

# **PROYECTO FIN DE CARRERA**

**MODELO DINÁMICO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DEL  
LABORATORIO DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS DE LA  
E.S.I.: ESTUDIO EN CONDICIONES FUERA DE DISEÑO**

Dpto. de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos  
Grupo de Máquinas y Motores Térmicos  
E.S. Ingenieros de Sevilla

Emilio Perucha Ortega

## ÍNDICE

- 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**
  
- 2. PROGRAMA DE MODELIZACIÓN DINÁMICA Y HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN: ECOSIMPRO Y SMARTSKECTH**
  - 2.1 ECOSIMPRO**
    - 2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA**
    - 2.1.2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES**
    - 2.1.3 HERRAMIENTAS DE ECOSIMPRO**
      - **LIBRERÍAS**
      - **VENTANA PRINCIPAL DEL PROGRAMA**
      - **MONITOR DE EXPERIMENTOS**
    - 2.1.4 PROCESO DE TRABAJO**
      - **PARTICIONES**
  - 2.2 SMARTSKETCH**
    - 2.2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA**
    - 2.2.2 COMPILAR PARA ECOSIMPRO**
  
- 3. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN DE REFRIGERACIÓN DE MOTORES Y FRENOS**
  - **ESQUEMAS DE LA INSTALACIÓN**
  
- 4. MODELIZACIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACION**
  - 4.1 MODELADO DE LA INSTALACIÓN**
    - **COMPONENTES**

## **4.2 COMPONENTES DE LA INSTALACIÓN**

- **DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO**
- **MODELIZACIÓN**
- **COMPONENTE ECOSIM**
- **ARCHIVO EL**

## **5. DESCRIPCION DEL MODELO ECOSIM POR BLOQUES**

## **6. RESULTADOS EXPERIMENTALES: ASPECTOS BÁSICOS DE LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN PARA CONDICIONES FUERA DE DISEÑO**

- **POTENCIA DEL MOTOR**
- **ESTADO DE LA TORRE DE REFRIGERACIÓN**

## **7. COMENTARIOS SOBRE EL USO DE EcosimPro Y SMARTSKETCH**

## **8. DESARROLLOS Y APLICACIONES FUTURAS**

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXO I. USO DE LA SIMULACIÓN**

### **I.I. EDICIÓN DE UN EXPERIMENTO**

### **I.II. COMPILAR UN EXPERIMENTO**

### **I.III. EJECUTAR UN EXPERIMENTO EN LA INTERFAZ DE ECOSIM**

### **I.IV. EJECUTAR UN EXPERIMENTO EN EL MONITOR DE EXPERIMENTOS**

### **I.V. MODO DE EJECUCIÓN DE LA SIMULACIÓN DE LA INSTALACIÓN DE REFRIGERACIÓN DE MOTORES Y FRENOS DEL LABORATORIO**

## **ANEXO II. COMPONENTES GENÉRICOS: ARCHIVOS EL**

### **I.I. COMPONENTE CONTORNO**

### **I.II. COMPONENTE TABLAS**

## **1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.**

La aplicación de las nuevas tecnologías a cualquier sector de la sociedad es hoy en día un hecho. El poder controlar numerosos aspectos del mundo laboral mediante la informatización posibilita un manejo más fácil, ambicioso y económico del ensayo.

Este es el punto de partida que dio lugar a este proyecto desde el Grupo de Motores Térmicos de Sevilla. Este departamento cuenta con la reciente construcción de un laboratorio de ensayos de máquinas y motores térmicos situado en el área de edificios de laboratorios de los distintos departamentos de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. Con la idea de aprovechar los avances de la informatización se pretende en un futuro contar con un laboratorio virtual que permita la realización simulada de ensayos de máquinas y motores térmicos de forma que se pueda variar la entrada y conocer la salida. Ello, claro está, siempre reflejando fielmente lo que ocurriría en un ensayo real.

Este proyecto constituye básicamente el inicio de esa modelización del laboratorio, centrándose en el modelado y la simulación del sistema de refrigeración de motores y frenos perteneciente a las instalaciones del laboratorio.

Para ello se suministró por parte del departamento de Motores Térmicos un programa de simulación y diseño recién adquirido por el Grupo que prometía una fácil modelización del sistema. Dentro de este proyecto se contempla además una breve presentación del programa en cuestión, EcosimPro, y de la herramienta de dibujo asociada, el programa 2D CAD SmartSketch, así como una guía fácil para utilizar la simulación realizada de la instalación. Por último, se añaden unos comentarios sobre el uso de estos programas y la opinión personal acerca de ellos.

Hay que señalar además que el modelado del sistema pretende simular el funcionamiento de éste como instalación de refrigeración, pero no ser una representación fiel de todos los componentes que físicamente existen en la realidad, ya que muchos de ellos sólo son formas de medir caudales o presiones y no afectan al comportamiento como refrigeración.

## **2. PROGRAMA DE MODELIZACIÓN DINÁMICA Y HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN: ECOSIMPRO Y SMARTSKETCH.**

### **2.1 ECOSIMPRO.**

#### **2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA.**



La modelización del sistema se ha realizado mediante un programa comercial adquirido por el Grupo de Motores Térmicos de Sevilla (GMTS). El programa es Ecosimpro, de Empresarios Agrupados, que está especialmente ideado para modelar cualquier sistema que se rija por ecuaciones algebraicas y diferenciales, con el especial atractivo de contar con una interfaz muy amena y que permite el control gráfico y fácil de cualquier variable a la hora de ejecutar un experimento.

#### **¿Qué es EcosimPro?**

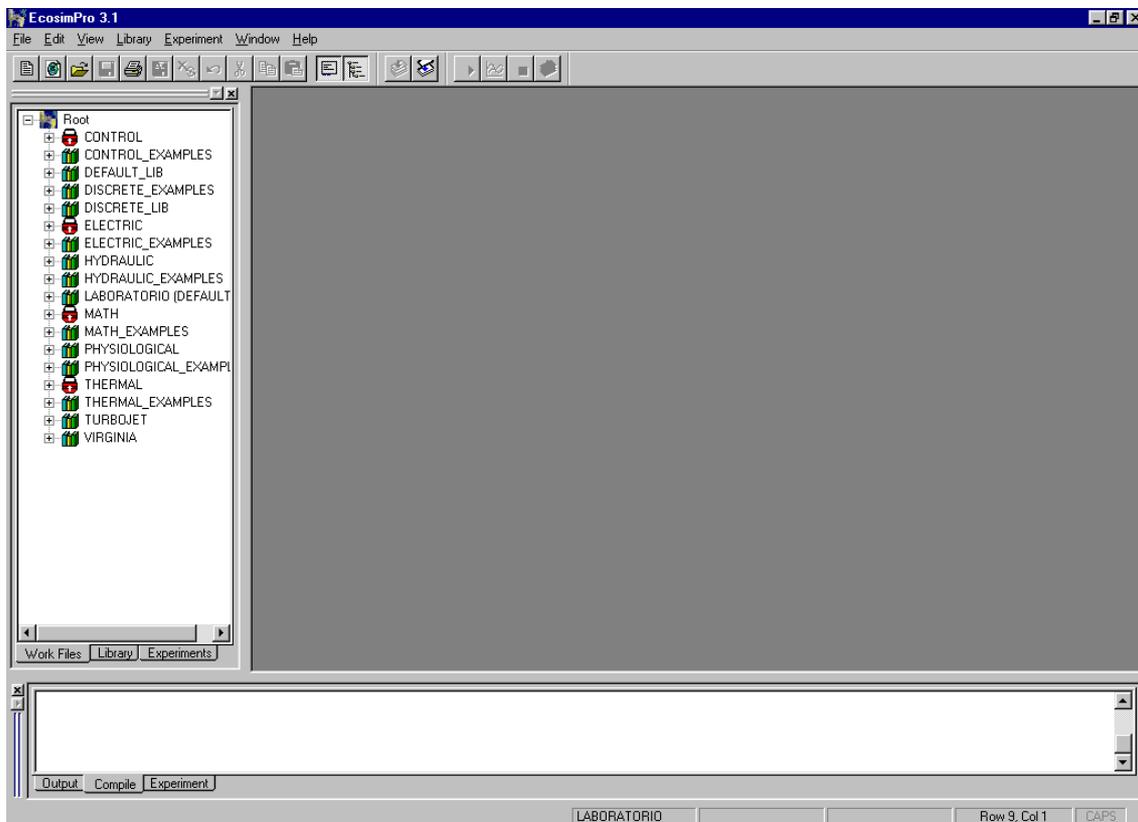
EcosimPro es una herramienta muy poderosa de simulación continua y discreta. Ofrece un amplio surtido de herramientas de modelización y simulación, basado en más de veinte años de experiencia como ingeniería de simulación de sistemas complejos.

El desarrollo de EcosimPro arranca desde un diverso campo de disciplinas ingenieriles: simulación, programación orientada y un moderno diseño de interfaz para el usuario.

Normalmente los ingenieros pasan el 80% del tiempo con la programación y un 20% modelando, tratando con muchos campos fuera de su especialización. El principal objetivo del diseño de EcosimPro es darle la vuelta a esta situación y permitir que el

ingeniero ocupe el 80% del tiempo en la modelización física y sólo el 20% programando. EcosimPro se encarga internamente de la complejidad de la resolución de las ecuaciones, optimizar el modelo numérico y resolver sistemas de ecuaciones lineales y no lineales. EcosimPro tiene su propio lenguaje: EL. Este lenguaje es muy intuitivo para el ingeniero y las ecuaciones se escriben prácticamente igual a su forma algebraica. EL incorpora los últimos avances en tecnología de programación, como el encapsulado, enumeración de tipos de datos, herencia múltiple y arrays multidimensionales, que permiten al ingeniero familiarizarse con el lenguaje y reutilizar fácilmente componentes para crear un nuevo modelo.

La interfaz gráfica de EcosimPro resultará familiar a cualquier usuario de entornos desarrollados bajo Microsoft Windows, en especial Microsoft Visual C++ y Visual Basic. Se trata de un entorno visual muy intuitivo en el que el usuario puede rápida y fácilmente crear librerías, componentes, archivos de simulación, etc, y realizar de forma práctica la modelización.



EcosimPro es una herramienta abierta. A diferencia de otros sistemas de simulación, EcosimPro no es dominio específico de un campo de aplicación: las librerías ya han sido desarrolladas para poder ser utilizadas en distintas áreas. Más aún, es fácil extender el uso del programa a partir de la creación de nuevas librerías de componentes escritos en el lenguaje de modelización de EcosimPro. Es fácil reutilizar subrutinas adicionales de FORTRAN, C o C++ que pueden ser llamadas desde el lenguaje de EcosimPro.

EcosimPro puede utilizarse para estudiar:

- Comportamiento transitorio
- Estado estacionario
- Estudios paramétricos
- Experimentos complejos utilizando funciones de FORTRAN, C, C++, etc.

El desarrollo de EcosimPro ha sido financiado principalmente por la propia compañía y por la Agencia Europea del Espacio (ESA).

Los usuarios potenciales de EcosimPro pueden ser ingenieros, físicos, químicos, matemáticos, biólogos, etc, para modelar procesos simples y complejos. EcosimPro puede ser aplicado fácilmente a campos multidisciplinarios: Química, Fluidos, Control, Mecánica, etc; en general, cualquier problema modelado ecuaciones algebraicas y diferenciales. También es útil para los universitarios para aprender a modelar problemas físicos y para proyectos fin de carrera y doctorados.

En el caso de este proyecto, EcosimPro se ha utilizado para modelar el comportamiento de un fluido, el agua, a través de un conjunto tan variado de elementos como es todo un sistema de refrigeración y control de temperatura. El empleo de este programa ha inducido un modelo por componentes, de forma que cada elemento de la instalación ha sido modelado de forma independiente. Esto ha reportado la creación de una librería de elementos relacionados con la Hidráulica que pueden ser posteriormente reutilizados en cualquier otro sistema.

## **Objetivos perseguidos por EcosimPro.**

Los principales objetivos a la hora de modelar un sistema dinámico serán:

- Velocidad, cumpliendo con los requerimientos de cada aplicación
- Corrección, los resultados han sido comparados con los resultados reales
- Robustez, los modelos no tienen frecuentes problemas numéricos o de convergencia
- Extensibilidad, fáciles de extender en un futuro
- Facilidad para ser modificados
- Legible, listas simples fáciles de seguir
- Modular, descompuesto en librerías, componentes y puertos de una manera lógica
- Reutilizable, para construir otros componentes similares usando la herencia o la agregación
- Compatibilidad
- Integridad, facilidades para especificar restricciones en la integridad del modelo y la propagación de errores

Los dos principios básicos para mejorar la extensibilidad son:

- Simplicidad en el diseño. Una simple arquitectura es siempre más fácil de adaptar a cambios que una compleja.
- Descentralización. Hacer módulos tan autónomos como sea posible de forma que la probabilidad de un simple cambio sólo afectará a un módulo o a un número pequeño de ellos. Si no, el cambio podría dar lugar a una reacción en cadena.

Si nos aplicamos en estos principios, los componentes desarrollados con el lenguaje EL pueden ser reutilizados fácilmente para modelar otros que sean similares o más complejos. Estos factores determinarán la calidad de la programación de un sistema dinámico.

### 2.1.2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES.

Los conceptos llave a la hora de modelar con el programa EcosimPro son:

- **Componente:** Representa un modelo del sistema simulado, mediante variables, ecuaciones diferenciales y algebraicas, topología y comportamiento basado en sucesos.
- **Tipo de puerto de conexión:** Esto define por un lado un conjunto de variables que serán intercambiadas en las conexiones, y por otro, el comportamiento y las restricciones a cumplirse cuando existen conexiones entre más de dos puertos. Por ejemplo, en un tipo de puerto de conexión eléctrico se usa la tensión y la corriente como variables de uso en las conexiones. La conexión puerto evita conectar variables individuales; en cambio se manejan grupos de variables juntas.
- **Partición:** Para simular un componente, el usuario tiene que definir su modelo matemático asociado, llamado partición. Un componente puede tener asociadas más de una partición. Por ejemplo, si un componente tiene varias condiciones límite, es decir, valores de variables que son conocidas, según el grupo de variables seleccionadas, cada uno produce una partición o modelo matemático distinto. El siguiente paso es generar experimentos para cada partición. La partición de un componente define la causalidad del modelo final.
- **Experimento:** Los experimentos realizados para cada partición del componente representan los distintos casos de simulación. En ellos se dan los valores o funciones conocidas en función del tiempo para las variables límite, y en cada uno de ellos pueden ser distintos. Los experimentos pueden ser triviales para calcular un estado estacionario, ó muy complejos con muchos estados estacionarios y transitorios cambiando múltiples variables en el modelo.
- **Librería de componentes:** Todos los componentes se clasifican en distintas disciplinas dentro de las librerías.

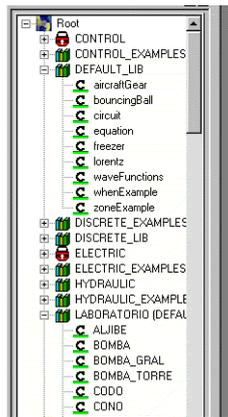
### **2.1.3 HERRAMIENTAS DE ECOSIMPRO.**

Las herramientas de Ecosim constan de los siguientes módulos de software:

- El Lenguaje de Simulación de EcosimPro (EL) para expresar tanto la simulación de componentes como sus experimentos en forma de texto.
- Las librerías de componentes de EcosimPro, clasificadas por disciplinas (Energía, Propulsión, Control, etc.).
- La ventana principal de EcosimPro, que provee al usuario de un entorno de fácil utilización a la hora de crear nuevos componentes usando el lenguaje EL.
- La herramienta de SmartSketch. Se trata de un programa gráfico 2D CAD de Intergraph y que permite mediante el dibujo una simulación gráfica que puede ser compilada como un componente de EcosimPro.
- Un monitor gráfico para experimentos que permite ejecutar simulaciones y plotear gráficas de variables.

- **Librerías de EcosimPro.**

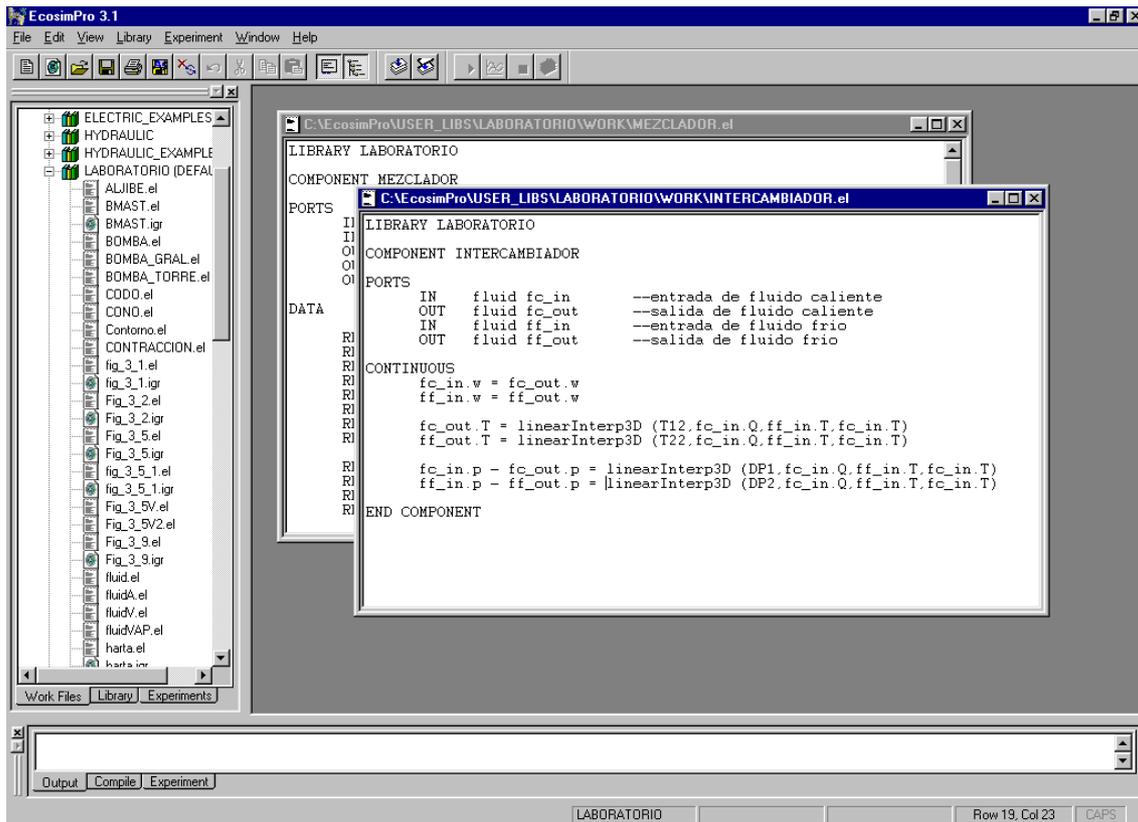
En EcosimPro todo está insertado dentro de una determinada librería. Normalmente las librerías están clasificadas por disciplinas como Electrical, Control, Fluid, etc. EcosimPro dispone de un conjunto de librerías estándar y de otras que pueden ser solicitadas aparte. Para este proyecto, como ya se ha comentado, se ha tenido que construir la librería propia del laboratorio, lo que ha supuesto parte del proyecto.



La siguiente figura muestra la configuración típica de las librerías de EcosimPro. Existe una raíz y distintas librerías dentro de ella. Ahí también se ha ubicado la librería realizada a causa de este proyecto, LABORATORIO. Cada librería contiene distintos elementos, como componentes, tipos puerto y funciones.

- **Ventana principal de EcosimPro.**

EcosimPro dispone de una interfaz muy potente para construir nuevos componentes. La apariencia de la ventana principal de EcosimPro es similar a las de Microsoft Visual C++ y Visual Basic:



Las principales áreas son:

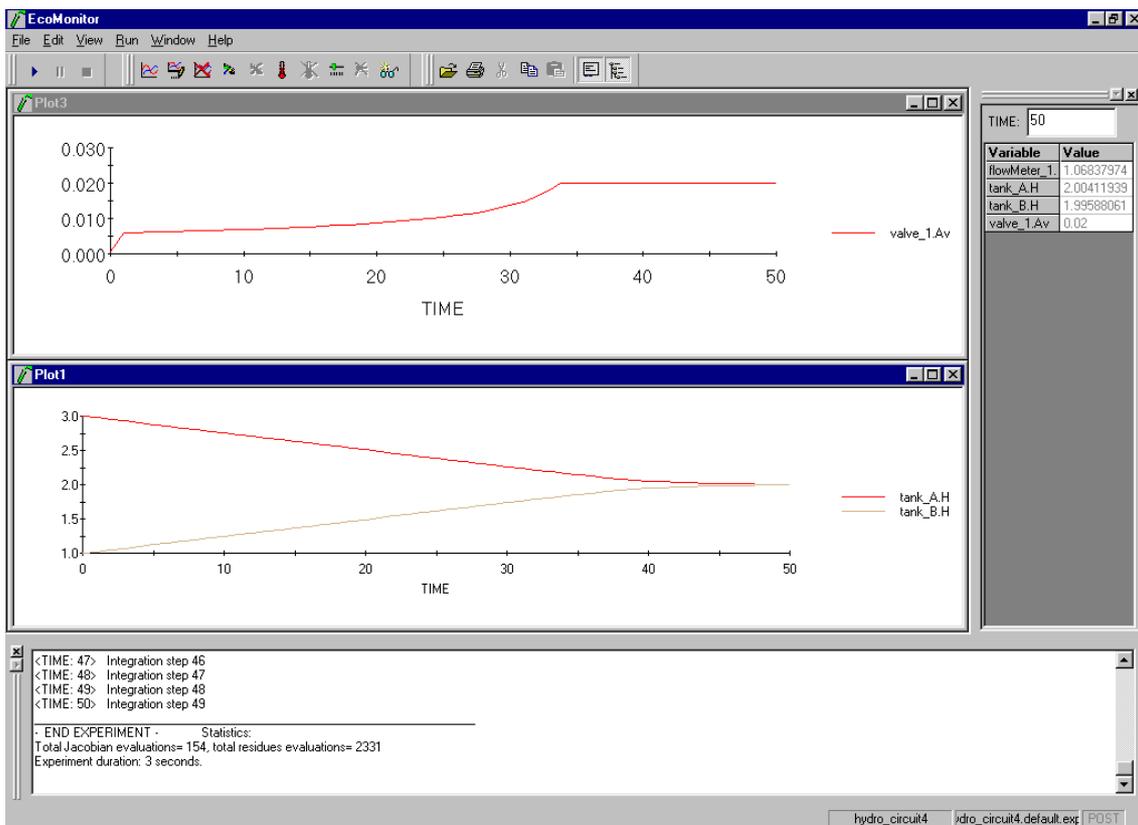
- Área de edición: la zona de la derecha corresponde a las ventanas de edición. Cada ventana está asociada a un fichero que puede contener uno o más componentes, puertos, funciones, etc.
- Área de exploración: la parte de la izquierda muestra tres pestañas para diferentes vistas de las librerías:

- Work files: para los ficheros de EL y SmartSketch asociados a las librerías.
  - Library: para navegar a través de las librerías activas.
  - Experiments: para navegar entre los experimentos creados para simular los componentes.
- 
- Ventana de mensajes: la zona inferior contiene también tres ventanas distintas que despliegan los mensajes del sistema, compilador y simulación.

En esta ventana el usuario crea componentes, librerías, modelos matemáticos, experimentos, etc, y también correr simulaciones sin herramientas gráficas. Las simulaciones con salidas gráficas se ejecutan en el Monitor de Experimentos.

- **Monitor de Experimentos.**

Se utiliza para correr simulaciones con salidas gráficas y se lanza desde la ventana principal de EcosimPro. Después de crear el experimento, se accede a este monitor picando con el botón derecho sobre el nombre del experimento en el área de exploración y seleccionando la opción “Experiment in Monitor”, con lo que se despliega la correspondiente ventana:

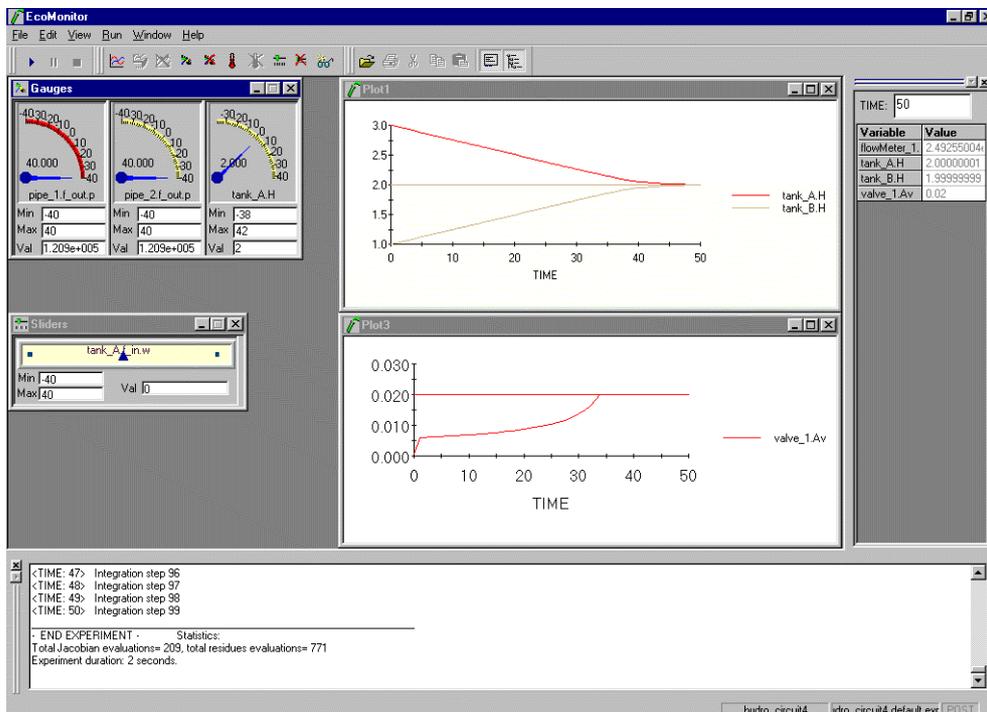


La ventana se divide en las siguientes áreas:

- Área de menú (zona superior): contiene los menús para crear dibujos, variables de seguimiento, cálculo de estados estacionarios y transitorios, etc.

- Área de dibujo (amplia zona izquierda): contiene todos los gráficos de la simulación. Pueden simultanearse varias ventanas y variables de seguimiento. Cada una de estas ventanas puede extraerse y volcarse en una aplicación de Office.
- Área de vista (zona derecha): despliega distintos valores de las variables elegidas. Su valor se actualiza en cada intervalo de comunicación. La simulación actual con el tiempo se muestra en la parte superior.
- Área de mensajes: todas los sucesos que se den en la simulación aparecen en esta ventana. Ello permite seguir y controlar la simulación y trazar pasos de integración.

El Monitor de Experimentos permite también al usuario seleccionar indicadores para controlar los valores de las variables y medidores desde los cuales pueden cambiarse dinámicamente datos ó condiciones límite:



### 2.1.4 PROCESO DE TRABAJO EN ECOSIMPRO.

Un componente de EcosimPro puede construirse igualmente desde el principio de la nada, introduciéndole todos los campos necesarios, que desde otros componentes básicos predefinidos, lo que se llamaría componente hereditario. Así mismo, un componente puede ser cogido desde una librería del sistema ó ser definido por el usuario.

Cada componente contiene una descripción matemática de la realidad física que representa.

Los componentes tienen interfaces entre ellos mediante los puertos de conexión. Así, pueden unirse componentes a través de sus puertos para formar un nuevo componente. EcosimPro se considera jerárquico en el sentido de que los modelos pueden tener también puertos y así ser unidos a otros componentes para crear componentes más complejos.

Como se apuntó antes, los componentes pueden heredar un comportamiento de otros componentes, permitiendo reutilizar el código probado y testado de los componentes padres.

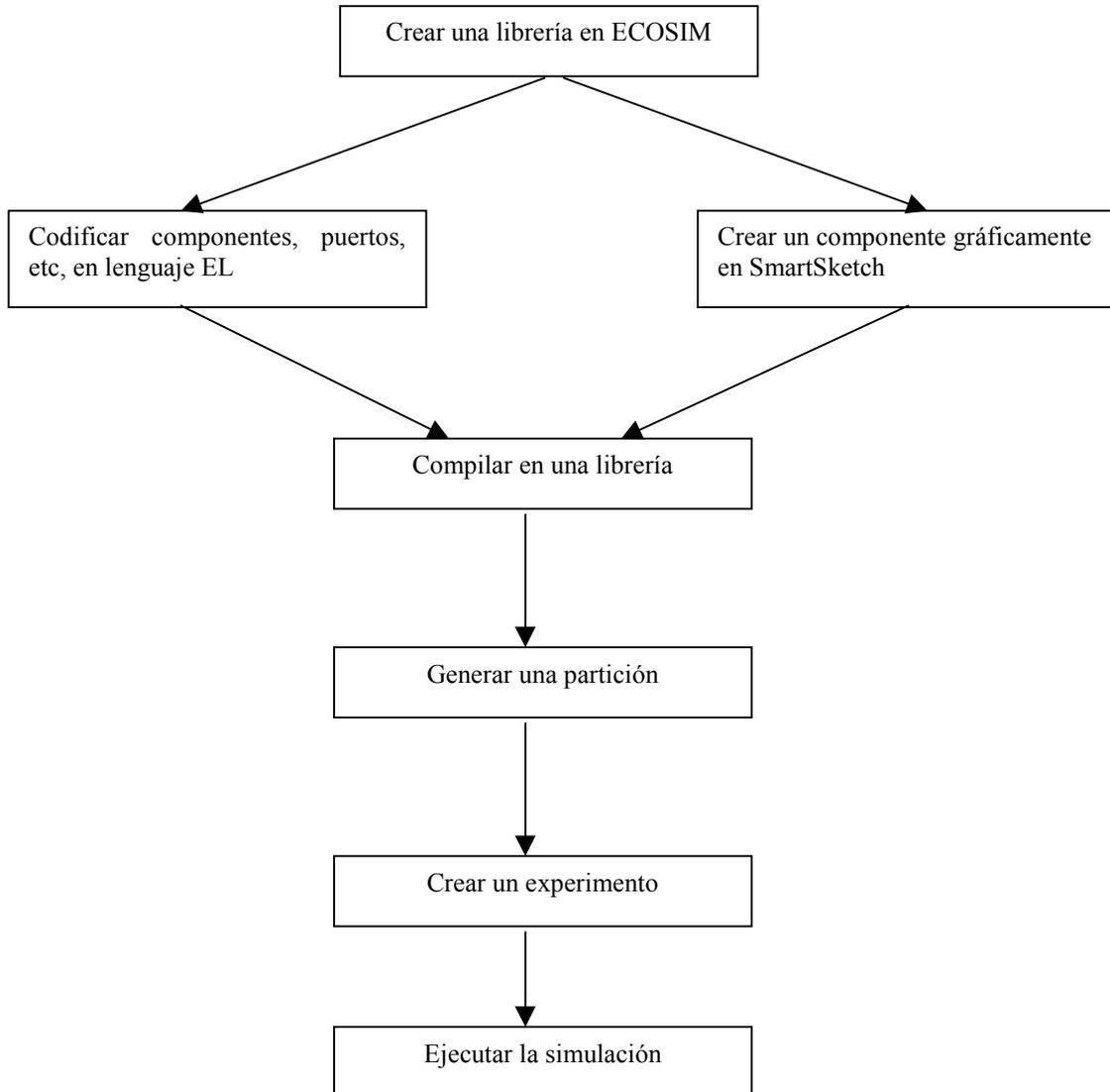
Un experimento define las condiciones iniciales, a veces necesarias para comenzar el proceso de resolución, y las condiciones límite del modelo matemático, y las soluciones deseadas (en estado transitorio ó estacionario).

Los experimentos pueden ser desde triviales y simples hasta muy complejos usando lenguaje secuencial con las instrucciones básicas de **for**, **while** e **if**, llamadas a otras funciones, etc, e incluso funciones especiales para calcular estados estacionarios, integración del modelo, etc.

El proceso de crear componentes en EcosimPro consta de los siguientes pasos:

- Lo primero es crear (o reutilizar) una librería y luego codificar el nuevo componente y tipo(s) de puerto, bien utilizando el lenguaje de EcosimPro (EL) ó la herramienta gráfica SmartSketch. Esta última forma consiste en usar un programa gráfico, asociado a EcosimPro en su configuración, de forma que mediante símbolos se conforma el nuevo componente y luego existe la opción de crear automáticamente en EcosimPro el archivo de lenguaje EL asociado.
- El siguiente paso, simular el componente, incluye generar un modelo matemático asociado o partición, y después crear un experimento para esa partición.
- Finalmente, hay que correr la simulación, bien en modo **batch** (dejándolo simplemente ejecutarse) ó en modo visual, utilizando la herramienta de EcosimPro del Monitor de Experimentos, donde se permite observar la evolución gráfica de cualquier variable definida y representar resultados.

El siguiente esquema muestra el modo de trabajo a seguir con EcosimPro:



- **Particiones.**

La partición en EcosimPro es un paso intermedio entre el componente y el experimento. Una partición es un modelo matemático del componente.

Cuando se quiere simular un componente se necesita primero definir una partición y luego crear experimentos para esa partición. Ecosimpro además provee de una partición por defecto para cada componente. Pero un componente puede tener más de una partición, y cada una de ellas más de un experimento.

Puede haber problemas físicos que sólo convergen si la variable correcta se elige para resolver un problema de alto índice. En estos casos Ecosimpro tiene poco que hacer con el conocimiento matemático que tiene del problema. Lo que necesita es el conocimiento físico que sólo el usuario puede aportar.

Ecosimpro puede hacer distintas particiones en función de tres factores:

- Condiciones límite: imponen condiciones sobre las variables que son conocidas en un determinado experimento para hacer coincidir el número de ecuaciones con el de incógnitas. Estas variables no pueden ser cualquiera, y en la misma partición Ecosimpro comprueba la validez de ellas, de forma que luego pueda resolverse el problema.
- Puntos de break en **problemas circulares**: el usuario debe elegir las variables para romper el círculo.
- Resolución de problemas de alto índice
- Cambio de una variable definida como dato a incógnita

## 2.2 SMARTSKETCH.

### 2.2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA.



SmartSketch es un programa de dibujo desarrollado por Intergraph Corporation para la creación de gráficos 2D y soluciones bajo entorno Windows. Se trata de una herramienta poderosa que complementa a Microsoft Office y forma parte de las herramientas de CAD como herramienta básica de diseño.

SmartSketch es una aplicación que permite crear rápidamente sketches (dibujos, símbolos), diseños complejos de ingeniería, producción de dibujos, esquemas, diagramas de negocios, planos, y mucho más.

EcosimPro utiliza SmartSketch como una herramienta de entorno para generar componentes en EL. En EcosimPro todos los componentes pueden crearse utilizando el lenguaje EL, incluso si tienen una topología muy compleja. Sin embargo, EcosimPro, utilizando la herramienta 2D CAD SmartSketch, provee de una forma más fácil para crear componentes complejos (y simples) de forma gráfica sin tener que aprender detalles del lenguaje EL. En otras palabras, el usuario crea un modelo esquemático y desde éste, un software especial generará automáticamente el código EL asociado. El usuario tendrá acceso a este código como se explicará posteriormente.

Al utilizar SmartSketch, el usuario debe proveer a los componentes con los apropiados datos, dimensiones, etc. Al final, el compilador utilizado desde SmartSketch detectará si existe alguna incongruencia. En los casos pertinentes el compilador generará un mensaje de error y el usuario deberá corregir el problema.

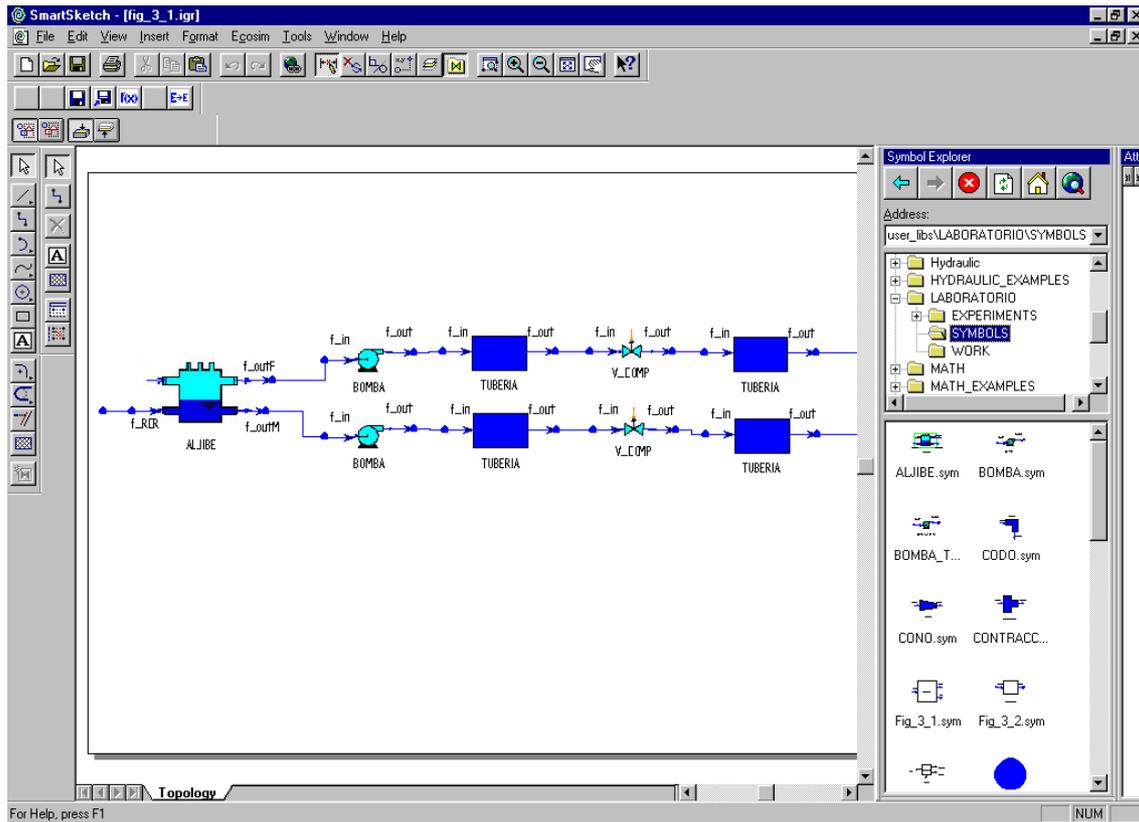
El programa SmartSketch contienen muchas más aplicaciones de las que EcosimPro requiere y que el usuario de EcosimPro no necesita saber. En realidad, el conocimiento requerido de SmartSketch para utilizar EcosimPro se aprende en menos de una hora. Sin embargo, SmartSketch supone un programa profesional para construir modelos CAD industriales y dispone de muchas funciones que permiten crear dibujos 2D muy complejos.

A continuación se explica brevemente un ejemplo del funcionamiento de SmartSketch.

La pantalla de SmartSketch posee tres áreas principales:

- Área de dibujo: es donde se trabaja directamente en SmartSketch para dibujar el sistema, componentes, conexiones, etc.
- Área de herramientas: incluye las barras de herramientas, tanto para dibujos como para opciones de trabajo.
- Área de símbolos: contiene el navegador y la paleta de símbolos.

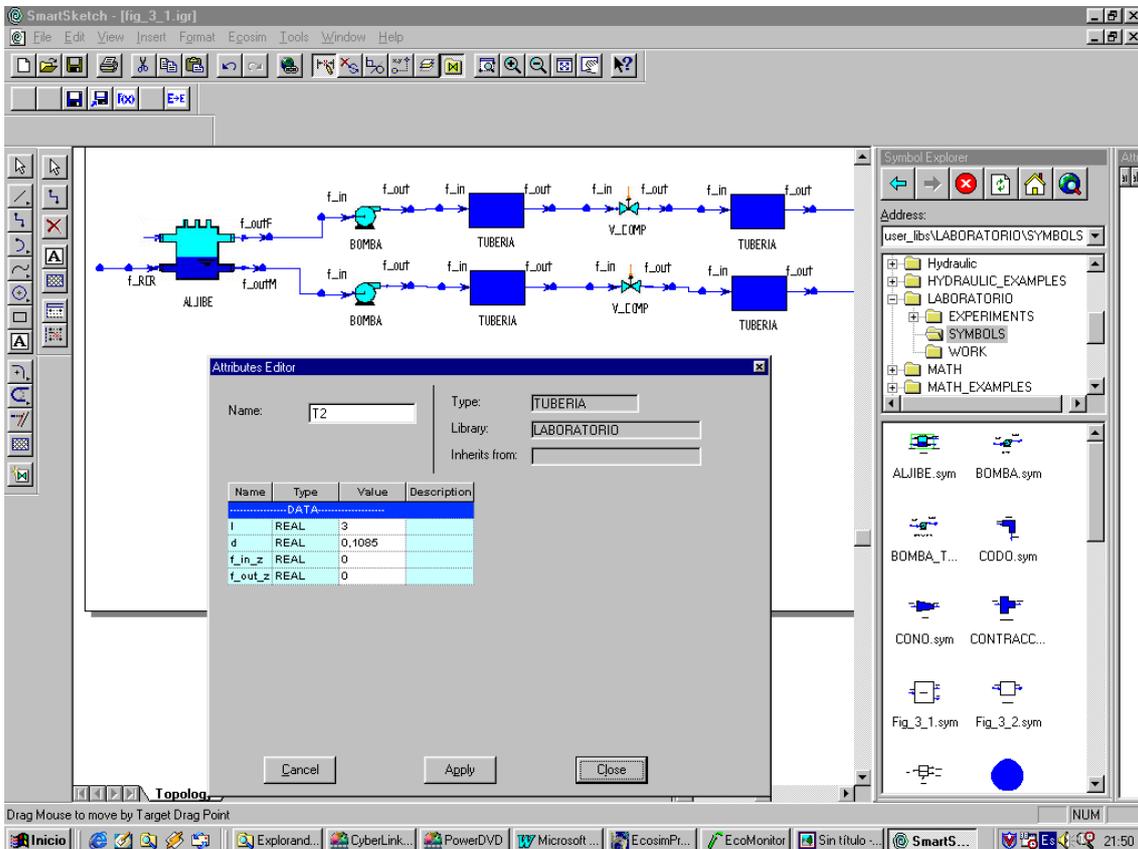
La siguiente figura muestra un componente creado con SmartSketch. En la parte derecha de la ventana aparece la paleta de componentes disponibles de una determinada librería (un icono para cada componente). El usuario puede arrastrar los componentes de la paleta hacia su dibujo y luego conectarlos y establecer los atributos de cada uno de ellos. Con esto se obtiene un componente más complejo a partir de la unión de varios.



Por último, seleccionando la opción de compilar **Compile into EcosimPro libraries** se crea un nuevo componente en EcosimPro. Este componente puede entonces ya simularse normalmente como si hubiese sido creado en EcosimPro mediante el lenguaje EL, ya que el archivo EL correspondiente se ha generado automáticamente. Esta acción está dentro del menú de EcosimPro que posee SmartSketch y que da acceso a los comandos de EcosimPro, también disponibles en botones de acceso directo.



SmartSketch dispone además de editores visuales para introducir las propiedades de los objetos. Cada componente encapsula la información matemática acerca del componente físico que representa. Los atributos del componente (datos, parámetros y declaraciones) pueden editarse simplemente mediante la selección del objeto y ejecutar el editor de atributos **Attributes editor**, bien desde el menú ó desde el icono. Otra alternativa es hacer doble click sobre el componente elegido y se desplegará una ventana para la edición del objeto:

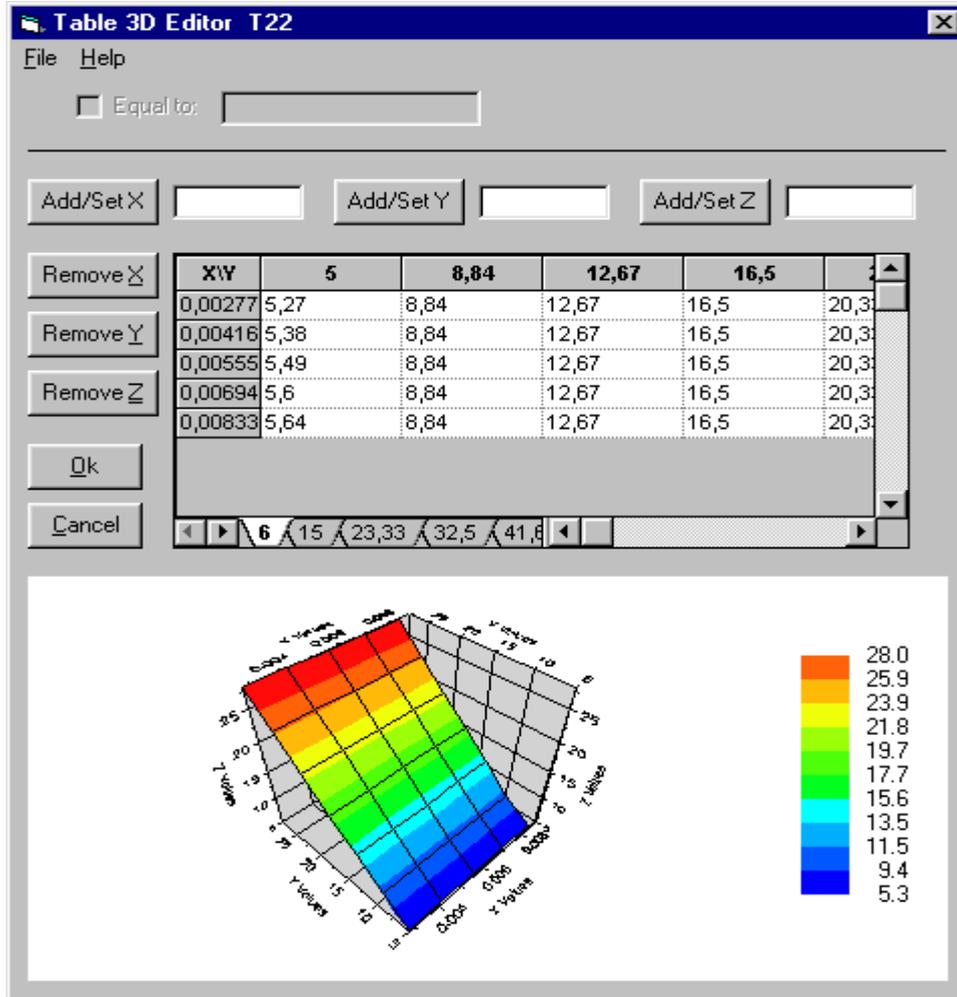


La ventana del editor de atributos contiene información que identifica el componente que está siendo editado (nombre, tipo, librería, herencia) e información sobre los datos, parámetros y declaraciones del componente. La información acerca de los datos, parámetros y declaraciones se encuentra accesible pinchando en las barras de Data, Params y Decl.

El editor de objetos acepta diferentes tipos de datos propios del lenguaje de EcosimPro: REAL, INTEGER, ENUMERATION, BOOLEAN y tablas de una, dos y tres dimensiones. Estos editores permiten al usuario modificar los atributos de un objeto de una forma muy intuitiva.

Una herramienta especial de edición está disponible para editar arrays (cadenas). Cuando el campo de un dato es del tipo array el editor de atributos despliega el valor **Array** en el campo **Type**. Cualquiera que sea la dimensión del array, éste aparecerá inicializado como es en el archivo EL correspondiente. Para editar un array simplemente habrá que picar en el campo **Edit** localizado a la derecha del array en cuestión.

La siguiente figura muestra la edición de una tabla 2D para un atributo de un componente:



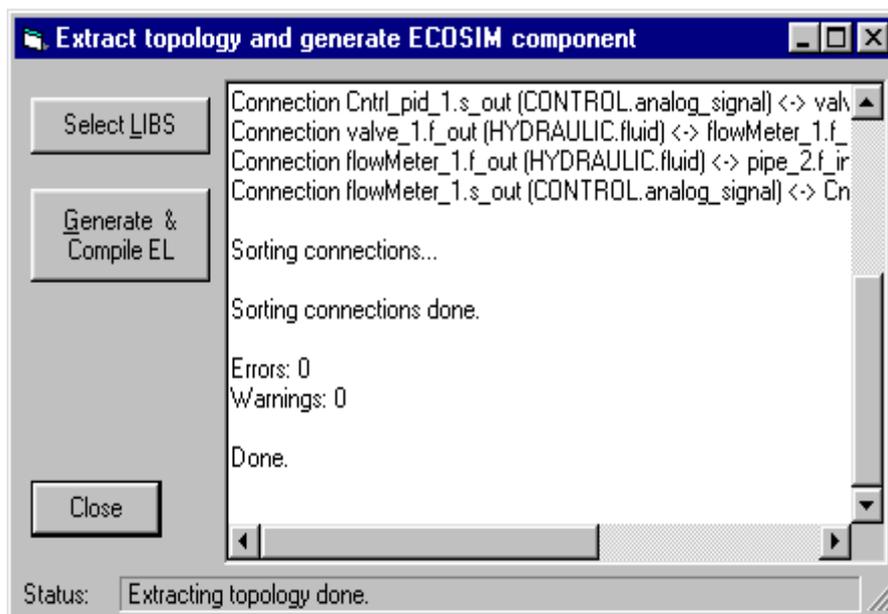
El usuario puede modificar dinámicamente los valores de la tabla y el gráfico se actualiza automáticamente.

- **Compilar para EcosimPro.**

Es la selección más importante, utilizada para compilar el esquema final para EcosimPro.



El usuario debe dar el nombre del componente y la librería de EcosimPro donde insertarlo. Posteriormente el sistema extraerá automáticamente la topología del esquema y generará el código EL para el nuevo componente.



Finalmente debe seleccionarse la opción **Generate/Compile EL** para generar automáticamente el código EL correspondiente. Si la compilación es satisfactoria aparecerá un mensaje de aprobación.

El usuario puede examinar en la librería correspondiente dentro de la ventana de trabajo de EcosimPro que aparece el componente construido desde SmartSketch.

### **3. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN DE REFRIGERACIÓN DE MOTORES Y FRENOS.**

La instalación de refrigeración de motores y frenos del laboratorio se encuentra dentro del mismo laboratorio de motores y en sus proximidades. Como ya se comentó, se va a seguir una descomposición en bloques de la instalación, de forma que sea más fácil su seguimiento.

El sistema de refrigeración se ha dividido en cuatro bloques:

El **BLOQUE I** se compone del depósito de almacenamiento de agua, el aljibe, que proporcionará el agua necesaria para la refrigeración tanto de motores como de frenos; igualmente están las bombas que permitirán el abastecimiento de agua a las celdas de ensayo; y por último la valvulería y tuberías necesarias para la distribución del agua.

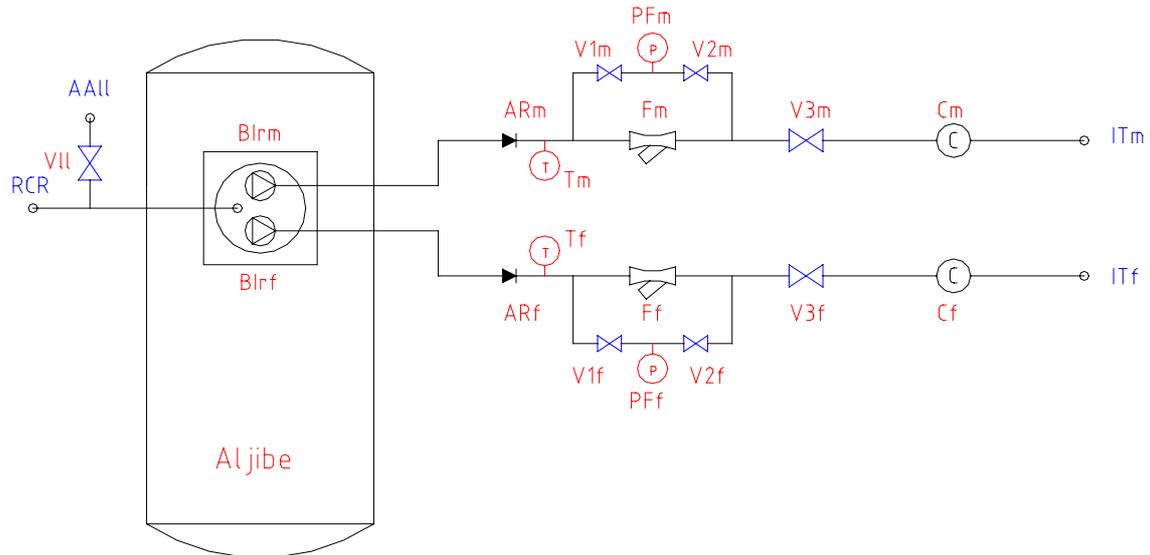
El segundo bloque, **BLOQUE II**, contiene los elementos y equipos necesarios para enfriar el agua: dos torres de refrigeración (una para la refrigeración de motores y otra para la de frenos) y los elementos de bombeo y distribución necesarios.

El tercer bloque, **BLOQUE III**, está formado por el sistema de distribución del agua para el abastecimiento de agua fría a las celdas de ensayo y su retorno al aljibe, procedente de la refrigeración de motores y frenos.

Por último, el **BLOQUE IV** se compone de los elementos de control de caudal y temperatura del agua que debe entrar directamente en los motores y frenos. Este bloque aparece de forma simultánea en cada celda de ensayo, con distintas dimensiones según el rango de potencias de los motores que se ensayarán para el que esté diseñado cada celda.

## BLOQUE I. Aljibe para almacenamiento de agua y sistema de impulsión.

La figura **3.1** representa el esquema del BLOQUE I, compuesto del depósito de almacenamiento de agua (aljibe) y los elementos de bombeo y distribución.



**Figura 3.1**

Los elementos de interés de este bloque son:

- **AA<sub>II</sub>**: aporte de agua para llenado inicial del aljibe.
- **Aljibe**: depósito de almacenamiento de agua para la refrigeración.
- **AR<sub>f</sub>**: válvula antirretorno para evitar el vaciado de la tubería de impulsión a la torre de refrigeración de frenos al parar la instalación.
- **AR<sub>m</sub>**: válvula antirretorno similar a la anterior correspondiente a la refrigeración de motores.
- **BI<sub>rf</sub>**: bomba de impulsión de agua al circuito de refrigeración de frenos.
- **BI<sub>rm</sub>**: bomba de impulsión de agua al circuito de refrigeración de motores.
- **C<sub>f</sub>**: caudalímetro de lectura visual para el circuito de frenos.
- **C<sub>m</sub>**: caudalímetro de lectura visual para el circuito de motores.

- **F<sub>f</sub>**: filtro para el caudal que circula por el circuito primario del intercambiador de calor del sistema de enfriamiento de frenos.
- **F<sub>m</sub>**: filtro para el caudal que circula por circuito primario del intercambiador de calor del sistema de enfriamiento de motores.
- **IT<sub>f</sub>**: impulsión de agua del aljibe hacia el sistema de refrigeración de frenos.
- **IT<sub>m</sub>**: impulsión de agua del aljibe hacia el sistema de refrigeración de motores.
- **PF<sub>f</sub>**: manómetro de lectura visual para medir las presiones estáticas a la entrada y salida del filtro F<sub>f</sub>.
- **PF<sub>m</sub>**: manómetro de lectura visual para medir las presiones estáticas a la entrada y salida del filtro F<sub>m</sub>.
- **RCR**: punto de retorno de agua al aljibe procedente de la refrigeración tanto de frenos como de motores.
- **T<sub>f</sub>**: termómetro de lectura visual para medir la temperatura en la impulsión hacia la refrigeración de frenos.
- **T<sub>m</sub>**: termómetro de lectura visual para medir la temperatura en la impulsión hacia la refrigeración de motores.
- **V1<sub>f</sub>**: válvula de mariposa para que P<sub>Ff</sub> mida la presión estática antes de F<sub>f</sub>.
- **V1<sub>m</sub>**: válvula de mariposa para que P<sub>Fm</sub> mida la presión estática antes de F<sub>m</sub>.
- **V2<sub>f</sub>**: válvula de mariposa para que P<sub>Ff</sub> mida la presión estática antes de F<sub>f</sub>.
- **V2<sub>m</sub>**: válvula de mariposa para que P<sub>Fm</sub> mida la presión estática antes de F<sub>m</sub>.
- **V3<sub>f</sub>**: válvula de compuerta para el corte de suministro de agua al sistema de enfriamiento de frenos.
- **V3<sub>m</sub>**: válvula de compuerta para el corte de suministro de agua al sistema de enfriamiento de motores.
- **V<sub>II</sub>**: válvula de mariposa para el llenado del aljibe.

## BLOQUE II. Sistema de enfriamiento de agua.

Este bloque corresponde a los elementos destinados a enfriar el agua procedente de la refrigeración de los motores y los frenos.

La refrigeración de ambos sistemas es independiente aunque muy parecida. La estructura básica de cada uno de ellos comprende una torre de refrigeración, un intercambiador de calor de placas líquido-líquido y la valvulería y elementos de bombeo y distribución necesarios.

### Refrigeración del agua destinada a la refrigeración de los motores.

La siguiente figura (**figura 3.2**) muestra el esquema del sistema de enfriamiento del agua proveniente de la refrigeración de los motores:

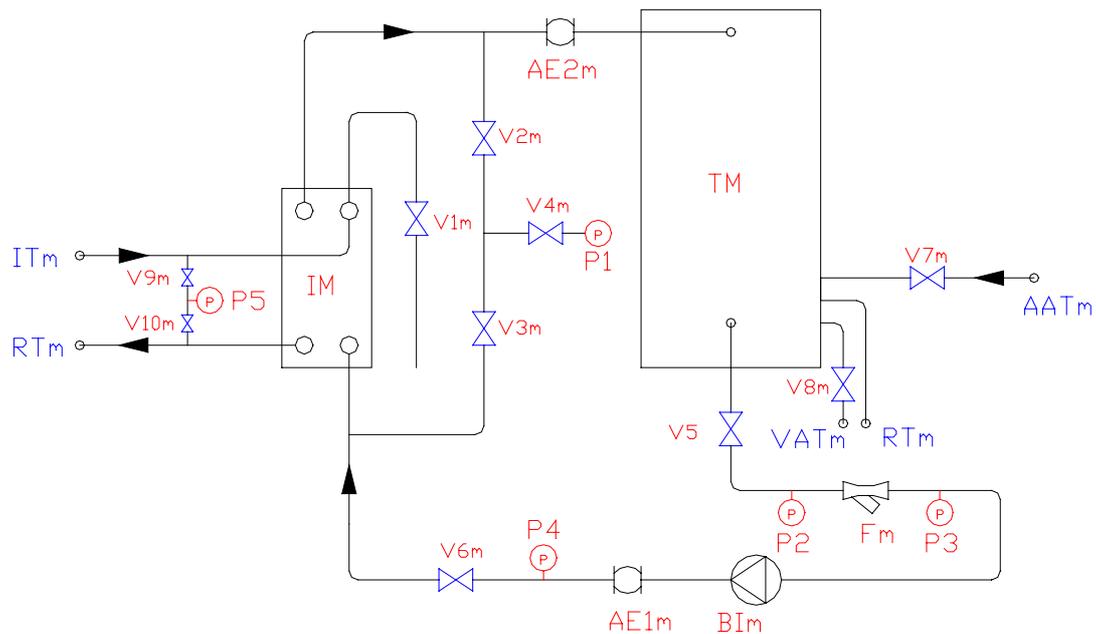


Figura 3.2

A continuación se definen los puntos y elementos de interés:

- **AAT<sub>m</sub>**: punto de aporte de agua a la torre. Para mantener un cierto nivel de agua en el aljibe es preciso reponer de vez en cuando para suplir la pérdida de agua

producida principalmente en la torre de refrigeración por arrastre y evaporación. El aporte se realiza de forma automática por medio de un nivel de boya.

- **AE<sub>1m</sub>**: acoplamiento elástico destinado a impedir las vibraciones que se producen en la entrada a torre para evitar daños en la misma.
- **AE<sub>2m</sub>**: acoplamiento elástico similar al anterior pero situado a la salida de torre para evitar daños.
- **BI<sub>m</sub>**: bomba de impulsión que hace circular el agua por el circuito secundario del sistema de enfriamiento (circuito de agua de torre).
- **F<sub>m</sub>**: filtro para captación de partículas sólidas en el circuito secundario, para evitar que dañen los elementos de la bomba y de la torre.
- **IM**: intercambiador de calor líquido-líquido de placas del circuito de refrigeración de los motores. En el circuito primario entra agua “caliente” (procedente del aljibe) y sale “fría” para la refrigeración de los motores.
- **IT<sub>m</sub>**: punto de impulsión del agua procedente del aljibe hacia el sistema de enfriamiento de motores.
- **P1**: manómetro de lectura directa para medida de presión en la entrada y la salida del circuito primario del intercambiador de calor.
- **P2**: manómetro de lectura directa para medida de presión antes del filtro.
- **P3**: manómetro de lectura directa para medida de presión después del filtro y a la entrada de la bomba.
- **P4**: manómetro de lectura directa para medida de presión a la entrada y la salida del circuito secundario del intercambiador de calor.
- **RT<sub>m</sub>**: respiradero de la torre, para evitar una presurización dentro de ella que pudiera dañar algún elemento.
- **RT<sub>m</sub>**: punto de retorno del agua “fría” del circuito primario hacia la refrigeración de motores.
- **TM**: torre de refrigeración del circuito de los motores.
- **V1<sub>m</sub>**: válvula de mariposa para toma de agua “caliente” del circuito primario.
- **V2<sub>m</sub>**: válvula de mariposa para selección de la medida a realizar con P1.
- **V3<sub>m</sub>**: válvula de mariposa para selección de la medida a realizar con P1.
- **V4<sub>m</sub>**: válvula de mariposa para selección de la medida a realizar con P1.
- **V5<sub>m</sub>**: válvula de mariposa para corte de suministro de agua a la bomba BI<sub>m</sub>.

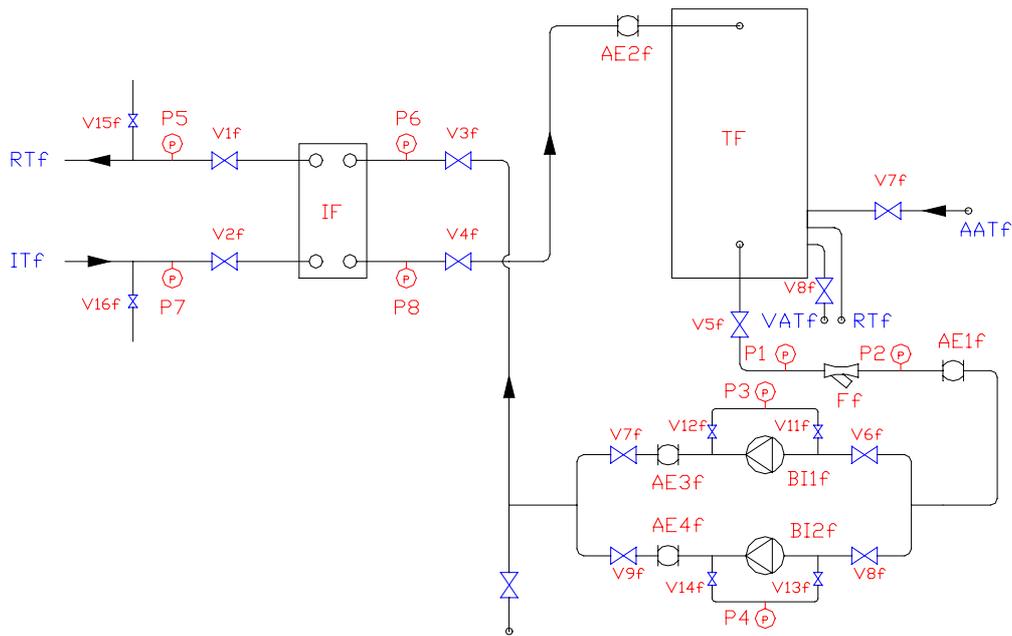
- **V6<sub>m</sub>**: válvula de mariposa para corte de suministro de agua del circuito secundario al intercambiador.
- **V7<sub>m</sub>**: válvula de mariposa para corte de suministro de agua a la torre de refrigeración.
- **V8<sub>m</sub>**: válvula de mariposa para vaciado del agua de la bandeja de recuperación de la torre.
- **V9<sub>m</sub>**: válvula de mariposa para selección de la medida a realizar con P5.
- **V10<sub>m</sub>**: válvula de mariposa para selección de la medida a realizar con P5.
- **VAT<sub>m</sub>**: Conducto para el vaciado del agua de la bandeja de recuperación de la torre.

Como puede observarse, en este bloque se diferencian claramente los dos circuitos de los que consta. Por un lado se tiene el circuito primario (caliente), que corresponde al agua que viene del aljibe y que es enfriada para poder refrigerar el motor. Por otro lado, existe un circuito secundario destinado a enfriar el primario y que él mismo se va enfriando (y trabajando a temperaturas menores que las del primario) mediante la torre de refrigeración. Esto está así pensado para aprovechar al máximo el funcionamiento del motor.

### **Refrigeración del agua destinada a la refrigeración de los frenos.**

Este sistema es muy parecido al de los motores, salvo detalles mínimos que se comentan a continuación. La figura 3.3 muestra un esquema de esta instalación para poder identificar los equipos correspondientes:





**Figura 3.3**

Los elementos, equipos y puntos de interés son:

- **AAT<sub>f</sub>**: punto de aporte de agua a la torre. Para mantener un cierto nivel de agua en el aljibe es preciso reponer de vez en cuando para suplir la pérdida de agua producida principalmente en la torre de refrigeración por arrastre y evaporación. El aporte se realiza de forma automática por medio de un nivel de boya.
- **AE<sub>1f</sub>**: acoplamiento elástico destinado a impedir las vibraciones que se producen en la entrada a torre para evitar daños en la misma.
- **AE<sub>2f</sub>**: acoplamiento elástico similar al anterior pero situado a la salida de torre para evitar daños.
- **AE<sub>3f</sub>**: acoplamiento elástico destinado a impedir las vibraciones que se producen en el conducto de impulsión de la bomba BI<sub>1f</sub> para evitar daños en elementos de la instalación.
- **AE<sub>4f</sub>**: acoplamiento elástico destinado a impedir las vibraciones que se producen en el conducto de impulsión de la bomba BI<sub>2f</sub> para evitar daños en elementos de la instalación.

- **BI<sub>f1</sub>**: bomba de impulsión que hace circular el agua por el circuito secundario del sistema de enfriamiento (circuito de agua de torre).
- **BI<sub>f2</sub>**: bomba de impulsión que hace circular el agua por el circuito secundario del sistema de enfriamiento (circuito de agua de torre). Actuará de forma alternativa a BI<sub>f1</sub>, nunca simultáneamente.
- **F<sub>f</sub>**: filtro para captación de partículas sólidas en el circuito secundario, para evitar que dañen los elementos de las bombas y de la torre.
- **IF**: intercambiador de calor líquido-líquido de placas del circuito de refrigeración de los frenos. En el circuito primario entra agua “caliente” (procedente del aljibe) y sale “fría” para la refrigeración de los frenos.
- **IT<sub>f</sub>**: punto de impulsión del agua procedente del aljibe hacia el sistema de enfriamiento de motores.
- **P1**: manómetro de lectura directa para medida de presión antes del filtro.
- **P2**: manómetro de lectura directa para medida de presión después del filtro.
- **P3**: manómetro de lectura directa para medida de presión en la entrada y la salida de la bomba de impulsión BI<sub>f1</sub>.
- **P4**: manómetro de lectura directa para medida de presión en la entrada y la salida de la bomba de impulsión BI<sub>f2</sub>.
- **P5**: manómetro de lectura directa para medida de presión en la salida del circuito primario del intercambiador de calor.
- **P6**: manómetro de lectura directa para medida de presión en la entrada del circuito secundario del intercambiador de calor.
- **P7**: manómetro de lectura directa para medida de presión en la entrada del circuito primario del intercambiador de calor.
- **P8**: manómetro de lectura directa para medida de presión en la salida del circuito secundario del intercambiador de calor.
- **RT<sub>f</sub>**: respiradero de la torre, para evitar una presurización dentro de ella que pudiera dañar algún elemento.
- **RT<sub>f</sub>**: punto de retorno del agua “fría” del circuito primario hacia la refrigeración de frenos.
- **TF**: torre de refrigeración del circuito de los frenos.

- **V1<sub>f</sub>**: válvula de mariposa de corte de flujo de agua de salida del intercambiador del circuito primario.
- **V2<sub>f</sub>**: válvula de mariposa para corte de flujo de agua de entrada al intercambiador del circuito primario.
- **V3<sub>f</sub>**: válvula de mariposa para corte de flujo de agua de entrada al intercambiador del circuito secundario.
- **V4<sub>f</sub>**: válvula de mariposa para corte de flujo de agua de salida del intercambiador del circuito secundario.
- **V5<sub>f</sub>**: válvula de mariposa para vaciado del agua de la bandeja de recuperación de la torre.
- **V6<sub>f</sub>**: válvula de mariposa para corte de suministro de agua a la bomba BI<sub>f1</sub>.
- **V7<sub>f</sub>**: válvula de mariposa para corte de suministro de agua a la salida de la bomba BI<sub>f1</sub>.
- **V8<sub>f</sub>**: válvula de mariposa para corte de suministro de agua a la bomba BI<sub>f2</sub>.
- **V9<sub>f</sub>**: válvula de mariposa para corte de suministro de agua a la salida de la bomba BI<sub>f2</sub>.
- **V10<sub>f</sub>**: válvula de mariposa para corte de suministro de agua de aporte a la torre.
- **V11<sub>f</sub>**: válvula de mariposa para selección de la medida de presión a realizar con P.
- **V12<sub>f</sub>**: válvula de mariposa para selección de la medida de presión a realizar con P3.
- **V13<sub>f</sub>**: válvula de mariposa para selección de la medida de presión a realizar con P4.
- **V14<sub>f</sub>**: válvula de mariposa para selección de la medida de presión a realizar con P4.
- **V15<sub>f</sub>**: válvula de mariposa para toma de agua “fría” del circuito primario.
- **V16<sub>f</sub>**: válvula de mariposa para toma de agua “caliente” del circuito primario.
- **V17<sub>f</sub>**: válvula de mariposa para vaciado del agua de la bandeja de recuperación de la torre.
- **VAT<sub>f</sub>**: Conducto para el vaciado del agua de la bandeja de recuperación de la torre.

Como puede observarse, la diferencia fundamental con el sistema análogo para motores sería la duplicidad de la bomba de impulsión. Esto permitirá mantener el funcionamiento de la instalación en el caso de que existiera algún problema en una de las bombas.

### **BLOQUE III. Sistema de distribución del agua.**

Tal y como se desprendía del **BLOQUE I** todo el agua caliente procedente de la refrigeración tanto de los motores como de los frenos retorna al aljibe por un único conducto de gran sección. Por el otro lado, el agua del aljibe es impulsada hacia el sistema de enfriamiento de cada celda para motores y frenos. Esta distribución de los caudales de agua se refleja en la siguiente figura (**fig. 3.4**):

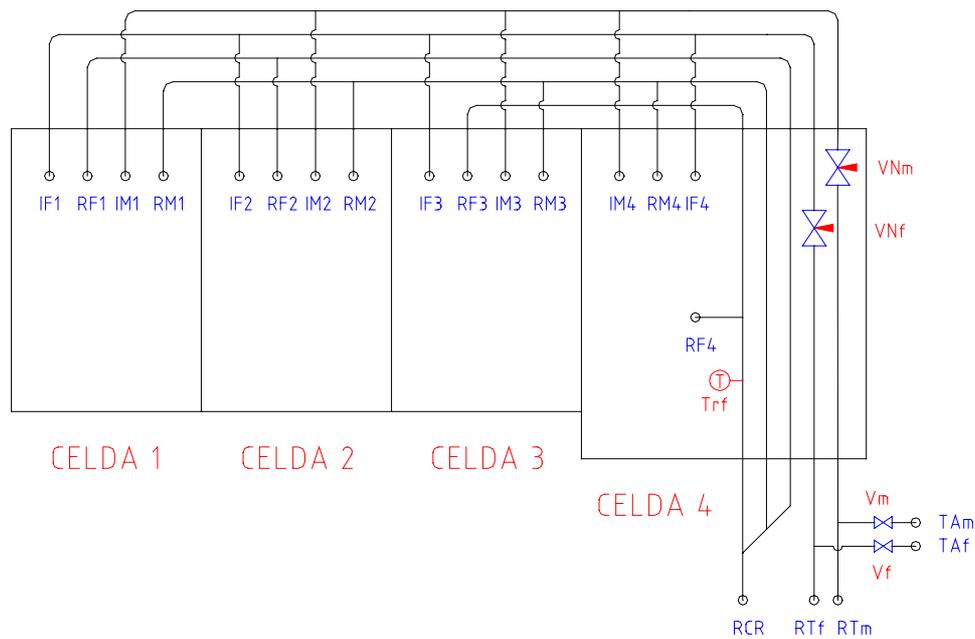


Figura 3.4

En cada una de las celdas existirá unos puntos de entrada y salida del sistema de enfriamiento tanto para motores como para frenos, y otros dos puntos para desagüe del agua tras la refrigeración del motor y el freno de cada celda.

Los puntos y elementos de interés señalados en la figura 3.4 son:

- **IF<sub>1</sub>**: impulsión de agua “fría” del circuito primario del sistema de enfriamiento hacia los frenos para la celda 1.
- **IF<sub>2</sub>**: impulsión de agua “fría” del circuito primario del sistema de enfriamiento hacia los frenos para la celda 2.
- **IF<sub>3</sub>**: impulsión de agua “fría” del circuito primario del sistema de enfriamiento hacia los frenos para la celda 3.
- **IF<sub>4</sub>**: impulsión de agua “fría” del circuito primario del sistema de enfriamiento hacia los frenos para la celda 4.
- **IM<sub>1</sub>**: impulsión de agua “fría” del circuito primario del sistema de enfriamiento hacia la instalación de control de temperatura del agua de refrigeración de los motores para la celda 1.

- **IM<sub>2</sub>**: impulsión de agua “fría” del circuito primario del sistema de enfriamiento hacia la instalación de control de temperatura del agua de refrigeración de los motores para la celda 2.
- **IM<sub>3</sub>**: impulsión de agua “fría” del circuito primario del sistema de enfriamiento hacia la instalación de control de temperatura del agua de refrigeración de los motores para la celda 3.
- **IM<sub>4</sub>**: impulsión de agua “fría” del circuito primario del sistema de enfriamiento hacia la instalación de control de temperatura del agua de refrigeración de los motores para la celda 4.
- **RCR**: retorno de agua del circuito de refrigeración hacia el aljibe.
- **RF<sub>1</sub>**: punto de retorno del agua utilizada en la refrigeración de los frenos para la celda 1.
- **RF<sub>2</sub>**: punto de retorno del agua utilizada en la refrigeración de los frenos para la celda 2.
- **RF<sub>3</sub>**: punto de retorno del agua utilizada en la refrigeración de los frenos para la celda 3.
- **RF<sub>4</sub>**: punto de retorno del agua utilizada en la refrigeración de los frenos para la celda 4.
- **RM<sub>1</sub>**: punto de retorno del agua utilizada en la refrigeración de los motores para la celda 1.
- **RM<sub>2</sub>**: punto de retorno del agua utilizada en la refrigeración de los motores para la celda 2.
- **RM<sub>3</sub>**: punto de retorno del agua utilizada en la refrigeración de los motores para la celda 3.
- **RM<sub>4</sub>**: punto de retorno del agua utilizada en la refrigeración de los motores para la celda 4.
- **RT<sub>f</sub>**: retorno de agua fría del circuito primario del sistema de enfriamiento del agua para la refrigeración de los frenos de las celdas. Este punto aparecía como salida en la **figura 3.3**.
- **RT<sub>m</sub>**: retorno de agua fría del circuito primario del sistema de enfriamiento del agua para la refrigeración de los motores de las celdas. Este punto aparecía como salida en la **figura 3.2**.

- $VN_f$ : válvulas de corte de accionamiento neumático para el circuito de refrigeración de frenos.
- $VN_m$ : válvulas de corte de accionamiento neumático para el circuito de refrigeración de motores. La misión de estas dos válvulas ( $VN_f$  y  $VN_m$ ) es evitar que se vacíen las conducciones de impulsión de agua fría del circuito primario del sistema de enfriamiento tras la parada de las bombas de impulsión al finalizar el ensayo.

#### **BLOQUE IV. Control de temperatura para el agua de suministro a la refrigeración de motores y frenos.**

##### **Refrigeración de motores.**

La **figura 3.5** muestra el esquema de la instalación de control de temperatura para el agua de suministro al circuito de refrigeración de los motores en ensayo. La única diferencia de este sistema entre las celdas radica exclusivamente en las dimensiones de los equipos y las tuberías, ya que las potencias caloríficas a disipar aumentan paulatinamente desde la celda 1 a la celda 4.



- **T<sub>1</sub>**: termómetro de lectura visual para la medida de la temperatura del agua “fría” procedente del circuito primario del sistema de enfriamiento que alimenta al sistema.
- **T<sub>2</sub>**: termómetro de lectura visual para la medida de la temperatura del agua de alimentación directa a la refrigeración de los motores.
- **T<sub>3</sub>**: termómetro de lectura visual para la medida de la temperatura del agua de salida de la refrigeración de los motores.
- **V<sub>1</sub>**: válvula de mariposa para corte de suministro de agua “fría” al mezclador.
- **V<sub>2</sub>**: válvula de mariposa para corte de suministro de agua desde el mezclador hacia el motor.
- **V<sub>3</sub>**: válvula de mariposa para la conexión directa entre la entrada de agua “fría” del circuito primario con el motor sin usar el mezclador.
- **V<sub>4</sub>**: válvula de mariposa para corte de suministro de agua de refrigeración al motor.
- **V<sub>5</sub>**: válvula de mariposa para corte de la salida de agua de refrigeración del motor.
- **V<sub>6</sub>**: válvula para el corte del desagüe del mezclador.
- **V<sub>7</sub>**: válvula para el vaciado del mezclador.
- **V3Vam**: válvula de tres vías de accionamiento manual, para el cambio de modo de operación del motor (motor marino ó motor con radiador).
- **V3Vct**: válvula de tres vías comandada por temperatura, para el ajuste de la temperatura del agua de refrigeración suministrada al motor.

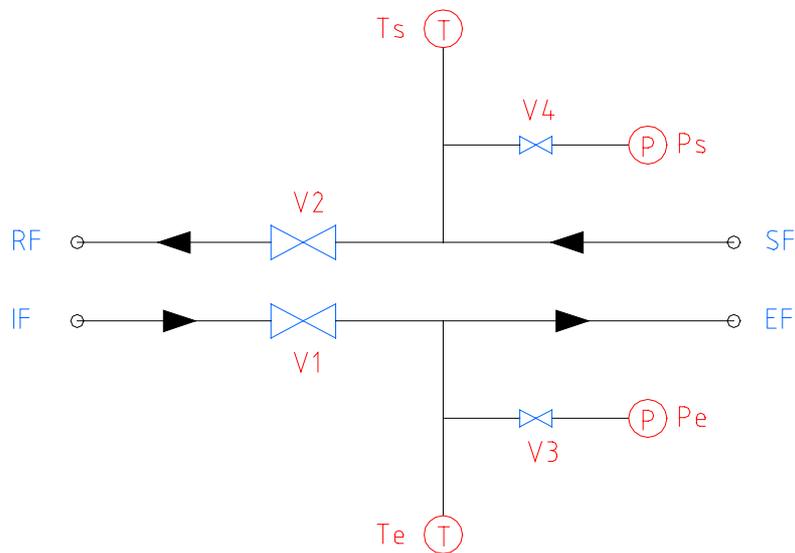
Los puntos IM y RM corresponden a cada uno de los puntos de conexión con el sistema de distribución de agua que aparecía en la figura 3.4.

Hay que señalar que aunque el sistema de control de temperatura de entrada del agua al motor es similar en todas las celdas, salvo por las dimensiones, la disposición de la válvula de tres vías de accionamiento manual en las celdas 3 y 4 es distinta a la mostrada en la figura 3.5, donde se encuentra horizontal por simplicidad en la ejecución de la instalación.

### **Refrigeración de frenos.**

La refrigeración de los frenos no necesita de un sistema de control de temperatura de entrada como el explicado anteriormente para los motores. En ellos se persigue simular lo más fielmente posible el funcionamiento real de un motor, por lo que la temperatura de salida fría del circuito primario no se ajustaría a la realidad.

En los frenos se pretende exclusivamente disipar en forma de calor toda la energía asociada al frenado. Es por ello que la instalación de refrigeración de frenos se reduce a unas válvulas de corte de suministro más unos elementos de medida de presiones y temperaturas, como se ve en la figura 3.8:



**Figura 3.8**

Los elementos de interés que aparecen en esta figura son:

- $P_e$ : manómetro de lectura directa, para medida de la presión del agua de entrada al freno.
- $P_s$ : manómetro de lectura directa, para medida de la presión del agua de salida del freno.
- $T_e$ : termómetro de lectura directa, para medida de la temperatura del agua de entrada al freno.
- $T_s$ : termómetro de lectura directa, para medida de la temperatura del agua de salida del freno.

- V<sub>1</sub>: válvula de mariposa para el corte de suministro de agua al freno.
- V<sub>2</sub>: válvula de mariposa para el corte de agua de retorno del freno.
- V<sub>3</sub>: válvula de mariposa. Permitirá realizar la medida de presión del agua de entrada al freno.
- V<sub>4</sub>: válvula de mariposa. Permitirá realizar la medida de presión del agua de salida del freno.

La única diferencia entre las cuatro celdas respecto a la instalación de refrigeración de frenos estriba en las distintas posiciones de las tomas de impulsión y retorno del agua refrigerante. Lo único que ha condicionado esta distribución es la disposición y tamaño de los frenos que serán instalados en cada una de las celdas, para conseguir menores longitudes de tuberías en el interior de las celdas.

#### **4. MODELIZACIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.**

La descripción anterior hace referencia a los distintos elementos que aparecen en la instalación de refrigeración del Laboratorio de Motores. Como ya se apuntó al principio, se desea tener una simulación del comportamiento de dicha instalación. Por ello, se ha realizado un modelo de todo el sistema, que si bien no refleja fielmente todo lo que la instalación contiene físicamente, sí es una modelización bastante buena de su comportamiento.

Mediante un examen visual de la instalación se tomó nota de los distintos elementos que componen la instalación, así como de sus dimensiones. Se descartaron aquellos que no afectaban al comportamiento del sistema, como medidores de presión, caudal y temperatura y se ha realizado la construcción en EcosimPro de la siguiente lista de elementos que aparecen:

- Aljibe
- Bomba
- Bomba de torre
- Codo
- Intercambiador
- Mezclador
- Té en ángulo de 90° de dos entradas y una salida
- Té en ángulo de 90° de una entrada y dos salidas
- Torre de enfriamiento
- Tubería
- Tubo de goma
- Válvula de mariposa
- Válvula de compuerta
- Válvula neumática

Además se han definido otros elementos afines a los anteriores que deben formar parte de la librería creada en este proyecto:

- Bomba general
- Cono
- Contracción
- Té en ángulo de 30° de dos entradas y una salida
- Té en ángulo de 45° de dos entradas y una salida
- Té en ángulo de 60° de dos entradas y una salida

Todos estos elementos están definidos de forma general y dan lugar a uno de los objetivos de este proyecto, la construcción de una librería en EcosimPro de componentes de instalaciones hidráulicas. Hay que señalar que elementos como el mezclador y el intercambiador corresponden particularmente a componentes especiales de la instalación del Laboratorio de Motores, por razones que serán posteriormente comentadas.

## **4.1 MODELADO DE LA INSTALACIÓN.**

- **COMPONENTES GENERALES: CONTORNO, TABLAS**

Ante la diversidad de elementos existente en el sistema de refrigeración del laboratorio se optó por ir estudiando los distintos componentes que aparecían y aplicar en cada uno de ellos las ecuaciones que rigiesen el comportamiento de cada uno de ellos.

El primer paso fue definir de alguna manera el fluido que va a circular por la instalación, en este caso, agua. Esto se debe hacer teniendo en cuenta la forma de trabajo del programa de simulación que se maneja. EcosimPro centra las condiciones de conexión en los elementos puerto. El fluido será el nexo entre dos componentes del sistema.

En EcosimPro existe un puerto que podría haber servido para los objetivos de este proyecto. Sin embargo, no era suficiente, por lo que se definió un nuevo tipo de puerto para la librería LABORATORIO: *fluid*. Como se verá más adelante, en esta librería existen otros tipos de puerto, definido para las corrientes de aire y de vapor, que también aparecen en la instalación, pero el tipo *fluid* será el más utilizado.

Las variables de control que se han elegido han sido el flujo másico, la presión y la temperatura.

Además existen unos componentes que no responden a ningún elemento ni tipo de flujo en concreto, sino que son condiciones auxiliares definidas para los componentes. Estos son los componentes *Tablas* y *Contorno*.

En el componente *Tablas* se recogen todas aquellas tablas que serán utilizadas por los componentes de la librería LABORATORIO. Se optó por definir las aparte, en vez de cada una dentro del componente que la utilizara, porque existían varias que eran llamadas por muchos componentes y por tener un orden y una simplicidad dentro de la modelización.

El componente *Contorno* hace referencia a todas las constantes y condiciones exteriores comunes a todos los componentes. Este fichero puede variarse directamente sin tener que ir componente a componente.

Además de todo esto, cada componente tendrá sus propias ecuaciones que rijan el comportamiento del fluido dentro de él. Algunos componentes como las bombas o las válvulas se han modelado con sus ecuaciones características. En otros componentes no ha sido posible, y se ha contemplado el elemento como una caja negra a la que se le han

aplicado las ecuaciones de Continuidad, Primer y Segundo Principio como ecuaciones básicas para obtener las tres variables de *fluid*:

$$\sum_s \dot{m} + \dot{m}_{vc} = \sum_e \dot{m}$$

$$\dot{Q}_{VC} + \dot{W}_{VC} = \frac{d}{dt} \left[ \dot{m}_{VC} \cdot \left( u + \frac{1}{2} v^2 + gz \right)_{VC} \right] + \sum_s \dot{m}_s \cdot \left( h + \frac{1}{2} v^2 + gz \right)_s - \sum_e \dot{m}_e \cdot \left( h + \frac{1}{2} v^2 + gz \right)_e$$

$$Q_{VC} + \sum_s \frac{\Delta P_o}{\rho} \dot{m}_s - \sum_e \frac{\Delta P_o}{\rho} \dot{m}_e = \sum_s \dot{m}_s \cdot \left( h - \frac{p}{\rho} \right)_s - \sum_e \dot{m}_e \cdot \left( h - \frac{p}{\rho} \right)_e$$

El término  $\Delta P_o$  hace referencia a la pérdida de presión por fricción y merece un capítulo especial que se desarrollará a continuación.

Tras examinar el problema, se decidió que era lógico desacoplar los problemas de presión y temperatura, ya que sus variaciones se deben causas independientes. Por ello las ecuaciones utilizadas en cada elemento serían:

$$\dot{Q}_{VC} = \dot{m}_{VC} \cdot h_{VC} + m_{VC} \cdot \dot{h}_{VC} + \sum_s \dot{m}_s \cdot h_s + - \sum_e \dot{m}_e \cdot h_e$$

$$\sum_s \frac{\Delta P_o}{\rho} \dot{m}_s - \sum_e \frac{\Delta P_o}{\rho} \dot{m}_e = \sum_e \dot{m}_e \cdot \left( \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} v^2 + gz \right)_e - \sum_s \dot{m}_s \cdot \left( \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} v^2 + gz \right)_s$$

#### CAÍDAS DE PRESIÓN.

Existen distintos modelos de caídas de presión para los elementos existentes en el sistema de refrigeración. Se ha utilizado una bibliografía específica para modelar dichas caídas, destinada a facilitar el análisis y la evaluación de los coeficientes de resistencia de flujo o pérdida de presión para la mayoría de elementos de paso de flujo.

En dicha bibliografía se consideran las siguientes ideas:

- Las condiciones de entrada y salida son ideales y se aplican a fluidos Newtonianos considerados homogéneos, incompresibles y sin ningún aporte de trabajo o energía.
- Las tuberías y paredes se consideran rígidas.
- Los datos de referencia dados son los coeficientes de pérdida de presión estática, que pueden considerarse como toda la pérdida de presión estática en el componente. Incluye la pérdida no recuperable dentro del componente como la fricción y las pérdidas recuperables.
- El coeficiente de pérdida de presión  $\zeta$  se considera tal y como se determina experimentalmente. Es decir, será la pérdida de presión estática  $\Delta p$ , dividida por la dinámica  $\rho w^2/2$ :

$$\zeta = \frac{\Delta p}{\rho w^2 / 2} \quad \rightarrow \quad \Delta p = \zeta \frac{\rho w^2}{2}$$

$\rho$ : densidad del fluido

$w$ : velocidad del fluido

- La pérdida total de presión estática se considera positiva en el sentido convencional. Si se tratara de un incremento de presión estática, como por ejemplo un difusor, sería tratada como una cantidad negativa.
- El efecto del número de Reynolds  $Re$  sobre el coeficiente de pérdida de presión es en su mayoría apreciable para valores bajos ( $Re < 10^5$ ). Para valores mayores se considera independiente del número de Reynolds.
- En los casos en que no hay indicación alguna del número de Reynolds se asume que el valor dado de  $\zeta$  es virtualmente independiente de  $Re$ . Sin embargo, para el caso de flujo puramente laminar ( $Re < 2 \cdot 10^3$ ), el valor de  $\zeta$  es tan sólo una aproximación.

Además se ha utilizado esta bibliografía sólo para agua líquida con densidad poco variable.

Para el caso de una tubería recta de área constante, donde el radio hidráulico  $R_h$  es la cuarta parte del diámetro hidráulico que a su vez es igual al diámetro de la tubería, la ecuación de Darcy-Weisbach expresa la pérdida de presión estática por fricción como:

$$\Delta p_{fr} = \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{l}{R_h} \cdot \frac{\rho w_o^2}{2}$$

y llamando  $\zeta = \lambda \frac{l}{D_h}$  queda:

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{\rho w_o^2}{2}$$

El factor  $\lambda$  hace referencia al factor de fricción de Moody, f.

Con todo esto se ha modelado la pérdida de carga por fricción para cada componente donde sea oportuno en función del valor de  $\zeta$  tabulado para cada caso.

## 4.2. COMPONENTES DE LA INSTALACIÓN.

### **Puerto *fluid*.**

Como se apuntó anteriormente las variables de control que se han elegido han sido el flujo másico ( $w$ , kg/s), la presión ( $p$ , N/ m<sup>2</sup>) y la temperatura ( $T$ , °C). Dentro de *fluid* se han definido además otras variables en función de estas tres: caudal ( $Q$ , m<sup>3</sup>/s), entalpía ( $h$ , J/kg), densidad ( $\rho$ , kg/ m<sup>3</sup>) y calor específico ( $c_p$ , J/kg K).

Tanto la densidad como el calor específico están definidas con respecto a una tabla termodinámica de comportamiento en función de la temperatura para el agua.

Además, EcosimPro permite definir las ecuaciones de conexión para cada variable entre puertos. Esas ecuaciones de conexión son contempladas automáticamente por EcosimPro mediante un indicador que se le adjudica a cada variable.

Existen tres tipos de indicadores de comportamiento en conexión:

- EQUAL: una variable con este indicador mantiene el mismo valor para todos los puertos de una conexión, es decir, especifica la equivalencia de esa variable en todos los puertos.
- SUM: está asociado a variables tipo flujo e indica que en una conexión la suma de los flujos entrantes es igual a la suma de los de salida.
- Sin indicación: no se genera ninguna ecuación de conexión asociada a la variable.

En *fluid* se tiene:

EQUAL REAL	w (flujo másico)
EQUAL REAL	p (presión)
EQUAL REAL	T (temperatura)

Así, en cada conexión EcosimPro contemplará la suma de flujos y la igualdad de presiones y de temperaturas, ya que sólo tenemos en cada conexión una entrada y una salida.

Archivo EL:

*LIBRARY LABORATORIO*

*PORT fluid*

<i>SUM REAL</i>	<i>w</i>	<i>"flujo de masa (kg/s)"</i>
<i>EQUAL REAL</i>	<i>p</i>	<i>"presion"</i>

```

EQUAL OUT REAL T      "temperatura (°C)"

REAL Q      "caudal (m3/s)"
REAL h      "entalpía específica"
REAL cp     "calor específico"
REAL rho    "densidad (kg/m3)" -- así sirve para agua y
combustible
CONTINUOUS
w = rho * Q      --en f de Q xq será lo q conozcamos
h = T * cp      --ENTALPÍA
--Tabla (cp,rho,mu,nu,k,Pr)
cp = linearInterp2D(props,T,1)
rho = linearInterp2D(props,T,2)
END PORT

```

### **Puerto *fluidA*.**

En cada una de las torres de refrigeración se tiene una corriente de entrada-salida de aire (húmedo) que ve modificada su humedad al enfriar la corriente de agua pulverizada en la torre.

Para este tipo de fluido se ha contemplado otro tipo de puerto dentro de la modelización en EcosimPro. Este puerto tiene como variables independientes: la masa d aire seco ( $w_a$ , kg/s), la masa de vapor ( $w_w$ , kg/s), la presión total de la corriente ( $p$ , N/m<sup>2</sup>), la presión parcial del vapor ( $p_w$ , N/m<sup>2</sup>), la temperatura de la corriente ( $T$ , °C), el caudal

de aire húmedo ( $Q$ , m<sup>3</sup>/s), la humedad específica ( $W$ , kg agua/kg aire seco), el volumen específico ( $v$ , m<sup>3</sup>/kg aire seco), la humedad relativa de la corriente ( $f_i$ , tanto por uno) y la entalpía del aire húmedo ( $h$ , J/kg). Estas variables definen la corriente de aire, siendo entre ellas sólo independientes cuatro.

Como se pueden tener distintos datos de la corriente de aire se prefirió contemplar todas las variables y así tener una mayor manejabilidad del fluido.

Entre ellas existen las siguientes relaciones por las que se definen unas en función de otras:

$$W = \frac{w_w}{w_a}$$

$$W = 0.622 \cdot \frac{p_w}{p - p_w}$$

$$v = 287.055 \cdot (T + 273) \cdot \frac{1 + 1.6078 \cdot W}{p/1000}$$

$$w_a = \frac{Q}{v}$$

$$f_i = \frac{p_w}{p_{sat}(T)}$$

$$h = 1.005 \cdot T \cdot 1000 + (2501.6 + 1.805 \cdot T) \cdot 1000$$

Archivo EL:

*LIBRARY LABORATORIO*

*PORT fluidA --para aire húmedo*

*REAL w\_a "masa d aire seco (kg/s)"*

*REAL w\_w "masa d vapor (kg/s)"*

*REAL p "presión (N/m2)"*

*REAL p\_w "presión parcial del vapor (N/m2)"*

*REAL T "temperatura (°C)"*

*REAL Q "caudal d aire húmedo (m3/s)"*

*REAL W*      "*humedad específica (kg agua/kg a.s.)*"  
*REAL v*      "*vol específico (=Vol aire húmedo/Pm aire,m3/kg\_a.s.)*"  
*REAL fi*      "*humedad rel (tanto x 1)*"  
*REAL h*      "*entalpía del aire húmedo (J/kg)*"

*CONTINUOUS*

$W = w_w/w_a$   
 $W = .622 * p_w / (p - p_w)$   
 $v = 287.055 * (T + 273) * (1 + 1.6078 * W) / (p / 1000)$   
 $w_a = Q/v$   
 $fi = p_w / \text{linearInterp1D}(p_{sat}, T)$   
 $h = 1.005 * T * 1000 + (2501.6 + 1.805 * T) * 1000$

*END PORT*

### **Puerto *fluidV*.**

Se ha definido este tipo de puerto para modelar una corriente de vapor de agua referente a las pérdidas existentes en el mezclador por evaporación.

Este puerto tendrá las mismas variables independientes que *fluid*: flujo másico ( $w$ , kg/s), presión ( $p$ , N/ m<sup>2</sup>) y temperatura ( $T$ , °C) y la entalpía ( $h$ , J/kg), que se definirá dentro del componente en función de las tablas termodinámicas correspondientes al vapor de agua.

Archivo EL:

*LIBRARY LABORATORIO*

*PORT fluidV*

*SUM REAL*            *w*        "*flujo de masa (kg/s)*"

*EQUAL REAL*        *p*        "*presion*"

*REAL*                 *h*        "*entalpía específica*"

*EQUAL OUT REAL* *T*       "*temperatura (°C)*"

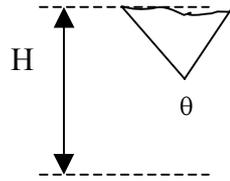
*END PORT*

**ALJIBE: Componente *ALJIBE*.**

El aljibe es un elemento de almacenamiento de agua, tipo depósito con altura de agua variable. Es por tanto un componente variable con el tiempo.

Lo fundamental es esa variación de volumen respecto al tiempo. Como se trata de un cilindro en disposición horizontal, la ley de variabilidad de masa vendrá en función de:





$$H = \frac{D}{2} \cdot \left(1 - \cos \frac{\theta}{2}\right)$$

$$A = L \cdot D \cdot \text{sen } \theta$$

$$a = \frac{D^2}{8} \cdot (\theta - \text{sen } \theta)$$

$$V = L \cdot a$$

D "diámetro del aljibe (m)"

L "longitud del aljibe (m)"

H "nivel del agua (m)"

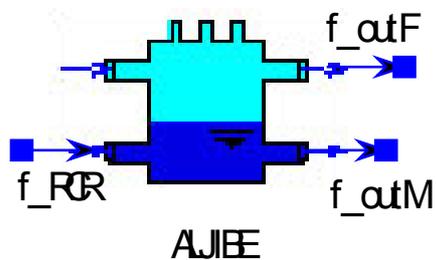
A "área longitudinal al nivel del agua (m<sup>2</sup>)"

theta "θ, ángulo de control según cilindro horizontal (rad)"

a "superficie transversal"

V "volumen total en el aljibe"

Componente Ecosim:



Las ecuaciones anteriormente indicadas son las que se han tomado para modelar el componente, aparte de las ecuaciones generales. Al trabajar con EcosimPro, aparecían problemas a la hora de resolver estas ecuaciones para obtener la variable  $\theta$  (theta). Entonces se optó por despejarla de la ecuación de H y darle un tratamiento especial como se verá en el archivo EL.

Al tratarse de un depósito y mantenerse las presiones de remanso, las presiones de las corrientes de salida serán iguales a las de los puntos dentro del aljibe de igual cota. Las temperaturas de salida serán iguales a la del interior del aljibe.

El aljibe de la instalación del Laboratorio de Motores tiene una capacidad máxima de 10 m<sup>3</sup> con las siguientes dimensiones:

Diámetro: 1.85 m.

Longitud: 3.93 m.

En el funcionamiento habitual de la instalación está previsto que el aljibe contenga un volumen aproximado de 7 m<sup>3</sup>. Para ello, y ya que el volumen de tuberías se ha estimado en un máximo de 2 m<sup>3</sup>, se deberá llenar el aljibe hasta una capacidad aproximada de 9 m<sup>3</sup> de agua.

Archivo EL:

*LIBRARY LABORATORIO*

*COMPONENT ALJIBE*

*PORTS*

<i>IN fluid f_RCR</i>	<i>"entrada del agua"</i>
<i>OUT fluid f_outM</i>	<i>"salida del agua hacia el motor"</i>
<i>OUT fluid f_outF</i>	<i>"salida del agua hacia el freno"</i>

*DATA*

$REAL D = 1.85$       "diametro del aljibe (m)"  
 $REAL L = 3.93$       "longitud del aljibe (m)"  
 $REAL H0 = 1.5$       "nivel inicial de agua (m)"  
 $REAL z\_RCR = 0$       "entrada del agua"  
 $REAL z\_outM = 0$       "salida del agua hacia el motor"  
 $REAL z\_outF = 0$       "salida del agua hacia el freno"

DECLS

$REAL H$       "nivel del agua (m)"  
 $REAL A$       "area longitudinal al nivel del agua (m2)"  
 $REAL theta$       "angulo de control según cilindro horizontal (rad)"  
 $REAL a$       "superficie transversal"  
 $REAL M$       "masa total en el aljibe"  
 $REAL V$       "volumen total en el aljibe"  
 $REAL T$       "temperatura en el aljibe"  
 $REAL cp$       "calor especifico"  
 $REAL rho$       "densidad"

INIT

$H = H0$   
 $T = T\_ext$

CONTINUOUS

$cp = linearInterp2D(props, T, 1)$   
 $rho = linearInterp2D(props, T, 2)$   
  
 $theta = ZONE (H \leq D/2) 2 * \cos(1 - (2 * H/D))$   
 $ZONE ((2 * H/D) - 1) < 1 (2 * PI - 2 * \cos((2 * H/D) - 1))$   
 $OTHERS 2 * PI$   
 $A = L * (D * \sin(theta/2))$   
 $a = D ** 2 / 8 * (theta - \sin(theta))$   
 $V = L * a$   
 $M = rho * V$

--conservación de masa

$$H*L*D*\sin(\theta/2) = (f\_RCR.w - f\_outM.w - f\_outF.w)/rho$$

--conservación de energía

$$(f\_RCR.w - f\_outM.w - f\_outF.w) * cp * T + M * cp * T' = \backslash \\ + f\_RCR.w*f\_RCR.h - f\_outM.w*f\_outM.h - f\_outF.w*f\_outF.h$$

$$f\_outM.p = rho * g * (H - z\_outM) + p\_ext$$

$$f\_outM.p = f\_outF.p$$

$$f\_outM.T = T$$

$$f\_outF.T = T$$

END COMPONENT

### **BOMBA: Componente *BOMBA*.**

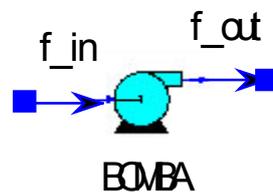
Este componente modela el comportamiento de una bomba axial como las situadas a la salida del aljibe para impulsión del agua.

En este tipo de bombas se suele disponer de las curvas características de la altura, la potencia y el rendimiento en función del caudal de trabajo de la bomba. Estas curvas responden a polinomios característicos de la bomba. Es por ello por lo que además se ha construido otro componente para Bomba General (*BOMBA\_GRAL*) en el que se pueden

introducir directamente los valores de los coeficientes de dichos polinomios como datos, ya que un principio sólo se había realizado el caso de la bomba de la que se disponía en la instalación.

En ambos casos se ha dispuesto que la bomba sea adiabática, ya que la variación de temperatura al atravesar el fluido la bomba es despreciable.

Componente Ecosim:



La bomba se mueve sobre su curva de funcionamiento altura-caudal. El punto de operación responderá a las necesidades de la instalación a la que deba dar servicio la bomba.

Para ello a la bomba le deben llegar las pérdidas de los elementos que debe surtir y en función de ello establecer su punto de funcionamiento. Esto se hace a partir del puerto *P\_control*.

Con todo lo expuesto anteriormente se tienen controladas las tres variables fundamentales del fluido, caudal, presión y temperatura, y aparte variables que puede interesar controlar como la potencia y el rendimiento, ya que EcosimPro permite visualizar la variación de variables en función de otras.

Bomba. Archivo EL:

```
LIBRARY LABORATORIO
COMPONENT BOMBA
PORTS
```

```
IN    fluid f_in    --fluido inlet f_in
```

```

        OUT fluid f_out          --fluido outlet f_out
        IN P_control P
DATA
    REAL d = 0.2                --diametro de la tuberia a la que se conecta
DECLS
    REAL H                      "altura (m)"
TOPOLOGY
    PATH f_in TO f_out
INIT
    f_in.T = T_ext
    H=23
    P.perdida=1000
    f_in.p =100000
    f_out.p=300000
    f_in.Q = .01
CONTINUOUS
    f_in.T = f_out.T
    f_in.w = f_out.w
    (f_out.p - f_in.p) / (f_in.rho * g) = H
    IMPL (f_in.Q) f_in.Q = ZONE (f_in.Q<.001) .012
                                ZONE (f_in.Q>.02) .012
                                OTHERS (linearInterp1D (tabla_B, H))/3600
    H = ZONE (H<5) 23
        ZONE (H>55) 23
        OTHERS 15+P.perdida/f_in.w/g
END COMPONENT

```

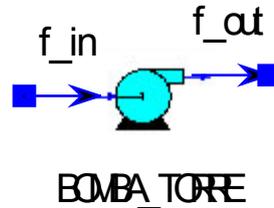
### **BOMBA DE TORRE DE REFRIGERACIÓN: Componente *BOMBA\_TORRE*.**

Este componente modela el comportamiento de las bombas de impulsión situadas en las torres de refrigeración, una para la torre de la instalación de motores y dos para la de frenos.

La razón por la que no se ha utilizado directamente el componente *BOMBA\_GRAL* estriba en que estas bombas actúan en un punto fijo de funcionamiento y por ello se

define como dato el valor de las características de ese punto, que viene dado por el caudal de funcionamiento que refrigera la torre.

Componente Ecosim:



Para una mejor actuación del sistema de resolución de EcosimPro y evitar errores numéricos se ha definido como dato la altura que da la bomba y así se dejan como variables todas las características del *fluid*.

Para *BOMBA\_TORRE* no se definen ni la potencia ni el rendimiento en primer lugar porque no interesan y en segundo porque no se dispone de las curvas correspondientes.

Este modelo de bomba se construye igualmente adiabático como las anteriores.

El punto de funcionamiento de la bomba de torre será un caudal de trabajo de 36.4 m<sup>3</sup>/h (0.01 m<sup>3</sup>/s aproximadamente) al que le corresponde una altura suministrada por bomba de 23 m.

**Archivo EL:**

```

LIBRARY LABORATORIO
COMPONENT BOMBA_TORRE
PORTS
    IN    fluid f_in
    OUT   fluid f_out
DATA
    
```

*REAL H = 23      "altura (m)"*

*TOPOLOGY*

*PATH f\_in TO f\_out*

*CONTINUOUS*

*--Conservación de masa:*

$$f_{in}.w = f_{out}.w$$

*--Energía:*

$$f_{in}.T = f_{out}.T$$

*--Presión:*

$$H = (f_{out}.p - f_{in}.p) / (f_{in}.rho * g)$$

*END COMPONENT*

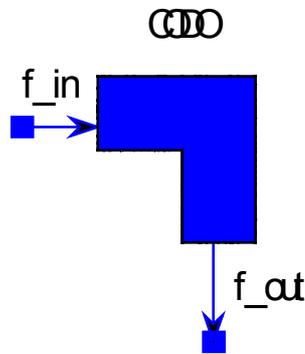
**CODO: Componente *CODO*.**



El codo es un elemento geométrico propio de instalaciones de distribución que permite el cambio de dirección en la trayectoria de un fluido.

La parte más importante de este componente es la pérdida de presión debida a la fricción. Para modelarlo se ha recurrido como se comentó anteriormente a la bibliografía utilizada para pérdidas de carga.

Componente Ecosim:



La modelización del elemento codo se hace fácilmente a partir de las ecuaciones generales de conservación de masa, primer y segundo principio.

Archivo EL:

```

LIBRARY LABORATORIO
COMPONENT CODO
PORTS
    IN    fluid  f_in          --fluid inlet f_in
    OUT   fluid  f_out        --fluid outlet f_out
    OUT   P_control  P
DATA
    REAL l=.15  --longitud de tuberia (m)
    REAL d=0.2  --diametro de tuberia (m)
    REAL angulo=90  --angulo del codo
    
```

```

REAL f_in_z = 0
REAL f_out_z = 0
DECLS
  REAL A
  REAL Re1          --Reynolds
  REAL Nu1          --Nusselt
  REAL Pr1          --Prandtl
  REAL he1          --Coef. de convección exterior
  REAL nu1          --viscosidad cinemática media
  REAL k1           --conductividad media
  REAL rho1
  REAL cp1
  REAL hi1          -- Coef. conv. interior
  REAL U1
  REAL DTLMI
  REAL T_medial
  REAL delta
  REAL lambda1
  REAL perd_loc
  REAL v_entrada
  REAL v_salida
  REAL Q_entrada
  REAL Q_salida
  REAL NuD_inf
  REAL C
  REAL n
  REAL delta_p
TOPOLOGY
  PATH f_in TO f_out
INIT
  f_out.T = (f_in.T+T_ext)/2
  f_out.p = f_in.p
  T_medial=(f_in.T+T_ext)/2
  Re1 = 1
  Pr1 = 5
  P.perdida = 500
CONTINUOUS
  Q_entrada = f_in.w / rho1
  v_entrada = Q_entrada / A
  Q_salida = f_out.w / rho1
  v_salida = Q_salida / A
  f_in.w = f_out.w
  A = PI*d**2/4
  delta = 0.0002/(d/2)
  T_medial = (f_in.T+(T_ext+f_in.T)/2)/2
  rho1 = linearInterp2D(props,T_medial,2)
  cp1 = linearInterp2D(props,T_medial,1)
  nu1 = linearInterp2D(props,T_medial,4)

```

```

Pr1 = linearInterp2D(props,T_medial,6)
k1 = linearInterp2D(props,T_medial,5)
Re1 = abs(v_entrada * d / nu1)
lambda1=linearInterp2D(fric2,delta,Re1)
perd_loc/0.16 =      ZONE(angulo<=70)
                    (0.9*sin(angulo*PI/180))

                    ZONE(angulo>70 AND angulo<100)
                    1

                    OTHERS
                    (0.7+0.35*angulo*(PI/180)/90)

```

--TURBULENTO PARA TODO EL CONDUCTO:

```
Nu1=NuD_inf*(1+C*(d/l)**n)
```

```

NuD_inf=0.023*(Re1**.8)*(Pr1**(1/3))
C=ZONE(l/d>20)6
  OTHERS 1
n=ZONE(l/d<20)1
  OTHERS .7

```

```

he1=ZONE ((f_in.T-T_ext)<.01) 1\
  OTHERS 3.56*abs((T_medial-T_ext)/d)**0.25
hi1 = ZONE (Nu1>0) k1*Nu1/d
  OTHERS 1
U1 = 1/(1/he1+1/hi1)
DTLMI = ZONE ((f_in.T-T_ext)<.01) 1e-4
  OTHERS (f_out.T-f_in.T)/log(abs((T_ext-f_in.T)/(T_ext-f_out.T)))

```

--Ec de la energía

```

PI*d*l*U1*DTLMI\
= f_in.w*cp1*(f_out.T-f_in.T)

```

--2º principio

$$f_{out.p} + \rho_1 * g * f_{out.z} = f_{in.p} + \rho_1 * g * f_{in.z} - \Delta p$$

```

f_in.rho*f_in.cp*(f_out.T-f_in.T) - (f_out.p-f_in.p)-\
PI*d*l*U1*DTLMI*\
f_in.rho/f_in.w=\
  ZONE(Re1>=10000)
  (2*linearInterp1D(tabla_codo,Re1)*perd_loc+\
0.0175*3*angulo*lambda1)*f_in.rho*v_entrada**2/(2*d)+\

```

```

                                g*(f_in.rho*f_out_z-f_in.rho*f_in_z)
                                ZONE(Re1<10000 AND Re1>=3000)
                                (0.6/Re1+perd_loc+0.0175*3*angulo*lambda1)*f_in.rho*v_entrada**2/(2*d)
+|
                                g*(f_in.rho*f_out_z-f_in.rho*f_in_z)
                                ZONE(Re1>=2000 AND Re1<3000)
                                (linearInterp2D(fric2,delta,Re1)*l*f_in.rho*v_entrada**2)/(2*d)+|
                                g*(f_in.rho*f_out_z-f_in.rho*f_in_z)
                                OTHERS
                                (linearInterp1D(fric1,Re1)*l*f_in.rho*v_entrada**2)/(2*d)+|
                                g*(f_in.rho*f_out_z-f_in.rho*f_in_z)

P.perdida = f_in.w*delta_p/f_in.rho

END COMPONENT

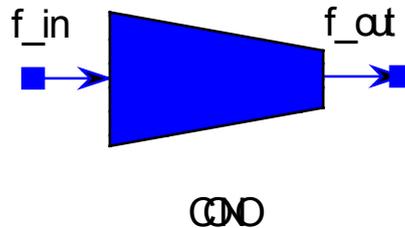
```

### **CONO: Componente CONO.**

Se trata de otro elemento geométrico utilizado para la transición de diámetros de tubo. La pérdida de carga por fricción es también importante, como en el codo, pero además se ha contemplado la transferencia de calor por convección. Sin embargo, tras varios experimentos se comprueba que esta transferencia por convección no alcanza valores importantes en las dimensiones del laboratorio. De todas formas se mantiene este

control de temperatura para poder modelar elementos similares en cualquier otra instalación.

Componente Ecosim:



Archivo EL:

*LIBRARY LABORATORIO*

*COMPONENT CONO*

*PORTS*

*IN fluid f\_in --fluid inlet f\_in*  
*OUT fluid f\_out --fluid outlet f\_out*  
*OUT P\_control P*

*DATA*

*REAL D0=.2 --diámetro inicial*  
*REAL D2=.1 --diámetro final*  
*REAL S=.1 --altura cono*  
*REAL f\_out\_z = 0*  
*REAL f\_in\_z = 0*

*DECLS*

*REAL chi\_loc --coef de pérdida de p local*  
*REAL rel --relación S/Dh, válido para  $Re > 3.5 \cdot 10^{**3}$*   
*REAL v0 --velocidad del fluido a la entrada*  
*REAL v2 --velocidad del fluido a la salida*  
*REAL F0 --área a la entrada*

*REAL F2*                    --área a la salida  
*REAL T\_prop*  
*REAL k*  
*REAL A\_lat*  
*REAL he*  
*REAL hi*  
*REAL U*  
*REAL delta\_p*  
*REAL DTLM*  
*REAL NuD\_inf*  
*REAL C*  
*REAL n*  
*REAL Nu*  
*REAL Re*  
*REAL nu*  
*REAL Pr*

*TOPOLOGY*

*PATH f\_in TO f\_out*

*INIT*

*f\_out.T = (f\_in.T+T\_ext)/2*

*CONTINUOUS*

*Re=v0\*D0/nu*

*nu=linearInterp2D(props,f\_in.T,4)*

*Pr = linearInterp2D(props,T\_prop,6)*

*F0 = PI\*D0\*\*2/4*

*F2 = PI\*D2\*\*2/4*

*rel = S/D0*

*chi\_loc = linearInterp1D(t\_cono,rel)*

*v0 = (f\_in.w / f\_in.rho) / F0*

*v2 = (f\_out.w / f\_out.rho) / F2*

*f\_out.w = f\_in.w*

```

    delta_p = chi_loc * (f_out.rho*v2**2/2)
--PÉRDIDA DE TEMPERATURA
--TURBULENTO PARA TODO EL CONDUCTO:
    Nu=NuD_inf*(1+C*((D0+D2)/2/S)**n)
    NuD_inf=0.023*(Re**.8)*(Pr**(1/3))
    C=ZONE(S/(D0+D2)*2>20)6
        OTHERS 1
    n=ZONE(S/(D0+D2)*2>20)1
        OTHERS .7
    he=ZONE (f_in.T==T_ext) 1
        OTHERS 3.56*abs((T_prop-T_ext)/(D0+D2)*2)**0.25
    hi = k*Nu/(D0+D2)*2
    T_prop = (f_in.T+(f_in.T + T_ext)/2)/2
    k = linearInterp2D(props,T_prop,5)
    A_lat = PI*(D0+D2)/2*sqrt(S**2+((D2-D0)/2)**2)
    U = 1/(1/he+1/hi)
    DTLM = ZONE (f_in.T==T_ext) 0
        OTHERS (f_out.T-f_in.T)/log((T_ext-f_in.T)/(T_ext-f_out.T))
    U*A_lat*DTLM = f_in.w*(f_out.cp*f_out.T-\
f_out.cp*f_in.T+(v2**2-v0**2)/2+g*(f_out.z-f_in.z))
    U*A_lat*DTLM + delta_p/f_in.rho*f_in.w =\
f_in.w*f_out.rho*f_out.T-\
(f_in.cp*f_in.T)-(f_out.p-f_in.p)/\
f_out.rho*f_in.w

P.perdida = delta_p/f_in.rho/g

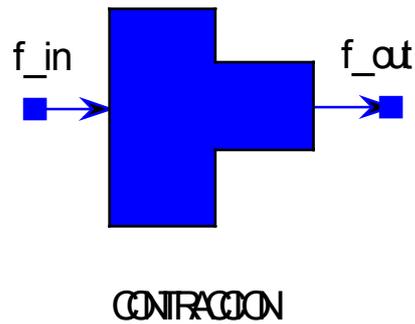
```

END COMPONENT

**CONTRACCIÓN: Componente *CONTRACCIÓN*.**

Este componente modela un cambio brusco de sección, una repentina contracción entre dos elementos de distribución de fluido. La pérdida de carga por fricción es muy significativa.

Componente Ecosim:



Archivo EL:

*LIBRARY LABORATORIO*

*COMPONENT CONTRACCION*

*PORTS*

*IN fluid f\_in --fluid inlet f\_in*

*OUT fluid f\_out --fluid outlet f\_out*

*DATA*

*REAL D1 =.1 --diámetro inicial*

*REAL D0 =.09 --diámetro final*

*REAL l\_seg =.01 --longitud de convergencia*

*DECLS*

*REAL chi\_loc --coef de pérdida de p local*

*REAL Re --Reynolds a la salida*

*REAL v0 --vel a la salida*

*REAL v1 --vel a la entrada*

*REAL rel --relación área final/área inicial (F0/F1)*

*REAL F0 --área a la salida (F0)*

*REAL F1 --área a la entrada (F1)*

*REAL alfa*

*REAL chi\_seg*

*REAL delta\_p*

*REAL nu\_in*

*REAL nu\_out*

TOPOLOGY

*PATH*  $f\_in$  TO  $f\_out$

INIT

$f\_out.T = f\_in.T$

DISCRETE

WHEN ( $Re \leq 10$ ) THEN

$chi\_loc = 30/Re$

END WHEN

WHEN ( $Re > 10$  AND  $Re \leq 10000$ ) THEN

$rel = D0/D1$

$chi\_loc = linearInterp2D(t\_contraccion, rel, Re)$

END WHEN

WHEN ( $Re > 10000$ ) THEN

$alfa = 2 * atan((D1 - D0) / 2 / l\_seg)$

$rel = l\_seg / D0$

$chi\_seg = linearInterp2D(t\_convergencia, rel, alfa)$

$chi\_loc = chi\_seg * (1 - rel) ** 0.75$

--viene en  $f$  de lo q no se especifica bien -> reconsiderar en cono

$chi\_fric$

END WHEN

CONTINUOUS

$F0 = PI * D0 ** 2 / 4$

$v0 = (f\_in.w / f\_in.rho) / F0$

$F1 = PI * D1 ** 2 / 4$

$v1 = (f\_in.w / f\_out.rho) / F1$

$Re = v0 * D0 / nu\_in$  -- $nu$  se ha evaluado a la entrada

$nu\_in = linearInterp2D(props, f\_in.T, 4)$

$nu\_out = linearInterp2D(props, f\_out.T, 4)$

$f\_out.w = f\_in.w$

$delta\_p = chi\_loc * (f\_in.rho * v0 ** 2 / 2)$

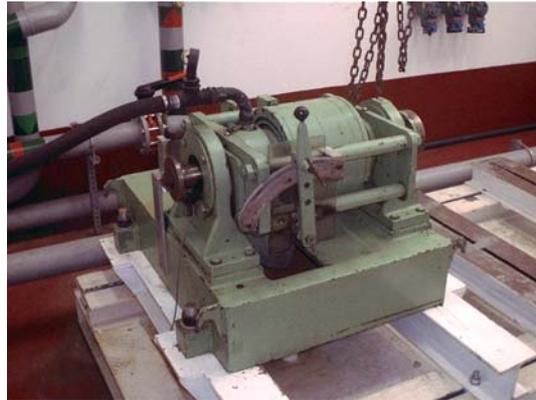
--creo q la perdida por temperatura será insignificante

$f\_in.h + v1 ** 2 / 2 = f\_out.h + v0 ** 2 / 2$

$$\begin{aligned} \text{delta\_p}/f\_in.\rho &= f\_out.h-f\_out.p/f\_out.\rho- \\ &(f\_in.h-f\_in.p/f\_in.\rho) \end{aligned}$$

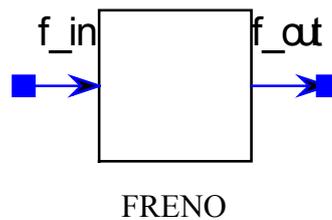
*END COMPONENT*

**FRENO:** Componente *FRENO*



El freno consiste en el elemento disipador de la potencia dada por el motor, potencia disipada en forma de calor.

Componente Ecosim:



Archivo EL:

*LIBRARY LABORATORIO*

*COMPONENT FRENO*

*PORTS*

*IN fluid f\_in*

*OUT fluid f\_out*

*OUT P\_control P*

*DATA*

*REAL W\_pf=800000*

*CONTINUOUS*

*f\_out.p = 100000--p\_ext*

$$W_{pf} = f_{in}.rho * f_{in}.Q * f_{in}.cp * (f_{out}.T - f_{in}.T)$$

$$f_{in}.w = f_{out}.w$$

$$P.perdida = f_{in}.w * (f_{in}.p - f_{out}.p) / f_{in}.rho$$

*END COMPONENT*

## **INTERCAMBIADOR DE CALOR DEL CIRCUITO DEL MOTOR:**

Componente *INTERCAMBIADOR*.

El intercambiador de calor utilizado en el sistema de enfriamiento del circuito del motor es un intercambiador de calor líquido-líquido de placas.

En el circuito primario entra el agua “caliente” procedente del aljibe, y sale agua “fría” que va hacia la torre de refrigeración donde se enfriará aún más. Por el circuito secundario circula el agua procedente de la torre que intercambia calor con el circuito primario y sale hacia la refrigeración del motor.

En la bibliografía existen pocos datos referentes a la modelización de intercambiadores de placas, por lo que se ha decidido modelar el intercambiador como una caja negra de la que se tengan tabuladas las entradas y salidas. Ello ha sido posible gracias a la existencia de un programa de diseño del intercambiador en cuestión de la empresa suministradora, Programas Sedical para Intercambiadores.

**Obtención de datos con Programa Sedical.**

Las variables de entrada del sistema serán el caudal del circuito primario (Q1) y las temperaturas de entrada de ambos circuitos (T11 y T21), ya que el caudal del circuito secundario viene impuesto por la bomba. Es por tanto necesaria una tabla de comportamiento tridimensional. Para acceder a los datos tabulados se contempla en el modelo la interpolación lineal, accesorio del lenguaje de programación.

El número de puntos necesario para obtener una fiabilidad de resultados aceptable ha sido determinado en función de la variabilidad de los datos obtenidos dentro de los márgenes de actuación del sistema:

VARIABLE	COTA INFERIOR	COTA SUPERIOR
<b>Caudal primario Q1 (m<sup>3</sup>/h)</b>	10	30 (impuesta por las condiciones de

		entrada)
<b>Temperatura primario T11 (°C)</b>	6	60
<b>Temperatura secundario T21 (°C)</b>	5 (temperatura de rocío del agua en invierno)	28 (temperatura de rocío del agua en verano)

Para obtener los resultados deseados se ha partido de unos datos de diseño suministrados por la empresa. Con ellos se ha accedido al programa y se ha realizado en un primer paso la función de diseño, obteniéndose como resultado el intercambiador del que se dispone en el laboratorio.

<b>DATOS</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>CIRCUITO CALIENTE</b>	<b>CIRCUITO FRÍO</b>
<b>Potencia</b>	kW	775	775
<b>Fluido</b>		Agua	Agua
<b>Caudal</b>	m <sup>3</sup> /h	27.1	36.4
<b>Temperatura entrada</b>	°C	60.0	31.5
<b>Temperatura salida</b>	°C	35.0	50.0
<b>Pérdidas de carga</b>	kPa	27	49
<b>Calor específico</b>	kJ/kg K	4.18	4.18
<b>Peso específico</b>	kg/m <sup>3</sup>	987	990
<b>Conductividad térmica</b>	W/m K	0.64	0.63
<b>Viscosidad</b>	cSt	0.6	0.7
<b>Dif. Temp. Log. Media</b>	°C	6.2	6.2
<b>Área transmisión calor</b>	m <sup>2</sup>	18.9	18.9

<b>Valor U, servicio</b>	W/m <sup>2</sup> K	6616	6616
<b>Factor de ensuciamiento</b>	m <sup>2</sup> K/W	10e-6	10e-6
<b>Sobredimensionamiento</b>	%	1	1
<b>Agrupamiento</b>		1*22 / 1*22	1*22 / 1*22

AGRUPAMIENTO ULTRAFLEX S/S=22 S/D=0 D/S=0 D/D=0

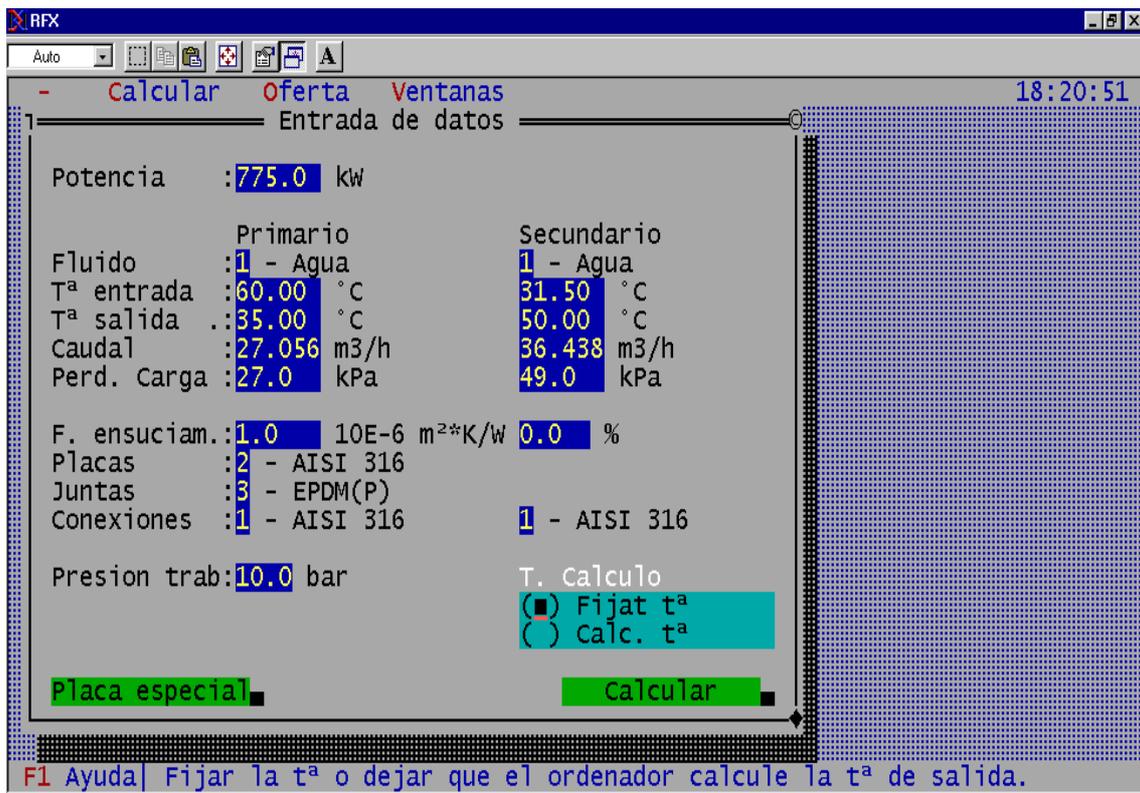
NS total de placas (Unidades) 45

Presión trabajo/prueba (MPa) 1.0/1.5

La forma de ver en el programa Sedical cómo se comporta con otras condiciones es la siguiente:

- Hacer el cálculo original, respetando los datos de partida que aparecen en la tabla anterior y comprobar que el programa recomienda el mismo intercambiador: UFX-42 H, de 18.9 m<sup>2</sup> de superficie, agrupamiento 1 x 22 (22 canales de primario, otros 22 de secundario, lo que supone 22 + 22 = 44 placas, más 1 de cierre, que hacen las 45 que tiene el intercambiador). En la parte inferior de la pantalla debe aparecer:

S/S=22 S/D=0 D/S=0 D/D=0



Se calcula entonces con estos datos y se obtiene el intercambiador que idóneo para esas condiciones:

The screenshot shows the RFX software interface. The top menu bar includes 'Auto', 'Calcular', 'oferta', and 'Ventanas'. The time is 18:27:50. The 'Entrada de datos' section contains the following input values:

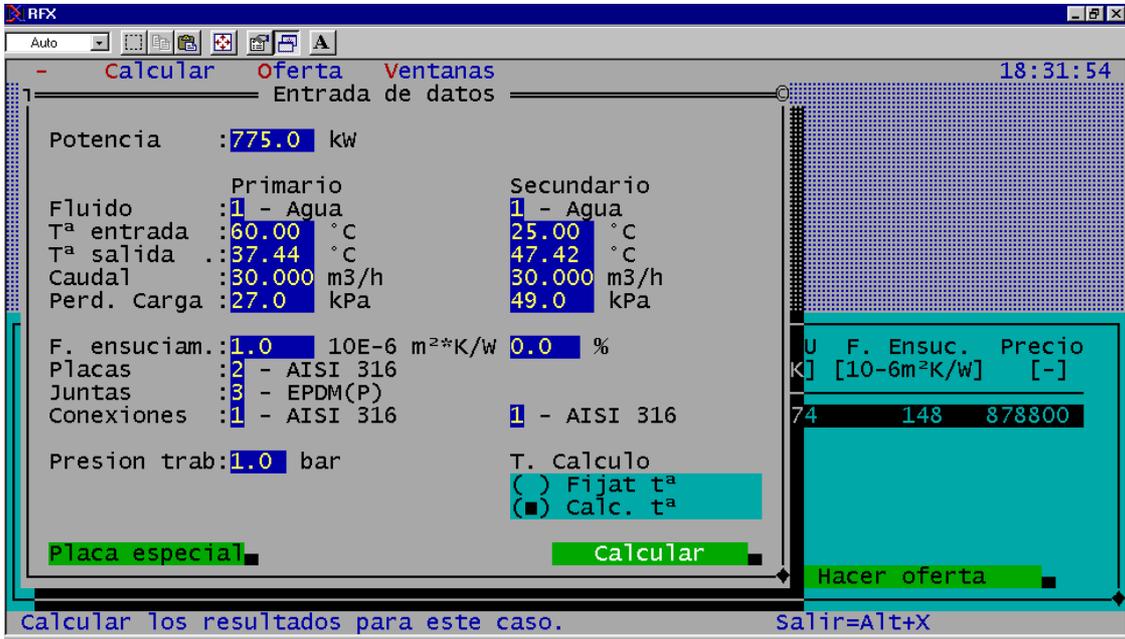
Potencia	:775.0 kW	
Fluido	Primario: 1 - Agua	Secundario: 1 - Agua
Tª entrada	:60.00 °C	:31.50 °C
Tª salida	:35.00 °C	:50.00 °C
Caudal	:27.056 m3/h	:36.438 m3/h
Perd. Carga	:27.0 kPa	:49.0 kPa

The 'Resultados' section displays a table with the following data:

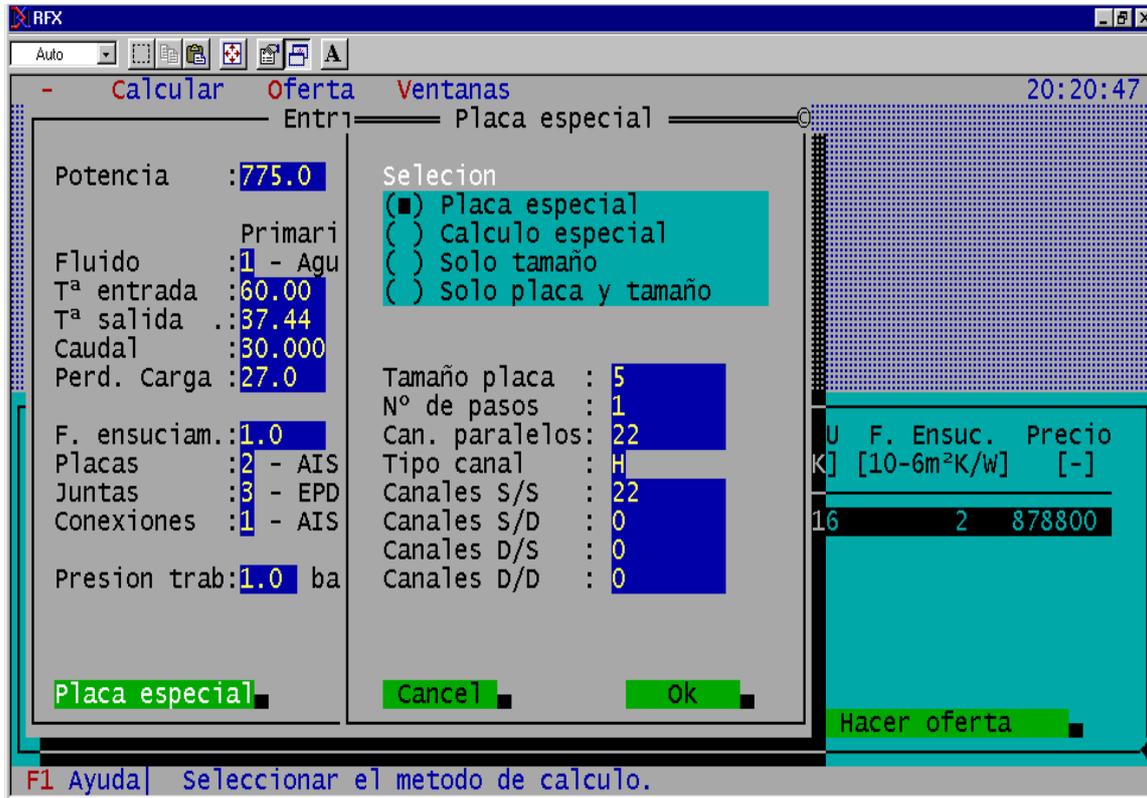
Placa	Canal	Area [m²]	Agrupamiento	DP1 [kPa]	DP2 [kPa]	Valor U [w/m²K]	F. Ensuc. [10-6m²K/w]	Precio [-]
UFX-	42 H	18.9	1 x 22	27	49	6616	2	878800

Below the table, the configuration is shown as S/S= 22 S/D= 0 D/S= 0 D/D= 0. At the bottom, there are two buttons: 'Modificar datos' and 'Hacer oferta'. A footer note says 'Pulse ENTER para ver mas datos.'

- Una vez que se tiene en pantalla el cálculo del intercambiador original (sombreado frente a los otros que calcula), se selecciona MODIFICAR DATOS. Ahora se introducen todos los cambios deseados dejando a 0 la sobredimensión.



- Cuando se terminen los cambios, antes de pulsar CALCULAR, se pulsa PLACA ESPECIAL, respetando todos los datos que aparecen del cálculo original, dando ENTER a todo, y al final a OK.



- Se pulsa CALCULAR.

El circuito primario siempre es el más caliente.

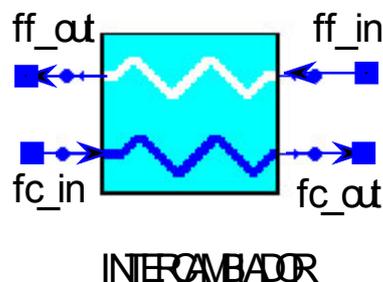
### Análisis de los datos obtenidos.

Se han obtenido uno a uno los distintos resultados con el Programa Sedical para construir las tablas tridimensionales de las temperaturas de salida de los circuitos caliente (T12) y frío (T22) y las pérdidas de carga del flujo caliente (DP1) y del flujo frío (DP2) en función de las variables de entrada caudal de flujo caliente (Q1), temperatura de entrada de flujo caliente (T11) y temperatura de entrada de flujo frío (T21).

En vista de los resultados obtenidos puede decirse que:

- T12 no es lineal con T11, aunque el rango de variación no es muy grande y con un adecuado número de puntos de la tabla puede modelarse. El comportamiento respecto a T21 es aproximadamente lineal, por lo que es válida la interpolación. T12 no es lineal con respecto a Q1 pero varía en un rango muy estrecho.
- T22 tiene un comportamiento aproximadamente lineal respecto a T11 y T21, por lo que es correcta la interpolación lineal en la tabla de comportamiento. Con respecto a Q1 no se comporta linealmente, pero puede decirse que el rango de variación es lo suficientemente pequeño como para hacer válida la interpolación.
- Las variaciones de las pérdidas de carga de ambos flujos son muy pequeñas y es aceptable interpolar en las tablas.

Componente Ecosim:



El intercambiador se define como un elemento de dos entradas y dos salidas, en el que las condiciones de salida se establecen a partir de las de entrada.

Existen dos corrientes distintas con una entrada y una salida, pero con una relación entre ambas. La conservación de la masa se aplica a las dos corrientes, con el caudal del circuito frío establecido, y en función de lo expuesto anteriormente a partir del programa Sedical se obtiene:

- Temperatura de salida del circuito caliente (T12) en función de: caudal y temperatura de entrada del circuito caliente (Q1, T11, respectivamente) y temperatura de entrada del circuito frío (T21). La variable *estado* permite establecer que esta temperatura sea igual a la de entrada en el caso de que la torre de refrigeración no esté operativa (*estado* = 0). El *estado* 1 establece la interpolación en la tabla de forma normal.
- Temperatura de salida del circuito frío (T22) en función de: caudal y temperatura de entrada del circuito caliente (Q1, T11, respectivamente) y temperatura de entrada del circuito frío (T21).
- Presión de salida del circuito caliente dada por la caída de presión en el circuito caliente DP1 establecida a partir de: caudal y temperatura de entrada del circuito caliente (Q1, T11, respectivamente) y temperatura de entrada del circuito frío (T21).
- Presión de salida del circuito frío dada por la c caída de presión en el circuito caliente DP2 establecida a partir de: caudal y temperatura de entrada del circuito caliente (Q1, T11, respectivamente) y temperatura de entrada del circuito frío (T21).

Archivo EL:

*LIBRARY LABORATORIO*

*COMPONENT INTERCAMBIADOR*

*PORTS*

*IN fluid fc\_in --fluido caliente inlet fc\_in*

*OUT fluid fc\_out --fluido caliente outlet fc\_out*

*IN fluid ff\_in --fluido frio inlet fc\_in*

*OUT fluid ff\_out --fluido frio outlet fc\_out*

*OUT P\_control P\_cc*

*DATA*

*REAL estado = 1*

*INIT*

*ff\_in.T=15*

*ff\_out.T = ff\_in.T+20*

*fc\_out.T = fc\_in.T-20*

*CONTINUOUS --se sup q Q2=36.4*

*fc\_in.w = fc\_out.w*

*ff\_in.w = ff\_out.w*

*fc\_out.T = estado\*linearInterp3D (T12,fc\_in.Q,ff\_in.T,fc\_in.T)+(1-estado)\*fc\_in.T*

*ff\_out.T = linearInterp3D (T22,fc\_in.Q,ff\_in.T,fc\_in.T)*

*fc\_out.p = estado\*(fc\_in.p-linearInterp3D (DP1,fc\_in.Q,ff\_in.T,fc\_in.T))+(1-estado)\*fc\_in.p*

*ff\_in.p - ff\_out.p = linearInterp3D (DP2,fc\_in.Q,ff\_in.T,fc\_in.T)*

*P\_cc.perdida = fc\_in.w\*(fc\_in.p - fc\_out.p)/fc\_in.rho*

*END COMPONENT*

## MEZCLADOR: Componente *MEZCLADOR*.



El mezclador que se ha instalado en cada una de las celdas ha sido especialmente construido para las instalaciones del laboratorio, por lo que no se dispone de información de características técnicas.

Todos ellos están abiertos a la atmósfera, con lo que se impide la presurización de las cubas, fabricadas en fibrocemento. El hecho de estar abiertos a la atmósfera trae como contrapartida que se evapore parte del agua contenida en el mezclador, cuya temperatura estará próxima a los 80 °C. Existirá por tanto equilibrio líquido-vapor en el interior del mezclador.

Entradas y salidas:

- AAM: agua a motor. Es el caudal de agua que tras la mezcla se encuentra en condiciones idóneas de temperatura para refrigerar el motor a ensayo.
- ADM: agua caliente procedente del motor en ensayo tras su refrigeración.
- ADT: aporte de agua a la torre.
- RB: rebosadero. El agua no necesaria vuelve al aljibe.

Para hacer un modelado más sencillo del elemento se ha contemplado el mezclador como una caja negra con unas determinadas entradas y salidas.

Para la corriente **evap** se ha utilizado el puerto *fluidV*, descrito anteriormente, ya que sólo interesa su entalpía y ésta vendrá dada por la tabla de entalpía de vapor saturado.

No existirá en ningún momento vapor sobrecalentado porque para ello tendría que evaporarse todo el agua contenida en el mezclador.

El mezclador utiliza la corriente de agua fría (proveniente de la torre de refrigeración) para refrigerar el agua del motor. La regulación la consigue mezclando las dos corrientes, de forma que la corriente fría se calienta y la caliente se enfría.

El decremento de temperatura que consigue la corriente caliente se regula aumentando o disminuyendo el caudal de la corriente fría. Una válvula de tres vías comandada por temperatura hace que circule mas o menos corriente fría en función de la temperatura que se quiera conseguir en el mezclador, y por tanto en función de la temperatura que regresa al motor.

El mezclador esta abierto a la atmósfera para evitar problemas de presión, esto hace que exista cierta evaporación al ambiente, pero esta es prácticamente despreciable al ser la temperatura máxima que pueda alcanzar el mezclador inferior a 80°C (temperatura máxima de la corriente que refrigera al motor). Sin embargo, en el modelo utilizado en Ecosim se ha tenido en cuenta esta evaporación, para controlar en cierta medida la perdida total de agua que puede existir a lo largo del tiempo en la ejecución de experimento.

El mezclador consta de cinco corrientes de agua:

- ♦ **ADT**: Agua de entrada proveniente de la torre (corriente fría)
- ♦ **ADM**: Agua de entrada proveniente del motor (corriente caliente)
- ♦ **AAM**: Agua de salida del mezclador
- ♦ **RB**: Agua de salida del mezclador (la que rebosa del deposito)
- ♦ **evap**: Corriente de agua que se evapora

Al haber cinco corrientes de agua tenemos 16 variables (3 por corriente de agua y 4 por la corriente de evaporación), de ellas se conocen:

- ♦ Las 3 variables de ADT y las 3 de ADM

- ♦ De la corriente de evaporación: la presión ( $p_{ext}$ ), la temperatura (T del mezclador).
- ♦ De AAM se sabe que sale a la  $T^a$  del mezclador, y que su presión viene dada por la exterior y el peso de la columna de agua que soporta. Además se sabe que la corriente de AAM debe ser la misma que la de ADM, (la corriente que entra y sale del motor debe ser la misma)
- ♦ De RB, igual que para AAM se conoce  $T^a$  y presión.

De las 16 variables se tienen 13 conocidas, por lo que nos faltan 3 ecuaciones para conocer todas las variables del sistema. Las 3 ecuaciones que se han tenido en cuenta son:

- ♦ Un balance de masa total.
- ♦ Un balance de energía total.
- ♦ Una relación experimental de la cantidad de agua evaporada.

Cantidad de agua evaporada: La cantidad de agua evaporada en una superficie libre experimentalmente es:  $\omega = 0.00674 \cdot (P_w - P)^{1.2}$ , donde P se mide en mmHg y  $\omega$  en  $Kg/h \cdot m^2$

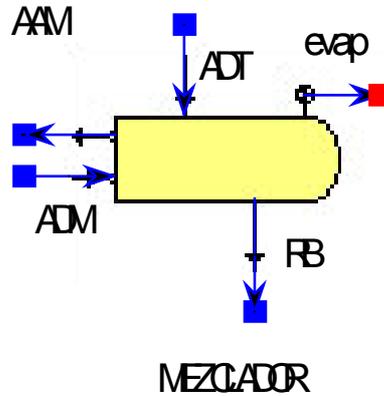
La cantidad de agua total evaporada habrá que multiplicarla por la superficie de evaporación, en nuestro caso (A·D)

Poniendo la relación en las unidades utilizadas en nuestra simulación:

$$evap.\omega = (A \cdot D/3600) \cdot 0.00674 \cdot (P_{\omega}/133 - P/133)^{1.2}$$

Una vez que está el elemento completamente definido se transforman las ecuaciones en el lenguaje EL, y se le asigna un dibujo. El dibujo que en Ecosim representa al mezclador es:

Componente Ecosim:



Archivo EL:

*LIBRARY LABORATORIO*

*COMPONENT MEZCLADOR*

*PORTS*

*IN fluid ADT --corriente ADT*

*IN fluid ADM --corriente ADM*

*OUT fluid RB --corriente RB*

*OUT fluid AAM --corriente AAM*

*OUT fluidV evap --corriente evap*

*DATA*

*REAL A = .20 "cota A"*

*REAL B = .50 "cota B"*

*REAL C = .40 "cota C"*

*REAL D = .60 "cota D"*

*REAL E = .10 "cota E"*

*REAL F = .30 "cota F"*

*REAL G = .20 "cota G"*

*REAL x = 0.0005 "cota indeterminada en el manual"*

```

REAL D_ADT = 0.2
REAL D_RB = 0.2
REAL D_AAM = 0.2
REAL D_ADM = 0.2
REAL ADT_z = 0
REAL RB_z = 0
REAL AAM_z = 0
REAL ADM_z = 0

```

*DECLS*

```

REAL T           "temp del vol principal"
REAL rho
REAL M
REAL cp
REAL v_ADT
REAL A_ADT
REAL v_AAM
REAL A_AAM
REAL v_RB
REAL A_RB
REAL v_ADM
REAL A_ADM

```

*INIT*

```

ADT.p = 100000
ADM.p = 100000
ADM.T = 80
RB.p = 100000
AAM.p = 100000
evap.p = 100000

```

*CONTINUOUS*

```

cp = linearInterp2D(props,T,1)
rho = linearInterp2D(props,T,2)
M = C*C*D*rho

```

$$v\_ADT = (ADT.w / ADT.rho) / A\_ADT$$

$$A\_ADT = PI * D\_ADT ** 2 / 4$$

$$v\_ADM = (ADM.w / ADM.rho) / A\_ADM$$

$$A\_ADM = PI * D\_ADM ** 2 / 4$$

$$v\_RB = (RB.w / RB.rho) / A\_RB$$

$$A\_RB = PI * D\_RB ** 2 / 4$$

$$v\_AAM = (AAM.w / AAM.rho) / A\_AAM$$

$$A\_AAM = PI * D\_AAM ** 2 / 4$$

--Corriente de evaporación

$$evap.p = p\_ext$$

$$evap.T = T$$

$$evap.h = linearInterp2D(lv, 2, p\_ext)$$

$$evap.w = 2e-6 * \log(1 + (1 - fi\_ext) * |$$

$$linearInterp2D(lv, 1, T\_ext) / (p\_ext - linearInterp2D(lv, 1, T))) * A * D$$

--Balance de masa

$$0 = (ADT.w + ADM.w - RB.w) - evap.w - AAM.w$$

--Balance de energía

$$ADT.w * (ADT.h + v\_ADT ** 2 / 2 + g * ADT\_z) + |$$

$$ADM.w * (ADM.h + v\_ADM ** 2 / 2 + g * ADM\_z) - |$$

$$RB.w * (RB.h + v\_RB ** 2 / 2 + g * ADT\_z) - |$$

$$AAM.w * (AAM.h + v\_AAM ** 2 / 2 + g * AAM\_z) - |$$

$$evap.w * (evap.h) = M * cp * T' + (ADT.w + ADM.w - RB.w - AAM.w - evap.w) * cp * T$$

--Corrientes de salida

$$AAM.T = T$$

$$AAM.p = linearInterp2D(props, T, 2) * g * (C - x) + p\_ext - 1 / 2 * |$$

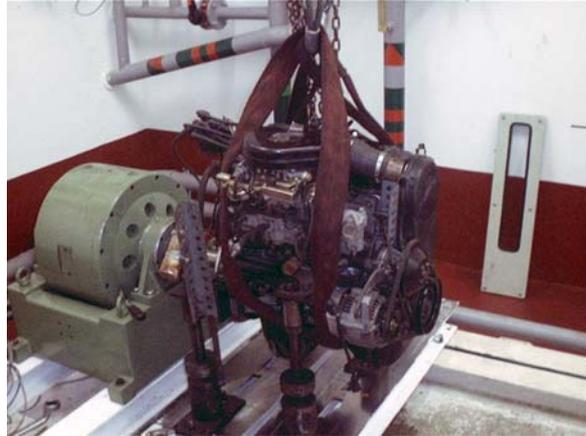
$$linearInterp2D(props, T, 2) * v\_AAM ** 2$$

$$RB.T = T$$

$$RB.p = 100000$$

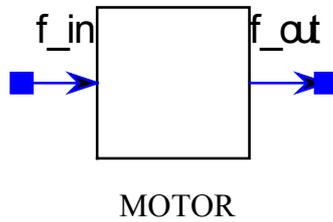
END COMPONENT

## MOTOR: Componente *MOTOR*



El motor se caracteriza por su ley de regulación térmica en función de la potencia. El caudal de paso por el motor ha sido modelado por una ley suministrada por el Tutor de este proyecto.

Componente Ecosim:



Este elemento tiene como dato la potencia, que es además parámetro a variar en el análisis posterior de la instalación.

Archivo EL:

*LIBRARY LABORATORIO*

*COMPONENT MOTOR*

*PORTS*

*IN fluid f\_in*

*OUT fluid f\_out*

*DATA*

*REAL Wmotor = 600000*

*INIT*

*f\_in.T = 70*

*f\_in.w = 10*

*CONTINUOUS*

*Wmotor = 1000\*f\_out.Q\*4200\*(f\_out.T-f\_in.T)*

*f\_out.Q = 0.009\*Wmotor/800000+0.00384*

*f\_out.p = 120000*

*f\_out.w = f\_in.w*

*END COMPONENT*

## T's DE DISTINTA CONFIGURACIÓN.

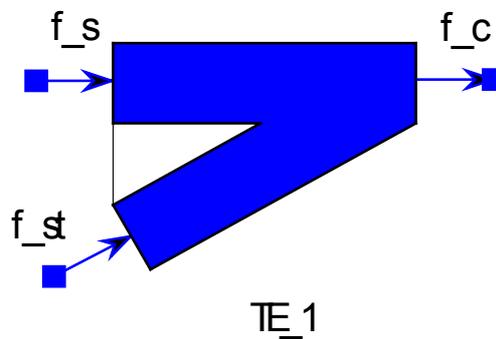
Las T's son elementos de bifurcación de flujo en las instalaciones. Se han modelado cuatro tipos de T's según la entrada de flujo y el ángulo de una de sus ramas. Al igual que en otros componentes lo importante a modelar radica en la pérdida de carga por fricción, distinta en cada tipo.

- $TE\_1$ : Té de dos entradas y una salida en ángulo de  $90^\circ$ .
- $TE\_2$ : Té de dos entradas y una salida en ángulo de  $45^\circ$ .
- $TE\_3$ : Té de dos entradas y una salida en ángulo de  $60^\circ$ .
- $TE\_4$ : Té de dos entradas y una salida en ángulo de  $30^\circ$ .
- $TE\_18$ : Té de una entrada y dos salidas en ángulo de  $90^\circ$ .

T de dos entradas y una salida en ángulo de  $90^\circ$ : Componente  $TE\_1$ .

En este tipo de T confluyen dos corrientes que se unen para dar una única de salida. Una corriente de entrada y la de salida tienen igual dirección y diámetro, siendo variable el diámetro de la otra corriente de entrada. Esta segunda corriente de entrada tendrá asociado un mayor diferencial de presión.

Componente Ecosim:



Este elemento vendrá dado principalmente por el estado de las dos corrientes de entrada, y en función de las ecuaciones generales se obtendrán las condiciones de salida. Se trata de una mezcla de corrientes que dan lugar a una única de salida, cuya temperatura vendrá dada en función de las de las corrientes de entrada.

**T de una entrada y dos salidas en ángulo de 90°: Componente *TE\_18*.**



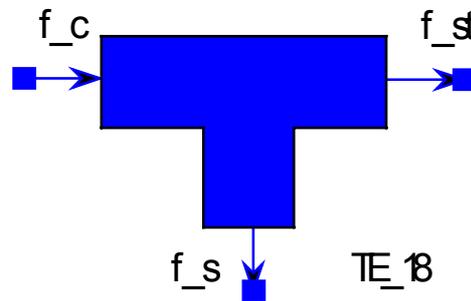
Supone la división de una corriente de entrada en dos de salida. Las características de las dos corrientes de salida vendrán en función de condiciones externas a este elemento.

La presión de salida de las dos corrientes es la misma, al igual que la temperatura. En principio se trata de un elemento de poco recorrido, por lo que la variación de temperatura es despreciable y por tanto las corrientes de salida tendrán igual temperatura que la de entrada.

La presión de salida vendrá dada en función de las pérdidas que se originen y éstas en función de los caudales de paso.

Es necesaria una condición externa como última ecuación que establezca la relación entre las dos salidas.

Componente Ecosim:



El elemento  $TE_{18}$  se ha utilizado para modelar la válvula de tres vías comandada por temperatura. Esta válvula desvía hacia el mezclador un determinado caudal en función de la temperatura que se desee para la entrada al motor.

Este ajuste de temperatura no está claro en el manual de funcionamiento del laboratorio de Motores, así que se ha optado, en función de lo indicado por los responsables del laboratorio, por un funcionamiento de la válvula según el cuál se desvía caudal hacia el mezclador procedente de la refrigeración por las torres cuando la temperatura de entrada al motor supere los  $70^{\circ}\text{C}$ .

El modelo de actuación de la válvula se ha elegido lineal, por ser una opción sencilla de manejar y de modificar en el caso de que en algún momento se conozca en concreto el funcionamiento de dicha válvula.

## **TORRE DE REFRIGERACIÓN:** Componente *TORRE*.

En una torre de refrigeración o de enfriamiento se persigue refrigerar una corriente de agua al ponerla en contacto con una corriente de aire. El enfriamiento se produce por el contacto entre las dos corrientes y por evaporación de parte del agua. El agua debe entrar pulverizada de forma que se aumente la superficie de contacto y así favorecer el proceso.

El funcionamiento de una torre de refrigeración se expresa por los valores de “la escala” y de la “aproximación”:

- La escala es la reducción de temperatura del agua en la torre.
- La aproximación es la diferencia entre la temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada y la temperatura del agua a la salida.

La temperatura de bulbo húmedo hace referencia a la medida por un termómetro denominado también de bulbo húmedo, que posee un bulbo recubierto por una tela empapada en agua. Haciendo pasar sobre el bulbo una corriente de aire a velocidad suficientemente elevada ( $3 \div 5$  m/s) se produce, si el aire no está saturado, un descenso de temperatura respecto a la indicada por un termómetro normal debido a la evaporación del agua que baña la tela. Pasado un cierto tiempo, la temperatura medida permanece constante y puede tomarse. Ese valor corresponde a la temperatura húmeda o de bulbo húmedo de la corriente de aire.

Esta temperatura húmeda no es sino una aproximación aceptable de una propiedad termodinámica del aire denominada temperatura termodinámica de bulbo húmedo o de saturación adiabática, que no puede ser medida directamente. Esta temperatura está influenciada no sólo por el estado del aire sino también por transferencias de calor y masa.

Las torres de las que se dispone en el laboratorio se caracterizan por ser de tiro inducido (la corriente de aire fluye de forma forzada por los ventiladores) y en contracorriente

(las corrientes de agua y de aire fluyen en sentidos opuestos). Para este tipo de torres la bibliografía específica un método de análisis concreto.

### **Análisis de Torre de Refrigeración de corrientes opuestas.**

Se estudia un volumen diferencial de la torre y se desprecia la cantidad de agua que se evapora.

El calor perdido por el agua es el ganado por el aire, lo que da lugar a la siguiente ecuación:

$$dQ = G \cdot dh = -L \cdot c_{p_w} \cdot d\theta$$

dh: diferencial de entalpía del aire (J/kg a.s.)

$c_{p_w}$ : calor específico del agua (4200 J/kg °C)

dA: superficie total mojada (m<sup>2</sup>). Incluye la superficie de las gotas de agua así como de las láminas mojadas y la del restante material mojado.

L: cantidad de agua que entra (kg/s)

G: cantidad de aire que entra (kg/s)

$\theta$ : temperatura del agua de entrada

$\theta-d\theta$ : temperatura del agua de salida

Un tema importante en este proceso es la transmisión de energía del aire a una superficie mojada. Para ello es interesante explicar el concepto de entalpía potencial:

Entalpía potencial: fuerza que hace pasar calor del aire no saturado a una superficie mojada debido a una diferencia de temperaturas de bulbo seco. Además existe otra fuerza, la diferencia de presión de vapor, que origina una transferencia de masa.

Cuando una corriente de aire no saturado fluye sobre una superficie mojada existe entre ellos una película de aire laminar y el calor transmitido ( $dQ_t$ ) se debe, a causa de las dos

fuerzas mencionadas anteriormente, al calor sensible transmitido ( $dQ_s$ ) y al calor latente transmitido ( $dQ_l$ ):

$$dQ_t = dQ_s + dQ_l$$

Estos calores vienen dados respectivamente por:

$$dQ_s = f_g \cdot (t - t_s) \cdot dA$$

$f_g$ : coeficiente de transmisión de calor a través de película ( $J/s \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ )

$t$ : temperatura del aire no saturado ( $^\circ\text{C}$ )

$t_s$ : temperatura de la superficie mojada ( $^\circ\text{C}$ )

$$dQ_l = h_{fg} \cdot dw$$

$h_{fg}$ : entalpía de evaporación ( $J/kg$ )

$dw$ : peso de agua condensada o evaporada ( $kg/s$ )

Toda la humedad condensada ó evaporada debe pasar a través de la película de aire por difusión:

$$dw = k' \cdot (p - p_s)$$

$k'$ : constante de difusión ( $m.s$ )

$p$ : presión de vapor del aire no saturado ( $N/ \text{m}^2$ )

$p_s$ : presión de vapor de la superficie mojada ( $N/ \text{m}^2$ )

Si la presión barométrica es aproximadamente constante y teniendo en cuenta que la humedad  $W$  de una corriente de aire es proporcional a la presión de vapor puede asumirse que:

$$k' \cdot (p - p_s) \cong k \cdot (W - W_s)$$

W: humedad del aire no saturado (kg vapor/kg a.s.)

W<sub>s</sub>: humedad del aire saturado (kg vapor/kg a.s.)

Queda entonces que:

$$dQ_l = k \cdot (W - W_s) \cdot h_{fg} \cdot dA$$

Según el autor Lewis, el coeficiente k puede expresarse como:

$$k = \frac{f_g}{cp + W \cdot cp_s}$$

cp: calor específico del aire

cp<sub>s</sub>: calor específico del vapor

Con lo que al final el calor transmitido queda como sigue:

$$dQ_t = f_g \cdot (t - t_s) \cdot dA + \frac{f_g}{cp + W \cdot cp_s} \cdot h_{fg} \cdot (W - W_s) \cdot dA$$

En cuanto a la entalpía potencial, se tiene que:

- Entalpía del aire saturado a la temperatura de la superficie mojada:

$$h_s = cp \cdot t_s + W_s \cdot (h_f - h_{fg})$$

- Entalpía del aire no saturado:  $h = cp \cdot t + W \cdot (h_f + h_{fg} + cp_s \cdot (t - t_s))$

Si se opera con las ecuaciones anteriores se llega a que puede obtenerse la siguiente expresión para el calor transmitido en función de la diferencia de entalpías h-h<sub>s</sub> habiendo despreciado el término  $h_f \cdot (W - W_s)$ :

$$dQ_i \cong \frac{f_g \cdot dA}{cp + W \cdot cp_s} \cdot (h - h_s)$$

Con esta aproximación el error que se comete es menor del 5% y presenta la ventaja de poder trabajar con entalpías.

Otra aproximación que aparece en la bibliografía es la siguiente:

$cp + W \cdot cp_s \cong 0.245$  donde se han empleado unidades de kcal/kg °C para los calores específicos. Esta expresión en las unidades utilizadas en este proyecto es igual a 1080.2 J/kg °C. Para poder utilizar cualquier sistema de unidades se denominará C al valor de la expresión en general.

Si se aplica todo esto a una torre de refrigeración, es el agua quien es enfriada por el aire, que se calienta.

El calor intercambiado por la corriente de agua será:

$$dQ = -L \cdot cp_w \cdot d\theta = \frac{f_g}{C} \cdot (h_s - h) \cdot dA$$

de donde queda que:

$$-\int_{\theta_a}^{\theta_b} \frac{L \cdot cp_w \cdot d\theta}{h_s - h} = \int \frac{f_g}{C} \cdot dA = \frac{f_g \cdot A}{C}$$

Suele denominarse “característica termodinámica” de la torre a la siguiente expresión:

$$\int_{\theta_b}^{\theta_a} \frac{d\theta}{h_s - h} = \frac{cte}{L}$$

Haciendo uso de la ecuación de la igualdad entre calor cedido por el agua y el ganado por la corriente de aire, se llega la expresión conocida como “Integral o ecuación de Merkel”:

$$\int_{h_d}^{h_c} \frac{d\theta}{h_s - h} = \frac{cte}{G}$$

La integral del calor intercambiado suele realizarse mediante integración numérica: consiste en dividir la torre en un número finito de volúmenes de forma que el incremento de temperatura  $\Delta T$  sea siempre el mismo.

En cada volumen se verificará:

$$\Delta Q = -L \cdot cp_w \cdot \Delta\theta = \frac{f_g \cdot \Delta A}{C} \cdot (h_s - h)_m$$

Sumando para todos los volúmenes, suponiendo el mismo incremento de temperatura en cada uno de ellos, quedará:

$$\frac{f_g \cdot A}{C} = -L \cdot cp_w \cdot \Delta\theta \cdot \sum_m \frac{1}{(h_s - h)_m}$$

Esta ecuación representa el comportamiento del fluido dentro de la torre y permite predecir los resultados para una entrada determinada. La expresión depende tanto de características del fluido como de la geometría de la propia torre. Para cada torre debe realizarse una prueba de recepción para unas condiciones determinadas de forma que pueda estimarse el término constante propio de cada torre.

Prueba de recepción.

El fabricante de una torre de refrigeración puede garantizar que esta enfría un caudal determinado de agua, desde  $\theta_a$  hasta  $\theta_b$ , para una determinada temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada. Se hace esta prueba y se obtiene el valor de  $f_g.A/C$ . Este valor deberá ser igual al correspondiente a los datos de las condiciones específicas dadas por el fabricante.

Predicción de las condiciones de salida de una torre.

Conocidos  $f_g.A/C$ ,  $L$ ,  $G$  y las restantes condiciones de entrada, puede predecirse la temperatura del agua a la salida.

Sin embargo, esto no suele hacerse directamente, sino por aproximaciones sucesivas. Pueden conocerse  $h_c$ ,  $\theta_a$ ,  $G$  y  $L$ , pero  $\theta_b$  o  $h_d$  no pueden calcularse directamente.

El método de aproximaciones sucesivas consiste en suponer  $\theta_b$ , obtener con ella  $f_g.A/C$  y volver a  $\theta_b$ . Así sucesivamente hasta que se obtiene el valor correcto de  $f_g.A/C$ .

Desviaciones de las condiciones ideales.

Si el agua entra a una temperatura superior a  $38^\circ\text{C}$  las predicciones de funcionamiento se desvían de los resultados experimentales, dando éstos enfriamientos menores que los previstos.

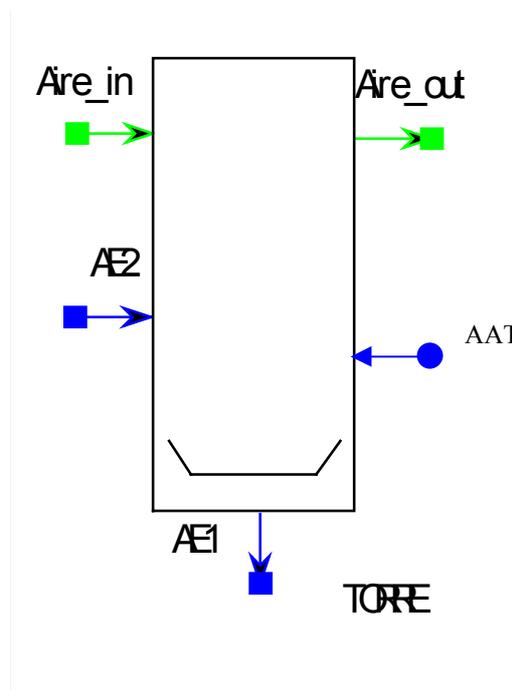
Esto es debido a dos razones:

- La existencia de un gradiente de temperaturas en el agua: para que el calor pase del interior de una gota a la superficie tiene que verificarse que la temperatura interior sea mayor que la temperatura en la superficie. Entonces se tomará una temperatura media mayor que la temperatura en la superficie.

- La temperatura de la película de aire que rodea al agua no es la misma que la temperatura de la superficie del agua, sino ligeramente menor. Por ello la transmisión de energía calculada será también mayor que la experimental.

Estas desviaciones se hacen más apreciables a partir de una temperatura de entrada del agua mayor que 38°C.

Componente Ecosim:



El elemento *TORRE* no ha podido ser modelado con las ecuaciones anteriores debido a que no se dispone por el momento de las características técnicas de las torres instaladas en el Laboratorio de Motores. Se ha mantenido toda la descripción de dicho elemento por considerar este proyecto abierto a ser completado en un futuro, si se conocen más datos sobre las torres.

Para modelar la torre se ha recurrido a datos racionales de torres de refrigeración de corrientes opuestas:

- Caudal másico de aire: aproximadamente cuatro veces mayor que el de la corriente de agua a enfriar (la masa de agua tiene un valor de unos 10 kg/s).

- Cantidad de agua que se evapora: la bibliografía consultada establece que la cantidad de agua evaporada en una torre de refrigeración de corrientes opuestas suele ser un 0.2 por mil. En el elemento esta cantidad será igual a la de entrada del caudal de aportación AAT.
- Se ha impuesto el salto de temperaturas de la corriente de aire en vez de contemplar directamente la ecuación de la energía, ya que era más fiable desde el punto de vista de resolución de Ecosim, al imponer también la temperatura de salida de la corriente de agua.
- La temperatura mínima a la que el aire puede enfriar el agua es su temperatura húmeda (ya definida anteriormente). En este modelo se ha hecho la hipótesis de imponer como temperatura de salida del agua la de entrada del aire. Con ello se cumplen las necesidades requeridas a la torre.

Archivo EL:

*LIBRARY LABORATORIO*

*COMPONENT TORRE*

*PORTS*

*IN fluid AE2*

*OUT fluid AE1*

*IN fluid AAT*

*IN fluidA Aire\_in*

*OUT fluidA Aire\_out*

*DECLS*

*REAL T       "temperatura en la torre"*

*REAL cp*

*REAL rho*

*REAL M*

*REAL H*

*INIT*

*H = 0.1*

*AE2.T = 40*

*CONTINUOUS*

$$cp = \text{linearInterp2D}(props, T, 1)$$

$$\rho = \text{linearInterp2D}(props, T, 2)$$

$$M = \rho * (H * 2 * 2)$$

*--Conservación de masa*

$$H * 2 * 2 = (AE2.w + AAT.w + Aire\_in.w\_w - Aire\_out.w\_w - AE1.w) / \rho$$

$$AAT.w = -Aire\_in.w\_w + Aire\_out.w\_w$$

$$Aire\_in.w\_a = Aire\_out.w\_a$$

*--Corrientes*

$$Aire\_in.w\_a = 40$$

$$Aire\_in.p = Aire\_out.p$$

$$Aire\_out.T = Aire\_in.T + 4.65$$

$$Aire\_in.p = p\_ext$$

$$Aire\_in.T = T\_ext$$

$$Aire\_in.fi = fi\_ext$$

$$AE1.Q = .01$$

$$AE1.p = p\_ext$$

$$AE1.T = T$$

$$AAT.p = p\_ext$$

$$AAT.T = T\_ext$$

$$AAT.w = .0002 * AE2.w$$

$$T = T\_ext$$

*END COMPONENT*

## **TUBERÍA: Componente *TUBERIA*.**



El elemento *TUBERIA* se caracterizará por sus condiciones geométricas (diámetro  $D$  y longitud  $L$ ), el material y la forma en que está construido y las condiciones de entrada de presión, temperatura y caudal o velocidad del fluido que circula por él, en este caso, agua.

En el componente *TUBERIA* se han considerado como ecuaciones básicas las siguientes:

Ecuación de continuidad:  $m_s = m_e$ , donde se ha considerado tramo de tubería recta, de sección constante.

Para la ecuación de la energía se han tenido en cuenta únicamente las pérdidas por convección, ya que la conducción y la radiación son despreciables frente a ellas. Para cuantificar a esas pérdidas por convección se ha recurrido a correlaciones numéricas aplicadas a un caso de convección forzada (por diferencia de presión), interna y externa, sin cambio de fase.

El coeficiente de resistencia calorífica se ha expresado en función de los coeficientes de convección externo e interno:

$$U1 = 1 / (1/h_{e1} + 1/h_{i1})$$

Para la transferencia de calor desde la superficie por conducción y convección, al aire, a la presión atmosférica y a temperaturas ordinarias, como es el caso de la instalación, el coeficiente de convección exterior viene dado, tanto para tubos horizontales como verticales largos, por:

$$h_{el} = 3.56 \cdot (\Delta t_s / D_0')^{0.25}$$

$\Delta t_s$ : temperatura de la superficie descubierta menos la del aire ambiente.

El coeficiente de convección interior ha sido calculado mediante las correlaciones empíricas correspondientes en función de los siguientes números adimensionales:

Número de Reynolds referido al diámetro:  $Re_D = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$

Número de Nusselt referido al diámetro:  $Nu = \frac{h \cdot D}{k}$

Número de Prandtl:  $Pr = \frac{\mu / \rho}{k / \rho \cdot c_p} = \frac{v}{\alpha}$

$\rho$ : densidad

$v$ : velocidad del fluido

$\mu$ : viscosidad del fluido

$h$ : coeficiente de convección

$k$ : conductividad térmica del fluido

Se obtendría entonces:

Coeficiente de convección interior:  $h_i = k \cdot Nu / D$

Para la obtención del número de Nusselt se ha utilizado la siguiente correlación:

- Número de Nusselt medio  $Nu_D = Nu_{D_\infty} \cdot (1 + C \cdot (D/L)^n)$

Esta correlación es válida para todo el conducto y aplicable para las condiciones que se tendrán en el sistema: régimen turbulento ( $Re > 2000$ ) y  $2 < L/D < 60$ . Además:

$$Nu_{D\infty} = 0.023 \cdot Re_D^{0.8} \cdot Pr^{1/3}$$

$$C = 1 : n = 0.72 < L/D < 20$$

$$C = 6 : n = 1.0 \quad L/D > 20$$

Después en cada zona se aplica el balance global de energía:

$$A \cdot U \cdot DTLM = m \cdot ((h + \frac{1}{2}c^2 + gz)_s - (h + \frac{1}{2}c^2 + gz)_e)$$

donde:

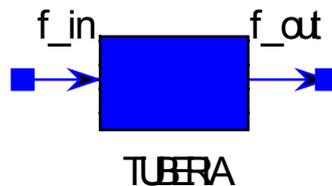
A: área de contacto (sería el área lateral de la tubería  $\pi DL$ )

U: coeficiente global de transmisión de calor  $U = \frac{1}{1/h_e + 1/h_i}$

DTLM: diferencia de temperaturas logarítmica media en el tramo

$$DTLM = \frac{T_{sal} - T_{ent}}{\ln\left(\frac{T_{ext} - T_{ent}}{T_{ext} - T_{sal}}\right)}$$

Componente Ecosim:



Todas las ecuaciones explicadas anteriormente son las utilizadas para modelar el elemento *Tubería*. Las condiciones de salida se obtendrán a partir del estado de entrada al componente.

Archivo EL:

*LIBRARY LABORATORIO*

*COMPONENT TUBERIA*

*PORTS*

*IN fluid f\_in --fluid inlet f\_in*  
*OUT fluid f\_out --fluid outlet f\_out*  
*OUT P\_control P*

*DATA*

*REAL l=1 --longitud de tubería (m)*  
*REAL d=0.2 --diametro de tubería (m)*  
*REAL f\_in\_z = 0*  
*REAL f\_out\_z = 0*

*DECLS*

*REAL delta\_p*  
*REAL A --Area*  
*REAL Re1 --Reynolds*  
*REAL Nu1 --Nusselt*  
*REAL Pr1 --Prandtl*  
*REAL he1 --Coef. de convección exterior*  
*REAL cp1 --calor específico medio*  
*REAL nu1 --viscosidad cinemática media*  
*REAL k1 --conductividad media*  
*REAL hi1 -- Coef. conv. interior*  
*REAL UI*  
*REAL DTLMI*  
*REAL T\_medial*  
*REAL delta*

*REAL Q\_entrada*

*REAL Q\_salida*

*REAL v\_entrada*

*REAL v\_salida*

*REAL rho1*

*REAL NuD\_inf*

*REAL C*

*REAL n*

*TOPOLOGY*

*PATH f\_in TO f\_out*

*INIT*

$$f\_out.T = (f\_in.T + T\_ext)/2$$

$$P.perdida = 100$$

*CONTINUOUS*

$$Q\_entrada = f\_in.w / rho1$$

$$v\_entrada = Q\_entrada / A$$

$$Q\_salida = f\_out.w / rho1$$

$$v\_salida = Q\_salida / A$$

$$f\_in.w = f\_out.w$$

$$A = PI*d**2/4$$

$$delta = 0.0002/(d/2)$$

$$T\_media1 = (f\_in.T + (T\_ext + f\_in.T)/2)/2$$

$$rho1 = linearInterp2D(props, T\_media1, 2)$$

$$cp1 = linearInterp2D(props, T\_media1, 1)$$

$$nu1 = linearInterp2D(props, T\_media1, 4)$$

$$Pr1 = linearInterp2D(props, T\_media1, 6)$$

$$k1 = linearInterp2D(props, T\_media1, 5)$$

$$Re1 = abs(v\_entrada * d / nu1)$$

*--TURBULENTO PARA TODO EL CONDUCTO:*

$$Nu1 = NuD\_inf * (1 + C * (d/l)**n)$$

$$NuD\_inf = 0.023 * (Re1**0.8) * (Pr1**(1/3))$$

$$C = ZONE(l/d > 20) 6$$

```

OTHERS 1
n=ZONE(l/d<20)1
OTHERS .7

he1=ZONE ((f_in.T-T_ext)<.01) 1\
OTHERS 3.56*abs((T_medial-T_ext)/d)**0.25
hi1 = ZONE (Nu1>0) k1*Nu1/d
OTHERS 1
U1 = 1/(1/he1+1/hi1)
DTLM1 = ZONE ((f_in.T-T_ext)<.01) 1e-4
OTHERS (f_out.T-f_in.T)/log(abs((T_ext-f_in.T)/(T_ext-f_out.T)))

--Ec de la energía
IMPL (f_out.T) PI*d*l*U1*DTLM1\
      = f_in.w*cp1*(f_out.T-f_in.T)

--2º principio
f_out.p + rho1*g*f_out_z = f_in.p + rho1*g*f_in_z - delta_p
delta_p =ZONE (Re1>2000)
          (linearInterp2D(fric2,delta,Re1)*l*rho1*v_entrada**2)/(2*d)
OTHERS
          (linearInterp1D(fric1,Re1)*l*rho1*v_entrada**2)/(2*d)

P.perdida = f_in.w*delta_p/f_in.rho

END COMPONENT

```

## TUBO DE GOMA: Componente TUBO\_GOMA1



Para los tubos de goma se han tenido en cuenta las mismas ecuaciones y las correspondientes tablas para cuantificar las pérdidas por fricción. Por su gran diámetro y baja velocidad de fluido se toma este elemento como un tramo recto normal según la bibliografía empleada para cuantificar las pérdidas.

Archivo EL:

```

--POR SU GRAN DIAMETRO Y BAJA VELOCIDAD DE FLUIDO
--SE TOMA ESTE ELEMENTO COMO UN TRAMO RECTO NORMAL
LIBRARY LABORATORIO
COMPONENT Tubo_goma1
PORTS
    IN    fluid f_in          --fluid inlet f_in
    OUT   fluid f_out        --fluid outlet f_out
    OUT   P_control P
DATA
    REAL l=1                --longitud de tuberia (m)
    REAL d=0.2              --diametro de tuberia (m)
    REAL f_in_z = 0
    REAL f_out_z = 0
DECLS
    REAL A                  --Area
    REAL Re1                --Reynolds
    
```

*REAL Nu1*            --Nusselt  
*REAL Pr1*            --Prandtl  
*REAL he1*            --Coef. de convección exterior  
*REAL cp1*            --calor específico medio  
*REAL nu1*            --viscosidad cinemática media  
*REAL k1*             --conductividad media  
*REAL hi1*            -- Coef. conv. interior  
*REAL UI*  
*REAL DTLMI*  
*REAL T\_medial*  
*REAL delta*  
*REAL Q\_entrada*  
*REAL Q\_salida*  
*REAL v\_entrada*  
*REAL v\_salida*  
*REAL rho1*  
*REAL NuD\_inf*  
*REAL C*  
*REAL n*  
*REAL delta\_p*

*TOPOLOGY*

*PATH f\_in TO f\_out*

*INIT*

$$f\_out.T = (f\_in.T + T\_ext) / 2$$

$$P.perdida = .01$$

*CONTINUOUS*

$$Q\_entrada = f\_in.w / rho1$$

$$v\_entrada = Q\_entrada / A$$

$$Q\_salida = f\_out.w / rho1$$

$$v\_salida = Q\_salida / A$$

$$f\_in.w = f\_out.w$$

$$A = PI * d ** 2 / 4$$

```

delta = 0.0002/(d/2)
T_media1 = (f_in.T+(T_ext+f_in.T)/2)/2
rho1 = linearInterp2D(props,T_media1,2)
cp1 = linearInterp2D(props,T_media1,1)
nu1 = linearInterp2D(props,T_media1,4)
Pr1 = linearInterp2D(props,T_media1,6)
k1 = linearInterp2D(props,T_media1,5)
Re1 = abs(v_entrada * d / nu1)
--TURBULENTO PARA TODO EL CONDUCTO:
Nu1=NuD_inf*(1+C*(d/l)**n)
    NuD_inf=0.023*(Re1**.8)*(Pr1**(1/3))
    C=ZONE(l/d>20)6
        OTHERS 1
    n=ZONE(l/d<20)1
        OTHERS .7
he1=ZONE ((f_in.T-T_ext)<.01) 1\
    OTHERS 3.56*abs((T_media1-T_ext)/d)**0.25
hi1 = ZONE (Nu1>0) k1*Nu1/d
    OTHERS 1
U1 = 1/(1/he1+1/hi1)
DTLM1 = ZONE ((f_in.T-T_ext)<.01) 1e-4
    OTHERS (f_out.T-f_in.T)/log(abs((T_ext-f_in.T)/(T_ext-f_out.T)))
IMPL (f_out.T) PI*d*l*U1*DTLM1\
    = f_in.w*cp1*(f_out.T-f_in.T)
--2º principio
f_out.p + rho1*g*f_out_z = f_in.p + rho1*g*f_in_z - delta_p
delta_p =ZONE (Re1>2000)
    (linearInterp2D(fric2,delta,Re1)*l*rho1*v_entrada**2)/(2*d)
    OTHERS
    (linearInterp1D(fric1,Re1)*l*rho1*v_entrada**2)/(2*d)
P.perdida = f_in.w*delta_p/f_in.rho
END COMPONENT

```

## TUBO DE GOMA: Componente TUBO\_GOMA2



Modelado igual que el elemento tubería. Las pérdidas son las especificadas en la bibliografía para tramo rugoso y flexible.

Componente Ecosim:



Archivo EL:

*LIBRARY LABORATORIO*

*COMPONENT Tubo\_goma2*

*PORTS*

<i>IN</i>	<i>fluid f_in</i>	<i>--fluid inlet f_in</i>
<i>OUT</i>	<i>fluid f_out</i>	<i>--fluid outlet f_out</i>
<i>OUT</i>	<i>P_control P</i>	

*DATA*

<i>REAL dcal=0.25</i>	
<i>REAL l=1</i>	<i>--longitud de tuberia (m)</i>
<i>REAL d=0.2</i>	<i>--diametro de tuberia (m)</i>

*REAL f\_in\_z = 0*

*REAL f\_out\_z = 0*

*DECLS*

*REAL A --Area*

*REAL Re1 --Reynolds*

*REAL Nu1 --Nusselt*

*REAL Pr1 --Prandtl*

*REAL he1 --Coef. de convección exterior*

*REAL cp1 --calor específico medio*

*REAL nu1 --viscosidad cinemática media*

*REAL k1 --conductividad media*

*REAL hi1 -- Coef. conv. interior*

*REAL UI*

*REAL DTLMI*

*REAL T\_medial*

*REAL delta*

*REAL Q\_entrada*

*REAL Q\_salida*

*REAL v\_entrada*

*REAL v\_salida*

*REAL rho1*

*REAL NuD\_inf*

*REAL C*

*REAL n*

*TOPOLOGY*

*PATH f\_in TO f\_out*

*INIT*

*f\_out.T = (f\_in.T + T\_ext)/2*

*CONTINUOUS*

*Q\_entrada = f\_in.w / rho1*

*v\_entrada = Q\_entrada / A*

*Q\_salida = f\_out.w / rho1*

```

v_salida = Q_salida / A
f_in.w = f_out.w
A = PI*d**2/4
delta = 0.0002/(d/2)
T_medial = (f_in.T+(T_ext+f_in.T)/2)/2
rho1 = linearInterp2D(props,T_medial,2)
cp1 = linearInterp2D(props,T_medial,1)
nu1 = linearInterp2D(props,T_medial,4)
Pr1 = linearInterp2D(props,T_medial,6)
k1 = linearInterp2D(props,T_medial,5)
Re1 = abs(v_entrada * d / nu1)

```

--TURBULENTO PARA TODO EL CONDUCTO:

```

Nu1=NuD_inf*(1+C*(d/l)**n)
NuD_inf=0.023*(Re1**.8)*(Pr1**(1/3))
C=ZONE(l/d>20)6
OTHERS 1
n=ZONE(l/d<20)1
OTHERS .7
he1=ZONE ((f_in.T-T_ext)<.01) 1\
OTHERS 3.56*abs((T_medial-T_ext)/d)**0.25
hi1 = ZONE (Nu1>0) k1*Nu1/d
OTHERS 1
UI = 1/(1/he1+1/hi1)
DTLM1 = ZONE (f_in.T==T_ext) 0
OTHERS (f_out.T-f_in.T)/log((T_ext-f_in.T)/(T_ext-f_out.T))
PI*d*l*UI*DTLM1\
= f_in.w*cp1*(f_out.T-f_in.T) +\
f_in.w*(v_salida**2 - v_entrada**2)/2+\
f_in.w*g*(f_out_z-f_in_z)
rho1*cp1*(f_out.T-f_in.T) - (f_out.p-f_in.p)-\
PI*d*l*UI*DTLM1*rho1/f_in.w=\

```

```
ZONE(Re1 >= 4000)
linearInterp1D(lambda_tubo_goma, Re1) * l / d cal
ZONE(Re1 < 4000 AND Re1 > 2000)
(linearInterp2D(fric2, delta, Re1) * l * rho1 * v_entrada ** 2) / (2 * d)
OTHERS
(linearInterp1D(fric1, Re1) * l * rho1 * v_entrada ** 2) / (2 * d)

P.perdida = cp1 * (f_out.T - f_in.T) / g - (f_out.p - f_in.p) / rho1 / g - \
PI * d * l * UI * DTLMI / f_in.w / g

END COMPONENT
```

## VÁLVULA DE COMPUERTA: Componente $V\_COMP$ .

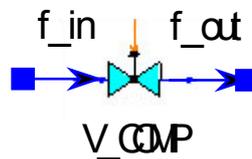


Se ha modelado una válvula estándar de compuerta (de globo, de asiento) con paredes divididas a un ángulo de  $45^\circ$ .

Este tipo de válvula es denominado también de cierre y simplemente establece la posibilidad ó no de paso de flujo. La parte importante a modelar es la pérdida de carga por fricción, dependiente únicamente del diámetro de la válvula como ya se comentó anteriormente.

Se considera como un elemento adiabático.

Componente Ecosim:



Al igual que en los elementos anteriores la salida viene dada a partir del estado de entrada. La conservación de masa y temperatura establecen esas dos variables y la presión de salida viene dada en función de las tablas correspondientes. En este tipo de

válvulas la caída de presión es sólo función del diámetro de la válvula y no de lo que ésta se encuentre abierta.

Archivo EL:

*LIBRARY LABORATORIO*

*COMPONENT V\_COMP --válvula de interrupción, de globo o de asiento*

*PORTS*

*IN fluid f\_in --fluid inlet f\_in*

*OUT fluid f\_out --fluid outlet f\_out*

*OUT P\_control P*

*DATA*

*REAL D0=.2 --diámetro de entrada y salida*

*DECLS*

*REAL chi\_loc --coef de pérdida de p local*

*REAL Re --Reynolds a la entrada (>10000)*

*REAL nu*

*REAL F0 --área tubería*

*REAL delta\_p*

*REAL v\_in*

*TOPOLOGY*

*PATH f\_in TO f\_out*

*CONTINUOUS*

*F0 = PI\*(D0/2)\*\*2*

*v\_in = f\_in.Q / F0*

*nu = linearInterp2D (props,f\_in.T,4)*

*Re = v\_in \* D0 / nu --nu se ha evaluado a la entrada*

*f\_out.w = f\_in.w*

*f\_in.T = f\_out.T*

*chi\_loc = linearInterp1D (t\_comp, D0)*

*v\_in = (delta\_p/chi\_loc/f\_in.rho\*2)\*\*0.5*

$$f_{out.p} = f_{in.p} - \text{delta}_p$$

$$P_{perdida} = f_{in.w} * \text{delta}_p / f_{in.rho}$$

*END COMPONENT*

### VÁLVULA DE MARIPOSA: Componente $V\_MAR$ .

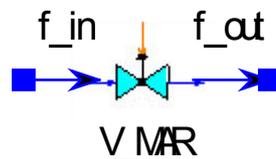


Se trata de modelar un dispositivo destinado a interceptar el paso de un fluido. En este caso se trata de válvulas de mariposa que mediante el giro de una plaquita permiten el paso o no del fluido, en mayor o menor medida en función de las pérdidas de carga que se originen.

En los elementos válvula (también en el de compuerta que aparece más adelante) adquiere mucha importancia la pérdida de carga por fricción, que depende del diseño y de la forma de las partes internas. En la válvula de mariposa es relevante además la posición que el elemento de cierre tenga dentro de la válvula. En función de ello se obtiene el paso de flujo por la válvula y la pérdida de carga por fricción.

Se considera un elemento adiabático.

Componente Ecosim:



Las ecuaciones a aplicar son las generales, obteniéndose las condiciones de salida en función de las de entrada. Sin embargo, tal y como se ha apuntado antes, la posición del

elemento de cierre es determinante para establecer las pérdidas de carga, y en una instalación son este tipo de elementos los que condicionan el caudal de paso. Esto es porque la bomba debe dar un caudal en función de las pérdidas que existan y el elemento válvula suele ser el que varíe esas pérdidas y por tanto el caudal y el punto de operación de la bomba.

Archivo EL:

*LIBRARY LABORATORIO*

*COMPONENT V\_MAR --dispositivo térmicamente aislante*

*PORTS*

*IN fluid f\_in --fluid inlet f\_in*

*OUT fluid f\_out --fluid outlet f\_out*

*OUT P\_control P*

*DATA*

*REAL D0=.0806 --diámetro tubería*

*REAL D\_medio=1 --relación diám mariposa/D0 (0.98 ó 1.00)*

*REAL delta=40 --ángulo de apertura (0° completamente abierta, 90°*

*cerrada)*

*DECLS*

*REAL Re --Reynolds a la salida*

*REAL v0 --vel en tubería*

*REAL F0 --área tubería*

*REAL Dd --diám mariposa*

*REAL Dt*

*REAL nu*

*REAL delta\_p*

*TOPOLOGY*

*PATH f\_in TO f\_out*

*CONTINUOUS*

*F0 = PI\*Dt\*\*2/4*

*v0 = ZONE (delta<90) f\_in.w/f\_in.rho/F0*

*OTHERS 0*

$nu = \text{linearInterp2D}(\text{props}, f\_in.T, 4)$

$Re = v0 * D0 / nu$  --nu se ha evaluado a la entrada

$Dd = D\_medio * D0$

$f\_in.T = f\_out.T$

$f\_out.w = f\_in.w$

$Dt = Dd * (1 - \sin(\text{delta} * \text{PI} / 180))^{**0.5}$

$v0 = \text{ZONE}(Re > 2000)$

$(\text{delta}_p / (\text{linearInterp2D}(\text{fric2}, 0.0002 / (Dt/2), Re) * 10 * f\_in.rho) * (2 * Dt))^{**0.5}$

*OTHERS*

$(\text{delta}_p / (\text{linearInterp1D}(\text{fric1}, Re) * 10 * f\_in.rho) * (2 * Dt))^{**0.5}$

$f\_out.p = f\_in.p - \text{delta}_p$

$P.\text{perdida} = f\_in.w * \text{delta}_p / f\_in.rho$

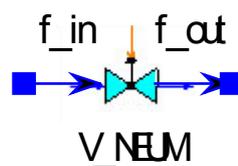
*END COMPONENT*

**VÁLVULA NEUMÁTICA: Componente  $V\_NEUM$ .**

La válvula neumática aparece en la instalación como un dispositivo de cierre por accionamiento neumático, elegido por conseguir un cierre total de la válvula en menos tiempo.

Los actuadores de diafragma se usan predominantemente para operar con válvulas de control. El pie se extiende mediante aire a presión, desde un controlador neumático, siendo aplicado al diafragma del actuador, que mueve el pistón contra el pie de válvula. La presión del aire contra el diafragma se aumenta hasta que el salto de presión y las fuerzas del fluido se igualan. Disminuyendo la presión neumática se permite que el salto de presión haga volver la válvula a su posición normal.

Esta válvula tiene un tratamiento distinto a las anteriores, ya que se dispone de sus características técnicas en el Manual de funcionamiento del Laboratorio de Motores. Ya que en el uso habitual de la instalación estas válvulas están abiertas y sólo introducen pérdidas de presión, son éstas la parte importante del modelado de este componente, tabuladas en función de la presión de operación.

**Componente Ecosim:**

Archivo EL:

*LIBRARY LABORATORIO*

*COMPONENT V\_NEUM*

*PORTS*

*IN fluid f\_in*

*OUT fluid f\_out*

*OUT P\_control P*

*DECLS*

*REAL delta\_p*

*TOPOLOGY*

*PATH f\_in TO f\_out*

*INIT*

*f\_in.Q = .01*

*delta\_p = 10000*

*CONTINUOUS*

*f\_in.w = f\_out.w*

*f\_in.T = f\_out.T*

*f\_in.p = f\_out.p + linearInterp1D (v\_neumatica,f\_in.Q)*

*f\_out.p=f\_in.p-delta\_p*

*P.perdida = ZONE (P.perdida<1) 5*

*ZONE (P.perdida>500) 300*

*OTHERS delta\_p/f\_in.rho\*f\_in.w*

*END COMPONENT*

## 5. DESCRIPCIÓN DEL MODELO POR BLOQUES.

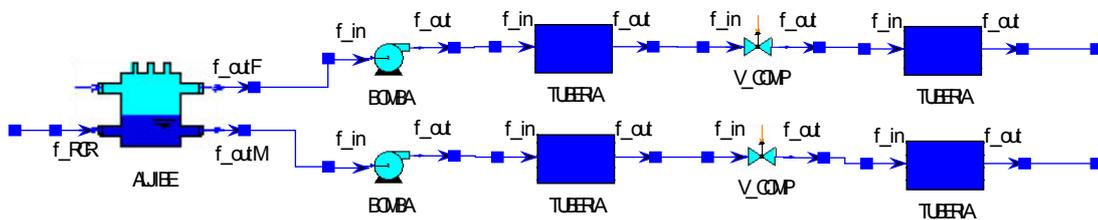
Para realizar la modelización de la instalación de refrigeración del Laboratorio de Motores se ha seguido la descripción detallada en el punto 3.

Como ya se comentó, la construcción realizada en EcosimPro refleja un modelo de la instalación y su comportamiento, y no un retrato fiel de todo lo que contiene.

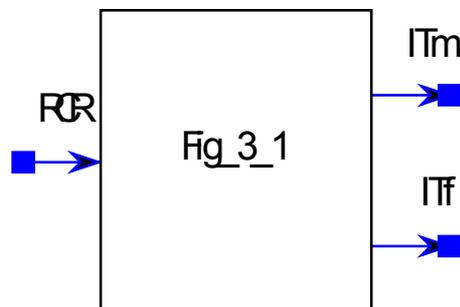
A continuación se detallarán los modelos de las figuras del punto 3, realizados en el programa SmartSketch y compilados y generados posteriormente los archivos EL en EcosimPro.

### BLOQUE I.

Modelo de la figura 3.1: depósito de almacenamiento de agua con elementos de distribución y bombeo.



Componente Ecosim:



Archivo EL:

*LIBRARY LABORATORIO*

*COMPONENT Fig\_3\_1*

*PORTS*

*OUT LABORATORIO.fluid Itf*

*OUT LABORATORIO.fluid Itm*

*IN LABORATORIO.fluid RCR*

*IN P\_control P\_3\_1m*

*IN P\_control P\_3\_1f*

*TOPOLOGY*

*LABORATORIO.BOMBA BIrm (*

*d = 0.1085)*

*LABORATORIO.BOMBA BIrf (*

*d = 0.1085)*

*LABORATORIO.TUBERIA T1 (*

*l = 3,*

*d = 0.1085,*

*f\_in\_z = 0,*

*f\_out\_z = 0)*

*LABORATORIO.TUBERIA T2 (*

*l = 3,*

*d = 0.1085,*

*f\_in\_z = 0,*

*f\_out\_z = 0)*

*LABORATORIO.TUBERIA T3 (*

*l = .5,*

*d = 0.1085,*

*f\_in\_z = 0,*

*f\_out\_z = 0)*

*LABORATORIO.TUBERIA T4 (*

*l = .5,*

```

    d = 0.1085,
    f_in_z = 0,
    f_out_z = 0)
LABORATORIO.V_COMP V3m (
    D0 = 0.1085)
LABORATORIO.V_COMP V3f (
    D0 = 0.1085)
LABORATORIO.ALJIBE ALJIBE (
    D = 1.85,
    L = 3.93,
    H0 = 1.5,
    z_RCR = 0,
    z_outM = 0,
    z_outF = 0)
CONNECT BIrm.f_out TO T1.f_in
CONNECT T1.f_out TO V3m.f_in
CONNECT V3m.f_out TO T3.f_in
CONNECT BIrf.f_out TO T2.f_in
CONNECT T2.f_out TO V3f.f_in
CONNECT V3f.f_out TO T4.f_in
CONNECT ALJIBE.f_outF TO BIrf.f_in
CONNECT ALJIBE.f_outM TO BIrm.f_in
CONNECT T3.f_out TO ITm
CONNECT T4.f_out TO ITf
CONNECT RCR TO ALJIBE.f_RCR
INIT
    ITm.T = 15
    ITf.T = 15
    BIrf.f_in.Q=1

```

*CONTINUOUS*

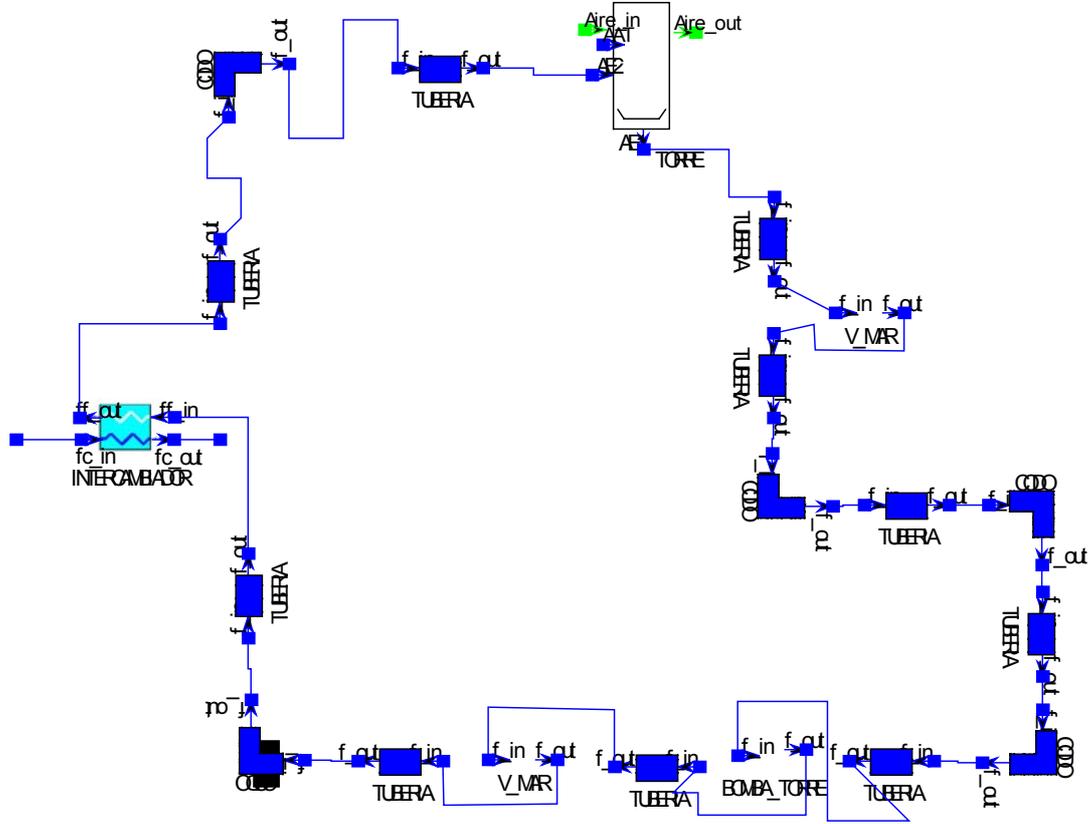
$$\text{IMPL}(P\_3\_1f.perdida) \quad B1rf.P.perdida = \\ P\_3\_1f.perdida + T2.P.perdida + V3f.P.perdida + T4.P.perdida$$

$$B1rm.P.perdida = \\ P\_3\_1m.perdida + T1.P.perdida + V3m.P.perdida + T3.P.perdida$$

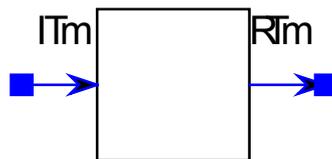
*END COMPONENT*

BLOQUE II.

Modelo de la figura 3.2 Torre Motor: instalación de enfriamiento del agua procedente de la refrigeración de los motores.



Componente Ecosim:



Fig\_3\_2

Archivo EL:

*LIBRARY LABORATORIO*

*COMPONENT Fig\_3\_2*

*PORTS*

*IN LABORATORIO.fluid ITm*

*OUT LABORATORIO.fluid RTm*

*OUT P\_control P\_3\_2*

*TOPOLOGY*

*LABORATORIO.TUBERIA T3 (*

*l = .5,*

*d = .1,*

*f\_in\_z = 0,*

*f\_out\_z = 0)*

*LABORATORIO.TUBERIA T4 (*

*l = .5,*

*d = .1,*

*f\_in\_z = 0,*

*f\_out\_z = 0)*

*LABORATORIO.TUBERIA T10 (*

*l = .5,*

*d = 0.1,*

*f\_in\_z = 0,*

*f\_out\_z = 0)*

*LABORATORIO.INTERCAMBIADOR INTC (1)*

*LABORATORIO.TUBERIA T1 (*

*l = .5,*

*d = 0.1,*

*f\_in\_z = 0,*

*f\_out\_z = 0)*

*LABORATORIO.CODO C2 (*

*angulo = 90,*

$l = .15,$   
 $d = 0.1,$   
 $f\_in\_z = 0,$   
 $f\_out\_z = 0)$

*LABORATORIO.TUBERIA T5 (*

$l = .5,$   
 $d = .1,$   
 $f\_in\_z = 0,$   
 $f\_out\_z = 0)$

*LABORATORIO.CODO C3 (*

$angulo = 90,$   
 $l = .15,$   
 $d = 0.1,$   
 $f\_in\_z = 0,$   
 $f\_out\_z = 0)$

*LABORATORIO.TUBERIA T6 (*

$l = .5,$   
 $d = .1,$   
 $f\_in\_z = 0,$   
 $f\_out\_z = 0)$

*LABORATORIO.CODO C4 (*

$angulo = 90,$   
 $l = .15,$   
 $d = 0.1,$   
 $f\_in\_z = 0,$   
 $f\_out\_z = 0)$

*LABORATORIO.TUBERIA T7 (*

$l = .5,$   
 $d = 0.1,$   
 $f\_in\_z = 0,$   
 $f\_out\_z = 0)$

*LABORATORIO.TUBERIA T8 (*

$$l = .5,$$

$$d = 0.1,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA T9 (*

$$l = .5,$$

$$d = .1,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.CODO C5 (*

$$angulo = 90,$$

$$l = .15,$$

$$d = 0.1,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.BOMBA\_TORRE BOMB (*

$$H = 23)$$

*LABORATORIO.V\_MAR V1 (*

$$D0 = 0.1,$$

$$D\_medio = 1,$$

$$delta = 0)$$

*LABORATORIO.V\_MAR V2 (*

$$D0 = 0.1,$$

$$D\_medio = 1,$$

$$delta = 0)$$

*LABORATORIO.TORRE TORRE*

*LABORATORIO.CODO C1 (*

$$angulo = 90,$$

$$l = .15,$$

$$d = 0.1,$$

$$f_{in\_z} = 0,$$

$$f_{out\_z} = 0)$$

LABORATORIO.TUBERIA T2 (

$$l = .5,$$

$$d = 0.1,$$

$$f_{in\_z} = 0,$$

$$f_{out\_z} = 0)$$

CONNECT T4.f\_out TO C2.f\_in

CONNECT C2.f\_out TO T5.f\_in

CONNECT T5.f\_out TO C3.f\_in

CONNECT C3.f\_out TO T6.f\_in

CONNECT T6.f\_out TO C4.f\_in

CONNECT C4.f\_out TO T7.f\_in

CONNECT T9.f\_out TO C5.f\_in

CONNECT C5.f\_out TO T10.f\_in

CONNECT BOMB.f\_out TO T8.f\_in

CONNECT T7.f\_out TO BOMB.f\_in

CONNECT T8.f\_out TO V2.f\_in

CONNECT V2.f\_out TO T9.f\_in

CONNECT T3.f\_out TO V1.f\_in

CONNECT V1.f\_out TO T4.f\_in

CONNECT ITm TO INTC.fc\_in

CONNECT TORRE.AE1 TO T3.f\_in

CONNECT T1.f\_out TO C1.f\_in

CONNECT C1.f\_out TO T2.f\_in

CONNECT T2.f\_out TO TORRE.AE2

CONNECT INTC.fc\_out TO RTm

CONNECT T10.f\_out TO INTC.ff\_in

CONNECT INTC.ff\_out TO T1.f\_in

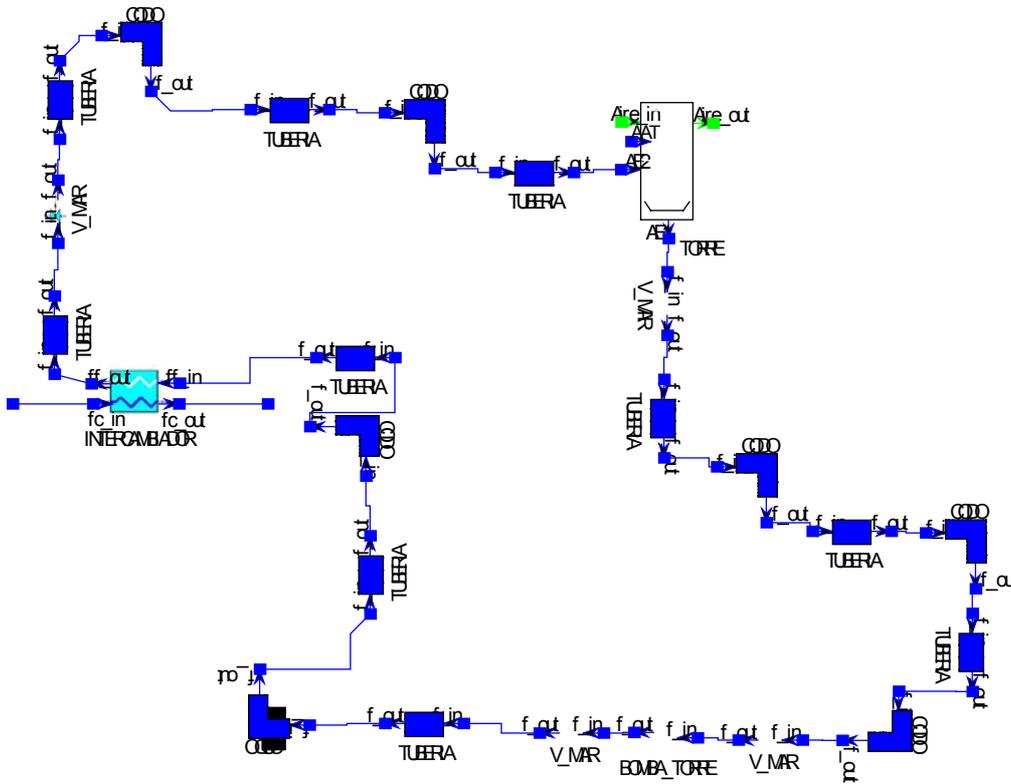
CONTINUOUS

$IMPL(P\_3\_2.perdida) P\_3\_2.perdida = ZONE (TIME < 1) .5$

$OTHERS INTC.P\_cc.perdida$

END COMPONENT

Modelo de la figura 3.3 Torre Freno: : instalación de enfriamiento del agua procedente de la refrigeración de los frenos.



Componente Ecosim:

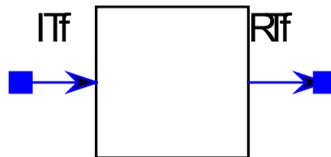


Fig 3\_3

Archivo EL:

*LIBRARY LABORATORIO*

*COMPONENT Fig\_3\_3*

*PORTS*

*OUT LABORATORIO.fluid RTf*

*IN LABORATORIO.fluid ITf*

*OUT P\_control P\_3\_3*

*TOPOLOGY*

*LABORATORIO.INTERCAMBIADOR INT\_Freno (1)*

*LABORATORIO.TORRE Torre*

*LABORATORIO.TUBERIA T1 (*

*l = .5,*

*d = 0.1,*

*f\_in\_z = 0,*

*f\_out\_z = 0)*

*LABORATORIO.V\_MAR V1 (*

*D0 = 0.1,*

*D\_medio = 1,*

*delta = 0)*

*LABORATORIO.TUBERIA T2 (*

*l = .5,*

*d = .1,*

*f\_in\_z = 0,*

*f\_out\_z = 0)*

*LABORATORIO.CODO C1 (*

*l = 0.15,*

*d = 0.1,*

*angulo = 90,*

*f\_in\_z = 0,*

*f\_out\_z = 0)*

*LABORATORIO.TUBERIA T3 (*

$$l = .5,$$

$$d = 0.1,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.CODO C2 (*

$$l = 0.15,$$

$$d = 0.1,$$

$$angulo = 90,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA T4 (*

$$l = .5,$$

$$d = .1,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.V\_MAR V2 (*

$$D0 = 0.1,$$

$$D\_medio = 1,$$

$$delta = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA T5 (*

$$l = .5,$$

$$d = .1,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.CODO C3 (*

$$l = 0.15,$$

$$d = 0.1,$$

$$angulo = 90,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA T6 (*

$$l = .5,$$

$$d = .1,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.CODO C4 (*

$$l = 0.15,$$

$$d = 0.1,$$

$$angulo = 90,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA T7 (*

$$l = .5,$$

$$d = 0.1,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.CODO C5 (*

$$l = 0.15,$$

$$d = 0.1,$$

$$angulo = 90,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.CODO C6 (*

$$l = 0.15,$$

$$d = 0.1,$$

$$angulo = 90,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA T9 (*

$$l = .5,$$

$$d = 0.1,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$f\_out\_z = 0)$

LABORATORIO.CODO C7 (

$l = 0.15,$

$d = 0.1,$

$angulo = 90,$

$f\_in\_z = 0,$

$f\_out\_z = 0)$

LABORATORIO.TUBERIA T10 (

$l = .5,$

$d = 0.1,$

$f\_in\_z = 0,$

$f\_out\_z = 0)$

LABORATORIO.V\_MAR VM3 (

$D0 = 0.1,$

$D\_medio = 1,$

$delta = 0)$

LABORATORIO.BOMBA\_TORRE Bomb (

$H = 23)$

LABORATORIO.V\_MAR VM4 (

$D0 = 0.1,$

$D\_medio = 1,$

$delta = 0)$

LABORATORIO.TUBERIA T8 (

$l = .5,$

$d = .1,$

$f\_in\_z = 0,$

$f\_out\_z = 0)$

CONNECT ITf TO INT\_Freno.fc\_in

CONNECT INT\_Freno.fc\_out TO RTf

CONNECT T1.f\_out TO V1.f\_in

CONNECT V1.f\_out TO T2.f\_in

CONNECT T2.f\_out TO C1.f\_in

```

CONNECT C1.f_out TO T3.f_in
CONNECT T3.f_out TO C2.f_in
CONNECT C2.f_out TO T4.f_in
CONNECT T4.f_out TO Torre.AE2
CONNECT Torre.AE1 TO V2.f_in
CONNECT V2.f_out TO T5.f_in
CONNECT T5.f_out TO C3.f_in
CONNECT C3.f_out TO T6.f_in
CONNECT T6.f_out TO C4.f_in
CONNECT C4.f_out TO T7.f_in
CONNECT T7.f_out TO C5.f_in
CONNECT T9.f_out TO C7.f_in
CONNECT T10.f_out TO INT_Freno.ff_in
CONNECT C7.f_out TO T10.f_in
CONNECT C5.f_out TO VM3.f_in
CONNECT VM3.f_out TO Bomb.f_in
CONNECT Bomb.f_out TO VM4.f_in
CONNECT VM4.f_out TO T8.f_in
CONNECT T8.f_out TO C6.f_in
CONNECT C6.f_out TO T9.f_in
CONNECT INT_Freno.ff_out TO T1.f_in

INIT
INT_Freno.P_cc.perdida=.5

CONTINUOUS

IMPL(P_3_3.perdida) P_3_3.perdida = ZONE (TIME<1) .5
OTHERS INT_Freno.P_cc.perdida

END COMPONENT

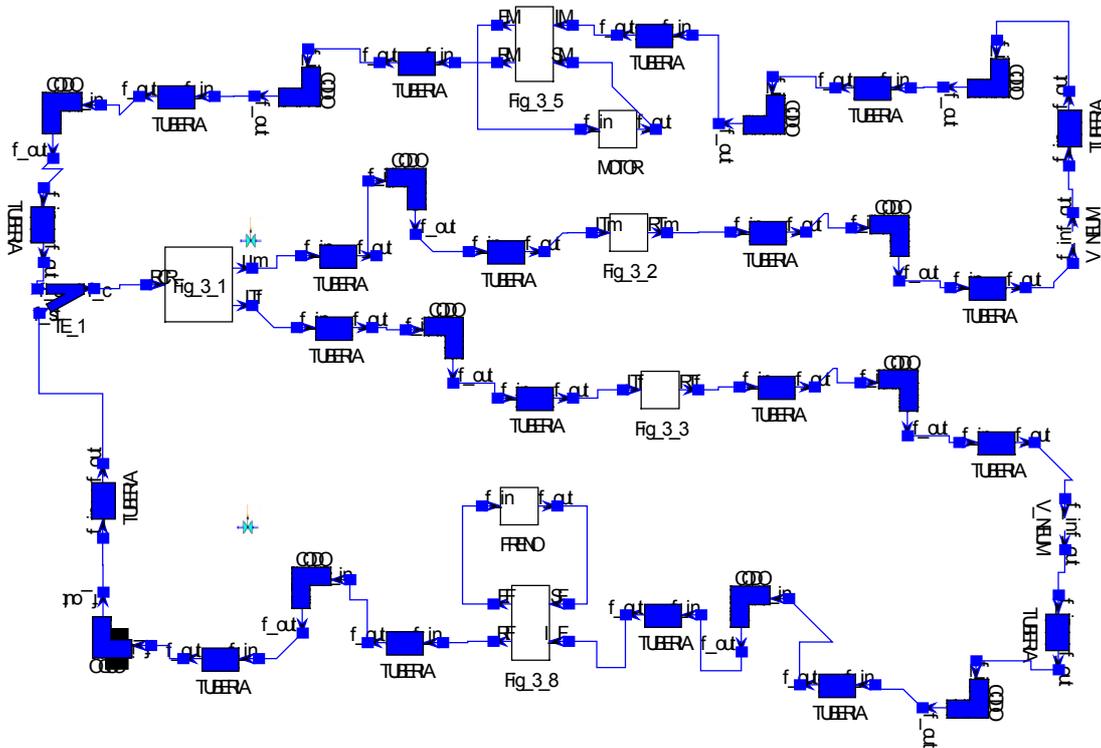
```

### BLOQUE III.

Modelo de la figura 3.4: sistema de distribución de agua de refrigeración hacia las celdas.

Esta figura está incluida en la modelización de la instalación general con las demás figuras insertadas. Se trata del elemento *Fig\_3\_9*.

No se contempla el funcionamiento simultáneo de varias celdas, debido a carencias de Ecosim. Las distintas celdas sólo se diferencian en las dimensiones de la *Fig\_3\_5*, para la que existen cuatro modelos distintos intercambiables.



Archivo EL:

*LIBRARY LABORATORIO*

*COMPONENT Fig\_3\_9*

*PORTS*

*TOPOLOGY*

*LABORATORIO.Fig\_3\_1 ALG\_fig31*

*LABORATORIO.Fig\_3\_2 Torre\_MOTOR*

*Fig\_3\_5 Mezc\_Motor*

*LABORATORIO.TE\_1 TE\_1 (*

*Dst = 0.1085,*

*Ds = 0.1085)*

*LABORATORIO.TUBERIA Tmotor (*

*l = .8,*

*d = 0.1085,*

*f\_in\_z = 0,*

*f\_out\_z = 0)*

*LABORATORIO.TUBERIA Tfreno (*

*l = .8,*

*d = 0.1085,*

*f\_in\_z = 0,*

*f\_out\_z = 0)*

*Fig\_3\_3 Torre\_freno*

*Fig\_3\_8 Mezc\_Freno*

*LABORATORIO.CODO Cm1 (*

*l = 0.15,*

*d = 0.1085,*

*angulo = 90,*

*f\_in\_z = 0,*

*f\_out\_z = 0)*

*LABORATORIO.TUBERIA Tm1 (*

*l = 13,*

$$d = 0.1085,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 12.2)$$

*LABORATORIO.CODO Cf1 (*

$$l = 0.15,$$

$$d = 0.2,$$

$$angulo = 90,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA Tf1 (*

$$l = 13,$$

$$d = 0.108,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 12.2)$$

*LABORATORIO.TUBERIA Tf2 (*

$$l = 12.2,$$

$$d = 0.1085,$$

$$f\_in\_z = 12.2,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.CODO Cf2 (*

$$l = 0.15,$$

$$d = 0.1085,$$

$$angulo = 90,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA Tf3 (*

$$l = 20,$$

$$d = 0.1085,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.V\_NEUM VNF*

*LABORATORIO.TUBERIA Tf4 (*

$$l = .1,$$

$$d = .1085,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.CODO Cf3 (*

$$l = 0.15,$$

$$d = 0.1085,$$

$$angulo = 90,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA Tf5 (*

$$l = 15,$$

$$d = 0.1085,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.CODO Cf4 (*

$$l = 0.15,$$

$$d = 0.1085,$$

$$angulo = 90,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA Tf6 (*

$$l = .1,$$

$$d = .1085,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA Tf7 (*

$$l = 15,$$

$$d = 0.1085,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.CODO Cf5 (*

$$l = 0.15,$$

$$d = 0.1085,$$

$$\text{angulo} = 90,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA Tf8 (*

$$l = 20,$$

$$d = 0.1085,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.CODO Cf6 (*

$$l = 0.15,$$

$$d = 0.1085,$$

$$\text{angulo} = 90,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA Tf9 (*

$$l = 10,$$

$$d = 0.1085,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA Tm2 (*

$$l = 12.2,$$

$$d = 0.1085,$$

$$f\_in\_z = 12.2,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.CODO Cm2 (*

$$l = 0.15,$$

$$d = 0.1085,$$

$$\text{angulo} = 90,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.TUBERIA Tm3 (

$$l = 20,$$

$$d = .1085,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.V\_NEUM VNm

LABORATORIO.TUBERIA Tm4 (

$$l = .1,$$

$$d = 0.1085,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.CODO Cm3 (

$$l = 0.15,$$

$$d = 0.1085,$$

$$angulo = 90,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.TUBERIA Tm5 (

$$l = 15,$$

$$d = .1085,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.CODO Cm4 (

$$l = 0.15,$$

$$d = 0.1085,$$

$$angulo = 90,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.TUBERIA Tm6 (

$$l = .25,$$

$$d = 0.1085,$$

$$f\_in\_z = 0,$$
$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.TUBERIA Tm7 (

$$l = .1,$$
$$d = 0.1085,$$
$$f\_in\_z = 0,$$
$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.CODO Cm5 (

$$l = 0.15,$$
$$d = 0.1085,$$
$$angulo = 90,$$
$$f\_in\_z = 0,$$
$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.TUBERIA Tm8 (

$$l = 20,$$
$$d = .1085,$$
$$f\_in\_z = 0,$$
$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.CODO Cm6 (

$$l = 0.15,$$
$$d = 0.1085,$$
$$angulo = 90,$$
$$f\_in\_z = 0,$$
$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.TUBERIA Tm9 (

$$l = 10,$$
$$d = .1085,$$
$$f\_in\_z = 0,$$
$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.FRENO FRENO

LABORATORIO.MOTOR MOTOR (500000)

CONNECT TE\_1.f\_c TO ALG\_fig31.RCR  
 CONNECT ALG\_fig31.ITm TO Tmotor.f\_in  
 CONNECT Tmotor.f\_out TO Cm1.f\_in  
 CONNECT Cm1.f\_out TO Tm1.f\_in  
 CONNECT Tm1.f\_out TO Torre\_MOTOR.ITm  
 CONNECT Tf1.f\_out TO Torre\_freno.ITf  
 CONNECT Cf1.f\_out TO Tf1.f\_in  
 CONNECT Tfreno.f\_out TO Cf1.f\_in  
 CONNECT ALG\_fig31.ITf TO Tfreno.f\_in  
 CONNECT Torre\_freno.RTf TO Tf2.f\_in  
 CONNECT Tf2.f\_out TO Cf2.f\_in  
 CONNECT Tf3.f\_out TO VNf.f\_in  
 CONNECT VNf.f\_out TO Tf4.f\_in  
 CONNECT Tf4.f\_out TO Cf3.f\_in  
 CONNECT Cf3.f\_out TO Tf5.f\_in  
 CONNECT Mezc\_Freno.RF TO Tf7.f\_in  
 CONNECT Tf7.f\_out TO Cf5.f\_in  
 CONNECT Cf5.f\_out TO Tf8.f\_in  
 CONNECT Tf8.f\_out TO Cf6.f\_in  
 CONNECT Cf6.f\_out TO Tf9.f\_in  
 CONNECT Tf9.f\_out TO TE\_1.f\_st  
 CONNECT Tm2.f\_out TO Cm2.f\_in  
 CONNECT Cm2.f\_out TO Tm3.f\_in  
 CONNECT Cf2.f\_out TO Tf3.f\_in  
 CONNECT Tf5.f\_out TO Cf4.f\_in  
 CONNECT Cf4.f\_out TO Tf6.f\_in  
 CONNECT Tf6.f\_out TO Mezc\_Freno.I\_F  
 CONNECT Tm3.f\_out TO VNm.f\_in  
 CONNECT VNm.f\_out TO Tm4.f\_in  
 CONNECT Tm4.f\_out TO Cm3.f\_in  
 CONNECT Cm3.f\_out TO Tm5.f\_in  
 CONNECT Tm5.f\_out TO Cm4.f\_in

CONNECT Cm4.f\_out TO Tm6.f\_in  
 CONNECT Mezc\_Motor.RM TO Tm7.f\_in  
 CONNECT Tm7.f\_out TO Cm5.f\_in  
 CONNECT Cm5.f\_out TO Tm8.f\_in  
 CONNECT Tm8.f\_out TO Cm6.f\_in  
 CONNECT Cm6.f\_out TO Tm9.f\_in  
 CONNECT Tm9.f\_out TO TE\_1.f\_s  
 CONNECT Torre\_MOTOR.RTm TO Tm2.f\_in  
 CONNECT Tm6.f\_out TO Mezc\_Motor.IM  
 CONNECT FRENO.f\_out TO Mezc\_Freno.SF  
 CONNECT Mezc\_Freno.EF TO FRENO.f\_in  
 CONNECT MOTOR.f\_out TO Mezc\_Motor.SM  
 CONNECT Mezc\_Motor.EM TO MOTOR.f\_in

INIT

Torre\_MOTOR.ITm.T = T\_ext  
 Torre\_freno.ITf.T = T\_ext

CONTINUOUS

$ALG\_fig31.P\_3\_1m.perdida = Torre\_MOTOR.P\_3\_2.perdida +$   
 $Mezc\_Motor.P\_3\_5.perdida +$   
 $VNm.P.perdida + Tmotor.P.perdida + Cm1.P.perdida +$   
 $Tm1.P.perdida + Tm2.P.perdida + Cm2.P.perdida + Tm3.P.perdida + Tm4.P.perdida +$   
 $Cm3.P.perdida +$   
 $Tm5.P.perdida + Cm4.P.perdida + Tm6.P.perdida + Tm7.P.perdida + Cm5.P.perdida +$   
 $Tm8.P.perdida + Cm6.P.perdida + Tm9.P.perdida + TE\_1.Ps.perdida$

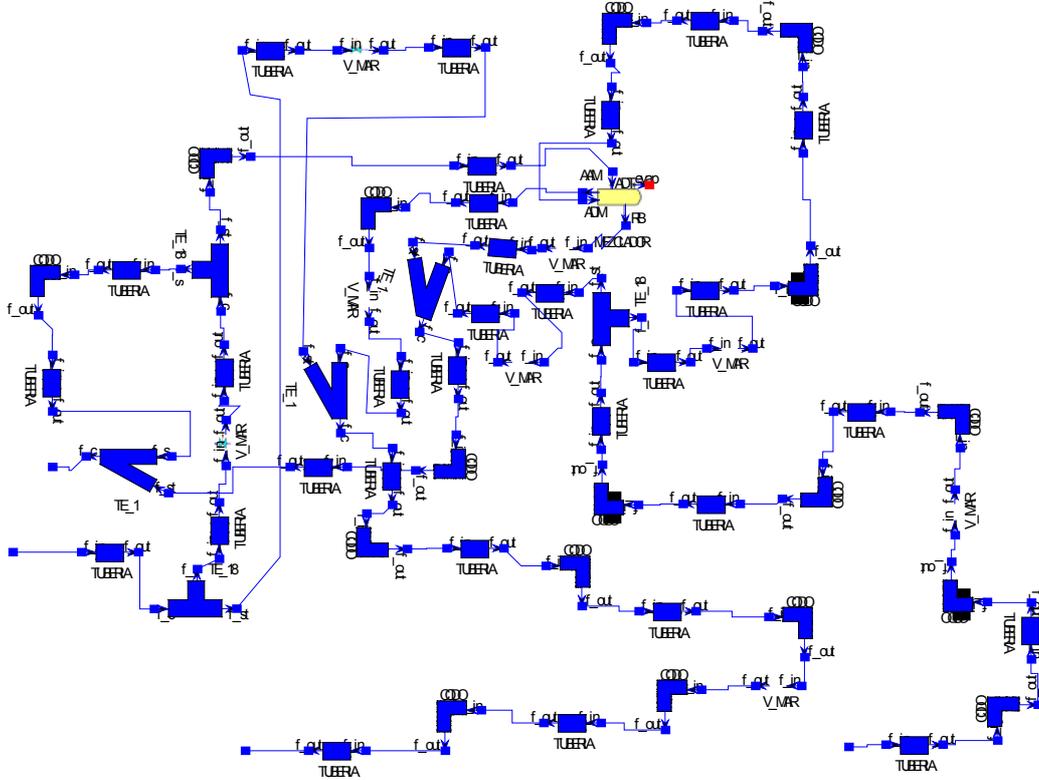
$ALG\_fig31.P\_3\_1f.perdida = Mezc\_Freno.P\_3\_8.perdida +$   
 $Torre\_freno.P\_3\_3.perdida +$   
 $Tfreno.P.perdida + Cf1.P.perdida + Tf1.P.perdida + Cf2.P.perdida +$   
 $Tf3.P.perdida + Tf4.P.perdida + Cf3.P.perdida + Tf5.P.perdida + Tf2.P.perdida +$

$$Cf4.P.perdida+Tf6.P.perdida+Tf7.P.perdida+Cf5.P.perdida+Tf8.P.perdida+Cf6.P.perdida+Tf9.P.perdida+TE_1.Pst.perdida+VNf.P.perdida$$

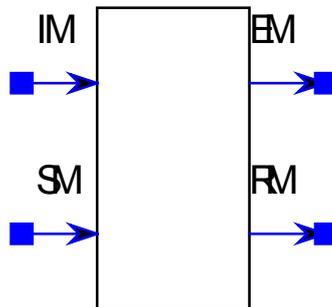
*END COMPONENT*

BLOQUE IV.

Modelo de la figura 3.5: sistema de control de temperatura de entrada de agua de refrigeración al motor.



Componente Ecosim:



Fig\_3\_5

Esta figura contiene una ecuación adicional a las características de los elementos. Esa ecuación corresponde a la regulación de caudal de la válvula de tres vías comandada por temperatura y que merece un capítulo especial.

### **VÁLVULA DE TRES VÍAS COMANDADA POR TEMPERATURA.**



Válvula de tres vías comandada por temperatura, para el ajuste de la temperatura del agua de refrigeración que se suministra a los motores. Esta válvula será utilizada, al igual que el mezclador, para hacer las veces de la refrigeración de un motor con radiador.

El comportamiento de esta válvula viene regido por la temperatura de salida del mezclador. Ésta será la que se imponga determinada por las necesidades de refrigeración del motor. Para que se alcance dicha temperatura a la salida del mezclador la válvula V3Vct desviaré el caudal necesario hacia el mezclador y el resto retornará al aljibe.

Para el modelado de esta válvula se pensó en recurrir a la composición de una *TE\_18* y dos válvulas de mariposa en cada una de las salidas con ángulos de apertura incógnitas, ya que se carecía de curvas específicas ó modelos de caídas de presión para este tipo de válvula. Al hacerlo así, el procedimiento de resolución de EcosimPro daba problemas. Entonces se suprimieron las dos válvulas, ya que lo único que aportaban era la pérdida de presión, en vista de que los caudales de paso de cada una de ellas eran solucionados en el elemento Mezclador.

La válvula de tres vías se considera también como un elemento termodinámicamente adiabático.

La ecuación que cierra el sistema de ecuaciones responde a una hipótesis realizada en función de la opción personal y las posibilidades de convergencia del programa Ecosim. Se probaron distintas leyes de comportamiento que desde el punto de vista físico parecían más acertadas, pero su introducción en el programa daba lugar a la no convergencia de la resolución del problema.

Archivo EL:

*LIBRARY LABORATORIO*

*COMPONENT Fig\_3\_5*

*PORTS*

*IN LABORATORIO.fluid SM*

*OUT LABORATORIO.fluid RM*

*OUT LABORATORIO.fluid EM*

*IN LABORATORIO.fluid IM*

*OUT P\_control P\_3\_5*

*TOPOLOGY*

*LABORATORIO.MEZCLADOR MEZC (*

*A = 0.2,*

*B = 1.2,*

*C = 1.1,*

*D = 1.6,*

*E = 0.1,*

*F = 1,*

*G = 0.6,*

*x = 0.0005,*

*D\_ADT = 0.2,*

*D\_RB = 0.1304,*

*D\_AAM = 0.1304,*

*D\_ADM = 0.1304,*

$$ADT\_z = 0,$$

$$RB\_z = 0,$$

$$AAM\_z = 0,$$

$$ADM\_z = 0)$$

LABORATORIO.TUBERIA T6 (

$$l = .25,$$

$$d = 0.0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.CODO C4 (

$$l = .15,$$

$$d = 0.0806,$$

$$angulo = 90,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.TUBERIA T5 (

$$l = .34,$$

$$d = 0.0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.CODO C3 (

$$l = .15,$$

$$d = 0.0806,$$

$$angulo = 90,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.TUBERIA T4 (

$$l = 1.18,$$

$$d = 0.0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.CODO C2 (*

$$l = .15,$$

$$d = 0.0806,$$

$$\text{angulo} = 90,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA T3 (*

$$l = 0.23,$$

$$d = 0.0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA T2 (*

$$l = 1.14,$$

$$d = 0.0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.CODO C1 (*

$$l = .15,$$

$$d = 0.0806,$$

$$\text{angulo} = 90,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA T1 (*

$$l = 2.77,$$

$$d = 0.0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.V\_MAR V5 (*

$$D0 = 0.0806,$$

$$D\_medio = 1,$$

$$\text{delta} = 0)$$

*LABORATORIO.V\_MAR V6 (*

$$D0 = 0.0806,$$

$$D\_medio = 1,$$

$$delta = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA T7 (*

$$l = .45,$$

$$d = 0.0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA T9 (*

$$l = .28,$$

$$d = 0.0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.CODO C5 (*

$$l = .15,$$

$$d = 0.0806,$$

$$angulo = 120,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA T10 (*

$$l = .9,$$

$$d = 0.0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA T11 (*

$$l = .05,$$

$$d = 0.0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA T21 (*

$l = .63,$   
 $d = .053,$   
 $f\_in\_z = 2.5,$   
 $f\_out\_z = 5)$

*LABORATORIO.CODO C6 (*

$l = .15,$   
 $d = 0.0806,$   
 $angulo = 90,$   
 $f\_in\_z = 0,$   
 $f\_out\_z = 0)$

*LABORATORIO.V\_MAR V2 (*

$D0 = 0.0806,$   
 $D\_medio = 1,$   
 $delta = 0)$

*LABORATORIO.TUBERIA T12 (*

$l = .68,$   
 $d = 0.0806,$   
 $f\_in\_z = 5,$   
 $f\_out\_z = 0)$

*LABORATORIO.CODO C7 (*

$l = .15,$   
 $d = 0.0806,$   
 $angulo = 90,$   
 $f\_in\_z = 0,$   
 $f\_out\_z = 0)$

*LABORATORIO.TUBERIA T13 (*

$l = .64,$   
 $d = .0806,$   
 $f\_in\_z = 0,$   
 $f\_out\_z = 0)$

*LABORATORIO.V\_MAR V4 (*

$D0 = 0.0806,$

$D\_medio = 1,$   
 $delta = 0)$

LABORATORIO.CODO C9 (

$l = .15,$   
 $d = .0806,$   
 $angulo = 90,$   
 $f\_in\_z = 0,$   
 $f\_out\_z = 0)$

LABORATORIO.TE\_18 TE2 (

$Dst = 0.053,$   
 $Ds = 0.053)$

LABORATORIO.TUBERIA T17 (

$l = .01,$   
 $d = 0.053,$   
 $f\_in\_z = 5,$   
 $f\_out\_z = 0)$

LABORATORIO.CODO C10 (

$l = .15,$   
 $d = 0.053,$   
 $angulo = 90,$   
 $f\_in\_z = 0,$   
 $f\_out\_z = 0)$

LABORATORIO.TUBERIA T18 (

$l = .78,$   
 $d = .053,$   
 $f\_in\_z = 0,$   
 $f\_out\_z = 0)$

LABORATORIO.TUBERIA T16 (

$l = .26,$   
 $d = .053,$   
 $f\_in\_z = 0,$   
 $f\_out\_z = 2.5)$

*LABORATORIO.V\_MAR VI (*

$$D0 = .053,$$

$$D\_medio = 1,$$

$$delta = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA T15 (*

$$l = 0.27,$$

$$d = .053,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA T14 (*

$$l = 1,$$

$$d = 0.053,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TE\_1 TE\_1\_1 (*

$$Dst = 0.0806,$$

$$Ds = 0.053)$$

*LABORATORIO.TUBERIA TUB1 (*

$$l = 0.82,$$

$$d = .0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.CODO CODO1 (*

$$angulo = 90,$$

$$l = .15,$$

$$d = 0.0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA TUB2 (*

$$l = .64,$$

$$d = .0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.CODO CODO2 (

$$angulo = 90,$$

$$l = .15,$$

$$d = .0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.CODO CODO3 (

$$angulo = 90,$$

$$l = .15,$$

$$d = 0.0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.TUBERIA TUB4 (

$$l = 2.77,$$

$$d = .0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.CODO CODO4 (

$$angulo = 90,$$

$$l = .15,$$

$$d = .0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.TUBERIA TUB5 (

$$l = .12,$$

$$d = .0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.CODO CODO11 (

$$angulo = 90,$$

$$l = .15,$$

$$d = 0.0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.TUBERIA TUB10 (

$$l = 2,$$

$$d = 0.0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.CODO CODO9 (

$$angulo = 90,$$

$$l = .15,$$

$$d = 0.0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.CODO CODO7 (

$$angulo = 90,$$

$$l = .15,$$

$$d = 0.0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.TUBERIA TUB8 (

$$l = 2,$$

$$d = 0.053,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

LABORATORIO.CODO CODO6 (

$$angulo = 90,$$

$$l = .15,$$

$$d = 0.053,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA TUB6 (*

$$l = 2,$$

$$d = 0.053,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*LABORATORIO.V\_MAR V8 (*

$$D0 = 0.0806,$$

$$D\_medio = 1,$$

$$delta = 0)$$

*LABORATORIO.TUBERIA T\_aux1 (*

$$l = .01,$$

$$d = 0.0806,$$

$$f\_in\_z = 0,$$

$$f\_out\_z = 0)$$

*CONNECT MEZC.RB TO V6.f\_in*

*CONNECT V6.f\_out TO T7.f\_in*

*CONNECT T9.f\_out TO C5.f\_in*

*CONNECT C5.f\_out TO T10.f\_in*

*CONNECT T1.f\_out TO C1.f\_in*

*CONNECT C1.f\_out TO T2.f\_in*

*CONNECT T3.f\_out TO C2.f\_in*

*CONNECT C2.f\_out TO T4.f\_in*

*CONNECT T4.f\_out TO C3.f\_in*

*CONNECT C3.f\_out TO T5.f\_in*

*CONNECT T5.f\_out TO C4.f\_in*

*CONNECT C4.f\_out TO T6.f\_in*

*CONNECT MEZC.AAM TO T11.f\_in*

*CONNECT T11.f\_out TO C6.f\_in*

*CONNECT C6.f\_out TO V2.f\_in*

*CONNECT V2.f\_out TO T12.f\_in*

*CONNECT C7.f\_out TO T13.f\_in*

*CONNECT IM TO T14.f\_in*

*CONNECT T15.f\_out TO V1.f\_in*  
*CONNECT V1.f\_out TO T16.f\_in*  
*CONNECT T16.f\_out TO TE2.f\_c*  
*CONNECT TE2.f\_s TO T17.f\_in*  
*CONNECT T17.f\_out TO C10.f\_in*  
*CONNECT C10.f\_out TO T18.f\_in*  
*CONNECT TE2.f\_st TO C9.f\_in*  
*CONNECT C9.f\_out TO T21.f\_in*  
*CONNECT T18.f\_out TO TE\_1\_1.f\_s*  
*CONNECT TE\_1\_1.f\_c TO RM*  
*CONNECT T10.f\_out TO TE\_1\_1.f\_st*  
*CONNECT T14.f\_out TO T15.f\_in*  
*CONNECT T12.f\_out TO TUB1.f\_in*  
*CONNECT T7.f\_out TO T9.f\_in*  
*CONNECT T6.f\_out TO MEZC.ADM*  
*CONNECT T21.f\_out TO MEZC.ADT*  
*CONNECT TUB1.f\_out TO C7.f\_in*  
*CONNECT CODO1.f\_out TO TUB2.f\_in*  
*CONNECT TUB2.f\_out TO CODO2.f\_in*  
*CONNECT CODO2.f\_out TO V4.f\_in*  
*CONNECT V4.f\_out TO CODO3.f\_in*  
*CONNECT CODO3.f\_out TO TUB4.f\_in*  
*CONNECT TUB4.f\_out TO CODO4.f\_in*  
*CONNECT CODO4.f\_out TO TUB5.f\_in*  
*CONNECT TUB5.f\_out TO EM*  
*CONNECT SM TO TUB6.f\_in*  
*CONNECT TUB6.f\_out TO CODO6.f\_in*  
*CONNECT CODO6.f\_out TO TUB8.f\_in*  
*CONNECT TUB8.f\_out TO CODO7.f\_in*  
*CONNECT CODO7.f\_out TO V5.f\_in*  
*CONNECT V5.f\_out TO CODO9.f\_in*  
*CONNECT CODO9.f\_out TO TUB10.f\_in*

*CONNECT TUB10.f\_out TO CODO11.f\_in*  
*CONNECT CODO11.f\_out TO T1.f\_in*  
*CONNECT V8.f\_out TO T3.f\_in*  
*CONNECT T2.f\_out TO T\_aux1.f\_in*  
*CONNECT T\_aux1.f\_out TO V8.f\_in*  
*CONNECT T13.f\_out TO CODO1.f\_in*

*INIT*

*TE2.f\_st.w = 10*

*EM.T = 75*

*CONTINUOUS*

*P\_3\_5.perdida = T21.P.perdida + \*

*C9.P.perdida + TE2.P.perdida + \*

*T18.P.perdida + T16.P.perdida + V1.P.perdida + T15.P.perdida + T14.P.perdida*

*TE2.f\_st.w = ZONE (TIME < 1) 1/2 \* TE2.f\_c.w \* abs(MEZC.AAM.T - 70) / 30 + \*

*1/2 \* TE2.f\_c.w \* (MEZC.AAM.T - 70) / 30 + 1e-6*

*OTHERS (30 \* TE2.f\_c.w \* abs(MEZC.AAM.T - 70) / 30 + \*

*30 \* TE2.f\_c.w \* (MEZC.AAM.T - 70) / 30) \*\* (1/3) + .1*

*END COMPONENT*

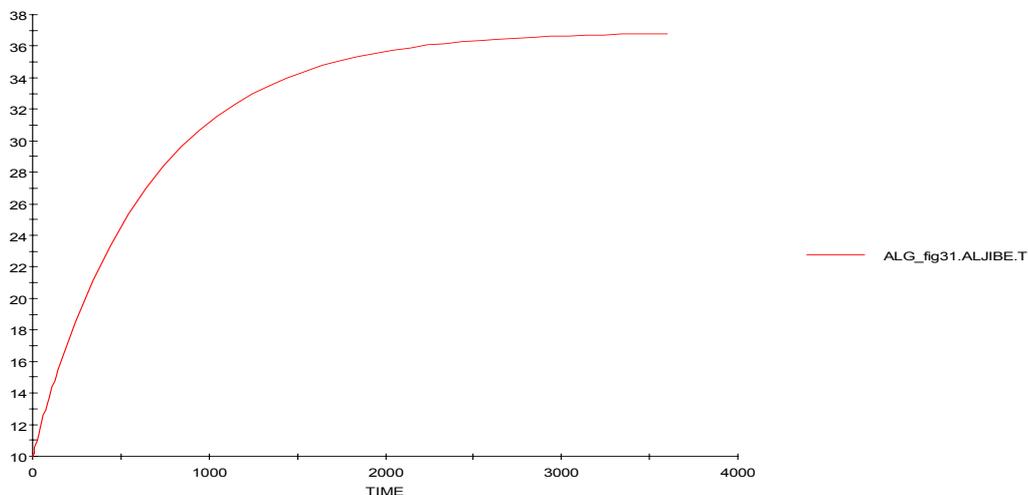
## 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES: ASPECTOS BÁSICOS DE LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN PARA CONDICIONES FUERA DE DISEÑO

Como resultados experimentales se muestran las respuestas del sistema a distintas condiciones de potencia del motor (800, 900 y 1000 kW). Para cada una de estas potencias se analizará la respuesta del sistema en el transitorio (hasta 3600 s) y en permanente (desde 3600 s hasta 24600 s). En el transitorio el sistema sufre unas variaciones que no responden a ajustes físicos del problema, sino a ajustes matemáticos. Ya que el sistema parte de unas variables iniciales, que o bien son asignadas por el usuario, o bien las asigna el propio problema. Éstas respuestas no son físicamente significativas. El permanente, sin embargo, sí es representativo. Pues una vez estabilizada la instalación se puede ver físicamente cómo responde el sistema al variar cualquier variable.

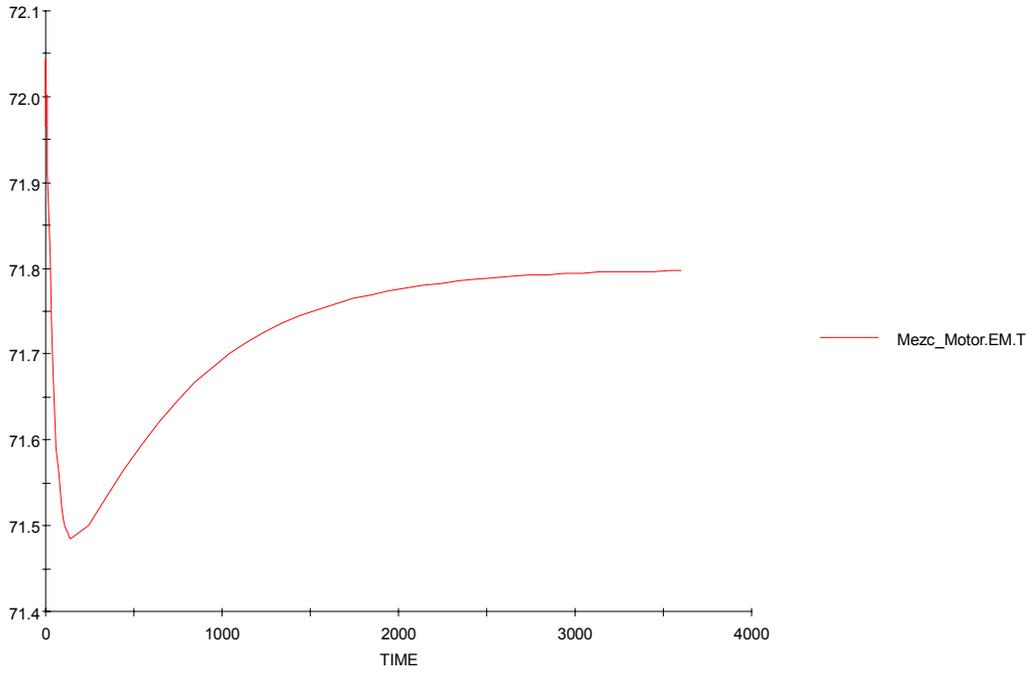
A continuación se muestra la evolución de algunas variables significativas para distintas condiciones.

### Potencia Motor: 800 kW

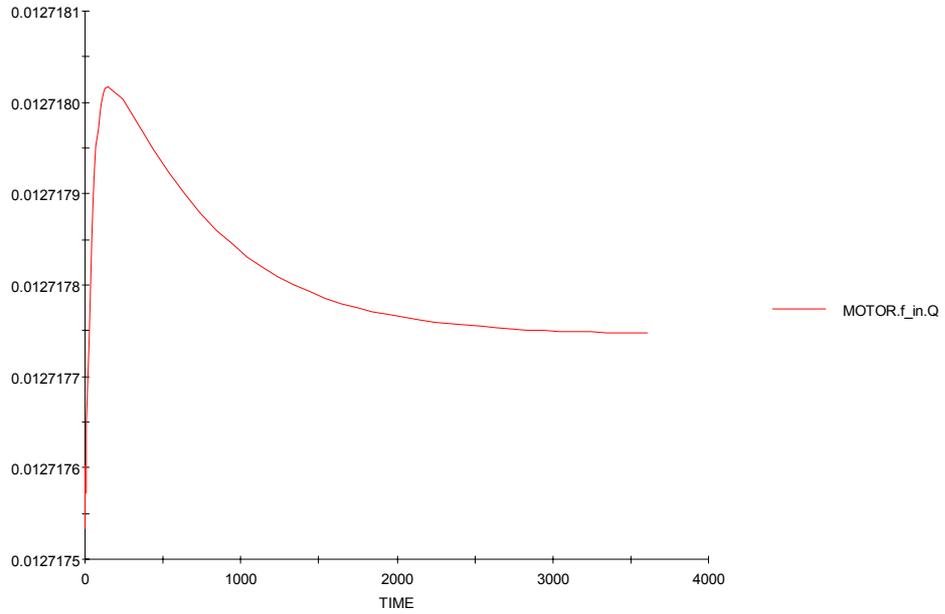
Temperatura de entrada al Aljibe



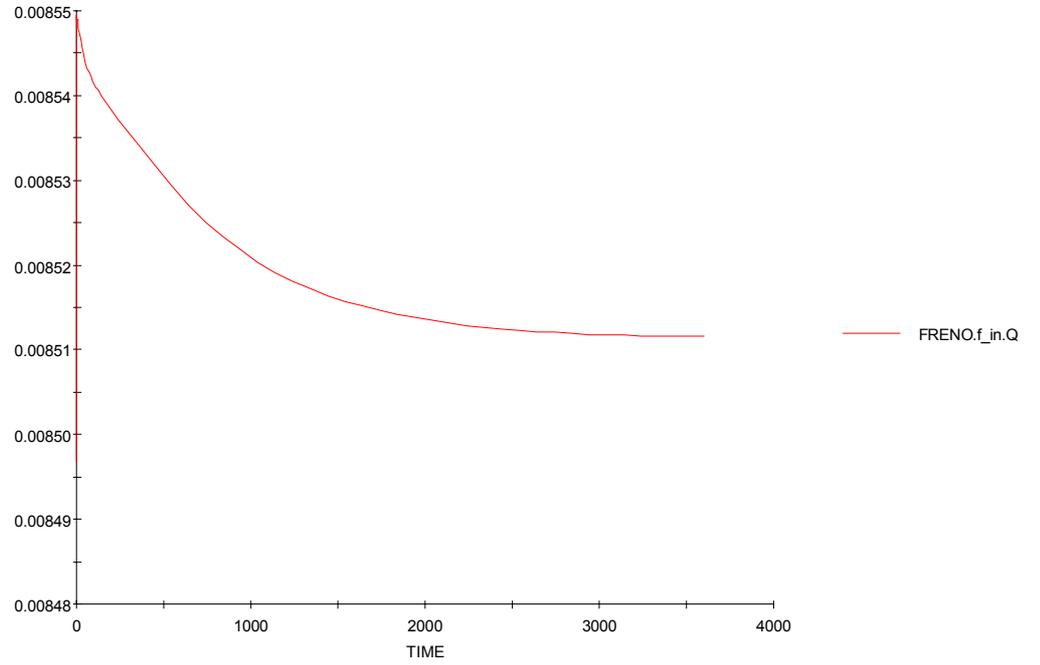
### Temperatura de entrada al motor:



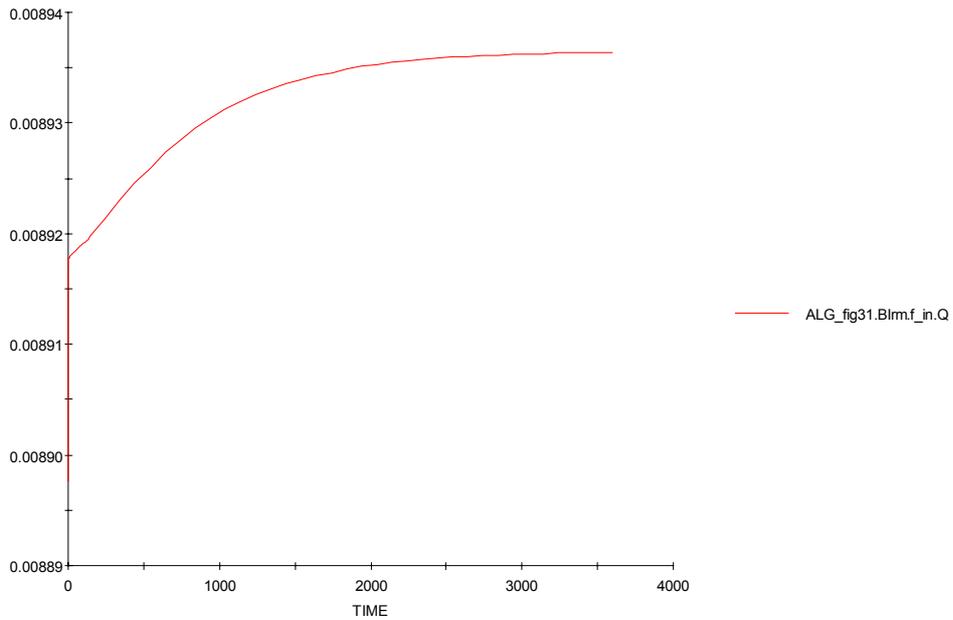
### Caudal de entrada al motor



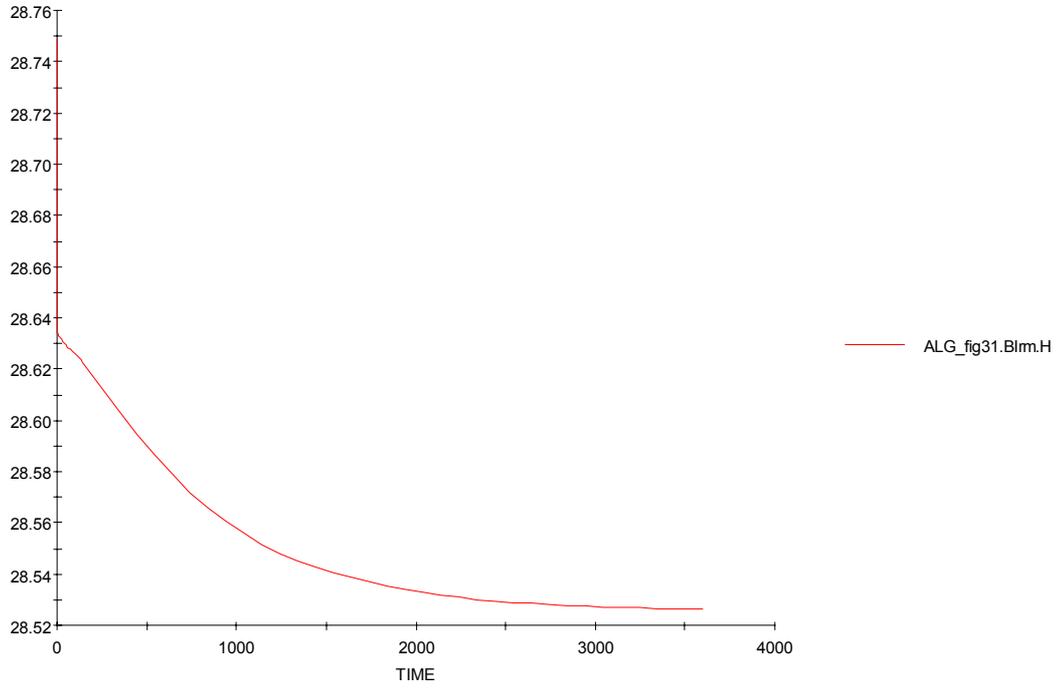
### Caudal de entrada al freno



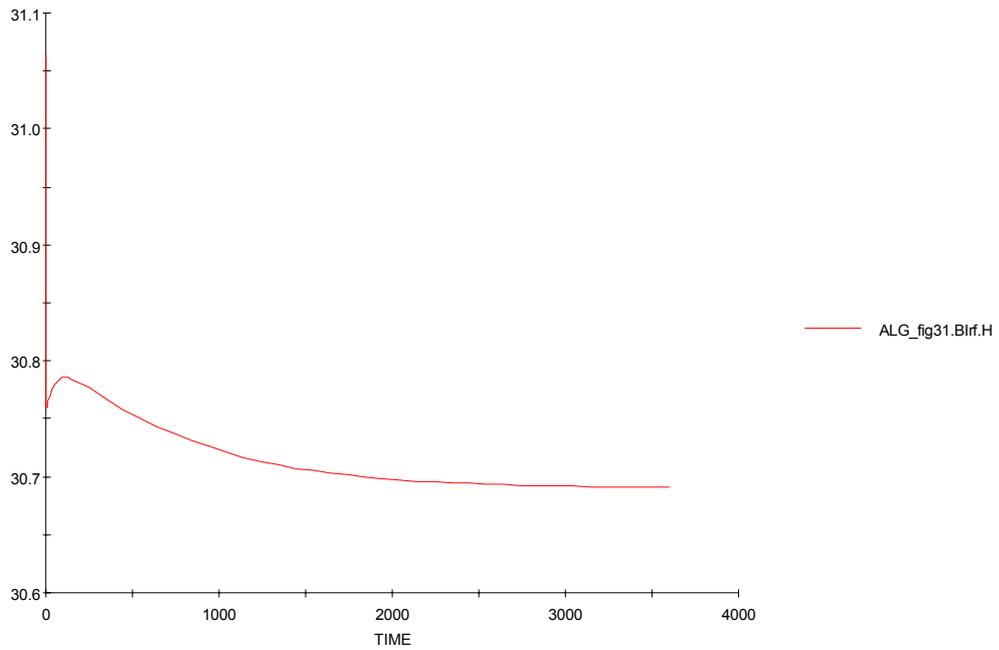
### Caudal circula por la bomba del circuito del motor



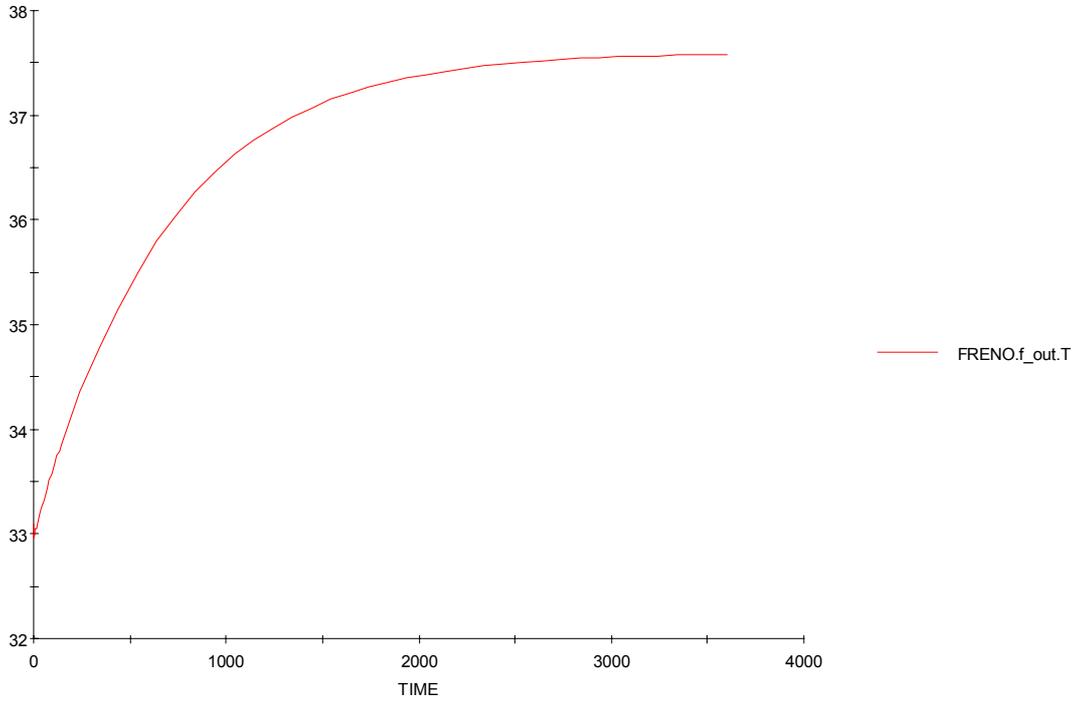
### Altura de la bomba del circuito del motor



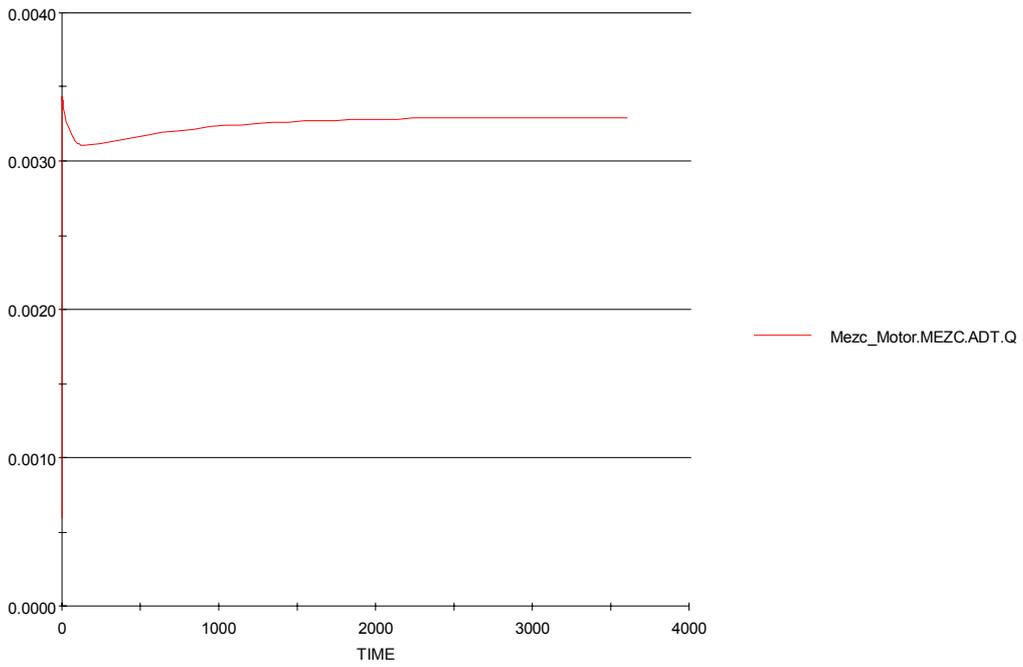
### Altura de la bomba del circuito del freno



### Temperatura de la salida del freno

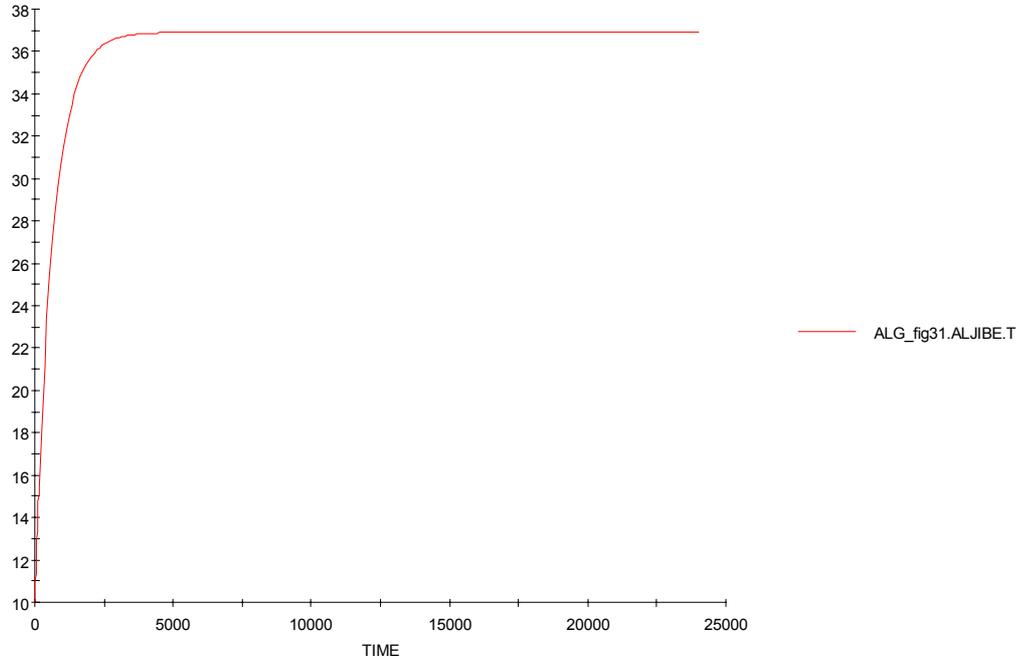


### Caudal que entra al mezclador a refrigerar

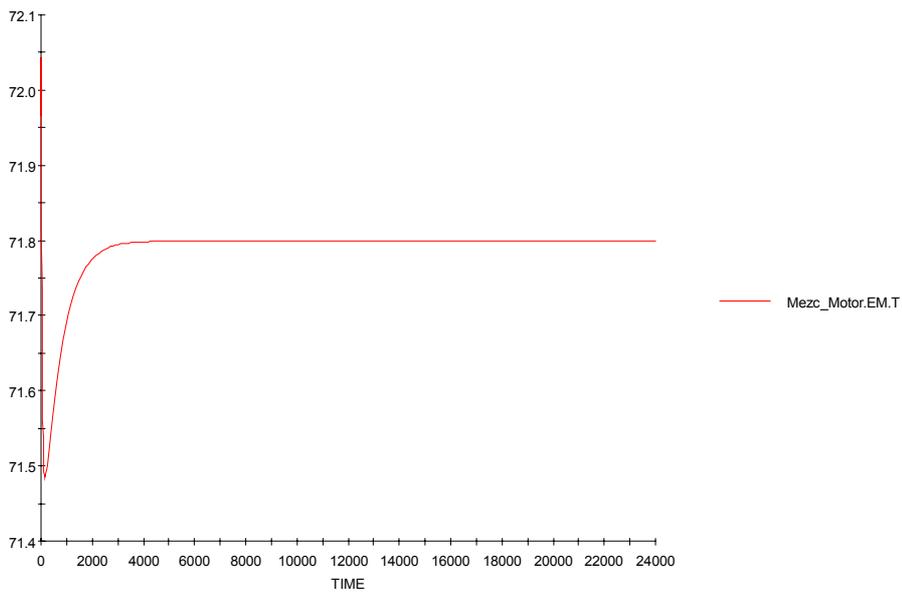


Dejando evolucionar el sistema hasta 6 horas se obtienen las siguientes evoluciones para las mismas variables que antes:

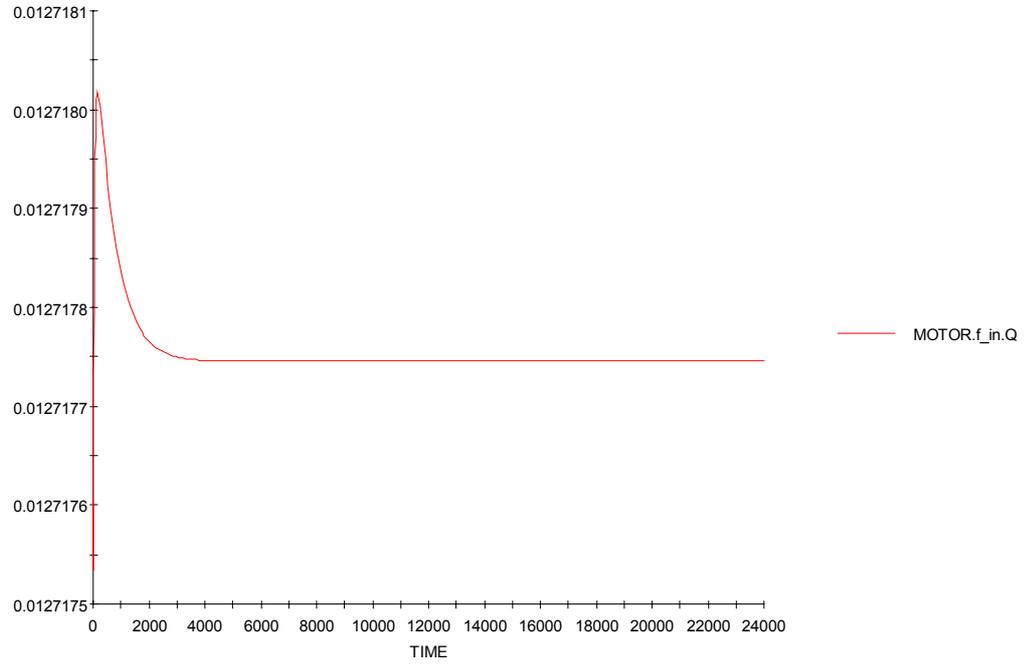
Temperatura de entrada al aljibe:



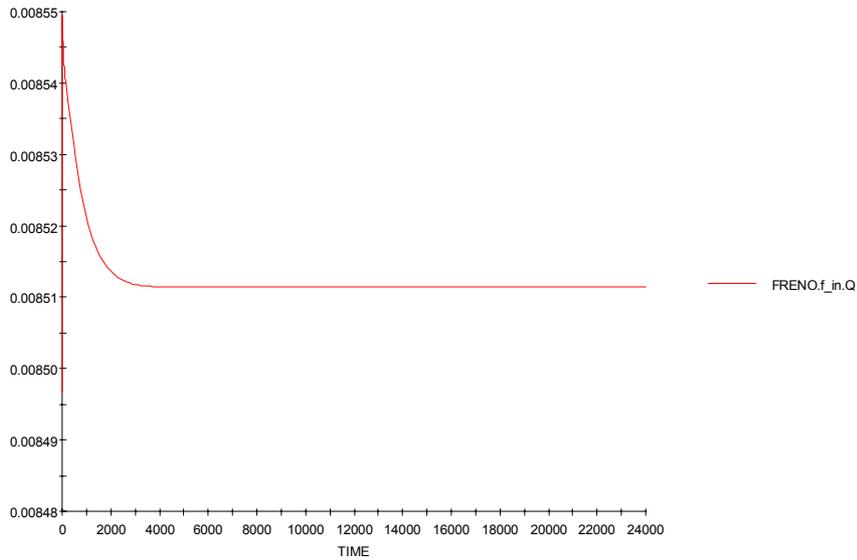
Temperatura de entrada al motor:



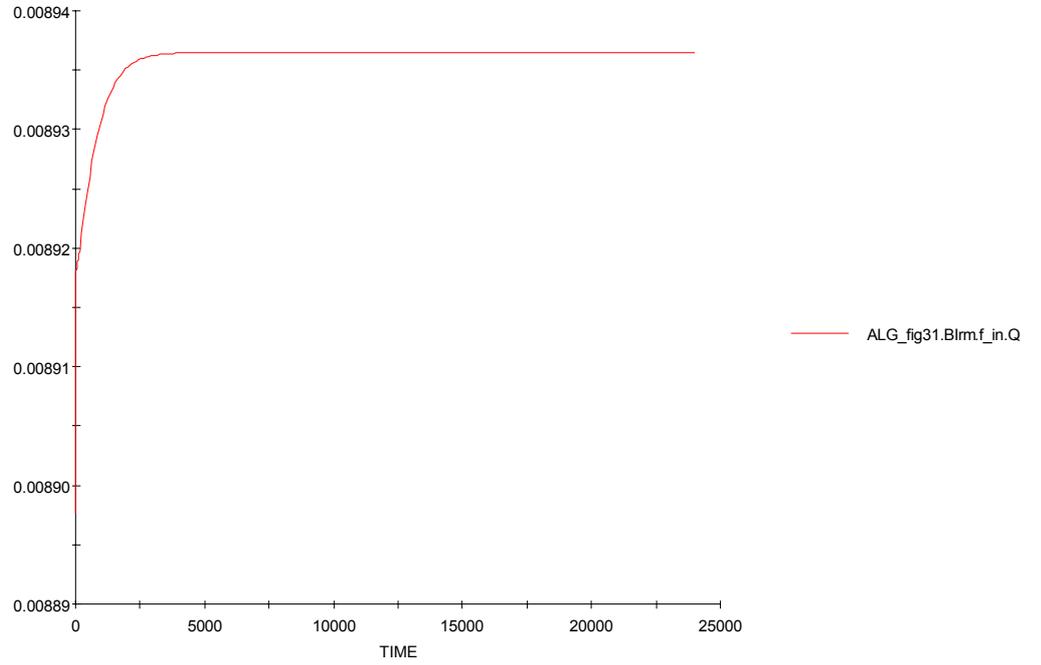
Caudal de entrada al motor:



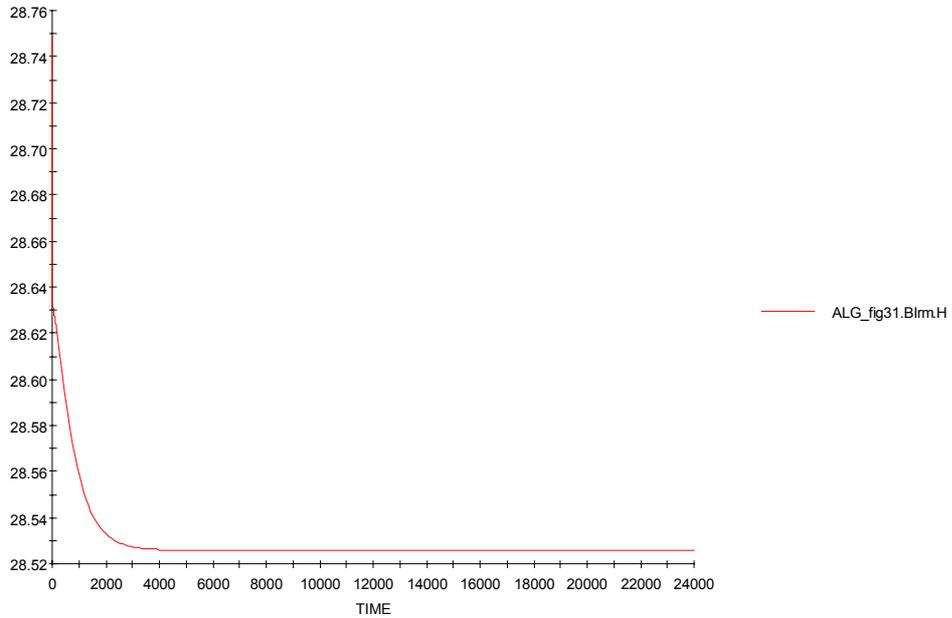
Caudal de entrada al freno:



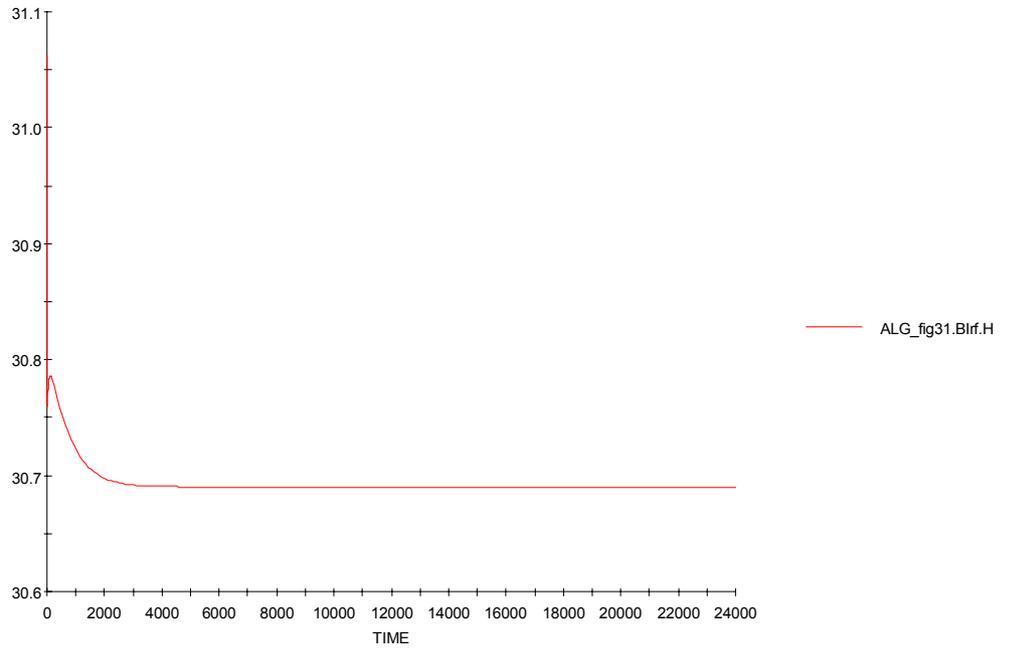
Caudal que da la bomba del circuito del motor:



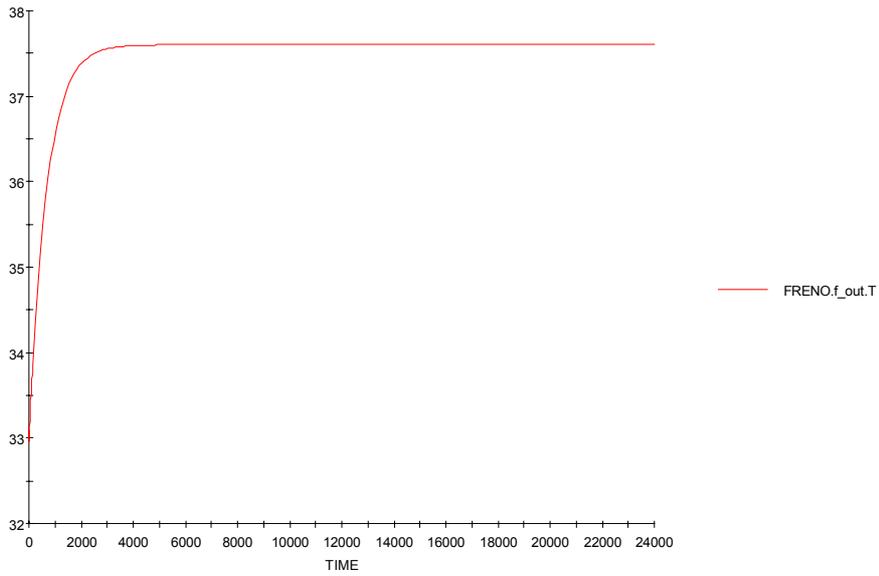
Altura que da la bomba del circuito del motor:



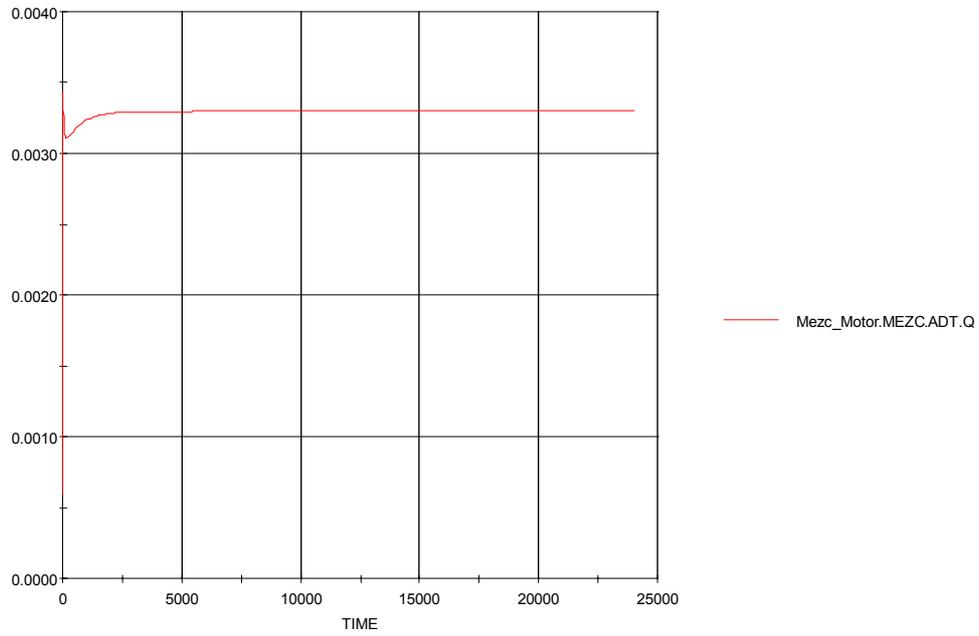
Altura que da la bomba del circuito del freno:



Temperatura de salida del freno:

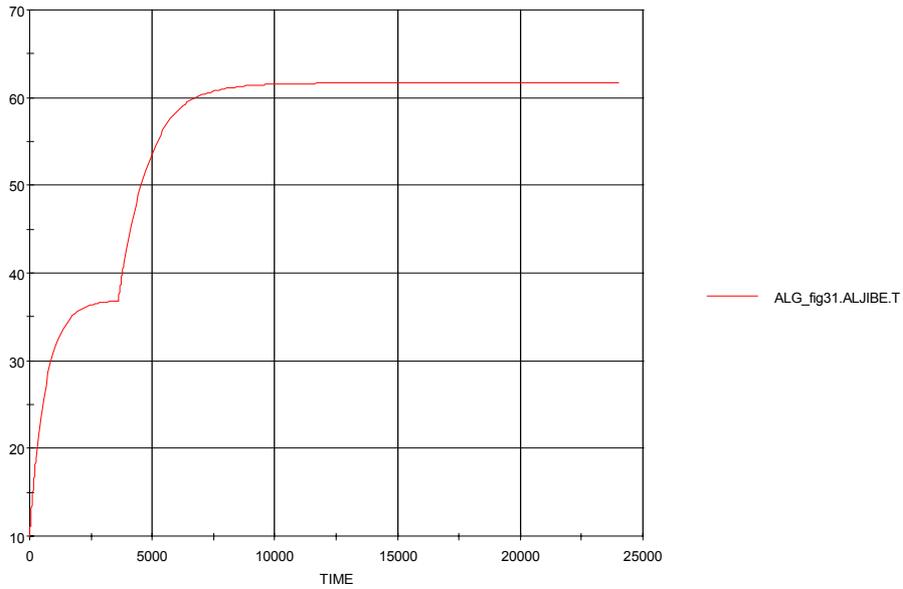


Caudal que entra a refrigerar el agua del motor al mezclador:

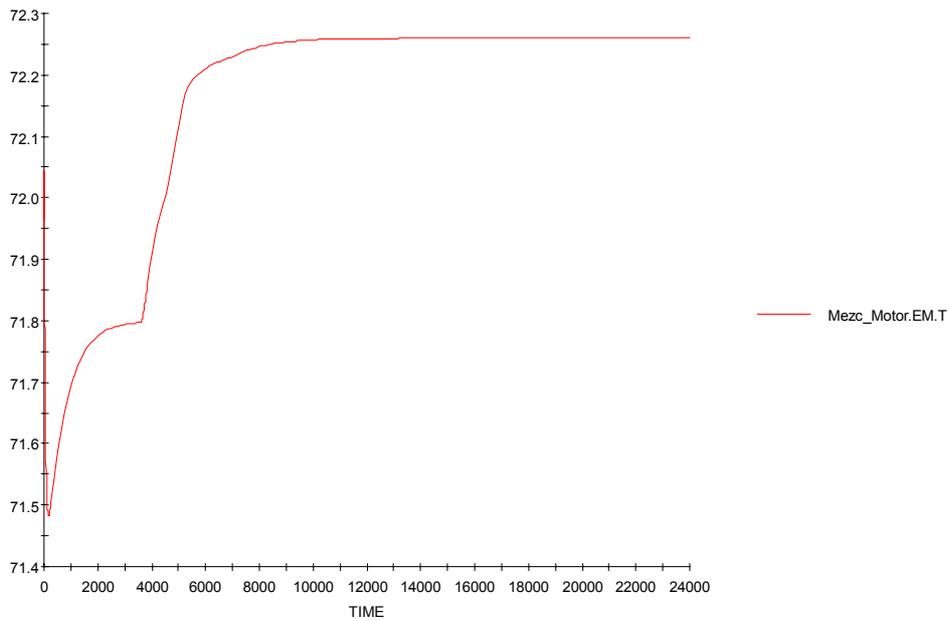


A continuación se muestra cómo evoluciona el sistema al quitar la torre del freno (se quita a partir de 1 h, que es cuando el sistema se estabiliza):

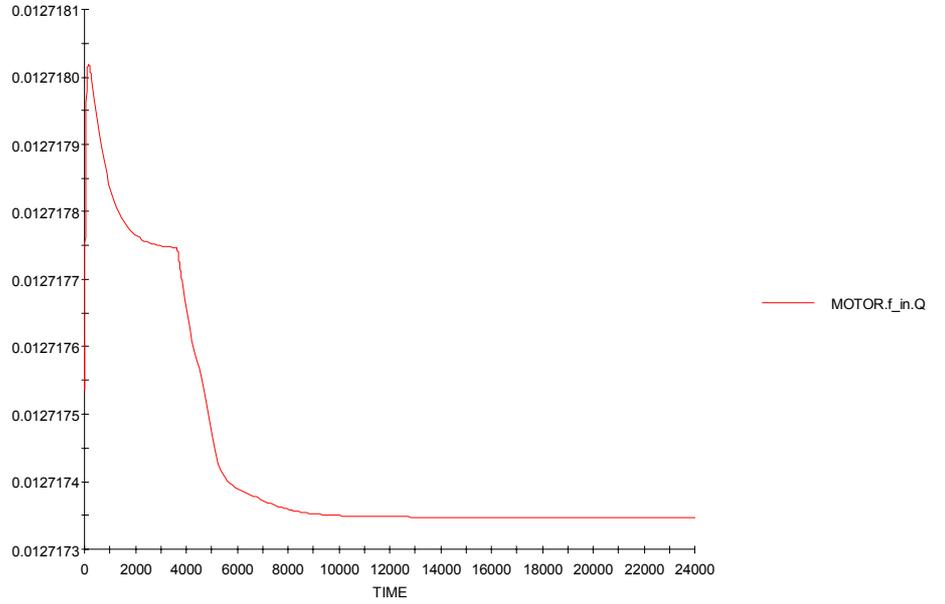
Temperatura de entrada al aljibe:



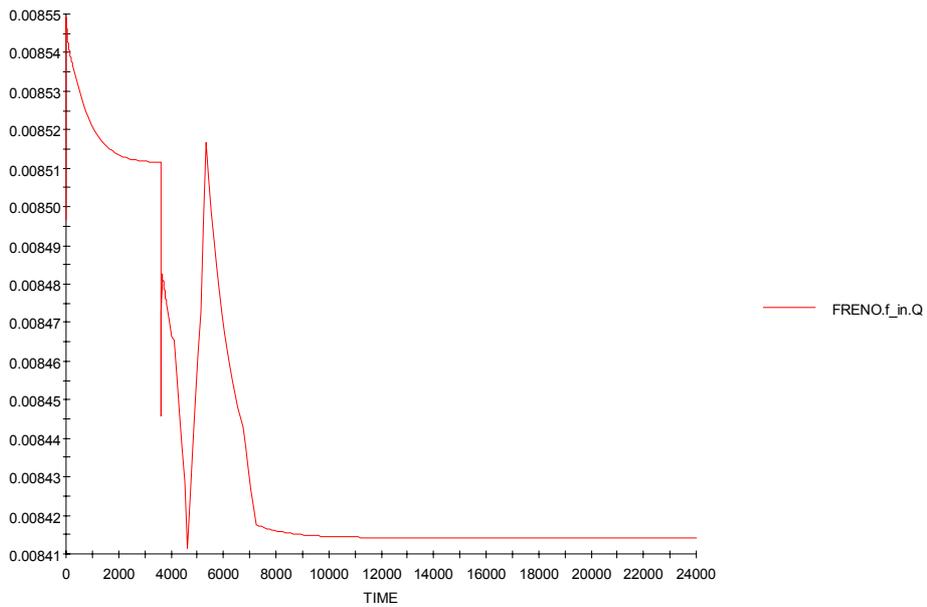
Temperatura de entrada al motor:



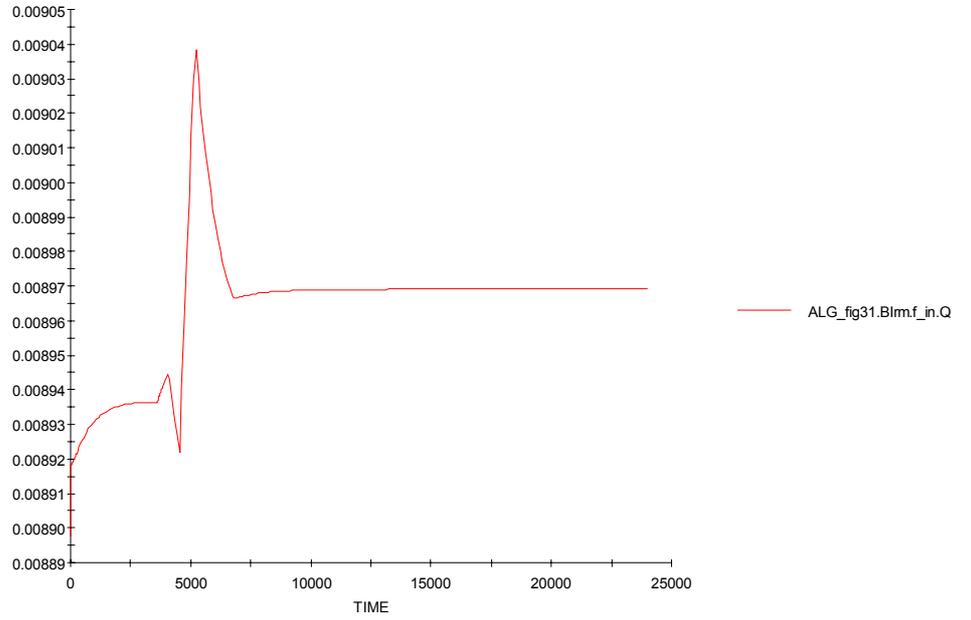
Caudal que dá la bomba del circuito del motor:



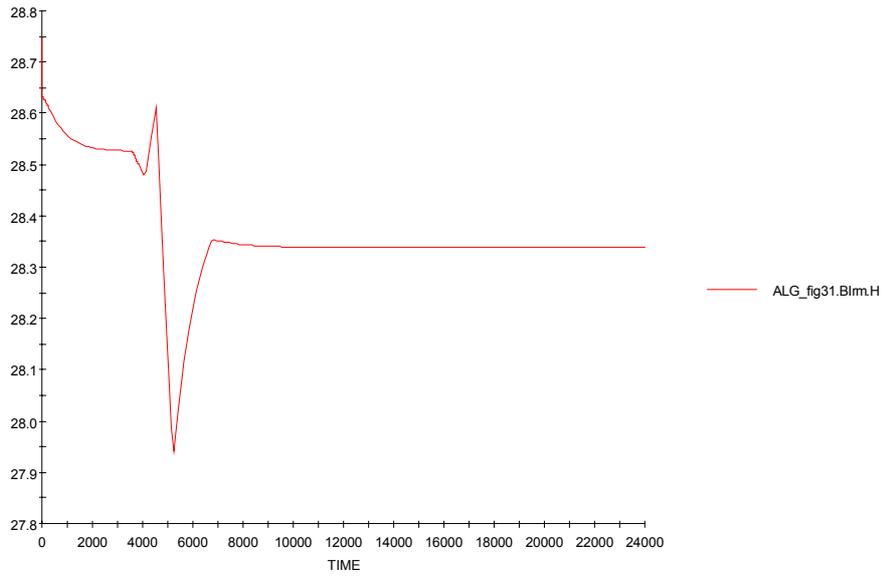
Caudal que entra al freno:



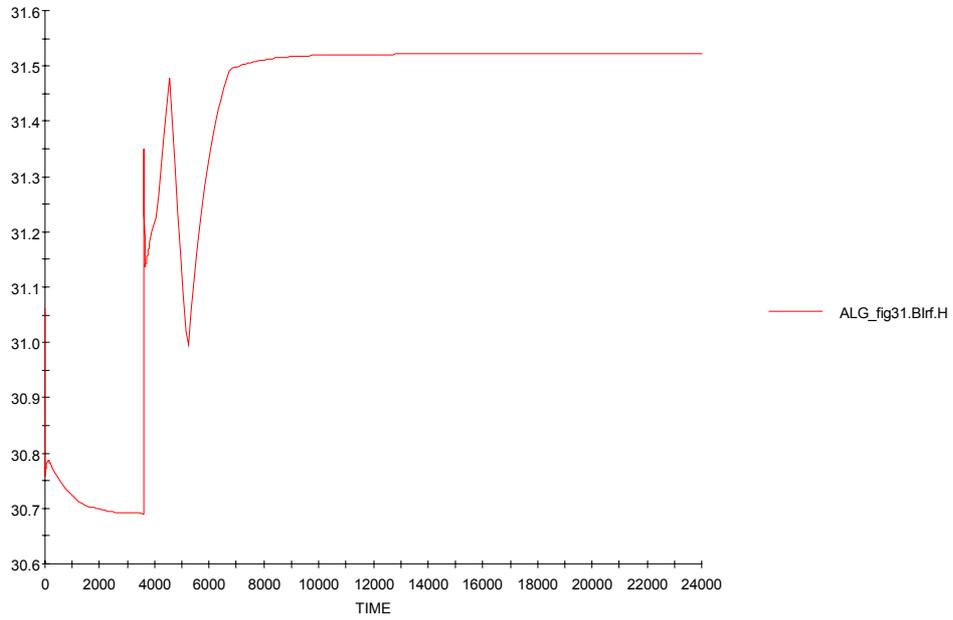
Caudal que dá la bomba del motor:



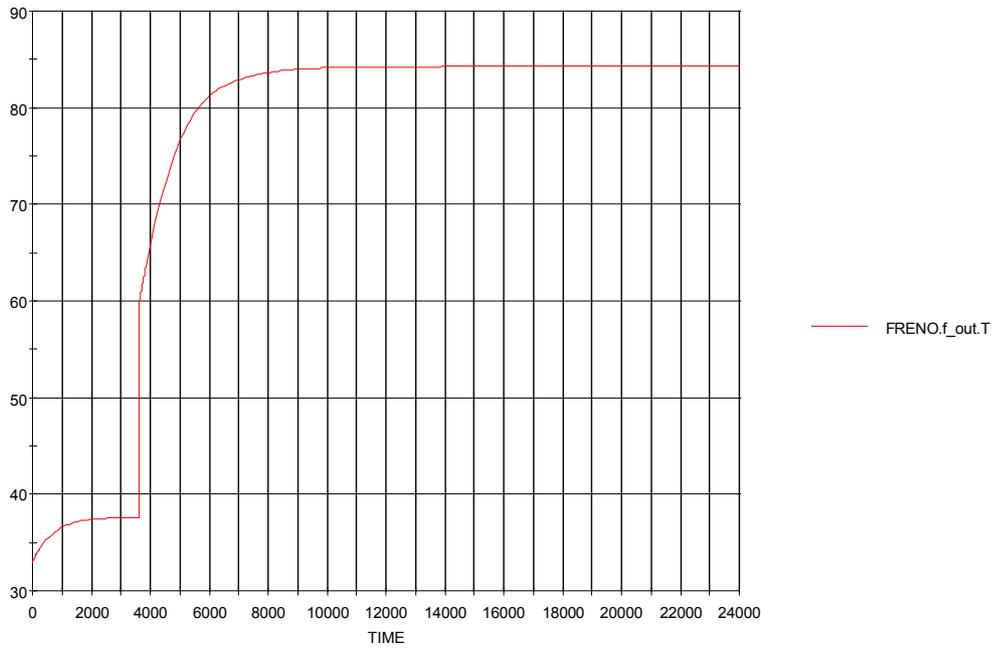
Altura que dá la bomba del motor:



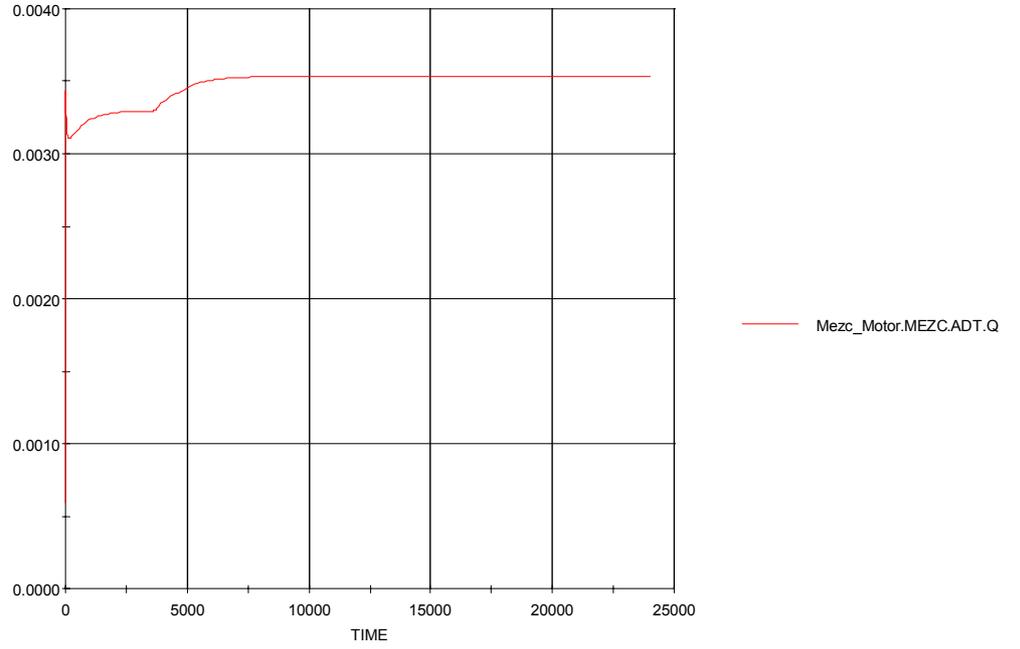
Altura que dá la bomba del freno:



Temperatura a la salida del freno:

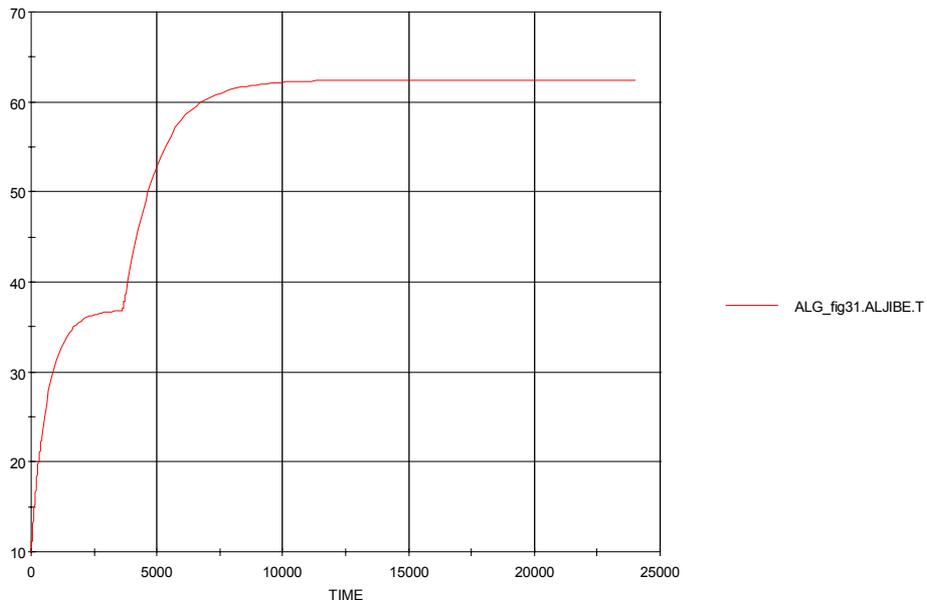


Caudal que entra a refrigerar al mezclador:

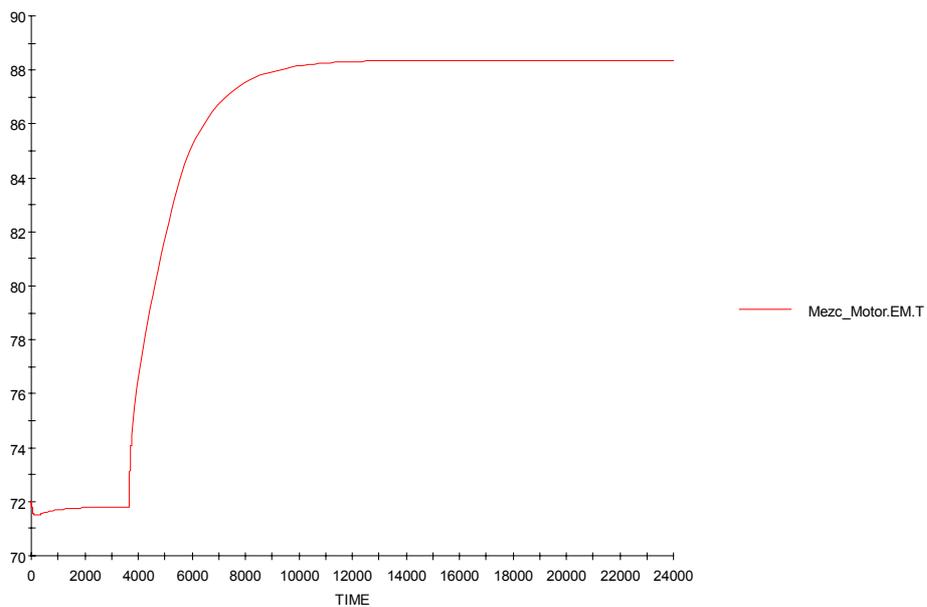


A continuación se muestra cómo evoluciona el sistema al quitar la torre del motor (se quita a partir de 1 h, que es cuando el sistema se estabiliza):

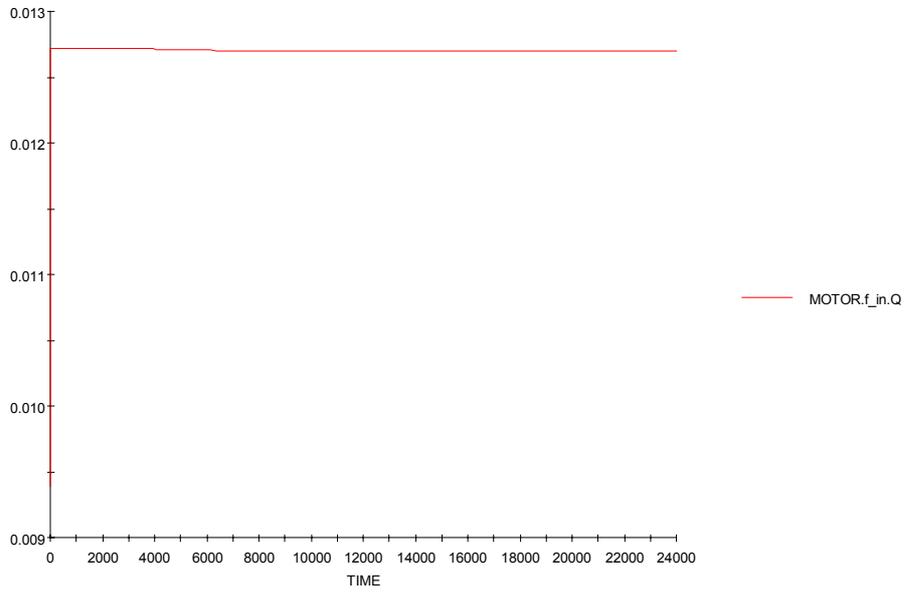
Temperatura del ajibe:



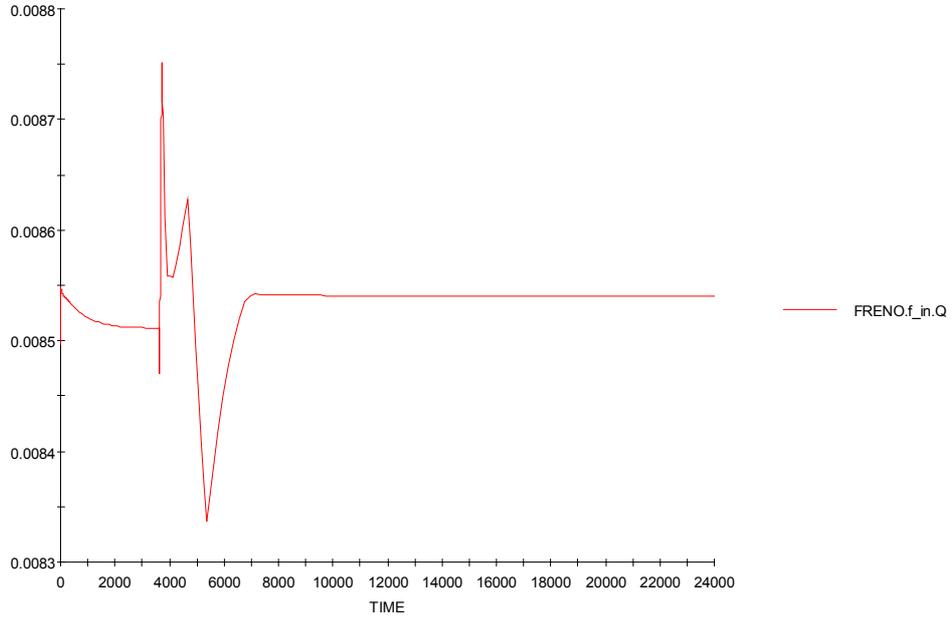
Temperatura de entrada al motor:



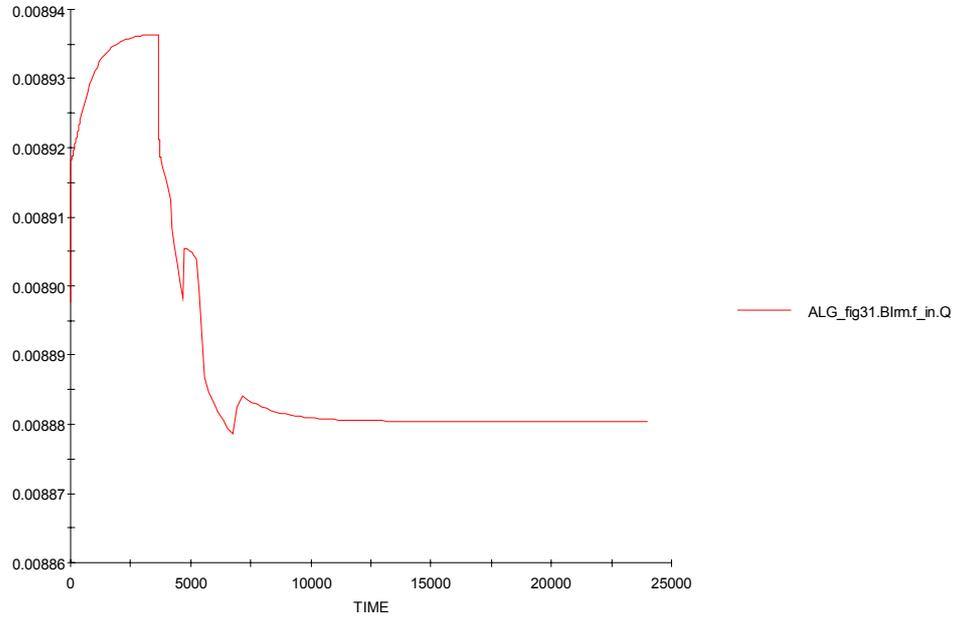
Caudal que dá el motor:



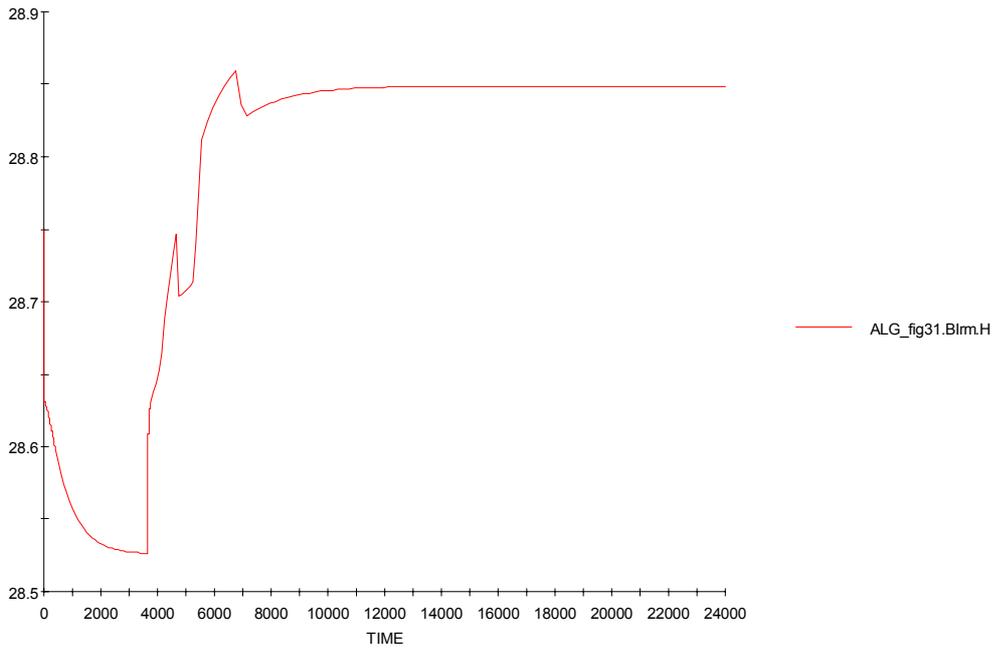
Caudal que entra al freno:



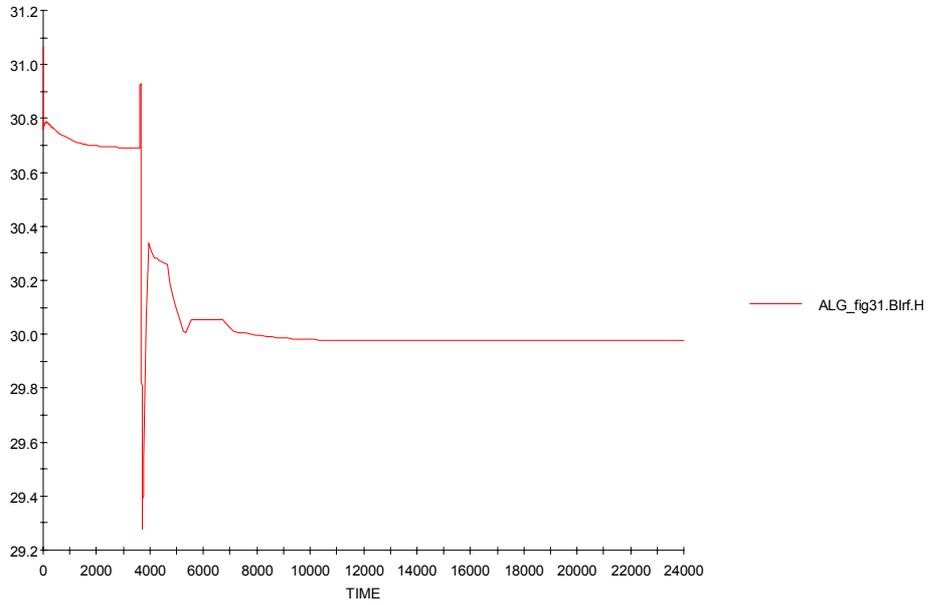
Caudal que dá la bomba:



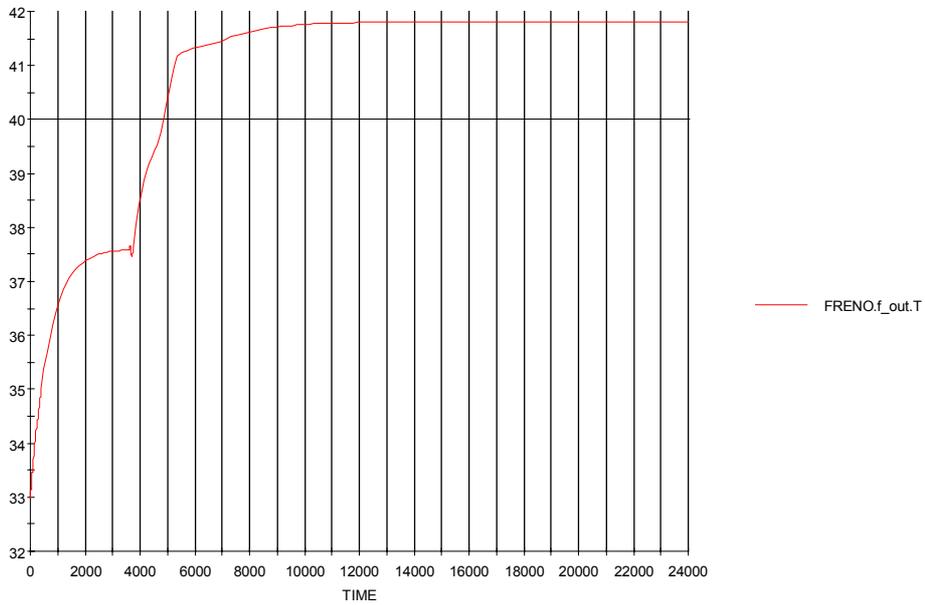
Altura que dá la bomba del circuito del motor:



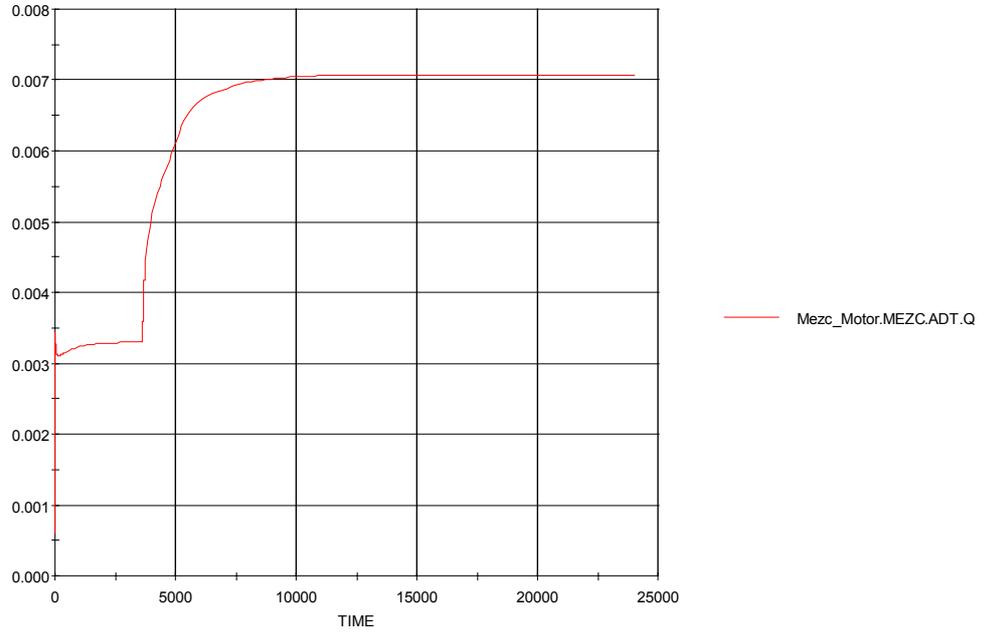
Altura que dá la bomba del circuito del freno:



Temperatura a la salida del freno:

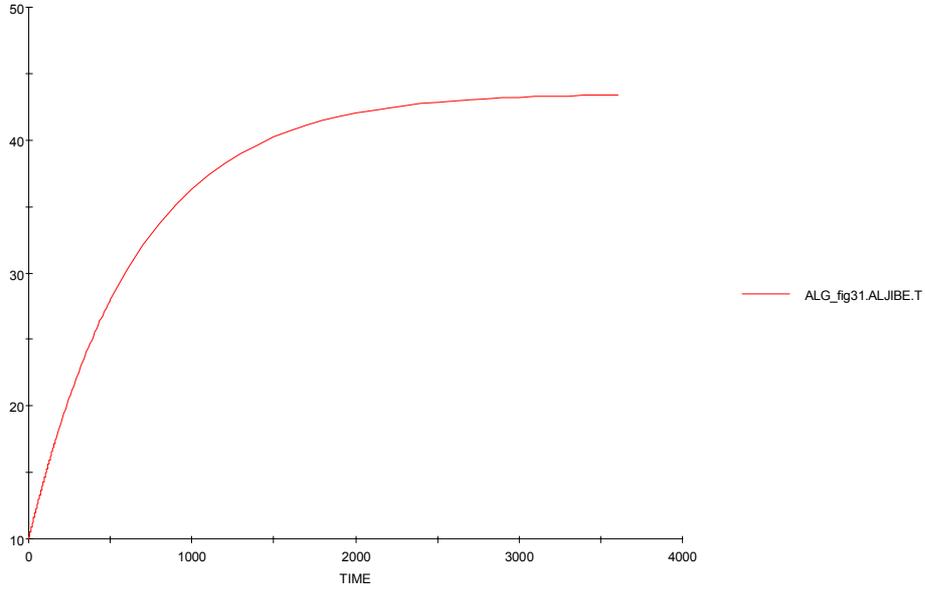


Caudal que entra a refrigerar al mezclador:

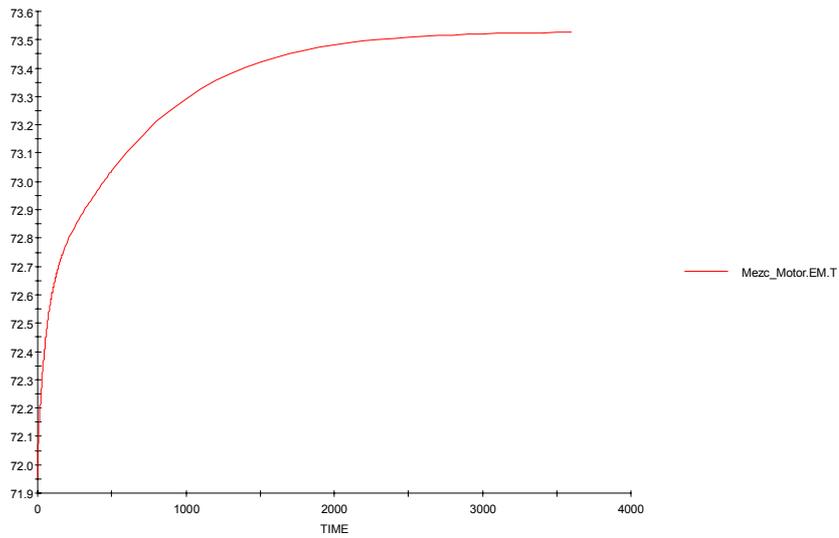


### Potencia Motor: 1000 kW

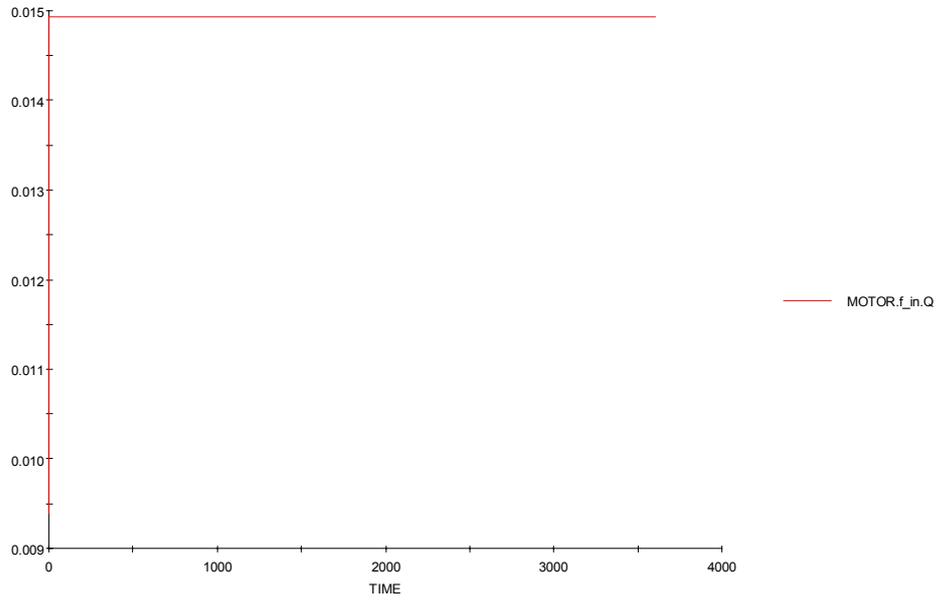
Temperatura del aljibe:



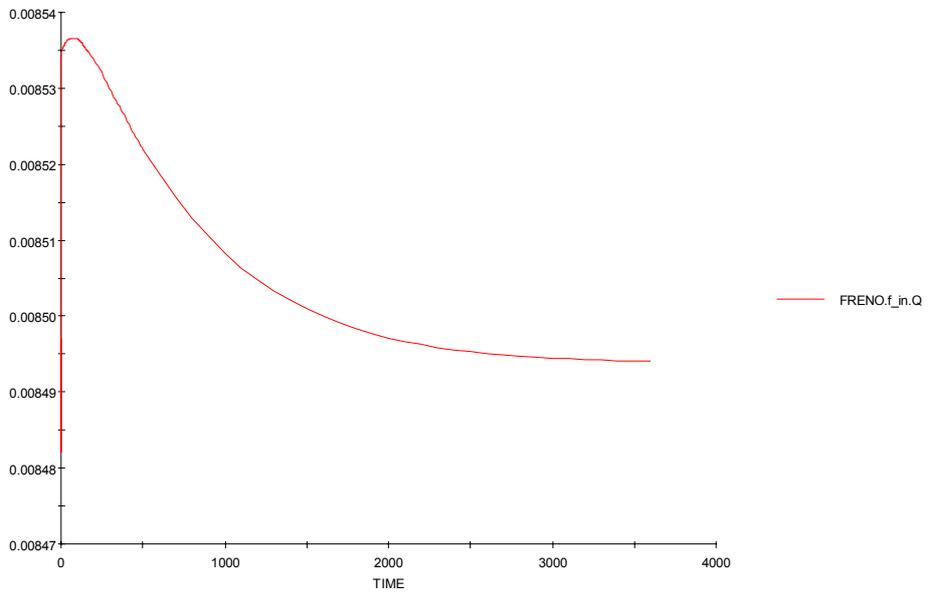
Temperatura de entrada al motor:



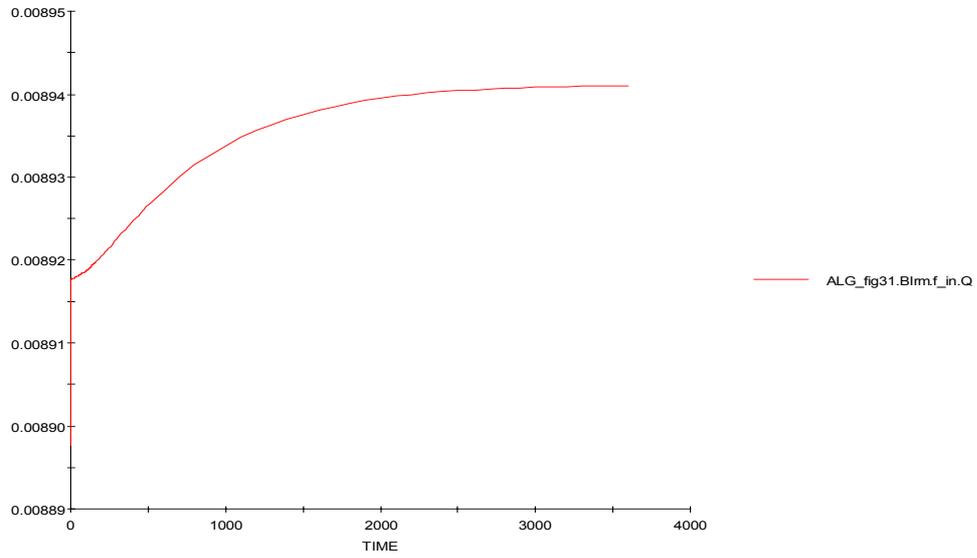
Caudal que da el motor:



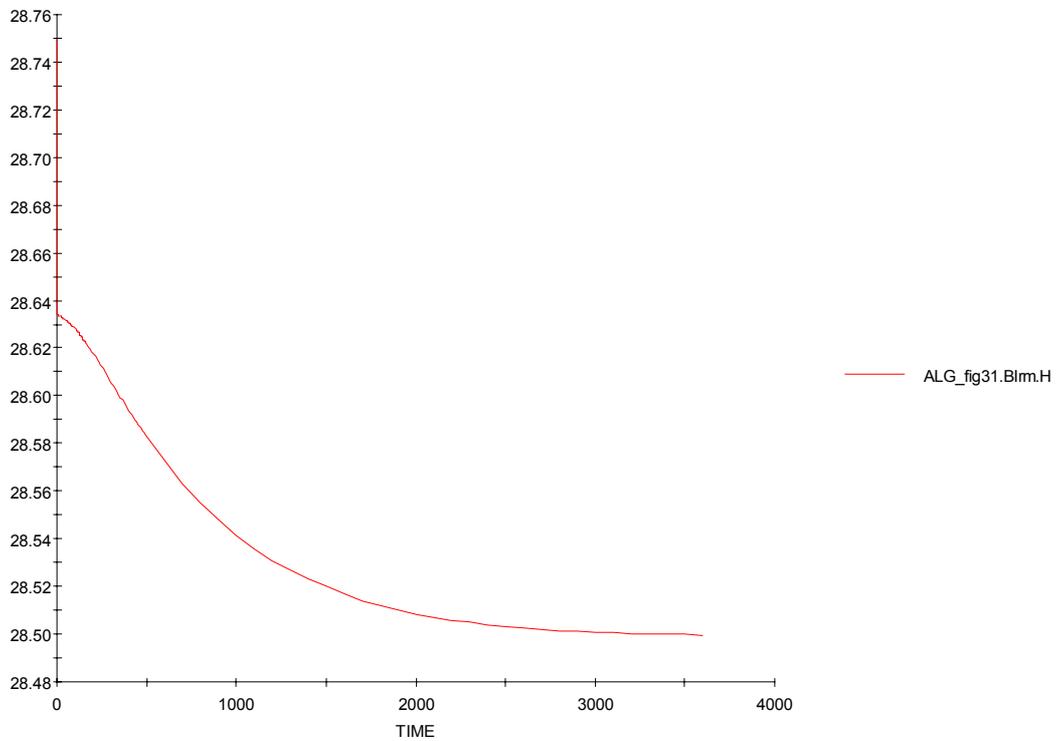
Caudal que da el freno:



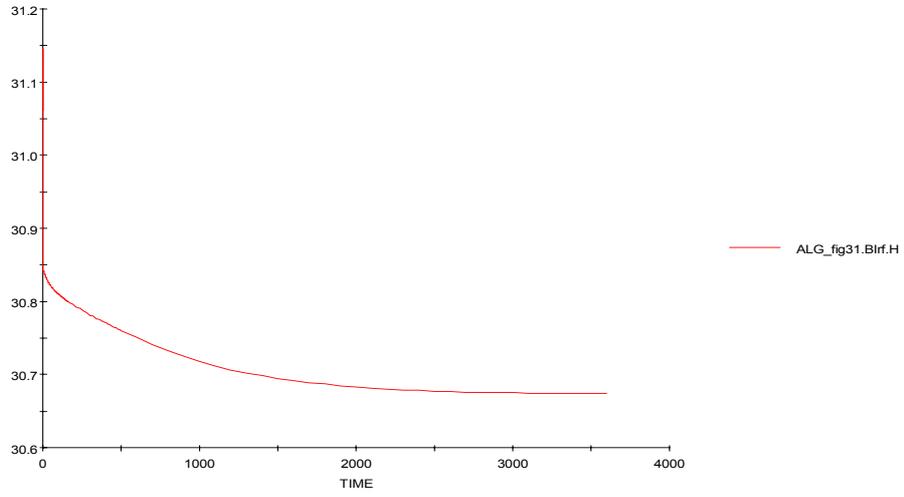
Caudal que da la bomba del circuito del motor:



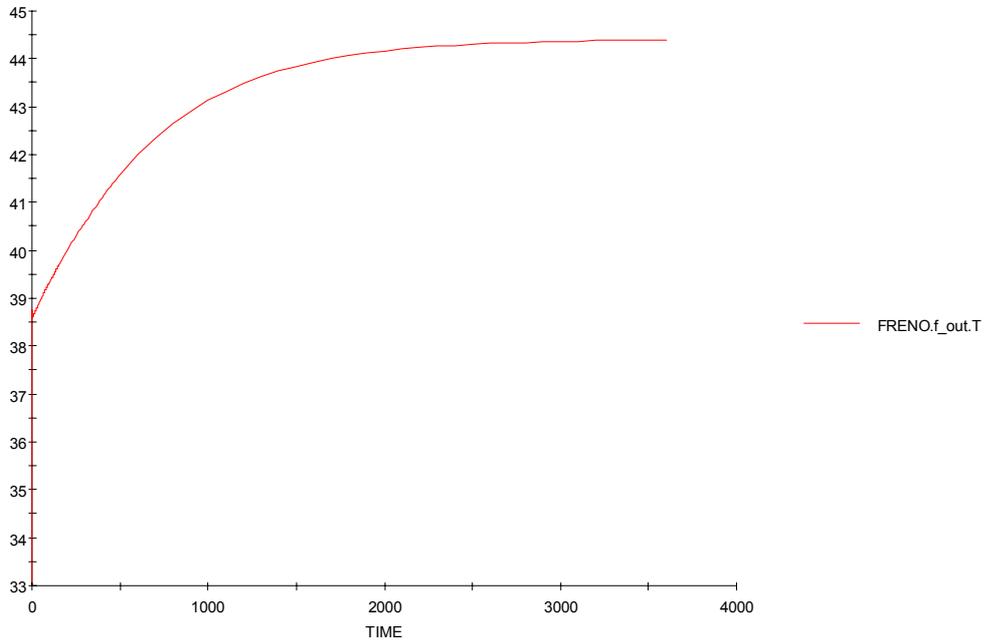
Altura que da la bomba del circuito del motor:



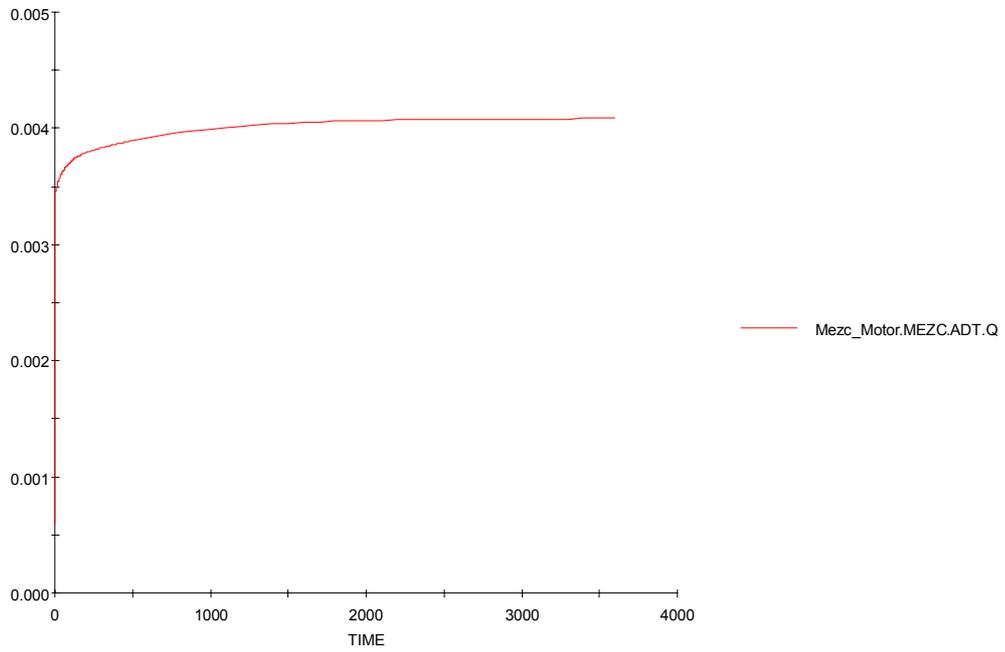
Altura que da la bomba del freno:



Temperatura a la salida del freno:

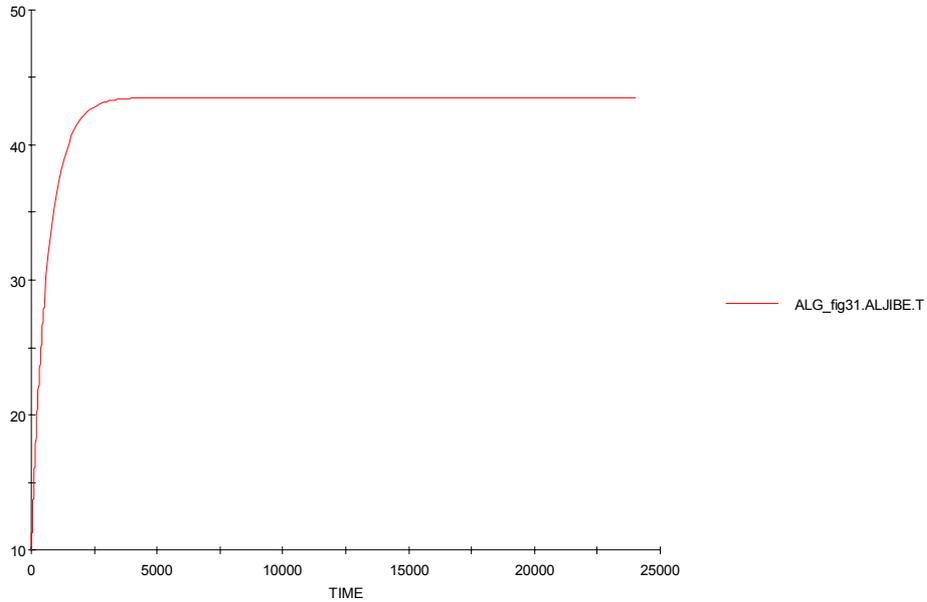


Caudal que entra a refrigerar al mezclador:

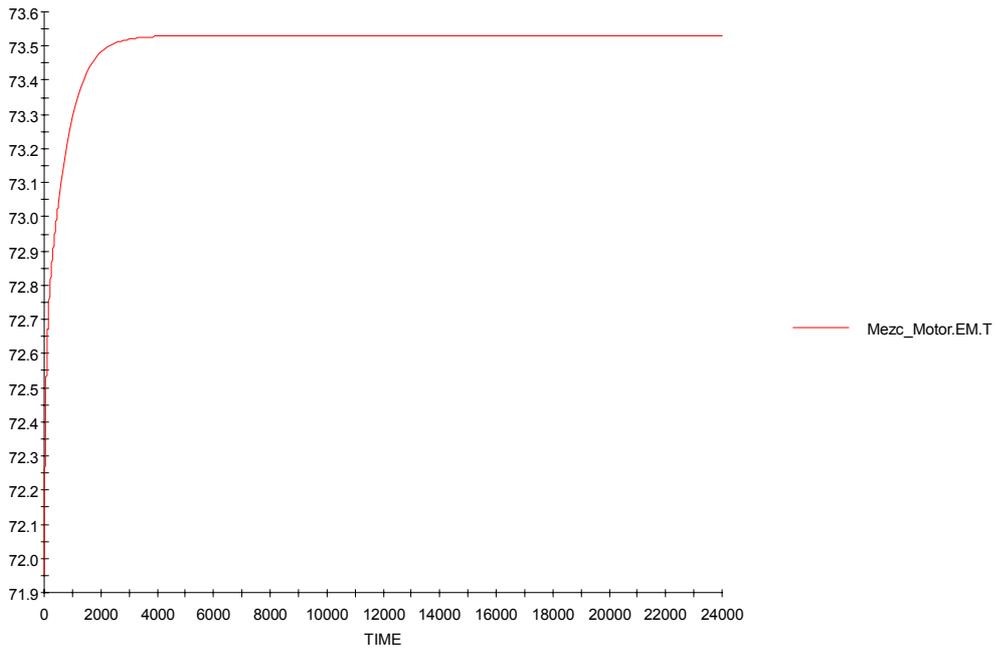


A continuación se muestra la evolución de las variables anteriores al dejar correr el experimento durante 6 horas:

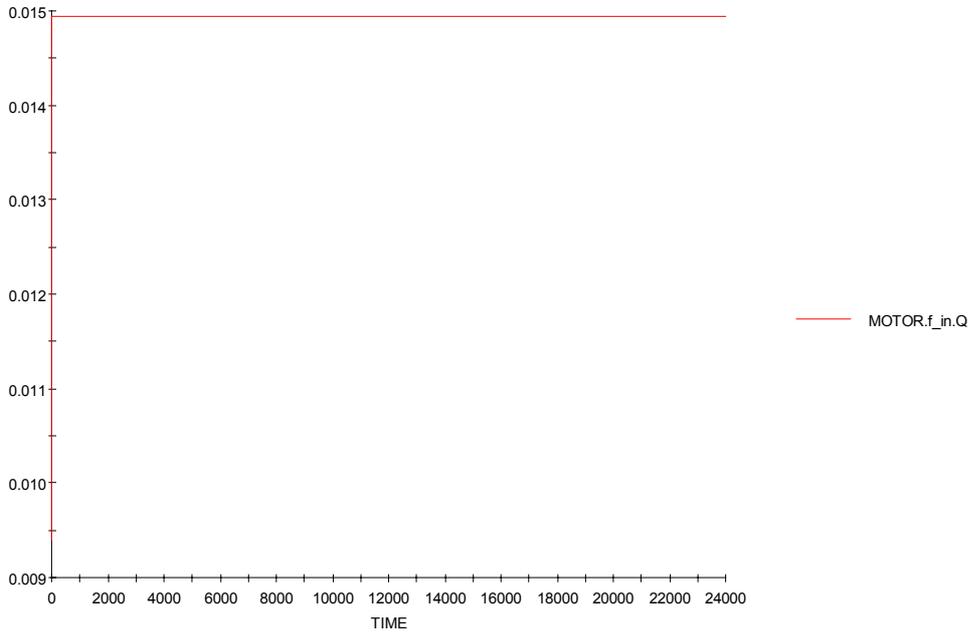
Temperatura del aljibe:



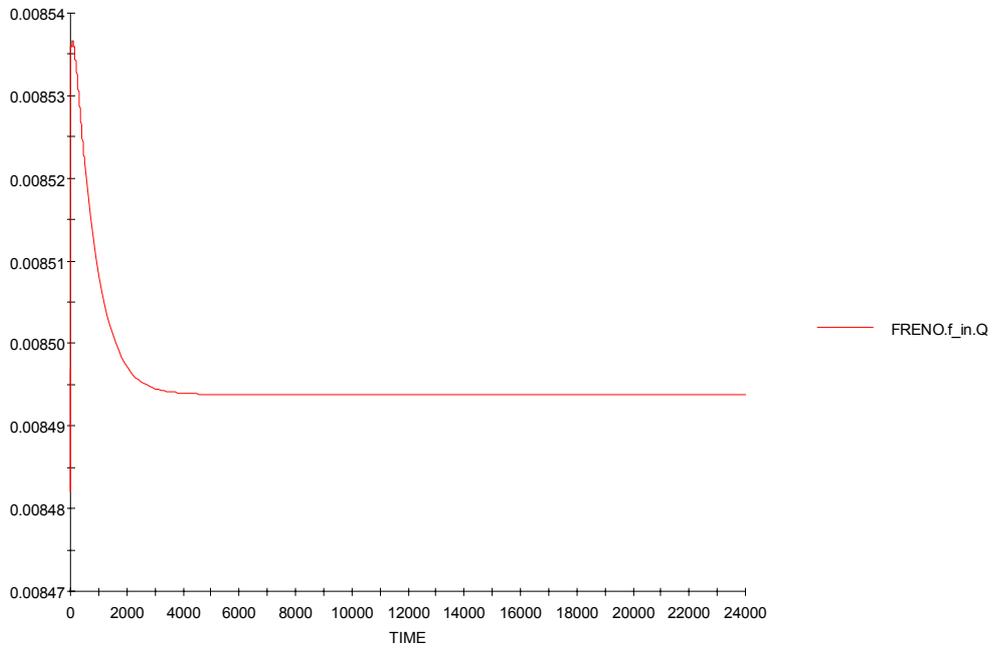
Temperatura de entrada al motor:



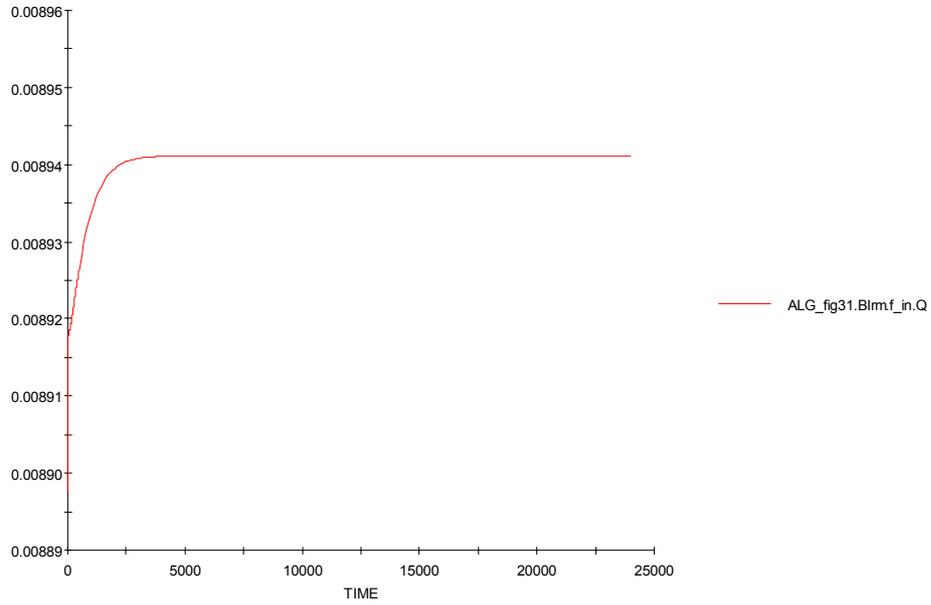
Caudal que da el motor:



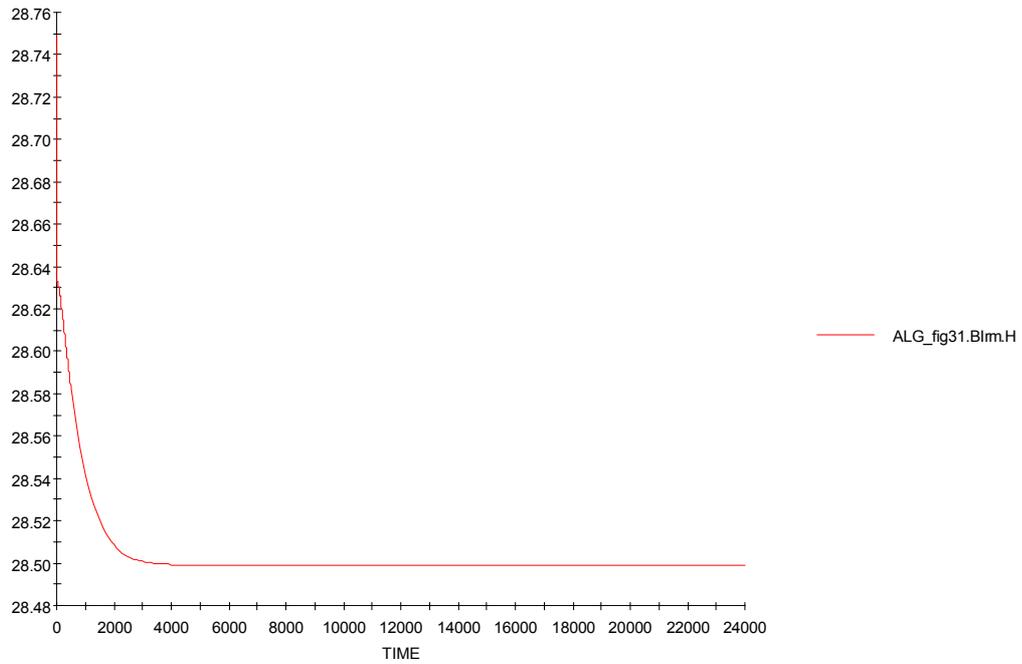
Caudal que entra al freno:



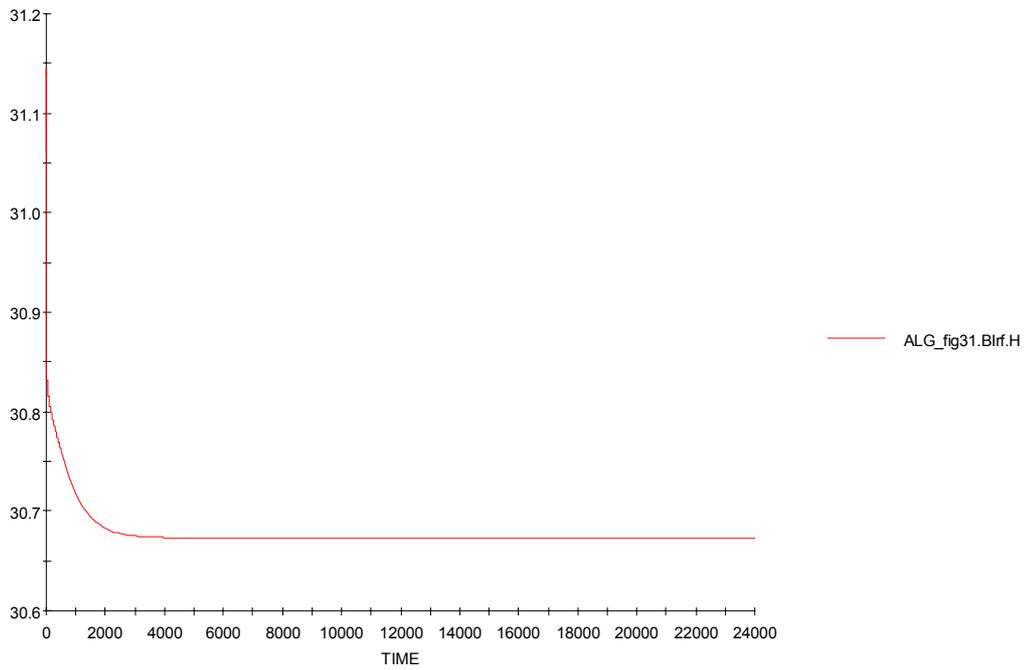
Caudal que da la bomba del circuito del motor:



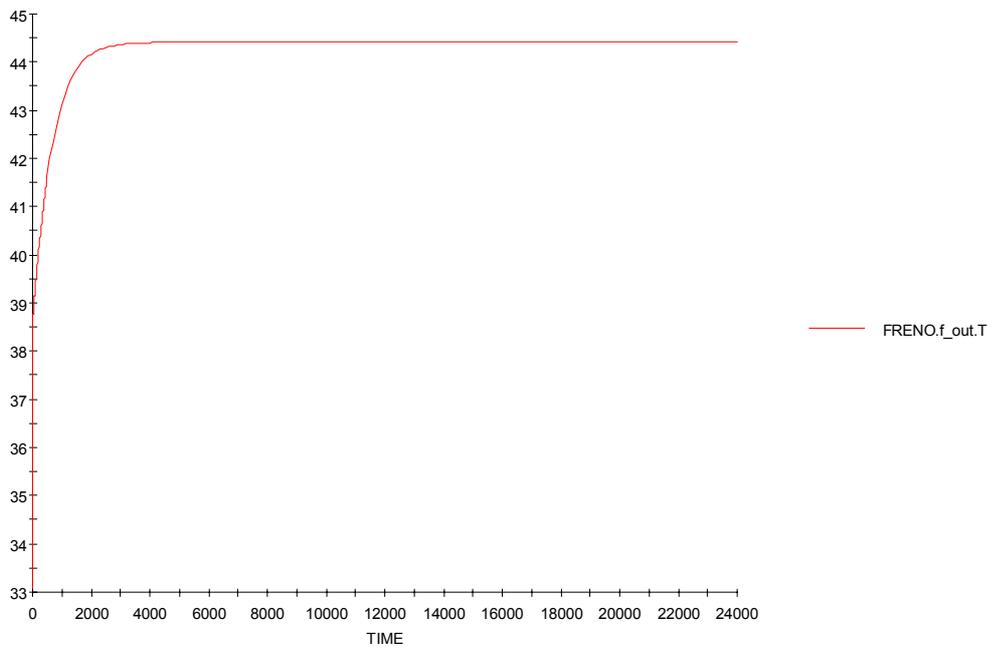
Altura que da la bomba del circuito del motor:



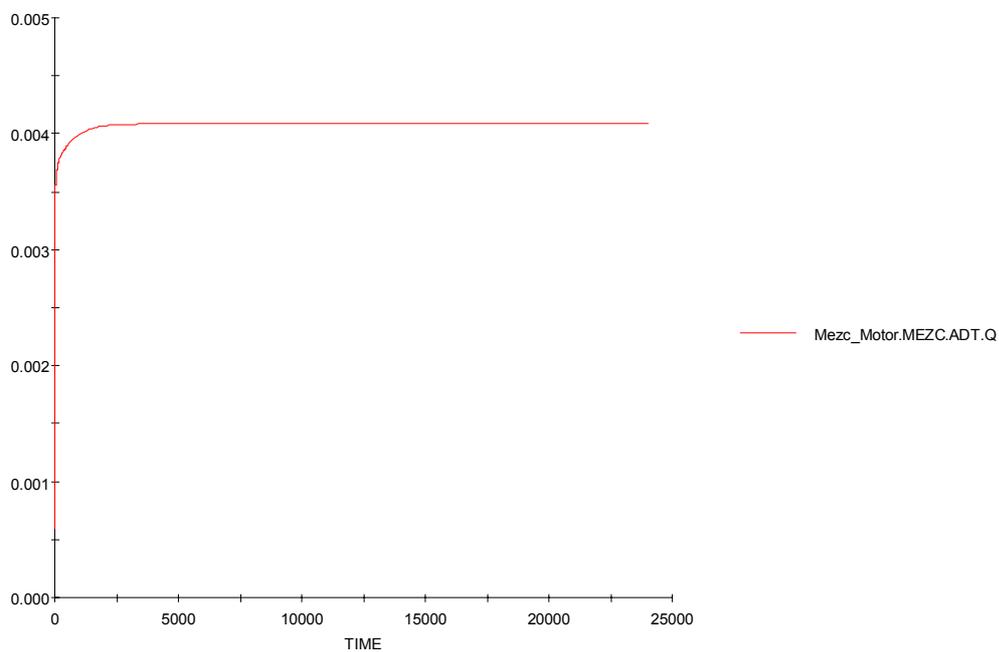
Altura que da la bomba del circuito del freno:



Temperatura a la salida del freno:



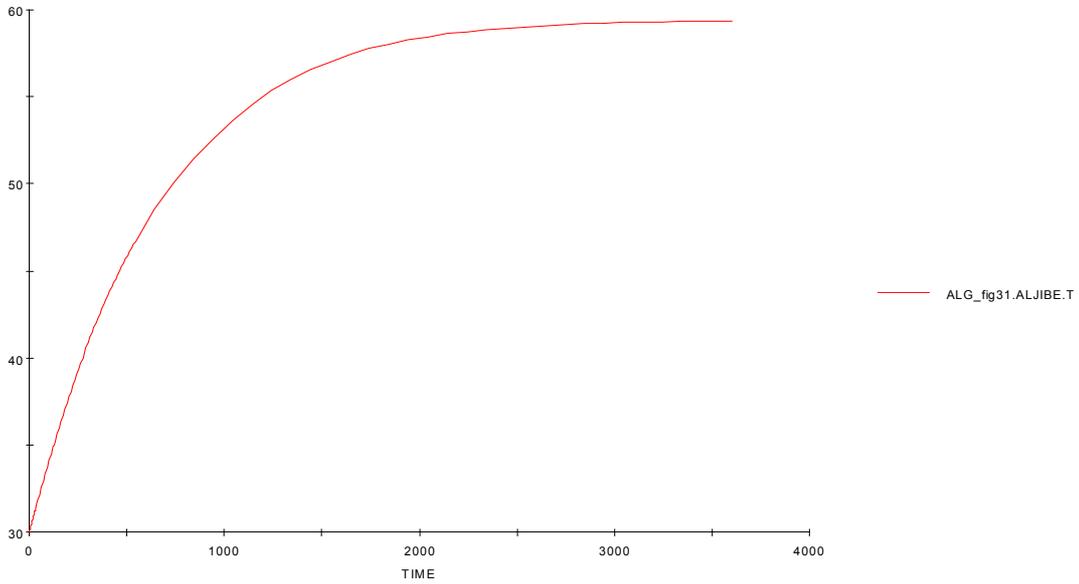
Caudal que entra a refrigerar al mezclador:



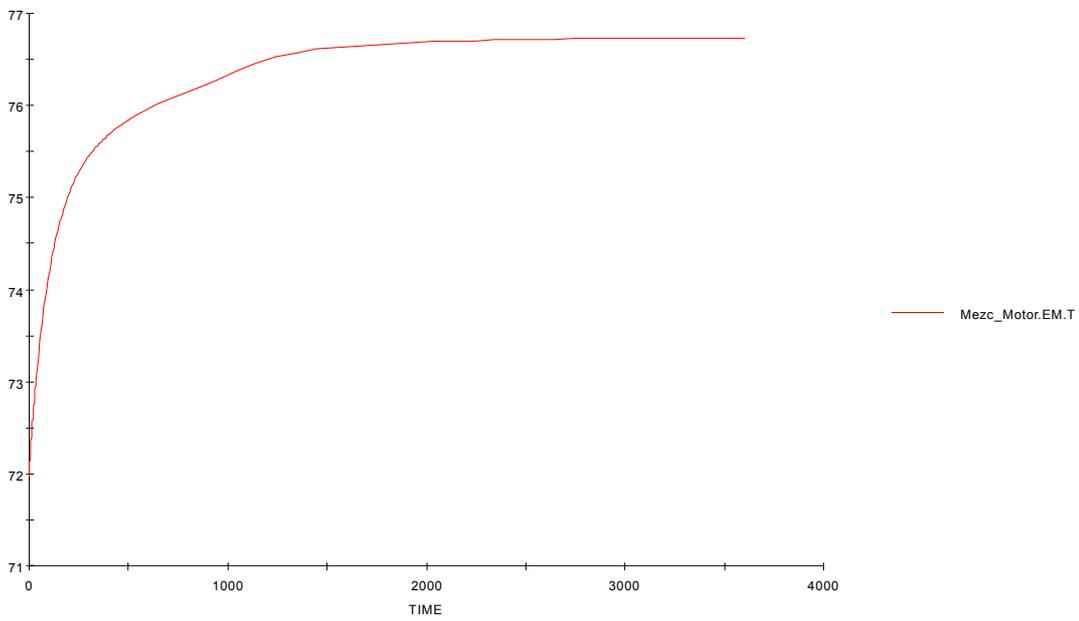
### Potencia Motor: 900 Kw

Evolución de algunas variables desde tiempo cero hasta un tiempo de 1 h (transitorio):

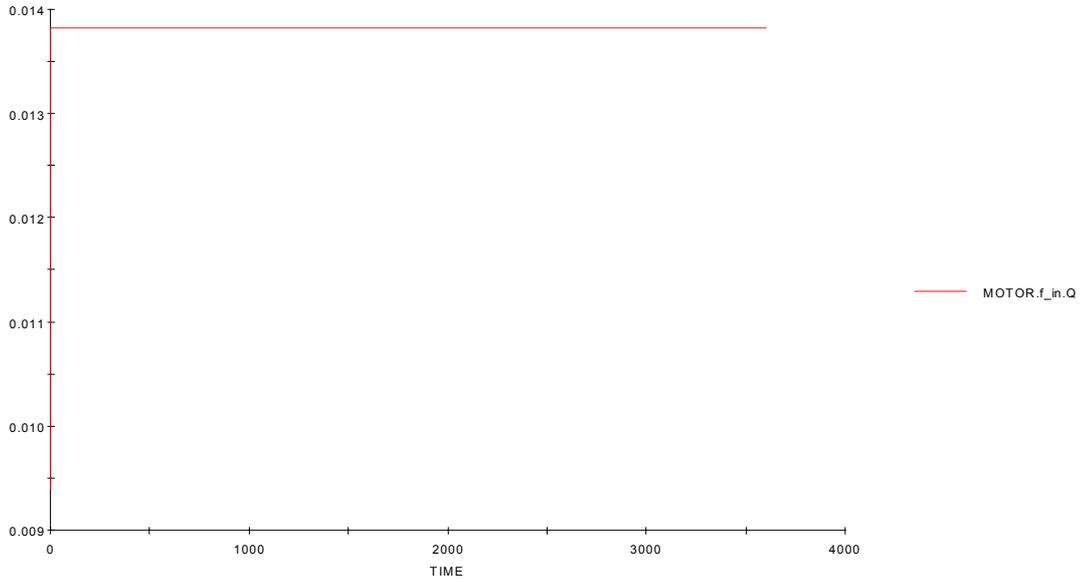
Temperatura del aljibe:



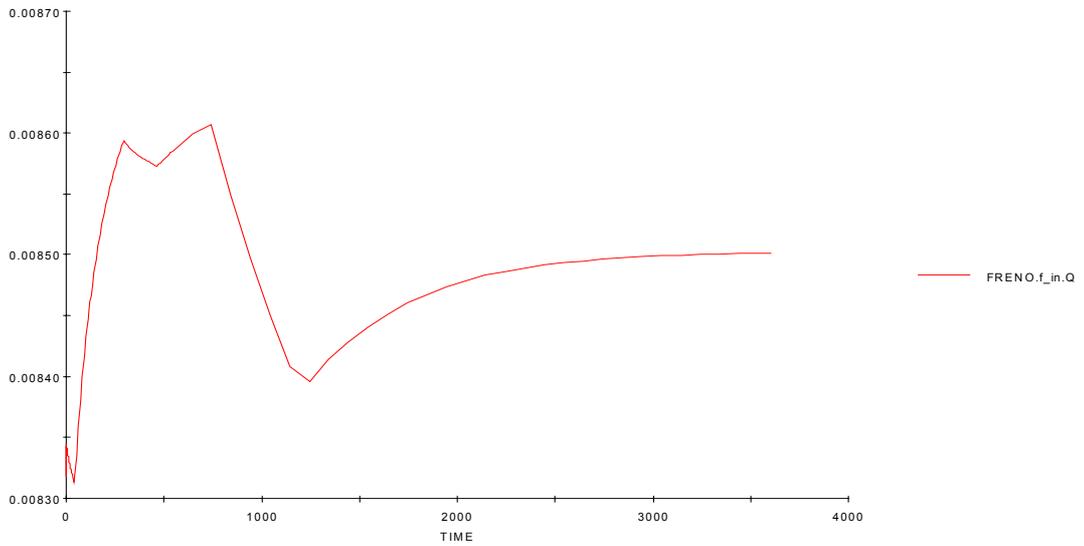
Temperatura de entrada al motor:



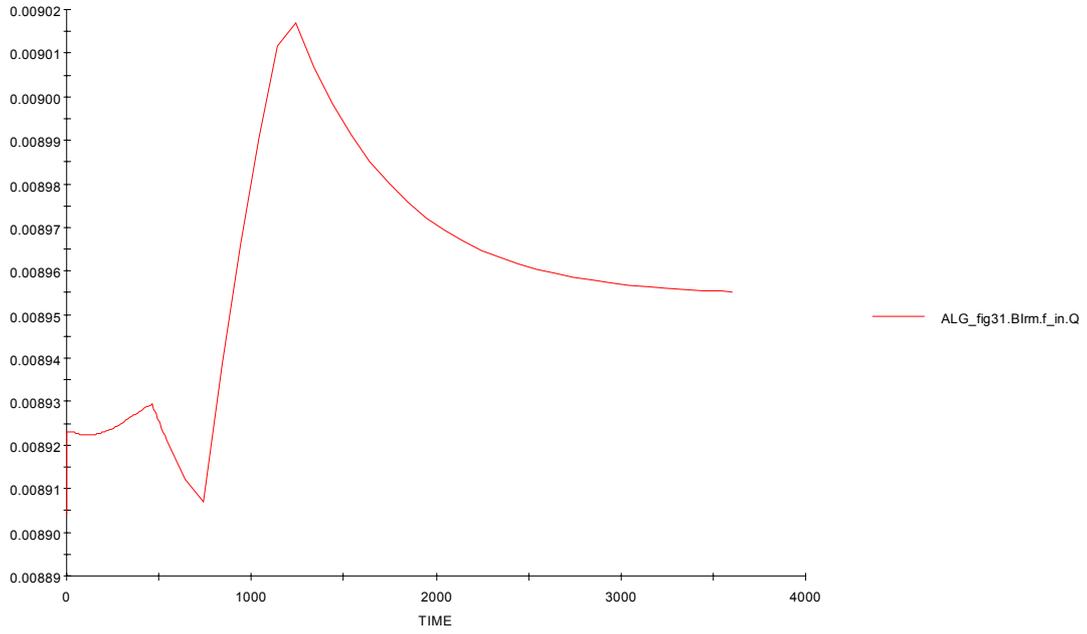
Caudal que circula por el motor:



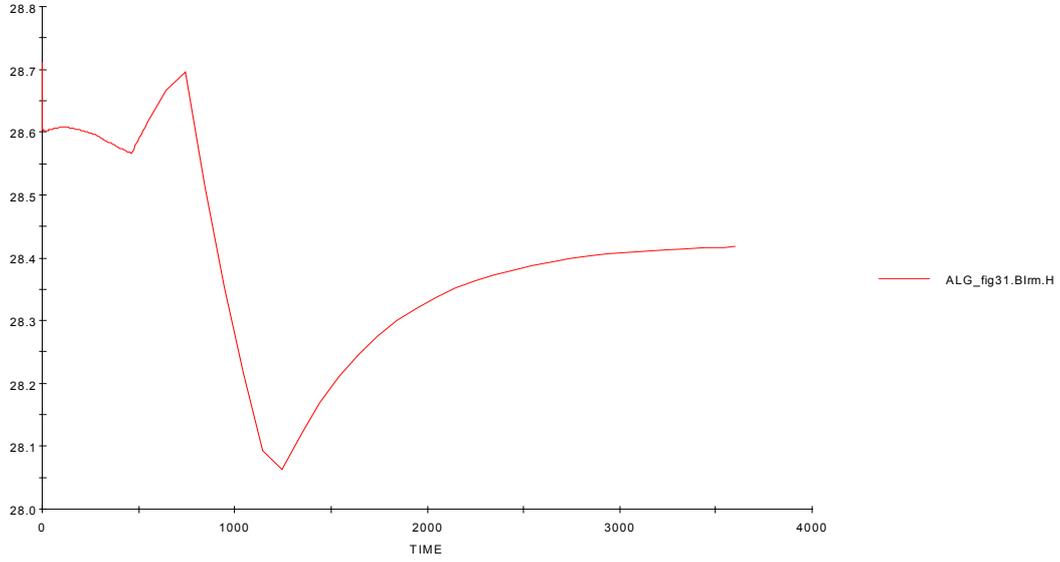
Caudal que circula por el freno:



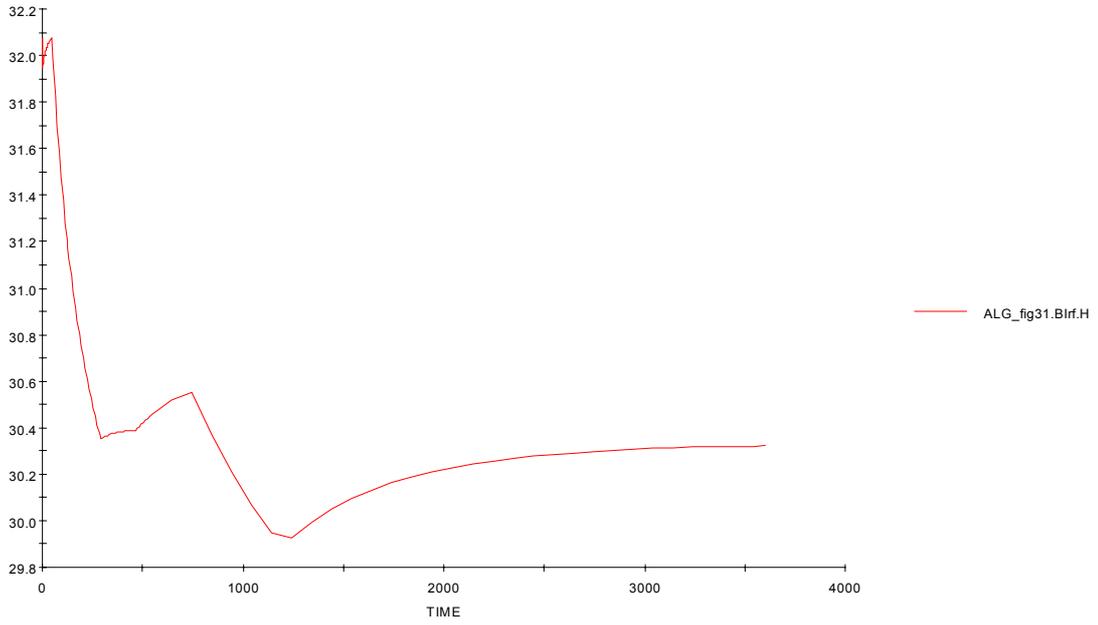
Caudal que da la bomba del circuito del motor:



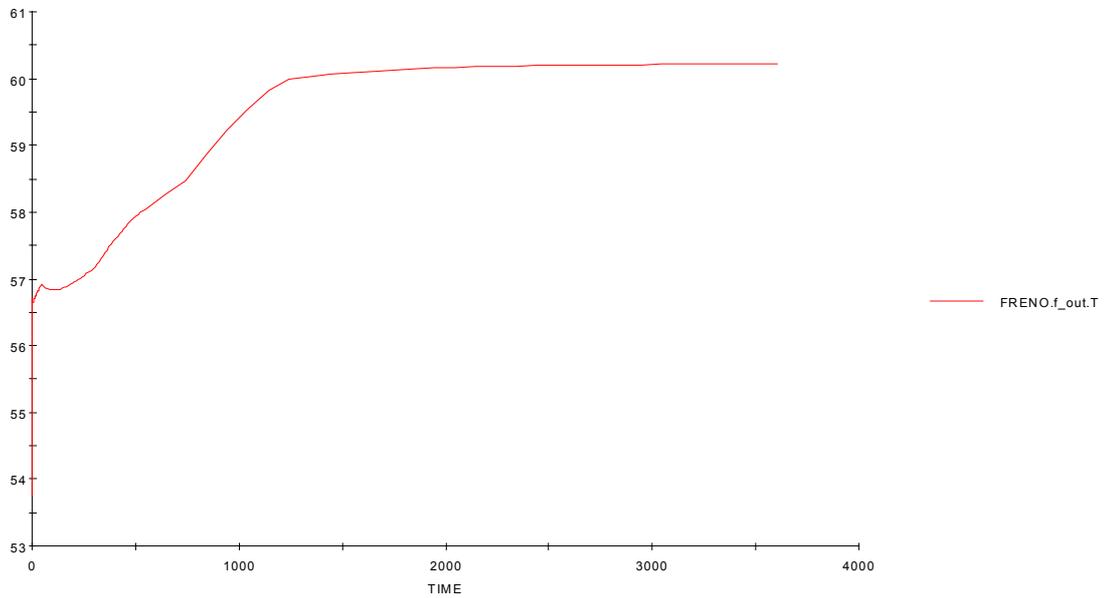
Altura que da la bomba del circuito del motor:



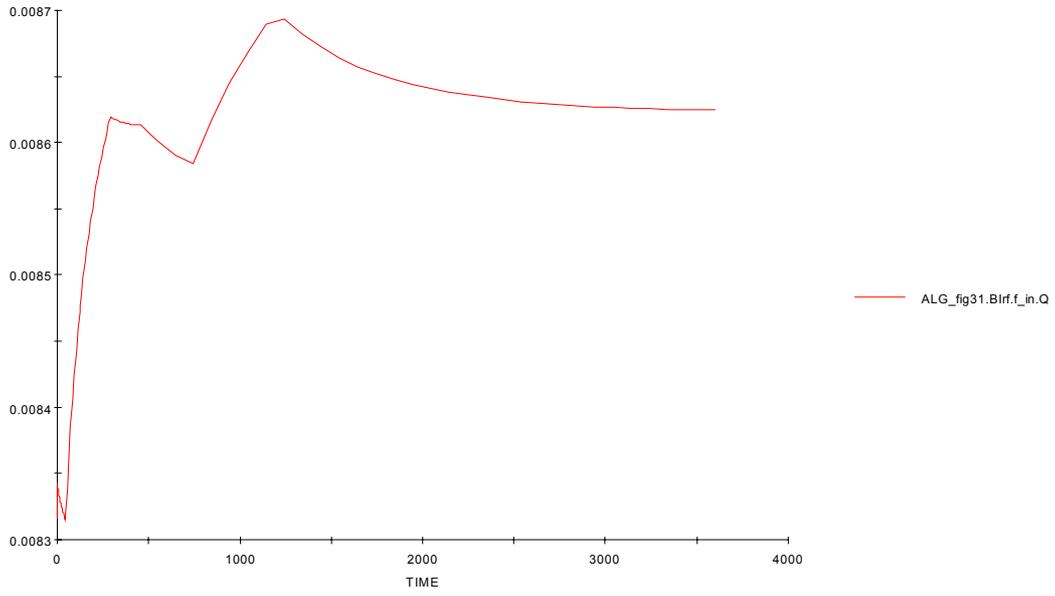
Altura que da la bomba del circuito del freno:



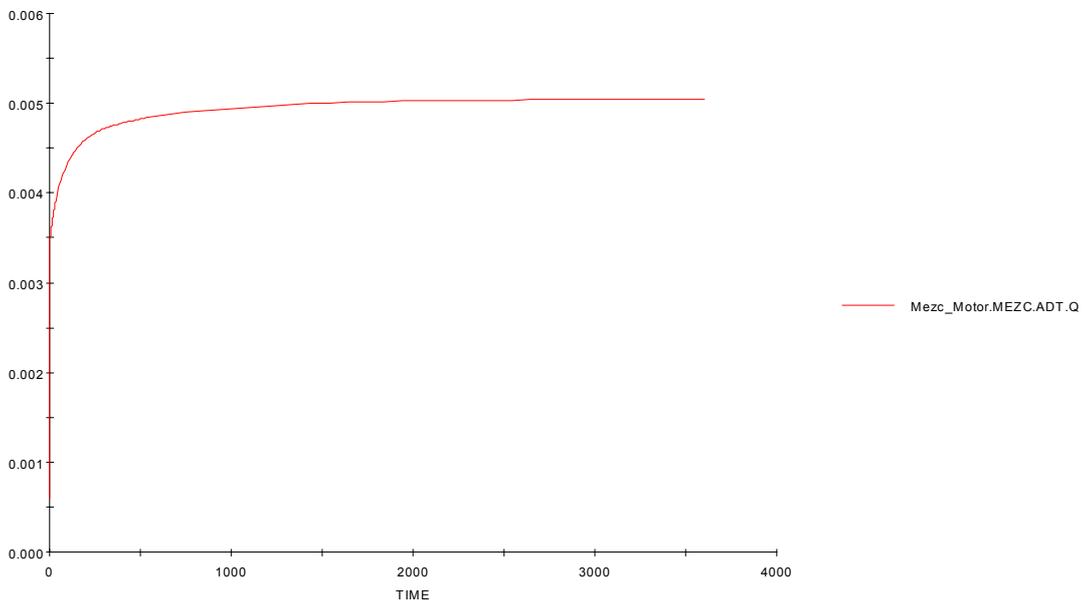
Temperatura a la salida del freno:



Caudal que da la bomba del circuito del freno:

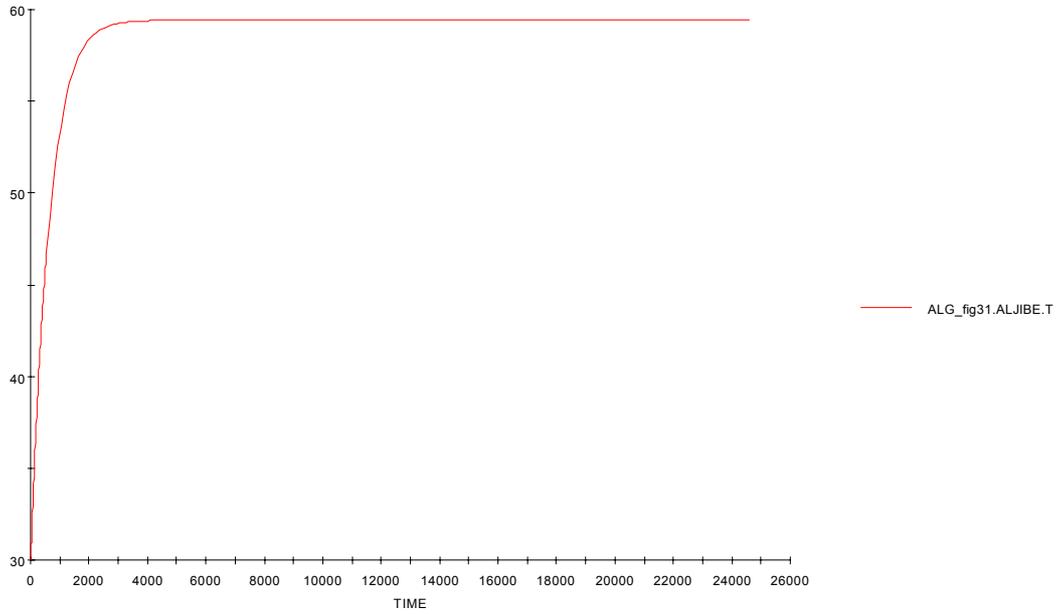


Caudal que entra a refrigerar al mezclador:

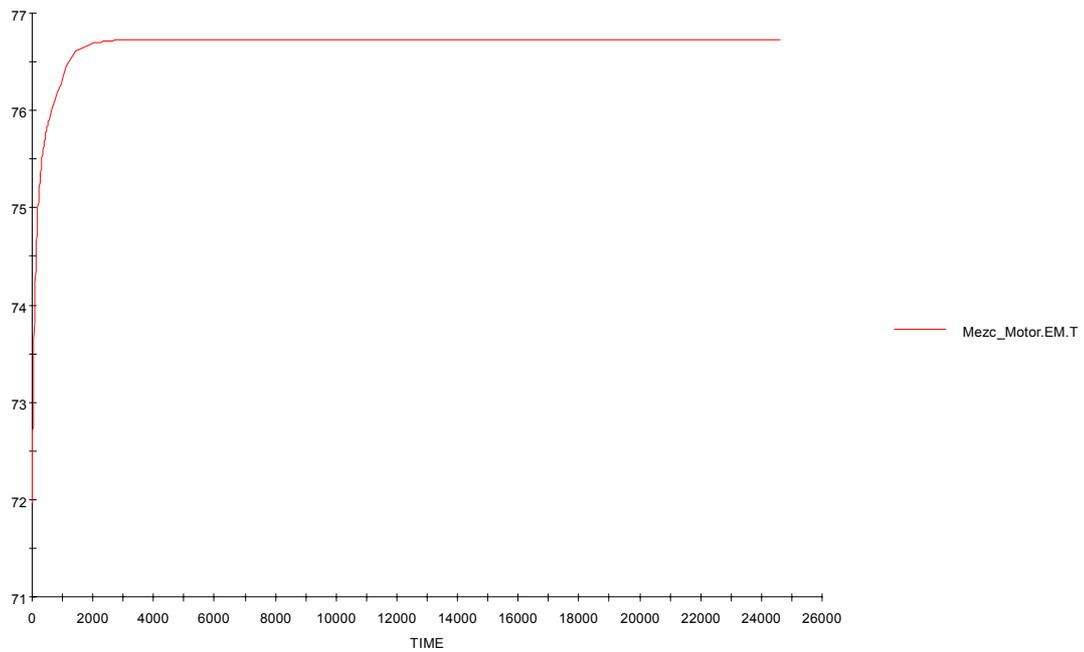


A continuación se muestra la evolución de las variables al dejarlas evolucionar en el tiempo 6 h (para ver el régimen permanente):

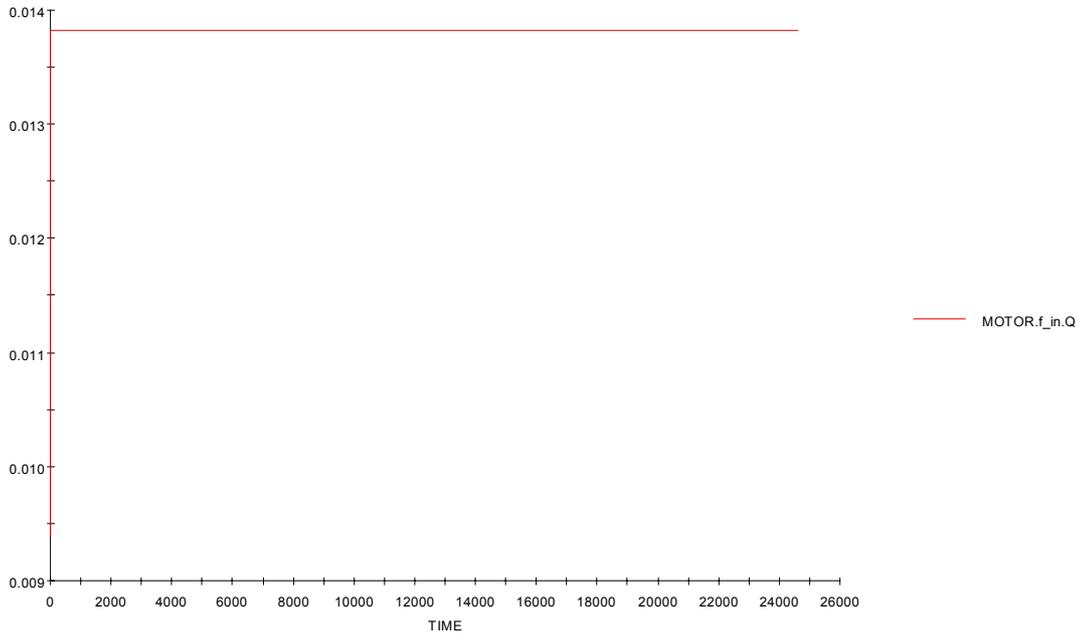
Temperatura del aljibe:



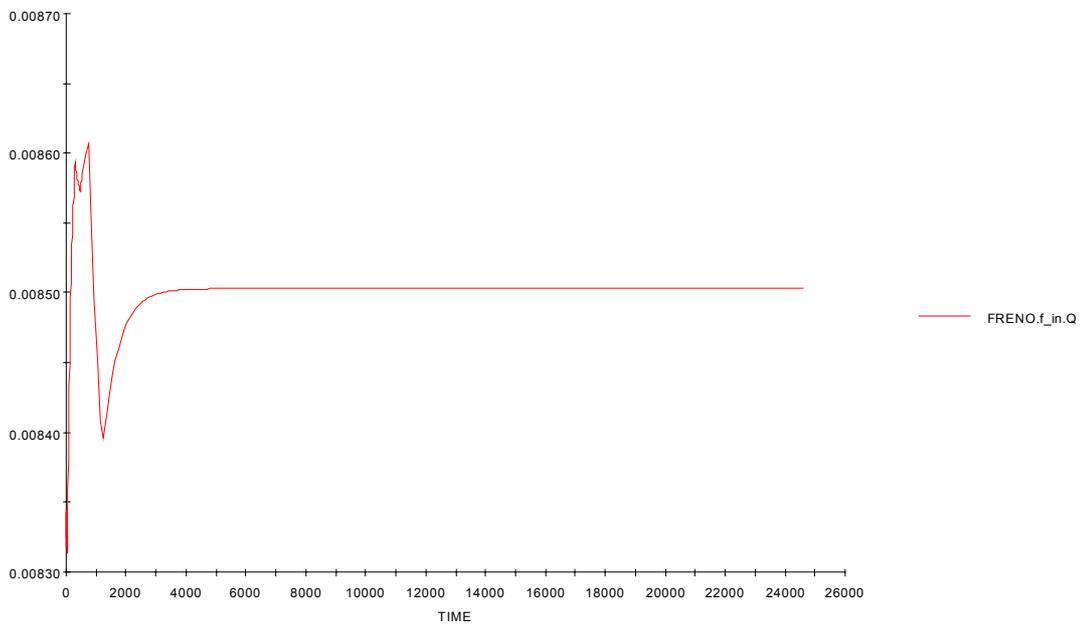
Temperatura de entrada al motor:



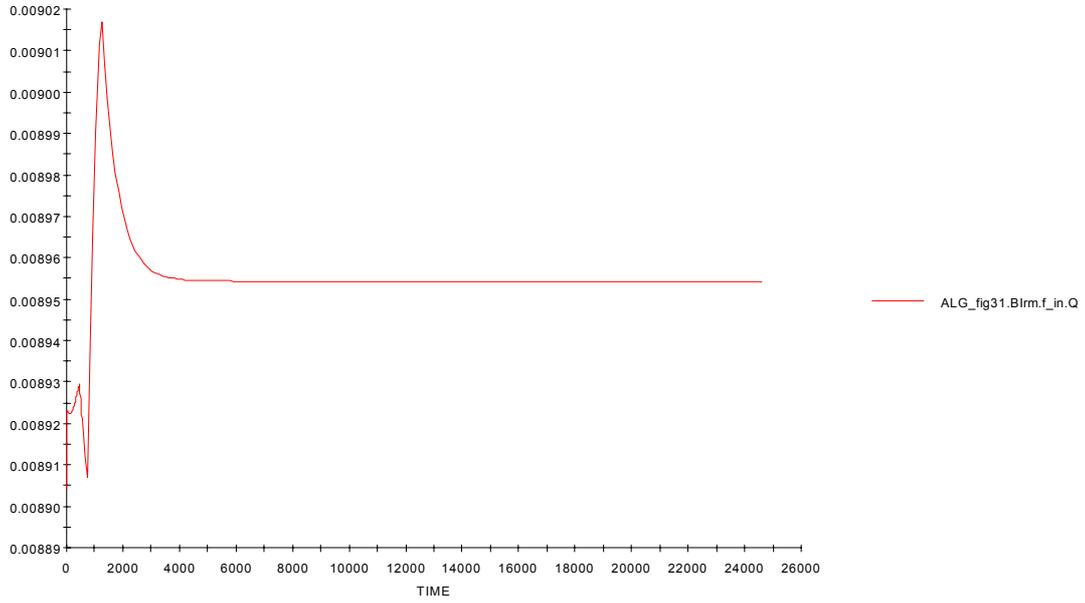
Caudal que circula por el motor:



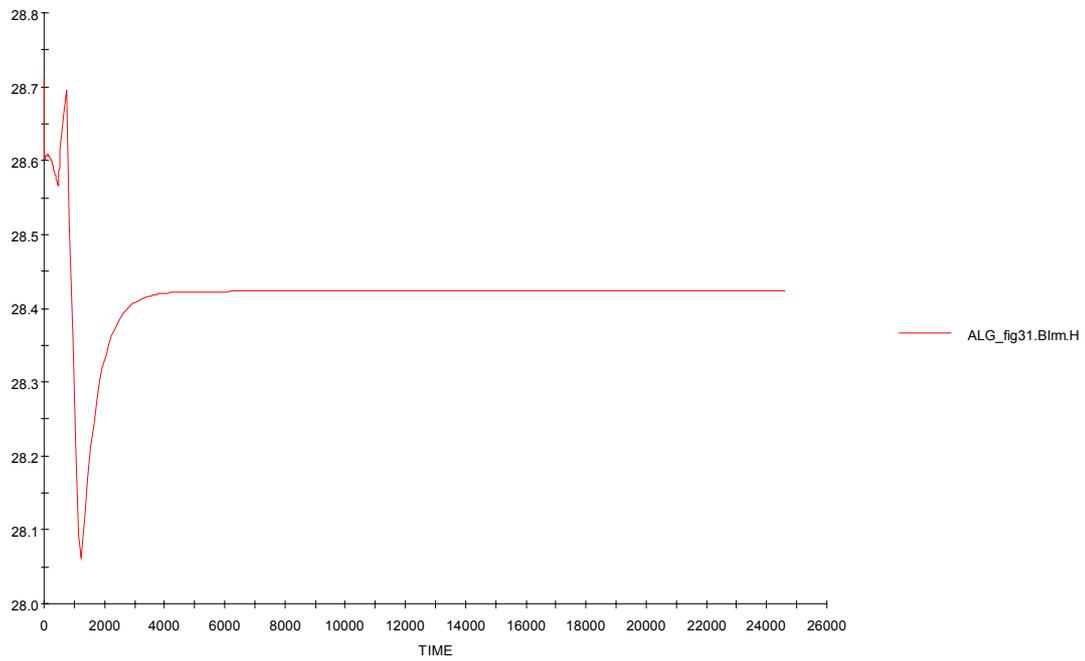
Caudal que circula por el freno:



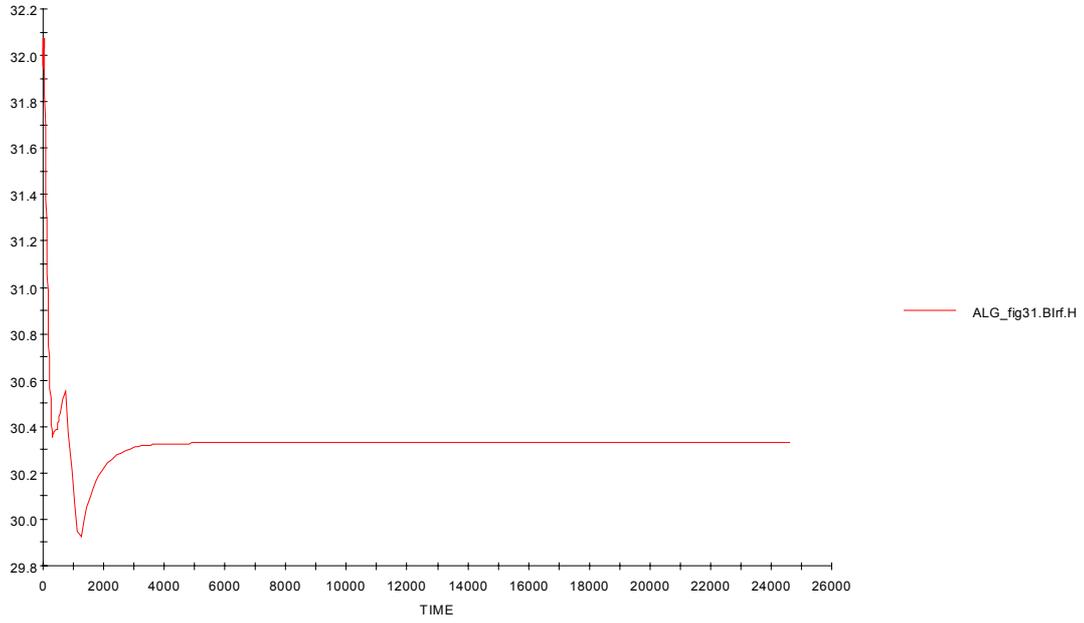
Caudal que circula por la bomba del circuito del motor:



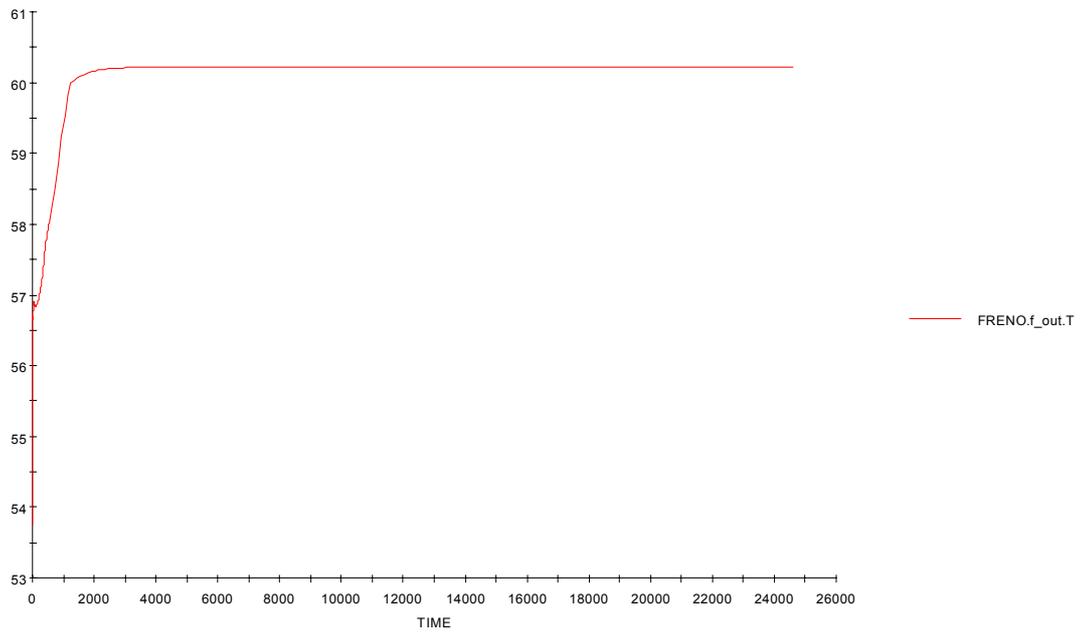
Altura que da la bomba del circuito del motor:



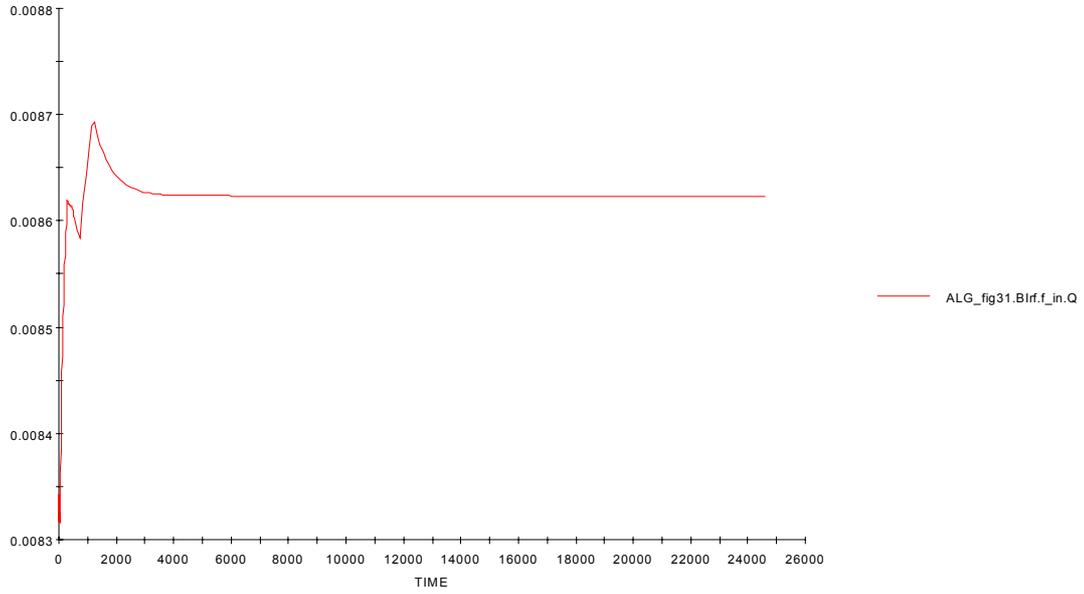
Altura que da la bomba del circuito del freno:



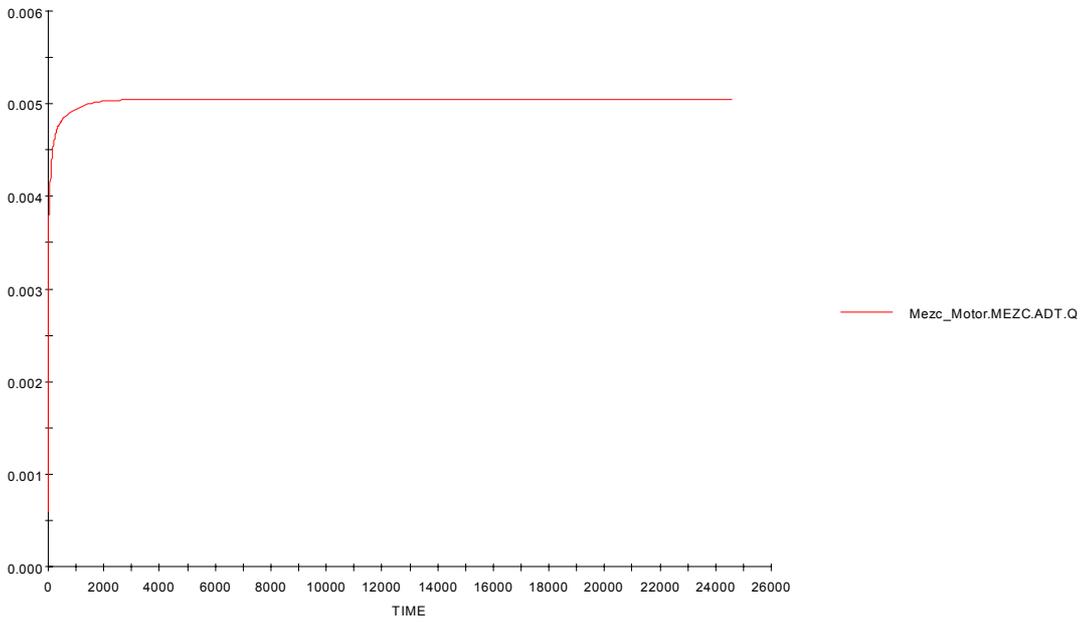
Temperatura de salida del freno:



Caudal que circula por la bomba del circuito del freno:



Caudal que entra a refrigerar el mezclador:



## 7. COMENTARIOS SOBRE EL USO DE ECOSIMPRO Y SMARTSKETCH

La versión 3.0 del programa EcosimPro, primera en comercializarse, nació para los usuarios en Enero de 2000. Desde entonces hasta ahora, Julio de 2001, se han sucedido las versiones 3.1 y la versión 3.2, disponible a partir de Septiembre de 2001. Todo ello indica que se trata de un programa relativamente nuevo y en continua mejora.

Para el proceso de optimización de EcosimPro, los proveedores han creado un foro en Internet de usuarios de EcosimPro, donde se pueden escribir comentarios, dudas, preguntas o problemas por parte tanto de los usuarios como de los proveedores: [ecosim-group.esp@coollist.com](mailto:ecosim-group.esp@coollist.com).

En este foro se han resuelto algunas dudas y otras han quedado para posteriores revisiones del programa. En este punto se pretende dar una visión de todas ellas y las soluciones que requerirían para una posible optimización de EcosimPro. La mayoría de ellas tienen que ver con el proceso de resolución de EcosimPro y el tratamiento de variables y ecuaciones, ya que lo que es la interfaz y la forma de manejar el programa están muy conseguidas.

EcosimPro da errores (mensajes de error) que no explica qué son, de dónde pueden venir o cómo arreglarlo. Este tipo de problemas se promete que serán resueltos en la nueva versión de EcosimPro, EcosimPro Version 3.2 para el caso de experimento estacionario. Si un estado estacionario no converge, EcosimPro generará en el fichero log mucha información útil para seguir los últimos valores de las variables estáticas. Se podrá entonces detectar la fuente de los problemas de no convergencia, ya que se almacenarán los datos justo antes del fallo. En la versión utilizada en este proyecto (versión 3.1) no se facilita esa información, y al producirse un fallo y acudir al fichero log se encontraban datos de las iteraciones anteriores al fallo y no se permitía investigar sobre qué valor de qué variable podía haber producido el problema.

Tras haber trabajado durante bastante tiempo con EcosimPro se ha echado en falta el modo de operación de otros sistemas en el que se pudiera elegir intervalos de solución. Al tratarse de un problema físico, las variables como los caudales de paso no debían tomar valores negativos. Estas variables están presentes en ecuaciones cuadráticas y EcosimPro más de una vez comenzó a resolver por la solución negativa. Ante esos problemas se decidió despejar donde se pudiera la variable en cuestión y guiar el método de resolución hacia los valores esperados.

En relación a lo anterior se debe comentar que, en palabras de personal de la empresa suministradora, “EcosimPro toma la iniciativa, a veces demasiada, de despejar la variable que mejor le convenga. Esto significa que EcosimPro te genera un modelo matemático correcto, pero que quizás no es un modelo físico correcto”. Se intentó por ello guiar los algoritmos de resolución con valores iniciales de la solución esperada. Ello no siempre dio buenos resultados: no evitó que EcosimPro tomara la solución negativa del problema; cambiándolos ligeramente no convergía un problema que antes sí lo hacía.

En vista de la experiencia, se creía que EcosimPro era muy sensible a la forma en que se escribiera una ecuación (un término u otro a un lado u otro de la igualdad). Según el personal de EcosimPro había que volver a intentar guiar el algoritmo de resolución del programa: “EcosimPro no penaliza por poner las variables a un lado u otro. Lo único que intentará siempre será asociar una ecuación  $e1$  a una variable  $v1$ . Esto significa que la variable  $v1$  se calculará en esa ecuación de forma explícita. Habría que restringir la “inteligencia” de EcosimPro e indicarle una variable sea siempre calculada en una determinada ecuación. ¿Se puede poner más inteligencia en EcosimPro para resolver esto automáticamente? Malamente, pues EcosimPro se maneja muy bien con las matemáticas pero de física no sabe nada. Por ejemplo cuando tiene que elegir una variable de tearing no sabe si esa variable va a tener valores peligrosos que provoquen problemas matemáticos (como división por cero).”. En este sentido, en el presente proyecto se han realizado distintas formas de “engañar” al sistema para evitar estas divisiones por cero, cosa bastante probable en el momento en que un caudal deje de pasar por una tubería.

Un problema derivado de las divisiones por cero y de otras causas no aparentes o desconocidas es el cese total del programa y aparición de una pantalla de error del PC en el momento de ejecutar un experimento. Las características de los PC's utilizados a la hora de realizar este proyecto han sido por encima de lo exigido en el manual de instalación de EcosimPro, por lo que no se sabe a qué se debe este problema. Acciones así raras se han sucedido durante la utilización de EcosimPro, como volver a una versión de los archivos anterior a la hora de un problema, sin respetar los archivos guardados y compilados inmediatamente anteriores al cese del programa debido al problema.

## 8. DESARROLLOS Y APLICACIONES FUTURAS

El modelo diseñado en este proyecto permite simular el comportamiento de la instalación de refrigeración del laboratorio en condiciones normales. Sin embargo, aún hay mucho que hacer a partir de este punto, ya que todo modelo puede ser mejorado siempre que sea sólo un modelo y no la realidad. Además, existen otros frentes de trabajo que deben ser completados a partir del desarrollo de este proyecto.

A continuación se explican brevemente los puntos por donde puede ser continuado el trabajo realizado en este proyecto de modelización del sistema de refrigeración del Laboratorio de Motores de la ESI:

- Validación experimental del modelo.

Las conclusiones a las que se ha llegado en esta memoria para establecer la bondad del modelo realizado tienen su base en el conocimiento de la instalación y los requerimientos para los que fue construída de los responsables del Laboratorio. A partir de aquí convendría realizar distintos experimentos reales similares a los expuestos para validar el modelo diseñado. Dicha comprobación no ha podido realizarse dentro de este proyecto por encontrarse la instalación con problemas o fuera de servicio.

- Válvula comandada por temperatura.

La ley de control de temperatura de la válvula comandada por temperatura y que rige el paso de caudal hacia el mezclador en función de una temperatura de consigna de entrada al motor consiste en una determinada hipótesis realizada en función de la opción personal y las posibilidades de convergencia del programa Ecosim. Se probaron distintas leyes de comportamiento que desde el punto de vista físico parecían más acertadas, pero su introducción en el programa daba lugar a la no convergencia de la resolución del problema, así que se quedó la hipótesis que permitía una solución por parte de EcosimPro.

A partir de aquí se abren dos frentes de trabajo futuros:

1. Conseguir, bien por parte del fabricante, bien por pruebas experimentales cuando sea posible en el laboratorio, la ley de control de la válvula. Esta ley podría consistir en una evolución del área de paso o del caudal derivado en función de la temperatura de consigna. Las pérdidas de carga se modelarían en función de que las suministrara también el fabricante ó como un elemento TE más una válvula a la salida de cada rama, y entonces determinar también el ángulo de apertura de dichas válvulas como ley de control.
  2. Ajustar el resolvidor de ecuaciones de forma que admita la ley resultado del punto anterior, ya que siempre no ha sido fácil introducir una determinada ecuación y que el programa resuelva. En este sentido habrá que ejecutar distintos experimentos y poner varios comandos de Ecosim tal que se guíe la resolución del problema, converja y dé resultados correctos.
- Lazo de combustible.

Para obtener un modelo completo del laboratorio de Motores y conseguir el objetivo último de tener un simulador o laboratorio virtual es necesario modelar la instalación de combustible. La ventaja está, por una vez, en la propia herramienta de trabajo EcosimPro, ya que muchos de los elementos modelados para la instalación de refrigeración permiten por la propia filosofía del programa ser reutilizados. Elementos como los puertos fluid, fluidA, P\_control, o componentes como Tuberia, V\_mar, V\_comp o Codo, se utilizarían directamente y sólo habría que ensamblarlos y definir sus características según la geometría de la instalación. Una vez más, el trabajo de modelado es fácil. Quedará entonces que se llegue a la resolución matemática del problema por parte de Ecosim, y en este sentido utilizar todas las herramientas posibles para conseguir la convergencia del sistema.

- Incluir la totalidad de las celdas simultáneamente.

El componente figura\_3\_5 está definido cuatro veces, una para cada celda, según las dimensiones de los elementos. Hasta ahora, EcosimPro no se atrevía a resolver el sistema con las cuatro celdas conectadas. El modelo de cada una de ellas ya está incluido en este proyecto y corre a cargo de los responsables de Ecosim el hacer de su programa una herramienta más potente. Como se ha venido comentando a lo largo de este proyecto el resolvidor de ecuaciones de Ecosim no es suficiente para resolver grandes sistemas.

- Afino general del modelo.

Aunque todas las hipótesis tomadas en la realización del modelo han sido racionalizadas existen muchas de ellas que pueden afinarse más en función del conocimiento de más datos de la instalación, como son los de la torre de refrigeración o el intercambiador del circuito del freno, o en función de que Ecosim acepte otro tipo de ecuaciones, resuelva y dé los resultados esperados.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- “Refrigeración y acondicionamiento de aire”. Stoecker.
- “Principios de refrigeración”. Roy J. Dossat.
- “Manuales Técnicos y de Instrucción para conservación de energía”. Tomo 8. IDEA.
- “Manual del ingeniero químico”. John H. Perry
- “Flow resistance: A design guide for engineers”. Erwin Fried, I.E. Idelchik.
- “Operación, control y mantenimiento del laboratorio de ensayos de máquinas y motores térmicos de la E.S.I. de Sevilla”. Proyecto Fin de Carrera. Francisco Javier Ridao González

## **ANEXO I. USO DE LA SIMULACIÓN.**

Los experimentos son desarrollados sobre modelos de componentes ya existentes con sus condiciones límite (particiones) ya definidas.

Se definen distintos experimentos sobre un modelo físico por los distintos valores numéricos asociados a las condiciones límite predefinidas, los datos o los resultados y la forma en que se hace.

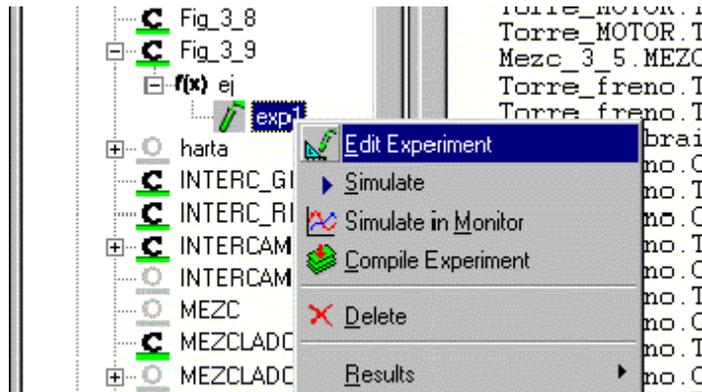
A continuación se desarrollan unos puntos acerca de cómo utilizar la simulación, pero descritos de forma general ya que es el modo habitual de trabajo con EcosimPro y que puede ser útil a la hora de trabajar y modificar cualquier aspecto de esta simulación. Se describirán los siguientes aspectos:

- Edición del experimento
- Compilación del experimento
- Ejecución del experimento en la ventana principal de EcosimPro
- Ejecución del experimento desde el EcoMonitor.

El experimento **exp 1** del componente **Fig\_3\_9** que aparece en todas las siguientes imágenes corresponde a la modelización del sistema de refrigeración del Laboratorio de Motores, objetivo de este proyecto.

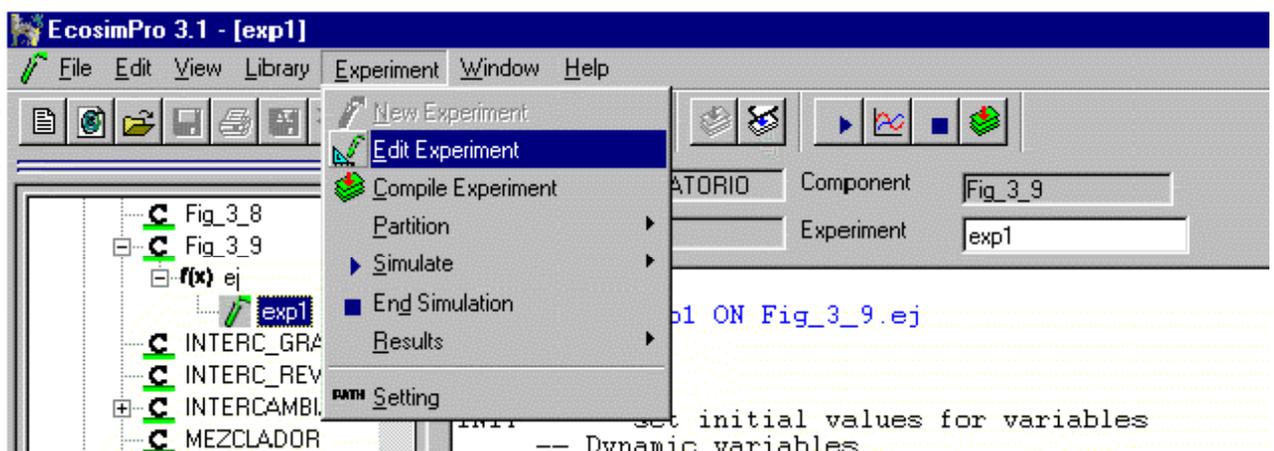
## I.I. EDICIÓN DE UN EXPERIMENTO.

Para editar el experimento realizado en este proyecto, hay que ir al área **Workspace Area/Experiment** y picar el experimento que aparece. Hacer doble click en el botón derecho y luego picar el comando **Edit**:



Aparece un menú desplegable de contexto en el que se debe elegir el comando **Edit Experiment**, con el que se edita el experimento seleccionado.

Alternativamente, se puede editar el experimento picando en el comando Experiment>Edit.

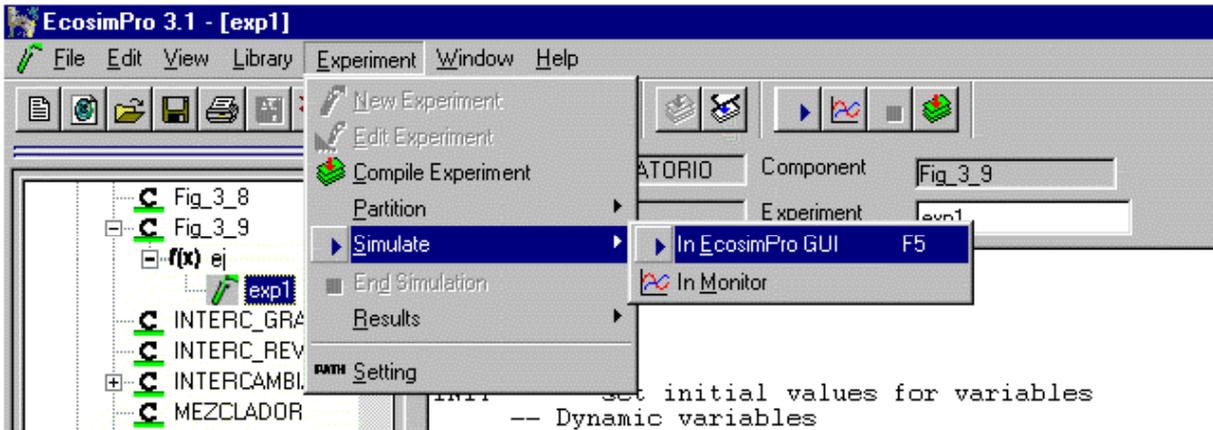


Una vez que se ha acabado de editar el experimento, se puede salvar el fichero creado para ese experimento picando en **File>Save** o en el botón **Save** de la barra de herramientas **Standard Toolbar**.

## I.II. COMPILAR UN EXPERIMENTO.

Cuando el usuario corre una simulación EcosimPro compilará, realizará el link y ejecutará automáticamente el experimento. Si existiera algún error durante la compilación, la ventana **Outputs Area/Compile** desplegará un mensaje de error y aparecerá la ventana de error **Compilation Error** con una indicación del fichero donde se ha dado el error.

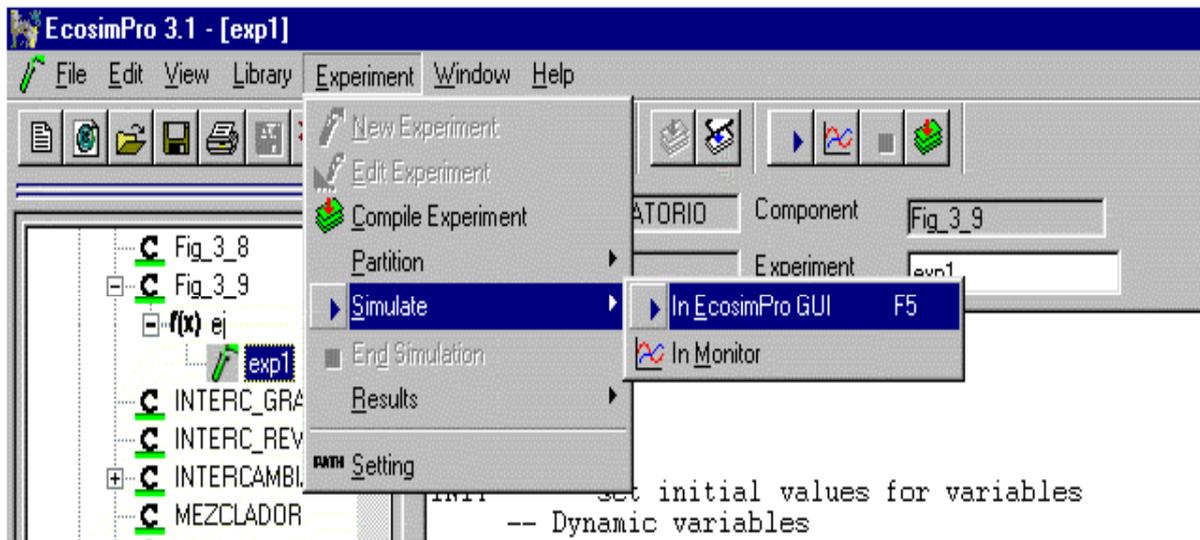
Si se trata de un error de sintaxis de EL, **Outputs Area/Compile** despliega la información requerida para localizar el error (número de línea, número de posición dentro de la línea, elementos de lenguaje esperados, etc). Para corregir cualquier error de sintaxis hay que mover el cursor a la línea indicada por **Outputs Area/Compile** y hacer doble click. La línea donde se encuentra el error se sobresaltará en el área **Editing Area**.



Si la compilación es correcta, aparecerá el mensaje **Compilation OK** en **Outputs Area/Compile**.

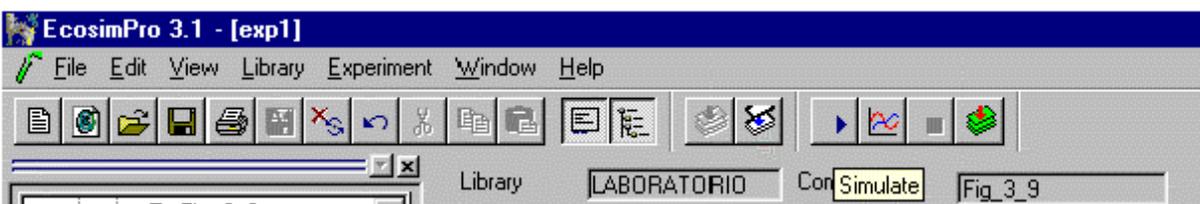
### I.III. EJECUTAR UN EXPERIMENTO EN LA INTERFAZ DE ECOSIMPRO.

Para ejecutar un experimento hay que ir al área **Workspace Area/Experiment** y picar en el experimento que se quiere ejecutar. Hacer doble click (aparecerá un menú de contexto) y luego picar en el comando **Simulate**.



Alternativamente puede picarse en el comando **Experiment>Simulate>In EcosimPro GUI**.

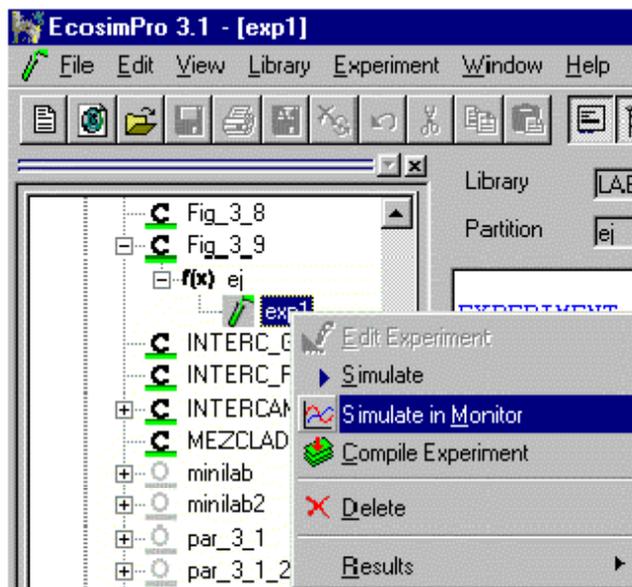
Otra opción es picar en el botón de simulación de la barra de herramientas **Launch a simulation without simulation monitor**.



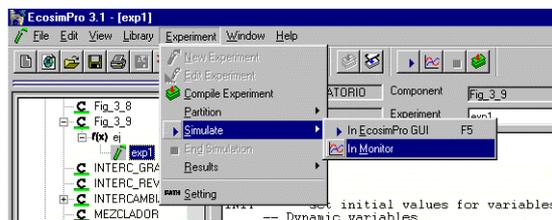


## I.IV. EJECUTAR UN EXPERIMENTO EN EL MONITOR DE EXPERIMENTOS.

Como se ha explicado anteriormente, para ejecutar un experimento hay que ir al área **Workspace Area/Experiment** y picar el experimento. Picar con el botón derecho (se despliega el menú de contexto) y luego en el comando **Simulate in Monitor**.



Alternativamente puede picarse en el comando **Experiment>Simulate>In Monitor**.



Otra forma de hacer esto es picar en el botón de la barra de herramientas Build/Experiment toolbar **Launch a simulation in the simulation monitor**.



## ANEXO II. COMPONENTES GENÉRICOS

- **Componente *Contorno*.**

### Archivo EL:

--CONDICIONES DE CONTORNO

CONST REAL  $T_{ext} = 30$  "Temperatura exterior (°C)"

CONST REAL  $p_{ext} = 100000$  "presión atmosférica (N/m<sup>2</sup>)"

CONST REAL  $g = 9.81$  "aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)"

CONST REAL  $PI = 3.14159265$  "NUMERO PI"

CONST REAL  $e = 2.7182818$  "NUMERO e"

CONST REAL  $fi_{ext} = .7$  "humedad rel (tanto x 1)"

- **Componente *Tablas*:**

Archivo EL

-----

-----TABLA DE FRICCION PARA TUBERÍA RECTA: *fric2* (*Re*>2000) y *fric1* (*Re*<2000)

-----

TABLE\_1D *fric1*={  
 {100,200,300,400,500,600,700,800,900,1000,1100,1200,1300,1400,1500,1600,1700,1800,1900,2000},\  
 {0.640,0.320,0.213,0.16,0.128,0.107,0.092,0.080,0.071,0.064,0.058,0.053,0.049,0.046,0.043,0.04,0.038,0.036,0.034,0.032} }

TABLE\_2D *fric2* = {  
 {0.05,0.04,0.03,0.02,0.015,0.01,0.008,0.006,0.004,0.002,0.001,0.0008,0.0006,0.0004,0.0002,0.0001,0.00005},\  
 {2.00E+03,3.00E+03,4.00E+03,6.00E+03,1.00E+04,2.00E+04,4.00E+04,6.00E+04,1.00E+05,2.00E+05,4.00E+05,6.00E+05,1.00E+06,2.00E+06,4.00E+06,6.00E+06,1.00E+07,2.00E+07,1.00E+08},\  
 {{.032,0.052,0.06,0.063,0.069,0.072,0.072,0.072,0.072,0.072,0.072,0.072,0.072,0.072,0.072,0.072,0.072,0.072},\  
 {.032,0.044,0.052,0.055,0.06,0.065,0.065,0.065,0.065,0.065,0.065,0.065,0.065,0.065,0.065,0.065,0.065,0.065},\  
 {.032,0.04,0.044,0.046,0.05,0.056,0.057,0.057,0.057,0.057,0.057,0.057,0.057,0.057,0.057,0.057,0.057},\  
 {.032,0.04,0.04,0.041,0.042,0.044,0.048,0.049,0.049,0.049,0.049,0.049,0.049,0.049,0.049,0.049,0.049},\  
 {.032,0.04,0.04,0.038,0.037,0.039,0.042,0.044,0.044,0.044,0.044,0.044,0.044,0.044,0.044,0.044},\  
 {.032,0.04,0.04,0.038,0.033,0.032,0.035,0.036,0.038,0.038,0.038,0.038,0.038,0.038,0.038,0.038},\  
 {.032,0.04,0.04,0.038,0.033,0.030,0.032,0.033,0.035,0.035,0.035,0.035,0.035,0.035,0.035,0.035},

```
{.032,0.04,0.04,0.038,0.033,0.028,0.028,0.029,0.030,0.032,0.032,0.032,0.032,0.032,0.032,0.032,0.032,0.032},\
{.032,0.04,0.04,0.038,0.033,0.027,0.025,0.025,0.026,0.028,0.028,0.028,0.028,0.028,0.028,0.028,0.028,0.028},\
{.032,0.04,0.04,0.038,0.033,0.027,0.023,0.021,0.021,0.021,0.022,0.023,0.023,0.023,0.023,0.023,0.023,0.023},\
{.032,0.04,0.04,0.038,0.033,0.027,0.023,0.021,0.018,0.017,0.018,0.018,0.020,0.020,0.020,0.020,0.020,0.020},\
{.032,0.04,0.04,0.038,0.033,0.027,0.023,0.021,0.018,0.016,0.016,0.017,0.018,0.019,0.019,0.019,0.019,0.019},\
{.032,0.04,0.04,0.038,0.033,0.027,0.023,0.021,0.018,0.016,0.015,0.016,0.017,0.017,0.017,0.017,0.017},\
{.032,0.04,0.04,0.038,0.033,0.027,0.023,0.021,0.018,0.016,0.014,0.014,0.014,0.015,0.016,0.016,0.016,0.016},\
{.032,0.04,0.04,0.038,0.033,0.027,0.023,0.021,0.018,0.016,0.014,0.013,0.012,0.012,0.013,0.014,0.014,0.014},\
{.032,0.04,0.04,0.038,0.033,0.027,0.023,0.021,0.018,0.016,0.014,0.013,0.012,0.011,0.011,0.011,0.012,0.012},\
{.032,0.04,0.04,0.038,0.033,0.027,0.023,0.021,0.018,0.016,0.014,0.013,0.012,0.011,0.010,0.010,0.010,0.011}}}
```

-----  
 -----*TABLA DE FRICCION PARA TUBOS DE GOMA*  
 -----

```
TABLE_ID          lambda_tubo_goma          =          {
{4000,6000,10000,20000,40000,60000,100000,200000},\
{0.057,0.052,0.046,0.038,0.031,0.028,0.025,0.02}}
```



{4193,999.8,0.001308,0.000001308,0.5820,9.42},\  
 {4187,999.2,0.001139,0.00000114,0.5911,8.07},\  
 {4182,998.3,0.001003,0.000001004,0.5996,6.99},\  
 {4180,997.1,0.0008908,8.933E-07,0.6076,6.13},\  
 {4180,995.7,0.0007978,8.012E-07,0.6150,5.42},\  
 {4179,994.1,0.0007196,7.238E-07,0.6221,4.83},\  
 {4179,992.3,0.0006531,6.582E-07,0.6286,4.34},\  
 {4182,990.2,0.0005962,6.021E-07,0.6347,3.93},\  
 {4182,998,0.0005471,5.537E-07,0.6405,3.57},\  
 {4184,958.7,0.0005043,5.116E-07,0.6458,3.27},\  
 {4186,983.1,0.0004668,4.748E-07,0.6507,3},\  
 {4187,980.5,0.0004338,4.424E-07,0.6553,2.77},\  
 {4191,977.7,0.0004044,4.137E-07,0.6594,2.57},\  
 {4191,974.7,0.0003783,3.881E-07,0.6633,2.39},\  
 {4195,971.6,0.000355,3.653E-07,0.6668,2.23},\  
 {4201,968.4,0.0003339,0.000000448,0.6699,2.09},\  
 {4203,965.1,0.000315,3.264E-07,0.6727,1.97},\  
 {4210,961.7,0.0002978,3.097E-07,0.6753,1.86},\  
 {4215,958.1,0.0002822,2.945E-07,0.6775,1.76},\  
 {4246,942.8,0.0002321,2.461E-07,0.6833,1.44},\  
 {4282,925.9,0.0001961,2.118E-07,0.6845,1.23},\  
 {4339,907.3,0.0001695,1.869E-07,0.6815,1.08},\  
 {4411,886.9,0.0001494,1.684E-07,0.6745,0.98},\  
 {4498,864.7,0.0001336,1.545E-07,0.6634,0.91},\  
 {4608,840.4,0.000121,1.439E-07,0.6483,0.86},\  
 {4770,813.6,0.0001105,1.358E-07,0.6292,0.84},\  
 {4991,783.9,0.0001015,1.295E-07,0.6059,0.84},\  
 {5294,750.5,0.0000934,1.245E-07,0.5780,0.86},\  
 {5758,712.2,0.0000858,1.205E-07,0.5450,0.91},\  
 {6566,666.9,0.0000783,1.174E-07,0.5063,1.02},\  
 {8234,610.2,0.0000702,1.151E-07,0.4611,1.25},\  
 {16138,526.2,0.00006,1.139E-07,0.4115,2.35}}

-----  
 -----*TABLA DE PROPIEDADES DEL AIRE: props*-----  
 -----

- 1:  $c_p$  (J/kg °C)
- 2:  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>)
- 3:  $\mu$  (kg/m s)
- 4:  $\nu$  (m<sup>2</sup>/s)
- 5:  $k$  (W/m °C)
- 6:  $Pr$  (adim)

TABLE\_2D props2 = {{0,10,20,30,40,50,60,70,80,90},\|  
 {1,2,3,4,5,6},\|  
 {{1005.7,1.2923,17.2E-6,13.31E-6,24.08E-3,.718},\|  
 {1005.8,1.2467,17.69E-6,14.191E-6,24.87E-3,.716},\|  
 {1006.1,1.2042,18.17E-6,15.09E-6,25.64E-3,.713},\|  
 {1006.4,1.1644,18.65E-6,16.01E-6,26.01E-3,.712},\|  
 {1006.8,1.1273,19.11E-6,16.96E-6,27.11E-3,.71},\|  
 {1007.4,1.0924,19.57E-6,17.92E-6,27.81E-3,.709},\|  
 {1008,1.0596,20.03E-6,18.9E-6,28.52E-3,.708},\|  
 {1008.7,1.0287,20.47E-6,19.9E-6,29.22E-3,.707},\|  
 {1009.5,.9996,20.92E-6,20.92E-6,29.91E-3,.706},\|  
 {1013,.9721,21.35E-6,21.96E-6,30.59E-3,.705}}}



{3127,3127,3126,3125,3116,3106,3083,3031,2970,2899,2811,1486,1475.5,1471.8,1467.4,1461.1,1452,1446.0,1439.1},\

{3177,3177,3177,3176,3168,3159,3139,3095,3046,2990,2926,2695,1647.1,1636.5,1625.1,1609.9,1589.6,1576.3,1550.5},\

{3228,3228,3228,3227,3220,3211,3194,3156,3115,3069,3019,2862,2604,2319,1849,1791,1742,1716,1671},\

{3280,3280,3279,3278,3272,3264,3249,3216,3180,3142,3100,2979,2820,2733,2582,2162,1934,1878,1789},\

{3331,3331,3331,3330,3325,3317,3303,3274,3243,3209,3174,3075,2957,2899,2810,2619,2208,2068,1924},\

{3384,3384,3383,3382,3377,3371,3558,3331,3303,3274,3244,3160,3064,3020,2954,2826,2516,2293,2051},\

{3436,3436,3436,3435,3430,3424,3412,3388,3363,3337,3310,3237,3157,3120,3068,2969,2743,2522,2181},\

{3489,3489,3489,3488,3484,3478,3467,3445,3422,3399,3375,3311,3241,3210,3166,3085,2907,2723,2316},\

{3597,3596,3596,3596,3592,3587,3578,3559,3539,3520,3500,3448,3394,3370,3337,3277,3152,3021,2594},\

{3706,3706,3705,3705,3702,3697,3689,3673,3636,3640,3623,3580,3536,3516,3490,3443,3346,3248,2857},\

{3816,3816,3816,3816,3813,3809,3802,3788,3774,3759,3745,3708,3671,3655,3633,3595,3517,3439,3105},\

{3929,3929,3929,3928,3926,3923,3916,3904,3892,3879,3867,3835,3804,3790,3772,3740,3675,3610,3324},\

{4043,4043,4043,4042,4040,4038,4032,4021,4011,4000,3989,3962,3935,3923,3908,3880,3825,3771,3526},\

{4159,4159,4159,4158,4156,4154,4149,4140,4131,4121,4112,4089,4065,4055,4042,4018,3972,3925,3714}}}

-----  
 ----- TABLA DE LA VALVULA COMPUERTA -----  
 -----

TABLE\_1D t\_comp = {{13,20,40,80,100,150,200,250,300,350},--D0 (mm) \\  
 {10.8,8,4.9,4.4,1,4.4,4.7,5.1,5.4,5.5}}

-----  
 ----- TABLA DE LA VALVULA MARIPOSA -----  
 -----

TABLE\_2D t\_chi\_qu = { {0.98,1.00}, \\  
 {0,10,20,30}, \\  
 { {0.6,.85,1.7,4}, \\  
 {0.3,.52,1.54,4.5}}}

-----  
 ----- TABLA DE TE\_1 -----  
 -----

TABLE\_2D tabla\_cs1 = { {0,.1,.2,.3,.4,.5,.6,.7,.8,.9,1}, \\  
 {1,.2,3,4,6,8,1}, \\  
 {{-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1}, \\  
 {.21,-.46,-.57,-.6,-.62,-.63,-.63}, \\  
 {3.1,.37,-.06,-.2,-.28,-.3,-.35}, \\  
 {7.6,1.5,.5,.2,-.05,-.08,-.1}, \\  
 {13.5,2.95,1.15,.59,.26,.18,.16}, \\  
 {21.2,4.58,1.78,.97,.44,.35,.27}, \\  
 {30.4,6.42,2.6,1.37,.64,.46,.31}, \\  
 {41.3,8.5,3.4,1.77,.76,.5,.4}, \\  
 {53.8,11.5,4.22,2.14,.85,.53,.45}, \\  
 {58,14.2,5.3,2.58,.89,.52,.4}, \\  
 {83.7,17.3,6.33,2.92,.89,.39,.27}}}

-----  
 ----- TABLA DE TE\_18 -----  
 -----

TABLE\_2D tabla\_cs18 = { {0.09, .19, .27, .35, .44, .55, 1}, --Fs/Fc |  
 {1, .2, .3, .4, .5, .6, .7, .8, .9, 1}, --Qs/Qc |  
 {{2.8, 4.5, 6, 7.88, 9.4, 11.1, 13, 15.8, 20, 24.7}, |  
 {1.41, 2, 2.5, 3.2, 3.97, 4.95, 6.5, 8.45, 10.8, 13.3}, |  
 {1.37, 1.81, 2.3, 2.83, 3.4, 4.07, 4.8, 6, 7.18, 8.9}, |  
 {1.1, 1.54, 1.9, 2.35, 2.73, 3.22, 3.8, 4.32, 5.28, 6.53}, |  
 {1.22, 1.45, 1.67, 1.89, 2.11, 2.38, 2.58, 3.04, 3.84, 4.75}, |  
 {1.09, 1.2, 1.4, 1.59, 1.65, 1.77, 1.94, 2.2, 2.68, 3.3}, |  
 {9, 1, 1.13, 1.2, 1.4, 1.5, 1.6, 1.8, 2.06, 2.8}}}

TABLE\_1D tabla\_cst18 = { {1, .2, .3, .4, .5, .6, .7, .8, .9, 1}, --Qst/Qc |  
 {7, .64, .6, .57, .55, .51, .49, .55, .62, .7}}

-----  
 ----- TABLA DE TE\_2 -----  
 -----

TABLE\_2D tabla\_cs2 = { {0, .1, .2, .3, .4, .5, .6, .7, .8, .9, 1}, --Qs/Qc |  
 {1, .2, .3, .4, .6, .8, 1}, --Fs/Fc |  
 {{-1, -1, -1, -1, -1, -1, -1}, |  
 {.24, -.45, -.56, -.59, -.61, -.62, -.62}, |  
 {3.15, .54, -.02, -.17, -.26, -.28, .29}, |  
 {8, 1.64, .6, .3, .08, 0, -.03}, |  
 {14, 3.15, 1.3, .72, .35, .25, .21}, |  
 {21.9, 5, 2.1, 1.18, .6, .45, .4}, |  
 {31.6, 6.9, 2.97, 1.65, .85, .6, .53}, |

{42.9,9.2,3.9,2.15,1.02,.7,.6},\  
 {55.9,12.4,4.9,2.66,1.2,.79,.66},\  
 {70.6,15.4,6.2,3.2,1.3,.8,.64},\  
 {86.9,18.9,7.4,3.71,1.42,.8,.59}}}

-----  
 ----- TABLA DE TE\_3 -----  
 -----

TABLE\_2D tabla\_cs3 = { {0,.1,.2,.3,.4,.5,.6,.7,.8,.9,1},--Qs/Qc\  
 {1,.2,.3,.4,.6,.8,1},--Fs/Fc\  
 {{-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1},\  
 {26,-42,-54,-58,-61,-62,-62},\  
 {3.35,.55,.03,-.13,-.23,-.26,-.26},\  
 {8.2,1.85,.75,.4,1,0,-.01},\  
 {14.7,3.5,1.55,.92,.45,.35,.28},\  
 {23,5.5,2.4,1.44,.78,.58,.5},\  
 {33.1,7.9,3.5,2.05,1.08,.8,.68},\  
 {44.9,10,4.6,2.7,1.4,.98,.84},\  
 {58.5,13.7,5.8,3.32,1.64,1.12,.92},\  
 {73.9,17.2,7.65,4.05,1.92,1.2,.99},\  
 {91,21,9.7,4.7,2.11,1.35,1}}}

-----  
 ----- TABLAS DE TE\_4 (TE\_1) -----  
 -----

TABLE\_2D tabla\_cs4 = { {0,.1,.2,.3,.4,.5,.6,.7,.8,.9,1},--Qs/Qc\  
 {1,.2,.3,.4,.6,.8,1},--Fs/Fc}

```

{-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1},\
{.4,-.37,-.51,-.54,-.59,-.6,-.61},\
{3.8,.72,.17,-.03,-.17,-.22,-.3},\
{9.2,2.27,1,.58,.27,.15,-.11},\
{16.3,4.3,2.06,1.3,.75,.55,.44},\
{25.5,6.75,3.23,2.06,1.2,.89,.77},\
{36.7,9.7,4.7,2.98,1.68,1.25,1.04},\
{42.9,13,6.3,3.9,2.2,1.6,1.3},\
{64.9,16.9,7.92,4.92,2.7,1.92,1.56},\
{82,21.2,9.7,6.1,3.2,2.25,1.8},\
{101,26,11.9,7.25,3.8,2.57,2}}
    
```

```

TABLE_1D  tabla_cs4t = { {0,.1,.2,.3,.4,.5,.6,.7,.8,.9,1},--Qs/Qc\
                        {0,0.16,0.27,0.38,0.46,0.53,0.57,0.59,0.6,0.59,0.55}}
    
```

-----  
 ----- TABLAS DEL INTERCAMBIADOR -----  
 -----

```

TABLE_3D  T22 = { {0.002778,.004167,.005556,.006945,.008334},\
                  {5.8.84,12.67,16.5,20.33,24.16,28},\
                  {6,15,23.33,32.5,41.67,50.8,60},\
                  {
                    {5.27,7.69,9.92,12.41,14.89,17.36,19.82},{8.84,10.51,12.76,15.23,17.71,20.17,22.65},{
                    12.67,13.3,15.56,18.04,20.52,22.99,25.46},\
                    {16.5,16.5,18.35,20.84,23.52,25.79,28.27},{20.33,20.33,20.36,23.63,26.13,28.59
                    ,31.09},{24.16,24.16,24.16,26.43,28.92,31.39,33.88},{28,28,28,29.23,31.72,34.2,36.7}},\
                  \
    
```

{5.38,8.91,12.15,15.81,19.46,23.09,26.77},{8.84,11.25,14.53,18.16,21.81,25.44,29.15}  
,{12.67,13.59,16.88,20.52,24.17,27.81,31.49},\

{16.5,16.5,19.2,22.84,26.5,30.14,33.85},{20.33,20.33,21.52,25.17,28.83,32.49,3  
6.18},{24.16,24.16,24.16,27.48,31.15,34.81,38.51},{28,28,28,29.8,33.47,37.14,40.83}},\

{5.49,9.85,14.02,18.78,23.49,28.18,32.97},{8.84,11.88,16.08,20.73,25.42,30.12,34.89}  
,{12.67,13.85,18,22.69,27.33,32.1,36.91},\

{16.5,16.5,19.93,24.61,29.31,34.02,38.79},{20.33,20.33,21.85,26.49,31.25,35.96  
,40.76},{24.16,24.16,24.16,28.41,33.11,37.82,42.65},{28,28,28,30.3,35.04,39.76,44.54}  
},\

{5.6,10.8,15.71,21.21,26.77,32.37,38.07},{8.84,12.41,17.31,22.78,28.33,33.91,39.71},{  
12.67,14.04,18.96,24.47,30.04,35.65,41.35},\

{16.5,16.5,20.53,26.08,31.57,37.17,42.95},{20.33,20.33,22.12,27.63,33.22,38.83  
,44.54},{24.16,24.16,24.16,29.17,34.73,40.34,46.1},{28,28,28,30.72,36.32,41.94,47.66}  
},\

{5.64,11.36,16.86,23.23,29.21,35.88,42.27},{8.84,12.78,18.37,24.55,30.83,37.16,43.62  
},{12.67,14.16,19.73,25.94,32.26,38.59,45.09},\

{16.5,16.5,20.98,27.23,33.51,39.85,46.31},{20.33,20.33,22.32,28.55,34.7,41.21,  
47.54},{24.16,24.16,24.16,29.75,36.09,42.43,48.9},{28,28,28,31.02,37.5,43.74,50.23}}  
}

TABLE\_3D T12 = { {0.002778,.004167,.005556,.006945,.008334},\  
{5,8.84,12.67,16.5,20.33,24.16,28},\  
{6,23.33,41.67,60},\  
}

{  
 {{5.02,5.34,5.39,5.41},{8.84,9.02,9.14,9.19},{12.67,12.79,12.92,13.2},{16.5,16.57,16.6  
 9,16.75},{20.33,20.33,20.48,20.53},{24.16,24.16,24.27,24.33},{28,28,28.08,28.12}},\|  
  
 {{5.07,5.82,6.33,6.64},{8.84,9.47,10,10.25},{12.67,13.09,13.6,13.92},{16.5,16.76,17.29  
 ,17.57},{20.33,20.43,20.94,21.26},{24.16,24.16,24.65,24.94},{28,28,28.35,28.67}},\|  
  
 {{5.11,6.86,7.83,8.68},{8.84,10.11,11.31,12.18},{12.67,13.61,14.87,15.58},{16.5,17.08,  
 18.25,19.13},{20.33,20.56,21.74,22.61},{24.16,24.16,25.32,26.15},{28,28,28.83,29.71}  
 },\|  
  
 {{5.16,7.68,9.78,11.44},{8.84,10.96,13.14,14.7},{12.67,14.14,16.25,17.94},{16.5,17.44,  
 19.62,21.34},{20.33,20.72,22.83,24.53},{24.16,24.16,26.22,27.87},{28,28,29.53,31.23}  
 },\|  
  
 {{5.23,8.9,12.14,14.46},{8.84,11.73,14.84,17.48},{12.67,14.75,17.81,20.43},{16.5,17.0  
 8,18.25,19.13},{20.33,20.92,24.19,26.83},{24.16,24.16,27.15,29.82},{28,28,30.31,32.92  
 }}}

TABLE\_3D DPI = { {0.002778,.004167,.005556,.006945,.008334},\|  
 {5,12.67,20.33,28},\|  
 {6,23.33,41.67,60},\|  
 {  
 {{4.6,4.4,4.3,4.2},{4.6,4.4,4.3,4.2},{4.6,4.4,4.3,4.2},{4.6,4.4,4.2,4.1}},\|  
  
 {{9.8,9.6,9.4,9.2},{9.7,9.5,9.3,9.1},{9.6,9.4,9.2,9},{9.5,9.3,9.1,8.9}},\|  
  
 {{17,16.6,16.2,15.8},{17,16.4,16,15.7},{17,16.3,15.9,15.6},{17,16,15.8,15.4}},\|  
  
 {{26,25.3,24.7,24.1},{26,25.1,24.5,23.9},{26,24.9,24.3,23.7},{26,25,24.1,23.6}},\|  
  
 {{36.8,35.7,34.8,33.9},{36.6,35.5,34.5,33.7},{36.4,35.2,34.3,33.5},{36.2,35,34,33.3}}}}

```

TABLE_3D DP2 = { {0.002778,0.004167,0.005556,.006945,.008334},\
                 {5,12.67,20.33,28},\
                 {6,23.33,41.67,60},\
                 {
  {{53.3,52.9,52.6,52.2},{53.3,51.9,51.5,51.2},{53.3,51,50.7,50.4},{53.3,50,49.9,49.6}},\

  {{53.3,52.8,52.2,51.7},{53.3,51.9,51.4,50.9},{53.3,51.1,50.6,50.2},{53.3,50.3,49.9,49.4}
},\

  {{53.3,52.5,51.9,51.2},{53.3,51.7,51.1,50.5},{53.3,50.9,50.4,49.8},{53.3,50.1,49.7,49.1}
},\

  {{53.3,52.5,51.7,51},{53.3,51.7,51,50.3},{53.3,51,50.3,49.7},{53.3,50.2,49.7,49.1}},\

  {{53.3,52.3,51.5,50.6},{53.3,51.6,50.8,50},{53.3,50.9,50.1,49.4},{53.3,50.2,49.5,48.8}}}
}

```

-----  
 ----- TABLAS DE EQUILIBRIO LIQ-VAPOR -----  
 -----

- T(°C)
- 1:p(N/m2)
- 2:hv (J/kg)
- 3:hl (J/kg)
- 4:vv (m3/kg)

```

TABLE_2D lv = { {1,2,3,4},\
  {0.1 ,3.8 ,7 ,9.7 ,12 ,14 ,15.9,17.5,19 ,20.4,21.7,23 ,24.1 ,\
  26.7 ,29 ,31 ,32.9,36.2,39 ,41.5,43.8,45.8,47.7,49.4,51.1,52.6 ,\

```

54 ,55.3 ,56.6 ,57.8 ,59 ,60.1 ,62.2 ,64.1 ,65.9 ,67.5 ,69.1 ,72.7 ,75.9 ,\n78.7 ,81.3 ,83.7 ,86 ,88 ,90 ,91.8 ,93.5 ,95.2 ,96.7 ,98.2 ,99.6 ,100 ,\n102.3,104.8,107.1,109.3},\n

{ {611 ,800 ,1000 ,1200 ,1400 ,1600 ,1800 ,2000 ,2200 ,2400 ,2600 ,2800 ,\n3000 ,3500 ,4000 ,4500 ,5000 ,6000 ,7000 ,8000 ,9000 ,10000 ,11000 ,\n12000 ,13000 ,14000 ,15000 ,16000 ,17000 ,18000 ,19000 ,20000 ,22000 ,24000 ,\n26000 ,28000 ,30000 ,35000 ,40000 ,45000 ,50000 ,55000 ,60000 ,65000 ,70000 ,\n75000 ,80000 ,85000 ,90000 ,95000 ,\n100000,101325,110000,120000,130000,140000},\n

{2501600,2508500,2514400,2519300,2523500,2527300,2530600,2533600,2536400,2539000,\n

2541300,2543600,2545600,2550400,2554500,2558200,2561600,2567500,2572600,2577100,\n

2581100,2584800,2588100,2591200,2594000,2596700,2599200,2601600,2603800,2605900,\n

2607900,2609900,2613500,2616800,2619900,2622700,2625400,2631500,2636900,2641700,\n

2646000,2649900,2653600,2656900,2660100,2663000,2665800,2668400,2670900,2673200,\n

2675400,2676000,2679600,2683400,2687000,2690300},\n

{0,15800,29300,40600,50300,58900,66500,73500,79800,85700,91100,96200,101000,111800,\

121400,130000,137800,151500,163400,173900,183300,191800,199700,206900,213700,220000,\

226000,231600,236900,242000,246800,251500,260100,268200,275700,282700,289300,304300,\

317700,329600,340600,350600,359900,368600,376800,384500,391700,398600,405200,411500,\

417500,419100,428800, 439400, 449200, 458400},\

{206.2,159.7,129.2,108.7,93.9,82.8,74,67,61.2,56.4,52.3,48.7,45.7,39.5,34.8,31.1,28.2,\

23.74,20.53,18.1,16.2,14.67,13.42,12.36,11.47,10.69,10.02,9.43,8.91,8.45,8.03,7.65,7,\  
6.45,5.98,5.58,5.23,4.53,3.99,3.58,3.24,2.96,2.73,2.53,2.36,2.22,2.087,1.972,1.869,\  
1.777,1.694,1.673,1.549,1.428,1.325,1.236}}}

-----  
 ----- *TABLAS DEL ELEMENTO CONTRACCIÓN* -----  
 -----

TABLE\_2D t\_contraccion = { {1,2,3,4,5,6}, --Fo/F1 \  
 {10,20,30,40,50,100,200,500,1000,2000,\  
 4000,5000,10000,10001}, --Re\  
 { {5,3,2,2,4,2,1.8,1.3,1.04,.82,.64,.5,.8,.75,.5,.45},\

{5,3.1,2.3,1.84,1.62,1.2,.95,.7,.5,.4,.6,.6,.4,.4},\  
 {5,2.95,2.15,1.7,1.5,1.1,.85,.6,.44,.3,.55,.55,.35,.35},\  
 {5,2.8,2,1.6,1.4,1,.78,.5,.35,.25,.45,.5,.3,.3},\  
 {5,2.7,1.8,1.46,1.3,.9,.65,.42,.3,.2,.4,.42,.25,.25},\  
 {5,2.6,1.7,1.35,1.2,.8,.56,.35,.24,.15,.35,.35,.2,.2}}

TABLE\_2D t\_convergencia = { {0.025,.05,.075,.1,.15,.6}, --rel=l/Dh\  
 {0,10,20,30,40,60,100,140,180}, --alfa\  
 { {0.5,.47,.45,.43,.41,.4,.42,.45,.5},\  
 {0.5,.45,.41,.36,.33,.3,.35,.42,.5},\  
 {0.5,.42,.35,.3,.26,.23,.3,.4,.5},\  
 {0.5,.39,.32,25,.22,.18,.27,.38,.5},\  
 {0.5,.37,.27,.2,.16,.15,.25,.37,.5},\  
 {0.5,.27,.18,.13,.11,.12,.23,.36,.5}}}

-----  
 -----TABLA D P D SAT PARA AGUA-----  
 -----

--T (°C)  
 --p (N/m2)

TABLE\_1D p\_sat = { {0.01,2,4,6,8,10,12,14,16,18,20,22,24,26,28,30,\  
 32,34,36,38,40,42,44,46,48,50,52,54,56,58,60},\  
 {611,705,813,935,1072,1227,1401,1597,1817,2062,2340,2640,\  
 2980,3360,3780,4240,4750,5320,5940,6620,7380,8200,9100,\  
 10090,11160,12340,13610,15000,16510,18150,19920}}

-----  
----- *TABLA DE VÁLVULA NEUMÁTICA* -----  
-----

*TABLE\_1D neum = { {0,250000,300000,400000,500000,600000,700000}, \*  
*{0,0,10000,280000,480000,660000,850000}}}*

-----  
----- *--TABLA BOMBA* -----  
-----

*--H (m)*

*--Q (m3/h)*

*TABLE\_1D tabla\_B = { {100,48.5,47,43,38,32,24,15.5}, \*  
*{10,13,15,20,25,30,35,40}}}*