

Capítulo 5

Modelo de parámetros distribuidos en EcosimPro[®]

El capítulo 5 presenta los pasos seguidos para implementar un modelo de parámetros distribuidos en EcosimPro[®], mediante el cual se va a modelar el tramo de tubería del captador solar situado en la azotea de la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. El modelo de parámetros distribuidos del captador solar tipo Fresnel desde el que se partirá se puede consultar en [5].

Se expondrá la necesidad de discretización del captador solar tanto desde el punto de vista sus características físicas como desde el punto de vista de su implementación en EcosimPro[®], y se realizará una breve descripción del proceso para la discretización de un sistema de parámetros distribuidos genérico. Posteriormente, partiremos del modelo ya discretizado dado por las ecuaciones en diferencias para el captador solar, adaptándolo para transformarlo en ecuaciones diferenciales ordinarias que puedan ser implementadas en EcosimPro[®]. Una vez que tengamos el modelo discretizado dado por las DAEs en cada tramo, se procederá a explicar la forma empleada en EcosimPro[®] para su implementación, sin entrar en detalles de código del componente captador que ya será descrito en profundidad en el capítulo siguiente.

5.1. Necesidad de discretización

El sistema físico concreto de la planta solar sobre el cual se ha desarrollado el modelo de parámetros distribuidos es el captador solar. Se trata de un tubo absorbedor de 64 metros de longitud y 0.068 metros de diámetro exterior. Como ya se ha comentado en la descripción de la planta realizada en el capítulo 2, sobre él van a incidir los rayos solares procedentes del campo de espejos de Fresnel situado en el plano paralelo inferior (reflector primario) y los procedentes indirectamente del espejo envolvente que rodea al tubo (reflector secundario). Esa radiación producirá un aumento de la temperatura del fluido caloportador a medida que se produzca su avance por el tubo. Por tanto, será la temperatura del fluido a la salida del captador nuestra variable de diseño del sistema.

Como se puede deducir de la breve descripción física anterior, **las características y condiciones del captador variarán evidentemente con el tiempo, pero también con la componente longitudinal del sistema**, dado que la variación de la temperatura del líquido con la componente transversal es prácticamente despreciable frente a esta última. Por tanto, el modelo matemático necesario dadas las características físicas y de operación del captador solar, es un **modelo en derivadas parciales** que refleje tanto la dependencia con respecto al tiempo como con respecto a la componente longitudinal.

Sin embargo, como se ha expresado en el capítulo 3, **EcosimPro® permite declarar sistemas descritos mediante DAEs e incluso eventos discretos, pero no permite declarar directamente sistemas formulados mediante ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (PDEs)**. Este es el motivo principal por el cual es necesario plantear la discretización del captador.

Mediante la discretización espacial de la tubería del captador podremos obtener una estructura dispersa del conjunto de DAEs que nos permitirá una **reducción de los tiempos de computación** necesarios en las simulaciones de sistemas descritos por ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, si bien es cierto que este **tiempo de computación se incrementará a medida que aumentemos la dimensión del sistema** (disminución del paso de discretización).

5.2. Discretización de un sistema de parámetros distribuidos

Los sistemas de parámetro globalizado son aquellos en los que las propiedades y las variables de estado del sistema pueden considerarse homogéneas a lo largo del mismo. En realidad todos los sistemas son distribuidos ya que siempre existen variaciones espaciales de las propiedades o variables. Sin embargo estas variaciones son con frecuencia pequeñas y pueden ignorarse, pudiendo considerar entonces el modelo como de parámetro globalizado.

Hay por otro lado una serie de **sistemas en los que la distribución espacial de las propiedades exige la utilización de un modelo de parámetro distribuido**. Suelen ser sistemas en los que la relación longitud-diámetro es muy alta y por tanto la dependencia de las variables con la longitud es muy importante. Este último caso es el caso del captador solar de la planta de la Escuela de Ingenieros de Sevilla.

Las ecuaciones matemáticas que modelan los procesos representados por un modelo de parámetros distribuidos son de la forma siguiente:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (V_z \cdot T)}{\partial z} = Transporte + Generación$$

El problema es que como se ha comentado anteriormente, **EcosimPro® no soporta ecuaciones diferenciales en derivadas parciales**, por tanto es preciso realizar una **transformación del modelo de parámetros distribuidos mediante la discretización con respecto a una de las variables, en este caso respecto de la variable longitudinal**.

La transformación de la ecuación anterior queda de la siguiente manera:

$$\frac{dT_n}{dt} = V_z \cdot \frac{(T_n - T_{n-1})}{\Delta z} + Transporte + Generación$$

La ecuación anterior equivale a una serie de modelos globalizados conectados entre sí como se muestra en la Ilustración 23. La conexión entre los múltiples modelos de parámetro globalizado se realiza de forma que la salida de un elemento coincide con la entrada del siguiente con un determinado retardo. El valor de la variable dependiente en cada punto de la discretización se calcula a partir de los valores en los puntos adyacentes, siendo el número de puntos utilizados el que determina el orden de discretización.

Por tanto el proceso consiste en dividir el sistema (en nuestro caso el tubo del captador solar) en un determinado número de elementos equidistantes entre sí (distribución uniforme). La elección del número de éstos es una cuestión de compromiso entre la exactitud en el cálculo del modelo (cuanto mayor sea el número de elementos más se acerca la solución a la de parámetros distribuidos) y el tiempo de simulación.

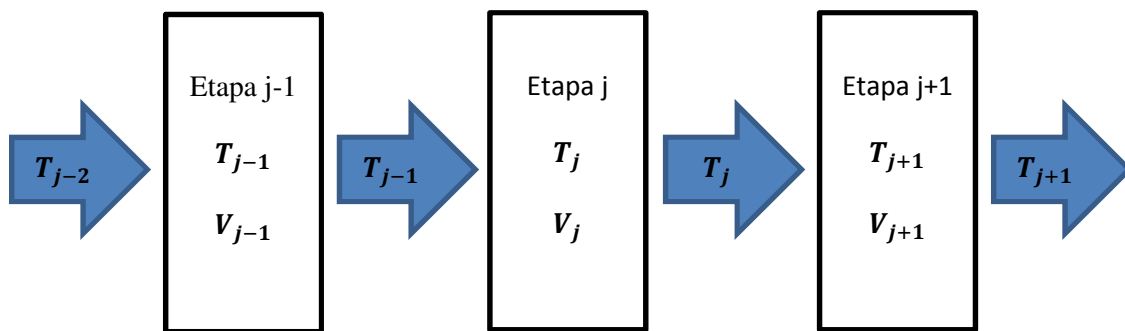


Ilustración 23. Discretización de un modelo de parámetros distribuidos

Como se puede observar en la ilustración anterior, cada etapa del modelo está caracterizada por el valor de la variable dependiente T_j (variable de diseño) y por los parámetros característicos en dicha etapa V_j que por supuesto variarán al movernos de una etapa a otra. El valor de T_j en una etapa específica vendrá determinado por el valor de la variable dependiente calculada en la etapa anterior T_{j-1} y por los parámetros característicos calculados a partir de las condiciones dadas en la etapa actual V_j .

El número de elementos final que se ha de tomar en la discretización, ha de cumplir con el **compromiso exactitud del cálculo/tiempo de simulación** mencionado anteriormente y además ser tal, que la solución final no varíe de forma significativa por el hecho de añadir o quitar un elemento.

5.3. Modelo del captador e implementación en EcosimPro®

En este apartado vamos a explicar el modelo matemático de parámetros distribuidos en el que se basa el captador solar de la planta situada en la azotea de la Escuela Superior de Ingenieros y cómo se puede desarrollar su implementación en EcosimPro®. El análisis termodinámico detallado del modelo del captador se puede consultar en [4].

Aquí únicamente se realizará un análisis somero sobre determinados aspectos del modelo tales como el funcionamiento de las ecuaciones y las reformas que se han llevado a cabo sobre las mismas para poder llevar a cabo su implementación en EcosimPro®.

5.3.1. Modelo de parámetros distribuidos del captador

El captador solar de la planta bajo estudio es un elemento crítico de la misma y complejo de modelar, ya que en **él intervienen diversos fenómenos de intercambio de calor: metal/ambiente, radiación/metal, metal/fluido y fluido/fluido**. Todos estos fenómenos de transferencia ocurrirán de manera simultánea y en cada elemento o tramo del captador debido a los gradientes de temperatura que aparecen en el sistema.

Teniendo en cuenta las relaciones de compromiso expresadas en el apartado anterior para la elección del orden de discretización, se ha optado por dividir el captador en 64 elementos de longitud 1 metro cada uno. Todos estos **elementos estarán conectados de tal manera que la salida de cada uno coincida con la entrada del siguiente según el sentido de flujo del fluido**. Por tanto, la salida de cada elemento será el valor de la temperatura en el interior de dicho elemento y será también entrada del elemento siguiente. No se considera dependencia axial de las variables. Por otro lado, **cada etapa o nodo experimentará un cierto retardo con respecto a la anterior** que dependerá del caudal inyectado al captador por la bomba exterior.

Podemos decir que el modelo del captador solar es por tanto el de una batería de 64 tubos de 1 metros perfectamente conectados en serie en cada uno de los cuales se producen un conjunto de intercambios de temperatura cuyo resultado se transmite al siguiente introduciendo al mismo tiempo un retardo dependiente del caudal de entrada.

En el diseño implementado en EcosimPro®, **el número de elementos diferenciales que dividen al captador, se ha parametrizado mediante la constante “N” del componte TUB_CAPTADOR**, de manera que se puedan añadir o quitar elementos a voluntad pudiendo así modificar el nivel de discretización que inicialmente será de 64 elementos. El primer y el último elemento están conectados al exterior mediante puertos de manera que las condiciones de entrada vienen impuestas por el entorno (caudal y temperatura del flujo de entrada) y las de salida vienen impuestas por el funcionamiento del propio captador.

Un esquema del captador sería el siguiente:

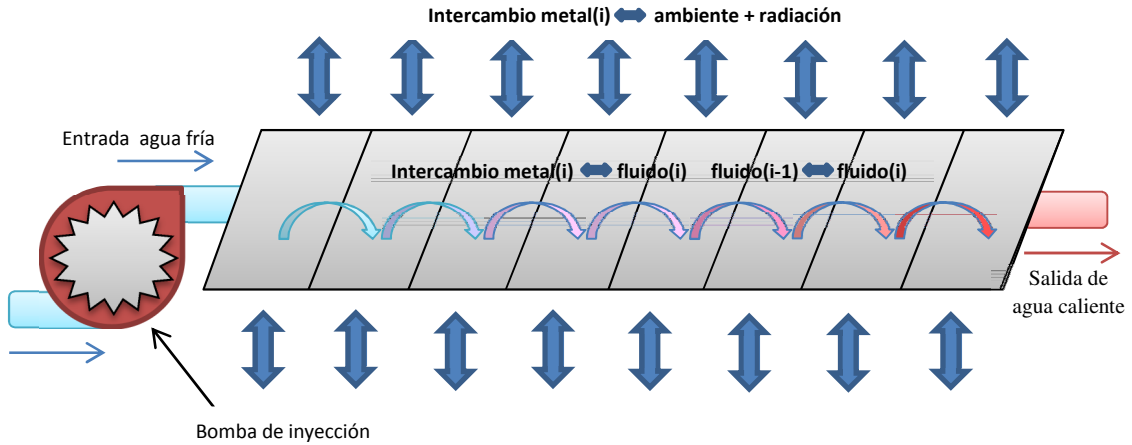


Ilustración 24. Esquema de funcionamiento del captador solar

Una descripción sencilla del funcionamiento del captador sería que el fluido procedente del circuito de tuberías de circulación de la planta solar es inyectado hacia el captador por medio de bombas a un caudal más o menos estable. El fluido entrará en el captador a una determinada temperatura y a medida que avanza por las distintas etapas del mismo ésta irá aumentando como consecuencia de los diferentes fenómenos de intercambio de calor que se producen en cada una de las etapas. El resultado a la salida del captador será un salto cuantitativo en la temperatura del fluido con respecto a la temperatura inicial de entrada, siendo éste nuevamente recirculado hacia la planta.

A continuación expondremos las ecuaciones en diferencias que modelan el funcionamiento de cada una de las etapas del captador. En cada celda se producirán una serie de fenómenos de intercambio de calor que vienen dados por las siguientes **ecuaciones de balance de temperatura**:

$$T_{metal}(i, n + 1) = T_{metal}(i, n) + \left(\frac{t_{int}}{p_m \cdot c_m \cdot A_m} \right) \cdot \left(I \cdot G \cdot \mu_{media} \cdot \rho_{sombra} \cdot \%espejos - H_l(i, n) \cdot G \cdot (T_{metal}(i, n) - T_{amb}) - L \cdot H_t(i, n) \cdot (T_{metal}(i, n) - T_{fluido}(i, n)) \right) \quad (1)$$

$$T_{fluido_sc}(i, n) = T_{fluido}(i, n) + \left(\frac{L \cdot H_t(i, n) \cdot t_{int}}{A_f \cdot p_f(i, n) \cdot c_f(i, n)} \right) \cdot (T_{metal}(i, n) - T_{fluido}(i, n)) \quad (2)$$

$$T_{fluido}(i, n + 1) = T_{fluido_sc}(i, n) - \left(\frac{q \cdot t_{int}}{A_f \cdot incx(i)} \right) \cdot (T_{fluido_sc}(i, n) - T_{fluido_sc}(i - 1, n)) \quad (3)$$

Es importante comentar que estas ecuaciones se aplican a cada uno de los tramos en los que se divide la tubería del captador exceptuando el primero de ellos, en el cual la temperatura del fluido caloportador viene determinada por la temperatura del flujo de entrada al captador impuesta como condición de contorno de entrada al sistema y que se toma de las tablas de datos reales proporcionadas por el sistema de adquisición de datos de la planta. Es decir, **en el tramo primero se ha de forzar que $T_{fluido}(1, n) = T_{flujo_in}(n)$** .

Pasamos a continuación a explicar brevemente cada una de las ecuaciones que rigen el modelo.

TEMPERATURA DEL METAL

La ecuación (1) refleja la variación de la temperatura en el metal absorbedor del que está compuesto cada uno de los trozos en los que se ha dividido la tubería del captador solar. La temperatura del metal en el elemento (i) en el instante (n+1) dependerá de la temperatura actual del metal en el instante (n) más la suma de tres factores a tener en cuenta:

- El factor radiación.
- Intercambio metal-ambiente.
- Intercambio metal-fluido.

El **factor radiación** calcula el **efecto que produce sobre la temperatura del metal la radiación efectiva que llega a cada trozo del campo**. Sólo llega radiación a las partes activas, las partes pasivas tienen un coeficiente de pérdidas mucho menor y por tanto la radiación incidente es nula. En nuestro caso tendremos que todos los 64 tramos son activos. Este término viene determinado por la expresión $I \cdot G \cdot \mu_{media} \cdot \rho_{sombra} \cdot \%espejos$, lo que se traduce en una **relación directamente proporcional con la temperatura del metal**, es decir, si este término aumenta la temperatura del metal también aumentará, y viceversa, si el factor radiación disminuye disminuirá la temperatura del metal. Como se observa, su valor es el resultado del producto de los siguientes factores:

- **Irradiancia (I)**: magnitud utilizada para describir la **potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética, en nuestro caso, radiación solar**. En unidades del sistema internacional se mide en W/m^2 . El valor de este factor se tomará de las tablas de datos reales de la planta solar de espejos de Fresnel aportada por el sistema de adquisición de datos de la misma. Es decir, este **valor muestra la variación real de la irradiancia que se ha producido en la planta durante un día determinado** y que ha sido medida por el sensor correspondiente.
- **Apertura del colector (G)**: constante configurable que determina la apertura del colector. **Su valor es dado en metros**.
- **Eficiencia óptica (μ_{media})**: término que engloba **diferentes factores que intervienen en la eficiencia óptica del captador** como son la reflectividad primaria (campo de espejos de Fresnel) y secundaria (reflector que rodea al tubo captador), la absorción y transmisividad del metal y los factores de ensuciamiento de los espejos. **Su resultado es el producto de todos ellos siendo un valor entre 0 y 1**. Todos estos factores son constantes configurables en el modelo del captador en EcosimPro®.

- **Factor de sombra (ρ_{sombra}):** factor de sombra del lazo para cada terraza, es decir, **la superficie que no se pierde por las sombras**. Como ya se comentó en el capítulo 4, tiene en cuenta la orientación e inclinación del campo y las sombras de unos espejos sobre otros, así como la zona del tubo absorbedor que no tiene sombras por el azimut del sol. **Su valor es dado también en tanto por uno.**
- **Porcentaje de espejos ($\%_{espejos}$):** variable que refleja el **porcentaje total de espejos del campo de Fresnel enfocados en un momento determinado**. Su valor se toma al igual que la irradiancia de las tablas proporcionadas por el sistema de adquisición de datos de la planta. Es decir, este factor muestra la variación con el tiempo del porcentaje de espejos del campo que están enfocados hacia el captador a lo largo de un día determinado. **Se mide en tanto por uno.**

El segundo factor representa el **intercambio metal-ambiente**. Éste proporciona el efecto que produce la temperatura ambiente sobre la temperatura del metal. Su expresión viene dada por $-H_l(i, n) \cdot G \cdot (T_{metal}(i, n) - T_{amb})$, y como se observa, muestra **una relación inversamente proporcional con la diferencia de temperaturas entre el metal y el ambiente**, es decir, si la diferencia de temperatura metal-ambiente es positiva la temperatura del metal disminuirá, por el contrario si es negativa, el efecto sobre la temperatura del metal se traduce en un aumento de la misma.

La relación de proporcionalidad de este factor viene dada por la constante **G** de apertura del colector (ya comentada anteriormente) y por el **coeficiente de pérdidas metal-ambiente por metro cuadrado de superficie $H_l(i, n)$** . Se trata de un coeficiente dinámico (varía con respecto del tiempo) y dependerá también de la diferencia de temperatura metal-ambiente. Se calcula para cada uno de los trozos en los que se divide el tubo del captador solar, por tanto muestra dependencia con respecto a la variable longitudinal (modelo de parámetros distribuidos). Su valor es dado en **W/ (m². °C)**.

El último factor es el que afecta a la **transferencia de calor metal-fluido** y su expresión es $-L \cdot H_t(i, n) \cdot (T_{metal}(i, n) - T_{fluido}(i, n))$. Éste término representa el efecto que produce sobre la temperatura del metal absorbedor del que está construido el tubo del captador una variación en la temperatura del fluido caloportador que circula por su interior. Nuevamente se observa una **dependencia inversamente proporcional con respecto a la diferencia de temperaturas entre el metal y el fluido**. Si dicha diferencia es positiva ($T_{metal} > T_{fluido}$), se produce una disminución de la temperatura del metal y viceversa.

La relación de proporcionalidad viene determinada por la constante **L** que **representa el diámetro propio de la tubería medido en metros y por el coeficiente de transmisión de calor por convección metal-fluido $H_t(i, n)$** . Este coeficiente es calculado para cada uno de los trozos en los que se divide el tramo de tubería del captador (dependencia longitudinal) y dependerá del caudal de entrada de fluido al captador así como de la temperatura del mismo. Su unidad de medida es **W/ (m². °C)**.

Los tres factores mencionados anteriormente aparecen en la ecuación (1) multiplicados por el cociente $\left(\frac{t_{int}}{p_m \cdot C_m \cdot A_m}\right)$, donde t_{int} es el tiempo de integración empleado en la discretización en segundos, p_m y C_m representan las características físicas y termodinámicas del metal y A_m es el área transversal del metal (área exterior del tubo) en m². Las constantes p_m y C_m vienen determinadas por las características del metal DIN 1.4404 de la tubería del captador y representan su densidad en kg/ m³ y su calor específico en J/kg°C.

El hecho de que el área transversal del metal aparezca en el denominador, indica que cuanto mayor sea ésta, menor será el efecto que producen sobre la temperatura del metal los tres factores influyentes explicados anteriormente.

TEMPERATURA DEL FLUIDO SUPONIENDO ESTADO ESTACIONARIO

La ecuación (2) expresa la **variación de la temperatura del fluido en cada uno de los tramos en los que se divide la tubería del captador en estado estacionario**, es decir, no se tiene en cuenta la transferencia de energía calorífica procedente del volumen de control anterior. Por tanto, esta ecuación refleja la transferencia de calor del metal de la tubería al fluido de su interior considerando que éste último está parado, es decir, considerando el caudal cero y en consecuencia el efecto nulo del flujo que se propaga por la tubería del captador.

La temperatura del fluido sin corregir (estado estacionario) en el volumen de control (i) en el instante de tiempo actual (n) dependerá de la temperatura actual del fluido en (n) más una cantidad que es proporcional a la diferencia de temperaturas metal-fluido en el instante y volumen de control considerados (i, n).

El **intercambio metal-fluido** en este caso viene determinado por la expresión $\left(\frac{L \cdot H_t(i,n) \cdot t_{int}}{A_f \cdot p_f(i,n) \cdot C_f(i,n)}\right) \cdot (T_{metal}(i,n) - T_{fluido}(i,n))$. Como se observa, la relación con la variación de la temperatura del fluido en estado estacionario $T_{fluido_sc}(i,n)$ es de proporcionalidad directa, es decir, un incremento de la diferencia de temperatura metal-fluido producirá un aumento de la temperatura del fluido en estado estacionario y viceversa.

La razón de proporcionalidad viene dada por el cociente entre varias constantes y coeficientes de los cuales algunos ya se han comentado anteriormente como es el caso de L , t_{int} y $H_t(i,n)$. En el denominador aparecen las constantes y coeficientes que describen el fluido. Tenemos que A_f , es el área transversal del fluido (área interior del tubo) en m² y $p_f(i,n)$ y $C_f(i,n)$ son respectivamente su densidad en kg/m³ y calor específico en J/kg°C. Vemos que estos dos últimos coeficientes dependen de (i, n), lo que significa que varían en función del instante de tiempo en el que nos encontremos (n) y del volumen de control considerado (i). La razón de la dependencia longitudinal con (i) es debida a que tanto p_f como C_f varían con la temperatura del fluido, por tanto, como obviamente ésta se va incrementando a lo largo de la longitud del tubo del captador,

estos coeficientes también variarán de la misma forma y serán distintos en cada volumen de control (**i**).

TEMPERATURA DEL FLUIDO CORREGIDA (fluido en movimiento)

La ecuación (3) por último **refleja la corrección sobre la temperatura del fluido caloportador en estado estacionario** calculada por la ecuación (2) **añadiendo la transferencia de energía entre volúmenes de control del fluido**, es decir, se considera la energía calorífica por transporte de caudal el cual ya será distinto de cero, obteniendo de esta manera como resultado la temperatura final del fluido en cada uno de los tramos (**i**) en los que se ha dividido la tubería del captador.

La temperatura final del fluido en el volumen de control (**i**) en el instante siguiente (**n+1**) será igual a la temperatura del fluido en estado estacionario en el instante actual (**n**) más un término de corrección que depende de la diferencia de temperatura de fluido en estado estacionario entre el volumen de control (**i**) y el anterior (**i-1**) en el instante de tiempo actual.

El **factor de corrección** presenta la expresión $-\left(\frac{q \cdot t_{int}}{A_f \cdot incx(i)}\right) \cdot (T_{fluido_sc}(i, n) - T_{fluido_sc}(i-1, n))$, donde se observa que **la variación de la temperatura final del fluido mantiene una relación inversamente proporcional con la diferencia de temperaturas de fluido en estado estacionario entre un volumen de control y su antecesor**. Por tanto, si la temperatura del fluido que entra a un volumen de control (**i**) procedente del volumen anterior es menor que la temperatura en el interior de dicho volumen ($T_{fluido_sc}(i-1, n) < T_{fluido_sc}(i, n)$), la diferencia será positiva y se producirá una disminución de temperatura en el fluido del volumen de control considerado. De manera contraria, si se cumple que ($T_{fluido_sc}(i-1, n) > T_{fluido_sc}(i, n)$), la diferencia pasará a ser negativa y por tanto se incrementará la temperatura del fluido en dicho volumen.

El cociente que pondera el factor de corrección incluye diferentes términos que es interesante comentar. Por un lado, en el numerador tenemos el caudal de flujo de entrada **q** en m³/s y por otro, en el denominador aparece el producto **A_f · incx (i)**, donde **incx (i)** es la longitud del tramo o segmento de tubo considerado. Si la partición se ha realizado de manera uniforme, entonces **incx (i)** pasa a ser constante y por tanto no depende del elemento (**i**) en el que nos encontremos.

La dependencia de la temperatura del fluido en un segmento de control (i) con la temperatura del flujo procedente del segmento anterior será tanto mayor cuanto mayor sea el caudal de entrada y menor el paso de discretización. Por consiguiente, un aumento en el caudal de entrada al captador ha de producir una disminución de la temperatura del fluido. Por otro lado, cuanto mayor sea la discretización (mayor número de segmentos) mayor será la influencia de la transferencia de calor inter-segmentos en la determinación de la temperatura final del fluido.

A modo resumen la ilustración siguiente muestra todos los fenómenos explicados anteriormente y que intervienen en el cálculo de la temperatura final del fluido en un volumen de control (i):

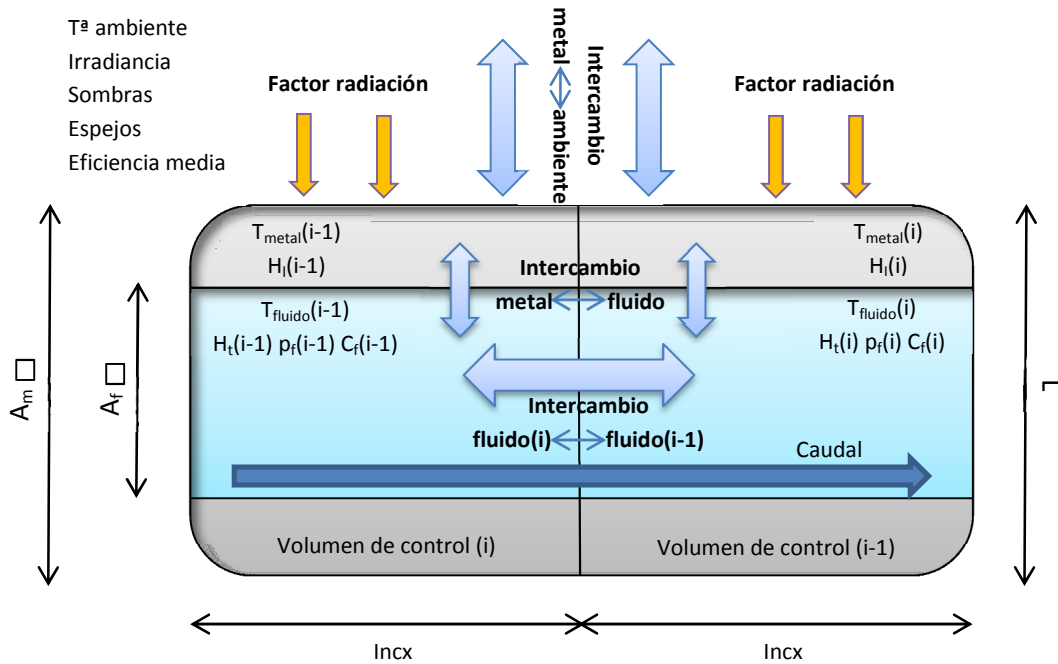


Ilustración 25. Fenómenos de transferencia de calor en un volumen de control (i)

5.3.2. Implementación en EcosimPro[®]

Una vez descritas las ecuaciones que rigen el modelo de parámetros distribuidos del captador solar, pasaremos a explicar como se ha realizado su implementación en EcosimPro[®]. Ésta puede dividirse en dos pasos diferenciados:

- Adaptación de las ecuaciones del modelo de parámetros distribuido.
- Implementación de cada uno de los volúmenes de control del modelo en EcosimPro[®].

Como se comentó en el capítulo 3, en EcosimPro[®] únicamente se pueden modelar y simular sistemas descritos mediante ecuaciones algebraico-diferenciales con inclusión de eventos discretos. Sin embargo, en el apartado anterior, las ecuaciones arrojadas por el modelo de parámetros distribuidos del captador solar están descritas mediante ecuaciones en diferencias. Es necesario por tanto realizar una **adaptación de estas ecuaciones para transformarlas en un conjunto DAEs que se puedan implementar en EcosimPro[®]**.

La definición analítica de derivada como un límite es la siguiente:

$$f'(a) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h) - f(a)}{h}$$

Partiendo de las ecuaciones (1), (2) y (3) de balance de temperatura, sustituyendo (2) en (3) y aplicando la definición anterior considerando **h** como **el tiempo de integración** y haciéndolo muy pequeño obtendremos las ecuaciones diferenciales que gobiernan cada uno de los volúmenes de control en los que se ha dividido el captador solar y que son las siguientes:

$$T'_{metal}(i) \cdot \left(\frac{C_{int}}{t_{int}} \right) = \left(\frac{1}{p_m \cdot C_m \cdot A_m} \right) \cdot \left(I \cdot G \cdot \mu_{media} \cdot \rho_{sombra} \cdot \%_{espejos} - H_l(i) \cdot G \cdot (T_{metal}(i) - T_{amb}) - L \cdot H_t(i) \cdot (T_{metal}(i) - T_{fluido}(i)) \right) \quad (4)$$

$$T'_{fluido}(i) \cdot \left(\frac{C_{int}}{t_{int}} \right) = \left(\frac{L \cdot H_t(i)}{A_f \cdot p_f(i) \cdot C_f(i)} \right) \cdot (T_{metal}(i) - T_{fluido}(i)) - \left(\frac{q}{A_f \cdot incx(i)} \right) \cdot (T_{fluido_{sc}}(i) - T_{fluido_{sc}}(i-1)) \quad (5)$$

Las ecuaciones diferenciales (4) y (5) junto con la ecuación algebraica (2) conforman ya el conjunto de DAEs implementables en EcosimPro[®] que modelan el comportamiento de cada uno de los tramos en los que se divide el tubo del captador solar.

Es importante resaltar la aparición de la constante $\left(\frac{C_{int}}{t_{int}} \right)$ multiplicando a las derivadas de la temperatura del metal y del fluido. Éste hecho es debido a la **adaptación que se produce entre las constantes de integración inicial del modelo de parámetros distribuidos utilizada en Matlab y la empleada para implementar el modelo en EcosimPro[®]**. Como se ha comentado, para obtener la descripción del sistema mediante un conjunto de DAEs implementables en EcosimPro[®], es necesario aplicar la definición analítica de la derivada **haciendo tender la constante de integración a un valor muy pequeño para que la aproximación sea correcta**. La constante de integración empleada inicialmente en el modelo de parámetros distribuidos era de 0,5 segundos, sin embargo para realizar la implementación en EcosimPro[®] se ha empleado una constante de tiempo nueva **CINT** de 1.388888889e-4, que es el equivalente en horas de medio segundo (se ha optado por elegir la hora como unidad de tiempo en EcosimPro[®] en vez del segundo por ser la unidad de tiempo empleada en las tablas dadas por el sistema de adquisición de datos de la planta). Por tanto, para aplicar la definición analítica de derivada a las ecuaciones, la constante de integración que ha de aparecer en el denominador es **CINT** y no **t_{int}** y es por ello por lo que aparece el cociente de ambas multiplicando a las derivadas.

Una vez finalizada la adaptación de las ecuaciones, el segundo paso es implementar cada uno de los volúmenes de control en los que se ha dividido la tubería del captador solar en EcosimPro[®].

Para realizar este segundo paso, inicialmente se pensó en programar un componente padre que modelara un segmento genérico de tubería del captador y posteriormente mediante el mecanismo de herencia crear todos los segmentos restantes, instanciarlos y conectarlos entre sí gráficamente mediante los puertos correspondientes. Esta opción

resultaba bastante tediosa y no facilitaba el poder introducir como parámetro a determinar por el usuario el número de segmentos en los que se dividía la tubería del captador y la longitud de los mismos. Tras un conocimiento más profundo del programa, se descubrió que **EcosimPro® permite la implementación de este tipo de sistemas de una forma sencilla mediante las sentencias EXPAND o EXPAND_BLOCK, las cuales ofrecen la posibilidad de insertar múltiples ecuaciones en una única línea mediante la expansión de un índice.**

Finalmente se optó por la última opción puesto que ésta suponía dos ventajas importantes:

1. Ahorro considerable de líneas de código que quedan reflejadas de forma compacta, con el consiguiente ahorro de tiempo.
2. Posibilidad de parametrizar el tamaño del conjunto de ecuaciones que se crea.

Esta última ventaja es especialmente útil en nuestro caso ya que se puede **hacer más grosera o más fina la discretización en función de un solo parámetro** que puede ser introducido por el usuario.

Como ejemplo, en un depósito, si queremos imponer que la temperatura de todas las salidas agrupadas en un vector (*Sal*) de dimensión *n_sal*, sea la indicada por una variable *T_dep* que refleja la temperatura del componente, el código mediante el uso de EXPAND sería el siguiente:

$$\text{EXPAND } (i \text{ IN } n_sal) \text{ Sal}[i].T = T_dep$$

Lo anterior es equivalente a las *n_sal* ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned} \text{Sal}[1].T &= T_dep \\ \text{Sal}[2].T &= T_dep \\ &\dots \\ \text{Sal}[n_sal].T &= T_dep \end{aligned}$$

Como vemos, EXPAND actúa como la sentencia FOR pero con la diferencia de que EXPAND tratará las ecuaciones como si el usuario las insertara de manera independiente. La sentencia FOR mantiene la estructura del bucle todo el tiempo de ejecución.

La sentencia EXPAND_BLOCK permite introducir varias ecuaciones en el mismo EXPAND y es la sentencia empleada para introducir las ecuaciones de nuestro sistema.

A continuación se muestra como queda el código final que implementa todas las ecuaciones que modelan los diferentes volúmenes de control de la tubería del captador.

```

EXPAND_BLOCK (i IN 2,N)

Hl[i]=perdidas_metal(Tm[i],S.Tamb)

caract_fluido(Tf[i],F_In.w,pf[i],Cf[i],Ht[i])

Tfsc[i]=Tf[i]+((P.L*Ht[i]*P.Tint)/(P.Af*pf[i]*Cf[i]))*(Tm[i]-Tf[i])

Tm[i]*(P.pm*P.Cm*P.Am)*(CINT/P.Tint)=S.I*P.G*P.Eficiencia media*E.sombras*E.espejos
_enfoc-Hl[i]*P.G*(Tm[i]-S.Tamb)-P.L*Ht[i]*(Tm[i]-Tf[i])

Tf[i]*(CINT/P.Tint)=((P.L*Ht[i])/(P.Af*pf[i]*Cf[i]))*(Tm[i]-Tf[i])-(F_In.w/(P.Af*incx))*(Tfsc[i]-
Tfsc[i-1])

END EXPAND_BLOCK

```

Las dos primeras funciones calculan los coeficientes de pérdidas y de transmisión del metal y del fluido respectivamente así como las características físicas y termodinámicas de este último para cada uno de los segmentos de la tubería del captador. El resto son las ecuaciones algebraico-diferenciales que modelan el comportamiento de la temperatura en el metal y el fluido y que ya han sido explicadas anteriormente.

Se hablará con más profundidad sobre el código empleado en el capítulo 6.