

# LIBRERÍAS DE ECOSIMPRO PARA SISTEMAS HIDRÁULICOS Y CASOS DE APLICACIÓN

Raúl Avezuela Rodríguez, Eusebio Huéllamo Martínez  
[rao@empre.es](mailto:rao@empre.es), [ehm@empre.es](mailto:ehm@empre.es)  
 Empresarios Agrupados, Magallanes, 3 28015 Madrid

## Resumen

*En este artículo se muestra la situación actual de una librería de EcosimPro para la simulación de transitorios hidráulicos en plantas industriales llamada PIPELIQTRAN.*

*Además se analizan varios casos de transitorios hidráulicos simulados con esta librería y se compara con los resultados encontrados en la bibliografía.*

**Palabras Clave:** Golpe de ariete, transitorios hidráulicos, ondas de presión.

## 1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este proyecto es el desarrollo de una librería de componentes en EcosimPro que permita construir de forma sencilla y modular modelos de sistemas hidráulicos para analizar los problemas de golpe de ariete que puedan presentar. Para ello se utiliza un método de resolución basado en ecuaciones diferenciales ordinarias en vez del método de las características, tradicionalmente utilizado para esta clase de análisis.

Los fenómenos y las suposiciones tenidos en cuenta en el desarrollo de esta librería son los siguientes:

- Fluido incompresible
- Condiciones cuasi-estacionarias de presión y flujo, pero no de temperatura
- Flujo unidimensional.
- Composición constante del fluido
- La dependencia con la temperatura de las propiedades del fluido
- Caídas de presión cuasi-estacionarias
- Se ha considerado la acumulación de calor en el líquido y en las paredes de tuberías y tubos de cambiadores de calor
- La librería permite la existencia de flujo inverso
- Se ha considerado la presión dinámica del fluido
- En lo realizado hasta ahora el fluido de trabajo es agua, aunque el usuario puede incluir fácilmente propiedades físicas para otro tipo de fluidos.

## 2 COMPONENTES

Existen dos grupos de componentes dentro de la librería dependiendo de la dirección de sus puertos. En el primer grupo están incluidas las tuberías cuyos puertos son siempre de entrada; y el segundo grupo está formado por el resto de componentes (bombas, válvulas...) cuyos puertos son siempre de salida. Las cotas y las áreas transversales de flujo se definen en las tuberías.

No es posible conectar directamente dos componentes que pertenezcan al mismo grupo. Siempre se ha de conectar un puerto de entrada con uno de salida o viceversa, y tampoco se permite la conexión múltiple dentro de un puerto.

Actualmente la librería dispone de los siguientes componentes:

Tabla 1: Componentes operativos en la librería

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN
Accumulator	Acumulador
Bound	Condición de contorno general
Bound_Ht	Condición de contorno de altura piezométrica total
Bound_M	Condición de contorno de flujo másico
Bound_Ps	Condición de contorno de presión estática
Bound_Pt	Condición de contorno de presión total
CheckValve	Válvula anti-retorno
Col2	Colector de dos conexiones o ramas
Engine	Motor
ExitValve	Válvula de salida
ExpanderASA	Ensanchador tipo ASA
ExpanderConical	Ensanchador de forma cónica
ExpanderSudden	Ensanchador de forma brusca
Filter	Filtro
FlowMeter	Medidor de flujo
Grid	Rejilla
Hex	Cambiador de calor
Pipe	Tubería
Psensor	Medidor de presión
Pump	Bomba
Pump_4q	Bomba de cuatro cuadrantes
Tank1	Tanque de una única conexión
Tsensor	Medidor de temperatura
VacuumBreaker	Rompedor de vacío
Valve	Válvula de regulación
WaterBox	Caja de agua
ZeroLossPipe	Tubería con pérdida de presión nula

En la figura 1 se muestran los iconos gráficos asociados a cada componente.

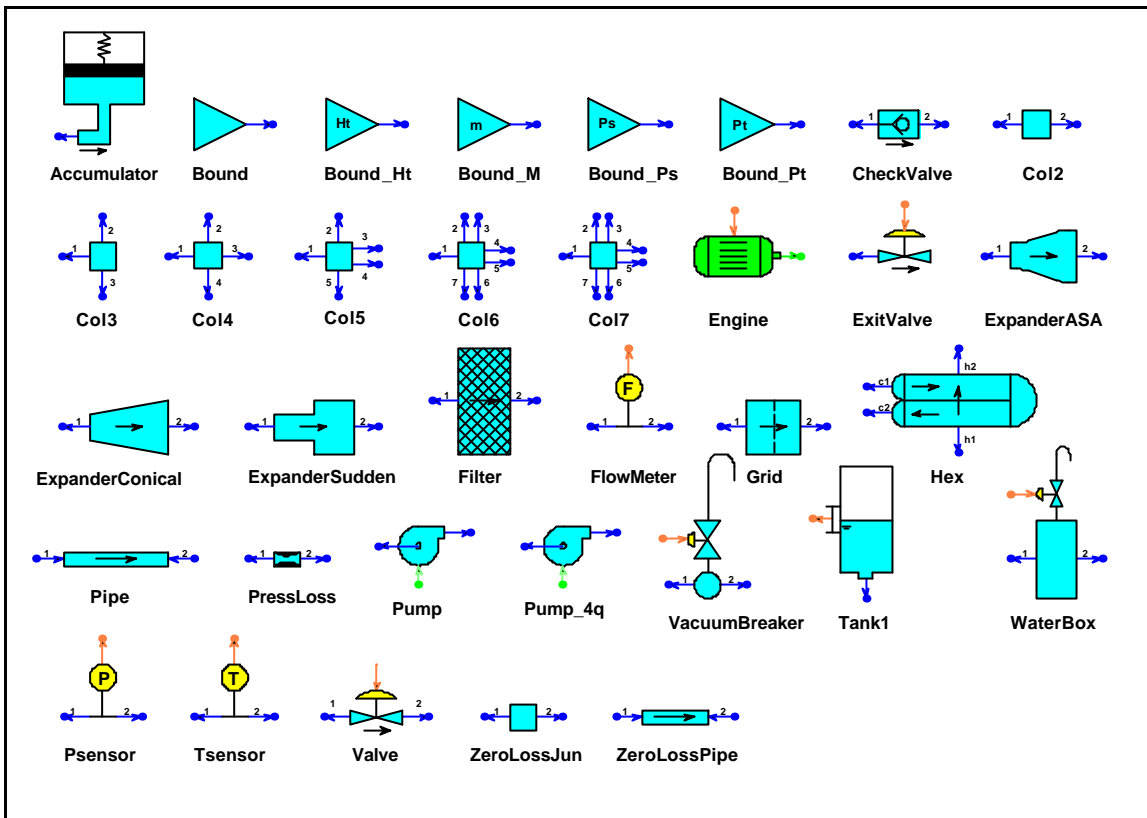


Figura 1: Paleta de componentes de la librería PIPELIQTRAN

A continuación se va a explicar de forma detallada el modelo implementado en la tubería que es el componente fundamental de esta librería, y posteriormente se detallará algún otro componente.

## 2.1 TUBERÍA

Los fenómenos y consideraciones que han sido modelados en la tubería son los siguientes:

- Número de nodos variable
- Posibilidad de utilizar diámetros nominales y “schedules”
- Ondas de presión
- Balance térmico (opcional)
- Cavitación en los nodos (opcional)
- Liberación de gas disuelto en el fluido (opcional)
- Velocidad del sonido modificada por la elasticidad de la tubería y por la liberación de gas
- Pérdidas de presión calculadas de acuerdo a factores de fricción estáticos

### 2.1.1 Ecuaciones de conservación de masa y de energía

A continuación se muestra el balance de conservación de masa aplicado a cada nodo:

$$\frac{dP_j}{dt} = \frac{c^2}{V_j} \cdot (m_j - m_{j-1}) \quad (1)$$

El balance de energía viene dado por la siguiente expresión:

$$\frac{dT_j}{dt} = \frac{m_j \cdot h_j - m_{j+1} \cdot h_{j+1}}{\mathbf{r} \cdot V_j \cdot c_p} \quad (2)$$

donde:

- $P_j$  = presión en el nodo  $j$
- $c$  = velocidad del sonido
- $V_j$  = volumen del nodo
- $m_j$  y  $m_{j+1}$  = flujos másicos de entrada y de salida a ese nodo, respectivamente
- $\mathbf{r}$  = densidad del fluido
- $c_p$  = calor específico del fluido
- $T_j$  = temperatura en el nodo  $j$
- $h_j$  y  $h_{j+1}$  = entalpías específicas de entrada y salida, respectivamente

### 2.1.2 Ecuación de conservación del momento

El balance de conservación del momento cinético se aplica entre los extremos de un nodo y la expresión utilizada es la siguiente:

$$\left( \frac{L}{A} \right)_j \cdot \frac{dm_j}{dt} = P_{j-1} + av_{j-1} - P_j - av_j - K \cdot \frac{m_j^2}{\mathbf{r} \cdot A_j^2} \quad (3)$$

donde:  $(L/A)_j$  es la relación entre longitud y área transversal en el nodo  $j$  y  $K$  el coeficiente de fricción.

$av_j$  es la viscosidad artificial. Es un término usado para reducir la dispersión numérica y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$av_j = -k_{damp} \cdot c \cdot \frac{m_{j+1} - m_j}{A_j} \quad (4)$$

siendo  $k_{damp}$  un dato definido por el usuario entre 0 y 1, y  $A_j$  el área transversal al flujo.

### 2.1.3 Cálculo de la velocidad del sonido

El cálculo de la velocidad del sonido tiene en cuenta tanto el efecto de la elasticidad de la pared de la tubería como los efectos de liberación de gas. La expresión utilizada para el cálculo de la velocidad del sonido teniendo en cuenta la elasticidad de la pared viene dada por la siguiente expresión:

$$c' = \frac{c_o}{\sqrt{1 + \frac{K}{E} \cdot c_1}} \quad (5)$$

donde:

$c_o$  = velocidad del sonido del fluido en función de la temperatura

$K$  = módulo de elasticidad del fluido

$E$  = módulo de elasticidad del material

$c_1$  = parámetro que depende del tipo de anclaje de la tubería, de la relación entre el diámetro interior y el espesor, y del coeficiente de Poisson del material.

Y si tenemos en cuenta la liberación de gas en el interior de la tubería, la expresión para calcular la velocidad del sonido se transforma en:

$$c = \frac{c'}{\sqrt{1 + \frac{m \cdot K \cdot (R / MM) \cdot T}{P^2} \cdot \frac{1}{1 + (K / E) \cdot c_1}}} \quad (6)$$

donde:

$c'$  = velocidad del sonido teniendo en cuenta la elasticidad de la pared de la tubería

$m$  = flujo másico de aire liberado por unidad de volumen de líquido

$R$  = constante del gas

$P$  = presión del gas

$MM$  = masa molecular del gas

$T$  = temperatura absoluta del gas

### 2.1.4 Fenómeno de la cavitación

El cálculo del fenómeno de la cavitación en la tubería es opcional. Si se tiene en cuenta este fenómeno, lo

que se hace es reducir la velocidad del sonido a un valor muy pequeño cuando la presión cae por debajo de la presión de vapor. Entonces el balance de conservación de masa y el volumen de burbuja se calculan de la siguiente manera:

$$\text{If } (P_j > P_{sat}) \quad \frac{dP_j}{dt} = \frac{c^2}{V_j} \cdot (m_j - m_{j-1}) \quad (7)$$

$$\frac{dV_{b,j}}{dt} = 0 \quad (8)$$

Else

$$\frac{dP_j}{dt} = 10^{-6} \cdot \frac{c^2}{V_j} \cdot (m_j - m_{j-1}) \quad (9)$$

$$\frac{dV_{b,j}}{dt} = \frac{m_{j+1} - m_j}{r_j} \quad (10)$$

siendo:

$V_{b,j}$  = volumen de la burbuja en el nodo  $j$

$P_{sat}$  = presión de saturación del fluido

## 2.2 BOMBA

Existen dos tipos de bombas dentro de la librería llamados `Pump` y `Pump_4q`. El primer tipo, `Pump`, corresponde a un modelo sencillo de una bomba donde el usuario puede especificar la curva de potencia de la bomba en función del flujo volumétrico a la velocidad de diseño de la bomba.

El segundo tipo llamado `Pump_4q` corresponde a un modelo de bomba de cuatro cuadrantes, que recoge las cuatro zonas de operación de una bomba. En este modelo están especificadas las curvas características de operación de una bomba a tres velocidades específicas: 25, 147 y 261. Aunque el usuario puede introducir sus propias curvas características.

Existe un componente llamado `Engine` que modela el comportamiento de un motor y que puede ser conectado a la bomba mediante un tipo de puerto llamado `shaft`. Mediante este componente se puede simular el arranque de una bomba estableciendo la relación entre el par motor y el número de vueltas.

## 2.3 COLECTOR

El colector es el elemento que sirve para unir o bifurcar ramas de tuberías. Existen varios modelos de colectores en función del número de conexiones que tengan. El colector de dos ramas se llama `Col2`, el de tres `Col3` y así sucesivamente hasta un máximo de 10 ramas o conexiones. De igual manera el componente que representa un tanque, presenta diferentes modelos en función del número de conexiones que dispongan.

Dentro del colector se realiza un balance de materia, energía y de momento.

Las expresiones utilizadas para los balances de materia (11) y energía (12) son las siguientes:

$$\frac{dP}{dt} = - \frac{\sum_{j=1}^{j=n} m_j}{V} \cdot c^2 \quad (11)$$

$$\mathbf{r} \cdot c_p \cdot V \cdot \frac{dT}{dt} = - \sum_{j=1}^{j=n} m_j \cdot h_j \quad (12)$$

siendo:

$n$  = número de ramas o conexiones del colector

$P$  = presión en el interior del colector

$m_j$  = flujo másico de salida de cada rama

$h_j$  = entalpía específica en cada rama

$V$  = volumen del colector

$\mathbf{r}$  = densidad del fluido

$c_p$  = calor específico del fluido

$c$  = velocidad del sonido del fluido

## 2.4 ROMPEDOR DE VACIO

El rompedor de vacío, llamado en la librería VacuumBreaker, es un componente que hereda el modelo del colector de dos ramas y que dispone de una entrada o salida de aire. Este componente permite la simulación de sistemas hidráulicos vacíos, en los que las tuberías estén llenas de aire.

La librería también dispone de un componente que representa una caja de agua de un condensador. Este componente recibe el nombre de WaterBox. Permite definir el volumen de la caja de agua así como la altura de dicha caja. Y ofrece la flexibilidad de definir condensadores con diferentes configuraciones.

## 3 EJEMPLOS

### 3.1 EJEMPLO DE UN CIERRE DE VÁLVULA INSTANTANEO

Se va a considerar el sistema hidráulico mostrado en la figura 2, en el que las condiciones de flujo son estacionarias en los instantes iniciales. La tubería T1 se ha discretizado con 100 nodos.

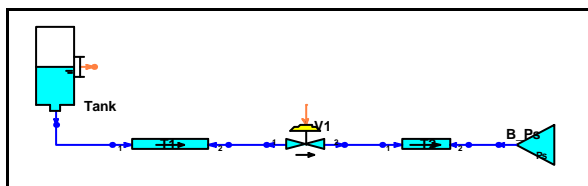


Figura 2: Esquema del ejemplo de cierre instantáneo de una válvula

La válvula se cierra de forma instantánea cuando transcurren 0.005 segundos como se muestra en la figura 3.

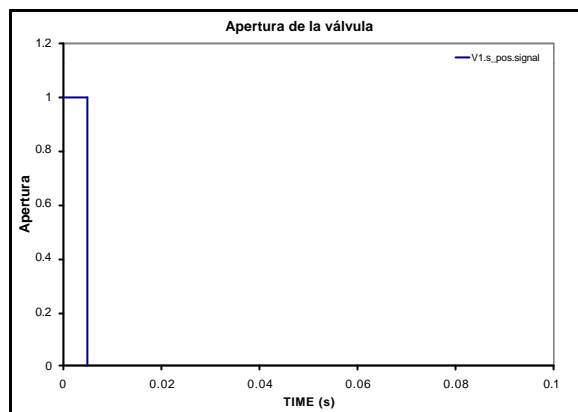


Figura 3: Cierre de la válvula

Tan pronto como la válvula está cerrada, se reduce la velocidad del fluido hasta hacerse nula, lo que causa un aumento de presión.

Debido a este aumento de presión la tubería se expande, el fluido se comprime, incrementándose su densidad, y una onda positiva de presión se propaga hacia el tanque. Detrás de esta onda, la velocidad de flujo se hace cero, y toda la energía cinética se convierte en energía elástica.

Como el nivel del tanque es constante, cuando la onda alcanza su entrada las condiciones son inestables porque la presión del fluido en el interior del tanque es menor que la presión del fluido en la superficie adyacente. Como consecuencia de esta diferencia el líquido comienza a fluir desde la tubería hasta el interior del tanque y se produce una onda de presión negativa que viaja hacia la válvula restableciendo la presión a su valor inicial o estacionario.

Como la válvula está completamente cerrada, no se puede mantener un flujo negativo en ella, por lo que la velocidad se hace nula y la presión se reduce generándose una onda negativa que se propaga aguas arriba. Detrás de esta onda, la presión adquiere un valor más pequeño que en el estado estacionario y la velocidad del fluido se anula.

Tan pronto como la onda de presión negativa alcanza la entrada del tanque, se crea otra vez una condición de desequilibrio. Ahora la presión es mayor en el lado del tanque que en el lado de la tubería, por lo que el fluido comienza a fluir hacia la válvula y se restaura la presión hasta su valor inicial. De esta manera las condiciones en la tubería son instantáneamente las mismas que en el estado estacionario inicial.

Al estar la válvula completamente cerrada cuando llega la onda, la secuencia de eventos anteriormente

descrita se repite. Debido a que las pérdidas de carga a lo largo de la tubería son pequeñas, las ondas de presión se disipan muy poco. Esta secuencia de eventos puede ser comprobada en las figuras 4 y 5. En la figura 4 se muestra la evolución de la presión con el tiempo en algunos de los nodos en los que se ha discretizado la tubería.

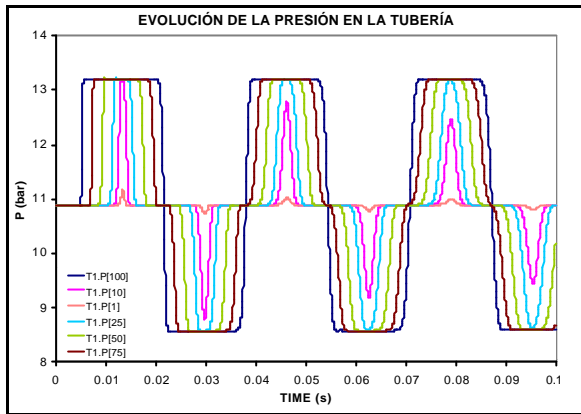


Figura 4: Perfil de presiones en la tubería

Y en la figura 5 se muestra la evolución del flujo másico con el tiempo en dichos nodos.

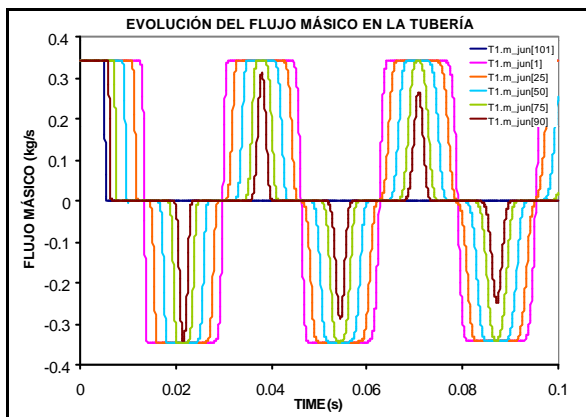


Figura 5: Perfil de flujos másicos en la tubería

### 3.2 EJEMPLO DEL DISPARO DE UNA BOMBA

Para ilustrar el caso del disparo de una bomba en un sistema, se utiliza el ejemplo 4.6 de la referencia [1]. Este ejemplo representa un sistema hidráulico formado por dos bombas en paralelo que bombean agua entre un estanque y un tanque colector. En el modelo desarrollado en EcosimPro se ha empleado una bomba equivalente a las dos empleadas en la bibliografía, pero esto no supone ninguna variación en la simulación del modelo porque la inercia de líquido entre la bomba y el colector de descarga es pequeña. El diagrama de flujo de este caso está representado en la figura 6.

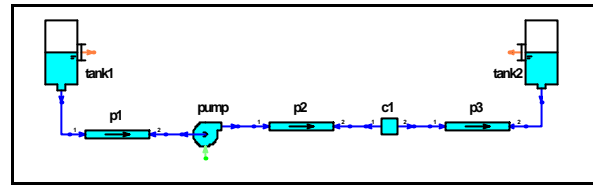


Figura 6: Diagrama de flujo del ejemplo 3.1

Algunos de los datos característicos de este sistema son los siguientes:

Tabla 2: Características de las tuberías

	Tubería p2	Tubería p3
Longitud (m)	450	550
Diámetro (m)	0.75	0.75
$Q_0$ (m <sup>3</sup> /s)	0.5	0.5

Los datos fundamentales de la bomba equivalente en las condiciones de diseño son:

Caudal:	$Q_R = 0.50 \text{ m}^3/\text{s}$
Altura:	$H_R = 60 \text{ m}$
Revoluciones:	$N_R = 1100 \text{ r.p.m.}$
Momento de inercia:	$I = 33.7 \text{ kg m}^2$
Eficiencia:	$\eta_R = 0.84$
Velocidad específica:	$N_S = 24.33$

La diferencia de presión en metros de columna de agua entre los niveles del embalse y el colector es de aproximadamente 60 m, teniendo en cuenta la diferencia de altura entre los dos niveles y las pérdidas de presión por fricción a lo largo de las tuberías.

La simulación parte de un estado estacionario en el que las condiciones de operación son las condiciones de diseño del sistema. Se supone que hay un corte de energía en el momento inicial y como consecuencia se origina un estado transitorio comúnmente conocido como disparo de una bomba.

En las figuras 7 y 8 se muestran los resultados obtenidos. En la figura 7 se han representado las alturas totales a la entrada de las tuberías p2 y p3.

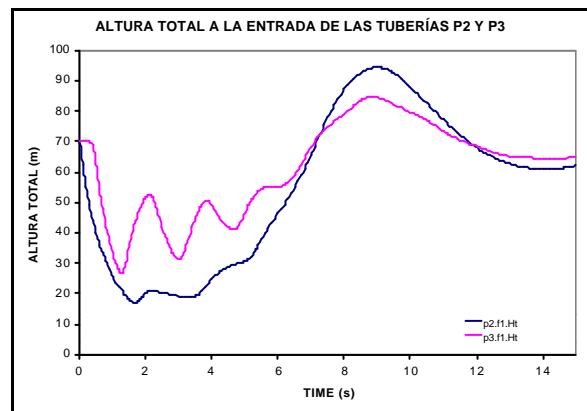


Figura 7: Altura total del fluido en las tuberías

Y en la figura 8 se han representado los flujos máxicos que circulan a la entrada de estas dos tuberías.

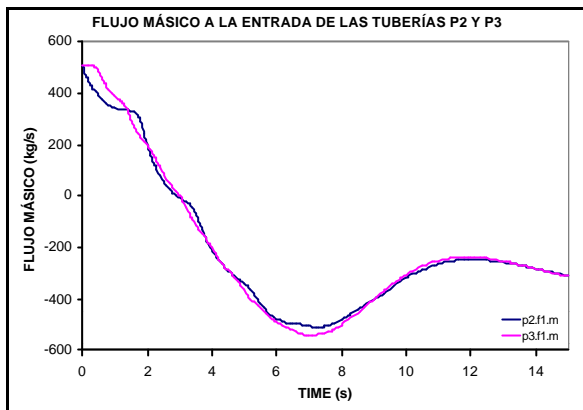


Figura 8: Flujo máxico en las tuberías

Los resultados obtenidos en EcosimPro son idénticos a los presentados en el ejemplo 4.6 de la referencia [1] lo que justifica el uso de la librería desarrollada para el análisis de este tipo de transitorios hidráulicos.

### 3.3 EJEMPLO DE UN SISTEMA DE AGUA DE CIRCULACIÓN

Se ha simulado un modelo de un sistema de agua de circulación de una central de ciclo combinado, cuyo diagrama de flujo aparece en la figura 9. El comportamiento hidráulico de este sistema había sido previamente estudiado mediante un código de cálculo de transitorios hidráulicos llamado THICOM (Transitorios Hidráulicos con Condiciones de Contorno Múltiples) basado en el método de las características [4]. A continuación se va a explicar uno de los casos analizados y se va a realizar una comparativa entre los resultados obtenidos con la librería PIPELIQTRAN de EcosimPro y el código de cálculo THICOM.

#### 3.3.1 Arranque secuencial de las dos bombas con el sistema lleno

El objeto de este análisis es comprobar si el tiempo de apertura de las válvulas de descarga de las bombas es el adecuado para que las presiones en el sistema no superen los máxicos tolerables. El tiempo de apertura de las dos válvulas es de 10 s. La válvula de descarga de la bomba B1 se empieza a abrir a los 20 s y la de la bomba B2 a los 85 s.

La primera bomba llamada B1 se conecta en el instante inicial mientras que la bomba B2 se conecta transcurridos 65 s.

El volumen inicial de aire en los rompedores de vacío C1 y C2 es de 4.92 m<sup>3</sup>.

A continuación se citan los datos más interesantes de los equipos que conforman el modelo.

Aproximadamente se ha introducido un nodo cada 10 m de tubería. Las tuberías más largas son la T10 con 55 m, la T121 con 37 m y la T15 con 65 m.

Las válvulas de descarga de las bombas (V1 y V2) poseen un A<sub>v</sub> de 3.115 m<sup>2</sup>.

Y los datos del punto de diseño de las bombas son los siguientes:

Altura	H = 20 m
Caudal	Q = 2.4035 m <sup>3</sup> /s
Velocidad	N = 710 r.p.m.
Potencia	W = 550.81 kW
Par	T = 7407.8 N m
Momento de inercia	I = 40.37 kg m <sup>2</sup>
Velocidad específica	N <sub>s</sub> = 116.4

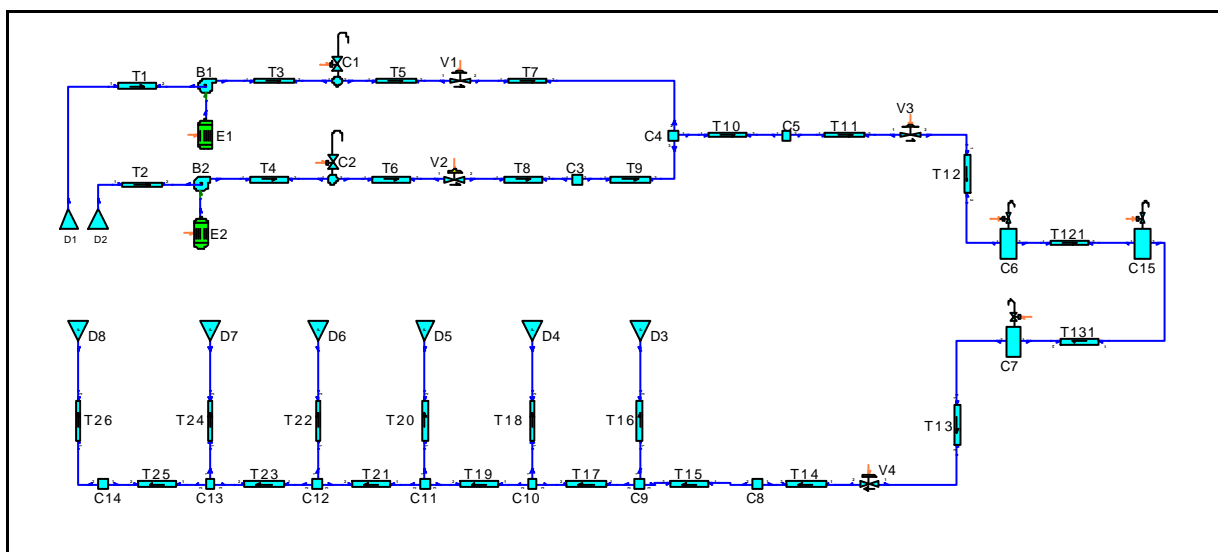


Figura 9: Esquema del modelo de cálculo para el sistema de agua de circulación

En la figura 10 se muestra la evolución de las presiones de descarga de las dos bombas calculadas con EcosimPro y con THICOM.

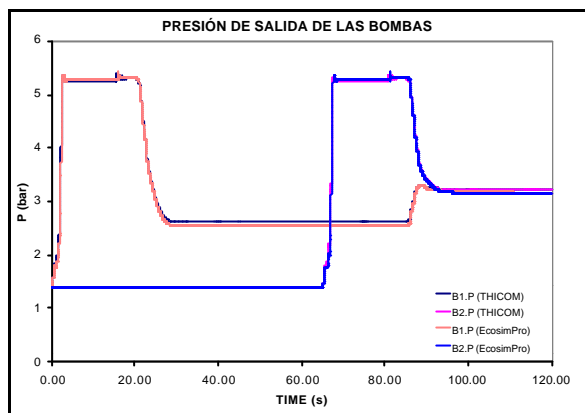


Figura 10: Presiones a la salida de las bombas

Se puede observar como con un tiempo de apertura de válvula de 10 s no existen problemas ni de sobrepresiones ni de depresiones en el sistema. Las presiones máximas son las originadas durante el vaciado del aire y las mínimas son debidas a la configuración geométrica del sistema. Se puede observar que el vaciado de aire de las tuberías de descarga de la primera bomba B1 se produce antes de los 20 s, antes de que se abra la válvula. Lo mismo ocurre en las tuberías de descarga de la segunda bomba B2.

En la siguiente figura (11) se muestra la evolución con el tiempo del flujo másico que circula por las bombas.

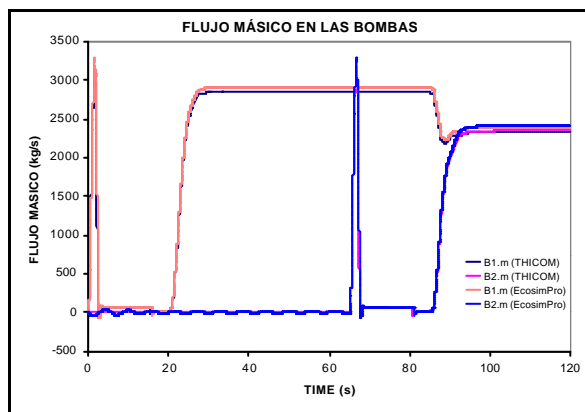


Figura 11: Flujos másicos en las bombas

Y finalmente en la figura (12) se muestra la evolución de la velocidad de giro de las bombas con el tiempo. Se observa la rapidez con que alcanzan las dos bombas su velocidad de giro de diseño.

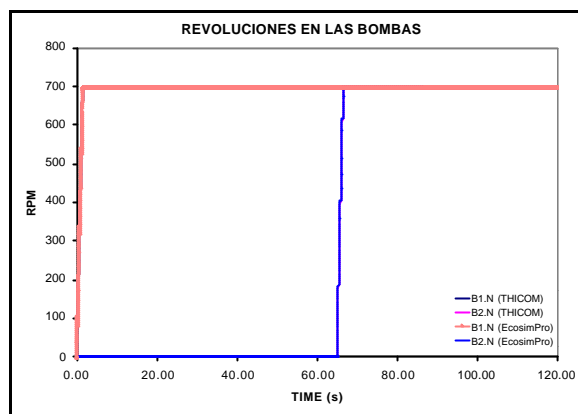


Figura 12: Velocidad de giro de las bombas

Las respuestas dinámicas obtenidas con la librería PIPELIQTRAN de EcosimPro son prácticamente iguales a las que se consiguieron con el programa de cálculo THICOM, como se puede comprobar en las diferentes figuras mostradas.

Las pequeñas discrepancias entre las dos respuestas son debidas a la dificultad de ajuste de los coeficientes de pérdida de presión y de las velocidades de sonido, ya que en el caso de THICOM son datos constantes mientras que en EcosimPro tanto la velocidad del sonido como los coeficientes de pérdida de presión son variables.

#### 4 CONCLUSIONES

Se ha podido desarrollar una librería en EcosimPro que permite realizar análisis precisos de transitorios hidráulicos. A pesar de que el método de las características es más eficiente y preciso para este tipo de estudios, el método utilizado en esta librería basado en ecuaciones diferenciales permite analizar de forma sencilla los diferentes casos de transitorios hidráulicos que se puedan presentar en un sistema sin necesidad de modificar el modelo inicial.

Además presenta la ventaja de que permite de forma sencilla y rápida incorporar a la librería nuevos componentes que pudieran resultar necesarios para la simulación de un sistema.

#### Referencias

- [1] Chaudry, M.H., (1987) "Applied hydraulics transients", Ed. Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- [2] Huélamo E., (2002) "Cálculo de transitorios hidráulicos del sistema de agua de circulación", EA, Madrid.

- [3] Idelchik I. E., (1986) "Handbook of Hydraulic Resistance", Hemisphere Publishing Corporation, USA.
- [4] Streeter V. L. and Wylie E. B., (1978) "Fluid Transients", McGraw-Hill Inc., USA.