(rad,deg))*cos(y_2*Convert
(rad,deg)))
f_2=cos(y_2*X*Convert(rad,deg))
theta_2=A_2*exp(-y_2^2*Fo)*f_2
A_3=(2*sin(y_3*Convert(rad,deg)))/(y_3+sin(y_3*Convert(rad,deg))*cos(y_3*Convert
(rad,deg)))
f_3=cos(y_3*X*Convert(rad,deg))
theta_3=A_3*exp(-y_3^2*Fo)*f_3
A_4=(2*sin(y_4*Convert(rad,deg)))/(y_4+sin(y_4*Convert(rad,deg))*cos(y_4*Convert
(rad,deg)))
f_4=cos(y_4*X*Convert(rad,deg))
theta_4=A_4*exp(-y_4^2*Fo)*f_4
heislerplacaexacta=theta_1+theta_2+theta_3+theta_4
END

```

```

Function groberplacaexacta(Bi,Fo)
y_1=Interpolate1(Biot,xi_1,Biot=Bi)
y_2=Interpolate1(Biot,xi_2,Biot=Bi)
y_3=Interpolate1(Biot,xi_3,Biot=Bi)
y_4=Interpolate1(Biot,xi_4,Biot=Bi)
A_1=(2*sin(y_1*Convert(rad,deg)))/(y_1+sin(y_1*Convert(rad,deg))*cos(y_1*Convert
(rad,deg)))
B_1=sin(y_1*Convert(rad,deg))/y_1
Q#Q_01=(A_1*exp(-y_1^2*Fo)*B_1)
A_2=(2*sin(y_2*Convert(rad,deg)))/(y_2+sin(y_2*Convert(rad,deg))*cos(y_2*Convert
(rad,deg)))
B_2=sin(y_2*Convert(rad,deg))/y_2
Q#Q_02=(A_2*exp(-y_2^2*Fo)*B_2)
A_3=(2*sin(y_3*Convert(rad,deg)))/(y_3+sin(y_3*Convert(rad,deg))*cos(y_3*Convert
(rad,deg)))
B_3=sin(y_3*Convert(rad,deg))/y_3
Q#Q_03=(A_3*exp(-y_3^2*Fo)*B_3)
A_4=(2*sin(y_4*Convert(rad,deg)))/(y_4+sin(y_4*Convert(rad,deg))*cos(y_4*Convert
(rad,deg)))
B_4=sin(y_4*Convert(rad,deg))/y_4
Q#Q_04=(A_4*exp(-y_4^2*Fo)*B_4)
groblerplacaexacta=1-(Q#Q_01+Q#Q_02+Q#Q_03+Q#Q_04)
END

```

---

## 2. Aletas

---

```
Function Ef_aletrectrectang(h,k,L,t)
m=sqrt((2*h)/(k*t))
L_c=L+(t/2)
arg=m*L_c*Convert(rad,deg)
Ef_aletrectrectang=(1/(m*L_c))*tanh(arg)
End
```

```
Function Af_aletrectrectang(L,t,w)
L_c=L+(t/2)
Af_aletrectrectang=2*w*L_c
End
```

```
Function Ef_aletrecttriang(h,k,L,t)
m=sqrt((2*h)/(k*t))
Ef_aletrecttriang=(1/(m*L))*(Bessel_I1(2*m*L)/Bessel_I0(2*m*L))
End
```

```
Function Af_aletrecttriang(L,t,w)
Af_aletrecttriang=2*w*(L^2+(t/2)^2)^2
End
```

```
Function Ef_aletrectparabolic(h,k,L,t)
m=sqrt((2*h)/(k*t))
Ef_aletrectparabolic=(2/(sqrt(4*(m*L)^2+1)+1))
End
```

```
Function Af_aletrectparabolic(L,t,w)
C=sqrt(1+(t/L)^2)
Af_aletrectparabolic=w*((c*L^2)+((L^2/t)*ln((t/L)+C)))
End
```

```
Function Ef_aletcircrectang(h,k,r_1,r_2,t)
m=sqrt((2*h)/(k*t))
r_2c=r_2+(t/2)
A=((2*r_1)/m)/(r_2c^2-r_1^2)
B=(Bessel_I1(m*r_2c)*Bessel_K1(m*r_1))-
(Bessel_I1(m*r_1)*Bessel_K1(m*r_2c))
C=(Bessel_I0(m*r_1)*Bessel_K1(m*r_2c))+(Bessel_I1(m*r_2c)*Bessel_K0(m*r_
1))
Ef_aletcircrectang=(A*B)/C
End
```

```
Function Af_aletcircrectang(r_1,r_2,L,t)
```

```

r_2c=r_2+(t/2)
Af_aletcircrectang=2*pi*(r_2c^2-r_1^2)
End

```

```

Function Ef_aleta_de_punta_rectang(h,k,L,D)
m=sqrt((4*h)/(k*D))
L_c=L+(D/4)
arg=m*L_c*Convert(rad,deg)
Ef_aleta_de_punta_rectang=(1/(m*L_c))*tanh(arg)
End

```

```

Function Af_aleta_de_punta_rectang(L,D)
L_c=L+(D/4)
Af_aleta_de_punta_rectang=pi*D*L_c
End

```

```

Function Ef_aleta_de_punta_triang(h,k,L,D)
m=sqrt((4*h)/(k*D))
I_2=Bessel_I0(2*m*L)-((2/(2*m*L))*Bessel_I1(2*m*L))
Ef_aleta_de_punta_triang=(2/(m*L))*(I_2/Bessel_I1(2*m*L))
End

```

```

Function Af_aleta_de_punta_triang(L,D)
Af_aleta_de_punta_triang=(pi*D/2)*(L^2+(D/2)^2)^(1/2)
End

```

```

Function Ef_aleta_de_punta_parabolic(h,k,L,D)
m=sqrt((4*h)/(k*D))
Ef_aleta_de_punta_parabolic=2/(sqrt(((4/9)*(m*L)^2)+1)+1)
End

```

```

Function Af_aleta_de_punta_parabolic(L,D)
C1=1+(2*(D/L)^2)
C2=sqrt(1+(D/L)^2)
Af_aleta_de_punta_parabolic=((pi*L^3)/(8*D))*((C1*C2)-
((L/(2*D)))*ln((2*D*C2/L)+C1))
End

```

---

### 3. Convección

---

#### *Convección Forzada Flujo Externo*

Function CFFE1(Re)

if (Re>500000) Then CALL ERROR ('Esta correlación es para flujo laminar, Re es muy alto',Re)

CFFE1=0.664\*Re<sup>(-1/2)</sup>

End

Function CFFE2(Re,Pr)

If (Pr<0.6) Then CALL ERROR ('El valor de Pr está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Pr)

CFFE2=0.332\*Re<sup>(1/2)</sup>\*Pr<sup>(1/3)</sup>

END

Function CFFE3(Re,Pr)

CFFE3=0.453\*Re<sup>(1/2)</sup>\*Pr<sup>(1/3)</sup>

END

Function CFFE4(Re)

if (Re>500000) Then CALL ERROR ('Esta correlación es para flujo laminar, Re es muy alto',Re)

CFFE4=1.328\*Re<sup>(-1/2)</sup>

End

Function CFFE5(Re,Pr)

If (Pr<0.6) Then CALL ERROR ('El valor de Pr está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Pr)

CFFE5=0.664\*Re<sup>(1/2)</sup>\*Pr<sup>(1/3)</sup>

END

Function CFFE6(Re,Pr)

CFFE6=0.6795\*Re<sup>(1/2)</sup>\*Pr<sup>(1/3)</sup>

END

Function CFFE7(Re)

if (Re>1E8) Then CALL ERROR ('El valor de Re está fuera de rango.Comprueba Variable info en menú Options',Re)

CFFE7=0.0592\*Re<sup>(-1/5)</sup>

End

Function CFFE8(Re,Pr)

If (Re>1E8) Then CALL ERROR ('El valor de Re está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Re)

```

If (Pr<0.6) or (Pr>60) Then CALL ERROR ('El valor de Pr está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Pr)
CFFE8=0.0296*Re^(4/5)*Pr^(1/3)
END

```

```

Function CFFE9(Re,Pr)
If (Re<=100000) or (Re>=5500000) Then CALL ERROR ( 'El valor de Re está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Re)
If (Pr<=0.7) or (Pr>=380) Then CALL ERROR ('El valor de Pr está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Pr)
CFFE9=0.029*Re^(4/5)*Pr^0.43
END

```

```

Function CFFE10(Re)
If (Re<=500000) or (Re>100000000) Then CALL ERROR ( 'El valor de Re está
fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Re)
CFFE10=0.074*Re^(-1/5)-0.0035
END

```

```

Function CFFE11(Re,Pr)
If (Re<=500000) or (Re>1E8) Then CALL ERROR ( 'El valor de Re está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Re)
If(Pr<=0.6) or (Pr>=60) Then CALL ERROR ('El valor de Pr está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Pr)
CFFE11=(0.037*Re^(4/5)-871)*Pr^(1/3)
END

```

```

Function CFFE12(Re,Pr,C)
If (Re<=1E5) or (Re>=5.5E6) Then CALL ERROR ( 'El valor de Re está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Re)
If (Pr<=0.7) or (Pr>=380) Then CALL ERROR ('El valor de Pr está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Pr)
If (C<=0.26) or (C>=3.5) Then CALL ERROR ('El valor de C está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Pr)
CFFE12=(0.036*Re^(4/5)-331)*Pr^0.43*C^(1/4)
END

```

```

Function CFFE13(Re,Pr)
If (Re<=0.4) or (Re>=400000) Then CALL ERROR ('El valor de Re está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Re)
If (Re>0.4) and (Re<4) Then
C=0.989
m=0.330
EndIf
If (Re>=4) and (Re<40) Then
C=0.911
m=0.385
EndIf
If (Re>=40) and (Re<4000) Then
C=0.683

```

```

m=0.466
EndIf
If (Re>=4000) and (Re<40000) Then
C=0.193
m=0.618
EndIf
If (Re>=40000) Then
C=0.027
m=0.805
EndIf
CFFE13=C*Re^m*Pr^(1/3)
End

```

```

Function CFFE14(Re,Pr,B)
If (Re<=1) or (Re>=1E6) Then CALL ERROR ('El valor de Re está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Re)
If (Pr<=0.7) or (Pr>=500) Then CALL ERROR ('El valor de Pr está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Pr)
If (Pr<=10) Then n=0.37 Else n=0.36
If (Re>1) and (Re<=40) Then
C=0.75
m=0.4
EndIf
If (Re>40) and (Re<=1000) Then
C=0.51
m=0.5
EndIf
If (Re>1000) and (Re<=2E5) Then
C=0.25
m=0.6
EndIf
If (Re>2E5) and (Re<1E6) Then
C=0.076
m=0.7
EndIf
CFFE14=C*(Re^m)*(Pr^n)*(B^(1/4))
End

```

```

Function CFFE15(Re,Pr)
A=Re*Pr
If (A<=2) Then CALL ERROR ('No cumple condiciones de aplicación
(Re*Pr<=2).Comprobar Variable Info en el menú Options',A)
CFFE15=0.3+((0.62*Re^(1/2)*Pr^(1/3))/((1+(0.4/Pr)^(2/3))^(1/4)))*(1+(Re/28200
0)^(5/8))^(4/5)
End

```

```

Function CFFE16(Re,Pr,C)
If(Re<=3.5) or (Re>=76000) Then CALL ERROR ( 'El valor de Re está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Re)

```

```

If(Pr<0.71) or (Pr>300) Then CALL ERROR ('El valor de Pr está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Pr)
If(C<=1) or (C>=3.2) Then CALL ERROR ('El valor de C está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',C)
CFFE16=2+(0.48*Re^(1/2)+0.06*Re^(2/3))*Pr^0.4*C^(1/4)
END

```

```

Function CFFE17(Re_max,Pr,C_1,C_2,m)
If (Re_max<=2000) or (Re_max>=4E4) Then CALL ERROR ( 'El valor de
Re_max está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú
Options',Re_max)
If(Pr<0.7) Then CALL ERROR ('El valor de Pr está fuera de rango.Comprueba
Variable info en el menú Options',Pr)
CFFE17=1.13*C_1*C_2*(Re_max^m)*Pr^(1/3)
END

```

```

Function CFFE18(Re_max,Pr,Pr_s,C,m)
If (Re_max<=1000) or (Re_max>=2E6) Then CALL ERROR ( 'El valor de
Re_max está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú
Options',Re_max)
If(Pr<=0.7) or (Pr>=500) Then CALL ERROR ('El valor de Pr está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Pr)
CFFE18=C*(Re_max^m)*(Pr^0.36)*(Pr/Pr_s)^(1/4)
END

```

### ***Convección Forzada Flujo Interno***

```
Function CFFI1(D,Re,Pr)
If (Re>2300) Then CALL ERROR ('El flujo debe ser laminar (Re es muy
alto).Comprobar Variable info en el menú Options',Re)
CFFI1=0.0575*D*Re*Pr
End
```

```
Function CFFI2(Gz)
CFFI2=1.077*Gz^(1/3)
End
```

```
Function CFFI3(Gz)
CFFI3=1.30*Gz^(1/3)
End
```

```
Function CFFI4(Gz)
CFFI4=3.36+((0.0668*Gz)/(1+0.04*Gz^(2/3)))
End
```

```
Function CFFI5(Gz,Pr,C)
A=Gz^(1/3)*C^0.14
If (Pr<=0.48) or (Pr>=16700) Then CALL ERROR ('El valor de Pr está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Pr)
If (A<2) Then CALL ERROR ('No cumple la condición
Gz^(1/3)*C^0,14>=2.Comprueba Variable info en el menú Options',A)
If (C<=0.0044) or (C>=9.75) Then CALL ERROR ('El valor de C está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',C)
CFFI5=1.86*A
End
```

```
Function CFFI6(Gz)
CFFI6=4.36+((0.036*Gz)/(1+0.0011*Gz))
End
```

```
Function CFFI7(Re)
CFFI7=64/Re
End
```

```
Function CFFI10(Re)
If (Re<=2300) or (Re>=10000) Then CALL ERROR ('El valor de Re está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Re)
CFFI10=0.3164*Re^(-1/4)
EndFunction CFFI11(Re)
If (Re<=10000) or (Re>=100000) Then CALL ERROR ('El valor de Re está fuera
de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Re)
CFFI11=0.184*Re^(-1/5)
End
```

```
Function CFFI12(Re,Pr,B,Ts,Tm,estado)
If (Re<=10000) Then CALL ERROR ('El valor de Re está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Re)
```

```

If (Pr<0.6) or (Pr>100) Then CALL ERROR ('El valor de Pr está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Pr)
If (B<60) Then CALL ERROR ('El valor de B= L/D está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',B)
A=Ts-Tm
If (estado=0) and (A>5) Then CALL ERROR ('El valor de Ts-Tm está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',estado)
If (estado=1) and (A>50) Then CALL ERROR ('El valor de Ts-Tm está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',estado)
If (estado<>0) and (estado<>1) Then CALL ERROR ('La variable estado debe ser 0
para líquidos, 1 para gases',estado)
If (A>0) Then n=0.4 Else n=0.3
CFFI12=0.023*Re^0.8*Pr^n
End

```

```

Function CFFI13(Re,Pr,A,B)
If (Re<=10000) Then CALL ERROR ('El valor de Re está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Re)
If (Pr<0.6) or (Pr>16700) Then CALL ERROR ('El valor de Pr está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Pr)
If (B<60) Then CALL ERROR ('El valor de B=L/D está fuera de rango.Comprueba
Variable info en el menú Options',B)
CFFI13=0.027*Re^0.8*Pr^(1/3)*A^0.14
End

```

```

Function CFFI14(Re,Pr,B)
If (Re<=10000) Then CALL ERROR ('El valor de Re está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Re)
If (Pr<0.6) or (Pr>160) Then CALL ERROR ('El valor de Pr está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Pr)
If (B<60) Then CALL ERROR ('El valor de B=L/D está fuera de rango.Comprueba
Variable info en el menú Options',B)
CFFI14=0.023*Re^0.8*Pr^(1/3)
End

```

```

Function CFFI15(St,Pr,B)
If (B<60) Then CALL ERROR ('El valor de B=L/D está fuera de rango.Comprueba
Variable info en el menú Options',B)
CFFI15=8*St*Pr^(2/3)
End

```

```

Function CFFI16(Re,Pr,A,B)
If (Re>=4000) Then CALL ERROR ('El valor de Re está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Re)
If (Pr<0.46) or (Pr>592) Then CALL ERROR ('El valor de Pr está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Pr)
If (B<60) Then CALL ERROR ('El valor de B=L/D está fuera de rango.Comprueba
Variable info en el menú Options',B)
CFFI16=0.015*Re^0.83*Pr^0.42*A^0.14
End

```

Function CFFI17(Re,Pr,B)

If (Re<=10000) Then CALL ERROR ('El valor de Re está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Re)

If (B<=10) or (B>=400) Then CALL ERROR ('El valor de B=L/D está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',B)

CFFI17=0.036\*Re<sup>0.8</sup>\*Pr<sup>(1/3)</sup>\*B<sup>(-0.055)</sup>

End

Function CFFI18(NuD\_infinity,B)

If (B<=2) or (B>=60) Then CALL ERROR ('El valor de B=L/D está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',B)

If (B<=20) Then

C=1

n=0.7

Else

C=6

n=1

EndIf

CFFI18=NuD\_infinity\*(1+C\*B<sup>(-n)</sup>)

End

Function CFFI19qs(forma,relacion)

If (forma=0) and (relacion<>0) Then CALL ERROR ('con forma=0, el valor de la variable relacion debe ser cero',forma)

If (forma=2) and (relacion<>0) Then CALL ERROR ('con forma=2, el valor de la variable relacion debe ser cero',forma)

If (forma=1) and (relacion<1) Then CALL ERROR ('con forma=1 el valor de la variable relacion debe ser mayor o igual que 1',forma)

If (forma=0) and (relacion=0) Then

CFFI19qs=4.36

EndIf

If (forma=1) and (relacion>=1) and (relacion<1.4) Then

CFFI19qs=3.63+0.375\*(relacion-1)

EndIf

If (forma=1) and (relacion>=1.4) and (relacion<2) Then

CFFI19qs=3.78+0.55\*(relacion-1.4)

EndIf

If (forma=1) and (relacion>=2) and (relacion<3) Then

CFFI19qs=4.11+0.66\*(relacion-2)

EndIf

If (forma=1) and (relacion>=3) and (relacion<4) Then

CFFI19qs=4.77+0.58\*(relacion-3)

EndIf

If (forma=1) and (relacion>=4) and (relacion<8) Then

CFFI19qs=5.35+0.3125\*(relacion-4)

EndIf

If (forma=1) and (relacion>=8) and (relacion<20) Then

CFFI19qs=6.60+0.13583\*(relacion-8)

EndIf

```

If (forma=1) and (relacion>=20) Then
CFFI19qs=8.23
EndIf
If (forma=2) and (relacion=0) Then
CFFI19qs=3
EndIf
End

```

```

Function CFFI19Ts(forma,relacion)
If (forma=0) and (relacion<>0) Then CALL ERROR ('con forma=0, el valor de la
variable relacion debe ser cero',forma)
If (forma=2) and (relacion<>0) Then CALL ERROR ('con forma=2, el valor de la
variable relacion debe ser cero',forma)
If (forma=1) and (relacion<1) Then CALL ERROR ('con forma=1 el valor de la
variable relacion debe ser mayor o igual que 1',forma)
If (forma=0) and (relacion=0) Then
CFFI19Ts=3.66
EndIf
If (forma=1) and (relacion>=1) and (relacion<2) Then
CFFI19Ts=2.98+0.41*(relacion-1)
EndIf
If (forma=1) and (relacion>=2) and (relacion<4) Then
CFFI19Ts=3.39+0.525*(relacion-2)
EndIf
If (forma=1) and (relacion>=4) and (relacion<8) Then
CFFI19Ts=4.44+0.3775*(relacion-4)
EndIf
If (forma=1) and (relacion>=8) and (relacion<20) Then
CFFI19Ts=5.95+0.1325*(relacion-8)
EndIf
If (forma=1) and (relacion>=20) Then
CFFI19Ts=7.54
EndIf
If (forma=2) and (relacion=0) Then
CFFI19Ts=2.35
EndIf
End

```

Function CLFE1(Ra)

If (Ra<10000) or (Ra>1E13) Then CALL ERROR ('El valor de Ra está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Ra)

If (Ra>=10000) and (Ra<1E9) Then

C=0.59

n=1/4

Else

C=0.10

n=1/3

EndIf

CLFE1=C\*Ra^n

End

Function CLFE2(Ra,Pr)

If (Ra<=0.1) or (Ra>=1E9) Then CALL ERROR ('El valor de Ra está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Ra)

CLFE2=0.68+(0.67\*Ra^(1/4))/(1+(0.492/Pr)^(9/16))^(4/9)

End

Function CLFE3(Ra,Pr)

If (Ra<=0.1) or (Ra>=1E12) Then CALL ERROR ('El valor de Ra está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Ra)

CLFE3=(0.825+(0.378\*Ra^(1/6))/(1+(0.492/Pr)^(9/16))^(8/27))^2

End

Function CLFE4(GrNu,Pr,tipo)

If (tipo<>0) and (tipo<>1) Then CALL ERROR ('El valor de tipo deber 0 para nusselt local y 1 para nusselt medio',tipo)

A=GrNu\*Pr

If (A<100000) Then CALL ERROR ('El valor de GrNu\*Pr está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',A)

If (A>1E11) and (A<2E13) Then CALL ERROR ('El valor de GrNu\*Pr está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',A)

If (A>1E16) Then CALL ERROR ('El valor de GrNu\*Pr está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',A)

If (tipo=0) and (A<=1E11) Then

C=0.60

n=1/5

EndIf

If (tipo=0) and (A>=2E13) Then

C=0.568

n=0.22

EndIf

If (tipo=1) and (A<=1E11) Then

C=0.75

n=1/5

EndIf

If (tipo=1) and (A>=2E13) Then

C=0.645

n=0.22

```

EndIf
CLFE4=C*(GrNu*Pr)^n
End

```

```

Function CLFE5(Ra,orientacion)
If (orientacion<>0) and (orientacion<>1) Then CALL ERROR ('El valor de
orientacion deber 0 para superficie superior caliente o inferior fría y 1 para
superficie inferior caliente o superior fría',orientacion)
If (Ra<1E5) and (Ra>3E10) Then CALL ERROR ('El valor de Ra está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Ra)
If (orientacion=1) and (Ra<300000) Then CALL ERROR ('El valor de Ra está
fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Ra)
If (orientacion=0) and (Ra<2E7) Then
C=0.54
n=1/4
EndIf
If (orientacion=0) and (Ra>=2E7) Then
C=0.15
n=1/3
EndIf
If (orientacion=1) and (Ra<=3E10) Then
C=0.27
n=1/4
EndIf
CLFE5=C*(Ra)^n
End

```

```

Function CLFE6(Ra,orientacion)
If (orientacion<>0) and (orientacion<>1) Then CALL ERROR ('El valor de
orientacion deber 0 para superficie superior caliente o inferior fría y 1 para
superficie inferior caliente o superior fría',orientacion)
If (Ra>1E11) Then CALL ERROR ('El valor de Ra está fuera de rango.Comprueba
Variable info en el menú Options',Ra)
If (orientacion=1) and (Ra<1E6) Then CALL ERROR ('El valor de Ra está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Ra)
If (orientacion=0) and (Ra<2E8) Then
C=0.13
n=1/3
EndIf
If (orientacion=0) and (Ra>=2E8) Then
C=0.16
n=1/3
EndIf
If (orientacion=1) and (Ra<=1E11) Then
C=0.58
n=1/5
EndIf
CLFE6=C*(Ra)^n
End

```

Function CLFE7(Ra,theta)

If (Ra<10000) or (Ra>1E13) Then CALL ERROR ('El valor de Ra está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Ra)

If (Ra>=10000) and (Ra<1E9) Then

C=0.59

n=1/4

Else

C=0.10

n=1/3

EndIf

CLFE7=C\*(Ra\*cos(theta))^n

End

Function CLFE8(Ra,theta)

If (Ra<=100000) or (Ra>=1E11) Then CALL ERROR ('El valor de Ra está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Ra)

If (theta>=88) Then CALL ERROR ('El valor de theta está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',theta)

CLFE8=0.56\*(Ra\*cos(theta))^(1/4)

End

Function CLFE9(Ra,theta,Pr)

If (Ra<=100000) or (Ra>=1E11) Then CALL ERROR ('El valor de Ra está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Ra)

Gr=Ra/Pr

If (theta>=88) Then CALL ERROR ('El valor de theta está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',theta)

If (theta<15) Then

Grc=5E9

EndIf

If (theta>=15) and (theta<30) Then

Grc=5E9-((5E9-1E9)/15)\*(theta-15)

EndIf

If (theta>=30) and (theta<60) Then

Grc=1E9-((1E9-1E8)/30)\*(theta-30)

EndIf

If (theta>=60) and (theta<75) Then

Grc=1E8-((1E8-1E6)/15)\*(theta-60)

EndIf

If (theta>=75) Then

Grc=1E6

EndIf

If (Gr>=Grc) Then CALL ERROR ('El valor de Gr es mayor que Gr crítico.Comprueba Variable info en el menú Options',Gr)

CLFE9=0.56\*(Ra\*cos(theta))^(1/4)

End

Function CLFI10(Ra\_1,De,Di,Te,Ti,k,Pr,L)

delta=(De-Di)/2

Ra=(Ra\_1\*(ln(De/Di))^4)/(delta^3\*(Di^(-3/5)+De^(-3/5))^5)

```

If (Ra<1E2) or (Ra>1E7) Then CALL ERROR ('El valor de Ra* está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Ra)
kef=k*0.386*((Ra*Pr)/(0.861+Pr))^(1/4)
CLFI10=2*pi*kef*L*(Ti-Te)/ln(De/Di)
End

```

```

Function CLFE14(Ra)
If (Ra<1E-10) and (Ra>1E12) Then CALL ERROR ('El valor de Ra está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Ra)
If (Ra<1E-2) Then
C=0.675
n=0.058
EndIf
If (Ra>=1E-2) and (Ra<1E2) Then
C=1.020
n=0.148
EndIf
If (Ra>=1E2) and (Ra<1E4) Then
C=0.850
n=0.188
EndIf
If (Ra>=1E4) and (Ra<1E7) Then
C=0.480
n=1/4
EndIf
If (Ra>=1E7) Then
C=0.125
n=1/3
EndIf
CLFE14=C*(Ra)^n
End

```

```

Function CLFE15(Ra,Pr)
If (Ra<1E-4) or (Ra>1E9) Then CALL ERROR ('El valor de Ra está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Ra)
CLFE15=0.36+(0.518*Ra^(1/4))/(1+(0.559/Pr)^(9/16))^(4/9)
End

```

```

Function CLFE16(Ra,Pr)
If (Ra<=1E-5) or (Ra>=1E12) Then CALL ERROR ('El valor de Ra está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Ra)
CLFE16=(0.60+(0.378*Ra^(1/6))/(1+(0.559/Pr)^(9/16))^(8/27))^2
End

```

```

Function CLFE17(Ra,Pr)
If (Ra<=1) or (Ra>=1E5) Then CALL ERROR ('El valor de Ra está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Ra)
If (Pr<0.9) or (Pr>1.1) Then CALL ERROR ('El valor de Pr está fuera de rango,
debe estar próximo a 1.Comprueba Variable info en el menú Options',Pr)
CLFE17=2+0.43*Ra^(1/4)

```

End

Function CLFE18(Ra,Pr)

If (Ra<=3E5) or (Ra>=8E8) Then CALL ERROR ('El valor de Ra está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Ra)

A=2+0.50\*Ra^(1/4)

If (A<10) or (A>90) Then CALL ERROR ('El valor de nusselt está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',A)

CLFE18=A

End

Function CLFE19(Ra,Pr)

If (Ra>1E11) Then CALL ERROR ('El valor de Ra está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Ra)

If (Pr<0.7) Then CALL ERROR ('El valor de Pr está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Pr)

CLFE19=2+(0.589\*Ra^(1/4))/(1+(0.469/Pr)^(9/16))^(4/9)

End

## ***Convección Libre Flujo Interno***

Function CLFI1(Ra,Pr)

If (Ra<=3E5) or (Ra>7E9) Then CALL ERROR ('El valor de Ra está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Ra)

CLFI1=0.069\*Ra^(1/3)\*Pr^0.074

End

Function CLFI2(Ra,C)

If (Ra<1E2) or (Ra>2E7) Then CALL ERROR ('El valor de Ra está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Ra)

If (C<1) or (C>110) Then CALL ERROR ('El valor de C está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',C)

A=0.0605\*Ra^(1/3)

B=(1+((0.104\*Ra^0.293)/(1+(6310/Ra)^1.36))^3)^(1/3)

D=0.242\*(Ra\*C)^0.272

CLFI2=max(A,B,D)

End

Function CLFI3(Ra,C,theta)

If (theta>180) or (theta<=90) Then CALL ERROR ('El valor de theta está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',theta)

CLFI3=1+(CLFI2(Ra,C)-1)\*sin(theta)

End

Function CLFI4(Ra,C,theta,thetacrit)

If (theta<=thetacrit) or (theta>=90) Then CALL ERROR ('El valor de theta está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',theta)

CLFI4=CLFI2(Ra,C)\*(sin(theta))^(1/4)

End

Function CLFI5(Ra,C,theta,thetacrit,Pr)

If (theta>=thetacrit) or (theta<=0) Then CALL ERROR ('El valor de theta está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',theta)

If (C>10) Then CALL ERROR ('El valor de C está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',C)

A=0.0605\*Ra^(1/3)

B=(1+((0.104\*Ra^0.293)/(1+(6310/Ra)^1.36))^3)^(1/3)

D=0.242\*(Ra\*C)^0.272

Nu#90=max(A,B,D)

Nu#0=0.069\*Ra^(1/3)\*Pr^0.074

CLFI5=Nu#0\*((Nu#90\*(sin(thetacrit))^(1/4))/Nu#0)^(theta/thetacrit)

End

Function CLFI6(Ra,C,theta,thetacrit)

If (theta>=thetacrit) or (theta<=0) Then CALL ERROR ('El valor de theta está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',theta)

If (C<=10) Then CALL ERROR ('El valor de C está fuera de rango.Comprueba Variable info en el menú Options',C)

```

A=1-(1708/Ra*cos(theta))
If (A<0) Then
A=0
EndIf
B=((Ra*cos(theta)/5830)^(1/3))-1
If (B<0) Then
B=0
EndIf
CLFI6=1+1.44*A*(1-((1708*(sin(1.8*theta))^1.6)/(Ra*cos(theta))))+B
End

```

```

Function CLFI7(Ra,B)
If (B<0.75) or (B>2) Then CALL ERROR ('El valor de B está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',B)
CLFI7=0.55*Ra^(1/4)
End

```

```

Function CLFI8(Ra)
If (Ra<=1E4) or (Ra>=1E9) Then CALL ERROR ('El valor de Ra está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Ra)
CLFI8=0.59*Ra^(1/4)
End

```

```

Function CLFI9(Ra)
If (Ra<1E9) or (Ra>=1E12) Then CALL ERROR ('El valor de Ra está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Ra)
CLFI9=0.13*Ra^(1/3)
End

```

```

Function CLFI10(Ra_1,De,Di,Te,Ti,k,Pr,L)
delta=(De-Di)/2
Ra=(Ra_1*(ln(De/Di))^4)/(delta^3*(Di^(-3/5)+De^(-3/5))^5)
If (Ra<1E2) or (Ra>1E7) Then CALL ERROR ('El valor de Ra* está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Ra)
kef=k*0.386*((Ra*Pr)/(0.861+Pr))^(1/4)
CLFI10=2*pi*kef*L*(Ti-Te)/ln(De/Di)
End

```

```

Function CLFI11(Ral,De,Di,Te,Ti,k,Pr,)
delta=(De-Di)/2
Ra=(Ral*delta)/((Di*De)^4*(Di^(-7/5)+De^(-7/5))^5)
If (Ra<=1E2) or (Ra>=1E4) Then CALL ERROR ('El valor de Ra* está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options',Ra)
kef=k*0.74*((Ra*Pr)/(0.861+Pr))^(1/4)
CLFI11=pi*kef*Di*De*(Ti-Te)/delta
End

```

## Condensación

Function

```
CCONDENFE1(rho_liq,rho_vap,h_g1,k_l,mu_liq,Tsat,Ts,Tv,Cpl,Cpv,x,Re,theta)
If (Re>=1800) Then CALL ERROR ('El valor de Re está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options', Re)
hglprima=h_g1+0.68*Cpl*(Tsat-Ts)+Cpv*(Tv-Tsat)
CCONDENFE1=((9.81*cos(theta)*rho_liq*(rho_liq-
rho_vap)*hglprima*k_l^3)/(4*mu_liq*(Tv-Ts)*x))^(1/4)
End
```

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

```
If (Re>=1800) Then CALL ERROR ('El valor de Re está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options', Re)
If (Pr<0.01) Then CALL ERROR ('El valor de Pr está fuera de rango.Comprueba
Variable info en el menú Options', Pr)
CCONDENFE2=1.76*Re^(-1/3)*((9.81*cos(theta)*rho_liq*(rho_liq-
rho_vap)*k_l^3)/(mu_liq^2))^(1/3)
End
```

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

```
If (Re<=1800) Then CALL ERROR ('El valor de Re está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options', Re)
CCONDENFE3=0.0076*Re^(0.4)*((9.81*cos(theta)*rho_liq*(rho_liq-
rho_vap)*k_l^3)/(mu_liq^2))^(1/3)
End
```

Function

```
CCONDENFE4(rho_liq,rho_vap,h_g1,k_l,mu_liq,Tsat,Ts,Tv,Cpl,Cpv,x,Re)
If (Re>=1800) Then CALL ERROR ('El valor de Re está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options', Re)
hglprima=h_g1+0.68*Cpl*(Tsat-Ts)+Cpv*(Tv-Tsat)
CCONDENFE4=((9.81*rho_liq*(rho_liq-
rho_vap)*hglprima*k_l^3)/(4*mu_liq*(Tv-Ts)*x))^(1/4)
End
```

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

```
If (Re>=1800) Then CALL ERROR ('El valor de Re está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options', Re)
CCONDENFE5=1.76*Re^(-1/3)*((9.81*rho_liq*(rho_liq-
rho_vap)*k_l^3)/(mu_liq^2))^(1/3)
End
```

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

```
If (Re<=1800) Then CALL ERROR ('El valor de Re está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options', Re)
CCONDENFE6=0.0076*Re^(0.4)*((9.81*rho_liq*(rho_liq-
rho_vap)*k_l^3)/(mu_liq^2))^(1/3)
End
```

Function

```
CCONDENFE7(rho_liq,rho_vap,h_gl,k_l,mu_liq,Tsat,Ts,Tv,Cpl,Cpv,N,D,Re)
If (Re>=3600) Then CALL ERROR ('El valor de Re está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options', Re)
hglprima=h_gl+0.68*Cpl*(Tsat-Ts)+Cpv*(Tv-Tsat)
Ja=Cpl*(Tv-Ts)/h_gl
CCONDENFE7=0.725*(1+0.2*Ja*(N-1))*((9.81*rho_liq*(rho_liq-
rho_vap)*hglprima*k_l^3)/(4*mu_liq*(Tv-Ts)*N*D))^(1/4)
End
```

Function

```
CCONDENFI8(rho_liq,rho_vap,h_gl,k_l,mu_liq,Tsat,Ts,Tv,Cpl,Cpv,D,Re_v,theta)
If (Re_v>=35000) Then CALL ERROR ('El valor de Re está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options', Re_v)
hglprima=h_gl+0.68*Cpl*(Tsat-Ts)+Cpv*(Tv-Tsat)
CCONDENFE8=0.555*((9.81*rho_liq*(rho_liq-
rho_vap)*hglprima*k_l^3)/(mu_liq*(Tv-Ts)*D))^(1/4)
End
```

Function CCONDENFI9(Re\_liq,Re\_vap,rho\_liq,rho\_vap,Pr\_liq)

```
If (Re_liq<=5000) Then CALL ERROR ('El valor de Re_liq está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options', Re_liq)
If (Re_vap<=20000) Then CALL ERROR ('El valor de Re_vap está fuera de
rango.Comprueba Variable info en el menú Options', Re_vap)
Re_D=Re_liq+(Re_vap*(rho_liq/rho_vap)^(1/2))
CCONDENFE9=0.0265*(Re_D^0.8)*(Pr_liq^(1/3))
End
```

## ***Ebullición***

Function

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

A=sqrt(9.81\*(rho\_liq-rho\_vap)/sigma)

B=((Cpl\*DELTAT\_e)/(C\_s\_f\*h\_lg\*(Pr\_l^n)))^3

EBULLICION1=mu\_liq\*h\_lg\*A\*B

End

Function EBULLICION2(h\_lg,rho\_liq,rho\_vap,sigma)

A=(pi/24)\*rho\_vap\*h\_lg

B=((sigma\*9.81\*(rho\_liq-rho\_vap))/(rho\_vap^2))^(1/4)

C=(1+(rho\_vap/rho\_liq))^(1/2)

EBULLICION2=A\*B\*C

End

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

Lprima=L\*sqrt(9.81\*(rho\_liq-rho\_vap)/sigma)

If (geometria=1) and (Lprima<2.7) Then CALL ERROR ('el valor de L\*sqrt(9.81\*(rho\_liq-rho\_vap)/sigma) está fuera de las restricciones.Comprueba Variable info en el menu Options',Lprima)

If (geometria=1) and (Lprima>=2.7) Then

FL=1.14

EBULLICION3=FL\*0.131\*sqrt(rho\_vap)\*h\_lg\*(sigma\*9.81\*(rho\_liq-rho\_vap))^(1/4)

EndIf

If (geometria=2) and (Lprima<0.15) Then CALL ERROR ('El valor de L\*sqrt(9.81\*(rho\_liq-rho\_vap)/sigma) está fuera de las restricciones.Comprueba Variable info en el menu Options',Lprima)

If (geometria=2) and (Lprima>=0.15) Then

FL=0.89+2.27\*exp(-3.44\*sqrt(Lprima))

EBULLICION3=FL\*0.131\*sqrt(rho\_vap)\*h\_lg\*(sigma\*9.81\*(rho\_liq-rho\_vap))^(1/4)

EndIf

If (geometria=3) and (Lprima<0.15) Then CALL ERROR ('El valor de L\*sqrt(9.81\*(rho\_liq-rho\_vap)/sigma) está fuera de las restricciones.Comprueba Variable info en el menu Options',Lprima)

If (geometria=3) and (Lprima>=4.26) Then

FL=0.84

EBULLICION3=FL\*0.131\*sqrt(rho\_vap)\*h\_lg\*(sigma\*9.81\*(rho\_liq-rho\_vap))^(1/4)

EndIf

If (geometria=3) and (Lprima<4.26) Then

FL=1.734\*(Lprima)^(-1/2)

EBULLICION3=FL\*0.131\*sqrt(rho\_vap)\*h\_lg\*(sigma\*9.81\*(rho\_liq-rho\_vap))^(1/4)

EndIf

If (geometria=4) and (Lprima<4) Then CALL ERROR ('El valor de

L\*sqrt(9.81\*(rho\_liq-rho\_vap)/sigma) está fuera de las restricciones.Comprueba Variable info en el menu Options',Lprima)

If (geometria=4) and (Lprima>=4) Then

```

FL=0.90
EBULLICION3=FL*0.131*sqrt(rho_vap)*h_lg*(sigma*9.81*(rho_liq-
rho_vap))^(1/4)
EndIf
End

```

```

MODULE EBULLICION4 (h_lg,rho_liq,rho_vap,mu_vap,k_vap,T_s,T_sat,Cpv,
epsilon, alpha,D,h)
h_d=0.62*((k_vap^3*rho_vap*(rho_liq-rho_vap)*9.81*(h_lg+(0.4*Cpv*(T_s-
T_sat))))/(mu_vap*D*(T_s-T_sat)))^(1/4)
A=(1/epsilon)+(1/alpha)-1
h_r=(sigma*(T_s^4-T_sat^4))/(A*(T_s-T_sat))
x=(h_d*(h_d/x)^(1/3))+h_r
h=x
End

```

```

Function
EBULLICION5(mu_liq,h_lg,rho_liq,rho_vap,sigma,Cpl,C_s_f,Pr_l,n,DELTAT_e)
A=sqrt(9.81*(rho_liq-rho_vap)/sigma)
B=((Cpl*DELTAT_e)/(C_s_f*h_lg*(Pr_l^n)))^3
EBULLICION5=mu_liq*h_lg*A*B
End

```

```

Function
EBULLICION6(mu_liq,h_lg,rho_liq,rho_vap,sigma,Cpl,C_s_f,Pr_l,n,DELTAT_e)
A=sqrt(9.81*(rho_liq-rho_vap)/sigma)
B=((Cpl*DELTAT_e)/(C_s_f*h_lg*(Pr_l^n)))^3
EBULLICION6=mu_liq*h_lg*A*B
End

```

```

Function
EBULLICION7(D,DELTAT_e,DELTAP_sat,G,x,sigma,Cpl,h_lg,rho_liq,rho_vap,mu_l
iq,mu_vap,k_liq,Pr)
fi=((k_liq^0.79)*(Cpl^0.45)*(rho_liq^0.49))/((sigma^0.5)*(mu_liq^0.29)*(h_lg^0.24)*
(rho_liq^0.24))
X_tt=(((1-x)/x)^0.9)*((rho_liq/rho_vap)^0.5)*((mu_liq/mu_vap)^0.1)
y=1/X_tt
F=0.99597+1.7772*y-0.077198*y^2+0.0032843*y^3-0.000076809*y^4+8.8730E-
07*y^5-3.9372E-09*y^6
Re_liq=(G*(1-x)*D)/mu_liq
Re_TP=(F^1.25)*Re_liq
S=0.96172-0.000010368*Re_TP+5.7136E-11*Re_TP^2-1.6500E-
16*Re_TP^3+2.5107E-22*Re_TP^4-1.9052E-28*Re_TP^5+5.6741E-35*Re_TP^6
h_EN=0.00122*fi*(DELTAP_sat^0.75)*(DELTAT_e^0.24)*S
h_C=0.023*(k_liq/D)*(Re_liq^0.8)*(Pr^0.4)*F
EBULLICION7=h_C+h_EN
END

```

## 4. Radiación

	1 lambdaT [mE-6*K]	2 F <sub>0,λ</sub>
Row 2	400	0
Row 3	600	0
Row 4	800	0.000016
Row 5	1000	0.000321
Row 6	1200	0.002134
Row 7	1400	0.00779
Row 8	1600	0.01972
Row 9	1800	0.03934
Row 10	2000	0.06673
Row 11	2200	0.1009
Row 12	2400	0.1403
Row 13	2600	0.1831
Row 14	2800	0.2279
Row 15	2898	0.2501
Row 16	3000	0.2732
Row 17	3200	0.3181
Row 18	3400	0.3617
Row 19	3600	0.4036
Row 20	3800	0.4434
Row 21	4000	0.4809
Row 22	4200	0.516
Row 23	4400	0.5488
Row 24	4600	0.5793
Row 25	4800	0.6076
Row 26	5000	0.6337
Row 27	5200	0.959
Row 28	5400	0.6804
Row 29	5600	0.701
Row 30	5800	0.7202
Row 31	6000	0.7378

	1 lambdaT [mE-6*K]	2 F <sub>0,λ</sub>
Row 32	6200	0.7541
Row 33	6400	0.7692
Row 34	6600	0.7832
Row 35	6800	0.7961
Row 36	7000	0.8081
Row 37	7200	0.8192
Row 38	7400	0.8295
Row 39	7600	0.8391
Row 40	7800	0.848
Row 41	8000	0.8563
Row 42	8500	0.8746
Row 43	9000	0.89
Row 44	9500	0.9031
Row 45	10000	0.9142
Row 46	10500	0.9237
Row 47	11000	0.9319
Row 48	11500	0.94
Row 49	12000	0.9451
Row 50	13000	0.9551
Row 51	14000	0.9629
Row 52	15000	0.97
Row 53	16000	0.9738
Row 54	18000	0.9809
Row 55	20000	0.9856
Row 56	25000	0.9922
Row 57	30000	0.9953
Row 58	40000	0.998
Row 59	50000	0.999
Row 60	75000	0.9997
Row 61	100000	0.9999

Function FactorF\_0\_lambda(lambdaT)

FactorF\_0\_lambda=Interpolate1(lambdaT,F\_0\_lambda,lambdaT=lambdaT)

End

```
Function FFORMA2D1(h,w)
a=h/w
FFORMA2D1=sqrt(1+a^2)-a
End
```

```
Function FFORMA2D2(alpha)
FFORMA2D2=1-sin(alpha/2)
End
```

```
Function FFORMA2D3(h,w)
a=h/w
FFORMA2D3=(1/2)*(1+a-sqrt(1+a^2))
End
```

```
Function FFORMA2D4(S1,S2,S3)
FFORMA2D4=(S1+S2-S3)/(2*S1)
End
```

```
Function FFORMA2D5(a,b,c,r)
arg1=(a/c)
arg2=(b/c)
FFORMA2D5=(r/(b-a))*((arctan(arg2)*Convert(deg,rad))-
(arctan(arg1)*Convert(deg,rad)))
End
```

```
Function FFORMA2D6(s,D)
X=1+(s/D)
FFORMA2D6=(1/pi)*(sqrt((X^2)-1)+(arcsin(1/X)*Convert(deg,rad))-X)
End
```

```
Function FFORMA2D7(r1,r2,Fij$)
If (Fij$='F12') Then
FFORMA2D7=1
EndIf
If (Fij$='F21') Then
FFORMA2D7=r1/r2
EndIf
If (Fij$='F22') Then
FFORMA2D7=1-(r1/r2)
EndIf
End
```

```
Function FFORMA3D8(a,b,c)
X=a/c
Y=b/c
XX=1+X^2
YY=1+Y^2
AA=X/sqrt(YY)
BB=Y/sqrt(XX)
```

```

FFORMA3D8=(2/(pi*X*Y))*((0.5*ln((XX*YY)/(1+X^2+Y^2)))+(X*sqrt(YY)*(a
rctan(AA)*Convert(deg,rad)))+(Y*sqrt(XX)*(arctan(BB)*Convert(deg,rad)))-
(X*(arctan(X)*Convert(deg,rad)))-(Y*(arctan(Y)*Convert(deg,rad))))
End

```

```

Function FFORMA3D9(w,l,h)
HH=h/l
WW=w/l
arg1=(1/WW)
arg2=(1/HH)
arg3=((HH^2+WW^2)^(-1/2))
A=((1+WW^2)*(1+HH^2))/(1+WW^2+HH^2)
B=((WW^2)*(1+WW^2+HH^2))/((1+WW^2)*(HH^2+WW^2))^(WW^2)
C=((HH^2)*(1+WW^2+HH^2))/((1+HH^2)*(HH^2+WW^2))^(HH^2)
FFORMA3D9=(1/(pi*WW))*((WW*(arctan(arg1)*Convert(deg,rad)))+(HH*(arcta
n(arg2)*Convert(deg,rad)))-
(sqrt(HH^2+WW^2)*(arctan(arg3)*Convert(deg,rad)))+(0.25*ln(A*B*C)))
End

```

```

Function FFORMA3D10(r1,r2,h)
R_1=r1/h
R_2=r2/h
X=1+((1+R_2^2)/(R_1^2))
a=R_2/R_1
FFORMA3D10=0.5*(X-sqrt((X^2)-(4*a^2)))
End

```

```

Function FFORMA3D11(r1,r2,Fij$)
If (Fij$='F12') Then
FFORMA3D11=1
EndIf
If (Fij$='F11') Then
FFORMA3D11=0
EndIf
If (Fij$='F21') Then
FFORMA3D11=(r1/r2)^2
EndIf
If (Fij$='F22') Then
FFORMA3D11=1-(r1/r2)^2
EndIf
End

```

```

Function FFORMA3D12(L1,L2,D)
X=L1/D
Y=L2/D
XX=sqrt(1+X^2)
YY=sqrt(1+Y^2)
FFORMA3D12=(1/(2*pi))*(((X/XX)*(arctan(Y/XX)*Convert(deg,rad)))+(Y/YY)
*(arctan(X/YY)*Convert(deg,rad)))
End

```

```
Function FFORMA3D13(L,H,D)
X=D/L
Y=H/L
A=1/sqrt(1+(Y/X)^2)
B=1/sqrt(X^2+Y^2)
FFORMA3D13=(1/(2*pi))*((arctan(1/X)*Convert(deg,rad))-
(A*arctan(B)*Convert(deg,rad)))
End
```

```
Function FFORMA3D14(L1,L2,D)
X=L1/D
Y=L2/D
A=(X*Y)/(sqrt(1+X^2+Y^2+X^2+Y^2))
FFORMA3D14=(1/(4*pi))*arcsin(A)*Convert(deg,rad)
End
```

---

## 5. Intercambiadores de calor

---

Function DTLM\_FP(Tce,Tcs,Tfe,Tfs)

If (Tfs>Tcs) Then CALL ERROR ('La temperatura de salida del fluido frío no puede exceder a la temperatura de salida del fluido caliente')

DELTAT\_1=Tce-Tfe

DELTAT\_2=Tcs-Tfs

DTLM\_FP=(DELTAT\_2-DELTAT\_1)/(ln(DELTAT\_2/DELTAT\_1))

End

Function DTLM\_FC(Tce,Tcs,Tfe,Tfs)

If (Tfe>Tcs) Then CALL ERROR ('La temperatura de entrada del fluido frío no puede exceder a la temperatura de salida del fluido caliente')

DELTAT\_1=Tce-Tfs

DELTAT\_2=Tcs-Tfe

DTLM\_FC=(DELTAT\_2-DELTAT\_1)/(ln(DELTAT\_2/DELTAT\_1))

End

Function EFICIENCIA(C\_c,C\_f,NTU,tipo,n)

If (n=0) Then CALL ERROR ('El valor de n no puede ser cero, toma el valor del número de pasos por la carcasa, cuando el valor de la variable tipo=4, y toma el valor 1 en cualquier otro caso')

If (tipo<>1) and (tipo<>2) and (tipo<>3) and (tipo<>4) and (tipo<>5) and (tipo<>6) and (tipo<>7) Then CALL ERROR ('el valor de la variable tipo no es correcto, solo puede tomar valores enteros desde 1 hasta 7, ambos incluidos')

Cmin=min(C\_c,C\_f)

Cmax=max(C\_c,C\_f)

Cr=(Cmin/Cmax)

If (Cr=0) Then

EFICIENCIA=1-exp(-NTU)

EndIf

If (tipo=1) Then

EFICIENCIA=(1-exp(-NTU\*(1+Cr)))/(1+Cr)

EndIf

If (tipo=2) and (Cr<1) Then

EFICIENCIA=(1-exp(-NTU\*(1-Cr)))/(1-(Cr\*exp(-NTU\*(1-Cr))))

EndIf

If (tipo=2) and (Cr=1) Then

EFICIENCIA=NTU/(1+NTU)

EndIf

If (tipo=3) Then

A=1+exp(-NTU\*((1+Cr^2)^(1/2)))

B=1-exp(-NTU\*((1+Cr^2)^(1/2)))

EFICIENCIA=2\*(1/(1+Cr+(((1+Cr^2)^(1/2))\*A/B))))

EndIf

```

If (tipo=4) and (Cr<1) Then
A=1+exp(-(NTU/n)*((1+Cr^2)^(1/2)))
B=1-exp(-(NTU/n)*((1+Cr^2)^(1/2)))
C=2*(1/(1+Cr+(((1+Cr^2)^(1/2))*(A/B))))
X=(((1-(C*Cr))/(1-C))^n)-1
Y=(((1-(C*Cr))/(1-C))^n)-Cr
EFICIENCIA=X*(Y^(-1))
EndIf
If (tipo=4) and (Cr=1) Then
Cr_2=Cr-0.0001
A=1+exp(-(NTU/n)*((1+Cr_2^2)^(1/2)))
B=1-exp(-(NTU/n)*((1+Cr_2^2)^(1/2)))
C=2*(1/(1+Cr_2+(((1+Cr_2^2)^(1/2))*(A/B))))
X=(((1-(C*Cr_2))/(1-C))^n)-1
Y=(((1-(C*Cr_2))/(1-C))^n)-Cr_2
EFICIENCIA=X*(Y^(-1))
EndIf
If (tipo=5) and (Cr>0) Then
A1=((Cr)^(-1))*NTU^(0.22)
A2=exp(-Cr*(NTU^0.78))-1
EFICIENCIA=1-exp(A1*A2)
EndIf
If (tipo=6) and (Cr>0) Then
EFICIENCIA=(1/Cr)*(1-exp(-Cr*(1-exp(-NTU))))
EndIf
If (tipo=7) and (Cr>0) Then
EFICIENCIA=1-exp(-(1/Cr)*(1-exp(-Cr*NTU)))
EndIf
End

```

```

Function NTU_epsilon(C_c,C_f,epsilon,tipo,n)
If (n=0) Then CALL ERROR ('El valor de n no puede ser cero, toma el valor del
número de pasos por la carcasa, cuando el valor de la variable tipo=4, y toma el
valor 1 en cualquier otro caso')
If (tipo<>1) and (tipo<>2) and (tipo<>3) and (tipo<>4) and (tipo<>5) and (tipo<>6)
Then CALL ERROR ('El valor de la variable tipo no es correcto, solo puede tomar
valores enteros desde 1 hasta 6, ambos incluidos')
Cmin=min(C_c,C_f)
Cmax=max(C_c,C_f)
Cr=(Cmin/Cmax)
If (Cr=0) Then
NTU_epsilon=-ln(1-epsilon)
EndIf
If (tipo=1) Then
NTU_epsilon=-((ln(1-(epsilon*(1+Cr))))/(1+Cr))
EndIf
If (tipo=2) and (Cr<1) Then
NTU_epsilon=(1/(Cr-1))*ln((epsilon-1)/((epsilon*Cr)-1))
EndIf
If (tipo=2) and (Cr=1) Then

```

```

NTU_epsilon=epsilon/(1-epsilon)
EndIf
If (tipo=3) and (Cr>0) Then
E=((2/epsilon)-(1+Cr))/((1+Cr^2)^(1/2))
NTU_epsilon=-(((1+Cr^2)^(-1/2))*ln((E-1)/(E+1)))
EndIf
If (tipo=4) and (Cr<1) Then
F=(((epsilon*Cr)-1)/(epsilon-1))^(1/n)
epsilon_1=(F-1)/(F-Cr)
E=((2/epsilon_1)-(1+Cr))/((1+Cr^2)^(1/2))
NTU=-(((1+Cr^2)^(-1/2))*ln((E-1)/(E+1)))
NTU_epsilon=n*NTU
EndIf
  If (tipo=4) and (Cr=1) Then
Cr_2=Cr-0.001
F=(((epsilon*Cr_2)-1)/(epsilon-1))^(1/n)
epsilon_1=(F-1)/(F-Cr_2)
E=((2/epsilon_1)-(1+Cr_2))/((1+Cr_2^2)^(1/2))
NTU=-(((1+Cr_2^2)^(-1/2))*ln((E-1)/(E+1)))
NTU_epsilon=n*NTU
EndIf
If (tipo=5) and (Cr>0) Then
NTU_epsilon=-((ln(1+((1/Cr)*ln(1-(epsilon*Cr))))))
EndIf
If (tipo=6) and (Cr>0) Then
NTU_epsilon=-((1/Cr)*ln((Cr*ln(1-epsilon))+1))
EndIf
End

```

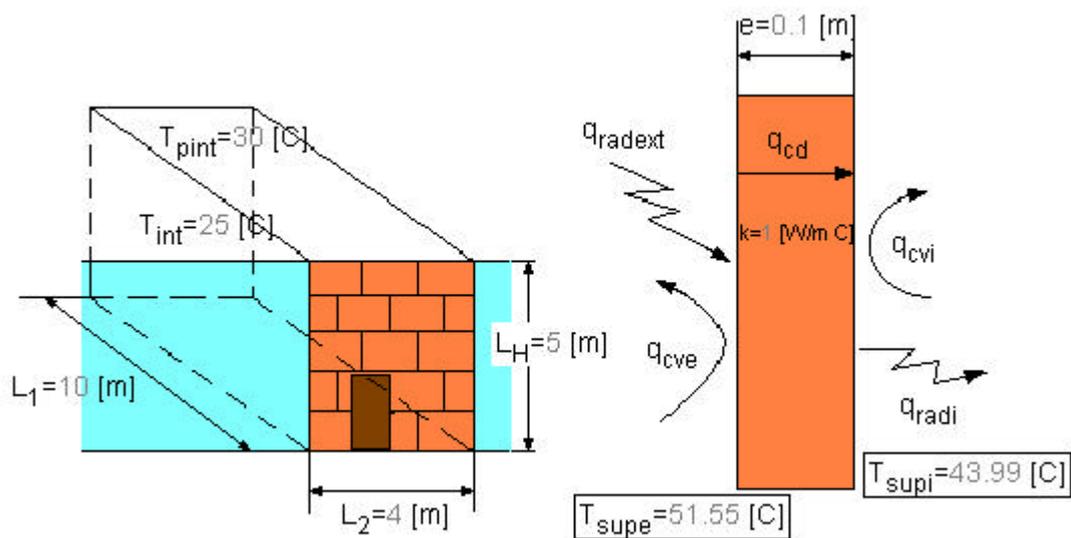
```

Function FactordecorreccionDTLM(Tce,Tcs,Tfe,Tfs,C_c,C_f,tipo,n)
If (tipo<>3) and (tipo<>4) and (tipo<>5) and (tipo<>6) Then CALL ERROR ('El
valor de la variable tipo no es correcto, solo puede tomar valores enteros desde 3
hasta 6, ambos incluidos')
Cmin=min(C_c,C_f)
Cmax=max(C_c,C_f)
If (Cmin=C_c) Then
epsilon=(Tce-Tcs)/(Tce-Tfe)
DELTATmin=Tce-Tcs
Else
epsilon=(Tfs-Tfe)/(Tce-Tfe)
DELTATmin=Tfs-Tfe
EndIf
NTU=NTU_epsilon(C_c,C_f,epsilon,tipo,n)
DTLM=DTLM_FC(Tce,Tcs,Tfe,Tfs)
FactordecorreccionDTLM=DELTATmin/(NTU*DTLM)
End

```

# Colección De Problemas De *Transferencia De Calor*

## *Mediante EES*



---

## Índice

---

1. Introducción.....	3
2. Guía práctica.....	5
3. Conducción en régimen permanente.....	17
3.1. Problema 1.....	17
3.2. Problema 2.....	20
4. Conducción en régimen transitorio.....	22
4.1. Problema 3.....	22
4.2. Problema 4.....	24
4.3. Problema 5.....	26
4.4. Problema 6.....	29
5. Aletas.....	32
5.1. Problema 7.....	32
6. Convección.....	35
6.1. Problema 8.....	35
6.2. Problema 9.....	37
6.3. Problema 10.....	39
6.4. Problema 11.....	41
6.5. Problema 12.....	44
7. Radiación.....	46
7.1. Problema 13.....	46
7.2. Problema 14.....	48
7.3. Problema 15.....	50
7.4. Problema 16.....	52
7.6. Problema 17.....	55
8. Mecanismos combinados.....	58
8.1. Problema 18.....	58
8.2. Problema 19.....	61

9. Intercambiadores de calor.....	64
9.1. Problema 20.....	64
9.2. Problema 21.....	66



# 1. Introducción

---

Aquí se presenta una colección de problemas donde se ponen de manifiesto todos los mecanismos de transferencia, conducción, convección y radiación. En la resolución de estos problemas se ha pretendido conjugar todas las posibilidades que ofrece el programa EES. Las aplicaciones más usuales son las siguientes:

- Uso de **Diagram Window**, utilizado para representar esquemáticamente el problema, ayudando a un mejor entendimiento del mismo y a plantear las ecuaciones para su solución.
- Uso de las **Thermophysical Property Functions** (funciones de propiedades termofísicas). Esto es muy importante, ya que nos permite poner las propiedades termofísicas (viscosidad, conductividad, número de Prandtl...) en función de variables como la temperatura, y poder resolver el problema sin iterar, haciéndolo el propio programa.
- Uso de las **User library routines** (funciones de librería) y **Modules**. Permite usar todas las funciones desarrolladas por el usuario, y en este caso funciones relacionadas con todas las aplicaciones de la transferencia de calor, como las correlaciones, factores de forma, ábacos...
- Uso de **Parametric Table Window**. Esta opción nos permite resolver el problema tantas veces como queramos en función de una o más variables del problema. Los valores de las variables paramétricas se introducen en una tabla, y el programa resuelve el problema para cada valor diferente de estas variables.
- Uso de **Plot Windows**. Las distintas soluciones obtenidas con la tabla paramétrica podemos representarlas gráficamente mediante este comando. Tenemos que elegir las variables que queremos representar y el programa nos proporciona la curva, y otras opciones para modificar ejes, ponerle nombre al gráfico...

En el siguiente punto, guía práctica, se dará más detalles del uso de estas herramientas, además de explicar también casi lo más importante, las estimaciones iniciales de las variables, ya que eso es fundamental para que el problema converja y nos de una buena solución.

La colección consta de 21 problemas, alguno de ellos con subapartados de un problema principal, y se encuentran repartidos entre los siguientes temas:

- Conducción en régimen permanente.
- Conducción en régimen transitorio.
- Aletas.
- Convección.
- Radiación.
- Mecanismos combinados.
- Intercambiadores de calor.



## 2. Guía Práctica

---

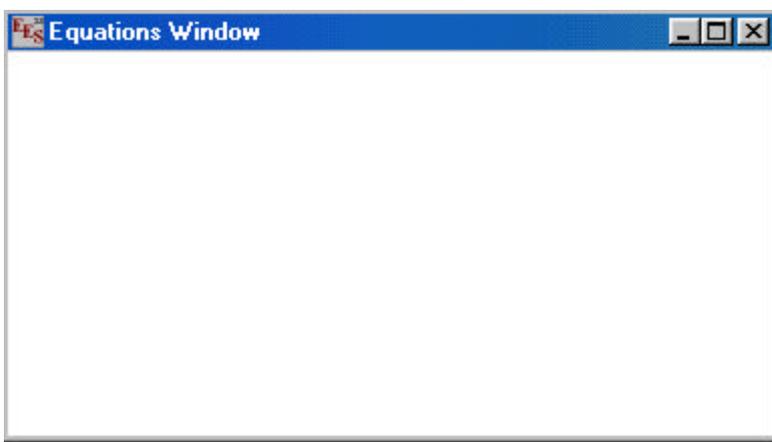
Basándonos en problemas de la colección se va a explicar cómo se utilizan las herramientas mencionadas en la introducción. No van a ser vistas con demasiado detalle puesto que existe un manual de usuario del programa EES donde se tratan con más profundidad, pero sí lo suficiente para tener unas ideas básicas.

Los apartados que veremos son:

- **Equations Window** (ventana de ecuaciones).
- **Unit System** (sistema de unidades).
- **Thermophysical Property Functions** (funciones de propiedades termofísicas).
- **User library routines** (funciones de librería) y **Modules**.
- **Variable Info** (estimaciones iniciales).
- **Parametric Table Window** (tabla paramétrica).
- **Plot Windows** (representaciones gráficas).
- **Diagram Window**.

### *Equations Window*

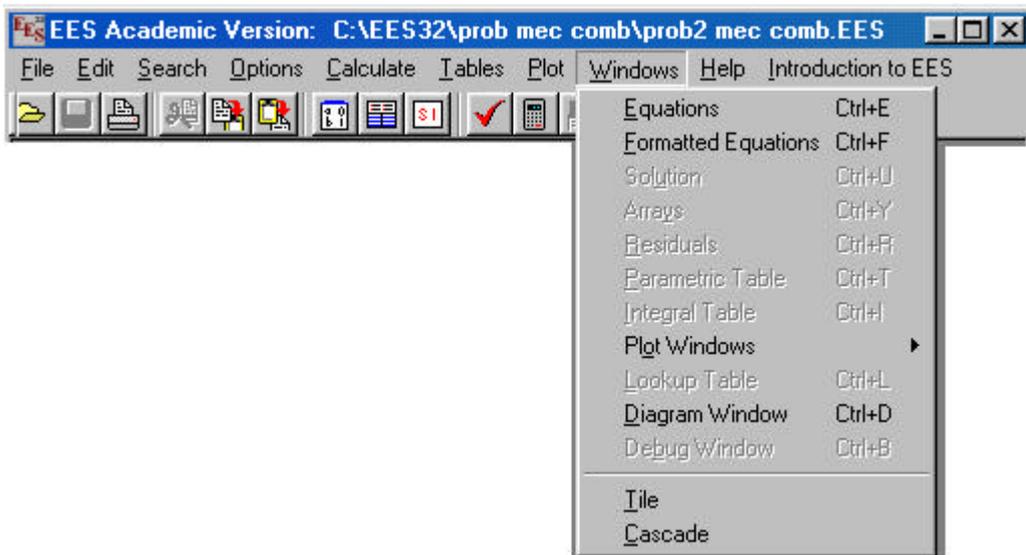
Cuando abrimos un archivo nuevo nos aparece la ventana de ecuaciones (**Equations window**), y ahí es donde escribimos las ecuaciones para la resolución del problema.



También podemos escribir texto si lo encerramos entre llaves, o entre comillas dobles. Si es entre comillas dobles el texto aparece también en **Formatted Equations Window**, donde se presentan las ecuaciones en formato matemático.

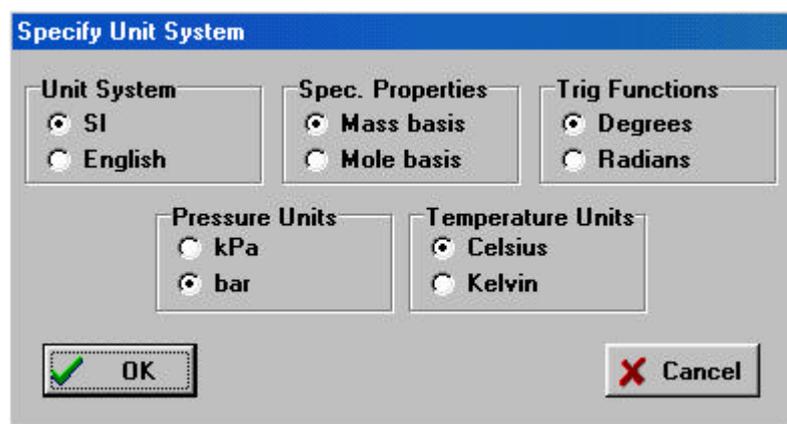
Pueden utilizarse los comandos de edición, cortar, copiar, pegar, que se encuentran en el menú **Edit**, de manera normal a cualquier procesador de texto.

Para hacer activa una ventana o para hacerla visible si no estuviera en pantalla, picamos en el menú **Windows**, y se despliega una persiana, como se muestra en el dibujo, con todas las ventanas que podemos activar.



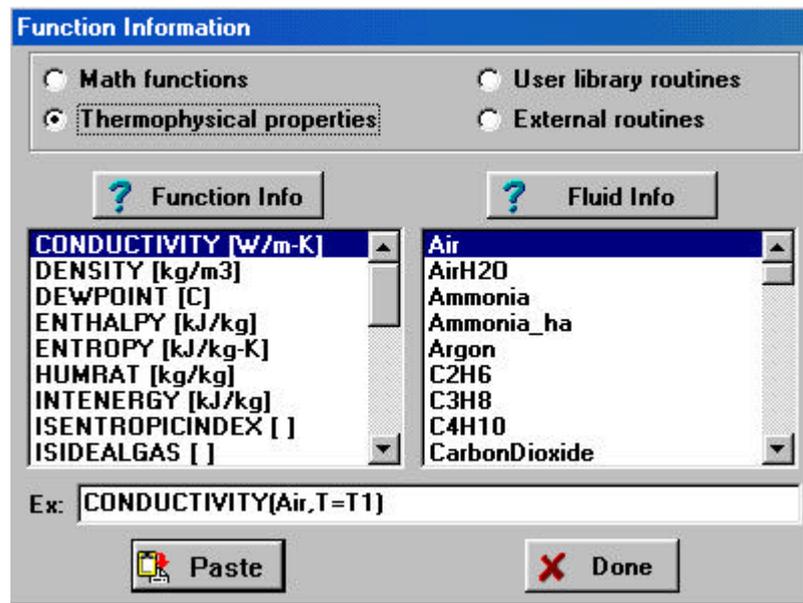
### *Unit System*

El comando **Unit System** en el menú **Options** nos proporciona una ventana donde nos indica las unidades de las variables usadas por las funciones matemáticas y de propiedades termofísicas. Es muy importante establecer las unidades, ya que si utilizamos una función trigonométrica, o de propiedades como por ejemplo la densidad, o alguna librería interna, pueden dar resultados erróneos. Si queremos establecer los valores para nuestro problema actual basta con picar el botón **OK**.



### *Thermophysical Property Functions*

Para utilizar una función de propiedades termofísicas picamos en el comando **Function Info** del menú **Options**, y nos aparecerá el siguiente cuadro de diálogo.



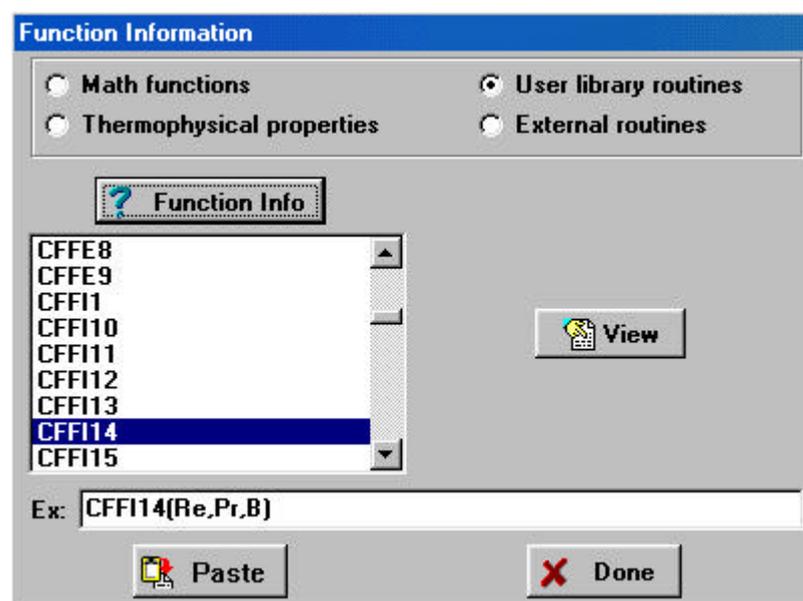
Los cuatro botones superiores nos indican cuál es la información que vamos a obtener, en este caso picamos **Thermophysical properties**. Como se puede ver, en la lista de la izquierda aparecen las propiedades indicando las unidades en las vienen expresadas (eso lo elegimos con **Unit System**, como vimos antes), y en la lista de la derecha la sustancia. Disponemos de dos botones de información, de la función y del fluido, y picando ahí podemos obtener una ayuda sobre sus características.

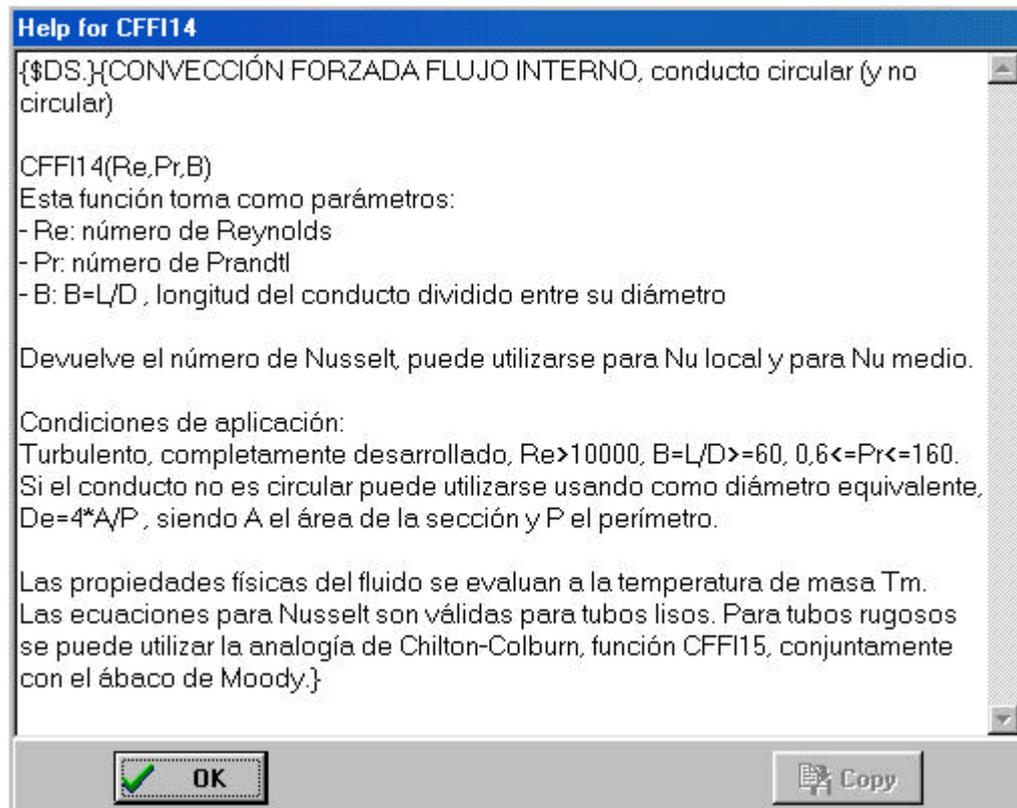
Picando en el botón **Paste** llevamos la función a la ventana de ecuaciones en la posición donde tuviéramos el cursor.

### *User library routines y Modules*

Para utilizar las funciones de la librería se procede de la misma manera que para las funciones termofísicas, pero picando en **User library routines**, y nos aparece un cuadro muy similar al anterior.

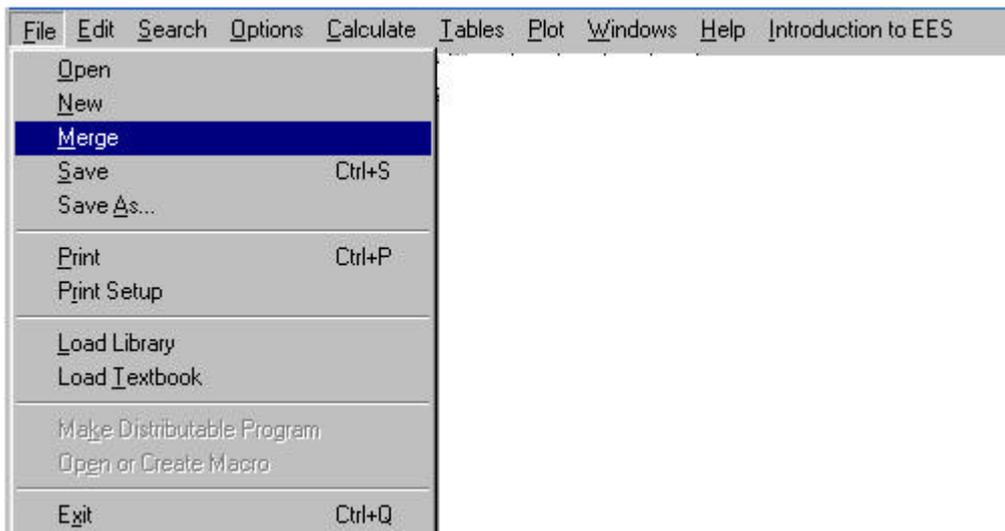
Aparece una lista donde podemos elegir la función que necesitamos, y además tenemos un botón de ayuda, **Function Info**, y otro botón, **View**, donde se puede ver el listado de la función. Como ejemplo vamos a ver la información de la función CFFI14.



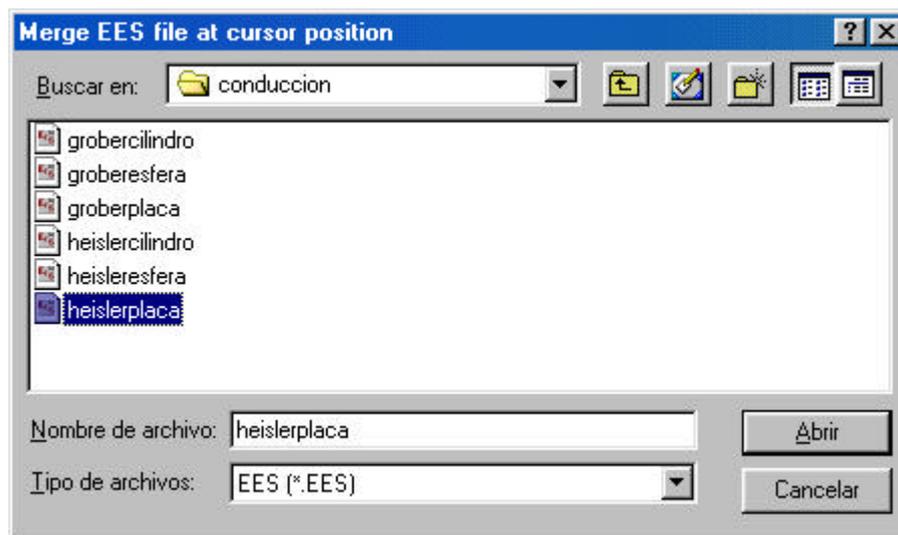


Picando en el botón **Paste** llevamos la función a la ventana de ecuaciones en la posición donde tuviéramos el cursor.

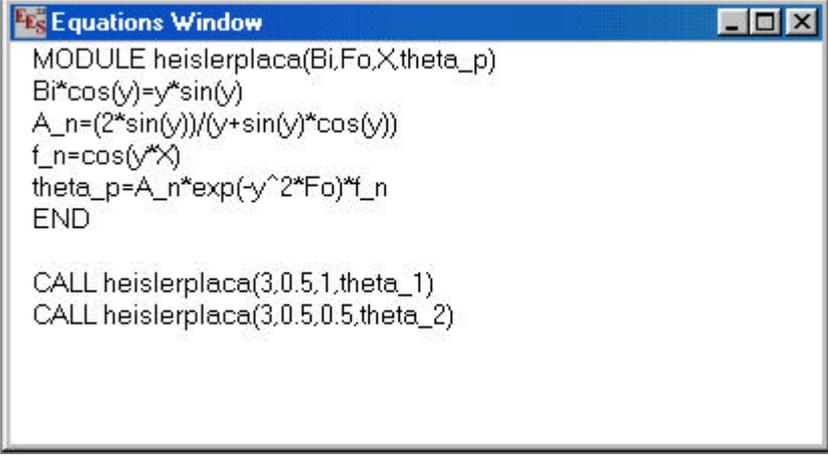
Los **Modules** son subprogramas que puede realizar el usuario e incorporarlo a la resolución de su problema en **Equation Window**. En las aplicaciones realizadas para la transferencia de calor existen **Modules** para los ábacos de Heisler y de Gröber, para las distintas geometrías de placa plana, cilindro y esfera. Es conveniente insertar el subprograma al principio de las ecuaciones. Si vamos a utilizar las relaciones de Heisler o Göber se introduce el subprograma al principio de todas las ecuaciones con el comando **Merge**, y cada vez que necesitemos usar el subprograma lo podemos llamar tantas veces como queramos y con valores diferentes cada vez. Vamos a ver como se haría. Vamos a partir de un problema nuevo y tenemos abierta nuestra ventana de ecuaciones. Vamos al menú **File**, y picamos en el comando **Merge**.



Nos aparece una ventana donde elegimos el fichero desde el que queremos insertar nuestro subprograma, en nuestro caso iremos a la carpeta **conduccion**, dentro de la carpeta **Userlib**, y elegiremos el archivo **heislerplaca**.



El subprograma se insertará en la posición donde tengamos el cursor en la ventana de ecuaciones, y una vez instalado podemos llamarlo cuantas veces queramos con los valores que queramos, devolviendo el valor a la variable de salida que indiquemos. Veamos un ejemplo.



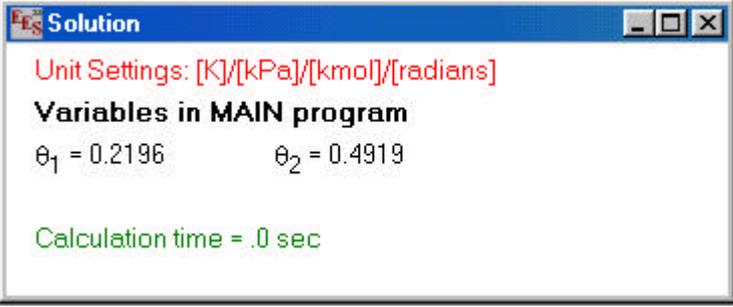
```

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(3,0.5,1,theta_1)
CALL heislerplaca(3,0.5,0.5,theta_2)

```

Arriba tenemos el subprograma y después hemos realizado dos llamadas, la primera nos devolverá el valor de  $\theta_1$  en el punto 0.5 de la placa, y la segunda llamada nos devolverá el valor de  $\theta_2$  en la superficie de la placa ( $X=1$ ). Picamos en **Solve** en el menú **Calculate**, y obtenemos la solución.



```

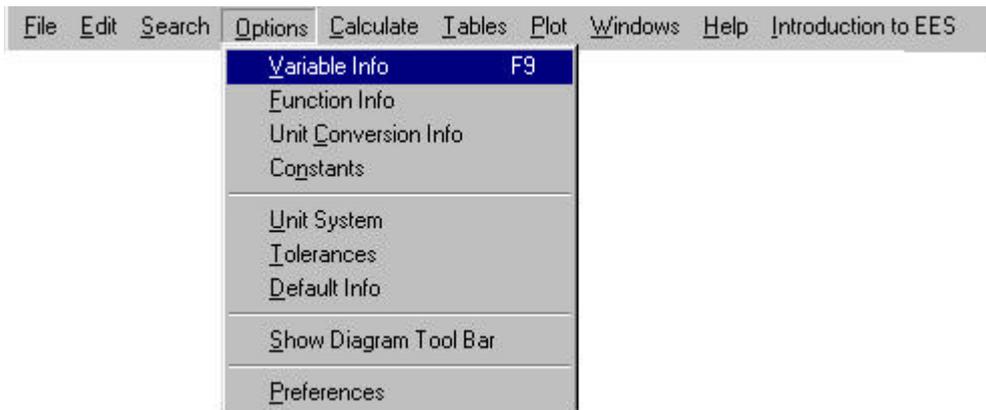
Unit Settings: [K]/[kPa]/[kmol]/[radians]
Variables in MAIN program
θ1 = 0.2196      θ2 = 0.4919

Calculation time = .0 sec

```

Las variables locales no aparecen a menos que lo seleccionemos en el comando **Preferences** en el menú **Options**.

## *Variable Info*



Este comando nos ofrece una ventana donde aparecen todas las variables del problema con una columna donde debemos darle unos valores iniciales. Es una de las cosas más importante a la hora de solucionar un problema mediante un programa. Si no estimamos bien estos valores puede que el problema no converja o no nos proporcione una correcta solución. Esto se hace todavía más importante si cabe con los problemas de transferencia de calor, donde los valores de los números adimensionales como  $Re$ ,  $Ra$ ,  $Gz$  tienen que estar dentro de un rango para la validez de la correlación, y donde tenemos que partir de buenas aproximaciones de los coeficientes de película para calcular las temperaturas superficiales y seguir con las iteraciones. El programa es el que itera, y a una velocidad infinitamente superior a la nuestra, pero si tiene unos buenos valores iniciales. Las funciones de librería de correlaciones tienen restringido los límites superior e inferior de  $Re$ , o  $Ra$ , mostrándonos un mensaje de error si esos parámetros no están dentro de su rango. Esto nos obliga a entrar siempre en esta ventana y darle valores a nuestras variables, y cuanto más cercanos a los reales menos problemas habrá para que el programa encuentre la solución.

En esta ventana podemos también ponerle límites superior e inferior a las variables, y ponerle las unidades. El programa no entiende de unidades, excepto cuando se utilizan las funciones trigonométricas o de propiedades, luego tenemos que ser coherentes con todos los valores de nuestras variables.

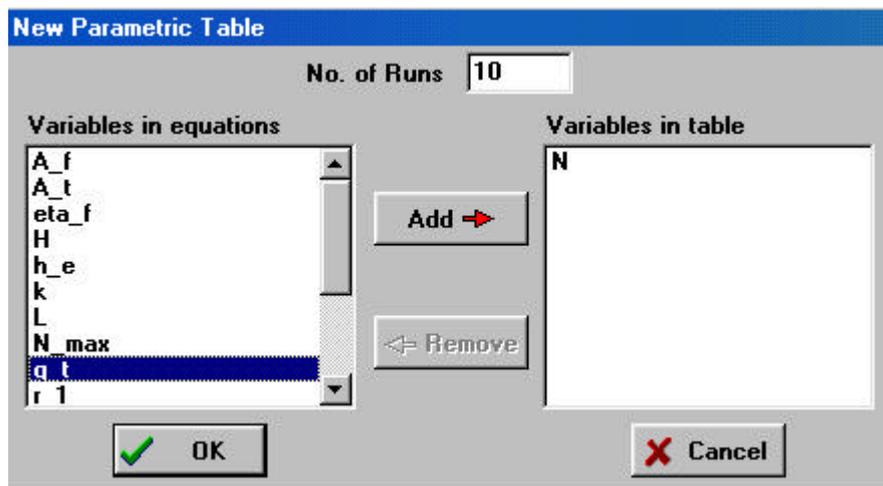
Variable Information						
Module <span>Main</span>						
Variable	Guess	Lower	Upper	Display		Units
B	60	-infinity	infinity	A	3	N
Cp	4179	-infinity	infinity	A	3	N J/kg°C
D	0.05	-infinity	infinity	A	3	N m
h	0.004259	-infinity	infinity	A	3	N W/m <sup>2</sup> °C
k	0.6286	-infinity	infinity	A	3	N W/m°C
L	10	-infinity	infinity	A	3	N m
m	3	-infinity	infinity	A	3	N kg/s
mu	0.0006531	-infinity	infinity	A	3	N kg/m*s
Nu#	1	-infinity	infinity	A	3	N
Pr	0.8734	-infinity	infinity	A	3	N
Re	116972	-infinity	infinity	A	3	N
Te	10	-infinity	infinity	A	3	N C
Tm	38	-infinity	infinity	A	3	N C
Ts	66	-infinity	infinity	A	3	N C
Tsup	82	-infinity	infinity	A	3	N C

### *Parametric Table Window*

File	Edit	Search	Options	Calculate	Tables	Plot	Windows	Help	Introduction to EES
<ul style="list-style-type: none"> <li>New Parametric Table</li> <li>Alter Values</li> <li>Retrieve Parametric Table</li> <li>Store Parametric Table</li> <li>Insert/Delete Runs</li> <li>Insert/Delete Vars</li> <li>Delete Parametric Table</li> <li>New Lookup Table</li> <li>Open Lookup Table</li> <li>Save Lookup Table</li> <li>Insert/Delete Lookup Rows</li> <li>Insert/Delete Lookup Cols</li> <li>Delete Lookup Table</li> <li>Linear Regression</li> </ul>									

En el menú **Tables** encontramos todos los comandos relacionados con las tabla paramétrica. **Parametric Table** se usa para automatizar cálculos repetitivos, para

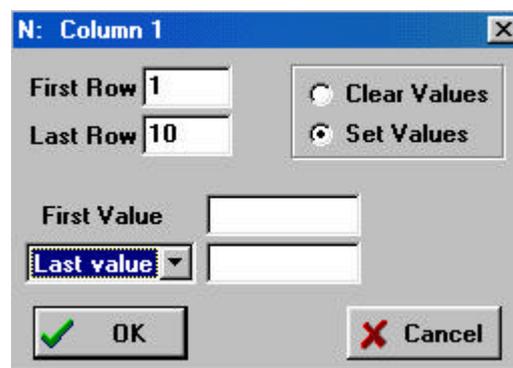
resolver ecuaciones diferenciales, para representar los datos en un gráfico, y para ajustar datos a una curva. Vamos a ver los pasos que seguimos para realizar una tabla y posteriormente veremos cómo podemos representar gráficamente las variables. Primero picamos en **New Parametric Table**, en el menú **Tables** y nos aparecerá una ventana donde elegimos las variables que queremos que formen la tabla, y el número veces que va a calcular la solución para los distintos valores.



La variable paramétrica, que es a la que vamos a darle valores, no puede estar definida en la ventana de ecuaciones porque si no nos saldría un mensaje de error. Podemos borrarla, o simplemente encerrarla entre paréntesis, con lo que el programa no la reconoce como variable sino como comentario.

En la tabla, picando en el triangulito negro superior derecha que hay en la celda de la variable nos aparece una ventanita donde asignamos valores a la variable, como se muestra en la siguiente figura.

	1	2
1.10	N	q <sub>t</sub> [W]
Run 1		
Run 2		
Run 3		
Run 4		
Run 5		
Run 6		
Run 7		
Run 8		
Run 9		
Run 10		



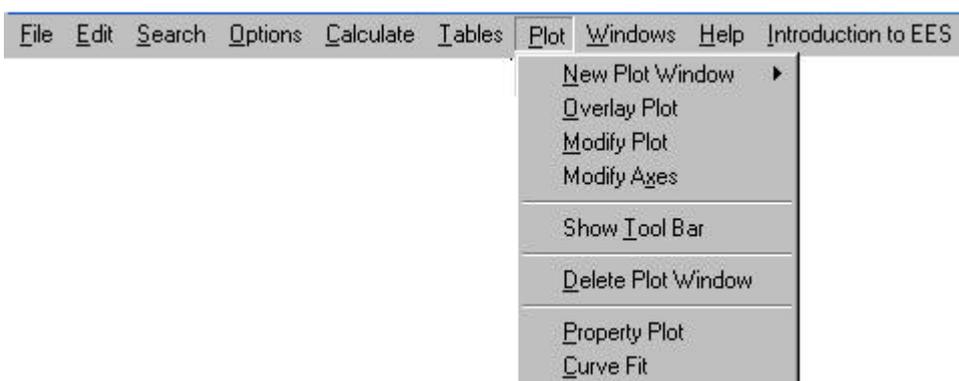
Una vez que hemos asignados los valores, picamos en el triangulito verde para resolver, obteniendo los resultados en la columna correspondiente.

1.10	1 N	2 $q_t$ [W]
Run 1	6	798.5
Run 2	7	892.3
Run 3	8	986.1
Run 4	9	1080
Run 5	10	1174
Run 6	11	1267
Run 7	12	1361
Run 8	13	1455
Run 9	14	1549
Run 10	15	1643

Existen comandos para alterar los valores, insertar más filas, insertar más variables, etc, explicados con detalles en el manual del programa EES.

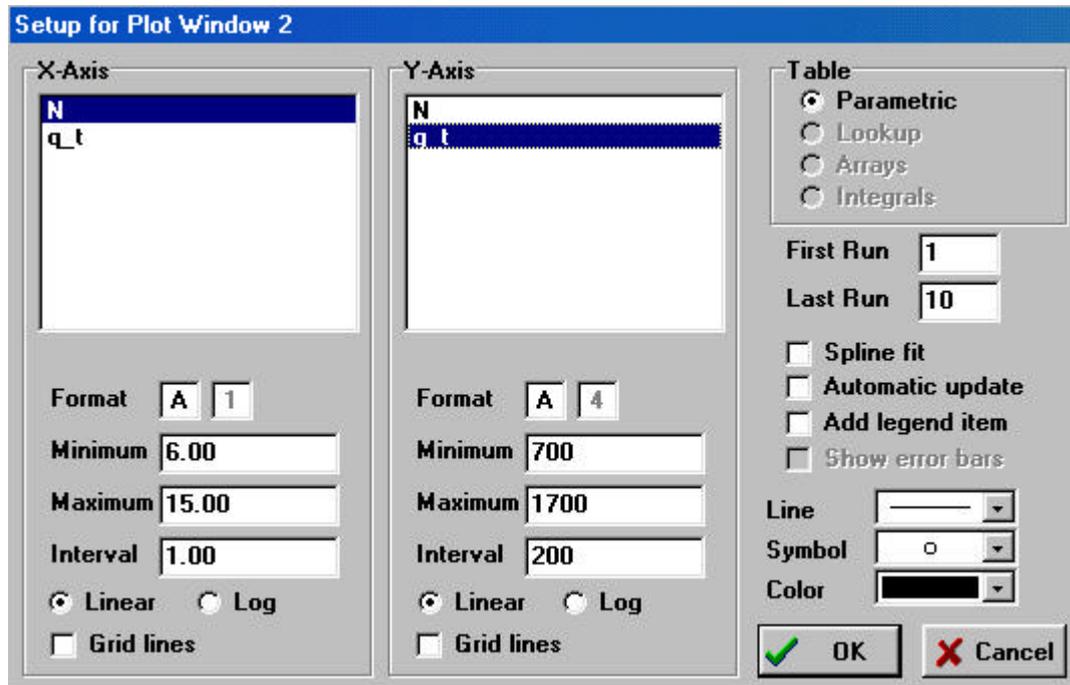
Estos análisis paramétricos son muy interesantes porque junto con su representación gráfica que veremos enseguida dan una idea muy intuitiva de cómo varían unas magnitudes frente a otra de una manera muy fácil y rápida.

## *Plot Windows*

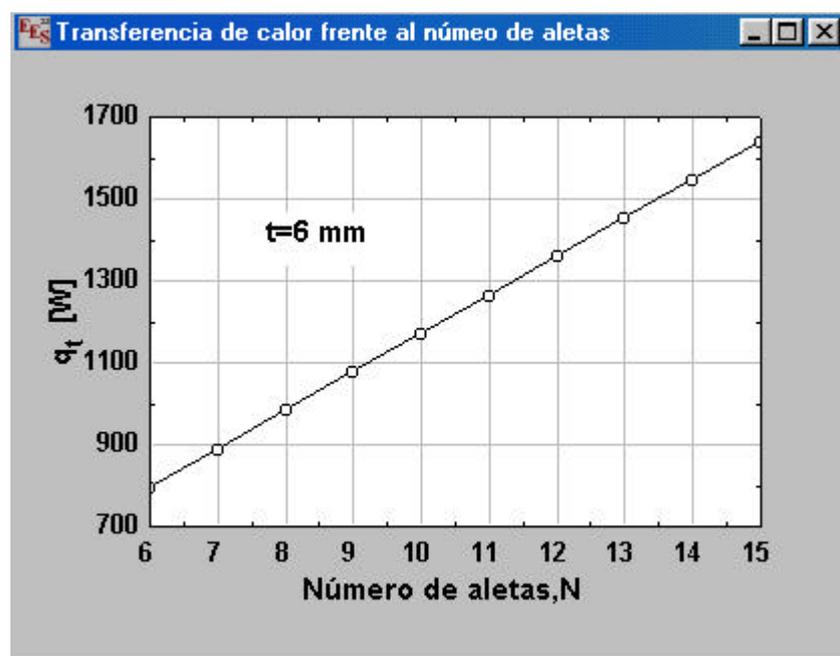


En el menú **Plot** encontramos los comandos para realizar representaciones gráficas. Nos permite dibujar las variables definidas en la **Parametric Tables**, **Lookup Table** o **Arrays Tables** en función de otras variables en esa tabla.

Veamos qué pasos hay que dar para representar en un gráfico un variable frente a otra. Empezamos picando en **New Plot Window**, elegimos qué tipo de representación queremos y nos aparece una ventana donde elegimos las variables de cada eje, y una serie de posibilidades más que nos ofrece.



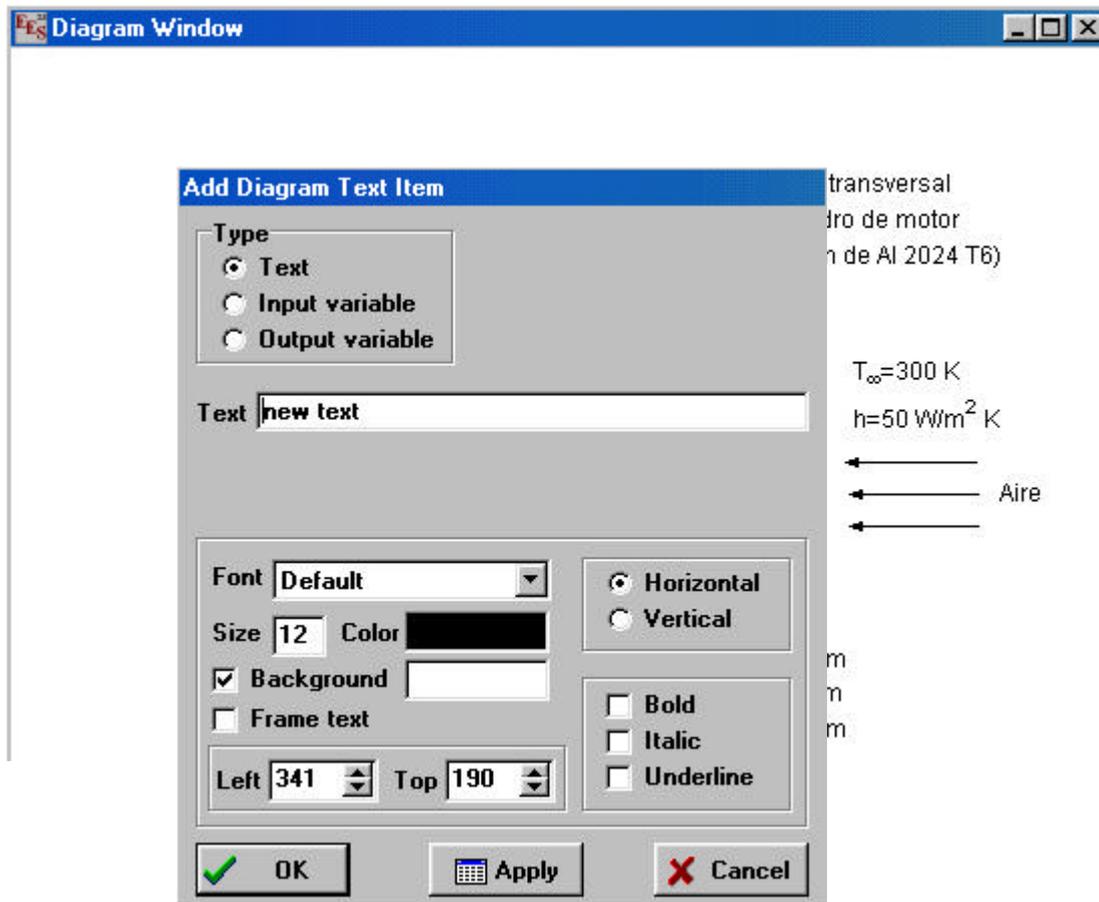
Pulsando **OK** tendremos la representación que queríamos. Picando en **Show Tool Bar** tenemos una barra de herramientas para escribir sobre el gráfico, añadir líneas, figuras...



## Diagram Window

El programa EES nos permite realizar esquemas y dibujos en **Diagram Window**, para así poder mostrar más claramente el problema o ayudarnos a interpretar el proceso o las ecuaciones para la solución. Pero tiene otra característica, y es que puede ser usado como entrada o salida de datos.

El dibujo no está realizado en EES, pero se puede hacer en cualquier programa de dibujos como el Paint, Microsoft Draw, Corel Drawm, o Power Point. También puede ser una imagen escaneada. Se copia (Copy) el dibujo y se pega (Paste) dentro de la ventana **Diagram Window**.



Picando en **Show Diagram Tool Bar**, en el menú **Options**, aparece una barra de herramientas con posibilidades de añadir texto, líneas, figuras, y utilizar el **Diagram Window** como entrada y salida de datos.

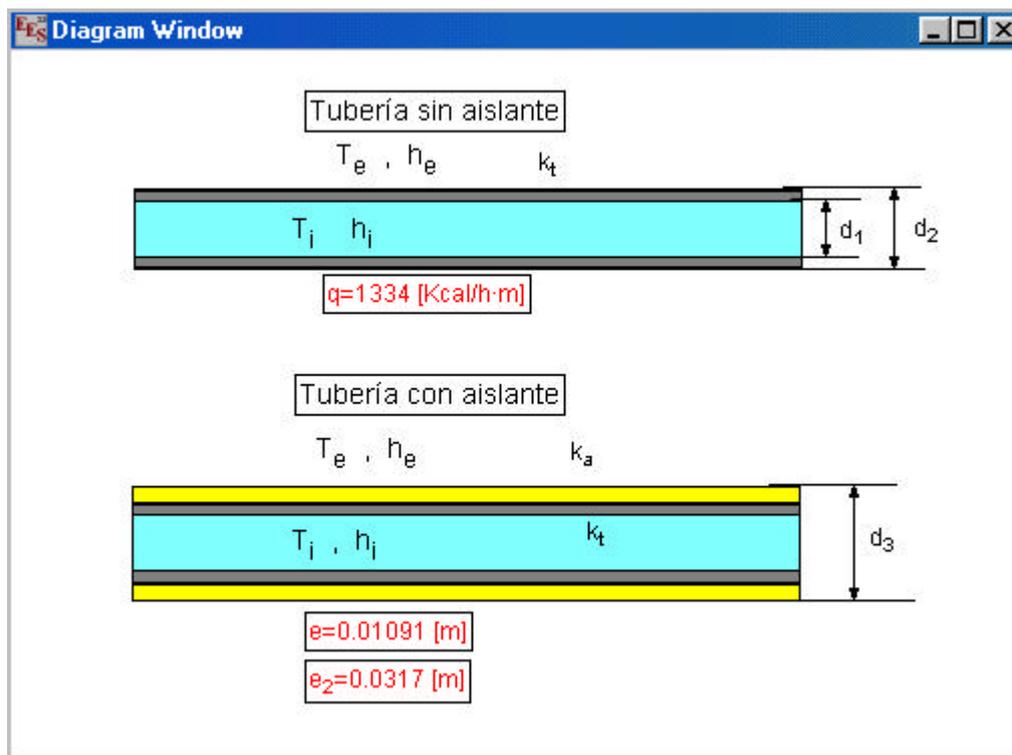
Una vez presentadas las herramientas más usuales y utilizadas de EES pasaremos a los problemas, que serán expuestos casi como sale en pantalla para que sirva de guía a la hora de iniciarse en la resolución de problemas con el programa EES.

### 3. Conducción en régimen permanente

#### 3.1. Problema 1

Por el interior de una tubería de acero, de 17 cm de diámetro exterior y de 15 cm de diámetro interior (conductividad térmica 15 Kcal/h m C ), circula vapor saturado a 60 Kgf/cm<sup>2</sup> de presión ( T=274 C ) atravesando un local que se encuentra a 21 C. Calcular:

- 1.- Flujo de calor por unidad de longitud.
  - 2.- Espesor de aislante (lana de roca de conductividad térmica 0.048 Kcal/h m C) necesario para reducir el flujo de calor a la tercera parte.
  - 3.- Espesor de aislante necesario para reducir la temperatura exterior hasta un valor máximo de 50 C.
- Los coeficientes de películas exterior e interior son 10 Kcal/2000 Kcal/m<sup>2</sup>C respectivamente.





"Datos"

$$r_1=0.075 ; r_2=0.085$$

$$T_i=274 ; T_e=21$$

$$h_i=2000 ; h_e=10$$

$$k_t=15 ; k_a=0.048$$

"Solución"

"1.- Flujo de calor por unidad de longitud"

{Utilizando el concepto de resistencia térmica , se puede expresar el flujo de calor mediante:

$$Q=(T_i-T_e)/(\text{suma de resistencias})$$

Refiriendo el cálculo a 1 m de tubería , tenemos}

$$A_i=2*\pi*r_1 ; A_e=2*\pi*r_2$$

$$R_i=1/(h_i*A_i) \quad \{\text{Resistencia por convección interior}\}$$

$$R_e=1/(h_e*A_e) \quad \{\text{Resistencia por convección exterior}\}$$

$$R_t=\ln(r_2/r_1)/(2*\pi*k_t) \quad \{\text{Resistencia por conducción en la tubería}\}$$

$$q=(T_i-T_e)/(R_i+R_t+R_e) \quad \{\text{ecuación de la transmisión de calor por conducción en un cilindro por unidad de longitud}\}$$

"2.- Espesor de aislante necesario para reducir la temperatura exterior hasta un valor máximo de 50 C."

{Para reducir el flujo de calor a la tercera parte, se añade aislante a la tubería , lo cual introduce una nueva resistencia térmica}

$$R_a=(\ln(r_3/r_2))/(2*\pi*k_a) \quad \{\text{Resistencia térmica del aislante}\}$$

$$q_2=q/3 \quad \{\text{reducimos el flujo de calor a la tercera parte}\}$$

$$q_2=(T_i-T_e)/(R_i+R_t+R_a+(1/(h_e*2*\pi*r_3))) \quad \{\text{ecuación de la transmisión de calor por conducción en un cilindro por unidad de longitud}\}$$

$$e=r_3-r_2 \quad \{\text{espesor de aislante necesario}\}$$

"3.- Espesor de aislante necesario para reducir la temperatura exterior hasta un valor máximo de 50 C."

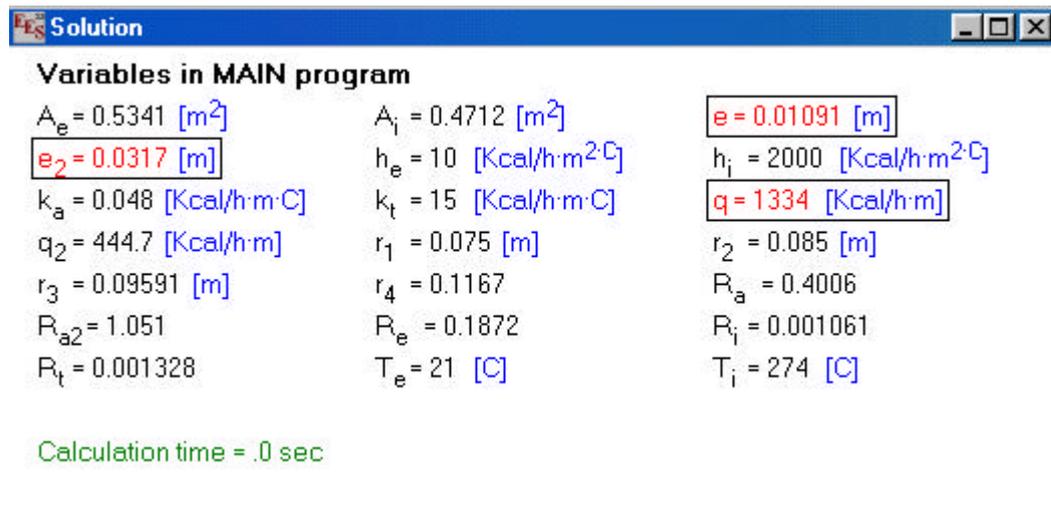
{Vamos a tener otro espesor de aislante diferente que lo vamos a llamar e\_2, y un nuevo radio, r\_4}

$$R_{a2}=(\ln(r_4/r_2))/(2*\pi*k_a) \quad \{\text{Resistencia térmica del aislante del tercer apartado}\}$$

$$2*\pi*r_4*h_e*(50-T_e)=(T_i-T_e)/(R_i+R_t+R_{a2}+(1/(h_e*2*\pi*r_4)))$$

$$e_2=r_4-r_2$$

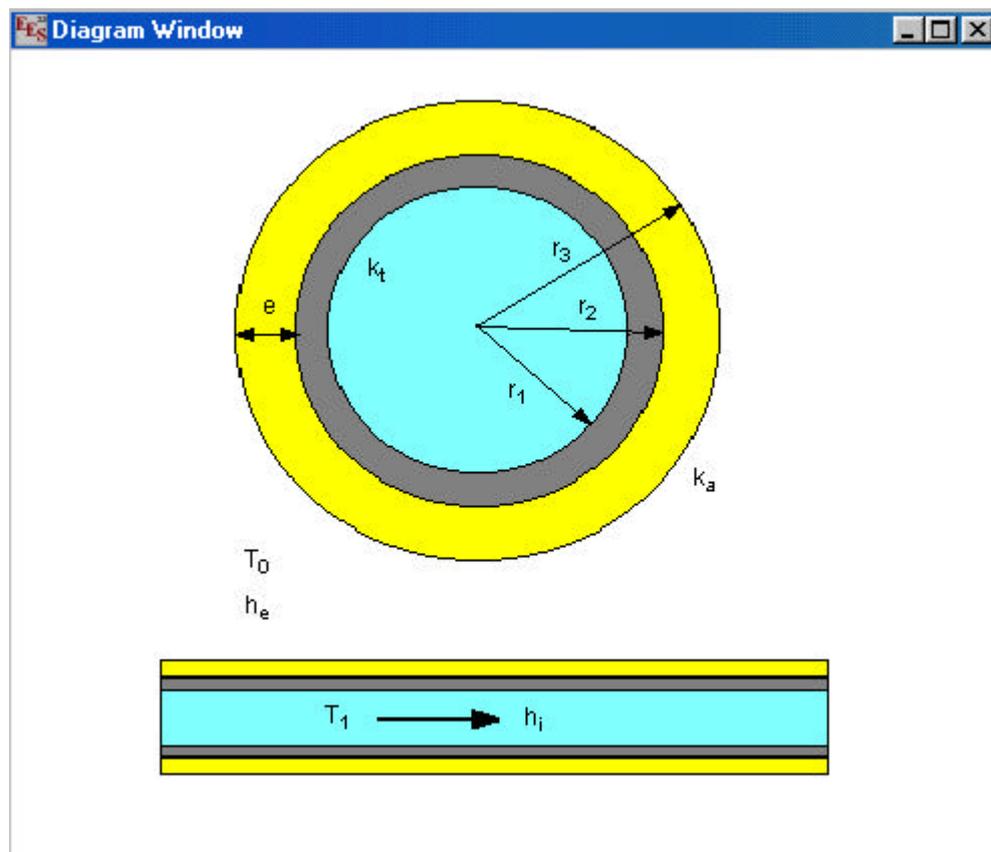
Una vez que tenemos escritas todas las ecuaciones y datos necesarios para solucionar el problema, picamos en **Solve**, en el menú **Calculate**, y obtenemos la solución.



Podemos ver las ecuaciones expresadas en forma matemática picando en **Formatted Equations**, en el menú **Windows**.

### 3.2. Problema 2

Un fluido a temperatura  $T_1$  circula a través de una tubería cuyos radios interior y exterior miden  $r_1$  y  $r_2$  respectivamente. Por su parte externa, la tubería está en contacto con un fluido a temperatura constante  $T_0$  menor que la temperatura del fluido. Para reducir la pérdida de calor desde el fluido interior se aísla la tubería. Estudiar la variación de la pérdida de calor de la tubería en función del espesor de aislamiento. El coeficiente de película interior es  $h_i$ , el coeficiente de película exterior es  $h_e$ , la conductividad de la tubería es  $k_t$  y la conductividad del aislante  $k_a$ .



Aquí tenemos un esquema del problema, vamos a pasar a la ventana de ecuaciones.



"Datos"

$r_1=0.025$	{ radio interior }
$r_2=0.035$	{ radio exterior }
$T_1=300$	{ Temperatura del fluido interior a la tubería }
$T_0=20$	{ Temperatura del fluido exterior a la tubería }
$h_i=2330$	{ coeficiente de película interior }
$h_e=11.63$	{ coeficiente de película exterior }
$k_t=17.5$	{ conductividad térmica de la tubería }

$k_a=0.06$  {conductividad térmica del aislante}

$L=1$  {longitud de la tubería}

"Solución"

$A_i=2*\pi*r_1$

$A_e=2*\pi*r_3$

$R_i=1/(h_i*A_i)$  {Resistencia por convección interior}

$R_e=1/(h_e*A_e)$  {Resistencia por convección exterior}

$R_a=\ln(r_3/r_2)/(2*\pi*k_a)$  {Resistencia térmica del aislante }

$R_t=\ln(r_2/r_1)/(2*\pi*k_t)$  {Resistencia por conducción en la tubería}

$Q/L=(T_1-T_0)/(R_i+R_t+R_a+R_e)$  { ecuación de la transmisión de calor por conducción en un cilindro por unidad de longitud}

$e=r_3-r_2$  { espesor de aislante en función del radio  $r_2$  y  $r_3$ }

Vamos a presentar la tabla paramétrica y los gráficos.

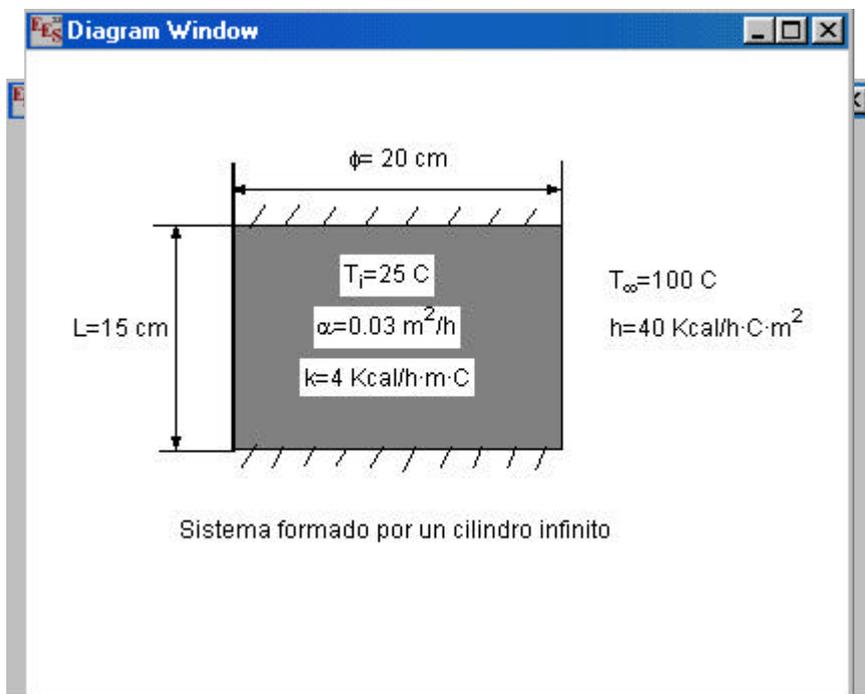
	1	2	3
1..10	$r_3$ [m]	$e$ [m]	$Q$ [J]
Run 1	0.035	0	705.7
Run 2	0.038	0.003	479.4
Run 3	0.041	0.006	368.8
Run 4	0.044	0.009	303.1
Run 5	0.047	0.012	259.5
Run 6	0.05	0.015	228.5
Run 7	0.053	0.018	205.2
Run 8	0.056	0.021	187.1
Run 9	0.059	0.024	172.5
Run 10	0.062	0.027	160.6

## 4. Conducción en régimen transitorio

### 4.1. Problema 3

Un cilindro de 20 cm de diámetro y 15 cm de longitud, de un material de conductividad térmica 4 Kcal/h·m·C y difusividad térmica  $0.03\text{m}^2/\text{h}$ , tiene tapados sus extremos lo que esencialmente lo aísla del flujo de calor. La temperatura del cilindro es uniforme, 25 C, y se pone en contacto con un fluido a 100 C.

Calcular la temperatura en el centro geométrico del cilindro en el plano central y en un punto situado a 5 cm del centro, una vez transcurridos 30 minutos desde el instante inicial.



Equations Window

"Datos"

$r=0.10$   
 $L=0.15$   
 $\alpha=0.03$ ;  $t=0.5$   
 $k=4$   
 $h=40$   
 $T_i=25$   
 $T_{\infty}=100$

"Solución"

{Si el cilindro está aislado en sus dos extremos, el flujo de calor no puede tener componente axial en ningún punto. Así, es como si el cilindro fuese infinito. Vamos a necesitar el module heislercilindro}

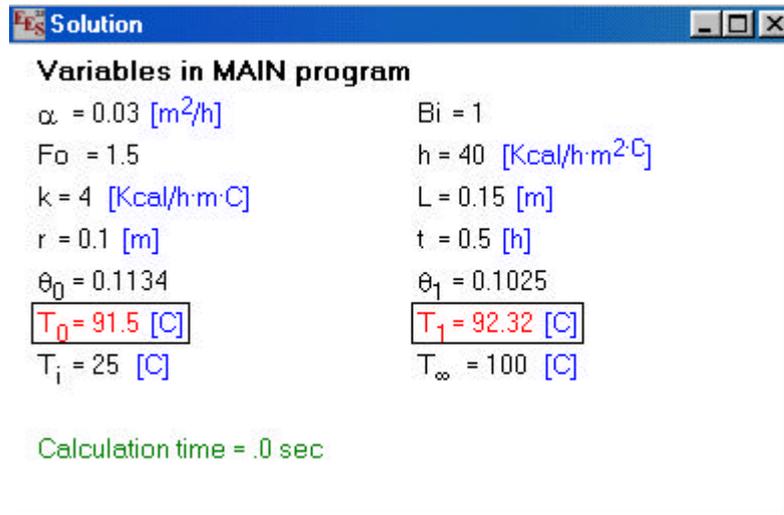
```

MODULE heislercilindro(Bi,Fo,X,theta_c)
y*Bessel_J1(y)=Bi*Bessel_J0(y)
A_n=(2*Bessel_J1(y))/(y*((Bessel_J0(y))^2+(Bessel_J1(y))^2))
f_n=Bessel_J0(y*X)
theta_c=A_n*exp(-y^2*Fo)*f_n
END
Bi=(h*r)/k                                { número de Biot }
Fo=(alpha*t)/r^2                           { número de Fourier }
CALL heislercilindro(Bi,Fo,0,theta_0)      { Module que nos da la temperatura
adimensional }
theta_0=(T_0-T_infinity)/(T_i-T_infinity)  { temperatura adimensional en el
centro }
CALL heislercilindro(Bi,Fo,0.5,theta_1)    { Module que nos da la temperatura
adimensional a un punto a 5 cm del centro }
theta_1=(T_1-T_infinity)/(T_i-T_infinity)  { temperatura adimensional en un
punto a 5 cm del centro }

```

El MODULE heislercilindro(Bi,Fo,X,theta\_c) ha sido introducido con el comando **Merge**, en el menú **File**.

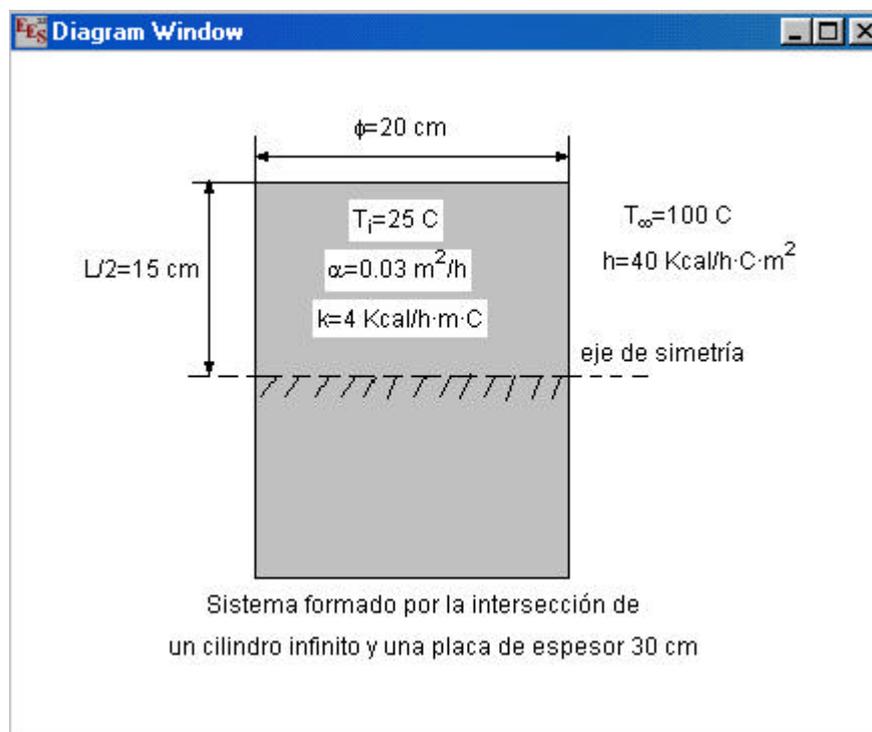
Picando en **Solve**, en el menú **Calculate**, obtenemos la solución.



## 4.2. Problema 4

Un cilindro de 20 cm de diámetro y 15 cm de longitud, de un material de conductividad térmica 4 Kcal/h·m·C y difusividad térmica 0.03m<sup>2</sup>/h, tiene tapados sus extremos lo que esencialmente lo aísla del flujo de calor. La temperatura del cilindro es uniforme, 25 C, y se pone en contacto con un fluido a 100 C.

Calcular la temperatura en el centro geométrico del cilindro en el plano central y en un punto situado a 5 cm del centro, una vez transcurridos 30 minutos desde el instante inicial, suponiendo que el cilindro tiene descubierto uno de sus extremos.





"Solución"

{El extremo aislado del cilindro puede asimilarse a una condición de simetría. Por ello el sistema puede considerarse formado por la intersección de un cilindro infinito y una placa de espesor doble de la altura del cilindro (ver diagram window). Vamos a necesitar los modules, heislerplaca y heislercilindro}

MODULE heislerplaca(Bi,Fo,X,theta\_p)

$Bi \cdot \cos(y) = y \cdot \sin(y)$

$A_n = (2 \cdot \sin(y)) / (y + \sin(y) \cdot \cos(y))$

$f_n = \cos(y \cdot X)$

$\theta_{p} = A_n \cdot \exp(-y^2 \cdot Fo) \cdot f_n$

END

MODULE heislercilindro(Bi,Fo,X,theta\_c)

$y \cdot \text{Bessel\_J1}(y) = Bi \cdot \text{Bessel\_J0}(y)$

$A_n = (2 \cdot \text{Bessel\_J1}(y)) / (y \cdot ((\text{Bessel\_J0}(y))^2 + (\text{Bessel\_J1}(y))^2))$

$f_n = \text{Bessel\_J0}(y \cdot X)$

$\theta_{c} = A_n \cdot \exp(-y^2 \cdot Fo) \cdot f_n$

END

"Datos"

r=0.10

L=0.30

alpha=0.03; t=0.5

k=4

h=40

T<sub>i</sub>=25

T<sub>infinity</sub>=100

$Bi_c = (h \cdot r) / k$  ;  $Bi_p = (h \cdot (L/2)) / k$       { número de Biot del cilindro y la placa respectivamente }

$Fo_c = (\alpha \cdot t) / r^2$  ;  $Fo_p = (\alpha \cdot t) / ((L/2)^2)$       { número de Fourier del cilindro y la placa respectivamente }

$\theta_0 = \theta_{0c} \cdot \theta_{0p}$

CALL heislercilindro(Bi\_c,Fo\_c,0,theta\_0c)      { Module que nos da la temperatura adimensional }

CALL heislerplaca(Bi\_p,Fo\_p,0.5,theta\_0p)      { El punto no está en el centro de la placa, sino a 7.5 cm del centro, por eso ponemos X=x/L=0.5 }

$\theta_0 = (T_0 - T_{infinity}) / (T_i - T_{infinity})$       { temperatura adimensional en el centro }

{ Para calcular la temperatura en el punto a 5 cm del centro del cilindro, tenemos }

CALL heislercilindro(Bi\_c,Fo\_c,0.5,theta\_1c)      { ahora X=0.5 }

CALL heislerplaca(Bi\_p,Fo\_p,0.5,theta\_1p)      { éste es igual que en la primera parte del problema }

$\theta_1 = \theta_{1c} \cdot \theta_{1p}$

$\theta_1 = (T_1 - T_{infinity}) / (T_i - T_{infinity})$       { temperatura adimensional en un punto a 5 cm del centro }

Picando en **Solve**, en el menú **Calculate**, obtenemos la solución.

The screenshot shows a window titled "Solution" with the following content:

Unit Settings: [K]/[kPa]/[kmol]/[radians]

**Variables in MAIN program**

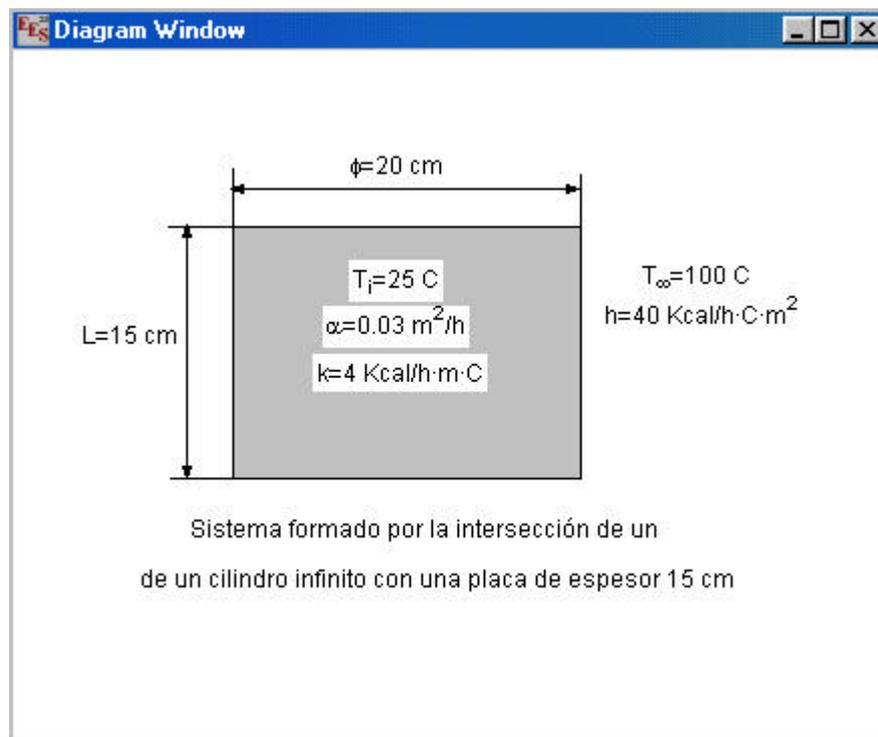
$\alpha = 0.03$ [m <sup>2</sup> /h]	$Bi_c = 1$	$Bi_p = 1.5$
$Fo_c = 1.5$	$Fo_p = 0.6667$	$h = 40$ [Kcal/h·m <sup>2</sup> ·C]
$k = 4$ [Kcal/h·m·C]	$L = 0.3$ [m]	$r = 0.1$ [m]
$t = 0.5$ [h]	$\theta_0 = 0.06004$	$\theta_{0c} = 0.1134$
$\theta_{0p} = 0.5297$	$\theta_1 = 0.05426$	$\theta_{1c} = 0.1025$
$\theta_{1p} = 0.5297$	$T_0 = 95.5$ [C]	$T_1 = 95.93$ [C]
$T_i = 25$ [C]	$T_\infty = 100$ [C]	

Calculation time = .1 sec

### 4.3. Problema 5

Un cilindro de 20 cm de diámetro y 15 cm de longitud, de un material de conductividad térmica 4 Kcal/h·m·C y difusividad térmica  $0.03 \text{ m}^2/\text{h}$ , tiene tapados sus extremos lo que esencialmente lo aísla del flujo de calor. La temperatura del cilindro es uniforme, 25 C, y se pone en contacto con un fluido a 100 C.

Calcular la temperatura en el centro geométrico del cilindro en el plano central y en un punto situado a 5 cm del centro, una vez transcurridos 30 minutos desde el instante inicial, suponiendo los dos extremos descubiertos. Calcular también la temperatura media del cilindro en este caso.



#### Equations Window

"Solución"

{En este caso, el sistema es la intersección de un cilindro infinito con una placa de espesor igual a la altura del cilindro, como se muestra en diagram window.

Vamos a necesitar los modules, heislercilindro, heislerplaca y para la temperatura adimensional, grobercilindro y groberplaca}

```
MODULE heislercilindro(Bi,Fo,X,theta_c)
```

```
y*Bessel_J1(y)=Bi*Bessel_J0(y)
```

```
A_n=(2*Bessel_J1(y))/(y*((Bessel_J0(y))^2+(Bessel_J1(y))^2))
```

```
f_n=Bessel_J0(y*X)
```

```
theta_c=A_n*exp(-y^2*Fo)*f_n
```

```
END
```

```
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
```

```
MODULE grobercilindro(Bi,Fo,Q#Q_0c)
y*Bessel_J1(y)=Bi*Bessel_J0(y)
A_n=(2*Bessel_J1(y))/(y*((Bessel_J0(y))^2+(Bessel_J1(y))^2))
B_n=(2*Bessel_J1(y))/y
Q#Q_0c=1-(A_n*exp(-y^2*Fo)*B_n)
END
```

```
MODULE groberplaca(Bi,Fo,Q#Q_0p)
Bi*cos(y)=y*sin(y)
A_n=(2*sin(y))/(y+sin(y)*cos(y))
B_n=sin(y)/y
Q#Q_0p=1-(A_n*exp(-y^2*Fo)*B_n)
END
```

"Datos"

```
r=0.10
L=0.15
alpha=0.03; t=0.5
k=4
h=40
T_i=25
T_infinity=100
Bi_c=(h*r)/k ; Bi_p=(h*(L/2))/k      { número de Biot del cilindro y la placa
respectivamente }
Fo_c=(alpha*t)/r^2 ; Fo_p=(alpha*t)/((L/2)^2) { número de Fourier del cilindro y
la placa respectivamente }
theta_0=theta_0c*theta_0p
CALL heislercilindro(Bi_c,Fo_c,0,theta_0c) { Module que nos da la temperatura
adimensional }
CALL heislerplaca(Bi_p,Fo_p,0,theta_0p) { X=0 ,porque está en el centro de la
placa }
theta_0=(T_0-T_infinity)/(T_i-T_infinity) { temperatura adimensional en el
centro }
{ Para calcular la temperatura en el punto a 5 cm del centro del cilindro, tenemos }
CALL heislercilindro(Bi_c,Fo_c,0.5,theta_1c) { ahora X=0.5 }
CALL heislerplaca(Bi_p,Fo_p,0,theta_1p) { X=0, porque está en el centro de la
placa }
theta_1=theta_1c*theta_1p
theta_1=(T_1-T_infinity)/(T_i-T_infinity) { temperatura adimensional en un
punto a 5 cm del centro }
{ Vamos a calcular la temperatura media, theta_m=1-(Q/Q_i) }
theta_m=theta_mc*theta_mp {temperatura media, es el producto de la
temperatura media del cilindro y de la placa }
theta_mc=1-Q#Q_0c
theta_mp=1-Q#Q_0p
```

CALL grobercilindro(Bi\_c,Fo\_c,Q#Q\_0c) {module que nos proporciona el porcentaje de calor transferido sobre el total posible, es el ábaco de Grober}  
 CALL groberplaca(Bi\_p,Fo\_p,Q#Q\_0p)  
 theta\_m=(T\_m-T\_infinity)/(T\_i-T\_infinity)

Picando en **Solve**, en el menú **Calculate**, obtenemos la solución.

**Solution**

Unit Settings: [K]/[kPa]/[kmol]/[radians]

**Variables in MAIN program**

$\alpha = 0.03$ [m <sup>2</sup> /h]	$Bi_c = 1$	$Bi_p = 0.75$
$Fo_c = 1.5$	$Fo_p = 2.667$	$h = 40$ [Kcal/h-m <sup>2</sup> -C]
$k = 4$ [Kcal/h-m-C]	$L = 0.15$ [m]	$Q\#Q_{0c} = 0.9076$
$Q\#Q_{0p} = 0.7972$	$r = 0.1$ [m]	$t = 0.5$ [h]
$\theta_0 = 0.02544$	$\theta_{0c} = 0.1134$	$\theta_{0p} = 0.2244$
$\theta_1 = 0.02299$	$\theta_{1c} = 0.1025$	$\theta_{1p} = 0.2244$
$\theta_m = 0.01875$	$\theta_{mc} = 0.09243$	$\theta_{mp} = 0.2028$
$T_0 = 98.09$ [C]	$T_1 = 98.28$ [C]	$T_i = 25$ [C]
$T_\infty = 100$ [C]	$T_m = 98.59$ [C]	

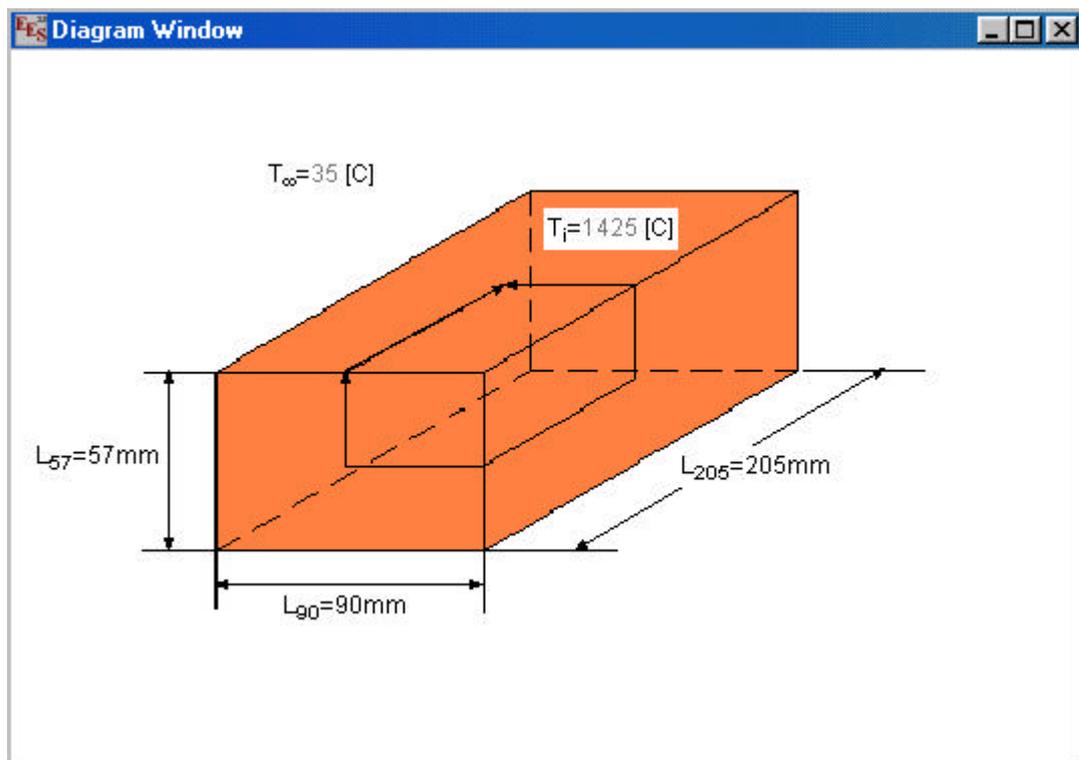
Calculation time = .1 sec

#### 4.4. Problema 6

Un ladrillo de 57x90x205 mm se cuece en un horno a 1425 C. Se enfría en aire a 35 C.

a) Calcular el tiempo para que la temperatura en el centro de la cara de 90x205 sea 70C. El coeficiente de transferencia convectivo entre el ladrillo y el aire es 20 Kcal/h·m<sup>2</sup>·C. El material del ladrillo tiene un calor específico de 0.2 Kcal/KgC, una densidad de 1600 Kg/m<sup>3</sup> y una conductividad térmica de 0.6 Kcal/h·m·C.

b) Calcular el tiempo para que la temperatura en el centro de la cara de 90x205 sea 70 C, haciendo una comparación de la variación del tiempo en función de la conductividad térmica.



a)

Equations Window

"Solución"

{El ladrillo es la intersección de tres placas perpendiculares entre sí de dimensiones 57, 90 y 205 mm, como se ve en diagram window. El punto que nos dicen está en la superficie de la placa de 57 mm de espesor y en el centro de las otras dos. La temperatura adimensional de este punto será:

$$\theta = \theta_{57}(X=1) \cdot \theta(X=0) \cdot \theta(X=0)$$

Vamos a necesitar el module heislerplaca }

MODULE heislerplaca(Bi,Fo,X,theta\_p)

$$Bi \cdot \cos(y) = y \cdot \sin(y)$$

$$A_n = (2 \cdot \sin(y)) / (y + \sin(y) \cdot \cos(y))$$

$$f_n = \cos(y \cdot X)$$

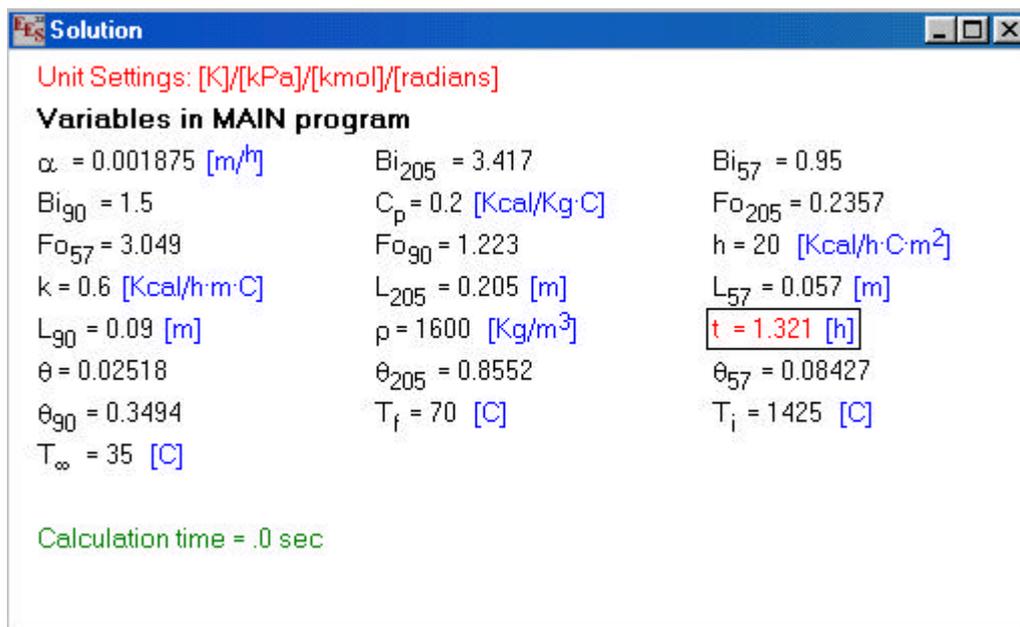
$$\theta_p = A_n \cdot \exp(-y^2 \cdot Fo) \cdot f_n$$

```

END
"Datos"
L_57=0.057; L_90=0.09; L_205=0.205
C_p=0.2
rho=1600
k=0.6
h=20
T_i=1425; T_infinity=35; T_f=70
"Ecuaciones para la solución"
alpha=k/(rho*C_p)
theta=(T_f-T_infinity)/(T_i-T_infinity)           {temperatura adimensional}
Bi_57=h*(L_57/2)/k; Fo_57=(alpha*t)/(L_57/2)^2
Bi_90=h*(L_90/2)/k; Fo_90=(alpha*t)/(L_90/2)^2
Bi_205=h*(L_205/2)/k; Fo_205=(alpha*t)/(L_205/2)^2
CALL heislerplaca(Bi_57,Fo_57,1,theta_57)         {X=1, está en la superficie}
CALL heislerplaca(Bi_90,Fo_90,0,theta_90)        {X=0, está en el centro}
CALL heislerplaca(Bi_205,Fo_205,0,theta_205)     {X=0, está en el centro}
theta=theta_57*theta_90*theta_205               {temperatura adimensional es el
producto de las tres temperaturas dimensionales}

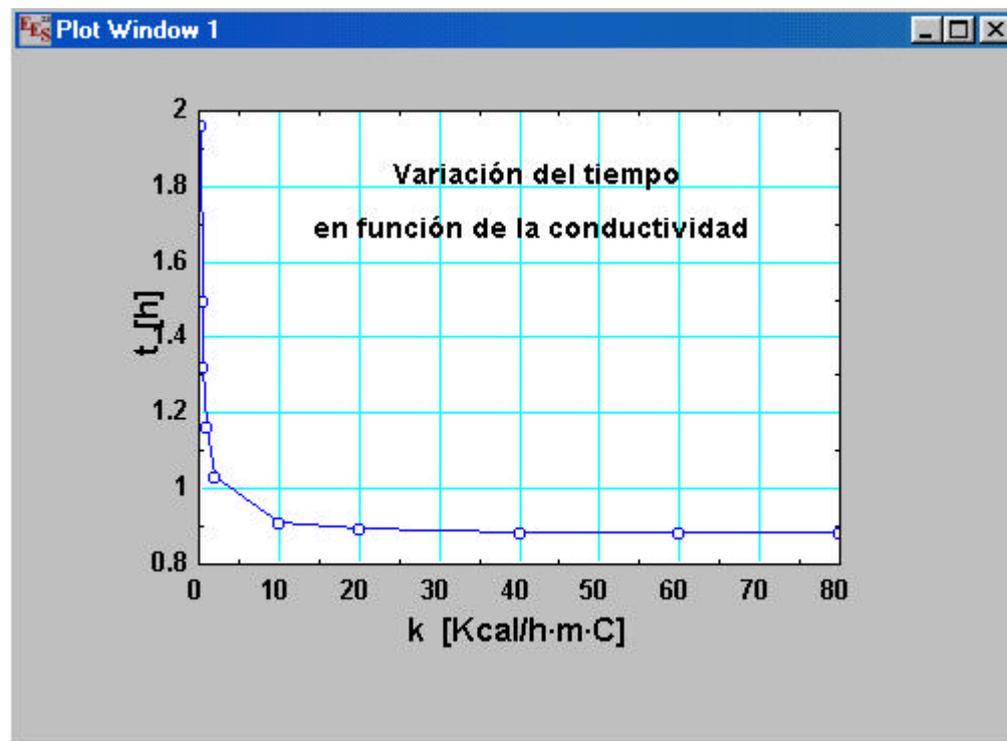
```

Picando en **Solve**, en el menú **Calculate**, obtenemos la solución.



b) Para este apartado Equations Window es el mismo pero encerrando entre paréntesis la conductividad térmica, ya que vamos a hacer un análisis paramétrico en función de esta variable. Vamos a hacer también la representación gráfica de los valores obtenidos.

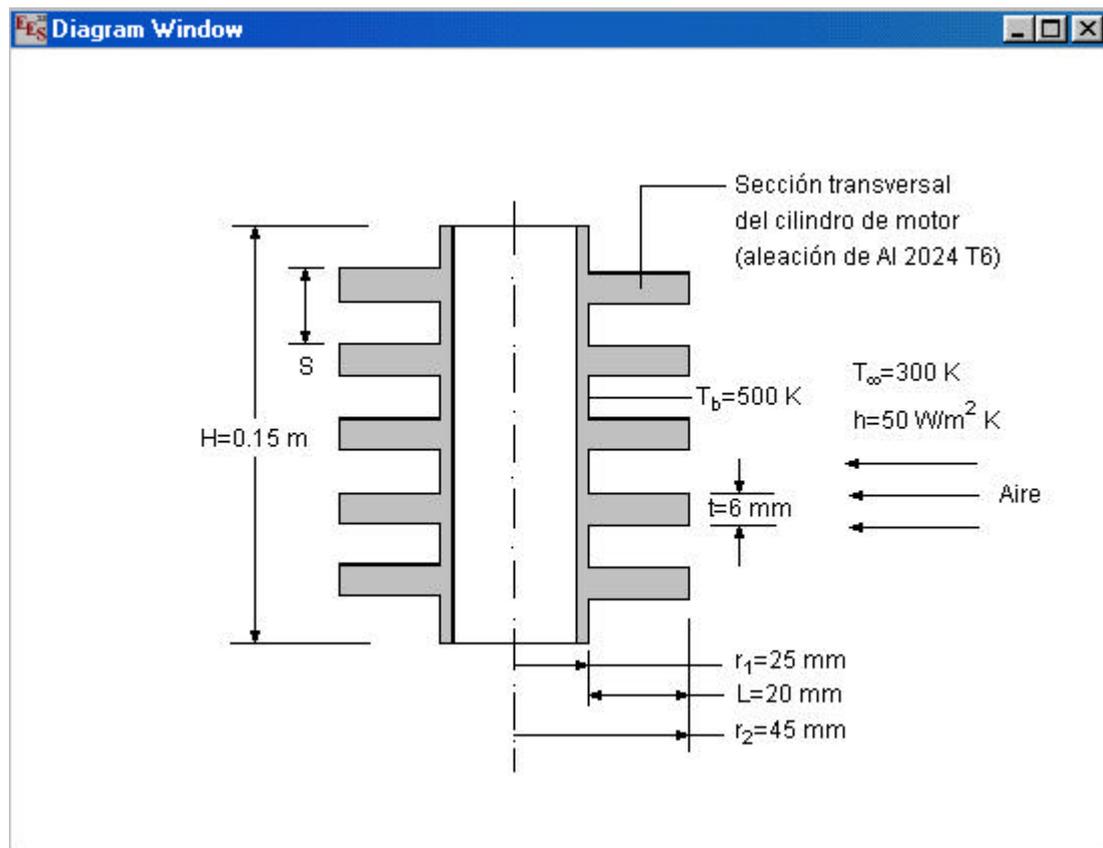
	1	2
	k [Kcal/h·m·C]	t [h]
Run 1	0.2	1.965
Run 2	0.4	1.5
Run 3	0.6	1.321
Run 4	1	1.163
Run 5	2	1.031
Run 6	10	0.9111
Run 7	20	0.8949
Run 8	40	0.8867
Run 9	60	0.8839
Run 10	80	0.8825



## 5. Aletas

### 5.1. Problema 7

Se conocen las condiciones de operación de un cilindro de motocicleta con aletas ( ver 'diagram window'). Encontrar el aumento en la transferencia de calor asociada con el uso de aletas.



"Solución"

{Suposiciones:

- 1.- Condiciones de estado estable.
- 2.- Conducción radial unidimensional en las aletas.
- 3.- Propiedades constantes.
- 4.- Intercambio de radiación insignificante con los alrededores.
- 5.- Coeficiente de convección uniforme sobre la superficie externa (con o sin aletas)}

"Datos"

$H=0.15$ ;  $r_1=0.025$ ;  $L=0.020$ ;  $r_2=0.045$ ;  $t=0.006$  {Datos de la geometría}

$T_b=500$ ;  $h_e=50$ ;  $T_\infty=300$  {Datos de las condiciones}

$k=186$  {conductividad del aluminio en torno a  $T=400 \text{ K}$ }

"Calor transferido con el uso de aletas"

$$q_t = h_e * A_t * (1 - ((N * A_f / A_t) * (1 - \eta_f))) * (T_b - T_{\infty})$$

$$A_t = N * A_f + (2 * \pi * r_1 * (H - (N * t))) \quad \{\text{área total}\}$$

$$A_f = A_{f\_aletacirrectang}(r_1, r_2, L, t) \quad \{\text{área de la aleta obtenida de función de librería}\}$$

$$N = 5 \quad \{\text{número de aletas}\}$$

$$\eta_f = E_{f\_aletacirrectang}(h_e, k, r_1, r_2, t) \quad \{\text{eficiencia de la aleta, función de librería}\}$$

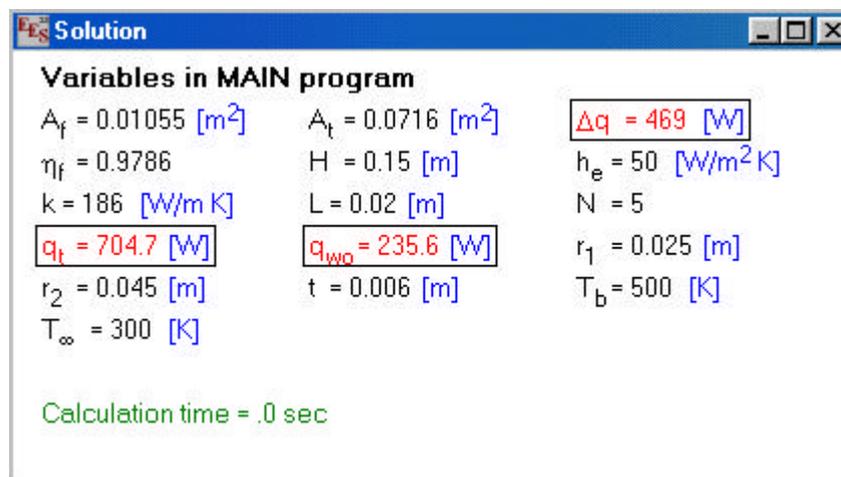
"calor transferido sin aletas"

$$q_{wo} = h_e * (2 * \pi * r_1 * H) * (T_b - T_{\infty})$$

"Diferencia de calor transferido entre un tipo y otro"

$$\Delta q = q_t - q_{wo}$$

Picando en **Solve**, en el menú **Calculate**, obtenemos la solución.



Vamos a ver cómo varía el calor transferido en función del número de aletas. En otro fichero de EES resolvemos el análisis paramétrico.

{Aunque las aletas aumentan de manera significativa la transferencia de calor del cilindro, aún es posible un mejoramiento considerable si se aumenta el número de aletas. Evaluamos esta posibilidad viendo la evolución de  $q_t$  en función de  $N$  manteniendo primero fijo el espesor de la aleta ( $t=6$  mm) e incrementando el número de aletas al reducir el espacio entre las aletas. Determinamos un espaciado de aletas de 2 mm en cada extremo del arreglo y un hueco mínimo de aleta de 4 mm.}

$$N_{\max} = H/S \quad \{\text{número máximo de aletas}\}$$

$$S = 0.002 * 2 + 0.006$$

$$q_t = h_e * A_t * (1 - ((N * A_f / A_t) * (1 - \eta_f))) * (T_b - T_{\infty})$$

$$A_f = A_{f\_aletacirrectang}(r_1, r_2, L, t) \quad \{\text{área de la aleta obtenida de función de librería}\}$$

$$A_t = N * A_f + (2 * \pi * r_1 * (H - (N * t))) \quad \{\text{área total en caso b}\}$$

$$\eta_f = E_{f\_aletacirrectang}(h_e, k, r_1, r_2, t) \quad \{\text{eficiencia de la aleta, función de librería}\}$$

{El número de aletas también aumenta reduciendo el espesor de la aleta. Si el hueco de la aleta se fija en  $(S-t)=4$  mm y las restricciones de fabricación dictan un espesor de aleta mínimo permisible de 2 mm, se pueden acomodar hasta  $N=25$  aletas, en este caso el estudio paramétrico queda}

$t=0.002$  {espesor de aleta mínimo permisible}

$S-t=0.004$

$N_{max}=H/S$

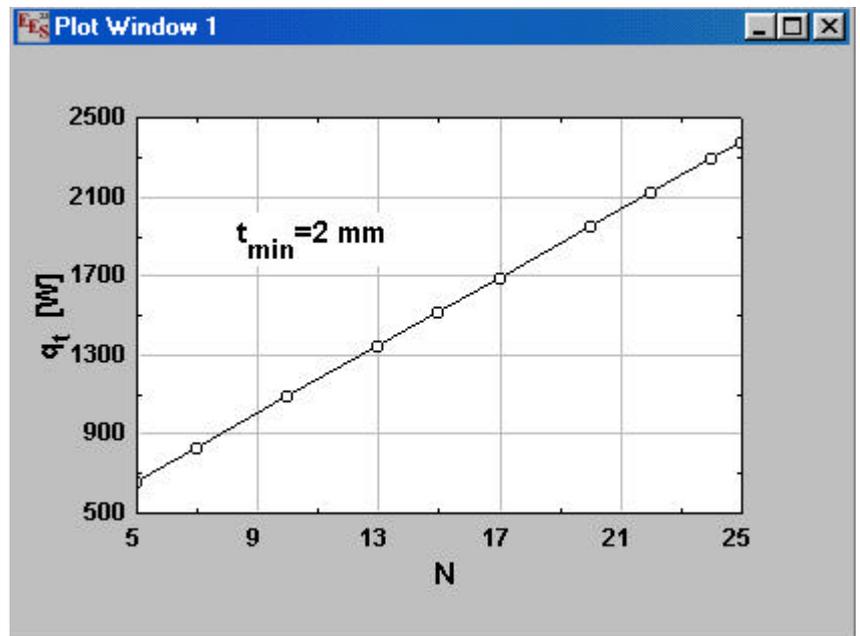
$q_t=h_e*A_t*(1-((N*A_f/A_t)*(1-\eta_f)))*(T_b-T_{infinity})$

$A_t=N*A_f+(2*\pi*r_1*(H-(N*t)))$  {área total }

$A_f=Af_{aleta\text{circrectang}(r_1,r_2,L,t)}$  {área de la aleta obtenida de función de librería}

$\eta_f=Ef_{aleta\text{circrectang}(h_e,k,r_1,r_2,t)}$  {eficiencia de la aleta, función de librería}

	1	2
	N	$q_t$ [W]
Run 1	5	664.6
Run 2	7	836.2
Run 3	10	1094
Run 4	13	1361
Run 5	15	1522
Run 6	17	1694
Run 7	20	1951
Run 8	22	2123
Run 9	24	2295
Run 10	25	2380

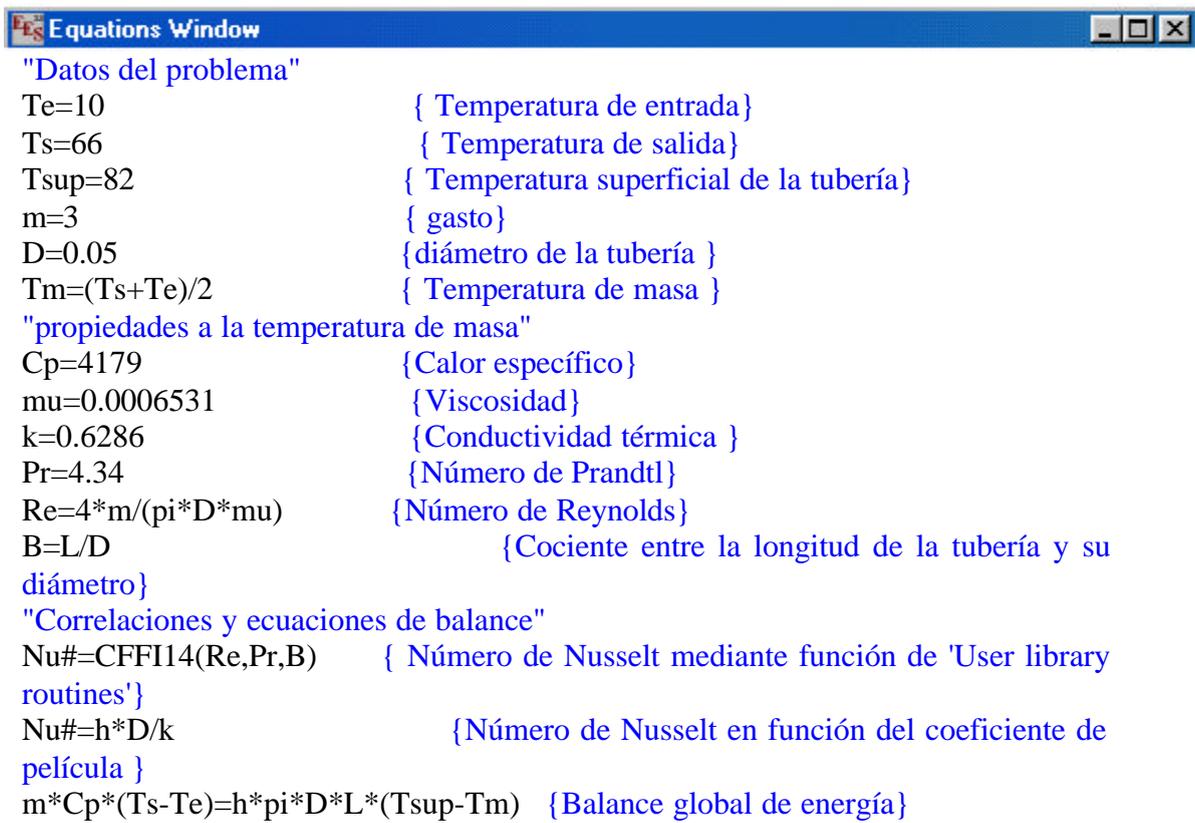


## 6. Convección

### 6.1. Problema 8

Se desean calentar 3 kg/s de agua que circula a través de una tubería horizontal de 5 cm de diámetro, desde 10 C hasta 66 C. La temperatura de la superficie de la tubería se mantiene a 82 C. Determinar:

- Longitud de tubería necesaria para alcanzar la temperatura del agua a la salida.
- coeficiente local de transferencia de calor en la superficie.

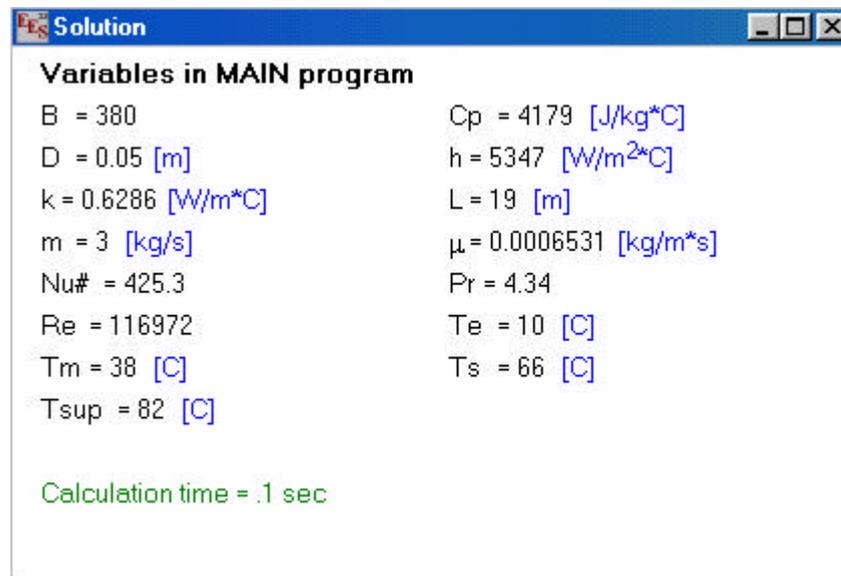


```

Equations Window
"Datos del problema"
Te=10           { Temperatura de entrada }
Ts=66           { Temperatura de salida }
Tsup=82         { Temperatura superficial de la tubería }
m=3             { gasto }
D=0.05          { diámetro de la tubería }
Tm=(Ts+Te)/2   { Temperatura de masa }
"propiedades a la temperatura de masa"
Cp=4179         { Calor específico }
mu=0.0006531   { Viscosidad }
k=0.6286        { Conductividad térmica }
Pr=4.34         { Número de Prandtl }
Re=4*m/(pi*D*mu) { Número de Reynolds }
B=L/D           { Cociente entre la longitud de la tubería y su
diámetro }
"Correlaciones y ecuaciones de balance"
Nu#=CFFI14(Re,Pr,B) { Número de Nusselt mediante función de 'User library
routines' }
Nu#=h*D/k       { Número de Nusselt en función del coeficiente de
película }
m*Cp*(Ts-Te)=h*pi*D*L*(Tsup-Tm) { Balance global de energía }

```

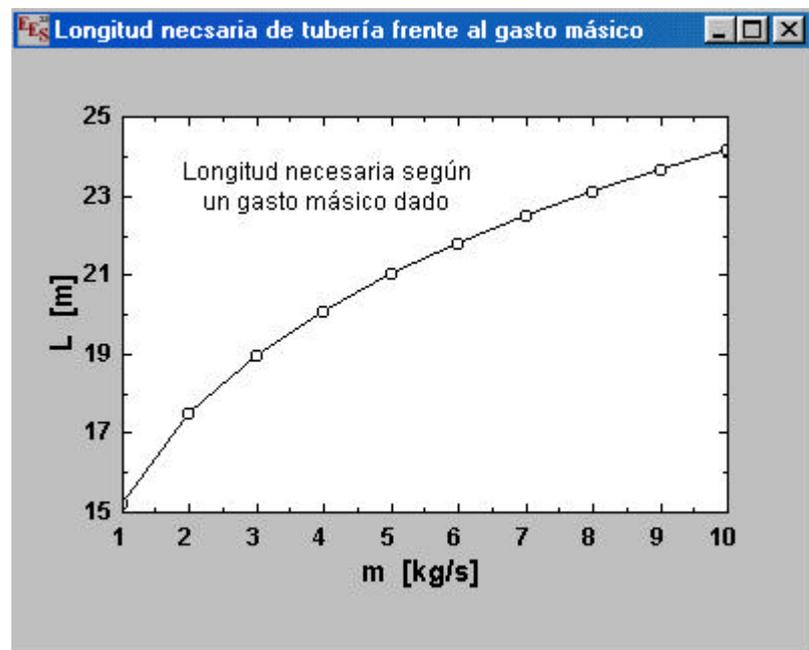
Picando en **Solve**, en el menú **Calculate**, obtenemos la solución.



Vamos a hacer un estudio paramétrico de la variación de la longitud necesaria cuando varía el gasto másico.

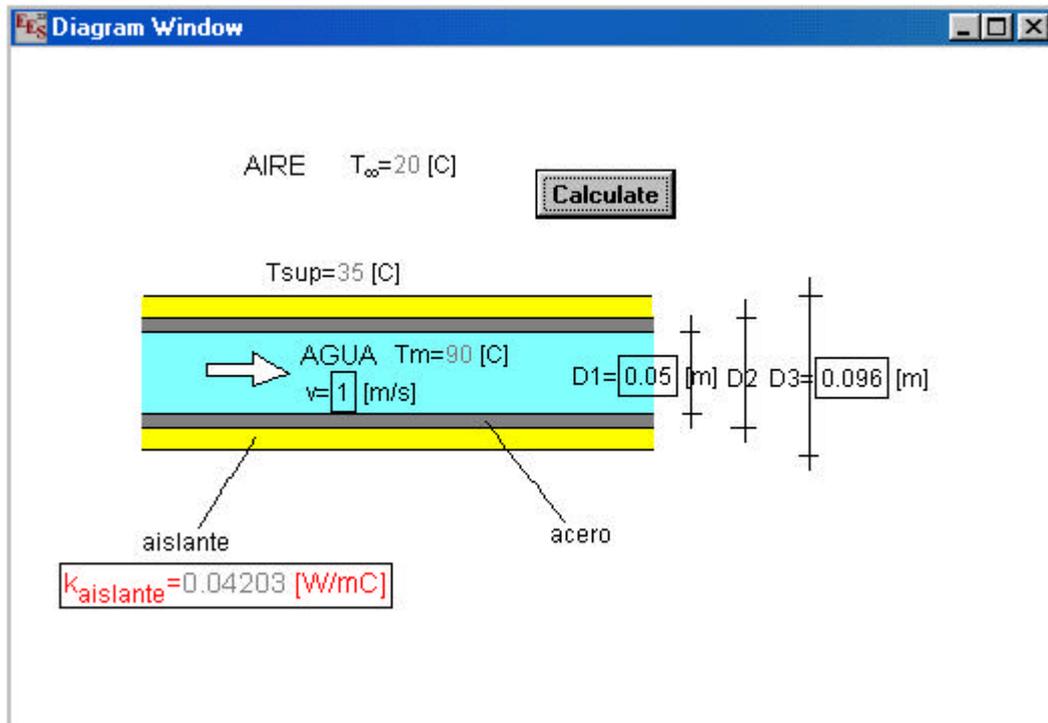
**Parametric Ta...**

	1	2
	m	L
	[kg/s]	[m]
▶ 1..10		
Run 1	1	15.25
Run 2	2	17.52
Run 3	3	19
Run 4	4	20.12
Run 5	5	21.04
Run 6	6	21.82
Run 7	7	22.51
Run 8	8	23.12
Run 9	9	23.67
Run 10	10	24.17



## 6.2. Problema 9

Por el interior de una tubería horizontal de acero de diámetro interior 50 mm y espesor 3 mm, circula agua a 90 C con una velocidad de 1 m/s. La tubería está aislada con una coquilla de 2 cm de espesor y discurre por una nave que se encuentra a 20 C. Para comprobar las características del aislamiento, se mide la temperatura superficial del mismo mediante un termómetro de contacto, observándose una temperatura de 35 C. Calcular la conductividad térmica del aislante. No considerar el intercambio radiante.



En esta ocasión hemos insertado un botón para calcular en **Diagram Window**, sólo picando ahí obtenemos la solución, que hará remarcar la solución en la ventana, ya que hemos utilizado también la opción de salida de datos por **Diagram Window**. Antes de poner la solución veamos la ventana de ecuaciones.



"Datos del problema"

$T_m=90$  {Temperatura de masa en el interior de la tubería}

$T_{sup}=35$  {Temperatura medida en la superficie del aislamiento}

$T_{\infty}=20$  {Temperatura ambiente}

$D_2=D_1+0.006$  {Diámetro exterior de la tubería, el interior y exterior del aislante se han introducido mediante el Diagram Window}

"Propiedades del agua usando 'thermophysical properties functions'"

$\rho=DENSITY(\text{Water}, T=T_m, P=1)$  {Densidad}

$\mu=VISCOSITY(\text{Water}, T=T_m, P=1)$  {Viscosidad}

$Pr_i=PRANDTL(\text{Water}, T=T_m, P=1)$  {Número de Prandtl}

```

k_agua=CONDUCTIVITY(Water,T=Tm,P=1) {Conductividad térmica del agua}
Re=rho*v*D1/mu {Número de Reynolds}
"Correlaciones mediante las funciones de librería"
Nu#_i=CFFI14(Re,Pr_i,60) { Número de Nusselt interno mediante función
de 'User library routines'}
Nu#_i=h_i*D1/k_agua {Número de Nusselt interno en función del coeficiente
de película interno}
"Propiedades del aire usando 'termophysical properties functions'"
Tmp=(Tsup+T_infinity)/2 {Temperatura media de película}
beta=1/(Tmp+273) {coeficiente de dilatación volumétrica}
Pr_e=PRANDTL(Air,T=Tmp) {Número de Prandtl}
nu=VISCOSITY(Air,T=Tmp)/DENSITY(Air,T=Tmp,P=1) {Viscosidad
cinemática}
k_aire=CONDUCTIVITY(Air,T=Tmp) {Conductividad térmica del aire}
Ra=(beta*9.81*(Tsup-T_infinity)*D3^3*Pr_e)/(nu^2) {Número de Rayleigh}
"Correlaciones mediante las funciones de librería"
Nu#_e=CLFE14(Ra) { Número de Nusselt externo mediante función de 'User
library routines'}
Nu#_e=h_e*D3/k_aire {Número de Nusselt interno en función del coeficiente
de película interno}
(Tm-
Tsup)/((1/(h_i*pi*D1))+ln(D3/D2)/(2*pi*k_aislante))+1/(h_e*pi*D3))=h_e*pi*
D3*(Tsup-T_infinity) {Ecuación global de balance}

```

Picando en **Solve**, en el menú **Calculate**, o bien en el botón de **Diagram Window** obtenemos la solución.

Unit Settings: [C]/[bar]/[kg]/[degrees]

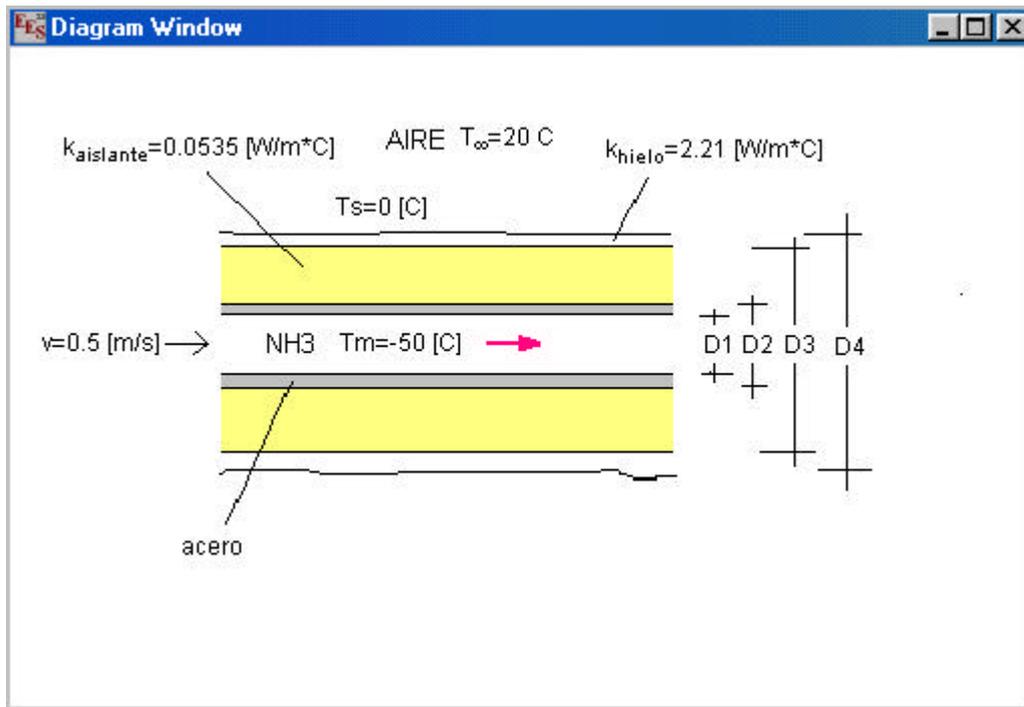
**Variables in MAIN program**

$\beta = 0.003328$ [1/K]	D1 = 0.05 [m]	D2 = 0.056 [m]
D3 = 0.096 [m]	$h_e = 4.329$ [W/m <sup>2</sup> C]	$h_i = 5475$ [W/m <sup>2</sup> C]
$k_{agua} = 0.6755$ [W/mC]	$k_{aire} = 0.02612$ [W/mC]	<b><math>k_{aislante} = 0.04203</math> [W/mC]</b>
$\mu = 0.0003146$ [kg/m-s]	$\nu = 0.00001601$ [m <sup>2</sup> /s]	Nu#_e = 15.92
Nu#_i = 405.3	Pr_e = 0.7153	Pr_i = 1.958
Ra = 1.209E+06	Re = 153439	$\rho = 965.5$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Tm = 90 [C]	Tmp = 27.5 [C]	Tsup = 35 [C]
T <sub>∞</sub> = 20 [C]	v = 1 [m/s]	

Calculation time = .0 sec

### 6.3. Problema 10

Por el interior de una tubería de acero de 5 cm de diámetro y 3 mm de espesor circula amoníaco líquido a  $-50\text{ C}$ , a una velocidad de  $30\text{ m/min}$ . La tubería está recubierta por una coquilla de aislante ( $k=0.0535\text{ W/mC}$ ) de  $1\text{ cm}$  de espesor y atraviesa un local que se encuentra a  $20\text{ C}$ . Calcular el espesor de la capa de hielo que se forma suponiendo una conductividad térmica del hielo constante de  $1.9\text{ W/mC}$ .



#### Equations Window

"Datos del problema"

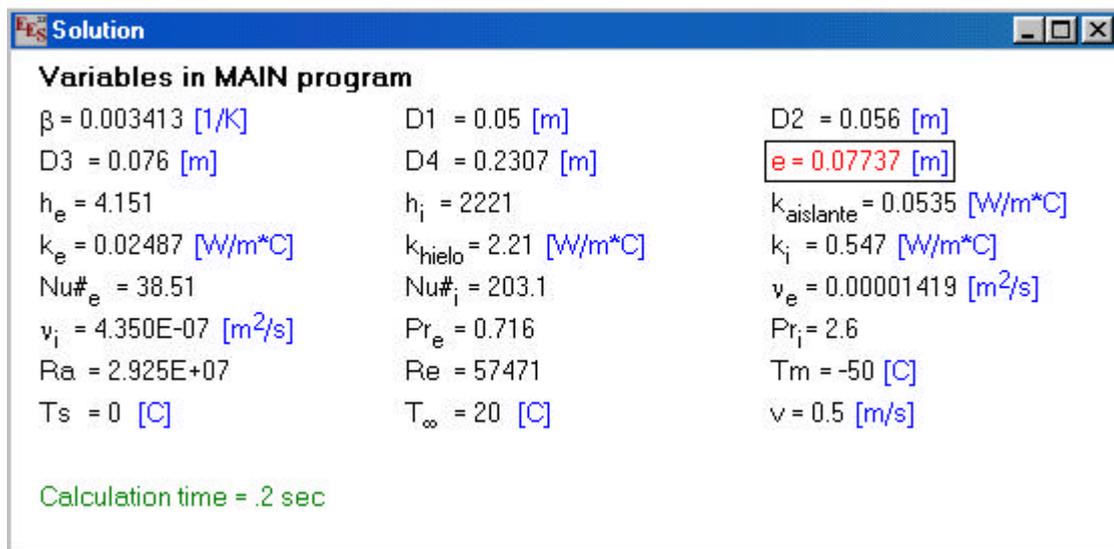
$T_m = -50$	{ Temperatura de masa }
$T_s = 0$	{ Temperatura superficial de la tubería, $0\text{ C}$ por ser hielo }
$T_{\infty} = 20$	{ Temperatura ambiente del local }
$D_1 = 0.05$	{ diámetro interior de la tubería }
$D_2 = 0.056$	{ diámetro exterior de la tubería de acero }
$D_3 = 0.076$	{ diámetro exterior de la tubería incluyendo la coquilla de aislante }
$e = (D_4 - D_3) / 2$	{ espesor de la capa de hielo }
$v = 0.5$	{ velocidad del flujo }
$k_{\text{aislante}} = 0.0535$	{ conductividad térmica del aislante }
$k_{\text{hielo}} = 2.2097$	{ conductividad térmica del hielo }
"propiedades del fluido interior, NH3, a temperatura de masa"	
$\nu_i = 0.435E-6$	{ Viscosidad cinemática }
$Pr_i = 2.60$	{ Número de Prandtl }
$k_i = 0.547$	{ conductividad térmica interior }
$Re = v * D_1 / \nu_i$	{ número de Reynolds interior }

```

"Correlaciones usando 'User library routines'"
Nu#_i=CFFI14(Re,Pr_i,60)    { Número de Nusselt mediante función de 'User
library routines'}
Nu#_i=h_i*D1/k_i           {expresión del número de Nusselt interior}
"propiedades del aire exterior a Tmp=10C"
beta=1/(T_infinity+273)    { coeficiente de dilatación volumétrica, T_infinity en C}
nu_e=14.19E-6              { Viscosidad}
Pr_e=0.716                 {Número de Prandtl}
k_e=24.87E-3              { conductividad térmica exterior}
Ra=9.81*beta*(T_infinity-Ts)*D4^3*Pr_e/nu_e^2  { número de Rayleigh}
"Correlaciones usando 'User library routines'"
Nu#_e=CLFE14(Ra)          { Número de Nusselt mediante función de 'User
library routines'}
Nu#_e=h_e*D4/k_e          {expresión del número de Nusselt exterior}
"ecuación de balance global"
(T_infinity-
Tm)/((1/h_i*pi*D1)+(ln(D3/D2)/(2*pi*k_aislante))+(ln(D4/D3)/(2*pi*k_hielo)))+(1
/h_e*pi*D4)=(T_infinity-Ts)*h_e*pi*D4  {ecuación de balance global}

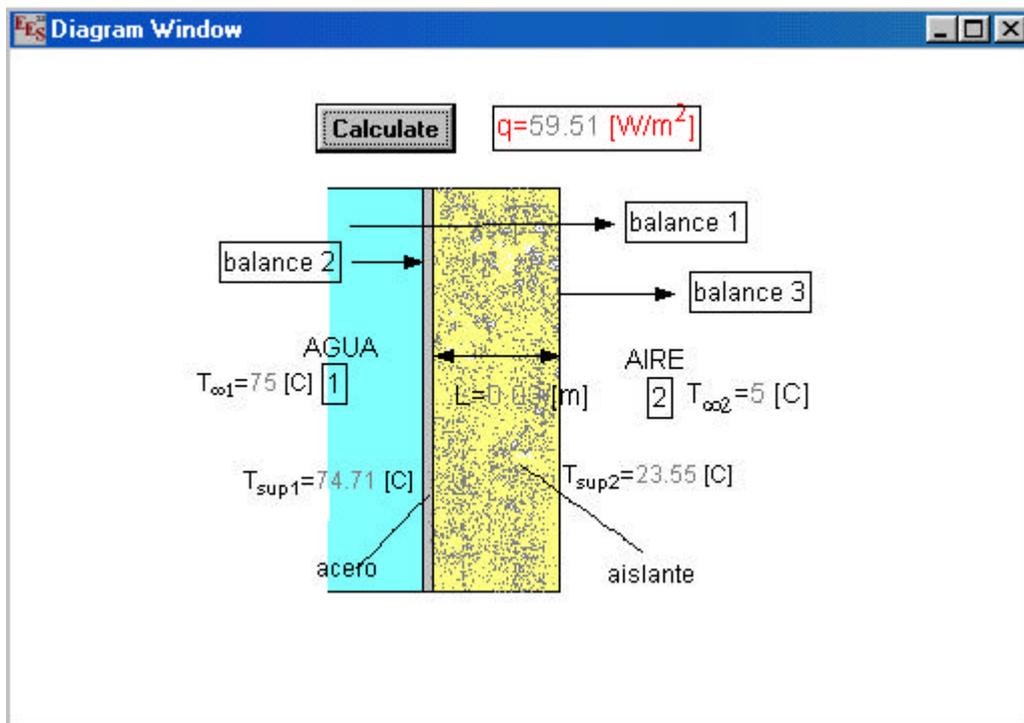
```

Picar en **Solve**, en el menú **Calculate**, para ver la solución.



## 6.4. Problema 11

Un depósito vertical de agua a 75 C situado en el exterior se aísla con 3 cm de fibra de vidrio ( $k=0.0349$  W/mC). El depósito, de diámetro suficientemente grande, está construido en chapa de acero de 3 mm de espesor. Calcular las pérdidas de calor laterales por unidad de superficie si la temperatura del aire ambiente en reposo es 5 C. Suponer régimen turbulento en ambas superficies y despreciar el intercambio radiante.



Se ha introducido en **Diagram Window** el botón para calcular y se ha utilizado también como salida de datos, aunque eso no quita que tengamos nuestra ventana de solución como veremos después de mostrar la ventana de ecuaciones.



Nota: el orden de las 'Ecuaciones de balance' y los valores iniciales de algunas variables como coeficientes de películas y  $T_{mp}$  (con la que se calculan las propiedades en este caso) en 'Variable Info' del menú 'Options', es importante para obtener la solución sin problemas de convergencia o rangos de validez de algunas variables. La altura del depósito la he tomado de 3 m, para el cálculo de  $Ra$  y de  $h$ .

Picar en 'Solve' del menú 'Calculate', o en el botón 'Calculate' de "Diagram Window" para obtener la solución.}

"Datos del problema"

$T_{\infty 1} = 75$	{ Temperatura de agua }
$T_{\infty 2} = 5$	{ Temperatura de aire }
$L = 0.03$	{ Espesor de aislante }
$k_{\text{aislante}} = 0.0349$	{ Conductividad térmica del aislante }

"Ecuaciones de balance"

$$(T_{\infty 1} - T_{\infty 2}) / ((1/h_1) + (L/k_{\text{aislante}}) + (1/h_2)) = h_1 * (T_{\infty 1} - T_{\text{sup1}})$$
 { Balance de energía desde el agua hasta la superficie del depósito, balance 2 del diagrama }

$$(T_{\infty 1} - T_{\infty 2}) / ((1/h_1) + (L/k_{\text{aislante}}) + (1/h_2)) = h_2 * (T_{\text{sup2}} - T_{\infty 2})$$
 { Balance de energía desde la superficie del aislante hasta el aire, balance 3 del diagrama }

$$q = (T_{\infty 1} - T_{\infty 2}) / ((1/h_1) + (L/k_{\text{aislante}}) + (1/h_2))$$
 { Calor transferido desde el seno del agua hasta el seno del aire, balance 1 del diagrama }

"Cálculo de coeficiente de película interno"

$$T_{\text{mp1}} = (T_{\text{sup1}} + T_{\infty 1}) / 2$$
 { Temperatura media de película }

"Propiedades del agua a  $T_{\text{mp1}}$ "

$$\beta_1 = 0.619 \times 10^{-3}$$
 { Coeficiente de dilatación volumétrica }

$$\nu_1 = \text{VISCOSITY}(\text{Water}, T=T_{\text{mp1}}, P=1) / \text{DENSITY}(\text{Water}, T=T_{\text{mp1}}, P=1)$$
 { Viscosidad cinemática }

$$\text{Pr}_1 = \text{PRANDTL}(\text{Water}, T=T_{\text{mp1}}, P=1)$$
 { Número de Prandtl }

$$k_1 = \text{CONDUCTIVITY}(\text{Water}, T=T_{\text{mp1}}, P=1)$$
 { Conductividad térmica del agua }

$$\text{Ra}_1 = (9.81 * \beta_1 * (T_{\infty 1} - T_{\text{sup1}}) * 3^3 * \text{Pr}_1) / \nu_1^2$$
 { Número de Rayleigh }

$$\text{Nu}\#_1 = \text{CLFE1}(\text{Ra}_1)$$
 { Número de Nusselt externo mediante función de 'User library routines' }

$$\text{Nu}\#_1 = h_1 * 3 / k_1$$
 { Número de Nusselt en función del coeficiente de película }

"Cálculo de coeficiente de película externo"

$$T_{\text{mp2}} = (T_{\text{sup2}} + T_{\infty 2}) / 2$$
 { Temperatura media de película }

"Propiedades del agua a  $T_{\text{mp2}}$ "

$$\beta_2 = 1 / (T_{\text{mp2}} + 273)$$
 { Temperatura media de película }

$$\nu_2 = \text{VISCOSITY}(\text{Air}, T=T_{\text{mp2}}) / \text{DENSITY}(\text{Air}, T=T_{\text{mp2}}, P=1)$$
 { Viscosidad cinemática }

$$\text{Pr}_2 = \text{PRANDTL}(\text{Air}, T=T_{\text{mp2}})$$
 { Número de Prandtl }

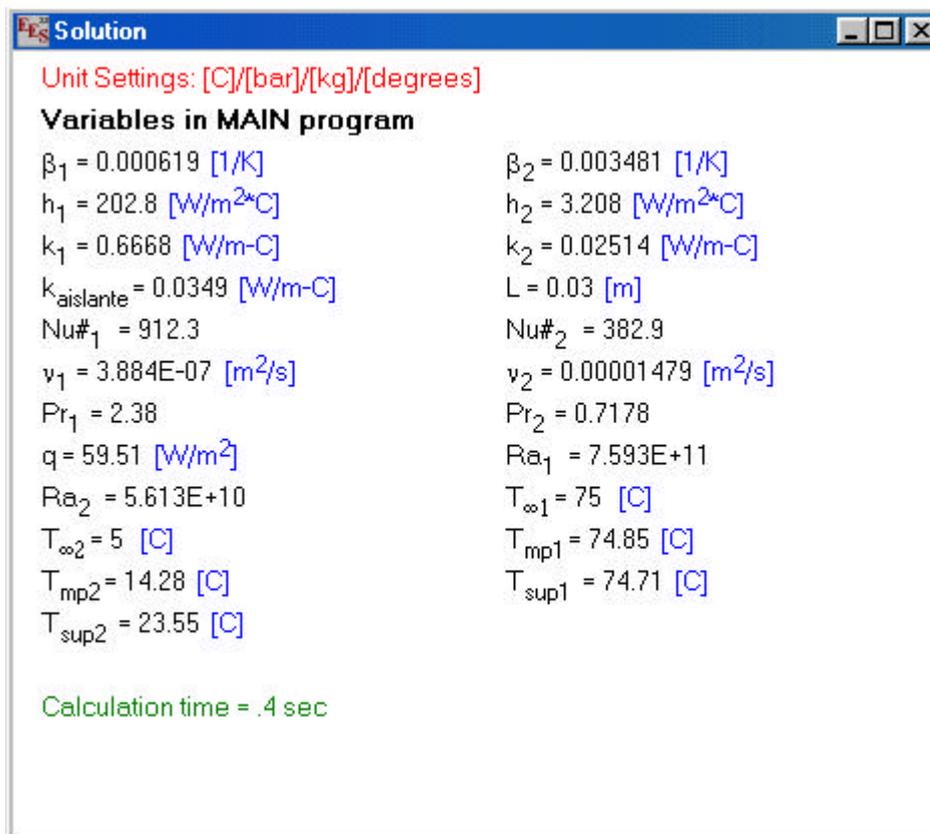
$$k_2 = \text{CONDUCTIVITY}(\text{Air}, T=T_{\text{mp2}})$$
 { Conductividad térmica del aire }

$$\text{Ra}_2 = (9.81 * \beta_2 * (T_{\text{sup2}} - T_{\infty 2}) * 3^3 * \text{Pr}_2) / \nu_2^2$$
 { Número de Rayleigh }

$$\text{Nu}\#_2 = \text{CLFE1}(\text{Ra}_2)$$
 { Número de Nusselt externo mediante función de 'User library routines' }

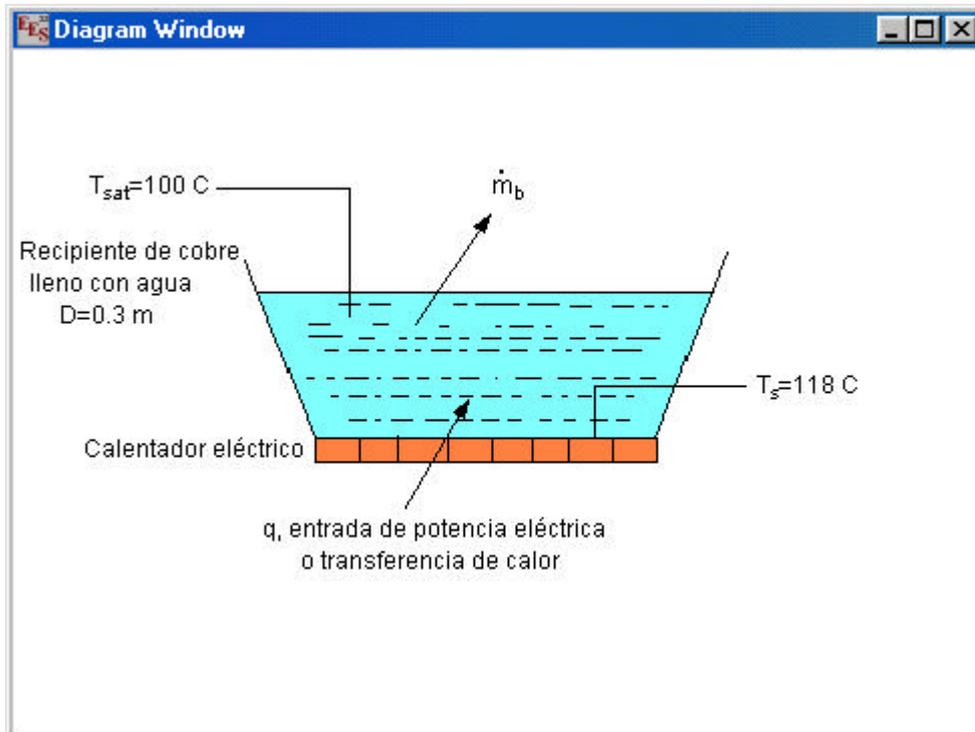
$$\text{Nu}\#_2 = h_2 * 3 / k_2$$
 { Número de Nusselt en función del coeficiente de película }

Resolviendo obtenemos la ventana de solución.



## 6.5. Problema 12

La parte inferior de un recipiente de cobre, de 0.3 m de diámetro, se mantiene a 118 C mediante un calentador eléctrico. Estime la potencia que se requiere para hervir agua en este recipiente. ¿Cuál es la rapidez de evaporación? Estime el flujo crítico de calor.



### Equations Window

"Solución"

{Suposiciones:

- 1.- Condiciones de estado estable.
- 2.- Agua expuesta a presión atmosférica estándar, 1.01 bar.
- 3.- Agua a temperatura uniforme  $T_{sat}=100\text{ C}$ .
- 4.- Superficie inferior del recipiente de cobre pulido.
- 5.- Pérdidas insignificantes del calentador a los alrededores.}

"Propiedades"

rho\_liq=957.9  
 Cpl=4217  
 mu\_liq=279E-6  
 Pr\_l=1.76  
 h\_lg=2257E3  
 sigma=58.9E-3  
 rho\_vap=0.5955

"Datos"

Ts=118  
 Tsat=100  
 D=0.3

"Ecuaciones para la solución"

$$\text{DELTA}T_e = T_s - T_{\text{sat}}$$

$q = \text{EBULLICION1}(\mu_{\text{liq}}, h_{\text{lg}}, \rho_{\text{liq}}, \rho_{\text{vap}}, \sigma, C_{\text{pl}}, C_{\text{s,f}}, Pr_1, n, \text{DELTA}T_e)$  { función que nos devuelve el calor por unidad de área de la superficie de la placa, para ebullición nucleada }

$C_{\text{s,f}} = 0.0130$ ;  $n = 1$  ;  $A = (\pi \cdot (D^2)) / 4$  { valores que corresponde a la combinación superficie pulida de cobre-agua, y A es el área de transferencia de calor }

$$Q_s = q \cdot A$$

$Q_s = m_{\text{dot}} \cdot h_{\text{lg}}$  { de aquí obtenemos la rapidez a la que se evapora agua desde la superficie libre al ambiente }

$q_{\text{max}} = \text{EBULLICION2}(h_{\text{lg}}, \rho_{\text{liq}}, \rho_{\text{vap}}, \sigma)$  { flujo de calor crítico }

Picando en **Solve**, en el menú **Calculate**, obtenemos la solución.

**Solution**

**Variables in MAIN program**

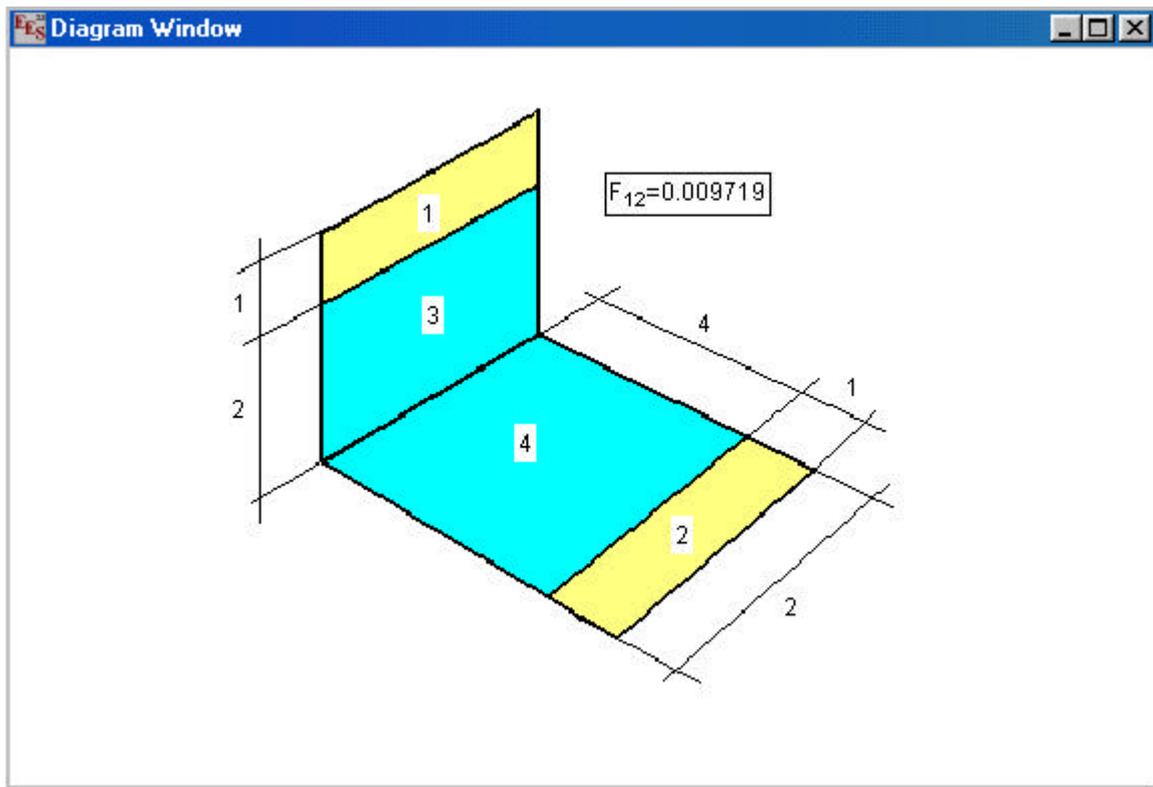
$A = 0.07069 \text{ [m}^2\text{]}$	$C_{\text{pl}} = 4217 \text{ [J/kg]}$
$C_{\text{s,f}} = 0.013 \text{ [C]}$	$D = 0.3 \text{ [m]}$
$\Delta T_e = 18 \text{ [C]}$	$h_{\text{lg}} = 2.257\text{E}+06 \text{ [J/kg]}$
$\mu_{\text{liq}} = 0.000279 \text{ [Ns/m}^2\text{]}$	$\dot{m}_h = 0.02501 \text{ [kg/s]}$
$n = 1$	$Pr_1 = 1.76$
$q = 798552 \text{ [W/m}^2\text{]}$	$q_{\text{max}} = 1.106\text{E}+06 \text{ [W/m}^2\text{]}$
$Q_s = 56446 \text{ [W]}$	$\rho_{\text{liq}} = 957.9 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
$\rho_{\text{vap}} = 0.5955 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$\sigma = 0.0589 \text{ [N/m]}$
$T_s = 118 \text{ [C]}$	$T_{\text{sat}} = 100 \text{ [C]}$

Calculation time = .0 sec

## 7. Radiación

### 7.1. Problema 13

Calcular el Factor de forma  $F_{12}$  de la figura de **Diagram Window**.



{Para aclarar la nomenclatura,  $F_{13\#24}$  significa factor de forma de la superficie 13 sobre la 24, el símbolo # indica la separación entre dos superficies, pero  $F_{12}$  indica factor de forma de 1 sobre 2, ya que no hay suma de superficies. }

$$A_{13} * F_{13\#24} = A_1 * F_{12} + A_1 * F_{14} + A_3 * F_{3\#42} \quad \text{\{adición\}}$$

$$A_{13} * F_{13\#4} = A_1 * F_{14} + A_3 * F_{34} \quad \text{\{adición\}}$$

$$A_1 = 2$$

$$A_3 = 4$$

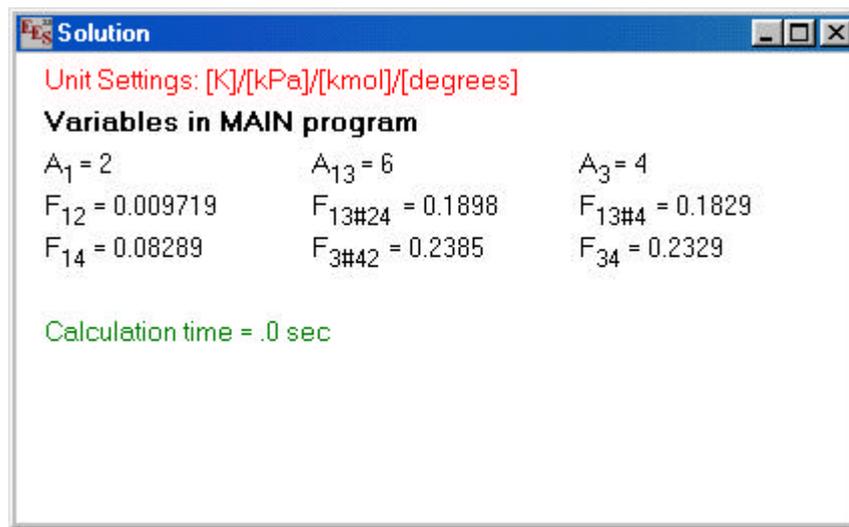
$$A_{13} = 6$$

$$F_{3\#42} = \text{FFORMA3D9}(2,2,5) \quad \text{\{funciones de librería de factores de forma 3D\}}$$

$$F_{13\#4} = \text{FFORMA3D9}(3,2,4)$$

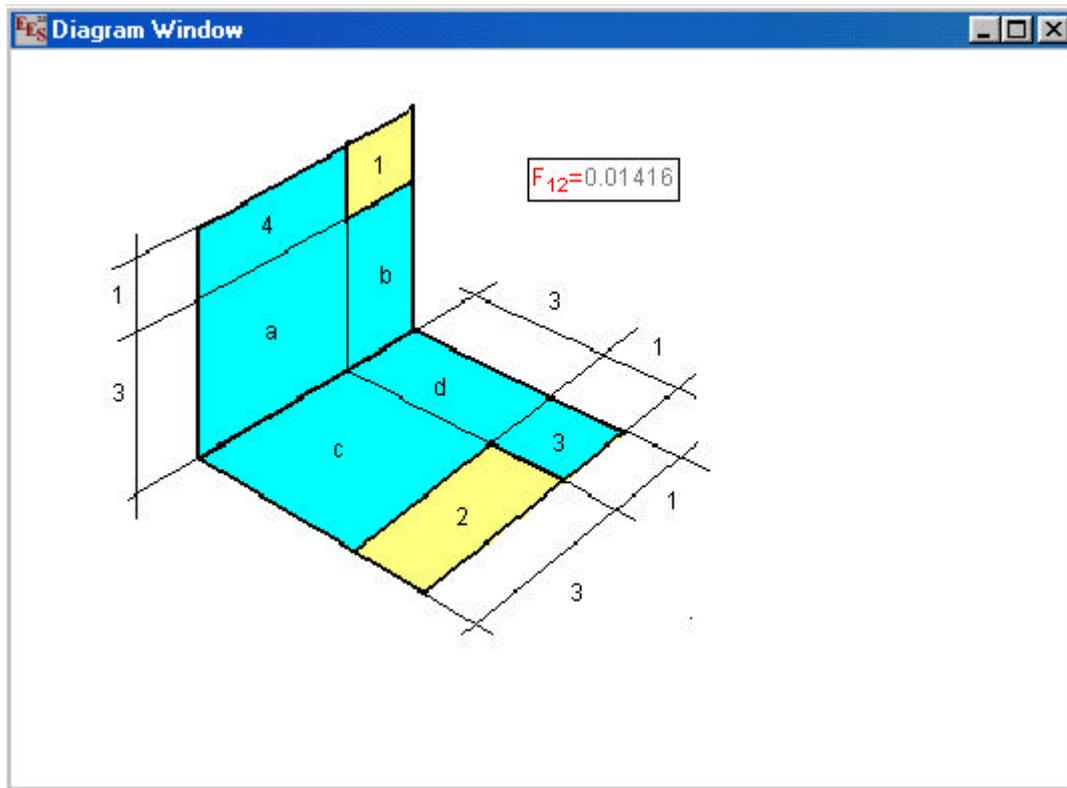
$$F_{34} = \text{FFORMA3D9}(2,2,4)$$

$$F_{13\#24} = \text{FFORMA3D9}(3,2,5)$$



## 7.2 Problema 14

Calcular el Factor de forma  $F_{12}$  de la figura de **Diagram Window**.

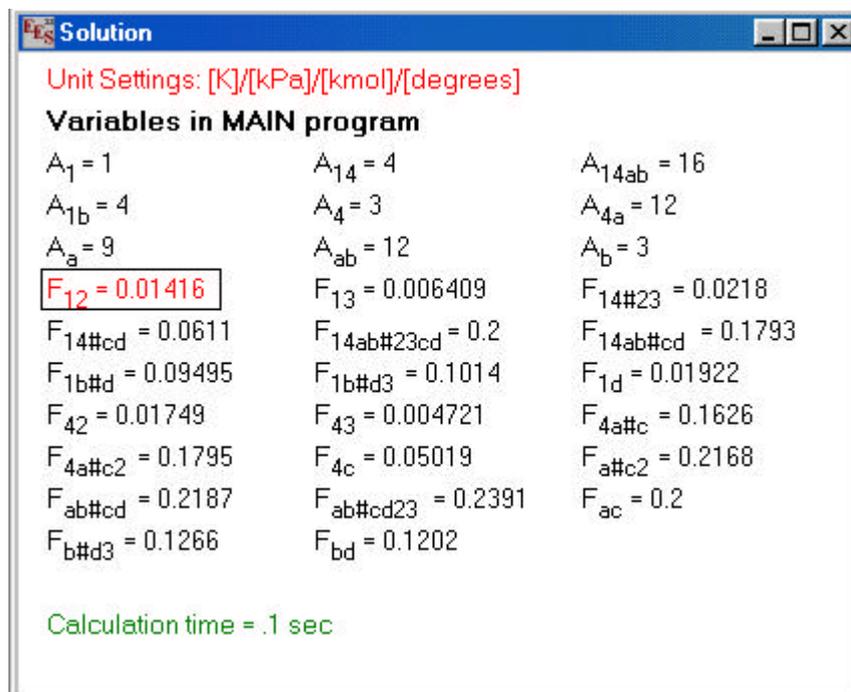


### Equations Window

$A_{14}=4; A_1=1; A_4=3$  {áreas }  
 $A_{14} * F_{14\#23} = A_1 * F_{12} + A_1 * F_{13} + A_4 * F_{42} + A_4 * F_{43}$  { adición }  
 $A_1 * F_{12} = A_4 * F_{43}$  {reciprocidad }  
 $A_{14ab}=16; A_{ab}=12$  {áreas }  
 $A_{14ab} * F_{14ab\#23cd} = A_{14} * F_{14\#23} + A_{14} * F_{14\#cd} + A_{ab} * F_{ab\#cd23}$  { adición }  
 $F_{ab\#cd23} = \text{FFORMA3D9}(3,4,4)$  { funciones de librería para factor de forma (w,l,h) }  
 $F_{14ab\#23cd} = \text{FFORMA3D9}(4,4,4)$  { funciones de librería para factor de forma (w,l,h) }  
 $A_{14ab} * F_{14ab\#cd} = A_{14} * F_{14\#cd} + A_{ab} * F_{ab\#cd}$  { adición }  
 $F_{14ab\#cd} = \text{FFORMA3D9}(4,4,3)$  { funciones de librería para factor de forma (w,l,h) }  
 $F_{ab\#cd} = \text{FFORMA3D9}(3,4,3)$  { funciones de librería para factor de forma (w,l,h) }  
 $A_{1b}=4; A_b=3$  {áreas }  
 $A_{1b} * F_{1b\#d3} = A_1 * F_{1d} + A_1 * F_{13} + A_b * F_{b\#d3}$  { adición }  
 $F_{1b\#d3} = \text{FFORMA3D9}(4,1,4)$  { funciones de librería para factor de forma (w,l,h) }  
 $F_{b\#d3} = \text{FFORMA3D9}(3,1,4)$  { funciones de librería para factor de forma (w,l,h) }  
 $A_{1b} * F_{1b\#d} = A_1 * F_{1d} + A_b * F_{bd}$  { adición }

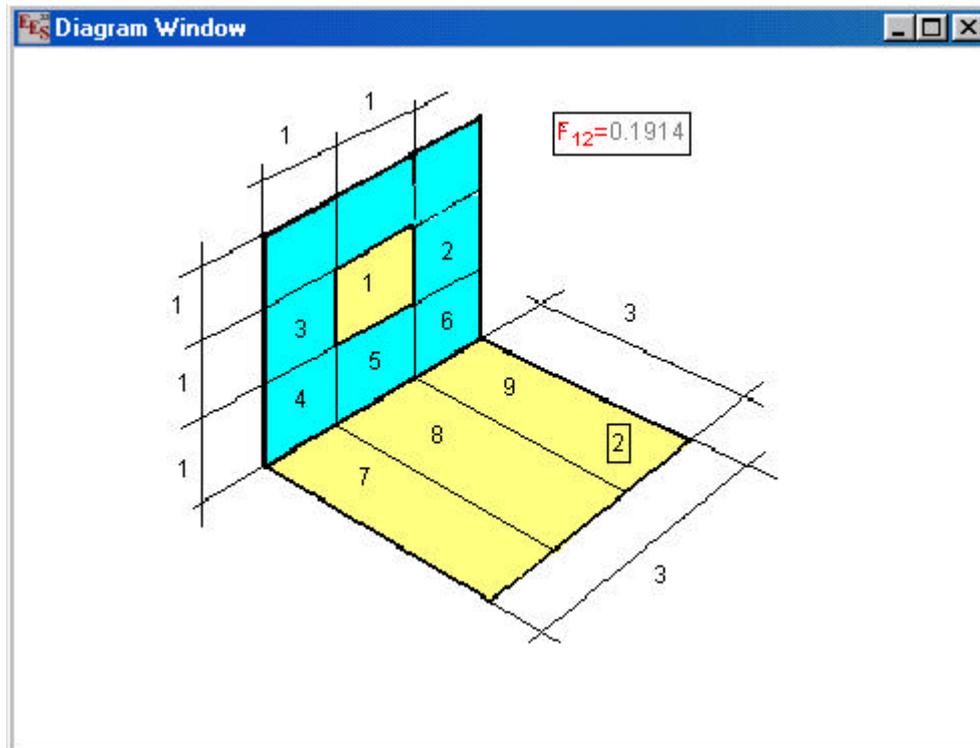
$F_{1b\#d} = \text{FFORMA3D9}(4,1,3)$  { funciones de librería para factor de forma (w,l,h)}  
 $F_{bd} = \text{FFORMA3D9}(3,1,3)$  { funciones de librería para factor de forma (w,l,h)}  
 $A_{4a} = 12; A_a = 9$  {áreas}  
 $A_{4a} * F_{4a\#c2} = A_4 * F_{4c} + A_4 * F_{42} + A_a * F_{a\#c2}$  {adición}  
 $F_{4a\#c2} = \text{FFORMA3D9}(4,3,4)$  { funciones de librería para factor de forma (w,l,h)}  
 $F_{a\#c2} = \text{FFORMA3D9}(3,3,4)$  { funciones de librería para factor de forma (w,l,h)}  
 $A_{4a} * F_{4a\#c} = A_4 * F_{4c} + A_a * F_{ac}$  {adición}  
 $F_{4a\#c} = \text{FFORMA3D9}(4,3,3)$  { funciones de librería para factor de forma (w,l,h)}  
 $F_{ac} = \text{FFORMA3D9}(3,3,3)$  { funciones de librería para factor de forma (w,l,h)}

Resolviendo, obtenemos la solución.



### 7.3. Problema 15

Calcular el Factor de forma  $F_{12}$  de la figura de **Diagram Window**.



**Equations Window**

$$A_1 * F_{12} = 2 * A_1 * F_{17} + A_1 * F_{18} \quad \{\text{adición}\}$$

"Cálculo de  $F_{18}$ "

$$A_1 * F_{18} = A_{15} * F_{15\#8} - A_5 * F_{58} \quad \{\text{adición}\}$$

$$F_{15\#8} = \text{FFORMA3D9}(2,1,3) \quad \{\text{funciones de librería para factor de forma (w,l,h)}\}$$

$$F_{58} = \text{FFORMA3D9}(1,1,3) \quad \{\text{funciones de librería para factor de forma (w,l,h)}\}$$

"Cálculo de  $F_{17}$ "

$$A_{13} * F_{13\#78} = A_1 * F_{17} + A_1 * F_{18} + A_3 * F_{37} + A_3 * F_{38} \quad \{\text{adición}\}$$

$$A_1 * F_{17} = A_3 * F_{38} \quad \{\text{reciprocidad espacial}\}$$

$$A_1 * F_{18} = A_3 * F_{37} \quad \{\text{reciprocidad espacial}\}$$

$$A_{13} * F_{13\#78} = A_{1345} * F_{1345\#78} - A_{45} * F_{45\#78}$$

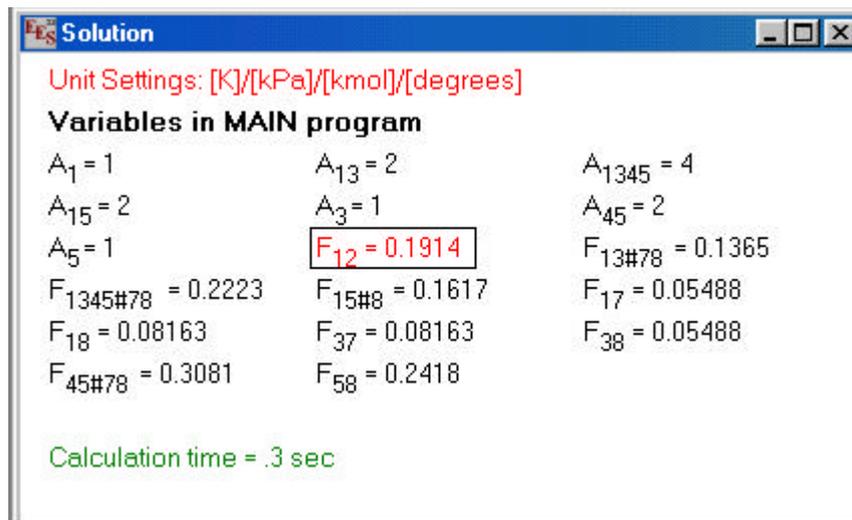
$$F_{1345\#78} = \text{FFORMA3D9}(2,2,3) \quad \{\text{funciones de librería para factor de forma (w,l,h)}\}$$

$$F_{45\#78} = \text{FFORMA3D9}(1,2,3) \quad \{\text{funciones de librería para factor de forma (w,l,h)}\}$$

"Datos de las áreas"

$$A_1 = 1; A_{13} = 2; A_{15} = 2; A_3 = 1$$

$$A_{45} = 2; A_5 = 1; A_{1345} = 4$$



## 7.4. Problema 16

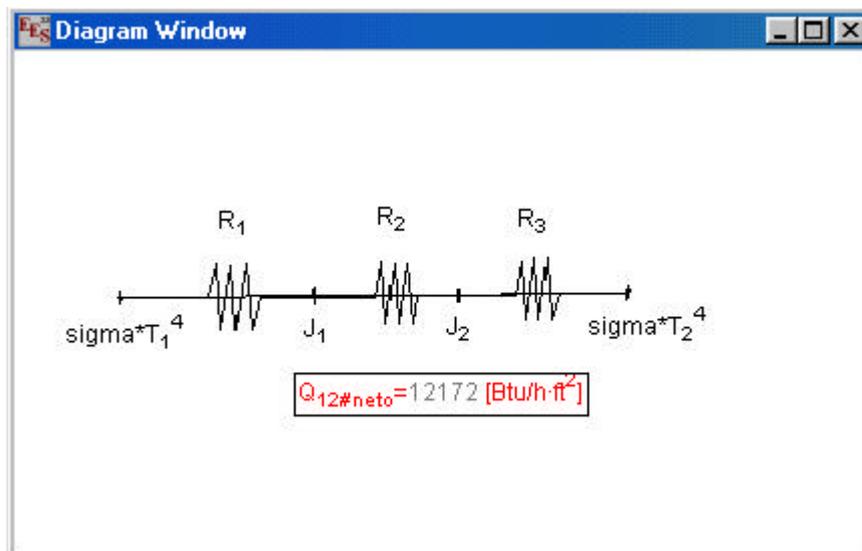
Se emplea una barra cilíndrica como calefactor; su diámetro es de 2 pulgadas, su emisividad efectiva es de 0.7 y se mantiene a 1640 F por efecto de calentamiento de una resistencia eléctrica.

- Determinar la energía que se debe proporcionar por pie de longitud de la barra.
- Determinar la energía que se debe proporcionar por pie de longitud de la barra si se coloca un reflector aislado, semicircular de 18 pulgadas de diámetro de la forma mostrada en la segunda **Diagram Window**.

Las paredes de la habitación en que está colocada la barra de calefacción está a 60 F con emisividad efectiva de 0.6.

Vamos a utilizar la analogía eléctrica.

a)



Equations Window

"Datos"

$$T_1=1640+460$$

$$\text{epsilon}_1=0.7$$

$$T_2=60+460$$

$$\text{epsilon}_2=0.6$$

$$D=2$$

$$S_1=\pi \cdot D/12 \quad \{ \text{área por por unidad de longitud de barra} \}$$

$$F_{12}=1 \quad \{ \text{la barra solo ve a la habitación} \}$$

$$\sigma=0.1714\text{E-}8$$

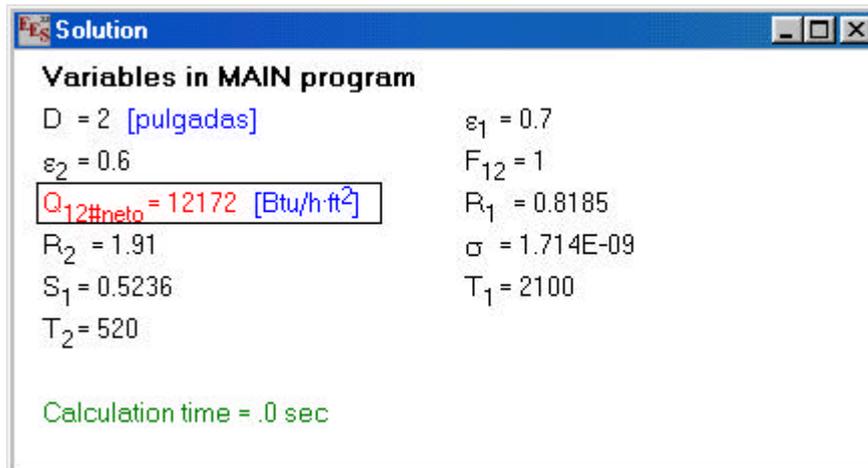
{ Teniendo en cuenta que la superficie 2 es mucho mayor que la 1, la resistencia  $R_2$  será despreciable frente a las demás, y el circuito se simplifica }

$$R_1=(1-\text{epsilon}_1)/(\text{epsilon}_1 \cdot S_1)$$

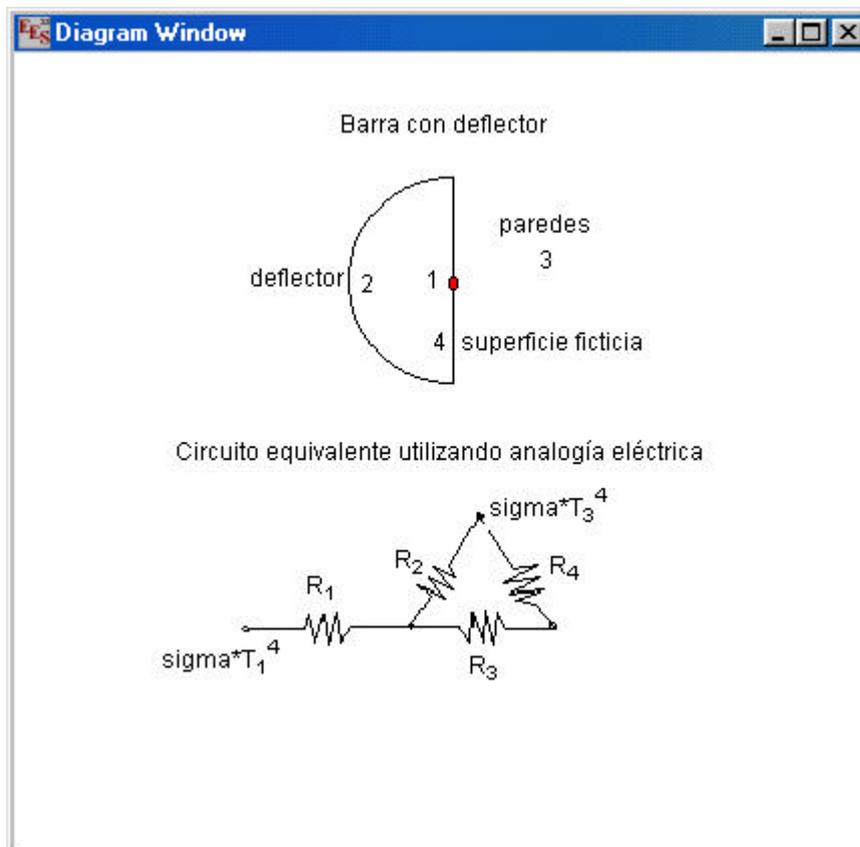
$$R_2=1/(S_1 \cdot F_{12})$$

$$Q_{12\#neto}=(\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4))/(R_1 + R_2)$$

Picando en **Solve**, en el menú **Calculate**, obtenemos la solución.



b)



**Equations Window**

"Datos"

$$T_1 = 1640 + 460$$

$$\epsilon_1 = 0.7$$

$$T_3 = 60 + 460$$

{ en este problema las paredes es la superficie 3 }

$$\epsilon_2 = 0.6$$

$$D_1 = 2$$

$$D_2 = 18$$

$$S_1 = \pi * D_1 / 12$$

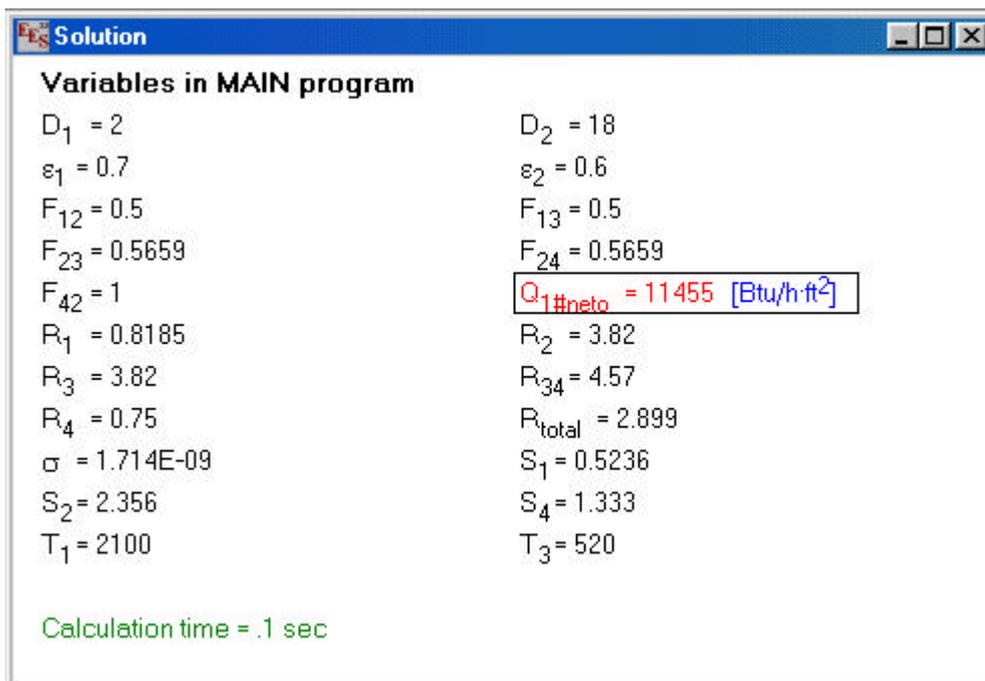
{ área de superficie 1 por unidad de longitud de barra }

```

S_2=(pi*D_2)/(12*2)      { área de superficie 2 por unidad de longitud de barra
}
S_4=16/12                { área de superficie 4 por unidad de longitud de barra }
sigma=0.1714E-8
"Cálculo de factores de forma"
F_12+F_13=1              { adición}
F_12=F_13
F_42=1                   { superficie 4 es ficticia}
S_2*F_24=S_4*F_42       { reciprocidad}
F_24=F_23
"solución del circuito"
R_1=(1-epsilon_1)/(epsilon_1*S_1)
R_2=1/(S_1*F_13)
R_3=1/(S_1*F_12)
R_4=1/(S_2*F_23)
R_34=R_3+R_4
R_total=R_1+((R_34*R_2)/(R_34+R_2))
Q_1#neto=(sigma*(T_1^4-T_3^4))/R_total

```

La solución en este apartado es



### 7.5. Problema 17

En la figura de **Diagram Window** se muestra un esquema de un receptor solar de cavidad.

Las superficies 2 y 4 constituyen la zona de evaporación, su temperatura es de 400 C y pueden suponerse negras.

La superficie 3 es el sobrecalentador, se encuentra a 600 C y puede suponerse negra.

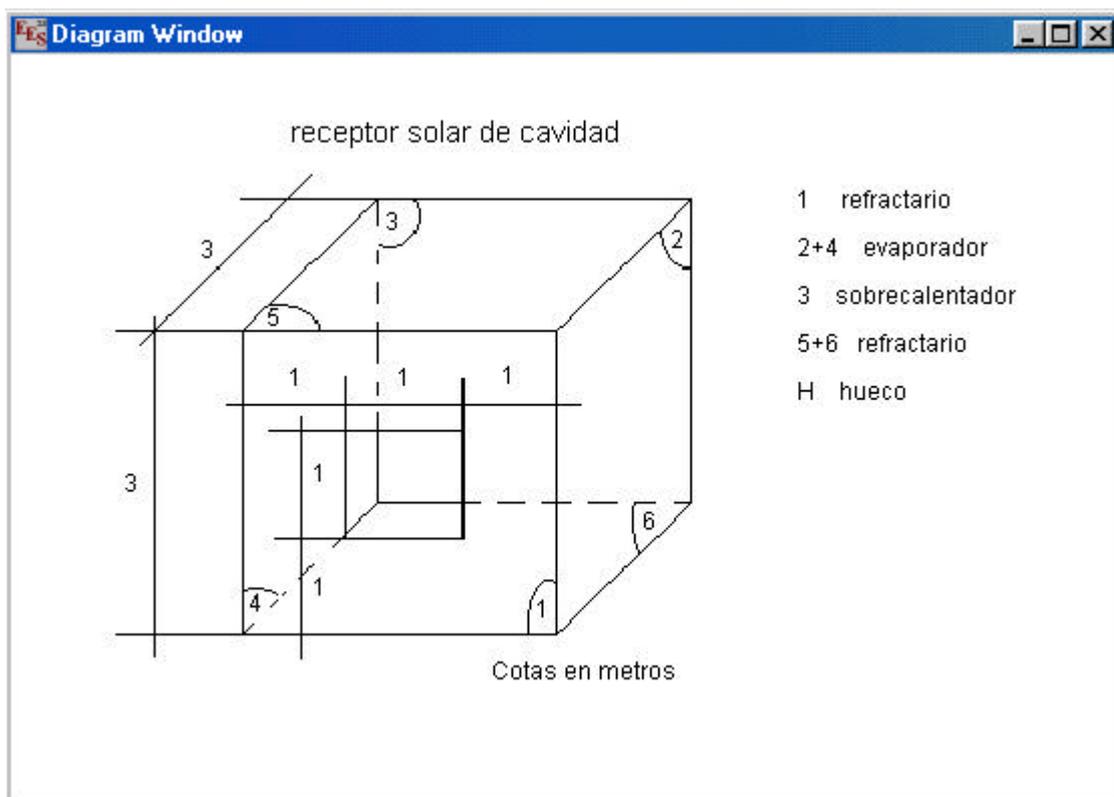
El suelo y el techo (superficies 5 y 6) son rerradiantes y se encuentran a igual temperatura.

La superficie 1 (cara frontal menos el hueco) es rerradiante y se encuentra a una temperatura distinta de la de las superficies 5 y 6.

Determinar:

- 1.- Temperatura de las superficies rerradiantes 1, 5 y 6.
- 2.- Calor perdido por el sobrecalentador.
- 3.- Cantidad de calor cedido al ambiente.

Supóngase que el ambiente está a una temperatura de 10 C, que el régimen es permanente y que el receptor se encuentra en una etapa de enfriamiento (radiación solar nula).



Equations Window

{SOLUCIÓN:

En el problema existen las siguientes superficies distintas:

1	refractario	T_1	rerradiante
2+4	evaporador	T_24=400 C	negra
3	sobrecalentador	T_3=600 C	negra
5+6	refractario	T_56	rerradiante
H	hueco	T_H=10 C	negra}

"Temperaturas conocidas"

$$T_{24}=400+273$$

$$T_3=600+273$$

$$T_H=10+273$$

$$\sigma=\sigma\#$$

$$S_1=8 ; S_3=9; S_H=1; S_{24}=18; S_{56}=18 ; S_{1H}=9 \quad \{\text{superficies}\}$$

"Ecuaciones de balance de energía radiante en cada superficie"

$$J_1-(F_{1\#24}*J_{24}+F_{13}*J_3+F_{1\#56}*J_{56}+F_{1H}*J_H)=0$$

$$J_{24}=\sigma*T_{24}^4$$

$$J_3=\sigma*T_3^4$$

$$J_{56}-(F_{56\#1}*J_1+F_{56\#24}*J_{24}+F_{56\#56}*J_{56}+F_{56\#3}*J_3+F_{56\#H}*J_H)=0$$

$$J_H=\sigma*T_H^4$$

$$J_1=\sigma*T_1^4$$

$$J_{56}=\sigma*T_{56}^4$$

"Calor cedido por el sobrecalentador"

$$Q_{3\#neto}=(S_3*\sigma*T_3^4)-$$

$$(S_1*F_{13}*J_1+S_{24}*F_{24\#3}*J_{24}+S_{56}*F_{56\#3}*J_{56}+S_H*F_{H3}*J_H)$$

"Calor cedido al ambiente"

$$Q_{H\#neto}=(S_H*\sigma*T_H^4)-$$

$$(S_{56}*F_{56\#H}*J_{56}+S_{24}*F_{24\#H}*J_{24}+S_3*F_{3H}*J_3)$$

{A la vista de las ecuaciones necesitamos calcular los siguientes factores de forma:

$$F_{1\#24}, F_{13}, F_{1\#56}, F_{1H}, F_{56\#1}, F_{56\#24}, F_{56\#56}, F_{56\#3}, F_{56\#H},$$

$$F_{24\#3},$$

$$F_{H3}, F_{24\#H}, F_{3H}\}$$

$$F_{1H}=0$$

"Cálculo de F\_3H, F\_H3"

$$F_{H3}=0.1914 \quad \{\text{calculado en problema 15 de la colección}\}$$

$$F_{H2}+F_{H4}+F_{H5}+F_{H6}+F_{H3}=1 \quad \{\text{adición}\}$$

$$F_{H2}=F_{H5}$$

$$F_{H4}=F_{H5}$$

$$F_{H6}=F_{H5}$$

$$F_{3H}=(S_H*F_{H3})/S_3 \quad \{\text{reciprocidad}\}$$

"Cálculo de F\_24#H, F\_56#H"

$$F_{H\#24}+F_{H\#56}+F_{H3}=1 \quad \{\text{adición}\}$$

$$F_{H\#24}=F_{H\#56}$$

$$F_{24\#H}=(S_H*F_{H\#24})/S_{24} \quad \{\text{reciprocidad}\}$$

$$F_{56\#H}=F_{24\#H}$$

"Cálculo de F\_56#56"

$$F_{56\#56}=\text{FFORMA3D8}(3,3,3) \quad \{\text{función de librería para factores de forma}\}$$

"cálculo de F\_13"

$$S_{1H}*F_{1H\#3}=S_1*F_{13}+S_H*F_{h3}$$

$F_{1H\#3} = \text{FFORMA3D8}(3,3,3)$  { función de librería para factores de forma }  
 "Cálculo de  $F_{1\#24}$ ,  $F_{1\#56}$ ,  $F_{56\#1}$ "  
 $F_{1\#24} + F_{1\#56} + F_{13} = 1$  { adición }  
 $F_{1\#24} = F_{1\#56}$   
 $F_{56\#1} = (S_1 * F_{1\#56}) / S_{56}$   
 "Cálculo de  $F_{24\#3}$ ,  $F_{56\#3}$ ,  $F_{56\#24}$ "  
 $F_{3\#24} + F_{3\#56} + F_{3\#1H} = 1$  { adición }  
 $F_{3\#24} = F_{3\#56}$   
 $F_{3\#1H} = F_{1H\#3}$   
 $F_{56\#3} = (S_3 * F_{3\#56}) / S_{56}$  { reciprocidad }  
 $F_{24\#3} = F_{56\#3}$   
 $F_{56\#3} + F_{56\#56} + F_{56\#24} + F_{56\#1H} = 1$  { adición }  
 $F_{56\#1H} = F_{56\#3}$

Picando en **Solve**, en el menú **Calculate**, obtenemos la solución.

**Solution**  
 Unit Settings: [C]/[kPa]/[kmol]/[degrees]  
**Variables in MAIN program**

$F_{1\#24} = 0.4022$	$F_{1\#56} = 0.4022$	$F_{13} = 0.1955$
$F_{1H} = 0$	$F_{1H\#3} = 0.1998$	$F_{24\#3} = 0.2$
$F_{24\#H} = 0.02127$	$F_{3\#1H} = 0.1998$	$F_{3\#24} = 0.4001$
$F_{3\#56} = 0.4001$	$F_{3H} = 0.02604$	$F_{56\#1} = 0.1788$
$F_{56\#1H} = 0.2$	$F_{56\#24} = 0.4001$	$F_{56\#3} = 0.2$
$F_{56\#56} = 0.1998$	$F_{56\#H} = 0.02127$	$F_{H\#24} = 0.3828$
$F_{H\#56} = 0.3828$	$F_{H2} = 0.1914$	$F_{H3} = 0.2344$
$F_{H4} = 0.1914$	$F_{H5} = 0.1914$	$F_{H6} = 0.1914$
$J_1 = 18428 \text{ [W/m}^2\text{]}$	$J_{24} = 11631 \text{ [W/m}^2\text{]}$	$J_3 = 32931 \text{ [W/m}^2\text{]}$
$J_{56} = 18175 \text{ [W/m}^2\text{]}$	$J_H = 363.7 \text{ [W/m}^2\text{]}$	$Q_{3\#neto} = 160151 \text{ [W]}$
$Q_{H\#neto} = -18765 \text{ [W]}$	$\sigma = 5.670E-08 \text{ [W/m}^2\text{K}^4\text{]}$	$S_1 = 8 \text{ [m}^2\text{]}$
$S_{1H} = 9 \text{ [m}^2\text{]}$	$S_{24} = 18 \text{ [m}^2\text{]}$	$S_3 = 9 \text{ [m}^2\text{]}$
$S_{56} = 18 \text{ [m}^2\text{]}$	$S_H = 1 \text{ [m}^2\text{]}$	$T_1 = 755.1 \text{ [K]}$
$T_{24} = 673 \text{ [K]}$	$T_3 = 873 \text{ [K]}$	$T_{56} = 752.5 \text{ [K]}$
$T_H = 283 \text{ [K]}$		

Calculation time = .1 sec

## 8. Mecanismos Combinados

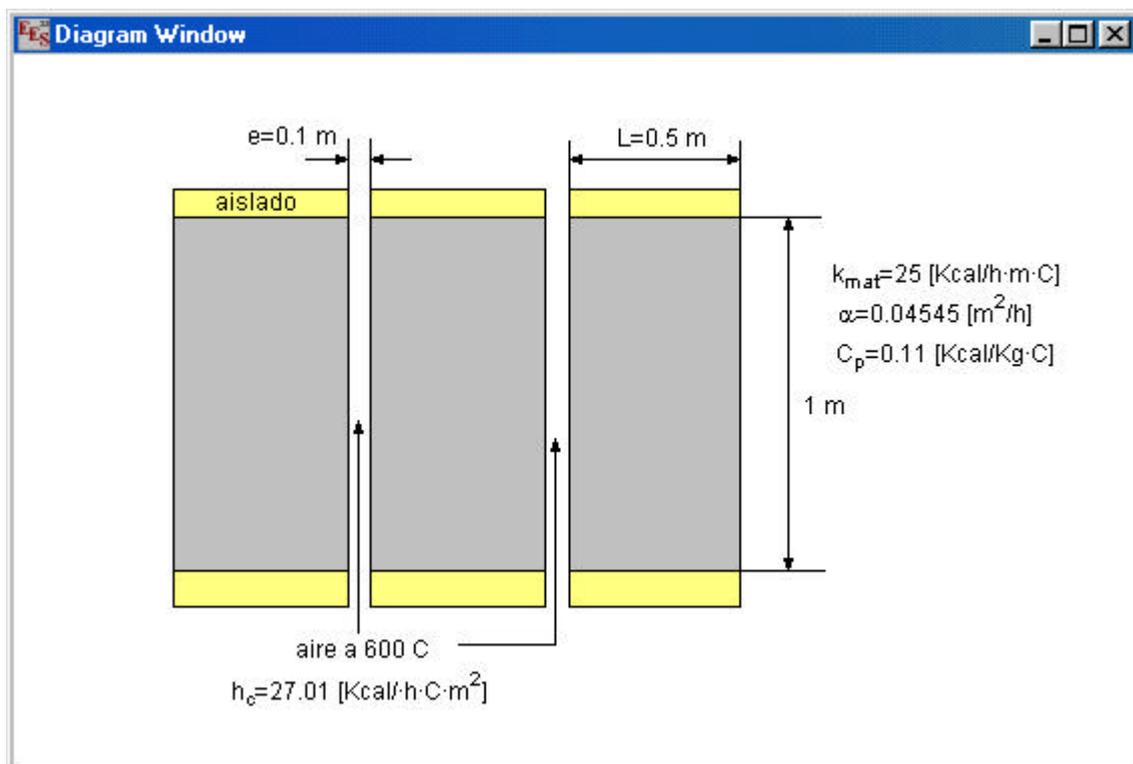
### 8.1. Problema 18

En la figura se representa un sistema de almacenamiento de energía, bien aislado del exterior, constituido por capas alternativas del material de acumulación y canales de 10 cm de espesor por los que circula aire a una velocidad de 20 m/s.

El material utilizado para almacenar energía ( $k=25 \text{ Kcal/h}\cdot\text{m}\cdot\text{C}$ ) se dispone en capas de 0.5 m de espesor, inicialmente a 25 C. Durante la etapa de acumulación, circula por los canales a 600 C.

¿Al cabo de cuánto tiempo se alcanzará el 75% de la capacidad de acumulación del sistema en estas condiciones? ¿Cuál es la temperatura del material en este instante?

El material de acumulación tiene una densidad de  $5000 \text{ Kg/m}^3$ , una conductividad térmica de  $25 \text{ Kcal/h}\cdot\text{m}\cdot\text{C}$  y un calor específico de  $0.11 \text{ Kcal/Kg}\cdot\text{C}$ .



#### Equations Window

"Solución"

{El problema de régimen transitorio se puede resolver una vez conocido el coeficiente de transferencia convectivo entre el aire y el material de acumulación. El aire circula por un canal, que se supone suficientemente largo como para despreciar los efectos de la región de entrada térmica, de 1 m de alto por 0.1 m de ancho}

{Conocido el coeficiente de transferencia, resolveremos el problema de conducción transitorio, y para ello necesitamos el module, groberplaca}

```

MODULE groberplaca(Bi,Fo,Q#Q_0p)
Bi*cos(y)=y*sin(y)
A_n=(2*sin(y))/(y+sin(y)*cos(y))
B_n=sin(y)/y
Q#Q_0p=1-(A_n*exp(-y^2*Fo)*B_n)
END
"Datos"
v=20
e=0.1
k_mat=25
L=0.5
T_i=25 ; T_m=600
rho_mat=5000
C_p=0.11
"Cáculo del coeficiente de transferencia convectivo"
D_e=4*A/P {diámetro equivalente}
A=0.1*1 {área de paso}
P=0.1*2+1*2 {perímetro}
"Propiedades del agua usando 'termophysical properties functions'"
rho_aire=DENSITY(Air,T=T_m,P=1) {Densidad}
mu=VISCOSITY(Air,T=T_m) {Viscosidad}
k_aire=CONDUCTIVITY(Air,T=T_m) {Número de Prandtl}
Pr=PRANDTL(Air,T=T_m) {Conductividad térmica del
agua}
Re=(rho_aire*v*D_e)/mu {Número de Reynolds}
Nu#=CFFI14(Re,Pr,60) {Número de Nusselt mediante función de 'User
library routines'}
Nu#=((h*D_e)/(k_aire)) {Número de Nusselt en función del coeficiente de
película}
h_c=h*(Convert(J,Kcal)/Convert(s,h)) {conversión de unidades de W/m^2 C a
Kcal/h·m·C}
"Solución del problema de conducción"
alpha=k_mat/(rho_mat*C_p) {difusividad térmica}
Q#Q_0p=0.75
Bi=h_c*(L/2)/k_mat {número de Biot}
Fo=(alpha*t)/(L/2)^2 {número de Fourier}
CALL groberplaca(Bi,Fo,Q#Q_0p) {llamada al module groberplaca}

```

Picando en **Solve**, en el menú **Calculate**, obtenemos la solución.

The screenshot shows the 'Solution' window in EES software. The window title is 'EES Solution'. Below the title bar, the unit settings are listed as [C]/[bar]/[kg]/[radians]. The main area is titled 'Variables in MAIN program' and displays a list of variables and their values with units. Some values are highlighted with red boxes:  $h = 31.42$  [W/m<sup>2</sup>C],  $h_c = 27.01$  [Kcal/h·C·m<sup>2</sup>], and  $t = 7.695$  [h]. At the bottom, the calculation time is shown as .3 sec.

Unit Settings: [C]/[bar]/[kg]/[radians]

**Variables in MAIN program**

A = 0.1 [m <sup>2</sup> ]	$\alpha$ = 0.04545 [m <sup>2</sup> /h]	Bi = 0.2701
$C_p$ = 0.11 [Kcal/Kg·C]	$D_e$ = 0.1818 [m]	e = 0.1 [m]
Fo = 5.596	<b>h = 31.42 [W/m<sup>2</sup>C]</b>	<b>h<sub>c</sub> = 27.01 [Kcal/h·C·m<sup>2</sup>]</b>
$k_{\text{aire}}$ = 0.06088 [W/m·C]	$k_{\text{mat}}$ = 25 [Kcal/h·m·C]	L = 0.5 [m]
$\mu$ = 0.00003846 [kg/m·s]	Nu# = 93.83	P = 2.2 [m]
Pr = 0.7043	Q#Q <sub>0p</sub> = 0.75	Re = 37729
$\rho_{\text{aire}}$ = 0.399 [Kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{\text{mat}}$ = 5000 [Kg/m <sup>3</sup> ]	<b>t = 7.695 [h]</b>
$T_i$ = 25 [C]	$T_m$ = 600 [C]	v = 20 [m/s]

Calculation time = .3 sec

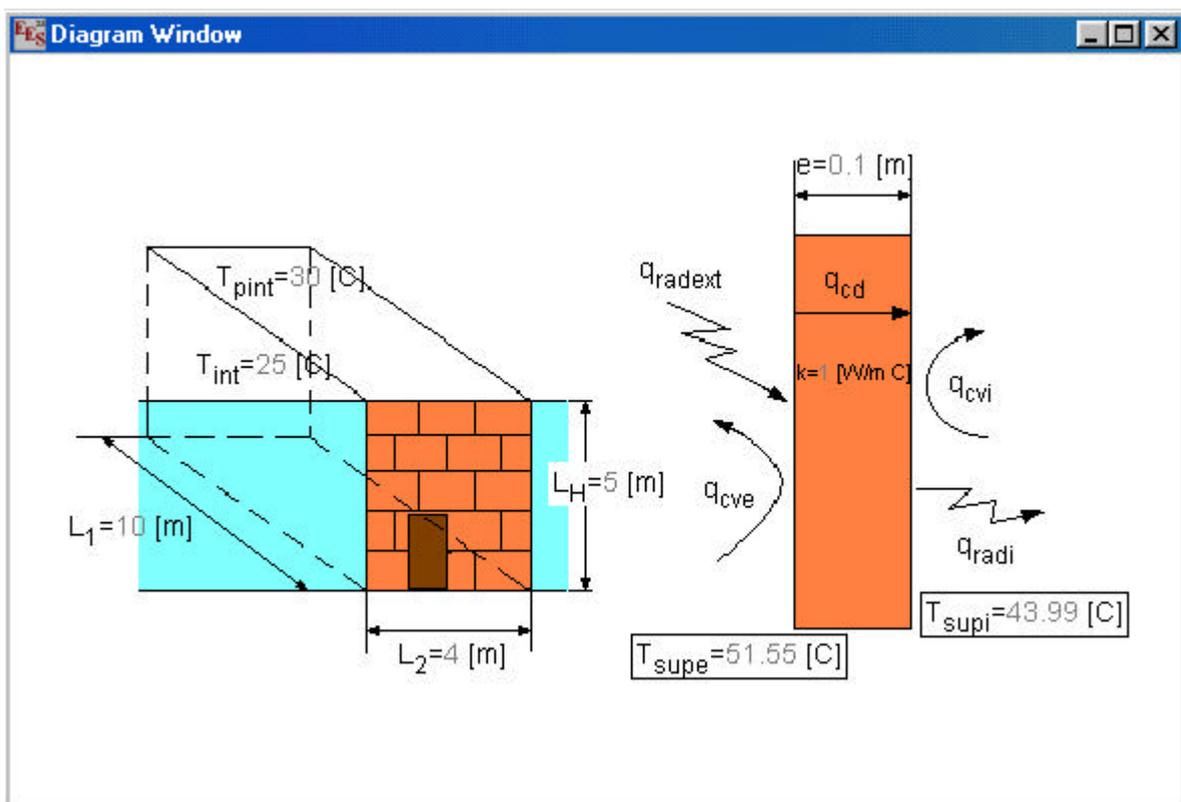
## 8.2. Problema 19

El aire interior de un local de  $10 \times 4$  m de superficie y 5 m de altura, se mantiene a una temperatura de 25 C mediante un sistema de climatización. El local tiene un solo cerramiento exterior de  $5 \times 4$  m, sobre el que incide una radiación solar de  $500 \text{ W/m}^2$ . La temperatura superficial interior del resto de cerramientos es igual a 30 C.

El cerramiento exterior está constituido por dos ladrillos macizos de 5 cm de espesor cada uno ( $k=1 \text{ W/mK}$ ), con una absorptividad de corta de 0.4. La emisividad de larga de todas las superficies es de 0.8. El aire ambiente exterior se encuentra a 40 C y se mueve con una velocidad de 5 m/s paralelo a la superficie exterior en sentido ascendente. Calcular:

- La transferencia de calor a través del cerramiento exterior.
- El calor que es necesario aportar o extraer al aire para mantenerlo a 25 C.

Considerar que la radiación solar incidente es radiación corta y que la resistencia de contacto entre los elementos del cerramiento exterior es despreciable. Suponer que el fenómeno de convección libre en las superficies interiores se puede asimilar a un problema de convección flujo externo.



Equations Window

"Solución"

"Datos"

T\_pint=30; T\_int=25; T\_ext=40

alpha=0.4; epsilon=0.8; e=0.10

q\_radext=500

k=1

v=5

L\_1=10; L\_2=4; L\_H=5

"Ecuaciones de balance"

$(T_{\text{supe}} - T_{\text{supi}}) / (e/k) = \alpha * q_{\text{radext}} + h_e * (T_{\text{ext}} - T_{\text{supe}})$

$(T_{\text{supe}} - T_{\text{supi}}) / (e/k) = (h_i * (T_{\text{int}} - 25)) + (\sigma * \epsilon * ((T_{\text{supi}} + 273)^4 -$

$(T_{\text{pint}} + 273)^4))$

"Cálculo de  $h_e$ "

$T_{\text{mpe}} = (T_{\text{ext}} + T_{\text{supe}}) / 2$

$\rho_e = \text{DENSITY}(\text{Air}, T = T_{\text{mpe}}, P = 1)$

$\mu_e = \text{VISCOSITY}(\text{Air}, T = T_{\text{mpe}})$

$k_e = \text{CONDUCTIVITY}(\text{Air}, T = T_{\text{mpe}})$

$\text{Pr}_e = \text{PRANDTL}(\text{Air}, T = T_{\text{mpe}})$

$\text{Re}_e = (\rho_e * v * L_H) / \mu_e$

$\text{Nu}_{\#_e} = \text{CFFE11}(\text{Re}_e, \text{Pr}_e)$

$\text{Nu}_{\#_e} = h_e * L_H / k_e$

"Cálculo de  $h_i$ "

$T_{\text{mpi}} = (T_{\text{int}} + T_{\text{supi}}) / 2$

$\beta = 1 / (T_{\text{int}} + 273)$

$k_i = \text{CONDUCTIVITY}(\text{Air}, T = T_{\text{mpi}})$

$\text{Pr}_i = \text{PRANDTL}(\text{Air}, T = T_{\text{mpi}})$

$\nu_i = \text{VISCOSITY}(\text{Air}, T = T_{\text{mpi}}) / \text{DENSITY}(\text{Air}, T = T_{\text{mpi}}, P = 1)$

$\text{Ra} = (9.81 * \beta * (T_{\text{supi}} - T_{\text{int}}) * L_H^3 * \text{Pr}_i) / (\nu_i^2)$

$\text{Nu}_{\#_i} = \text{CLFE1}(\text{Ra})$

$\text{Nu}_{\#_i} = (h_i * L_H) / k_i$

"a) transferencia de calor a través del cerramiento exterior"

$q_{\text{cd}} = (T_{\text{supe}} - T_{\text{supi}}) / (e/k)$

{Tenemos que calcular tres coeficientes de película más, suelo, techo y las paredes laterales.

y  $Q = \text{Sumatorio}(A_i * h_i * (T_i - T_{\text{int}}))$

"Cálculo de  $h_{\text{lateral}}$ "

$T_{\text{mplat}} = (T_{\text{int}} + T_{\text{pint}}) / 2$

$k_{\text{lat}} = \text{CONDUCTIVITY}(\text{Air}, T = T_{\text{mplat}})$

$\text{Pr}_{\text{lat}} = \text{PRANDTL}(\text{Air}, T = T_{\text{mplat}})$

$\nu_{\text{lat}} = \text{VISCOSITY}(\text{Air}, T = T_{\text{mplat}}) / \text{DENSITY}(\text{Air}, T = T_{\text{mplat}}, P = 1)$

$\text{Ra}_{\text{lat}} = (9.81 * \beta * (T_{\text{pint}} - T_{\text{int}}) * L_H^3 * \text{Pr}_{\text{lat}}) / (\nu_{\text{lat}}^2)$

$\text{Nu}_{\#_{\text{lat}}} = \text{CLFE1}(\text{Ra}_{\text{lat}})$

$\text{Nu}_{\#_{\text{lat}}} = (h_{\text{lateral}} * L_H) / k_{\text{lat}}$

"Cálculo de  $h_{\text{suelo}}$  y  $h_{\text{techo}}$ "

$T_{\text{mpsuelo}} = (T_{\text{int}} + T_{\text{pint}}) / 2$

$k_{\text{suelo}} = \text{CONDUCTIVITY}(\text{Air}, T = T_{\text{mpsuelo}})$

$\text{Pr}_{\text{suelo}} = \text{PRANDTL}(\text{Air}, T = T_{\text{mpsuelo}})$

$\nu_{\text{suelo}} = \text{VISCOSITY}(\text{Air}, T = T_{\text{mpsuelo}}) / \text{DENSITY}(\text{Air}, T = T_{\text{mpsuelo}}, P = 1)$

$$L_{\text{suelo}} = (L_1 * L_2) / (2 * (L_1 + L_2))$$

$$Ra_{\text{suelo}} = (9.81 * \beta * (T_{\text{pint}} - T_{\text{int}}) * L_{\text{suelo}}^3 * Pr_{\text{suelo}}) / ((\nu_{\text{suelo}})^2)$$

$$Nu_{\#_{\text{suelo}}} = CLFE5(Ra_{\text{suelo}}, 0)$$

$$Nu_{\#_{\text{suelo}}} = (h_{\text{suelo}} * L_{\text{suelo}}) / k_{\text{suelo}}$$

$$Nu_{\#_{\text{techo}}} = CLFE5(Ra_{\text{suelo}}, 1)$$

$$Nu_{\#_{\text{techo}}} = (h_{\text{techo}} * L_{\text{suelo}}) / k_{\text{suelo}}$$

"b) El calor que es necesario aportar o extraer al aire para mantenerlo a 25 C"

$$A_{\text{suelo}} = L_1 * L_2; \quad A_{\text{techo}} = A_{\text{suelo}}; \quad A_{\text{lateral}} = (L_2 * L_H) + (2 * L_1 * L_H)$$

$$A_e = L_2 * L_H; \quad A_i = A_e$$

$$Q = ((A_{\text{lateral}} * h_{\text{lateral}} + A_{\text{suelo}} * h_{\text{suelo}} + A_{\text{techo}} * h_{\text{techo}}) * (T_{\text{pint}} - T_{\text{int}})) + (A_i * h_i * (T_{\text{supi}} - T_{\text{int}}))$$

Resolviendo, obtenemos la solución.

**Solution**

Unit Settings: [C]/[bar]/[kg]/[degrees]

**Variables in MAIN program**

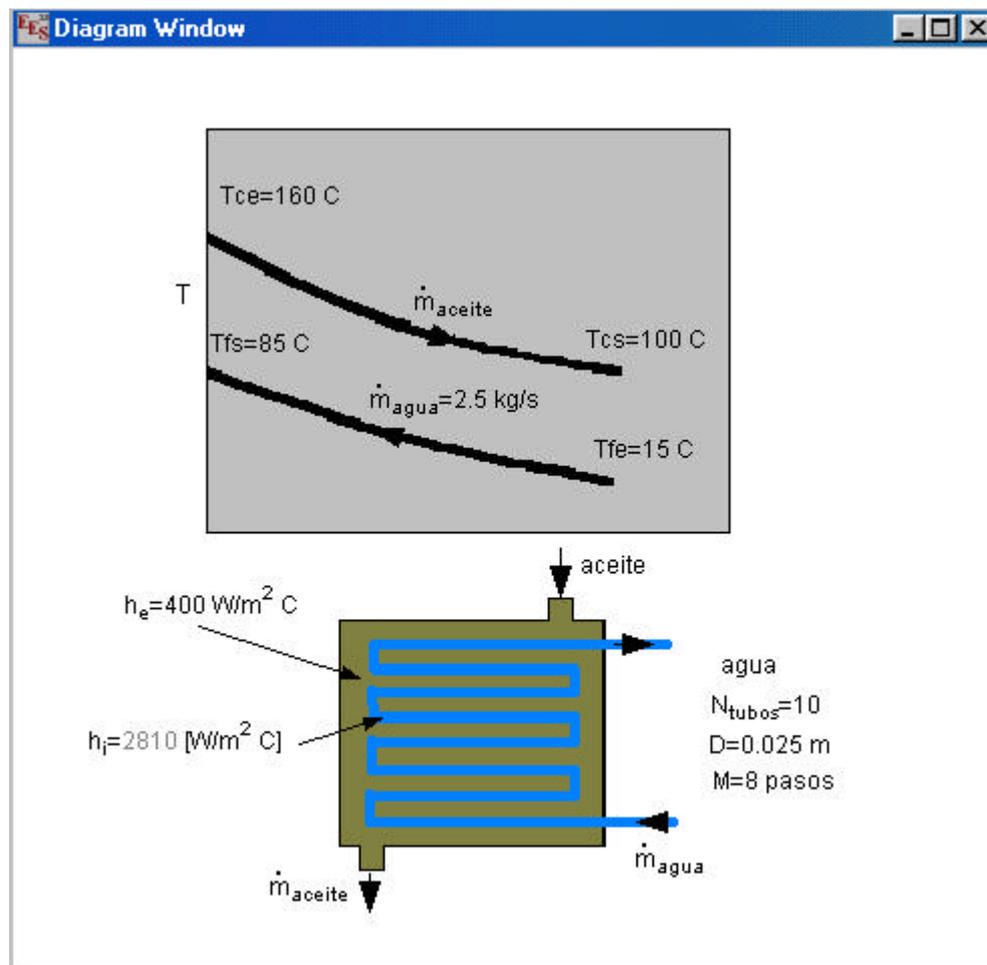
$\alpha = 0.4$	$A_e = 20 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_i = 20 \text{ [m}^2\text{]}$
$A_{\text{lateral}} = 120 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_{\text{suelo}} = 40 \text{ [m}^2\text{]}$	$A_{\text{techo}} = 40 \text{ [m}^2\text{]}$
$\beta = 0.003356 \text{ [1/K]}$	$e = 0.1 \text{ [m]}$	$\epsilon = 0.8$
$h_e = 10.77 \text{ [W/m}^2\text{ C]}$	$h_i = 3.117 \text{ [W/m}^2\text{ C]}$	$h_{\text{lateral}} = 2.015 \text{ [W/m}^2\text{ C]}$
$h_{\text{suelo}} = 3.022 \text{ [W/m}^2\text{ C]}$	$h_{\text{techo}} = 0.9441 \text{ [W/m}^2\text{ C]}$	$k = 1 \text{ [W/m C]}$
$k_e = 0.02744 \text{ [W/m C]}$	$k_i = 0.02663 \text{ [W/m C]}$	$k_{\text{lat}} = 0.02612 \text{ [W/m C]}$
$k_{\text{suelo}} = 0.02612 \text{ [W/m C]}$	$L_1 = 10 \text{ [m]}$	$L_2 = 4 \text{ [m]}$
$L_H = 5 \text{ [m]}$	$L_{\text{suelo}} = 1.429 \text{ [m]}$	$\mu_e = 0.00001941 \text{ [kg/m s]}$
$Nu_{\#_e} = 1962$	$Nu_{\#_i} = 585.4$	$Nu_{\#_{\text{lat}}} = 385.7$
$Nu_{\#_{\text{suelo}}} = 165.3$	$Nu_{\#_{\text{techo}}} = 51.65$	$\nu_i = 0.00001668 \text{ [m}^2\text{/s]}$
$\nu_{\text{lat}} = 0.00001601 \text{ [m}^2\text{/s]}$	$\nu_{\text{suelo}} = 0.00001601 \text{ [m}^2\text{/s]}$	$Pr_e = 0.7121$
$Pr_i = 0.7141$	$Pr_{\text{lat}} = 0.7153$	$Pr_{\text{suelo}} = 0.7153$
$Q = 3186 \text{ [W]}$	$q_{\text{cd}} = 75.63 \text{ [W/m}^2\text{]}$	$q_{\text{radext}} = 500 \text{ [W/m}^2\text{]}$
$Ra = 2.006E+11$	$Ra_{\text{lat}} = 5.739E+10$	$Ra_{\text{suelo}} = 1.339E+09$
$Re_e = 1.407E+06$	$\rho_e = 1.092 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$T_{\text{ext}} = 40 \text{ [C]}$
$T_{\text{int}} = 25 \text{ [C]}$	$T_{\text{mpe}} = 45.77 \text{ [C]}$	$T_{\text{mpi}} = 34.49 \text{ [C]}$
$T_{\text{mplat}} = 27.5 \text{ [C]}$	$T_{\text{mpsuelo}} = 27.5 \text{ [C]}$	$T_{\text{pint}} = 30 \text{ [C]}$
$T_{\text{supe}} = 51.55 \text{ [C]}$	$T_{\text{supi}} = 43.99 \text{ [C]}$	$\nu = 5 \text{ [m/s]}$

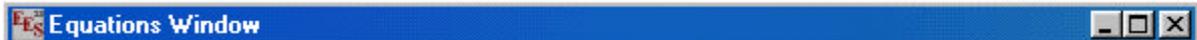
Calculation time = .6 sec

## 9. Intercambiadores De Calor

### 9.1. Problema 20

Se debe diseñar un intercambiador de calor de coraza y tubos para calentar 2.5 kg/s de agua de 15 C a 85 C. El calentamiento se realiza al hacer pasar aceite de motor caliente, que está disponible a 160 C, a través del lado de la coraza del intercambiador. Se sabe que el aceite proporciona un coeficiente promedio de convección  $h=400 \text{ W/m}^2\text{K}$  en el exterior de los tubos. Diez tubos conducen el agua a través de la coraza. Cada tubo tiene pared delgada, de  $D=25 \text{ mm}$ , y ha sido dispuesto para efectuar ocho pasos por la coraza. Si el aceite sale del intercambiador a 100 C, ¿cuál es el flujo necesario? ¿De qué longitud deben ser los tubos para llevar a cabo el calentamiento que se desea?





"Solución"

{Suposiciones:

- 1.- Pérdida de calor a los alrededores y cambios de energía cinética y potencial insignificantes.
- 2.- Propiedades constantes.
- 3.- Resistencia térmica de la pared del tubo y efectos de impurezas insignificantes.
- 4.- Flujo de atgua completamente desarrollado en los tubos.}

"Datos"

Tfe=15 {temperatura de entrada del fluido frío}  
 Tfs=85 {temperatura de salida del fluido frío}  
 Tce=160 {temperatura de entrada del fluido caliente}  
 Tcs=100 {temperatura de salida del fluido caliente}  
 h\_e=400 {coeficiente de película exterior (aceite)}  
 N\_tubos=10 {número de tubos}  
 D=0.025 {diámetro de los tubos}  
 M=8 {número de pasos de los tubos}  
 m\_dot\_agua=2.5 {flujo del fluido frío (agua)}

"Propiedades"

Tm\_aceite=130 {propiedades del aceite a temperatura media de 130 C}  
 Cp\_c=2350  
 Tm\_agua=50 {propiedades del agua a temperatura media de 50 C}  
 Cp\_f=4181  
 mu\_agua=548E-6 {viscosidad del agua}  
 k\_agua=0.643 {conductividad térmica del agua}  
 Pr\_agua=3.56 {número de Prandtl del agua}

"Ecuaciones para la resolución"

$q = m_{\text{dot\_agua}} * C_{p\_f} * (T_{fs} - T_{fe})$  {Balance global de energía}  
 $m_{\text{dot\_aceite}} = q / (C_{p\_c} * (T_{ce} - T_{cs}))$  {Flujo necesario de aceite}

"Longitu de tubo necesaria"

$q = U * (N_{\text{tubos}} * \pi * D * L) * F * DTLM\_FC$  {área total de los tubos,  
 $A = N_{\text{tubos}} * \pi * D * L$ }  
 $U = 1 / ((1/h_i) + (1/h_e))$   
 $C_c = m_{\text{dot\_aceite}} * C_{p\_c}$  {capacitancia térmica del fluido caliente}  
 $C_f = m_{\text{dot\_agua}} * C_{p\_f}$  {capacitancia térmica del fluido frío}  
 $F = \text{FactordecorreccionDTLM}(T_{ce}, T_{cs}, T_{fe}, T_{fs}, C_c, C_f, 3, 1)$  {Facor de corrección de la DTLM}

$DTLM\_FC = DTLM\_FC(T_{ce}, T_{cs}, T_{fe}, T_{fs})$  {función de librería interna que nos devuelve la DTLM en contraflujo}

"Cálculo de h\_i"

$m_{\text{dot\_agua1}} = m_{\text{dot\_agua}} / N_{\text{tubos}}$  {flujo por cada tubo}  
 $Re\_D = (4 * m_{\text{dot\_agua1}}) / (\pi * D * \mu_{\text{agua}})$  {númro de Reynolds en el interior de los tubos}  
 $B = L / D$  {longitud del conducto entre su diámetro(flujo completamente desarrollado)}  
 $Nu\#\_D = CFFI14(Re\_D, Pr_{\text{agua}}, B)$  {el 60 es porque consideramos flujo totalmente desarrollado, cuando tengamos la solución podemos comprobar que es cierto,  $L/D > 60$ }  
 $Nu\#\_D = h_i * D / k_{\text{agua}}$  {número de Nusselt, de aquí se obtiene h\_i}

*Resolviendo, obtenemos la solución*

**Solution**

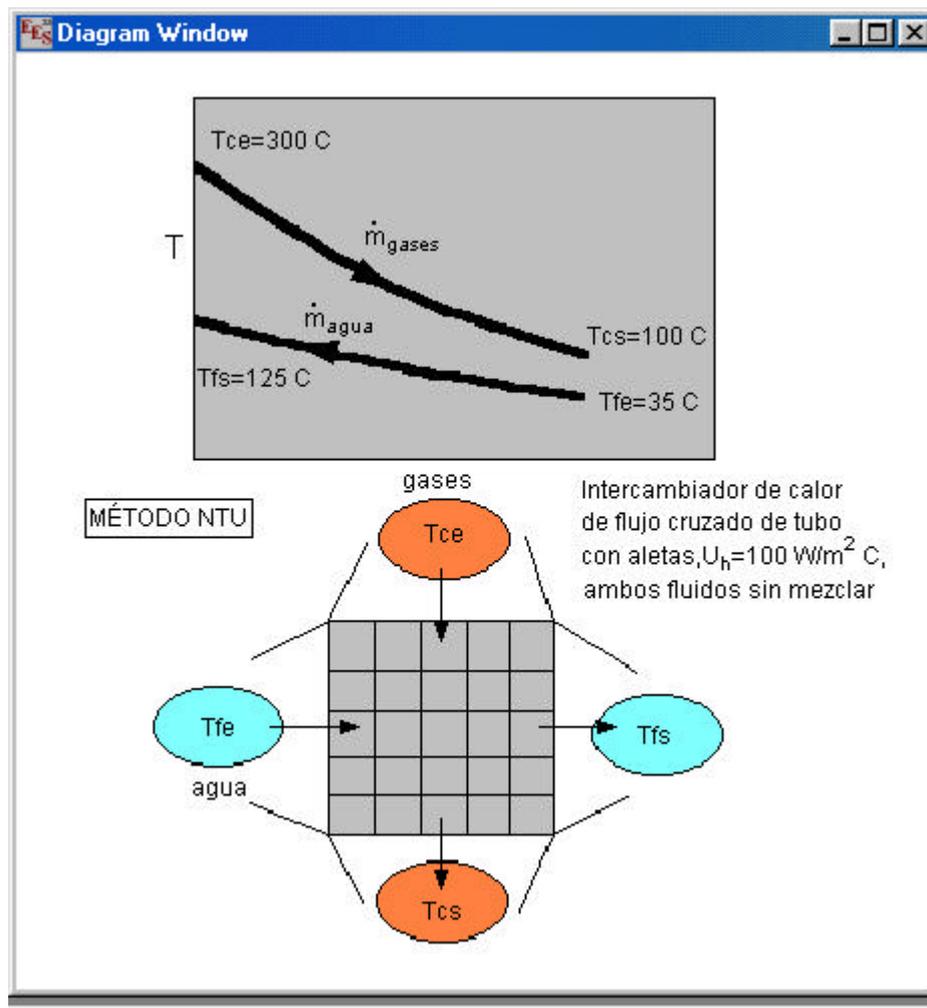
**Variables in MAIN program**

B = 1516	$C_{p_c} = 2350 \text{ [J/kg]}$	$C_{p_f} = 4181 \text{ [J/kg]}$
$C_c = 12195 \text{ [W]}$	$C_f = 10453 \text{ [W]}$	D = 0.025 [m]
$DTLM_{FC} = 79.9 \text{ [C]}$	<b>F = 0.8785</b>	$h_e = 400 \text{ [W/m}^2\text{C]}$
<b><math>h_i = 2810 \text{ [W/m}^2\text{C]}</math></b>	$k_{\text{agua}} = 0.643 \text{ [W/m C]}$	<b>L = 37.91 [m]</b>
M = 8	$\mu_{\text{agua}} = 0.000548 \text{ [N s/m}^2\text{]}$	<b><math>\dot{m}_{\text{aceite}} = 5.189 \text{ [kg/s]}</math></b>
$\dot{m}_{\text{agua}} = 2.5 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_{\text{agua1}} = 0.25 \text{ [kg/s]}$	$Nu\#_D = 109.3$
$N_{\text{tubos}} = 10$	$Pr_{\text{agua}} = 3.56$	q = 731675 [W]
$Re_D = 23234$	Tce = 160 [C]	Tcs = 100 [C]
Tfe = 15 [C]	Tfs = 85 [C]	$Tm_{\text{aceite}} = 130 \text{ [C]}$
$Tm_{\text{agua}} = 50 \text{ [C]}$	U = 350.2 [W/m <sup>2</sup> C]	

Calculation time = .7 sec

## 9.2 Problema 21

Gases de escape calientes, que entran a un intercambiador de calor de tubo con aletas de flujo cruzado a 300 C y salen a 100 C, se usan para calentar agua presurizada a una velocidad de flujo de 1 kg/s de 35 a 125 C. El calor específico del gas de escape es aproximadamente 1000 J/kgK, y el coeficiente global de transferencia de calor se basa en el área superficial del lado del gas es  $U_h=100 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . Determine con el uso del método NTU el área superficial  $A_h$  del lado del gas que se requiere. Analizar la variación del área superficial necesaria con la variación del flujo de fluido frío.



### Equations Window

"Solución" {ver 'Plot windows'}

{Suposiciones:

1.- Pérdidas de calor a los alrededores y cambios de energía cinética y potencial insignificantes.

2.- Propiedades constantes.}

"Datos"

Tfe=35

{temperatura de entrada del fluido frío}

Tfs=125

{temperatura de salida del fluido frío}

Tce=300

{temperatura de entrada del fluido caliente}

Tcs=100

{temperatura de salida del fluido caliente}

{m\_dot\_agua=1}

{flujo del fluido frío (agua)}

U\_h=100

{coeficiente global de transferencia}

Cp\_gases=1000

{Cp de los gases}

Cp\_agua=4197

{Cp del agua a temperatura media de 80 C}

"Ecuaciones para la resolución"

$C_f = m_{\text{dot\_agua}} * C_{p\_agua}$

{capacitancia térmica del fluido frío}

$C_c = C_f * ((T_{fs} - T_{fe}) / (T_{ce} - T_{cs}))$

{capacitancia térmica del fluido caliente}

$C_{\text{min}} = \min(C_c, C_f)$

$q_{\text{max}} = C_{\text{min}} * (T_{ce} - T_{fe})$

{calor máximo}

$q = C_f * (T_{fs} - T_{fe})$

{calor intercambiado}

$\epsilon = q / q_{\text{max}}$

{eficiencia}

$\epsilon = \text{EFICIENCIA}(C_c, C_f, \text{NTU}, 5, 1)$

{Función interna de librería, tipo=5 ,

ambos fluidos sin mezclar}

$\text{NTU} = (U_h * A_h) / C_{\text{min}}$

Vamos a presentar la solución con un estudio paramétrico del área necesaria cuando varía el gasto y lo representaremos mediante un gráfico.

	1	2
	$\dot{m}_{\text{agua}}$ [kg/s]	$A_h$ [m <sup>2</sup> ]
Run 1	0.25	9.556
Run 2	0.5	19.11
Run 3	0.75	28.67
Run 4	1	38.22
Run 5	1.25	47.78
Run 6	1.5	57.34
Run 7	1.75	66.89
Run 8	2	76.45
Run 9	2.25	86
Run 10	2.5	95.56

