

Trabajo Fin de Máster

Implementación de un modelo de cálculo para la
simulación numérica del flujo en una
instalación solar térmica

Autor/es

Isabel Echeverribar Pérez

Director/es

Mario Morales Hernández
Alejandro del Amo Sancho

Ponente

Amaya Martínez Gracia

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2017



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. Isabel Echeverribar Pérez,

con nº de DNI 73223022S en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Máster _____, (Título del Trabajo)

Implementación de un modelo de cálculo para la simulación numérica del flujo
en una instalación solar térmica

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 22 de noviembre de 2017

Fdo: Isabel Echeverribar Pérez

Resumen

Actualmente existen modelos que simulan la parte térmica de una instalación solar y, a su vez, otros que se centran en el análisis de pérdidas de carga en instalaciones de tuberías. Sin embargo, raramente se lleva a la práctica un análisis conjunto de ambos fenómenos. En este trabajo se realiza un desarrollo del modelo necesario para la simulación completa de una instalación solar atendiendo, no sólo a los términos de temperatura, sino también a los de cantidad de movimiento del flujo, pudiendo realizar análisis de pérdidas de carga y de energía. En primer lugar, se realiza una revisión bibliográfica donde se parte de las ecuaciones de conservación que gobiernan el comportamiento de un flujo (masa, cantidad de movimiento y energía) para llegar a las ecuaciones de un sistema presurizado en régimen transitorio. Posteriormente es necesario establecer unas hipótesis que lleven a modelo simplificado que permita despreciar los fenómenos poco relevantes para hacer más sencillo el cálculo, llegando a un modelo unidimensional. Finalmente, se escoge un método numérico para la resolución de las mismas. En concreto, se escoge un esquema en volúmenes finitos. Cuando la metodología está establecida se programa, en lenguaje C, un problema sencillo que comprueba el correcto tratamiento de las ecuaciones. Posteriormente, se procede a introducir en el modelo las componentes propias de una instalación solar térmica teórica para su resolución y se compara con valores estimados por otros *software*.

Índice general

1. Introducción	9
2. Modelización de una instalación solar térmica	13
2.1. Planteamiento del problema	13
2.2. Modelización de componentes	14
2.2.1. Modelización de bombas hidráulicas	15
2.2.2. Modelización de válvulas de estrangulación	16
2.2.3. Modelización de captadores solares	17
2.3. Modelización del flujo	18
2.3.1. Ecuaciones de flujo a presión 1D	19
3. Modelo numérico e implementación	21
3.1. Resolución del sistema de ecuaciones: esquema numérico	21
3.2. Implementación y simulación	23
4. Validación del modelo computacional	27
4.1. Caso test 1: Golpe de ariete	27
4.2. Caso test 2: Instalación solar teórica	29
5. Conclusiones	43
Bibliografía	47
A. Método numérico	49
A.1. Resolución del sistema de ecuaciones: esquema numérico	49
A.2. Modelos de fricción	52
A.3. Condiciones de contorno	53
A.4. Condiciones de contorno internas	54
A.5. Confluencias	54
B. Estructura del algoritmo de cálculo	57

C. Herramienta auxiliar de visualización: Paraview	59
---	-----------

Índice de figuras

2.1. Esquema de una instalación solar simple	14
3.1. Representación del avance temporal y espacial del esquema numérico. . . .	22
3.2. Representación de los contornos físicos a través de las condiciones de contorno. . . .	23
4.1. Esquema de la instalación experimental del caso test 1.	28
4.2. Comparación entre la simulación y las medidas del experimento de A. Bergant[11] para la sonda 1 (a) y 2 (b).	28
4.3. Esquema de la instalación experimental del caso test 1.	29
4.4. Esquema de la instalación experimental del caso test 2.	30
4.5. Geometría de la instalación modelizada escalada con distintas características: coeficiente de fricción, f (a), diámetro interior, D (b) y coeficiente de transmisión térmica, U (c).	31
4.6. Distribución espacial de la altura de presión, H [m.c.a.], para $t=0.001, 0.002, 0.003, 0.011, 0.014, 0.037, 0.054$ y 0.23 s.	33
4.7. Distribución espacial de la altura piezométrica, H [m], para $t=75$ s en las instalación general (arriba) y detalles escalados (b) y (c).	34
4.8. Distribución espacial de la velocidad, u [m/s], para $t=75$ s.	35
4.9. Distribución espacial del caudal volumétrico, Q [m ³ /s], para $t=75$ s. . . .	36
4.10. Distribución espacial de la temperatura, T [°C], para $t=1, 12, 35$ y 75 s. . . .	37
4.11. Curva de radiación introducida en la simulación (a) en TRNSYS y en el modelo desarrollado, G [W/m ²] y curva de caudal de funcionamiento de la bomba, Q [m ³ /s], (b).	39
4.12. Curvas de temperatura de entrada y ambiente introducidas en la simulación en TRNSYS y en el modelo desarrollado, en °C.	39
4.13. Curvas de temperatura de salida proporcionadas por TRNSYS y el modelo del trabajo, en °C, para los dos procedimientos implementados.	41
A.1. Representación de la discretización del dominio en celdas de anchura Δx . . .	50
A.2. Representación del transporte de la información en un esquema en ondas. . .	52

A.3. Representación del transporte de la información en los contornos.	53
A.4. Representación del transporte de la información en los contornos de entrada (a) y salida (b).	54
A.5. Representación de la imposición exterior de una condición de contorno interna.	54
A.6. Representación de la confluencia de 3 tuberías (T1, T2 y T3) y el transporte de información en ella.	55
B.1. Diagrama de flujo de las órdenes implementadas en el algoritmo de cálculo.	58
C.1. Distribución espacial de la presión para un tiempo dado en una instalación.	60

Capítulo 1

Introducción

Los esfuerzos que recientemente se han invertido en el desarrollo de la energía solar han provocado un aumento de su importancia dentro del campo energético hasta que, a día de hoy, se presenta como una alternativa viable dentro del ámbito de la generación [1]. A su vez, la necesidad de ligar los conceptos energéticos al término *sostenibilidad* aumenta cada vez más [9] y, en esa línea, esta tecnología tiene mucho que aportar como energía renovable. Dentro del amplio campo del aprovechamiento de la energía proveniente del sol, la solar térmica trata de transformar la radiación de llegada en aumentos de temperatura que puedan ser utilizados directa o indirectamente por el ser humano. Dependiendo del dispositivo de captación que se utilice, el rango de temperatura será diferente y, en base a ello, se divide la tecnología en tres grupos: de baja, media y alta temperatura [3]. El primero de ellos otorga valores máximos de en torno a los 100 °C y el presente trabajo se centra en la aplicación de esta tecnología para la generación de agua caliente, para calefacción o sanitaria (ACS).

La captación solar para la generación de agua caliente requiere de una instalación que, dentro de un rango de posibilidades que dependen del diseño y dimensiones de la misma, consta de un conjunto de dispositivos básicos. En particular, precisa de un dispositivo de captación que recoja la radiación incidente, de una red de transporte del fluido que se quiere calentar (tuberías), de un sistema de almacenamiento del fluido ya calentado y de otros elementos auxiliares, como válvulas o bombas de impulsión. Es decir, en definitiva, una instalación solar térmica es una instalación hidráulica diseñada de tal manera que el agua se caliente a su paso por los dispositivos de captación solar.

A la hora de abordar el diseño de una instalación solar térmica, es necesario poner atención a los distintos aspectos que tienen que ver con la viabilidad constructiva, la económica, la vida útil y la eficiencia. El correcto funcionamiento de la instalación dependerá de un buen diseño tanto en términos térmicos como hidrodinámicos. En particular, las pérdidas de calor cedidas al ambiente por la ausencia de un buen aislante o las pérdidas

de carga en las líneas son algunos de los factores a tener en cuenta en el diseño.

Las instalaciones de captación con un campo solar de gran tamaño se componen de varias bancadas de captadores en paralelo que, por razones constructivas o simplemente temporales por mal funcionamiento, pueden con contar con distinto número de dispositivos o metros de línea por bancada. En situaciones como ésta, se adoptan estrategias de equilibrado de pérdidas de presión mediante el uso de válvulas en las líneas que pretendan introducir pérdidas de carga controladas. Por otro lado, metodologías de diseño que minimicen las pérdidas en el transporte del fluido, tanto térmicas como de presión, son necesarias para la mejora del funcionamiento de las instalaciones y para el ahorro energético en la bomba de impulsión. Ejemplos como los expuestos evidencian la necesidad de herramientas de diseño que permitan abordar los problemas con los que una instalación pueda encontrarse en el futuro.

El avance tecnológico permite la recogida de datos de las instalaciones de manera que sea posible ajustar con más precisión los puntos de trabajo. No obstante, los ensayos de prueba-error son, por lo común, una de las metodologías más utilizadas para la optimización de diseños y la elección de puntos de operación, a pesar de no ser la técnica más eficiente. Algunos fabricantes ofrecen *software* para el ajuste de este tipo de diseños basados en cálculos sencillos. Sin embargo, la investigación computacional ha permitido el desarrollo de modelos de simulación complejos que, de manera práctica y rápida, calculan en detalle y reproducen fenómenos extraordinarios que es necesario predecir en la etapa de diseño.

En el ámbito de aplicación de la energía solar térmica y el diseño de instalaciones, el uso de herramientas como TRNSYS¹, que ofrece la posibilidad de realizar estudios dinámicos, se encuentra ampliamente extendido. Este tipo de herramientas resultan prácticas a la hora de estimar el funcionamiento térmico de una instalación, balances energéticos y cambios de temperatura. Sin embargo, dejan de lado la parte hidrodinámica de toda instalación.

Por otro lado, existe software de simulación de redes de tuberías que simula el comportamiento hidráulico de las mismas². En particular, es habitual el uso de modelos estacionarios que, si bien están adaptados para poder simular transitorios, no son capaces de reproducir ciertos fenómenos.

¹<http://www.trnsys.com/>

²<https://www.epa.gov/water-research/epanet>

El objetivo principal de este trabajo es el de aunar ambos campos para desarrollar un modelo de simulación detallado del flujo en una instalación solar térmica de baja temperatura, de manera que sea posible realizar un análisis complementario que estudie la hidrodinámica de la misma. En primer lugar, es necesario considerar los fenómenos que se quieren representar para partir de unas ecuaciones determinadas y, sobre ellas, aplicar las hipótesis necesarias que las simplifiquen. Este trabajo, pretendiendo reproducir adecuadamente las situaciones transitorias que puedan darse en una instalación, parte de las leyes de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía [4]. Dicho sistema de ecuaciones se adapta al flujo a presión que circula por el interior de una tubería, asumiendo un modelo unidimensional que asume una velocidad constante en la sección transversal de la tubería [7]. Posteriormente, se elige un modelo que las simplifique y las resuelva a través de un método numérico, ya que estas no tienen solución exacta. En particular, se utiliza un esquema numérico en volúmenes finitos, descentrado y explícito, para la resolución del sistema y se completa con una serie de ecuaciones adicionales que permiten la modelización de componentes presentes en una instalación como válvulas, bombas hidráulicas o captadores solares. De esta manera, el modelo se centrará en las líneas del circuito primario de una instalación solar térmica, representando no sólo las líneas de tubería, sino componentes como válvulas, bombas y captadores solares.

El modelo, desarrollado en lenguaje de programación C, se utiliza para simular varios casos test. En primer lugar, se simula un experimento de laboratorio propuesto por autores que han realizado estudios en la materia [7][2]. En concreto, se simula la reproducción del fenómeno transitorio del golpe de ariete. Posteriormente, se modela una instalación teórica comparando los resultados con valores de pérdida carga estimados en la industria. Adicionalmente, se valida el modelo termodinámico comparando con valores obtenidos teóricamente, así como con resultados proporcionados por una herramienta comercial de cálculo.

Capítulo 2

Modelización de una instalación solar térmica

Una instalación solar térmica puede verse como una instalación de fluidos convencional por cuyo interior fluye agua en unas condiciones determinadas de presión y temperatura. No obstante, es importante tener en cuenta que en dicha instalación no existen únicamente tuberías por las que el fluido se transporta, sino también componentes auxiliares que permiten su correcto funcionamiento como bombas, válvulas y, por supuesto, los colectores solares que calientan el fluido.

En este capítulo se presenta la instalación solar tipo que se usa de base para explicar todos los componentes que la integran y que se van a modelizar. Asimismo, se muestran las ecuaciones que rigen el comportamiento del flujo a través de cada uno de ellos y que después serán introducidas en el modelo, ya que es necesario entender todos los componentes que conforman la instalación para poder así representar los efectos que tienen sobre el flujo.

2.1. Planteamiento del problema

La Figura 2.1 muestra un esquema de una instalación solar convencional[3]. En ella, el fluido frío entra por la parte inferior del captador para calentarse a causa de la radiación solar y transportarse a más alta temperatura hasta el intercambiador de calor que se encuentra en el interior del depósito de acumulación, de donde se coge el agua que va a consumo. Una vez el calor se ha cedido al depósito, el agua fría vuelve hasta la entrada inferior del colector (o del subsistema de captación, que puede estar conformado por más de un colector). A este circuito, normalmente cerrado, se le llama circuito primario y es la parte de la instalación que se va a modelar.

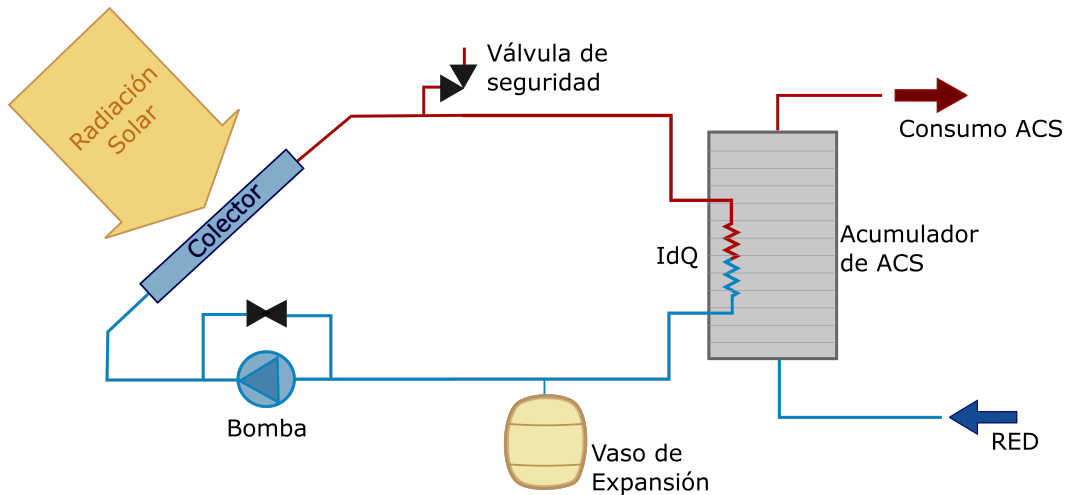


Figura 2.1: Esquema de una instalación solar simple

El circuito primario está conformado por varios subsistemas como son el de captación y el auxiliar (constituido por bombas, válvulas y tuberías). La manera en la que el flujo se desarrolla a lo largo de las tuberías se representará con las ecuaciones de flujo transitorio presurizado (*Water Hammer Equations*, WHE[7]), que se explican detalladamente en al final del presente capítulo. Dicho sistema consta de tres ecuaciones en derivadas parciales y proporciona información de velocidad, u , presión, p , y temperatura, T , en cada punto de la instalación y en cada instante de tiempo. Además, es posible conocer la evolución temporal y espacial de otras variables secundarias dependientes de las mencionadas variables principales, tales como el caudal volumétrico, másico, o la altura piezométrica.

Por otra parte, para representar la existencia de los componentes anteriormente mencionados en el dominio de la instalación se introducirán leyes más sencillas. La manera en la que se tratan las variables conservadas del flujo en cada componente se explica a continuación.

2.2. Modelización de componentes

En este apartado se explican las ecuaciones que representan las singularidades que los componentes introducen en la resolución del flujo por las tuberías. Para todos ellos, se asume el estado 1 como el estado de entrada al dispositivo y el 2 como estado de salida.

2.2.1. Modelización de bombas hidráulicas

Las bombas hidráulicas aportan energía al fluido que circula por la instalación con el propósito de superar las pérdidas de carga que se va a encontrar a lo largo de la misma. Se modelan a través de la ecuación característica (2.1) que incluye la presión concedida por la misma (expresada en altura de presión) en función del caudal circulante y de unos coeficientes, A y B , que dependen del modelo y suelen estar proporcionados por el fabricante.

$$\Delta H = A - BQ^2 \quad (2.1)$$

Por otro lado, la curva de la instalación es un balance de energía donde se tienen en cuenta las pérdidas de carga (presión) que el fluido se va a encontrar conforme avance por la misma en función de su propio caudal. Esta curva se expresa según (2.2):

$$h_L = f \frac{8L}{g\pi^2 D^5} + \Delta h_c + \Delta h_v \quad (2.2)$$

donde f es un coeficiente de fricción, L la longitud de la línea, g la aceleración de la gravedad y D el diámetro interior de la tubería. Además, Δh_c y Δh_v son las pérdidas singulares introducidas por los captadores solares y las válvulas, respectivamente. Las funciones de pérdidas de los captadores son curvas analíticas proporcionadas por los propios fabricantes. Las pérdidas en las válvulas vienen impuestas como consigna de diseño.

La intersección de estas dos curvas (2.1) y (2.2) otorga el punto de operación de la bomba, que fija la presión de salida de la misma y el caudal, quedando resuelta la parte hidrodinámica.

Por último, hay que añadir una ecuación que, dadas unas condiciones de entrada, resuelva la parte térmica y nos proporcione unas condiciones de salida. Para ello, hay que analizar el proceso térmico que se produce en una bomba hidráulica sin olvidar que el modelo calcula u , p y T .

El trabajo desarrollado por un dispositivo como una bomba sobre un flujo entre dos estados termodinámicos 1 y 2 puede expresarse en términos específicos como:

$$w = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1) + \nu(P_2 - P_1) \quad (2.3)$$

donde w es el trabajo y h_i es la entalpía del estado i (kJ/kg), c_p es el calor específico del fluido en las condiciones medias (kJ/kgK), T_i y P_i son temperatura y presión del estado i , respectivamente, y ν es el volumen específico (m^3/kg), inverso de la densidad.

Los procesos de aumento de presión en una bomba se modelizan a través de procesos de entropía constante a los que luego se les aplica un rendimiento isoentrópico η_s para obtener el estado de salida real. De este modo, se define el rendimiento isoentrópico como el trabajo que necesitaría la bomba si el proceso fuese isoentrópico entre el que realmente necesita:

$$\eta_s = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (2.4)$$

donde el estado $2s$ representa el estado 2 si el proceso fuese isoentrópico. Aplicando la definición de (2.3) en (2.4) se obtiene la ecuación (2.5) que expresa el rendimiento en función de las variables que resuelve el modelo.

$$\eta_s = \frac{c_p(T_{2s} - T_1) + \nu(P_{2s} - P_1)}{c_p(T_2 - T_1) + \nu(P_2 - P_1)} \quad (2.5)$$

El estado $2s$ tiene la misma presión que el estado real 2 que queremos obtener. Por otro lado, según la definición de entropía mostrada en la ecuación (2.6), un proceso isoentrópico se puede asumir como isoterma aplicando el modelo de sustancia incompresible (M.S.I.). Por tanto, la ecuación (2.5) queda expresada según (2.7), donde ρ es la densidad del fluido caloportador.

$$s_2 - s_1 = c_e \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \quad (2.6)$$

$$\eta_s = \frac{(P_2 - P_1)}{c_p \rho (T_2 - T_1) + (P_2 - P_1)} \quad (2.7)$$

De este modo, habiendo resuelto la parte hidrodinámica, es posible despejar la temperatura de salida conocida la de entrada.

2.2.2. Modelización de válvulas de estrangulación

Las válvulas de estrangulación realizan bajadas de presión sin aportar trabajo. Son elementos estáticos en los cuales $w = 0$ y la acumulación, extracción o aportación de masa es nula. Por esta razón, la parte hidrodinámica se resolverá aplicando la continuidad para la masa y una pérdida de presión asumida como consigna. De este modo, las variables presión y velocidad (a través de la continuidad del caudal) están unívocamente determinadas y simplemente es necesario resolver la parte térmica.

Como ya se ha apuntado, el trabajo en estos dispositivos es nulo y, por tanto, son modelados asumiendo procesos isoentálpicos, según la ecuación (2.3). De este modo, una vez resuelta la parte hidrodinámica y conocidas las presiones de entrada y salida, la ecuación (2.3) para válvulas se convierte en la ecuación (2.8) de donde se puede despejar la temperatura de salida, T_2 :

$$c_p(T_2 - T_1) = -\frac{1}{\rho}(P_2 - P_1) \quad (2.8)$$

2.2.3. Modelización de captadores solares

Los captadores solares son los dispositivos encargados de transformar la radiación solar en energía calorífica que, entre otras cosas, se transformará en un aumento de temperatura del fluido. Por otro lado, estos carecen de partes móviles que modifiquen de algún modo la energía cinética del flujo y, por tanto, sumado a que no existe ningún tipo de acumulación o extracción de masa, reducen la transformación hidrodinámica a una simple pérdida de carga en el fluido a su paso por el captador. A continuación se exponen las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del flujo tanto térmica como cinemáticamente a través del colector solar.

De un modo similar al de las válvulas, estos dispositivos tienen contabilizada la pérdida de carga desde fábrica para unas condiciones dadas. Estas pérdidas por fricción dependen del régimen del flujo que circula por su interior. Sin embargo, los rangos de velocidad en los que se mueven los problemas que se van a resolver no introducen cambios significativos en este término. De este modo, imponiendo continuidad de la masa y la simple relación entre las presiones de entrada y salida a través de la pérdida de carga dada por el fabricante, la parte hidrodinámica del colector queda resuelta.

Por otro lado, la parte térmica necesita de una entrada de información en términos energéticos. En el caso particular de la radiación solar, para cuantificar el aumento de temperatura del flujo, la potencia calorífica que se transmite al flujo, \dot{Q} (kW), se escribe en términos de un aumento de temperatura del fluido según la ecuación (2.9)

$$\dot{Q} = \dot{m}_f c_p \Delta T = \dot{m}_f c_p (T_2 - T_1) \quad (2.9)$$

donde \dot{m}_f es el caudal másico de flujo que atraviesa el colector (kg/s), c_p es su poder calorífico ($kJ/(kgK)$), y ΔT el incremento de temperatura que sufre el fluido a su paso por el dispositivo.

Por otro lado, es necesario cuantificar la potencia que llega al fluido. Dicha potencia no es directamente la que llega a la superficie terrestre, sino que depende del tipo de colector que la esté captando. En concreto, de toda la radiación solar que llega, I_s (kW/m^2), el calor que finalmente se aporta al fluido se expresa según la ecuación (2.10)

$$\dot{Q} = \eta_c A_c I_s \quad (2.10)$$

donde el rendimiento del colector, η_c ya tiene en cuenta las pérdidas por cesión de calor al ambiente y sigue una ley proporcionada por el fabricante como la que se expresa en (2.11)

$$\eta_c = \eta_0 - k_1 \left(\frac{T_f - T_a}{I_s} \right) - k_2 I_s \left(\frac{T_f - T_a}{I_s} \right)^2 \quad (2.11)$$

siendo T_a la temperatura ambiente y T_f la temperatura del fluido, calculada como el promedio entre la entrada y la salida. k_1 y k_2 son constantes del captador que vienen dadas por el fabricante y cuantifican las pérdidas en función de las características constructivas del mismo.

Igualando las expresiones (2.9) y (2.10) se puede obtener el salto térmico ($\Delta T = T_2 - T_1$) que experimenta el fluido a su paso por el colector dejando cerrado el sistema térmico, una vez que es conocida la temperatura de entrada al mismo y las características del dispositivo de captación:

$$T_2 = T_1 + \frac{\eta A_c I_s}{\dot{m}_f c_p} \quad (2.12)$$

2.3. Modelización del flujo

En un fluido en movimiento, en el cual se quieren resolver tanto variables hidráulicas como térmicas, tres ecuaciones fundamentales han de satisfacerse en cada punto de dominio: conservación de la masa, conservación de la cantidad de movimiento y conservación de la energía. Cuando no existen variaciones en la densidad del fluido, o estas se consideran despreciables, no existe vínculo alguno entre las dos primeras y la de conservación de la energía. Por esta razón, es común la utilización únicamente de las dos primeras para la resolución dinámica del flujo. Sin embargo, el presente trabajo se centra en la resolución de la distribución de temperatura que se da en una instalación y su evolución temporal, además de la resolución hidráulica, por lo que la tercera ecuación será también resuelta.

2.3.1. Ecuaciones de flujo a presión 1D

A continuación se presenta el sistema de ecuaciones que posteriormente será resuelto mediante un esquema numérico para el cálculo del flujo en la instalación. Dicho sistema deriva de las leyes de conservación anteriormente nombradas que, ya aplicadas a flujo en una tubería de diámetro D , sección A y en una dimensión, se pueden escribir como sigue:

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{(\partial \rho A u)}{\partial x} = 0 \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial(\rho A u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho A u^2)}{\partial x} = -A \frac{\partial P}{\partial x} - \pi D f \frac{u^2}{8} - \rho g A \sin \alpha \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{\rho c_p} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \beta T \rho \frac{\partial u}{\partial x} + f \frac{\rho u^3}{2D} - \frac{q_{ext}}{A} \right] \quad (2.15)$$

donde u , P y T son velocidad, presión y temperatura (variables a resolver), respectivamente, f es el coeficiente de fricción, c_p el calor específico del fluido, k el coeficiente de transmisión térmica del mismo, β es el coeficiente de expansión térmica, g es la aceleración de la gravedad, q_{ext} hace referencia al calor que puede transferirse de la instalación al exterior o viceversa en función de la temperatura ambiente y, por último, α representa el ángulo que forma el eje de la tubería con el plan horizontal.

La ecuación de la energía puede transformarse aplicando la definición de q_{ext} para una sección de una tubería circular[10]

$$q_{ext} = UP(T - T_a) \quad (2.16)$$

donde U es el coeficiente de transferencia térmica de la pared de la tubería, P el perímetro de la misma, y T_a es la temperatura ambiente. Además, asumiendo k constante en todas las direcciones puede extraerse de la derivada. Por último, no todos los términos de la ecuación necesitan ser tenidos en cuenta. Asumiendo flujo incompresible, el coeficiente β es nulo y el término que lo acompaña desaparece.:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{\rho c_p} \left[k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + f \frac{\rho u^3}{2D} - \frac{4U}{D} (T - T_a) \right] \quad (2.17)$$

Por otro lado, las ecuaciones de masa (2.13) y momento (2.14) pueden reescribirse aplicando un cambio de variable que permita trabajar con la presión en lugar de la densidad. Además, aplicando la regla de la cadena, desarrollando las derivadas totales y usando la definición de A para una tubería circular ($A = \pi D^2/4$), se obtiene

$$\frac{1}{\rho a^2} \left[\frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial x} \right] + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - f \frac{u^2}{2D} - g \sin \alpha \quad (2.19)$$

donde a es la propagación de las ondas de presión, que depende de las características de la tubería y del fluido

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \frac{DK}{eE}}} \quad (2.20)$$

siendo K el módulo de compresibilidad del fluido, ρ la densidad del mismo, D el diámetro interior de la tubería, e el espesor de la misma y E el módulo de Young del material que la conforma.

En las instalaciones que se resuelven en el presente trabajo, la velocidad de las ondas de presión es mucho más alta que la del flujo y los términos multiplicados por u pueden despreciarse. De este modo, haciendo un análisis dimensional[7], la parte dinámica del sistema de ecuaciones quedaría:

$$\frac{1}{\rho a^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + f \frac{u^2}{2D} + g \sin \alpha = 0 \quad (2.22)$$

Por último, usando la definición de altura piezométrica $P = \rho g (H - z)$ (siendo z la cota) la variable de la presión pasa a expresarse en metros y el sistema final, con las tres ecuaciones de conservación, queda

$$\frac{g}{a^2} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} = - \left(f \frac{u^2}{2D} + g \sin \alpha \right) \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{\rho c_p} \left(k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + f \frac{\rho u^3}{2D} - \frac{4U}{D} (T - T_a) \right) \quad (2.25)$$

Este sistema contiene las leyes de conservación que gobiernan el comportamiento del flujo hidrodinámico y térmico. Al tratarse de un sistema de ecuaciones en derivadas parciales, cuya solución no puede obtenerse analíticamente, es necesario resolverlo mediante métodos numéricos que discreticen el problema y sean capaces de proporcionar resultados muy aproximados a la realidad. La manera de resolverlo se explica en detalle en el Anexo A.

Capítulo 3

Modelo numérico e implementación

El presente capítulo explica la manera en la que se resuelven las ecuaciones expuestas anteriormente (ver cap. 2) y su utilización para conformar un caso de simulación. En primer lugar, se presenta el método numérico utilizado para resolverlas y la información necesaria para completar el sistema de ecuaciones. Posteriormente, se explica la manera en la que este método ha sido introducido en un algoritmo, así como el tipo de resultados que es posible obtener tras una simulación.

3.1. Resolución del sistema de ecuaciones: esquema numérico

El sistema de leyes de conservación que gobierna el flujo en el interior de las tuberías (ecuaciones (2.23), (2.24) y (2.25)) carece de solución analítica y su resolución ha de realizarse mediante métodos numéricos, capaces de capturar la transitoriedad del problema con alta precisión.

En el presente trabajo se resuelve el sistema de leyes de conservación a través de un esquema en volúmenes finitos que se explica detalladamente en el Anexo A. La utilización de un esquema numérico implica la discretización del dominio de cálculo espacial y temporal. Así, dada una instalación con una geometría determinada, todas las líneas son discretizadas espacialmente en celdas de tamaño Δx conformando la malla de cálculo. Para cada una de esas celdas se obtienen valores de las variables conservadas (H , u y T) y de las secundarias que derivan de estas (caudal, presión, etc.), que se actualizan en el tiempo conforme avanza la simulación desde un tiempo inicial ($t=0$) hasta uno final ($t=t_f$), dando pasos de tiempo, de tamaño Δt , como se representa en la Figura 3.1.

De esta manera, el modelo calcula de forma dinámica el avance de la simulación siendo

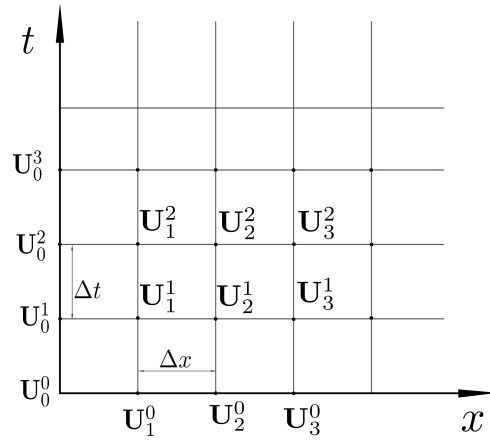


Figura 3.1: Representación del avance temporal y espacial del esquema numérico.

capaz de resolver problemas transitorios tanto en la parte térmica como la en la parte hidrodinámica y capturando el valor de cada celda en cada tiempo, que se actualiza según la ecuación (A.12).

Para representar la evolución del flujo dentro de una instalación no sólo es necesario partir de una malla que represente la geometría, sino que también es necesario fijar unas condiciones de contorno (CC) que proporcionen la información de las variables en los extremos. Matemáticamente, estas condiciones son necesarias para cerrar el sistema de ecuaciones y obtener una solución única. Físicamente, las CC representan el estado en el que el flujo entra y sale de la instalación, que influye directamente sobre la manera en la que éste se desarrolla dentro de la misma. La Figura 3.2 representa una tubería por la que circula un fluido conectando dos depósitos a distinta cota y distinta altura de presión. La velocidad y presión con la que el fluido se transporta de uno a otro depósito, así como el propio sentido, depende de la presión y altura a la que estos se encuentran. Puesto que cada una de las tres ecuaciones necesita una condición de contorno, es necesario imponer dos relacionadas con la parte hidrodinámica (una a la entrada y otra a la salida) y una vinculada a la parte térmica (T a la entrada). La manera en la que el esquema numérico trata las CC queda explicada en detalle en el Anexo A.

Además de información sobre los contornos del dominio de cálculo, es necesario imponer el estado en el que se encuentra la instalación inicialmente y desde el que parte la simulación. Esta información es la condición inicial, que está compuesta por los valores de las variables en cada una de las celdas de cálculo en $t=0$. A modo de ejemplo, la condición inicial para partir de una instalación apagada y fría consistiría en la imposición de velocidad nula, temperatura igual a la ambiente y presión constante definida por el usuario en todas las celdas.

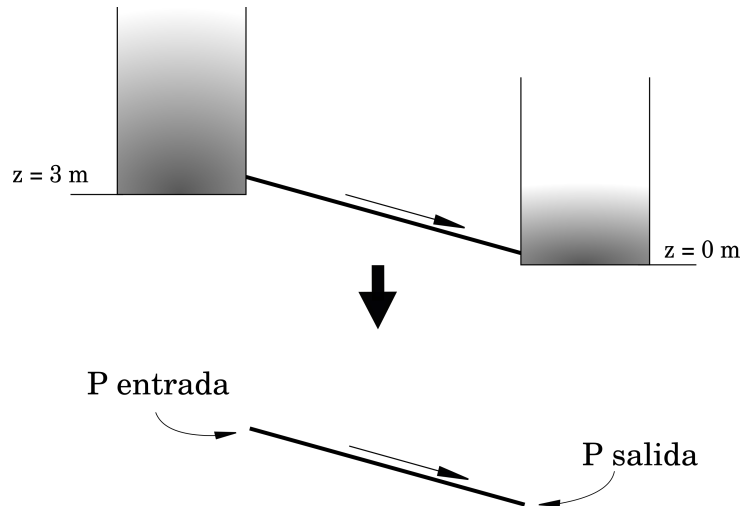


Figura 3.2: Representación de los contornos físicos a través de las condiciones de contorno.

Por último, en el presente trabajo el modelo numérico se aplica a instalaciones solares que, como se ha visto en el capítulo 2, incluyen no sólo tuberías por las que circula el flujo, sino también componentes que introducen cambios en el mismo, como son válvulas, captadores solares o bombas hidráulicas. Esta información se introduce en el cálculo a través de las llamadas “condiciones de contorno internas”. Estas condiciones implican una manera de calcular el flujo entre dos celdas de la instalación diferente a la ordinaria de manera que se represente el efecto que dicho componente ejerce sobre el fluido en la posición donde está el componente.

3.2. Implementación y simulación

Siguiendo el esquema numérico explicado anteriormente y detallado en el Anexo A, en el presente trabajo se desarrolla, en lenguaje C y sin interfaz gráfica, un *software* de simulación que sea capaz de reproducir la evolución transitoria en una instalación. Para ello, dicho *software* necesitará una geometría, la localización y caracterización de los componentes, unas condiciones de trabajo (introducidas a través de las CC) y una condición de partida (condición inicial). Como resultado se obtendrá la distribución de cada una de las variables en cada celda e instante de tiempo, siendo posible extraer resultados de evolución temporal en puntos “sonda”, así los gradientes de las variables a lo largo de la instalación para un tiempo dado.

Todo proceso de simulación consta de 3 partes diferenciadas: pre-proceso, cálculo y post-proceso. El pre-proceso es el paso en el que se configura un caso de simulación.

Durante esta etapa, la información de partida se determina para representar de manera computacional la realidad del problema que se desea simular. Dado que el desarrollo de una herramienta de pre-proceso no es el objetivo de este trabajo, la información de partida se da en forma de fichero de texto que el *software* lee y procesa. Dichos ficheros se configuran de forma manual y contienen la siguiente información de partida:

- Condiciones de contorno: es necesario definir la presión de los puntos extremos de la instalación (ver Figura 3.2 o A.3) y la temperatura de entrada del flujo.
- Condiciones iniciales: se define si la instalación parte de alguna distribución de presión, velocidad y temperatura determinada o comienza estando apagada ($u = 0$ en todos los puntos, $T = T_{ambiente}$ y una presión determinada).
- Geometría: se proporcionan la posición cartesiana (x, y, z) de todos los nodos de la instalación y las conectividades entre los mismos para conformar la geometría de la instalación y que el *software* pueda generar la malla espacial.
- Características técnicas de las tuberías: se requiere información a cerca de las dimensiones y el material del que están compuestas para calcular correctamente términos de fricción y de propagación de ondas.
- Componentes: se introduce la información relativa a la posición espacial y las características técnicas de los componentes que hay en la instalación.
- Radiación: se introduce la curva de radiación que incidirá sobre los captadores solares.

Una vez establecidos los datos de partida se pasa a la ejecución del modelo que los procesa y comienza a simular. El algoritmo de funcionamiento del código se explica más detalladamente en el Anexo B. Durante la simulación, el esquema numérico avanza en el tiempo actualizando las variables cada Δt y escribiendo los resultados en ficheros de texto para su posterior procesado.

Por la manera en la que resuelve el método, se pueden encontrar dos tipos de resultados: evoluciones espaciales en un tiempo dado y evoluciones temporales en puntos del espacio. La evolución temporal de una variable en un punto de la instalación se representa sencillamente en forma de gráfica. Sin embargo, la evolución espacial de las variables para un instante determinado puede ser más complicada si la instalación tiene una geometría compleja. Por ello, en el presente trabajo se ha recurrido a la utilización de un programa auxiliar para el post-proceso, denominado Paraview (ver Anexo C). Este *software* es capaz de procesar archivos en un formato estándar (**.vtk*)¹² de manera que únicamente es

¹https://www.paraview.org/Wiki/ParaView/Data_formats

²<https://www.vtk.org/wp-content/uploads/2015/04/file-formats.pdf>

necesario escribir la información de salida en dicho formato.

Capítulo 4

Validación del modelo computacional

El presente capítulo muestra simulaciones que se han llevado a cabo con el propósito de validar el modelo comparándolo con resultados extraídos de bibliografía o calculados teóricamente. En particular, se presentan dos casos test que pretenden validar diferentes situaciones. En primer lugar, se muestra la simulación de un caso experimental con el objetivo de validar la correcta reproducción del fenómeno de golpe de ariete. Posteriormente, se presenta la modelización de una instalación teórica proporcionada por Abora Energy S.L.¹ cuyos resultados se comparan con los obtenidos por la compañía y los cálculos teóricos habituales.

4.1. Caso test 1: Golpe de ariete

El fenómeno del golpe de ariete se produce con cambios bruscos en la velocidad que provocan el transporte rápido de ondas de presión a lo largo de la tubería. Estas ondas de presión, que se propagan con velocidad a (ver ecuación (2.20)), provocan oscilaciones tanto en la presión como en la velocidad. El estudio de su efecto y la interacción con la estructura de la instalación es la motivación de numerosos estudios y su representación sólo puede ser capturada con métodos que resuelvan las llamadas *Water Hammer Equations* y sean capaces de reproducir fenómenos transitorios[7].

El trabajo realizado por A. Bergant y A. R. Simpson[2] reproduce el fenómeno del golpe de ariete en un experimento controlado de laboratorio. Los mismos autores comparan en otro estudio la reproducción de este fenómeno con varios modelos de simulación[11]. Los resultados obtenidos en este trabajo han sido comparados con los publicados en el artículo mencionado. El experimento consiste en la modelización inicial de un flujo que se transporta a lo largo de una tubería que conecta dos depósitos a distinta altura hasta que,

¹<http://abora-solar.com/>

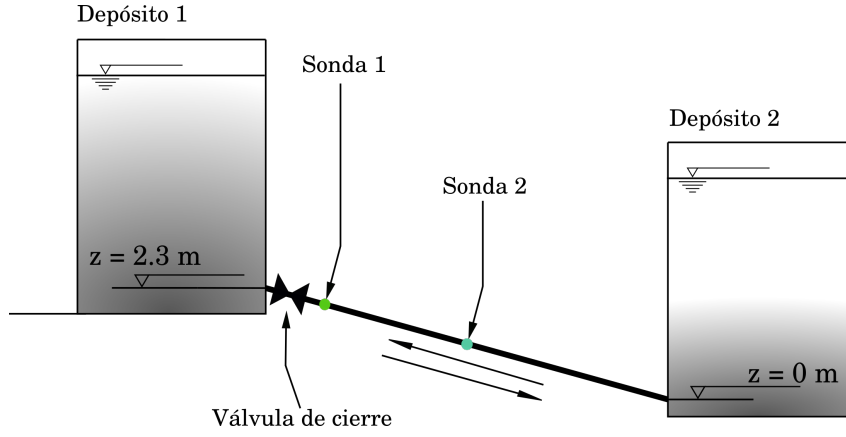


Figura 4.1: Esquema de la instalación experimental del caso test 1.

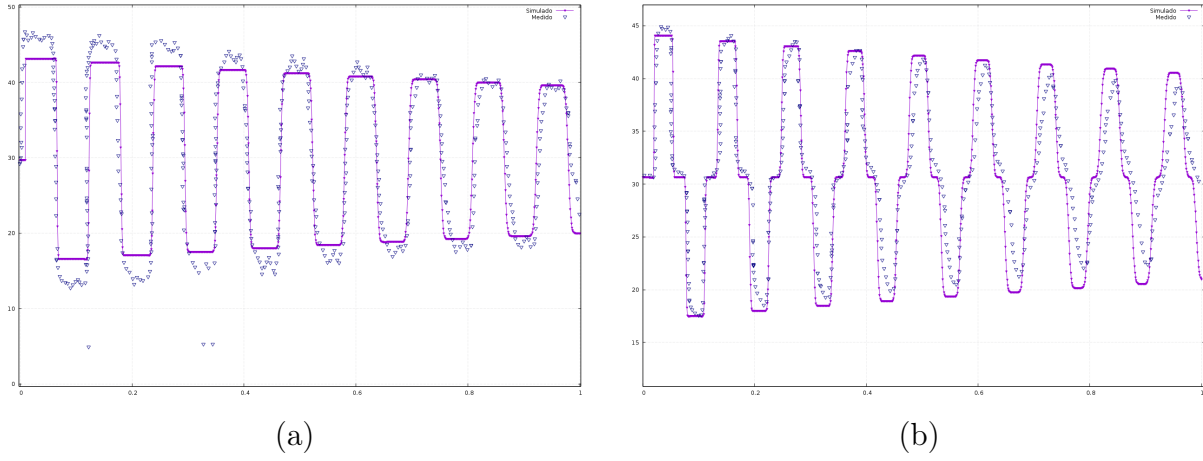


Figura 4.2: Comparación entre la simulación y las medidas del experimento de A. Bergant[11] para la sonda 1 (a) y 2 (b).

en un instante determinado ($t=0.009s$), se cierra una válvula en un extremo provocando la generación de una onda de presión (ver Figura 4.1). El experimento se encuentra monitorizado con varias sondas (pintadas en verde y azul en la misma figura) que registran la evolución temporal de la altura de presión en el punto de la tubería donde se encuentran. El experimento tiene una duración total de 1 segundo.

Inicialmente se parte de un estado estacionario en el que el flujo circula a 0.1 m/s desde el depósito 2 al depósito 1. Aguas arriba se impone la presión del depósito 2, proporcionada como dato. A su vez, aguas abajo se fija la velocidad estacionaria como CC hasta que, pasados los 0.009 s , se impone velocidad nula ($u = 0 \text{ m/s}$). La comparación entre los resultados obtenidos con el modelo y los datos experimentales se muestra en la Figura 4.2 para ambas sondas.

Se observan las oscilaciones en la altura piezométrica causadas por el cierre repentino

de la válvula aguas abajo que, en un primer instante, provoca un aumento de la presión. Posteriormente, las ondas comienzan a propagarse por la tubería con velocidad a , originando oscilaciones en la presión y en el sentido de la velocidad. Los datos experimentales (en azul en la Figura 4.2) muestran, para ambas sondas, una atenuación de las ondas a causa de la fricción con las paredes. La simulación de un caso sin fricción (o con una fricción no modelada correctamente) no es capaz de recoger esta atenuación[11]. En este trabajo, la implementación de modelos detallados para el factor de fricción, f (ver Anexo A), permite la reproducción de este fenómeno, como se observa en la Figura 4.2, donde los datos simulados (en morado) se comportan del mismo modo que los medidos.

4.2. Caso test 2: Instalación solar teórica

Para validar la utilidad y la credibilidad de los resultados del modelo desarrollado, la empresa Abora Energy S.L.² ha propuesto una instalación solar teórica con unos requisitos de diseño en términos de caudal circulando por las líneas, de pérdidas de presión, etc. predefinidos. El esquema de la instalación proporcionado puede verse en la Figura 4.3.

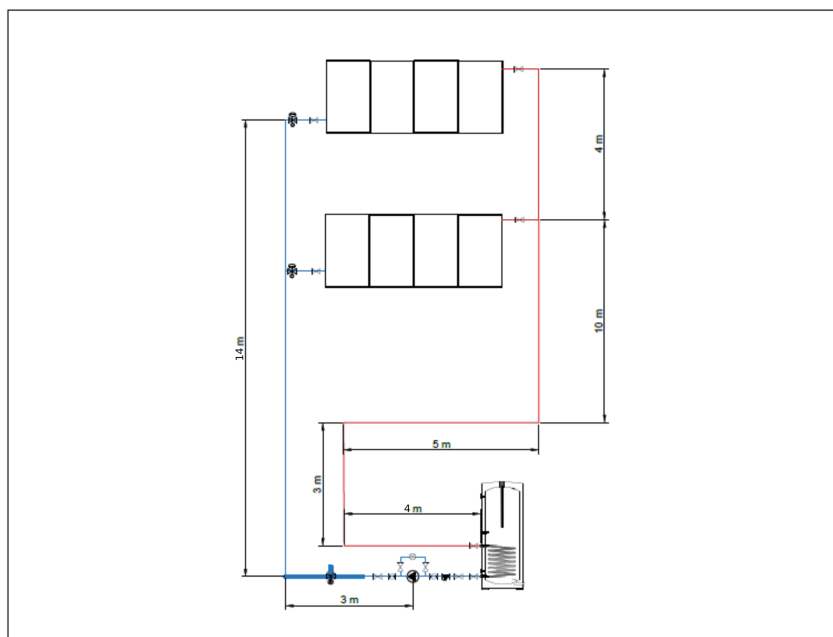


Figura 4.3: Esquema de la instalación experimental del caso test 1.

La instalación consta de 8 paneles solares distribuidos en dos bancadas en paralelo. Por cada panel se requiere que circulen 50 l/h para conseguir una producción térmica de-

²<http://abora-solar.com/>

terminada. Se proporciona información de las dimensiones y características de cada una de las tuberías (longitud, diámetro, espesor, rugosidad y material) y de la posición de las válvulas de equilibrado y de estrangulación que se encuentran en la instalación. Por último, se especifican las características técnicas del panel tanto en términos de rendimiento térmico como de pérdida de carga³, que se recogen en la Tabla 4.3. Toda la instalación se encuentra en cota $z=0$ m.

Pre-proceso

La Figura 4.4 muestra la malla de cálculo creada para este caso marcando las posiciones donde existen componentes modeladas como condición de contorno interna (CCI). El símbolo circular representa la bomba, el triangular representa válvulas y los cuadrados los captadores solares. Todas las componentes que introducen pérdidas de carga alrededor de la bomba, como llaves, antivibratorios, filtros, etc., han sido introducidos en la válvula cercana a la bomba. Por otro lado, en las bancadas de colectores, se ha introducido una válvula de equilibrado que asegure que la pérdida de carga es la misma en ambas bancadas.

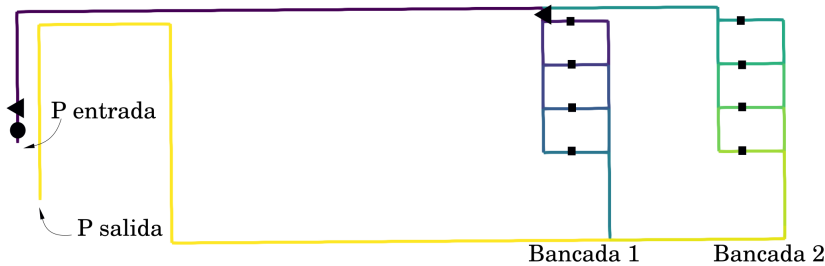


Figura 4.4: Esquema de la instalación experimental del caso test 2.

La Figura 4.5 muestra la geometría de la instalación introducida en el modelo representando en escala de colores diferentes características de las tuberías. Puesto que los colectores solares se modelizan como componentes puntuales en la instalación (ver Anexo A), es necesario introducir tramos de tubería que transporten el fluido haciendo que circule por el panel solar sin restarle energía. Por ello, se observa en las imágenes (a) y (c) de la Figura 4.5 que los tramos de los colectores tienen tanto fricción como transmitancia térmica nula. Por otro lado, los diámetros han sido adaptados para asegurar que circula el mismo caudal por todos los dispositivos de captación solar, como se observa en la imagen (b) de la mencionada figura. Se ha escogido una discretización espacial de $\Delta x = 0,1$ m.

Los datos de diseño proporcionados se han calculado para un estado estacionario. Por

³<http://abora-solar.com/wp-content/uploads/2017/11/FT-AH-60.pdf>

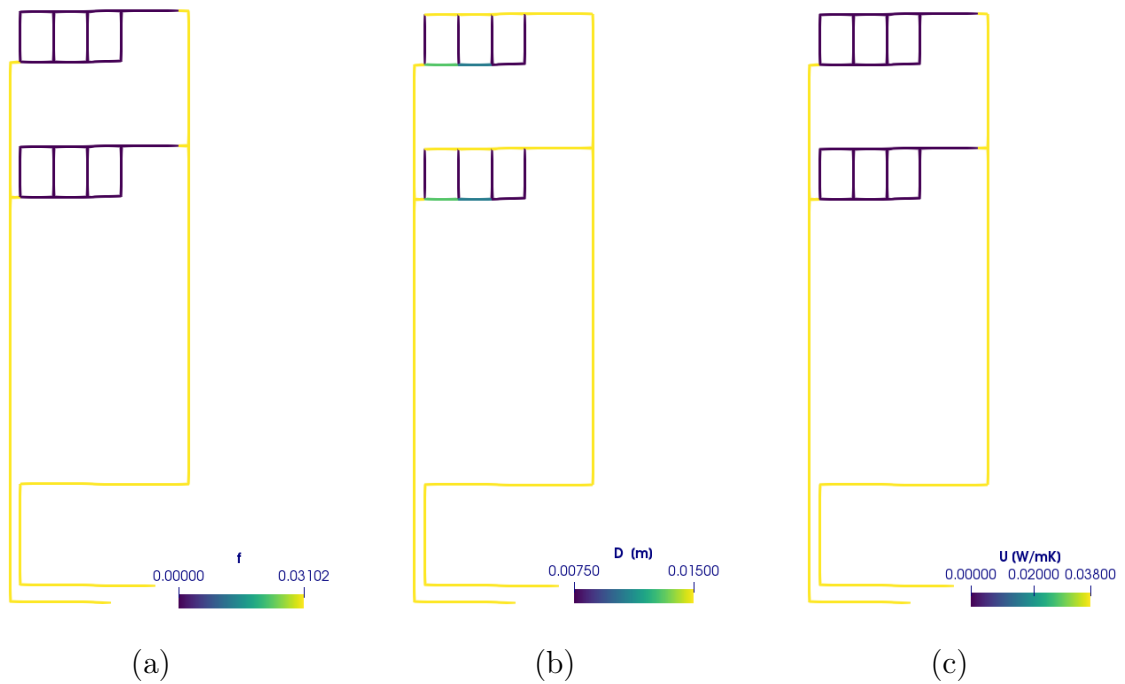


Figura 4.5: Geometría de la instalación modelizada escalada con distintas características: coeficiente de fricción, f (a), diámetro interior, D (b) y coeficiente de transmisión térmica, U (c).

ello, se parte de una instalación apagada como condición inicial hasta que se alcanza el estacionario deseado, en el que se realizan las comparaciones. La presión a la entrada y la salida es fija (representadas en la Figura 4.4), siendo la diferencia entre estas únicamente la pérdida de carga en el intercambiador de serpentín, que se encuentra dentro del acumulador (ver Figura 4.3). Los datos concretos de condiciones de contorno e iniciales pueden consultarse en la Tabla 4.1. El fluido que circula por el interior es agua con una densidad de 983 kg/m^3 y un calor específico de 4.18 kJ/kgK .

Cálculo

Condiciones de contorno	
Presión de entrada	2.3 bar (cte.)
Presión de salida	2.1 bar (cte.)
T^a de entrada	15 °C (cte.)
Condiciones iniciales	
P_0	2.3 bar
u_0	0 m/s
T_0	15 °C

Tabla 4.1: Datos de condiciones de contorno e iniciales para la simulación de la instalación teórica.

La simulación dura un total de 75 s con el propósito de asegurar que se ha alcanzado el estado estacionario al final de la misma. Como se explica en el capítulo 2, la velocidad de propagación de las ondas de presión, a , es muy elevada, de manera que los transitorios de la parte hidrodinámica son rápidos. La temperatura, que se transporta con la velocidad del fluido (ver ecuación (2.25)) tarda más tiempo en adoptar una distribución espacial que se mantenga en el tiempo y el estado estacionario no se alcanza hasta el final de la simulación.

La Figura 4.6 muestra datos de la evolución de la altura de presión en la instalación durante el primer segundo de simulación. Se observan las oscilaciones provocadas por la activación de la bomba sobre la instalación parada ($u=0$ m/s). En la parte superior derecha de cada imagen puede verse el tiempo al que corresponde, mientras que en la parte inferior de cada una se muestra la escala de la altura, que se ajusta en cada momento para ver las oscilaciones. Del mismo modo que en el caso test 1 se observa que, ante la repentina activación de la bomba, se produce un pico de presión que llega hasta 88.49 m en $t=0.011$ s. Para $t=0.002$, este pico ya se está propagando en forma de oscilaciones más atenuadas (hasta 77.44 mca). Posteriormente, en el instante $t=0.011$ la onda de presión ha llegado a los colectores mientras que después, para el instante $t=0.014$ s, ésta se propaga de nuevo hacia atrás. De esta manera la presión en la instalación oscila hasta que, para $t=0.230$ s ya se ha alcanzado el estado estacionario.

Post-proceso

Las Figuras 4.7-4.10 muestran la distribución espacial en la malla de distintas variables para un tiempo determinado en el que ya se ha alcanzado el estado estacionario. En concreto, la Figura 4.7(a) muestra la distribución de altura piezométrica en toda la instalación. Se observa el salto que impone la bomba hasta 26.34 m.c.a. para luego caer en la válvula colocada más aguas abajo que representa las pérdidas de los distintos elementos singulares que hay alrededor de la bomba (ver Figura 4.4). Con el propósito de ver en detalle otras pérdidas de presión que se producen en la instalación, se muestran las imágenes (b) y (c) de la misma Figura. En la imagen 4.7(b) puede verse el gradiente de presión representado en una escala de colores más ajustada (de 23.61 m.c.a a 23.70 m.c.a.) en la zona de los colectores solares, de manera que se aprecia claramente el efecto de la válvula de equilibrado. La imagen 4.7(c) muestra un detalle de la zona de la bomba, donde se distinguen las variaciones de presión debido a los distintos componentes que se hay modelados en ese tramo.

Las Figuras 4.8 y 4.9 muestran las distribuciones de velocidad y caudal volumétrico, respectivamente, para el tiempo final de la simulación. Estos caudales son caudales de

4.2. CASO TEST 2: INSTALACIÓN SOLAR TEÓRICA

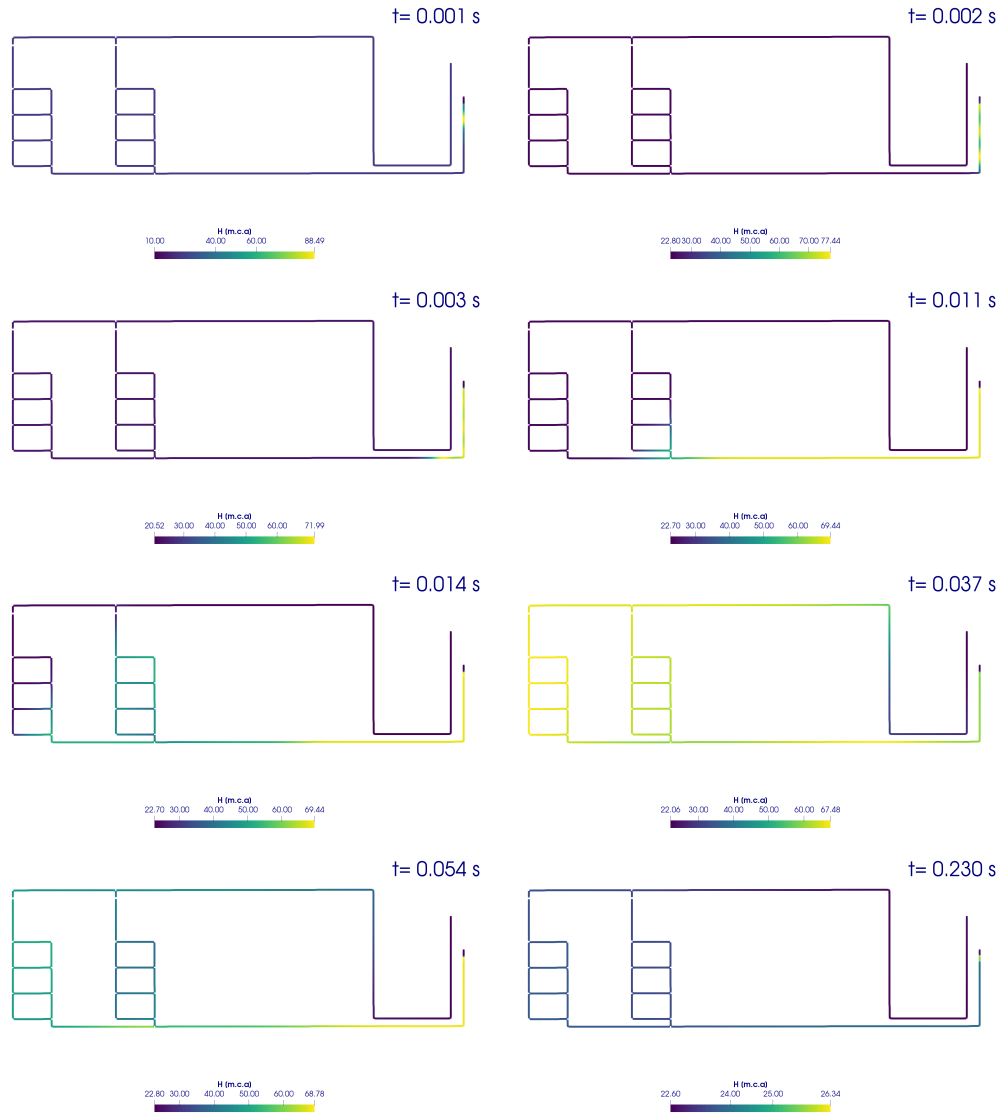
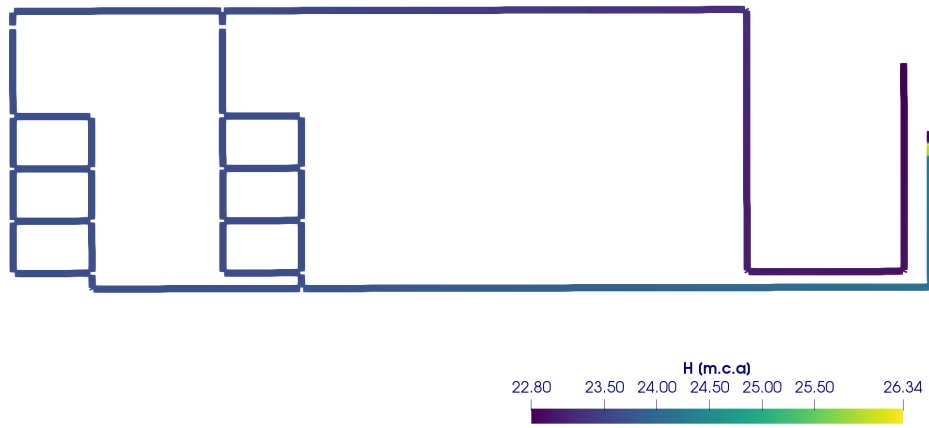
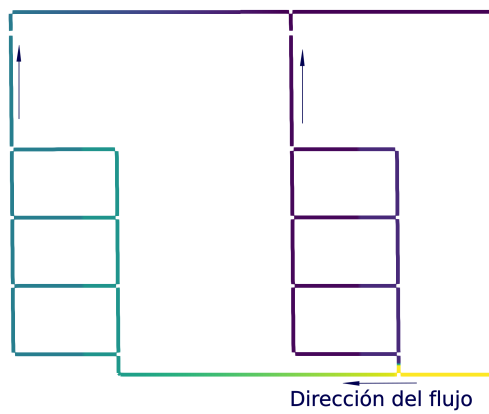


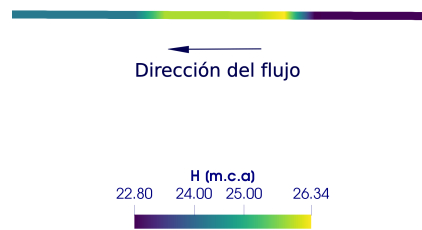
Figura 4.6: Distribución espacial de la altura de presión, H [m.c.a.], para $t=0.001, 0.002, 0.003, 0.011, 0.014, 0.037, 0.054$ y 0.23 s.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.7: Distribución espacial de la altura piezométrica, H [m], para $t=75$ s en las instalación general (arriba) y detalles escalados (b) y (c).

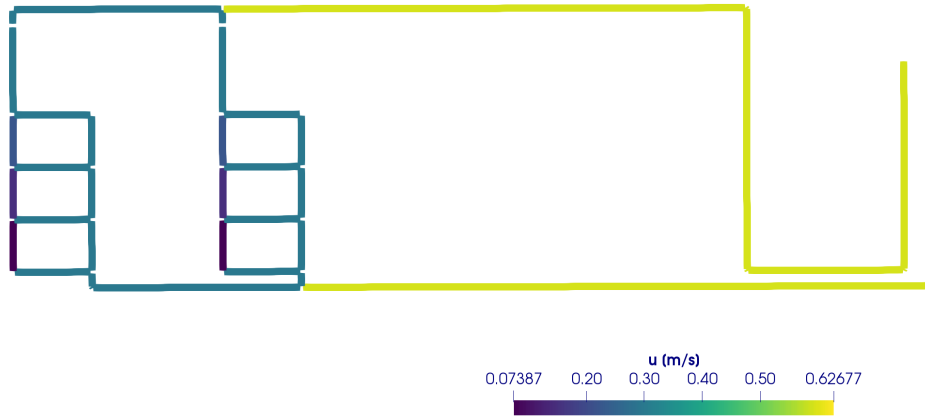


Figura 4.8: Distribución espacial de la velocidad, u [m/s], para $t = 75$ s.

diseño que se consiguen gracias al ajuste entre la curva de pérdidas de la instalación y la curva de bomba. En la Figura 4.9 se observa que, por cada línea de colector, fluye el mismo caudal asegurando la misma producción térmica. Concretamente, cada línea de captador se diseña para que circulen por ella 50 L/h, es decir, $1.38 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. En este caso, el simulador es capaz de conseguir un valor de $1.3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

La Figura 4.10 muestra la evolución temporal de la distribución de temperatura, en $^{\circ}\text{C}$, en la instalación. Como ya se ha explicado, la propagación transitoria de esta variable se realiza mucho más lentamente que las otras, ya que depende de la u del flujo. Este hecho se observa en dicha figura donde hasta los 75 s la temperatura de salida de los colectores no se propaga hasta el final de la instalación.

La discretización espacial proporciona (prácticamente) en cada instante de tiempo el valor de las variables en cada celda de la instalación. En particular, es posible observar el gradiente de presión que existen entre dos puntos cualesquiera del dominio de cálculo, permitiendo llevar a cabo una comparación entre las caídas de presión estimadas por Abora Energy S. L. y el modelo, que se muestra en la la Tabla 4.2. Del mismo modo, es posible obtener el valor exacto de caudal y velocidad que circula por la bomba y por los colectores.

Dadas unas características del captador solar, la producción térmica en estado estacionario y con radiación constante se puede calcular de forma teórica a través de las ecuaciones (2.9) y (2.10). De este modo, para las características del colector mostradas en la Tabla 4.3, y una radiación teórica de $1000 \text{ W}/\text{m}^2$, se calcula el salto térmico:

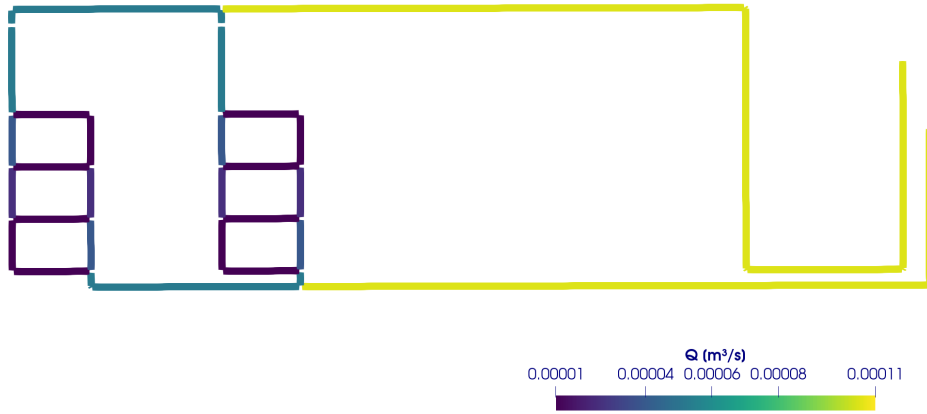


Figura 4.9: Distribución espacial del caudal volumétrico, Q [m^3/s], para $t = 75$ s.

	Teórico	Simulado	Error (%)	Error
Δh_{imp} [m]	0.545	0.53218	2.3	0.023
Δh_{imp} [m]	0.808	0.80839	-0.048	-0.00048
$u_{IMP/RET}$ [m/s]	0.6288	0.591011	6.3	0.063
$Q_{IMP/RET}$ [m^3/s]	$1.11 \cdot 10^{-4}$	$1.04 \cdot 10^{-4}$	5.4	0.054
Q_{COLEC} [m^3/s]	$1.38 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-5}$	5.7	0.057

Tabla 4.2: Datos técnicos del colector colocado en la instalación teórica.

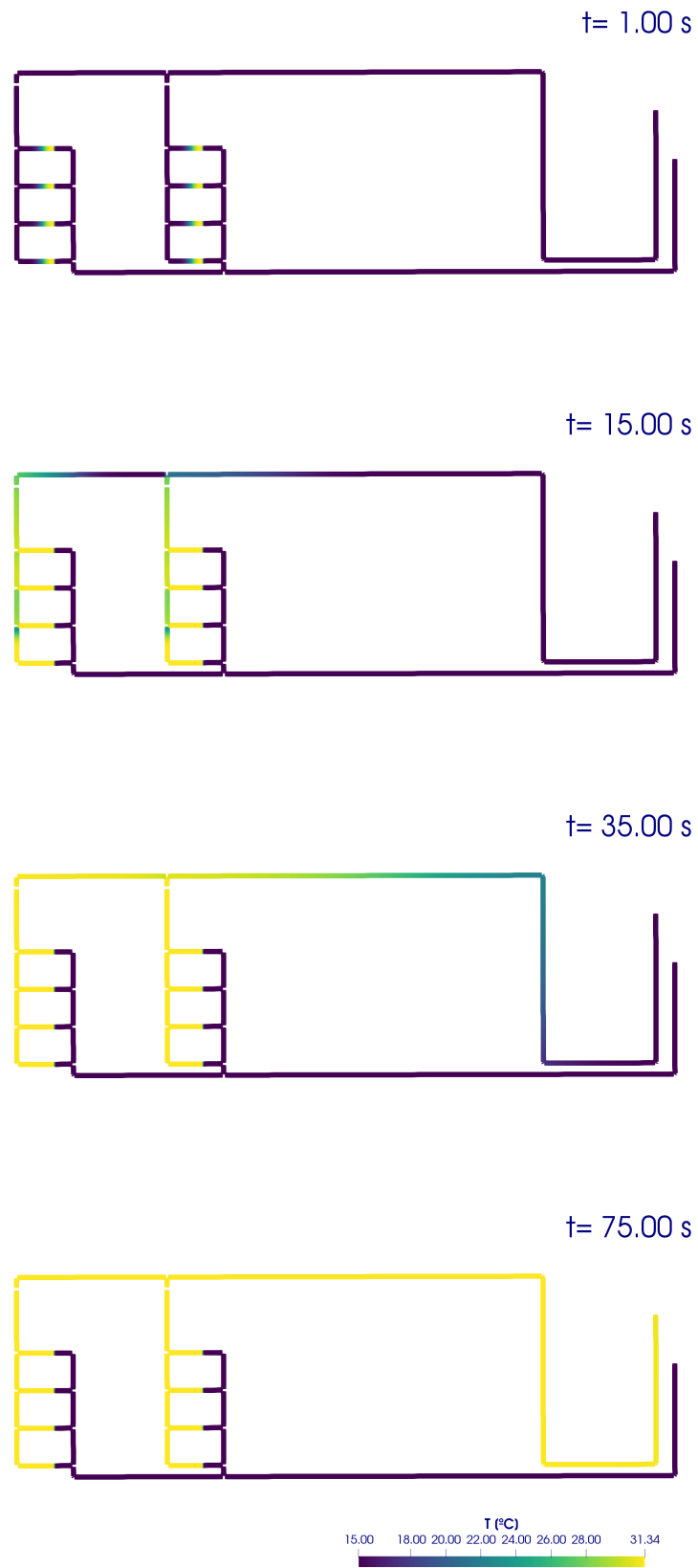


Figura 4.10: Distribución espacial de la temperatura, T [$^{\circ}\text{C}$], para $t=1$, 12, 35 y 75 s.

Especificaciones térmicas de los captadores	
η_0	0.59
a_1 [W/m ² K]	3.3
a_2 [W/m ² K ²]	0.018
A_{ap} [m ²]	1.57

Tabla 4.3: Datos técnicos del colector colocado en la instalación teórica.

T_{teor} [°C]	T_{sim} [°C]	Error [%]
30.6426	31.3383	-2.27

Tabla 4.4: Comparación entre temperatura alcanzada a la salida de los colectores teórica y simulada.

$$\Delta T = \frac{\eta A_C I_s}{\dot{m}_f c_p} \quad (4.1)$$

Asumiendo una T de entrada de 15 °C, y calculando un rendimiento según (2.11) de 0.580546, se obtiene una temperatura de salida del colector, T_2 que se expone en la Tabla 4.4 junto con la calculada por el modelo.

El diseño real de instalaciones solares se centra en transitorios de temperatura para obtener resultados de producción térmica. Para ello, programas de cálculo como TRNSYS⁴ permiten la introducción de curvas de radiación y de temperatura de entrada, de manera que se puede estimar una producción térmica a lo largo de intervalos de tiempo más amplios en los cuales la radiación no se mantiene constante. Para la validación del transitorio térmico del modelo desarrollado, se ha configurado la misma instalación teórica en el mencionado *software* comercial y se han comparado resultados. En concreto, se han simulado 52 horas durante las cuales la radiación sigue una curva que se muestra en la Figura 4.11(a). Dicha curva corresponde con la radiación media para la ciudad de Zaragoza de la hora 4000 a la 4042 del año. Además, la Figura 4.12 muestra la temperatura de entrada a la instalación y la ambiente, que también varían temporalmente. Por último, si bien la instalación pretende trabajar en estacionario hidrodinámico, se producen intervalos de apagado de la bomba que establecen caudal nulo entre las 7 y las 17 horas, como se observa en la gráfica mostrada en la Figura 4.11(b), en función de la radiación incidente.

Con estas condiciones de entrada y la geometría ya presentada en la Figura 4.5, se realiza la simulación en ambos modelos. Para comparar, se establecen distintos puntos de medida debido a la simplificación del modelo de TRNSYS, expuesta en la Figura 4.13. Es importante recalcar que en TRNSYS se representa el campo de colectores como un único

⁴<http://www.trnsys.com/>

4.2. CASO TEST 2: INSTALACIÓN SOLAR TEÓRICA

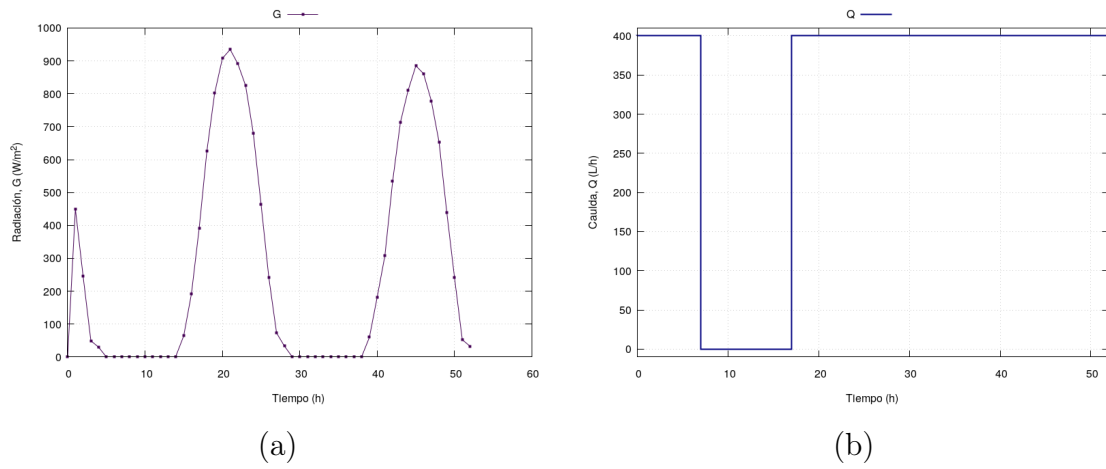


Figura 4.11: Curva de radiación introducida en la simulación (a) en TRNSYS y en el modelo desarrollado, G [W/m^2] y curva de caudal de funcionamiento de la bomba, Q [m^3/s], (b).

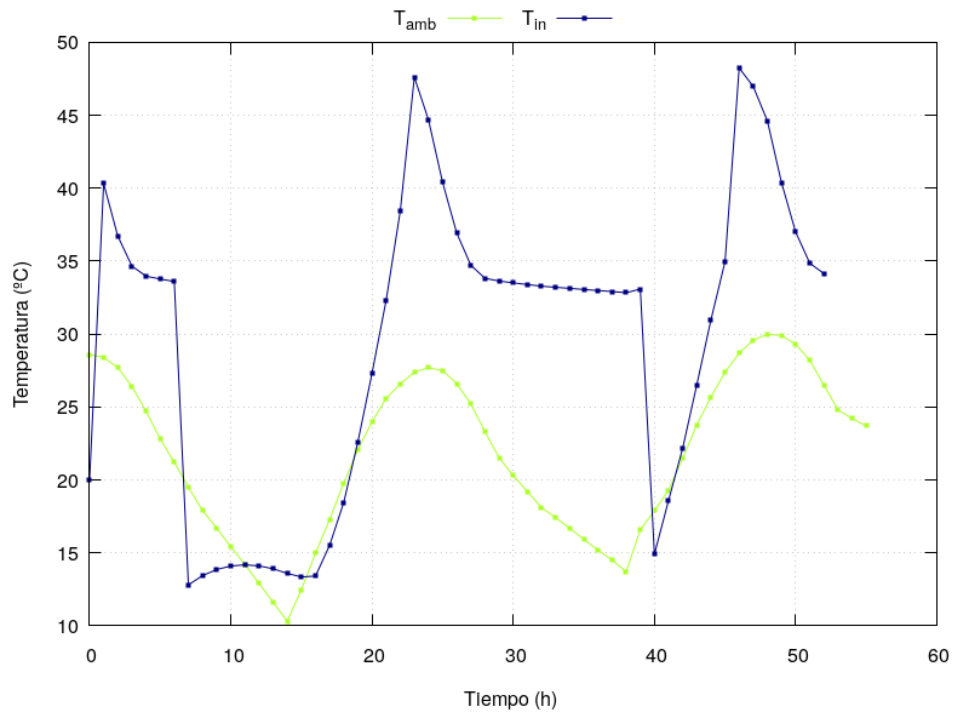


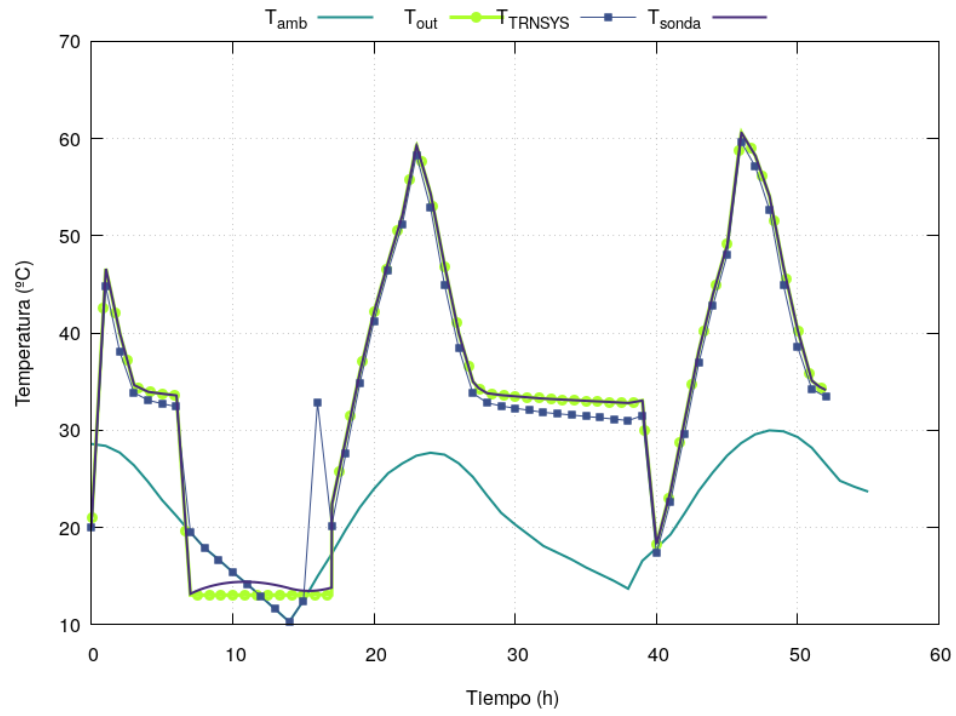
Figura 4.12: Curvas de temperatura de entrada y ambiente introducidas en la simulación en TRNSYS y en el modelo desarrollado, en $^{\circ}\text{C}$.

captador equivalente de manera que proporciona la salida del mismo como la del campo de colectores (T_{TRNSYS} en la Figura nombrada). El modelo aquí desarrollado representa las líneas de colectores, por lo que se representan dos temperaturas: la salida directa de un colector (que ha de coincidir con la del resto), T_{out} , y la evolución de temperatura medida en una sonda colocada justo en la confluencia entre las dos bancadas, T_{sonda} .

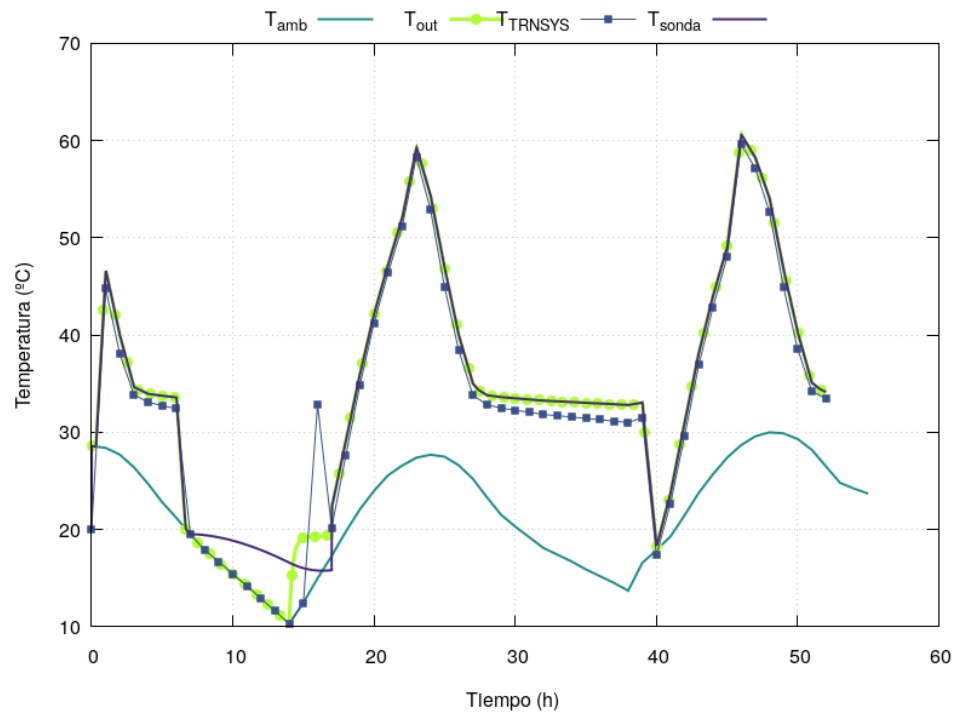
En primer lugar, se simulan los resultados expuestos en la imagen (a) de la Figura 4.13. Los resultados muestran una concordancia alta durante prácticamente todo el tiempo de simulación. Sin embargo, merece la pena destacar que existen diferencias entre las horas 7 y 17, coincidiendo con dos fenómenos que ocurren en la instalación: el apagado de la bomba y la imposición de una radiación nula. Parece intuirse que, en estos casos particulares, el modelo de TRNSYS renuncia a realizar los cálculos e impone temperatura ambiente. Ante este hecho, se implementa esa misma restricción en el código del trabajo con el propósito de comprender los resultados obtenidos. La imagen (b) de la misma Figura muestra los resultados tras este cambio. En dicha imagen se observa que, si bien la sonda no sigue la temperatura ambiente debido al transporte de las tuberías que ya se encontraban con altas temperaturas, sí lo hace la temperatura de salida de los colectores.

Por último, es importante notar el pico de temperatura registrado por el modelo de TRNSYS a las 15 horas, que coincide con un aumento en la radiación (que hasta entonces era nula) y un estado de la bomba todavía apagado. Se trata de un pico “artificial” que el modelo de simulación propuesto no reproduce demostrándose en este aspecto más robusto que el programa TRNSYS.

4.2. CASO TEST 2: INSTALACIÓN SOLAR TEÓRICA



(a)



(b)

Figura 4.13: Curvas de temperatura de salida proporcionadas por TRNSYS y el modelo del trabajo, en °C, para los dos procedimientos implementados.

Capítulo 5

Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas tras el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster: *Implementación de un modelo de cálculo para la simulación numérica del flujo en una instalación solar térmica*.

Analizando el objetivo principal de trabajo, se realiza a continuación una revisión de las tareas cumplidas. Principalmente, se pretendía realizar un análisis físico y matemático de los fenómenos que suceden en una instalación solar para su posterior utilización en el desarrollo de un modelo de cálculo. En primer lugar, las ecuaciones han sido analizadas, la influencia de cada término ha sido considerada y se han adoptado las hipótesis necesarias tras una revisión bibliográfica. Posteriormente, se ha escogido un modelo matemático que pudiese resolver el problema adecuadamente otorgando resultados fiables y robustos. Finalmente, se ha programado un algoritmo de cálculo que, además de resolver las ecuaciones, consta de toda una serie de funciones de lectura, procesado y volcado de datos que han conformado una herramienta completa para la simulación de instalaciones solares térmicas.

En el desarrollo de dichas tareas se han encontrado algunas dificultades cuya mención se considera importante. En primer lugar, las instalaciones solares térmicas, en términos de simulación, se analizan habitualmente centrándose o bien en la parte térmica y de producción o bien en la parte hidráulica, normalmente con análisis estacionarios. Por esta razón, la bibliografía se ha encontrado muy dispersa tanto para la construcción del modelo como para su validación. Y, por tanto, el modelo se ha validado de manera desacoplada: por un lado, con trabajos centrados en la hidrodinámica de flujos transitorios y, por otro, con programas comerciales centrados en la parte térmica.

En el presente trabajo, se ha implementado un programa en lenguaje C que es capaz de reproducir el flujo que circula en una instalación térmica. El *software* permite la introducción de cualquier geometría permitiendo simular desde una simple tubería recta entre

dos depósitos, como se ve en el caso test 1 (ver capítulo 4), hasta geometrías que incluyen confluencias entre varias tuberías, conformando varias bancadas, como se ve en el caso test 2 del mismo capítulo. Además, se han implementado toda una serie de componentes que, a través de la utilización de ecuaciones adicionales, modelan el paso del flujo por distintos dispositivos que suelen encontrarse en una instalación de estas características. De este modo, el modelo permite la representación de una instalación, facilitando la realización de análisis de sensibilidades y de influencia de cambios, proporcionando resultados en detalle. Adicionalmente, puesto que se ha implementado un esquema numérico que resuelve las ecuaciones para flujo transitorio, se han introducido varios modelos de fricción (ver Anexo A) para la correcta representación de los fenómenos de pérdida de energía en flujos no estacionarios.

Para su validación, se han llevado a cabo las simulaciones de varios casos test pretendiendo cubrir todos los tipos de resultados que el modelo es capaz de proporcionar. En el caso 1, se ha validado el correcto funcionamiento del modelo de fricción y de la resolución de las ecuaciones. El modelo reproduce correctamente tanto el periodo de tránsito de las ondas de presión que se transportan como la amplitud de las mismas, que se atenúa gracias a la implementación de un modelo de fricción detallado. Al haber simulado y comparado un caso tan transitorio como el de la reproducción del golpe de ariete, queda validada la parte hidrodinámica y el modelo de fricción. Este caso se complementa con el caso 2, donde se compara el cómputo de las pérdidas en la aspiración y la impulsión en estado estacionario. A su vez, la producción térmica se ha validado también en estado estacionario a través de la expresión teórica.

Además, también se valida el transitorio térmico a través de la modelización de un caso al que se le introducen radiación, temperatura de entrada y temperatura ambiente variables. Los resultados han sido comparados con un modelo comercial obteniendo, no sólo una buena aproximación de los resultados, sino una mejora de los valores obtenidos en situaciones especiales, en las que el caudal y la radiación son nulos.

Una vez el modelo ha sido validado, se puede concluir que se ha implementado una herramienta de simulación que, para una geometría dada, resulta práctica para el análisis tanto de pérdidas de carga como de producción térmica. Los resultados que proporciona permiten observar los efectos que producirían en el funcionamiento de una instalación la introducción o extracción de componentes, el efecto que tendría sobre los caudales la colocación de una bomba real en comparación con la de diseño, las variaciones en la fricción de las tuberías e incluso la evolución temporal de cambios repentinos durante el funcionamiento. En definitiva, se ha conformado un modelo que permite hacer análisis de

sensibilidad ante cambios reales.

Por último, resulta interesante anticipar una revisión del trabajo futuro que puede realizarse partiendo de este desarrollo. En primer lugar, la practicidad de la herramienta se ve mermada por la manera en la que la geometría se introduce. Si bien se hace detalladamente para dotarla de la máxima flexibilidad, la introducción por nodos de la instalación puede resultar tediosa en instalaciones de gran tamaño. Por otro lado, el modelo ha sido validado con casos de bibliografía, teóricos o en comparación con otros *software*. Sin embargo, la aplicación a un caso real y la posterior comparación con datos medidos en una instalación es una tarea que añadiría valor y veracidad a la herramienta. Dicha tarea ha intentado llevarse a cabo sin éxito debido a la falta de datos en sistemas que ya están instalados, quedando pendiente su validación para bancadas de diseño que se encuentren instaladas para experimentación.

Bibliografía

- [1] A. Bayod. *Sistemas fotovoltaicos*. Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2009.
- [2] A. Bergant y A. R. Simpson. *Water hammer and column separation measurements in an experimental apparatus*. Dept. of Civil and Environmental Engrg., University of Adelaide, Adelaide, Australia., 1995.
- [3] A. Martínez Gracia y A. del Amo Sancho. *Instalaciones solares térmicas de baja temperatura*. Prensas de la Universidad de Zaragoza. 2016.
- [4] L. M. Jiji. *Heat Convection*. Springer, 2006.
- [5] W. L. Daily W. L. Hankey R. W. Olive J.M. Jordaan. Resistance coefficients for accelerated and decelerated flows through smooth tubes and orifices. *Transactions of ASME*, 78:1071–1077, 1956.
- [6] R.J. LeVeque. *Numerical Methods for Conservation Laws*. Lectures in Mathematics. ETH Zürich. Birkhäuser Basel, 1992.
- [7] M. S. Ghidaoui M. Zhao D. A. McInnis y D. H. Axworthy. A review of water hammer theory and practice. *Applied Mechanichs Reviews*, 58(1):49–76, 2005.
- [8] M. Morales-Hernández. *Efficient explicit finite volume schemes for the shallow water equations with solute transport*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza, 2014.
- [9] Consejo de la Unión Europea Parlamento Europeo. Directiva 2009/28/ce del parlamento europeo y del consejo relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. 2009.
- [10] M. Sen. *Analytical Heat Transfer*. Number 2339 in Intermediate Heat Transfer Lecture Notes. University of Notre Dame. 2017.
- [11] A. Bergant A. R. Simpson y J. Vtkovsk. Developments in unsteady pipe flow friction modelling. *Journal of Hydraulic Research*, 39(3):249–257, 2001.

Apéndice A

Método numérico

A.1. Resolución del sistema de ecuaciones: esquema numérico

Para resolver las ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento del flujo (ecuaciones (2.23), (2.24) y (2.25)) es necesario discretizar el dominio en celdas y obtener, mediante un esquema numérico, los valores que toman las variables del problema en cada paso de tiempo (Δt). Para el presente trabajo se escoge un esquema en volúmenes finitos descentrado y explícito.

El sistema de ecuaciones que contiene las leyes de conservación se puede representar de forma compacta de un modo matricial:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{J} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} = \mathbf{S}(\mathbf{U}) \quad (\text{A.1})$$

donde \mathbf{U} representa el vector de variables conservadas, es decir, altura piezométrica H , velocidad u , y temperatura, T , y \mathbf{J} es la matriz que caracteriza el flujo de esas variables. Y, por último, \mathbf{S} contiene los términos fuente que actúan como sumideros o generadores de la cantidad de movimiento que provienen de las pérdidas por fricción y variaciones en la cota de la instalación. La ecuación (2.25) también tiene términos fuente de temperatura que actúan como generadores o sumideros de esta variable. Sin embargo, estos términos van a ser tratados de un modo centrado de manera que, para la discretización *upwind* que aquí se realiza, no son incluídos en el vector \mathbf{S}

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} H \\ u \\ T \end{pmatrix}, \quad \mathbf{J} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{a^2}{g} & 0 \\ g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & u \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\left[f \frac{u^2}{2D} + g \sin \alpha\right] \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

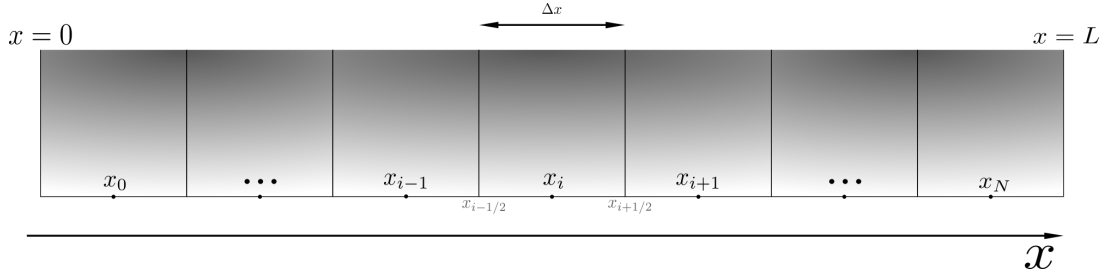


Figura A.1: Representación de la discretización del dominio en celdas de anchura Δx

La matriz \mathbf{J} se puede digonalizar a través de la matriz \mathbf{P} , compuesta por los vectores propios del sistema, \mathbf{e}^m ($m=1,2,3$)

$$\mathbf{J} = \mathbf{P}\mathbf{\Lambda}\mathbf{P}^{-1} \quad \mathbf{P} = \begin{pmatrix} \mathbf{e}^1 & \mathbf{e}^2 & \mathbf{e}^3 \end{pmatrix} \quad (\text{A.3})$$

de donde resulta la matriz $\mathbf{\Lambda}$ que, siendo diagonal, contiene los valores propios del sistema λ^m :

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{pmatrix} \lambda^1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda^3 \end{pmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Para el presente sistema de ecuaciones se obtiene:

$$\lambda^1 = a \quad \lambda^2 = -a \quad \lambda^3 = u \quad (\text{A.5})$$

donde a es la velocidad de propagación de las ondas en la tubería, calculada según la ecuación (2.20), y u la propia velocidad del flujo. La matriz \mathbf{P} y los vectores propios que definen el problema son:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ g/a & -g/a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{e}^1 = \begin{pmatrix} 1 \\ g/a \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{e}^2 = \begin{pmatrix} 1 \\ -g/a \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{e}^3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.6})$$

En cada pared $i + 1/2$, situada entre las celdas i e $i + 1$, se linealiza la ecuación (A.1) para obtener valores aproximados linealizados localmente en las paredes de los valores y vectores propios del sistema de manera que se cumple que

$$\tilde{\mathbf{J}}_{i+1/2} = \tilde{\mathbf{P}}_{i+1/2} \tilde{\mathbf{\Lambda}}_{i+1/2} \tilde{\mathbf{P}}_{i+1/2}^{-1} \quad (\text{A.7})$$

Escribiendo la ecuación (A.1) en cada celda de cálculo i , asumiendo discretizaciones temporales y espaciales de primer orden explícitas, además de una discretización espacial descentrada (upwind) de flujos y términos fuente, el sistema puede escribirse:

$$\frac{\Delta \mathbf{U}}{\Delta t} + \frac{(\tilde{\mathbf{J}}^+ \delta \mathbf{U})_{i-1/2}^n + (\tilde{\mathbf{J}}^- \delta \mathbf{U})_{i+1/2}^n}{\Delta x} = \tilde{\mathbf{S}}_{i-1/2}^{n,+} + \tilde{\mathbf{S}}_{i+1/2}^{n,-} \quad (\text{A.8})$$

donde $\Delta \mathbf{U} = \mathbf{U}_i^{n+1} - \mathbf{U}_i^n$, $\delta \mathbf{U}_{i+1/2} = \mathbf{U}_{i+1} - \mathbf{U}_i$ y Δt y Δx representan los pasos temporales y espaciales respectivamente. La discretización upwind (superíndices \pm) permite discriminar el signo de propagación de la información:

$$\tilde{\mathbf{J}}_{i+1/2}^{\pm} = \frac{\tilde{\mathbf{J}}_{i+1/2} \pm |\tilde{\mathbf{J}}_{i+1/2}|}{2} \quad \tilde{\mathbf{S}}_{i+1/2}^{\pm} = \frac{\tilde{\mathbf{S}}_{i+1/2} \pm |\tilde{\mathbf{S}}_{i+1/2}|}{2} \quad (\text{A.9})$$

Sustituyendo (A.7) en la ecuación (A.8), multiplicando el término fuente, $\tilde{\mathbf{S}}$, por la matriz identidad y reordenando queda

$$\frac{\Delta \mathbf{U}}{\Delta t} + \frac{\left[\tilde{\mathbf{P}} \tilde{\mathbf{\Lambda}}^+ \left(\tilde{\mathbf{A}} - \frac{\tilde{\mathbf{B}}}{\tilde{\mathbf{\Lambda}}} \right) \right]_{i-1/2}^n + \left[\tilde{\mathbf{P}} \tilde{\mathbf{\Lambda}}^- \left(\tilde{\mathbf{A}} - \frac{\tilde{\mathbf{B}}}{\tilde{\mathbf{\Lambda}}} \right) \right]_{i+1/2}^n}{\Delta x} \quad (\text{A.10})$$

siendo

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} \alpha^1 \\ \alpha^2 \\ \alpha^3 \end{pmatrix} = \tilde{\mathbf{P}}^{-1} \delta \mathbf{U}; \quad \tilde{\mathbf{B}} = \begin{pmatrix} \beta^1 \\ \beta^2 \\ \beta^3 \end{pmatrix} = \tilde{\mathbf{P}}^{-1} \tilde{\mathbf{S}} \quad (\text{A.11})$$

Por lo tanto, despejando las variables en el nuevo paso de tiempo en la ecuación (A.10) se llega a:

$$\mathbf{U}_i^{n+1} = \mathbf{U}_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\left(\sum_{m=1}^2 \tilde{\lambda}^+ \tilde{\gamma} \tilde{\mathbf{e}} \right)_{i-1/2}^m + \left(\sum_{m=1}^2 \tilde{\lambda}^- \tilde{\gamma} \tilde{\mathbf{e}} \right)_{i+1/2}^m \right]^n \quad (\text{A.12})$$

donde $\tilde{\gamma}_{i+1/2}^m = \left(\tilde{\alpha} - \frac{\tilde{\beta}}{\tilde{\lambda}} \right)_{i+1/2}^m$. El significado de la expresión (A.12) es simple: las variables conservadas de la celda i se actualizan cada paso de tiempo hasta su valor en el instante siguiente $n+1$ dependiendo del valor que tenían en el instante anterior, n , y de las contribuciones de las paredes izquierda y derecha, conteniendo información del estado de las celdas colindantes a la misma, como se representa en la Figura A.2.

Finalmente, Δt es el paso de tiempo que se calcula dinámicamente siguiendo

$$\Delta t = \text{CFL} \min_{i,m} \left(\frac{\Delta x}{|\tilde{\lambda}_{i+1/2}^m|^n} \right) \quad (\text{A.13})$$

donde el coeficiente CFL es el número de *Courant-Friedrich-Lewy*, una constante cuyo valor está entre 0 y 1 y asegura la estabilidad del método numérico [6, 8]. Con todo ello, el esquema numérico avanza tanto en el espacio, evaluando las variables hidrodinámicas H , u y T en todas las celdas, como el tiempo.

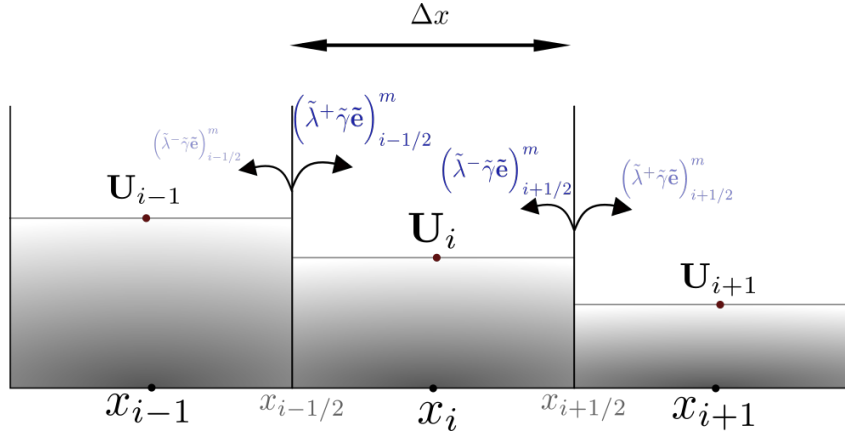


Figura A.2: Representación del transporte de la información en un esquema en ondas.

Del sistema de ecuaciones hidrodinámico (A.1) se ha llegado a la expresión de actualización de las variables conservadas en la celda (A.12), a través de un esquema que se denomina “de formulación en ondas”, donde se expresa la variación de \mathbf{U} como una función de su valor anterior y de unas contribuciones que provienen de las paredes de la propia celda aportando información sobre el estado de las vecinas. Esta manera de formular el esquema se representa como en la Figura A.2.

A.2. Modelos de fricción

El factor de fricción f presente en uno de los términos fuente de la ecuación (2.24) cobra especial relevancia a la hora de reproducir correctamente eventos transitorios[7]. En los modelos convencionales es común usar leyes de fricción que asumen que el cálculo usando la velocidad promedio en la sección en estacionario se puede extender al caso transitorio. Es el caso de la conocida ley de Darcy-Weisbach o la de Hazen-Williams[7], que utilizan un f constante. Sin embargo, otros estudios demostraron la dependencia de este factor f con la aceleración o deceleración del flujo[5] y añadieron correcciones empíricas a estas leyes. Modelos como el de Brunone[11] introducen las disipaciones de energía para reproducir correctamente la altura de presión en fenómenos transitorios.

En este trabajo, se han implementado dos leyes de fricción diferentes. En primer lugar, la clásica ley de Darcy-Weisbach se utiliza para las simulaciones de instalaciones que principalmente trabajan con estacionarios hidrodinámicos. En segundo lugar, una corrección del modelo de Brunone, propuesta por Vítkovský y detallada por A. Bergant[11], ha sido implementada para reproducir correctamente los casos de golpe de ariete (ver capítulo 4) siguiendo la ecuación (A.14) para el factor f .

$$f = f_q + \frac{kD}{u|u|} \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \text{asign}(u) \left| \frac{\partial u}{\partial x} \right| \right) \quad (\text{A.14})$$

donde $\text{sign}(u)$ denota el signo de la velocidad, u .

A.3. Condiciones de contorno

La naturaleza matemática del sistema de ecuaciones requiere de condiciones de contorno para completar la resolución del problema. Estas condiciones de contorno se aplican en los extremos físicos del dominio sobre las variables: presión o velocidad y temperatura. Dichas condiciones vendrán impuestas por los contornos reales del problema que se vaya a resolver e influyen en gran medida en la evolución posterior del flujo. Es decir, proporcionan información de cómo el flujo entra y sale de la instalación.

Cada una de las ecuaciones necesita una condición de contorno de manera que para el sistema hidrodinámico harán falta dos, una a la entrada y otra a la salida; y para el sistema térmico será necesaria una condición a la entrada. La razón reside en la formulación en ondas del esquema numérico (A.12). Cada celda interior de cálculo se actualiza con la información que le llegue de sus celdas vecinas izquierda y derecha.

Para este caso, dada la aplicación del modelo, la ecuaciones de masa y cantidad de movimiento se cerrarán imponiendo curvas de presión (variable o constante) que puedan representar el estado de las conexiones de entrada y salida del circuito primario. Para el sistema térmico es necesaria una condición de entrada que será siempre dada en forma de temperatura y representará las condiciones térmicas con las que el flujo entra en la instalación. En la Figura A.3 se representa un esquema simple de una hipotética instalación y los puntos en los que se aplicarían dichas condiciones de contorno de entrada y salida. La Figura A.4 representa la manera en la que la condición de contorno se impone en la celdas de los extremos del dominio, U_0 y U_N , representados en azul en dicha figura.

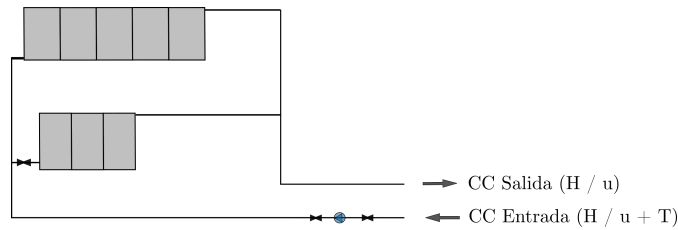


Figura A.3: Representación del transporte de la información en los contornos.

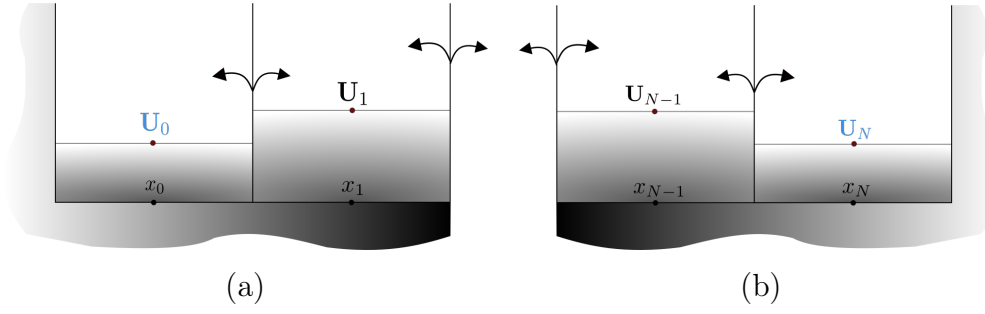


Figura A.4: Representación del transporte de la información en los contornos de entrada (a) y salida (b).

A.4. Condiciones de contorno internas

Los componentes de la instalación (válvulas, captadores y bombas) se modelan con las llamadas condiciones de contorno internas (CCI). Como indica la Figura A.5, las CCI anulan la información que atraviesa una pared para imponer directamente los valores en las celdas (en la Figura, las celdas i e $i + 1$). Para este trabajo, las ecuaciones calculan esos valores que se imponen en las celdas con las ecuaciones de las componentes que se han expuesto en el capítulo 2. Así, en el ejemplo de la Figura A.5, la temperatura se transportará entre la celda $i - 1$ e i de manera normal. Sin embargo, si la CCI entre las celdas i e $i + 1$ es un captador solar, la relación entre T_i y T_{i+1} no será el transporte habitual, sino el salto de temperatura que se haya calculado para un captador en unas condiciones determinadas del problema con la ecuación (2.12).

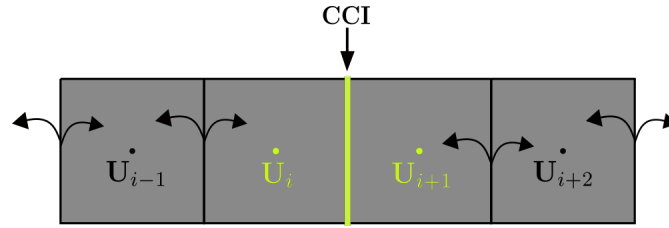


Figura A.5: Representación de la imposición exterior de una condición de contorno interna.

A.5. Confluencias

En la confluencia de dos o más tuberías es necesario establecer condiciones especiales que cierren el problema y aseguren la continuidad, quedando a criterio del diseñador el tratamiento de este tipo de situaciones. En este caso, se ha optado por la creación de una “celda de unión” (representada en color claro en la Figura A.6) que almacena la información que le llega y la reparte adecuadamente. Por tanto, es necesario establecer una

condición para cada una de las 3 variables que se resuelven.

En primer lugar, se impone la misma presión en todas las celdas vecinas de la celda unión. Para ello, se establece un promedio de todas las presiones de las celdas colindantes, P_j , ponderadas con el área, y posteriormente se impone en las celdas vecinas (en la Figura U_j se impone en las 3 celdas vecinas de la confluencia).

$$P_j = \frac{P_{N1}^n A_{N1} + P_{N2}^n A_{N2} + \dots + P_{Np}^n A_{Np}}{p A_{total}} \rightarrow P_{N1}^{n+1} = P_{N2}^{n+1} = \dots = P_{Np}^{n+1} = P_j \quad (A.15)$$

donde p representa el número total de tuberías que confluyen en la celda unión. Por otro lado, se impone continuidad de caudales para el cálculo de la velocidad en cada una de las celdas colindantes, siguiendo la ecuación (A.16):

$$\sum Q_{in} = \sum Q_{out} \rightarrow \sum u_{in} A_{in} = \sum u_{out} A_{out} \quad (A.16)$$

Por último, se asegura una continuidad en las ondas de temperatura a través de la imposición de la misma temperatura en todas las celdas que colindan con la celda de unión, de manera análoga a la presión. El tratamiento de las variables T y H en una confluencia se esquematiza en la Figura A.6.

$$T_j = \frac{T_{N1}^n A_{N1} + T_{N2}^n A_{N2} + \dots + T_{Np}^n A_{Np}}{p A_{total}} \rightarrow T_{N1}^{n+1} = T_{N2}^{n+1} = \dots = T_{Np}^{n+1} = T_j \quad (A.17)$$

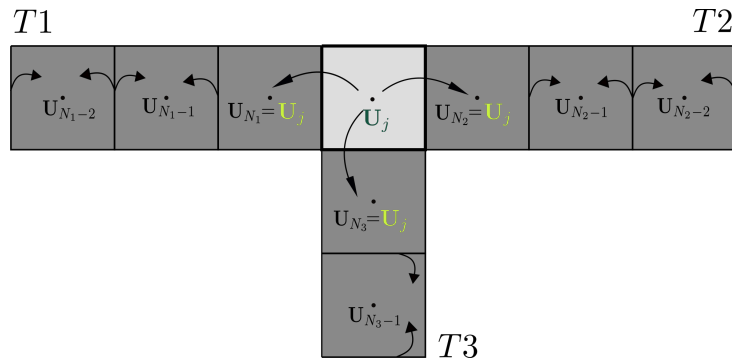


Figura A.6: Representación de la confluencia de 3 tuberías (T1, T2 y T3) y el transporte de información en ella.

Apéndice B

Estructura del algoritmo de cálculo

En la Figura B.1 se muestra un diagrama de flujo en el que aparecen las funciones principales que ejecuta el algoritmo cuando se realiza una simulación. En primer lugar, se leen los ficheros de entrada que definen el caso: condiciones de contorno, estado inicial de la instalación, geometría, así como localización y especificaciones técnicas de los componentes que exista. Posteriormente, se procede a la creación de la malla que calcula la discretización espacial de la geometría introducida, es decir, Δx , localización de todas las componentes introducidas en la malla, cómputo de las confluencias e impone la condición inicial en todas las celdas. Finalmente, comienza el bucle de actualización que se repite hasta que el tiempo (actualizado en cada instante según $t = t + \Delta t$) alcanza el valor final de la simulación.

El bucle de actualización comienza con las celdas conteniendo los valores de sus variables para el instante n , \mathbf{U}_i^n , que al comenzar la simulación son la condición inicial. Con esos valores se componen los flujos en las paredes que actualizarán las celdas posteriormente. Seguidamente, se actualiza la información teniendo en cuenta las componentes distribuidas por la instalación y, finalmente, se actualizan los valores en las celdas para el instante $n + 1$, calculando \mathbf{U}_i^{n+1} con la ecuación (A.12).

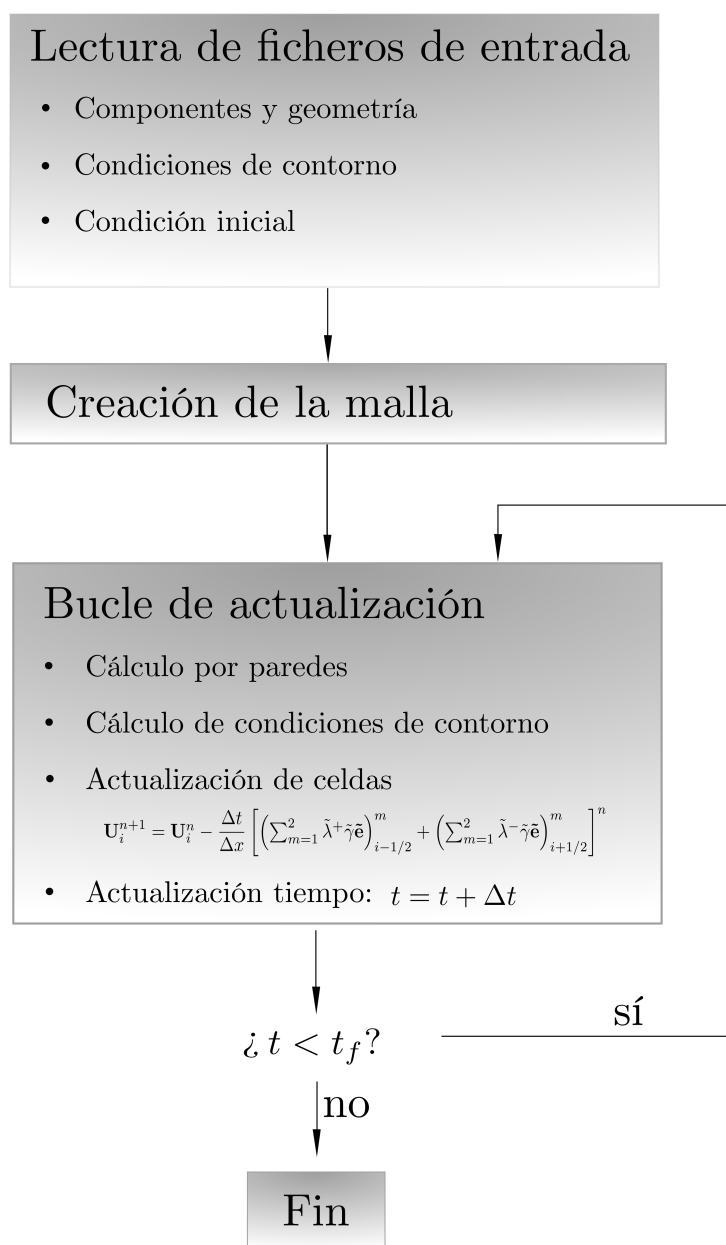


Figura B.1: Diagrama de flujo de las órdenes implementadas en el algoritmo de cálculo.

Apéndice C

Herramienta auxiliar de visualización: Paraview

Paraview es una aplicación para visualización de problemas científicos, multiplataforma y de código abierto. Entre otros tipos de archivo, es capaz de abrir ficheros **.vtk*. El formato de estos ficheros está estandarizado de manera que posibilita que el modelo de cálculo desarrollado en el presente trabajo escriba los resultados en archivos de texto con dicho formato. Cada uno de estos ficheros contiene, para cada instante concreto de tiempo, el valor que toman las variables del problema en todas las celdas de la malla. Es posible introducir al mismo tiempo todos los archivos **.vtk* de una simulación, lo que permite representar la evolución temporal de las variables a lo largo de la misma, siendo de gran utilidad en el estudio de fenómenos transitorios.

De este modo, es posible realizar un análisis rápido de un modo cualitativo y cuantitativo, resultando muy útil para mostrar de una manera visual los resultados obtenidos a lo largo de la instalación (ya que permite representaciones en 3D), así como para una observación detallada de los valores que toman las variables del problema.

Por sus características, *Paraview* ha sido utilizado en este trabajo para:

- Representación 3D de la geometría de las instalaciones introducidas, lo que ha permitido comprobar si la configuración de los ficheros de geometría a partir de los cuales se genera la malla es la correcta.
- Observación cualitativa y análisis cuantitativo de las variables representadas en una escala de colores, ya que permite observar la distribución espacial de las variables así como otorgar el valor exacto que toma cada variable en cada celda para cada instante de tiempo.

- Observar la evolución temporal de algunas variables y analizar así los casos transitorios.

La Figura C.1 muestra un ejemplo de visualización en 3D de una instalación modelada en el presente trabajo. En ella se pueden observar los valores de presión de las distintas celdas de la malla para un instante dado.

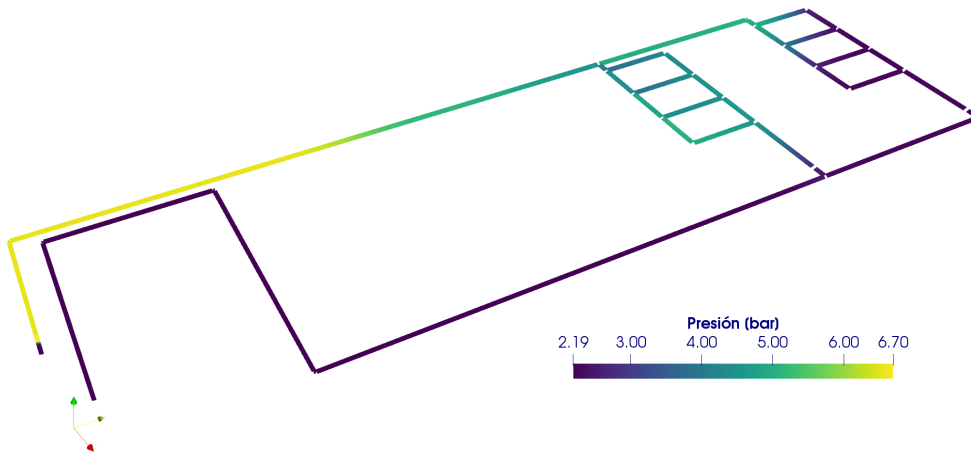


Figura C.1: Distribución espacial de la presión para un tiempo dado en una instalación.