

# SIMULACIÓN DE INSTALACIONES TÉRMICAS CON OPENMODELICA PARA LA REALIZACIÓN DE PRÁCTICAS VIRTUALES

VARELA DÍEZ, Fernando <sup>(1)</sup>; RAMOS HERNÁNDEZ, Ana <sup>(2)</sup>

AROCA LASTRA, Santiago <sup>(1)</sup>; ROVIRA DE ANTONIO, Antonio <sup>(1)</sup>

fvarela@ind.uned.es

<sup>(1)</sup>UNED, E.T.S.I. Industriales, Departamento de Ingeniería Energética

<sup>(2)</sup>Empresa Safran Engineering Services, Departamento de análisis de vuelos espaciales

## RESUMEN

La enseñanza a distancia de disciplinas cuyo contenido práctico tiene una cierta relevancia, como por ejemplo las asignaturas de ingeniería concernientes a instalaciones, suele verse mermada o dificultada por la carencia de prácticas de laboratorio que permitan al alumno adquirir una visión más completa y realista de la asignatura.

Para paliar esta circunstancia se están desarrollando en el Departamento de Ingeniería Energética de la ETSII de la UNED una serie de prácticas virtuales consistentes en la modelización de cada uno de los elementos típicos de una instalación térmica, para posteriormente poder ser conectados entre sí dando lugar a la reproducción simulada de una determinada instalación.

Entre ellos se incluyen elementos hidráulicos (bombas, ventiladores, tuberías, conductos, valvulería), térmicos (calderas, emisores de calor) y de control (controladores). Se modela tanto la parte térmica como hidráulica de cada uno de los elementos: balances de materia y energía y cálculo de la pérdida de presión de los circuitos hidráulicos.

El lenguaje de programación escogido ha sido *Modelica*, en el entorno *Openmodelica*, de carácter libre y gratuito, para facilitar el acceso a los alumnos. Este entorno es muy visual, fácil de utilizar, permite conexionar los elementos de la misma manera que se haría en el caso real y extraer resultados de cada punto de la instalación.

El objetivo de estas prácticas es ayudar a los estudiantes a comprender mediante la práctica determinados aspectos de la asignatura y reforzar algunos de los conceptos más importantes, así como comprobar la solidez de los conocimientos adquiridos. Además aumentando el apartado práctico de las asignaturas, se pretende aumentar el interés y fomentar el estudio de las asignaturas y con ello la mejora de los resultados académicos.

**Palabras clave:** Simulación de instalaciones térmicas, Prácticas virtuales, Modelica.

## 1. Introducción

Con este proyecto se pretende desarrollar una serie de prácticas virtuales para las asignaturas cuatrimestrales optativas Aire Acondicionado, Calefacción y Agua Caliente Sanitaria e Instalaciones de Climatización, de las titulaciones de Ingeniero Industrial y Grado en Ingeniería Mecánica y Tecnologías Industriales.

Estas prácticas consistirán en el manejo por parte de los alumnos de una serie de reproducciones virtuales de diferentes instalaciones de climatización cuyo comportamiento frente a diferentes parámetros y situaciones deberán analizar y sacar conclusiones al respecto.

Con este proyecto se pretenden conseguir principalmente dos objetivos:

- Ayudar a la comprensión de determinados aspectos de la asignatura y a reforzar algunos de los conceptos más importantes, así como a comprobar la solidez de los conocimientos adquiridos.
- Aumentar el apartado práctico de las citadas asignaturas, eminentemente prácticas de por sí, que adolecen de una carencia de este tipo de contenidos, y de este modo aumentar el interés y fomentar así el estudio de las asignaturas y la mejora de los resultados académicos.

Las reproducciones virtuales de las instalaciones serán realizadas por el equipo docente ad-hoc para cada asignatura, programadas en el lenguaje de programación Modelica, especialmente diseñado para el modelado de sistemas físicos, y manejadas por los alumnos mediante el software OpenModelica, software gratuito que proporciona una interfaz de entrada-salida muy adecuada para este tipo de simulaciones.

Las prácticas preparadas de este modo serán accesibles desde los cursos virtuales y serán obligatorias formando parte de la evaluación continua de las asignaturas.

## 2. El lenguaje Modelica y la interfaz OpenModelica

### 2.1. Modelica

Modelica [1] es un lenguaje de programación orientado a objetos, desarrollado para modelar y simular sistemas físicos que combinan elementos de diferentes dominios (eléctricos, mecánicos, hidráulicos y térmicos entre otros). Los modelos que se crean utilizando este lenguaje se describen utilizando ecuaciones algebraicas, diferenciales y discretas.

Esencialmente es un *solver* de ecuaciones diferenciales y algebraicas en el que el usuario describe el problema físico escribiendo el sistema de ecuaciones (de solución única) que lo definen, y Modelica se encarga de resolverlo.

Una de las principales características de Modelica es la jerarquía. Esta permite crear elementos que luego pueden utilizarse dentro de otros más complejos sin necesidad de volver a escribir el código que los define. Por ejemplo, el modelo de un condensador puede utilizarse dentro de un circuito eléctrico sin necesidad de volver a escribir las ecuaciones que lo describen.

Para ello se definen varias clases, las tres principales, el Modelo (“model”) que es un modelo de un elemento físico, el Conector (“connector”) que describe cómo interactúa un modelo con otros modelos y el Paquete (“package”) que es un contenedor para los modelos y la forma en la que se organizan las bibliotecas para mantener la jerarquía.

Modelica cuenta con varias bibliotecas en las cuales se encuentran disponibles modelos de diversos elementos. Su biblioteca estándar (“Modelica Standard Library”) contiene alrededor de 800 modelos y 550 funciones de diferentes dominios [2].

### 2.2. OpenModelica

Para utilizar el lenguaje de programación Modelica y sus bibliotecas se ha usado el entorno de simulación OpenModelica [3]. OpenModelica es un software de código abierto que permite realizar

simulaciones utilizando Modelica como lenguaje. Este software ofrece un entorno de simulación con el que se puede simular sistemas de diversos tipos utilizando los elementos que ya posee en sus librerías o programando nuevos elementos, en el que resulta sencillo interconectar de forma gráfica los componentes previamente creados para formar componentes más complejos, reproduciendo así de manera virtual la forma real de conexión entre los diferentes elementos que constituye una instalación.

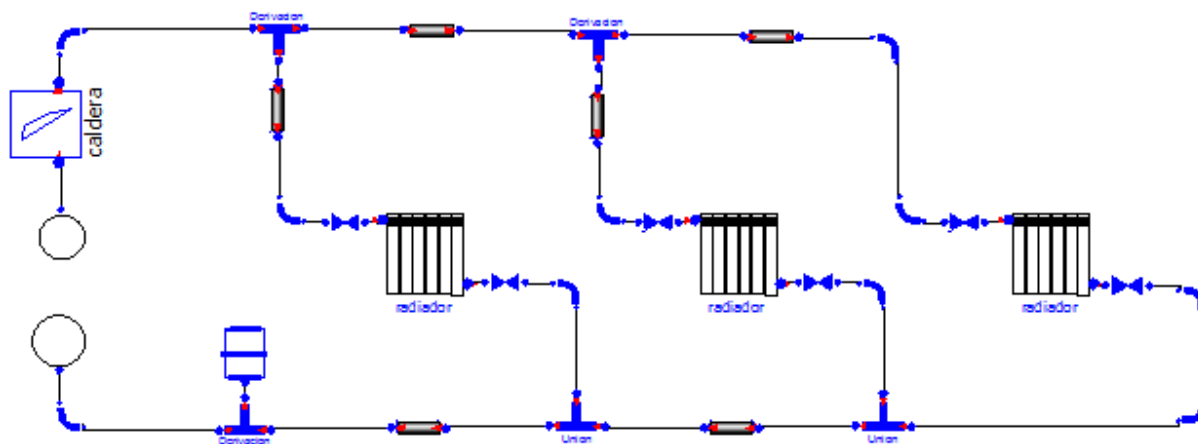


Figura 1: Reproducción de una instalación en OpenModelica.

Además, proporciona una interfaz de salida donde se pueden consultar de forma gráfica y numérica los resultados de cada variable definida dentro de la simulación.

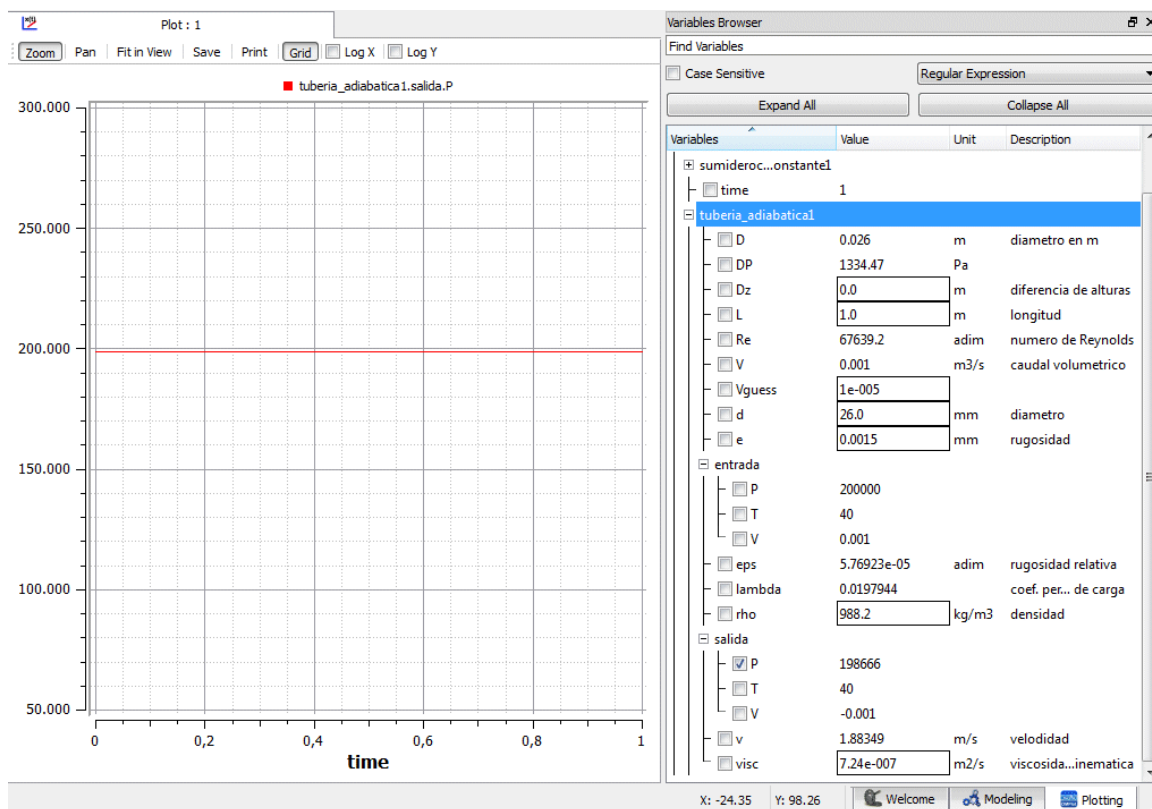


Figura 2: Pestaña de resultados en Openmodelica

### 3. Las prácticas virtuales

#### 3.1. Modelado matemático de los elementos

En primer lugar, se realiza un modelado matemático de cada uno de los elementos que van a constituir la instalación, definiendo las constantes y parámetros que lo definen, y las entradas y salidas del modelo. En nuestro caso, los modelos implementados son:

- a. Junta termohidráulica
- b. Bomba
- c. Radiador
- d. Tubería adiabática
- e. Caldera
- f. Vaso de expansión
- g. Derivación
- h. Unión
- i. Válvulas de 2 vías
  - Lineal
  - Cuadrática
  - Logarítmica
- j. Fuente de caudal
- k. Sumidero de caudal
- l. Curva/codo
- m. Válvula genérica

Como ejemplo, incluimos el modelado del elemento radiador:

#### Constantes del modelo:

- $c$  Capacidad térmica específica del fluido a la media de la temperatura de operación [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
- $\rho$  densidad del fluido a la media de la temperatura de operación [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

#### Parámetros del modelo:

- $n_{el}$  número de elementos del radiador [adim]
- $n$  exponente característico del emisor [adim]
- $\dot{q}_n$  potencia calorífica emitida en condiciones nominales por elemento [W]
- $T_{sn}$  temperatura de salida del agua del emisor en condiciones nominales [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- $T_{en}$  temperatura de entrada del agua en el emisor en condiciones nominales [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- $T_{an}$  temperatura del aire ambiente nominal [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- $T_a$  temperatura del aire ambiente [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- $m$  exponente de pérdida de carga del radiador [adim]
- $\dot{V}_0$  caudal de referencia del radiador para la pérdida de carga [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $\Delta P_0$  pérdida de presión de referencia del radiador [Pa]

#### Entradas:

- $T_e$  temperatura de entrada del agua en el emisor [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- $P_e$  presión manométrica del agua de entrada en el emisor [Pa]

- $\dot{V}_e$  caudal volumétrico que entra en el radiador [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

**Salidas:**

- $T_s$  temperatura de salida del agua del emisor [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- $P_s$  presión manométrica del salida del emisor [Pa]
- $\dot{V}_s$  caudal volumétrico que sale del radiador [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- $\dot{Q}$  potencia calorífica emitida [W]

**Variables intermedias:**

- $\dot{q}$  potencia calorífica emitida por elemento [W]
- $\Delta T_{mn}$  diferencia media de temperaturas en condiciones nominales [ $^{\circ}\text{C}$ ]

**Ecuaciones del modelo matemático:**

**Térmicas**

Modelo de emisión térmica según UNE-EN- 442:

- $$\dot{Q} = n_{el} \cdot \dot{q}_n \cdot \left( \frac{\Delta T_m}{\Delta T_{mn}} \right)^n$$
- $$\Delta T_m = \frac{T_s - T_e}{\ln \left( \frac{T_s - T_a}{T_e - T_a} \right)}$$
- $$\Delta T_{mn} = \frac{T_{sn} - T_{en}}{\ln \left( \frac{T_{sn} - T_{an}}{T_{en} - T_{an}} \right)}$$

Balance térmico

- $$\rho \cdot \dot{V} \cdot c \cdot (T_e - T_s) = \dot{Q}$$

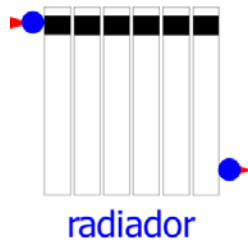
De pérdida de carga

- $$P_e = P_s + \Delta P_0 \cdot \left( \frac{\dot{V}}{\dot{V}_0} \right)^m,$$

donde  $(\dot{V}_0, \Delta P_0)$  es un punto cualquiera de la recta de pérdida de presión del radiador y  $m$  su pendiente.

**3.2. Implementación en Modelica**

A continuación, cada uno de los elementos se implementa en Modelica como un elemento interconectable que le permita formar parte de la instalación virtual. Para ello de vemos dotarle de conectores de entrada y salida, aparte de las ecuaciones generales del modelo.



### Código de programación del elemento

**model** radiador

**//Conectores que permiten interconectar el modelo con otros//**

```
mismodelos.junta_termohidraulica entrada annotation(Placement(visible = true, transformation(origin = {-80,80}, extent = {{-10,-10},{10,10}}, rotation = 0), iconTransformation(origin = {-80,80}, extent = {{-10,-10},{10,10}}, rotation = 0)));
```

```
mismodelos.junta_termohidraulicasalida annotation(Placement(visible = true, transformation(origin = {80,-40}, extent = {{-10,-10},{10,10}}, rotation = 0), iconTransformation(origin = {80,-40}, extent = {{-10,-10},{10,10}}, rotation = 0)));
```

**//Constantes y parámetros que definen el modelo//**

```
constant Real rho = 1000;
constant Real c = 4186;
parameter Real n = 1.35;
parameter Real T_ne = 75;
parameter Real T_ns = 65;
parameter Real T_na = 20;
parameter Real n_el = 4;
parameter Real q_n = 120;
parameter Real T_a = 22;
parameter Real m = 1.98;
parameter Real V_0 = 1.11e-005;
parameter Real DP_0 = 98;
Real Q;
Real DT_n;
Real T_s(start = T_ns);
Real T_e(start = T_ne);
Real DT;
Real DP;
```

**//Ecuaciones que definen el modelo//**

**equation**

```
salida.T = T_s;
entrada.T = T_e;
Q = n_el * q_n * (DT / DT_n) ^ n;
DT = (entrada.T - salida.T) / log((entrada.T - T_a) / (salida.T - T_a));
DT_n = (T_ne - T_ns) / log((T_ne - T_a) / (T_ns - T_a));
Q = entrada.V * rho * c * (entrada.T - salida.T);
DP = DP_0 * (entrada.V / V_0) ^ (m - 1) * abs(entrada.V / V_0);
salida.P = entrada.P - DP;
connect(salida.V, entrada.V);
```

**//Instrucciones gráficas que definen el icono del modelo//**

annotation(Diagram(coordinateSystem(extent ...);

endradiador;

### 3.3. Elaboración de la práctica

El siguiente paso es desarrollar una práctica que permita conseguir los objetivos fijados en un principio: fijar conceptos, asegurarnos de que el alumno ha comprendido correctamente los aspectos fundamentales y comprobar el efecto que tienen ciertas manipulaciones en la instalación sobre algunas variables de interés, para sacar conclusiones al respecto.

En este caso se ha desarrollado una práctica de dimensionamiento y equilibrado de una red de tuberías de calefacción y sus emisores:

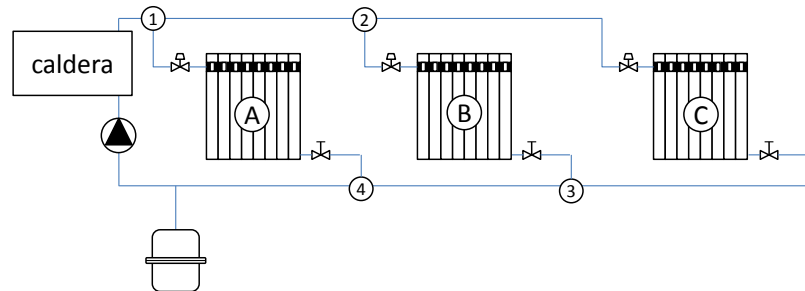


Figura 3: Instalación a simular en la práctica virtual.

Los objetivos de la práctica son:

1. Realizar el dimensionado y equilibrado manual de una red de tuberías, reproducir la instalación en el simulador y comprobar los caudales reales que circulan por cada tramo, verificando el equilibrado realizado.
2. Determinar la bomba adecuada para el circuito.
3. Realizar el dimensionado de los elementos terminales.
4. Ajustar el grado de apertura de cada detentor para equilibrar el circuito a los caudales de diseño.

Como objetivos secundarios están:

1. Determinar el punto de funcionamiento de la instalación calculado, y realizar la selección de la bomba adecuada entre las que se proponen.
2. Determinar la curva de carga real de la instalación.
3. Con la bomba acoplada, determinar el punto de funcionamiento real de la instalación.
4. Determinar la potencia emitida por los terminales antes y después de equilibrar el circuito.

Una vez definida la práctica, se procede al montaje virtual de la misma en el entorno OpenModelica, conectando los componentes virtuales entre sí:

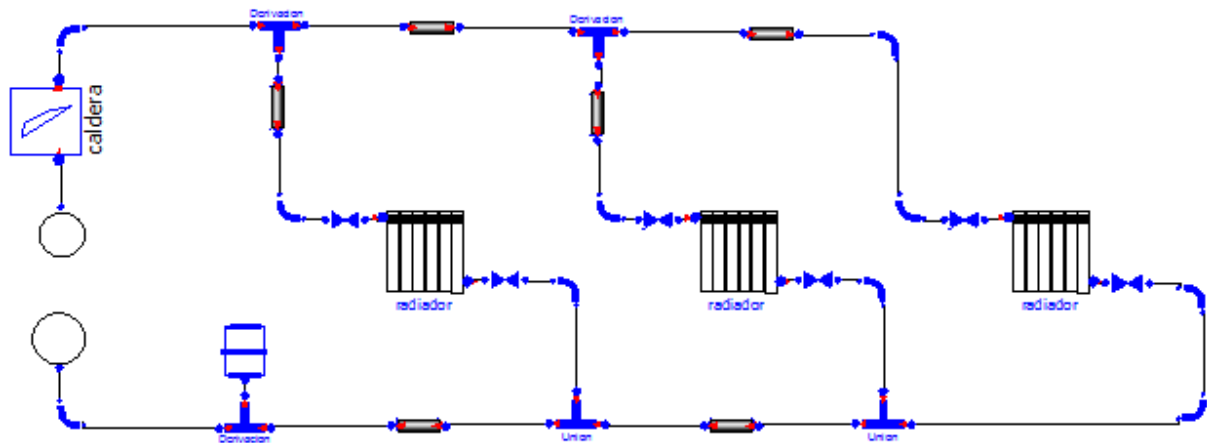


Figura 4: Instalación de la práctica representada en el entorno gráfico OpenModelica.

A continuación, se ajustan los parámetros de cada uno de los elementos (tamaños, potencias, características...) y se ejecutan las simulaciones propuestas en el guion de prácticas que permitan obtener los resultados deseados.

#### 4. Conclusiones y consideraciones finales

- El programa OpenModelica resulta adecuado y efectivo para el modelado matemático de dispositivos termohidráulicos.
- Asimismo, su carácter modular y su interfaz “plug and play” entre componentes lo hacen apto para la simulación de una gran variedad de instalaciones térmicas, tanto en régimen estacionario como transitorio.
- Por ello, el desarrollo de prácticas virtuales para las asignaturas de Instalaciones Térmicas en la Edificación en este entorno es factible y de fácil ejecución.

#### 5. Referencias

- [1] MODELICA AND THE MODELICA ASSOCIATION. [www.modelica.org](http://www.modelica.org)
- [2] MODELICA AND THE MODELICA ASSOCIATION. Modelica®-A Unified Object-Oriented Language for PhysicalSystemsModeling.LanguageSpecificationVersion3.1 Disponible en: <http://www.modelica.org/documents/ModelicaSpec31.pdf>
- [3] OPEN SOURCE MODELICA CONSORTIUM. <https://openmodelica.org/home/consortium>