

Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Industrial
Energía y Tecnología de Calor y Fluidos

**Diseño y modelado de un sistema de
disipación de calor mediante Trnsys y
técnicas CFD**

Anexo

Manel David Bosch Navío

Junio 2014

Director: Alejandro del Amo Sancho
Ponente: José María Marín Herrero

Departamento de Ingeniería Mecánica
Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Zaragoza

Anexo A.

Trnsys

Trnsys es un programa de simulación desarrollado por el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de Wisconsin-Madison (primera versión año del 1975) y enriquecido por las contribuciones de *Transolar Energietechnik GMBH*, *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)* y *Thermal Energy Systems Specialists (T.E.S.S)*.

Trnsys es un solver de ecuaciones algebraicas y diferenciales que incorpora una librería con los sistemas térmicos y energéticos más comunes, está diseñado para simulaciones transitorias principalmente. La estructura de composición del problema es modular. Cada uno de los componentes se describe mediante un módulo matemático que recibe el nombre de «type» dentro del programa *Trnsys*. Esta técnica modular permite analizar y evaluar un sistema entero como la suma de cada componente o sistema individual y la conexión entre los mismos. Cada uno de los «types» se describe con un modelo matemático mediante el lenguaje de programación Fortran (ver referencia [13]).

A.1. Modelo del problema en Trnsys

El modelo *Trnsys* A.1 describe el problema planteado. Está diseñado para realizar modificaciones en los parámetros originales de diseño.

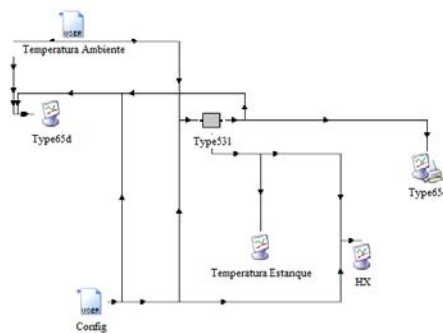


Figura A.1: Modelo de *Trnsys*.

Se pueden realizar cambios sobre el modelo de dos formas distintas:

- Actuando sobre el propio modelo, modificando las variables de caudal y temperatura como se observa en la figura [A.2](#)



Figura A.2: Cambio de modo de funcionamiento en el modelo.

- Cambiando el archivo «config.dat» al que acude el «type 9» o módulo de lectura de datos.

A.2. Módulos de cálculo del modelo

A continuación se detallarán los «types» usados en el proyecto. Se comentarán los requisitos más importantes para el usuario respecto a su configuración. Para acceder a dicha configuración se debe hacer doble clic con el botón izquierdo del ratón en el icono del «type» deseado.

A.2.1. Type 9

Es el bloque utilizado para la lectura de los ficheros. Para su configuración se deberá describir donde esta el fichero de lectura y sus características.

En la pestaña «External Files» del «type» se deberá especificar el directorio y el archivo objetivo del fichero, en nuestro caso «config.dat» como se observa en la imagen izquierda de la figura [A.3](#). Los principales parámetros del fichero se encuentran en la pestaña «Parameter» y son los siguientes: líneas de encabezamiento, datos de lectura y tiempo de intervalo de lectura. Están recuadrados en la imagen de la derecha de la figura [A.3](#).

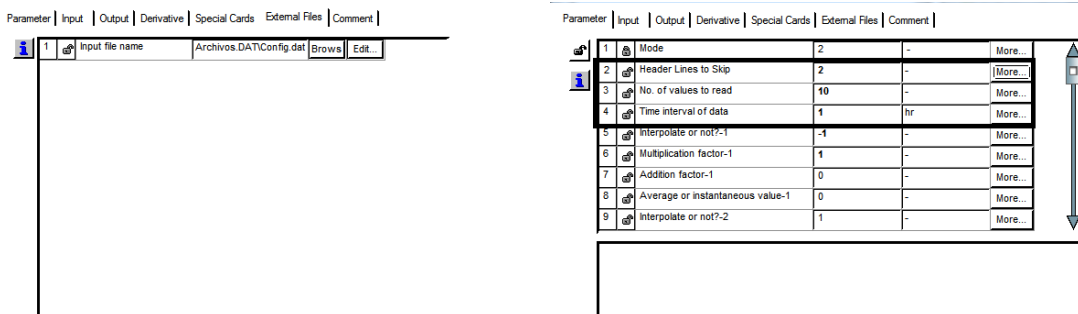


Figura A.3: Ventana de configuración del «type» 9 de Trnsys.

A.2.2. Type 65c

El módulo aquí descrito es el indicado para la exportación y representación de resultados. Y la configuración del «type» a nivel de usuario se representa siguiendo esa división.

- Para la exportación de resultados de deberá especificar su destino y formato en la pestaña «External Files» como se muestra en la figura [A.4](#).

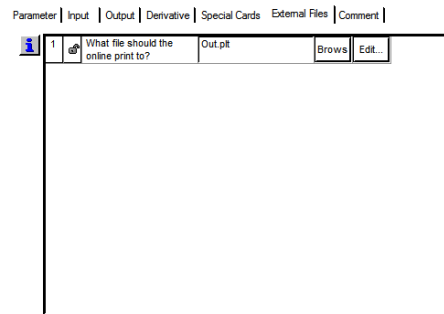


Figura A.4: Ventana de configuración para exportar resultados del «type» 65c de *Trnsys*

- La configuración de la representación de variables es tediosa debido a los muchos parámetros personalizables.

La pestaña «Parameter» especifica el número de variables por eje de ordenadas, así como el máximo y mínimo de dichos ejes. En la pestaña «Input» se solicita un nombre para cada una de las variables que se desea representar. Por último, en la pestaña «Special Cards» se definen los nombres representados en los ejes y el de la gráfica. Las pestañas comentadas se muestran en la figura [A.5](#).

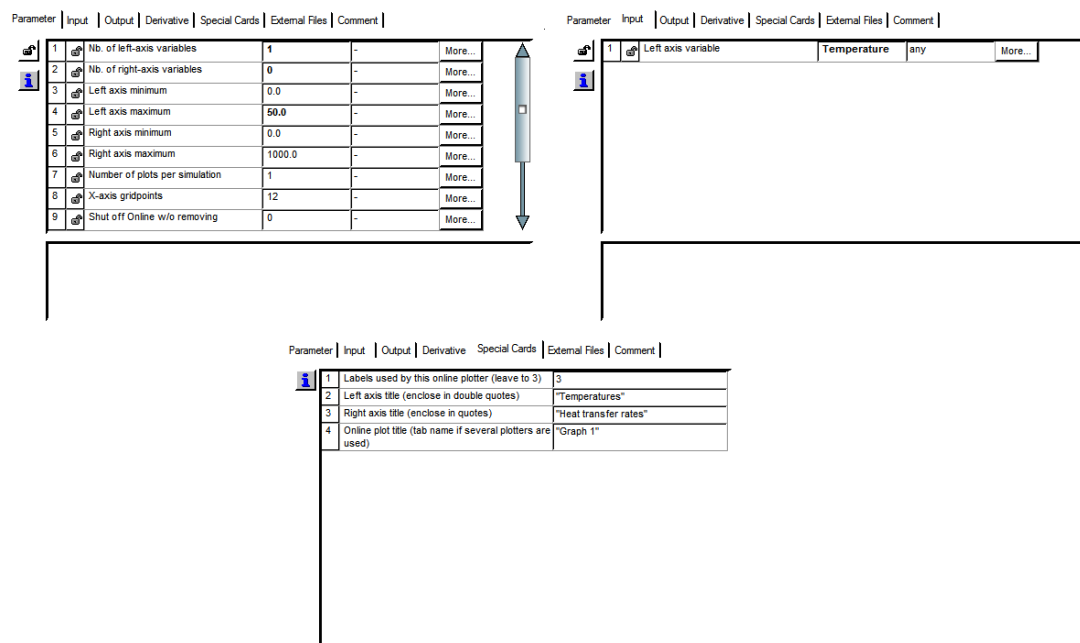


Figura A.5: Ventana de configuración del gráfico del «type» 65c de *Trnsys*

A.2.3. Type 531

El «type 531» es el núcleo de este sistema, y su configuración debe de simular el problema físico real. Dicha configuración se puede realizar de dos formas posibles: indirecta y directa.

- La configuración del «type» de forma indirecta consiste en coordinar los datos introducidos en la pestaña «Parameters» con el fichero de configuración cuyo directorio se especifica en «External Files». Dada su complejidad, y la necesidad de conocimientos previos en programación, esta opción se descarta para el proyecto.
- La configuración directa requiere el conocimiento en profundidad del «type» y del problema que se pretende simular. Los datos requeridos se introducen en un plug-in cargado directamente en el módulo de cálculo. Al rellenar los parámetros requeridos por dicho plug-in este crea directamente el fichero de la configuración.

Para acceder a los plug-in de aquellos «types» que lo dispongan, hay habilitado un botón en la esquina inferior izquierda de las ventanas de configuración como se puede observar en la figura [A.6](#)

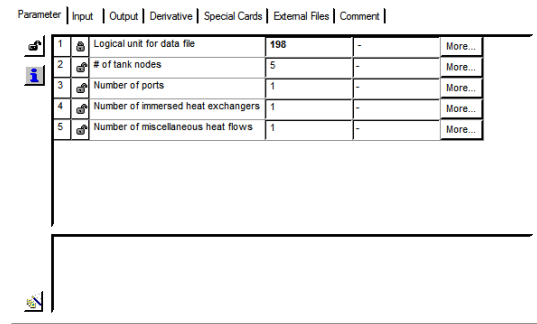


Figura A.6: Ventana de configuración de los parámetros del «type» 531 de *Trnsys*.

Al clicar en el botón se accede al plug-in del «type» indicado, en este caso al del «type» 531 como se muestra en la figura [A.7](#)

El primer bloque llamado «File Properties» permite especificar el directorio y nombrar el archivo de la configuración deseada.

El cuadro «Tank properties» contiene los siguientes parámetros:

- «Number of Tank Nodes» consiste en la división en láminas que se desea del estanque, este parámetro servirá para mostrar la estratificación del tanque.
- «Tank Volume», «Tank Height» y «Tank Perimeter» son las dimensiones características del volumen fluido que se desea calcular.
- «Top Loss Coefficient», «Bottom Loss Coefficient» corresponden a los coeficientes de pérdida de energía en la superficie superior e inferior. Están relacionados con «Top Loss Temperature» y «Bottom Loss Temperature» ya que son los valores de la temperatura de dichas superficies.

- «Additional Thermal conductivity» es el valor de conductividad térmica entre nodos dentro del estanque.
- «Flue Loss Temperature» es un parámetro que permite especificar la temperatura de los gases de escape que se utilizasen como fuente o sumidero de energía al estanque en caso de que existiese esa condición en el planteamiento del problema.
- «Inversión Mixing Flow Rate» cuantifica la capacidad de mezclado del fluido por sí mismo.
- «Edge Loss» son el conjunto de coeficiente de pérdidas («Nodal Edge Loss Coefficient») y de temperatura («Edge Loss Temperature») especificados para cada nodo seleccionable desde el desplegable «Node #».
- «Tank Fluid» permite especificar las propiedades de un fluido diferente a aquellos disponibles en la librería accesible mediante el menú desplegable.
- «Overall Flue Heat Loss Coefficient» es el valor del coeficiente de pérdida de calor por gases de escape.
- «Auxiliary Heat Rate» y «Initial Tank Node Temperature» corresponden a la tasa de calor auxiliar y a la temperatura inicial para cada nodo.

Con el objetivo de realizar una correcta configuración de las entradas y salidas al estanque («Paired Inlet/Outlet Ports») se recomienda que para especificar los parámetros del apartado se consulte la documentación oficial en el apartado [A.3.3](#) de este anexo.

El «type 531» permite añadir ganancias o pérdidas de energía al volumen fluido. Esta característica se especifica en el cuadro «Miscellaneous Heat Gains» que incluye el parámetro «Number of Misc Heat Gains» que permite especificar el número de aportaciones auxiliares. Para cada una de dichas aportaciones se deberá especificar la posición nodal y la cuantía de la misma en «Tank Node for Gain» y «Heat Addition» respectivamente.

El último apartado del plug-in de configuración del «type» hace referencia al intercambiador sumergido en «Immersed Heat Exchangers».

- Se definirá el número de intercambiadores en «Number of Immersed Heat Exchanger» para decidir el tipo de intercambiador que se desea simular y las ecuaciones características del mismo se sugiere consultar en este anexo el apartado [A.3.3](#).
- Para determinar el fluido que circula en el intercambiador («Heat Exchanger Fluid») el usuario puede elegir un fluido de la librería o especificar las propiedades del fluido que se desea simular.
- «Number of Heat Exchanger Nodes» indica el número de divisiones del intercambiador al realizar el cálculo.
- La posición de los nodos y el tamaño porcentual de cada uno de ellos se impone en el apartado «Placement Parameters».
- «Tube Inner Diameter», «Tube Outer Diameter», «Tube Leng» y «Number of Tubes» especifican el diámetro interior y exterior del tubo, la longitud del mismo y la cantidad de dichos tubos en el intercambiador.

- o Mediante «Header Volume», «Cross Sectional Area» se da valor numérico al volumen de la cabecera y al área frontal de dicho intercambiador cuya normal es la dirección del flujo.
- o Con «Wall Conductivity» queda definido el material con el que esta construido el intercambiador.
- o «Coil Diameter» y «Coil Pitch» determinan el bobinado en caso de que se escoja ese tipo de intercambiador.
- o Los parámetros «Temperature at Inlet» y «Flow Rate at Inlet» describen las condiciones de contorno al especificar la temperatura y el caudal de fluido en la entrada del intercambiador.
- o «Multiplier for Natural Convection Correlation», «Exponent for Rayleigh Number», «Geometry Factor» y «Geometry Factor Exponent» son los coeficientes que caracterizarán las ecuaciones de transferencia de calor. Con el fin de conocer los valores que describen numéricamente la situación simulada se consultó el fondo de dudas de la universidad de Wisconsin Madison en la referencia [14].

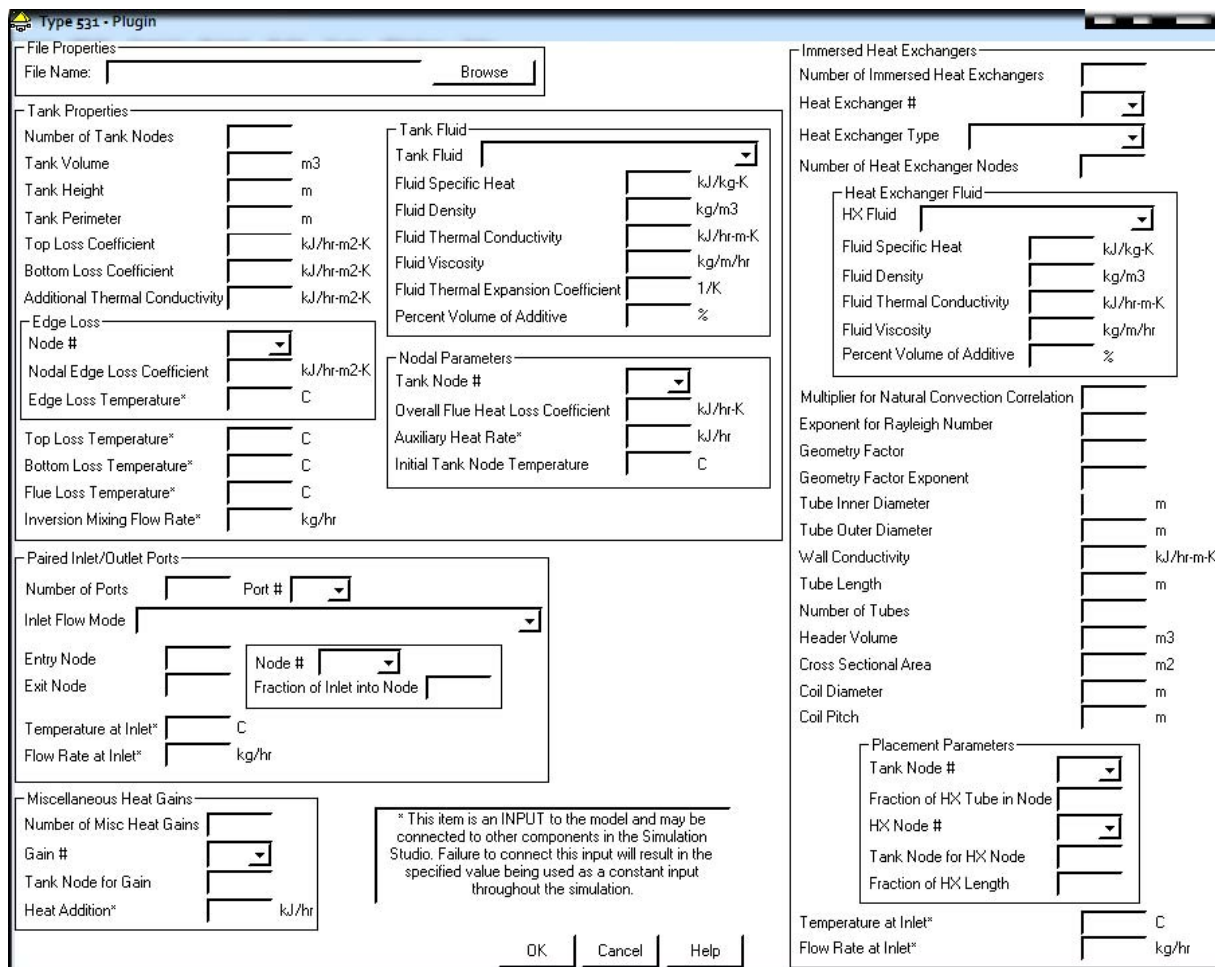


Figura A.7: Ventana del plug-in configuración del «type»531 de *Trnsys*.

A.3. Documentación Oficial

A.3.1. Trnsys Manual. Capítulo 3 Type 9 y Type 65c

--

--

A.3.2. Trnsys Manual. Capítulo 4 Type 9 y Type 65c

A.3.3. T.E.S.S. Library Type 531

TYPE 531: RECTANGULAR STORAGE TANK WITH IMMERSED HEAT EXCHANGER**General Description**

This subroutine models a rectangular cross section fluid-filled, constant volume storage tank with immersed heat exchangers as shown in Figure 1 below. The fluid in the storage tank interacts with the fluid in the heat exchangers (through heat transfer with the immersed heat exchangers), with the environment (through thermal losses from the top, bottom and edges) and with up to two flow streams that pass into and out of the storage tank. The tank is divided into isothermal temperature nodes (to model stratification observed in storage tanks) where the user controls the degree of stratification through the specification of the number of “nodes”. Each constant-volume node is assumed to be isothermal and interacts thermally with the nodes above and below through several mechanisms; fluid conduction between nodes, and through fluid movement (either forced movement from inlet flow streams or natural destratification mixing due to temperature inversions in the tank). The user has the ability to specify one of four different immersed heat exchanger types (or no HX if desired); horizontal tube bank, vertical tube bank, serpentine tube, or coiled tube. Auxiliary heat may be provided to each isothermal node individually; through the use of INPUTs to the model. The model also considers temperature-dependent fluid properties for either pure water, an ethylene glycol and water solution, or a propylene glycol and water solution for both the tank and heat exchanger fluids.

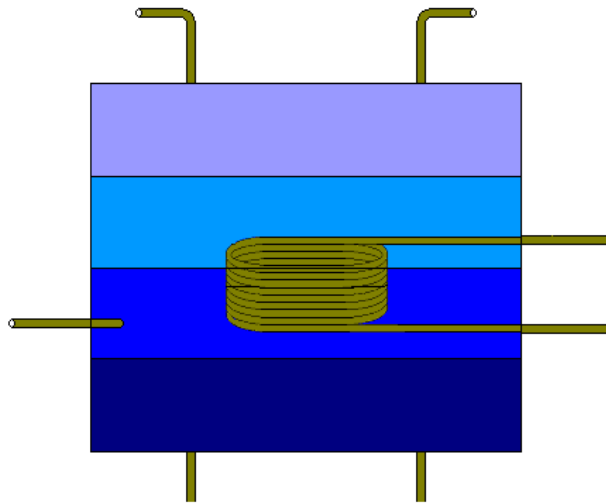


Figure 1: Schematic

Detailed Description

In this type of storage tank, heat can be transferred into and out of the storage tank through 3 unique fluid flow streams. Two of the fluid streams mix with the storage fluid while the third flow stream transfers heat to/from the storage tank through an immersed heat exchanger (the HX fluid does not mix with the storage fluid). The natural convection from the heat exchanger to the fluid in the storage tank can be a difficult problem to solve. Compounding this problem is the fact that the effects of the heat exchanger fluid mass must be considered for these types of systems. The problem breaks down into the required solution of two coupled differential equations:

$$dT_{\text{Tank}}/dt = (Q_{\text{in,Tank}} - Q_{\text{out,Tank}})/C_{\text{Tank}} \quad \text{Eq. 531.1}$$

531.1

$$dT_{HX}/dt = (Q_{in,HX} - Q_{out,HX})/C_{HX} \quad \text{Eq. 531.2}$$

where $Q_{in,Tank}$ and $Q_{out,Tank}$ are functions of the ambient temperature, the inlet fluid conditions and flow rates, and the heat exchanger temperature, and $Q_{in,HX}$ and $Q_{out,HX}$ are functions of the inlet fluid temperature and flow rate to the heat exchanger and the tank temperatures. While there are other available methods to solve coupled differential equations, we decided to solve the problem with an approximate analytical solution. The analytical solution has several inherent advantages over numerical solutions. First, the subroutine solves its own mathematical problem and does not have to rely on non-standard numerical recipes that must be attached to the subroutine. In this way, the subroutine can be imported into any FORTRAN compiler without problems. Secondly, some of the other solution methods (mainly the numerical solutions) are extremely dependent on the simulation timestep and may not converge under certain circumstances commonly encountered in domestic hot water systems (namely high flow rates for example). The analytical solution is timestep independent but does require an iterative solution inside the subroutine to solve the coupled differential equations. While solving two coupled differential equations iteratively can sometimes lead to convergence problems, this does not seem to be the case with this model under almost all operating scenarios.

To solve the differential equations analytically, the equations are placed into the form:

$$dT/dt = aT+b \quad \text{Eq. 531.3}$$

where T is the dependent variable, t is time, a is a constant and b may be a function of time or the dependent variable. If b is a constant, then the solution of this differential equation can be readily solved. If b is not constant, then a reasonable approximation to the analytical solution can be found by assuming that b is constant over the timestep and equal to its average value over the timestep.

At any time (for a not equal to zero):

$$T_{final} = (T_{initial} + b_{ave}/a) * e^{(a\Delta t)} - b_{ave}/a \quad \text{Eq. 531.4}$$

where

$$b_{ave} = b(T_{ave}) \quad \text{Eq. 531.5}$$

and

$$T_{ave} = 1/a\Delta t * (T_{initial} + b_{ave}/a) * (e^{(a\Delta t)} - 1) - b_{ave}/a \quad \text{Eq. 531.6}$$

With this assumption, the problem becomes straightforward to solve. Simply write the differential equation in the correct form, determine a and b_{ave} and solve for T_{final} and T_{ave} . Then recalculate b_{ave} and iterate until the temperatures converge.

While the assumption that b is constant over the timestep (and equal to its average value) is not technically correct (b for the tank is a function of the heat exchanger temperature for example), it is a reasonable approximation for the small timesteps we are using in the TRNSYS simulation (maximum timestep=1 hour).

This subroutine allows the user to designate the level of stratification for the storage tank by specifying a number of tank nodes (N). The tank is then divided into N horizontal nodes of equal volume (before

TYPE 531: RECTANGULAR STORAGE TANK WITH IMMERSED HEAT EXCHANGER

the placement of the heat exchanger which reduces the volume (and hence the capacitance) of the node). Each of the tank nodes is assumed to be isothermal. Node 1 is assumed to be at the top of the storage tank. The greater the number of nodes, the greater the stratification in the storage tank. Unreasonably increasing the number of nodes may slow down the simulation dramatically.

The heat exchangers are also divided into a user-defined number of isothermal nodes (N_{hx}), but these nodes are arranged along the flow direction of the heat exchanger (along the length of the pipe). Adjacent heat exchanger nodes interact thermally only via the flow stream, conduction is not considered between heat exchanger nodes.

For horizontal tube bank heat exchangers, each tube comprising the heat exchanger is uniformly divided into N_{hx} nodes along the horizontal direction. The user must supply the fraction of the total number of heat exchanger pipes that lie completely within each of the tank nodes.

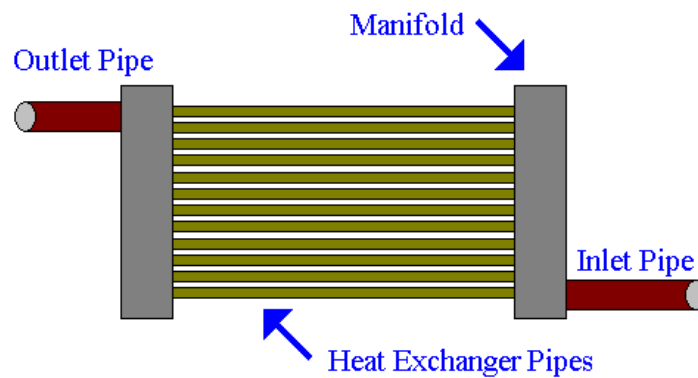


Figure 2 - Horizontal Tube Bank HX

For vertical tube bank heat exchangers, the tubes comprising the heat exchanger are divided into N_{hx} nodes along the vertical direction. For each heat exchanger node, the user must supply the fraction of the heat exchanger pipe length to be assigned to that node and the tank node in which this heat exchanger node is completely located. It is possible to have more than one heat exchanger node located within a tank node.

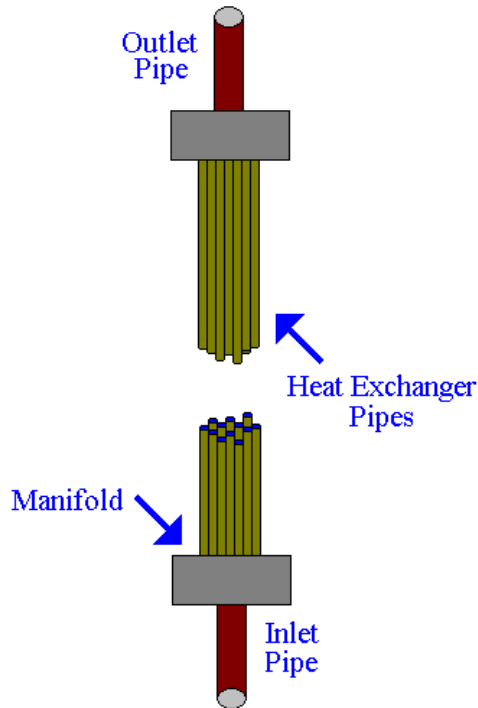


Figure 3 - Vertical Tube Bank HX

For coiled tube heat exchangers, the tubes comprising the heat exchanger (there may be more than one tube bundled together) are divided into N_{hx} nodes along the flow direction. For each heat exchanger node, the user must supply the fraction of the heat exchanger pipe length to be assigned to that node and the tank node in which this heat exchanger node is completely located. It is possible to have more than one heat exchanger node located within a tank node.

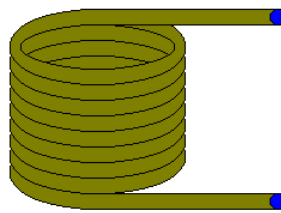


Figure 4 - Coiled Tube HX

For serpentine tube heat exchangers, the tubes comprising the heat exchanger (there may be more than one tube bundled together) are divided into N_{hx} nodes along the flow direction. For each heat exchanger node, the user must supply the fraction of the heat exchanger pipe length to be assigned to that node and the tank node in which this heat exchanger node is completely located. It is possible to have more than one heat exchanger node located within a tank node. With the serpentine tube HX, complex flow patterns through the tank may be specified and studied.

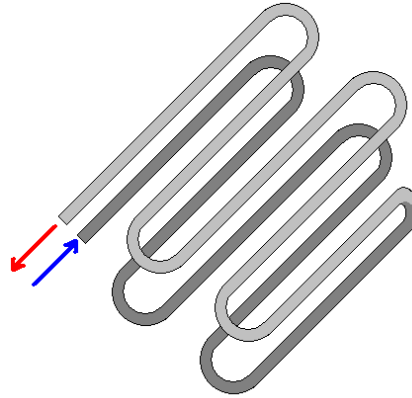


Figure 5 - Serpentine Tube HX

Heat Exchanger:

This model allows the user to designate which of 4 unique heat exchanger arrangements are immersed in the storage tank.

- vertical tube bank
- horizontal tube bank
- serpentine tube
- coiled tube

The outlet temperature at any time during the simulation for the heat exchanger flow stream is the average temperature of the heat exchanger node that contains the outlet (the last specified node) over the timestep. Header volumes (a user-supplied parameter) are added to the first and last heat exchanger nodes. The heat exchanger and storage tank interact thermally through natural convection heat transfer from the heat exchanger outer surface to the tank fluid (or in this case from the outer surface of the heat exchanger node to the tank fluid node). The overall heat transfer coefficient (UA) of the heat exchanger to tank heat transfer for any heat exchanger node can be expressed as:

$$n/UA = (1/h_o A_o) + R_w + (1/h_i A_i) \tag{Eq. 531.7}$$

where:

- n = number of identical tubes (pipes)
- h_o = outer surface heat transfer coefficient (tank fluid side)
- A_o = outer surface area of the HX node
- R_w = tube wall resistance
- h_i = inner surface heat transfer coefficient (in the tubes)
- a_i = inner surface area of the HX node

and:

$$h_o = N_{ud} * k/d_o \tag{Eq. 531.8}$$

where:

- N_{ud} = Nusselt number based on tube diameter
- k = fluid thermal conductivity

TYPE 531: RECTANGULAR STORAGE TANK WITH IMMERSED HEAT EXCHANGER

d_o = outer pipe diameter

and:

$$N_{ud} = C * (Ra)^n * (GF)^m \quad \text{Eq. 531.9}$$

where:

Ra = Rayleigh number for the tank fluid (based on fluid properties at $(T_{surf} + T_{\infty})/2$ → this requires an iterative solution as T_{surf} depends on the heat transfer)

T_{surf} = outer surface temperature of HX

T_{∞} = temperature of the tank node containing this HX node

$C, n, GF,$ and m = user supplied parameters

and:

$$R_w = \ln(r_o/r_i)/(2\pi L_{pipe}k_w) \quad \text{Eq. 531.10}$$

where:

r_o = outer pipe radius

r_i = inner pipe radius

L_{pipe} = length of pipe node

k_w = HX wall thermal conductivity

The inner surface heat transfer coefficient (h_i) is dependent on the type of heat exchanger as well as the fluid properties. The flow is assumed to be fully developed and the internal convection coefficient is based on the length of the tubes; and not on the length of the node. For all cases the Reynolds number (Re_{hx}) and Prandtl number (Pr_{hx}) are calculated as:

$$Re_{hx} = 4 \dot{m} / (\pi d_i \mu) \quad \text{Eq. 531.11}$$

$$Pr_{hx} = C_p * \mu / k \quad \text{Eq. 531.12}$$

where:

\dot{m} = Flow rate through 1 tube of the HX

d_i = inner tube diameter

μ = fluid viscosity

k = fluid thermal conductivity

C_p = fluid specific heat

For all heat exchanger types with the exception of the coiled tube HX, the transition from laminar flow to turbulent flow occurs at a Reynolds number of 2300. For coiled tube heat exchangers, the critical Reynolds number for transition from laminar flow to turbulent flow is calculated as

$$Re_{crit} = 20000 * (d_i/d_{coil})^{0.32} \quad \text{Eq. 531.13}$$

where:

d_{coil} = diameter of the coiled tube heat exchanger

For coiled tube heat exchangers the Nusselt number correlation for laminar flow is:

$$\text{Nusselt}_{hx} = \left[\left(\frac{48}{11} + \frac{\frac{51}{11}}{1 + \left[\frac{1342}{Pr_{hx}} \right]^2} \right)^3 + 1.816 \cdot \left(\frac{HE}{1 + \frac{1.15}{Pr_{hx}}} \right)^{1.5} \right]^{(1/3)} \quad \text{Eq. 531.14}$$

where:

$$HE = \frac{Re_{hx} \cdot \left[\frac{d_i}{d_{coil}} \right]^{0.5}}{1 + \left[\frac{Pitch_{coil}}{\pi \cdot d_i} \right]^2} \quad \text{Eq. 531.15}$$

and for turbulent flow conditions is:

$$\text{Nusselt}_{hx} = 0.023 \cdot Re_{hx}^{0.85} \cdot Pr_{hx}^{0.4} \cdot \left[\frac{d_i}{d_{coil}} \right]^{0.1} \quad \text{Eq. 531.16}$$

For serpentine heat exchangers, vertical tube bank heat exchangers and horizontal tube bank heat exchangers the Nusselt number correlation for laminar flow conditions is:

For cases where: $L_{tube} / d_i \leq 0.0425 \cdot Re_{hx} \cdot Pr_{hx}$

$$\text{Nusselt}_{hx} = \left[3.66^3 + 1.61^3 \cdot Re_{hx} \cdot Pr_{hx} \cdot \frac{d_i}{L_{tube}} \right]^{(1/3)} \quad \text{Eq. 531.17}$$

otherwise

$$\text{Nusselt}_{hx} = 4.364 \quad \text{Eq. 531.18}$$

and for turbulent flow conditions is:

$$\text{Nusselt}_{hx} = 0.0214 \cdot (Re_{hx}^{0.8} - 100) \cdot Pr_{hx}^{0.4} \quad (Pr_{hx} \leq 1.5) \quad \text{Eq. 531.19}$$

$$\text{Nusselt}_{hx} = 0.012 \cdot (Re_{hx}^{0.87} - 280) \cdot Pr_{hx}^{0.4} \quad (Pr_{hx} > 1.5) \quad \text{Eq. 531.20}$$

The internal heat transfer coefficient is then:

$$h_i = \text{Nusselt}_{hx} * k / d_i \quad \text{Eq. 531.21}$$

For cases where there is no flow through the heat exchanger, the Nusselt number is set to 1.0 for the calculation of the internal heat transfer coefficient. Finally, the heat transfer between the tank node (j) and heat exchanger node (k) can be calculated as:

$$Q_{hx,j \rightarrow k} = UA_{j,k} * (T_{\text{tank},j} - T_{hx,k}) \quad \text{Eq. 531.22}$$

The other component of heat transfer for the heat exchanger node (besides the heat transfer to the storage tank fluid) is via fluid flow through the heat exchanger:

$$Q_{\text{flow}} = \dot{m} * C_p * (T_{hx,k} - T_{in}) \quad \text{Eq. 531.23}$$

where:

\dot{m} = mass flow rate through the node (depends on HX flow rate and the number of tubes)

C_p = fluid specific heat

T_{in} = the inlet temperature to the heat exchanger node (this temperature may be the entering HX temperature or the temperature of the node upstream of this node depending on the location of the node)

$T_{hx,k}$ = the temperature of the heat exchanger node

The a and b terms for the differential equation ($dT/dt = aT + b$) for the heat exchanger heat transfer for the node can be expressed as:

$$a_{hx,k} = (\dot{m} * C_p - UA_{j,k}) / \text{Cap}_k \quad \text{Eq. 531.24}$$

$$b_{hx,k} = [(-\dot{m} * C_p * T_{in}) + (UA_{j,k} * T_{\text{tank},j})] / \text{Cap}_k \quad \text{Eq. 531.25}$$

where:

Cap_k = mass of fluid in HX node * specific heat of HX fluid

Storage Tank:

The storage tank model accounts for the following component heat transfers:

- thermal losses to the environment through the top of the storage tank
- thermal losses to the environment through the sides of the storage tank
- thermal losses to the environment through the bottom of the storage tank
- thermal losses to the environment through a gas flue passing through the tank
- heat exchange with flowing and stagnant fluid in the heat exchanger
- conduction between adjacent tank nodes
- mixing between nodes to eliminate thermal instabilities
- mixing between nodes due to load flow through the storage tank
- auxiliary heat input to the tank
- miscellaneous heat gains/losses to/from the tank

Top, Edge and Bottom Losses:

The storage tank interacts thermally with its environment through heat losses (or gains) to the tank from the top, edges and bottom areas of the storage tank. The model allows the user to specify unique environment temperatures for the top surface, bottom surface and edges in order to increase the flexibility of the model. The heat transfer from the top, edges and the bottom of the storage for tank node j is:

$$Q_{\text{loss,top},j} = (A_{\text{top},j} * U_{\text{top}}) * (T_{\text{tank},j} - T_{\text{env,top}}) \quad \text{Eq. 531.26}$$

$$Q_{\text{loss,bottom},j} = (A_{\text{bottom},j} * U_{\text{bottom}}) * (T_{\text{tank},j} - T_{\text{env,bottom}}) \quad \text{Eq. 531.27}$$

$$Q_{\text{loss,edges},j} = (A_{\text{edges},j} * U_{\text{edges}}) * (T_{\text{tank},j} - T_{\text{env,edge}}) \quad \text{Eq. 531.28}$$

where:

$A_{\text{top},j}$ = tank top surface area for thermal losses (all attributed to tank node 1)

$A_{\text{bottom},j}$ = tank bottom surface area for thermal losses (all attributed to tank node N)

$A_{\text{edge},j}$ = tank top surface area for thermal losses (distributed equally amongst all the nodes)

U_{top} = storage tank top heat loss coefficient

U_{bottom} = storage tank bottom heat loss coefficient

U_{edge} = storage tank edge heat loss coefficient

$T_{\text{tank},j}$ = temperature of the tank node

$T_{\text{env,top}}$ = tank environment temperature for losses through the top of the storage

$T_{\text{env,bottom}}$ = tank environment temperature for losses through the bottom of the storage

$T_{\text{env,edge}}$ = tank environment temperature for losses through the edges of the storage

Gas Flue Losses:

The storage tank also interacts thermally with its environment through heat losses from a gas flue which passes through the storage volume. The user specifies the overall heat loss coefficient from the tank node to the gas flue as parameter and provides the temperature of the gas flue as as INPUT to the model. **The losses from the gas flue are set to zero if auxiliary energy is being added to the tank.** The heat transfer from the storage to the gas flue for tank node j is:

$$Q_{\text{loss,flue,j}} = UA_{\text{flue,j}} * (T_{\text{tank,j}} - T_{\text{flue}}) * (1 - \gamma_{\text{aux}}) \quad \text{Eq. 531.29}$$

where:

$UA_{\text{flue,j}}$ = overall heat loss coefficient from node j to the gas flue

$T_{\text{tank,j}}$ = temperature of the tank node

T_{flue} = the temperature of the gas flue (an INPUT)

γ_{aux} = on/off indicator for whether auxiliary heat is being added to the storage tank

Conduction Effects:

The nodes in the storage tank of this model can interact thermally via conduction between nodes. An additional term must be supplied by the user to account for conduction in the storage tank wall (and maybe even to account conduction in the heat exchanger wall). Conduction between nodes can be turned off by the user by setting the additional conductivity term (a parameter) less than zero. The formulation of the conductivity heat transfer from tank node j is:

$$Q_{\text{cond,j}} = k_j * A_j * (T_j - T_{j+1}) / L_{\text{cond,j}} + k_{j-1} * A_{j-1} * (T_j - T_{j-1}) / L_{\text{cond,j-1}} \quad \text{Eq. 531.30}$$

where

T_j = temperature of this node

T_{j+1} = temperature of the node directly below the current node

T_{j-1} = temperature of the node directly above the current node

k_j = thermal conductivity of fluid in node j (evaluated at average temperature between this node and the node below)

k_{j-1} = thermal conductivity of fluid in node j (evaluated at average temperature between this node and the node above)

A_j = conduction interface area between this node and the one below it (may be reduced by the presence of a heat exchanger tube passing through the boundary between the tank nodes)

A_{j-1} = conduction interface area between this node and the one above it (may be reduced by the presence of a heat exchanger tube passing through the boundary between the tank nodes)

$L_{\text{cond,j}}$ = vertical distance between the centroid of this node and the centroid of the node below

$L_{\text{cond,j-1}}$ = vertical distance between the centroid of this node and the centroid of the node above

Inlet Flow Effects:

This model allows the user to have multiple flow streams which pass into and out of the storage tank. There are several methods which dictate where the entering water is placed in the storage tank.

Fixed Inlets and Outlets (“Inlet Flow Mode” = 1):

The user must specify the inlet and outlet locations (nodes) for each of the inlet and outlet streams. The temperatures at the outlets at any time are simply the average temperatures of the nodes containing the outlets over the simulation timestep. The user provides the inlet temperature and flow rate through each of the inlets. The inlet and outlet locations are also fixed throughout the simulation – they cannot be changed. The outlet flow rate from any outlet is simply the inlet flow rate from its paired inlet (for example 100 kg/h into inlet 1 causes 100 kg/h to exit the tank through outlet 1). An example is shown below of the path of the flow streams with the following conditions:

- Stream 1 = 200 kg/h with Inlet in Node 4 and Outlet in Node 1
- Stream 2 = 75 kg/h with Inlet in Node 1 and Outlet in Node 3

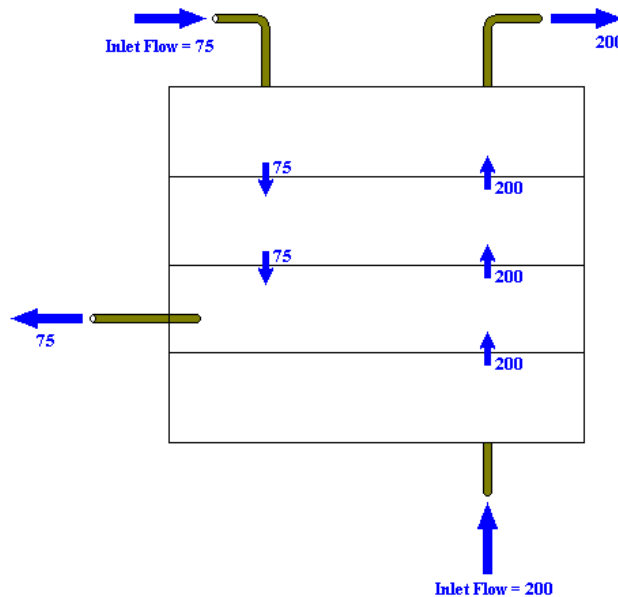


Figure 6 - Example Flows

In this tank model, the inlet fluid into a node is completely mixed with the storage tank fluid at every timestep before this fluid moves on to the next node (the fluid flow path is directly from the inlet node to the outlet mode). For example, water at 10 C and at a flow rate of 200 kg/h enters node 4 (outlet = node 1) of a storage tank which has an initial temperature of 30 C. The 10 C inlet flow stream mixes with the 30 C water in the tank node causing the tank node to fall to 25 C (for example). 200 kg/h of 25 C water then crosses the boundary into node 3 where it mixes with the fluid in this boundary before moving on towards node 2 and eventually out through the outlet in node 1.

As mentioned earlier, each inlet to the tank is assumed to be paired with an outlet from the tank. In other words, you cannot have two outlets from the tank and only one inlet into the tank or two inlets to

TYPE 531: RECTANGULAR STORAGE TANK WITH IMMERSSED HEAT EXCHANGER

the tank and only one outlet from the tank. However, by the use of a Type 11 mixing valve (2 inlets 1 outlet) or a Type 11 flow diverter (1 inlet 2 outlets) in combination with this tank model you can effectively simulate these odd paired systems. For example, if you wished to simulate 100 kg/h of water entering the bottom of the storage tank (node 5) through an inlet port and 100 kg/h of water entering the middle of the tank (node 3) from a different fluid stream with 200 kg/h leaving through the top of the tank (node 1) in one outlet you could specify the following parameters:

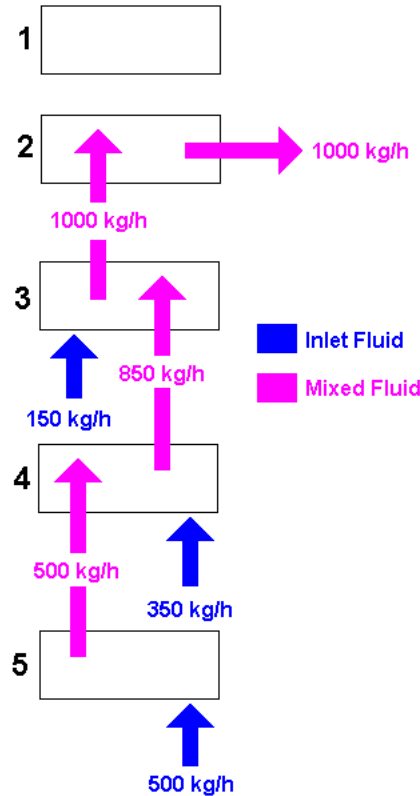
- “Inlet Flow Mode” = 1 : Indicates the user will specify the inlet and outlet locations
- “Entry node for Inlet 1” = 5 : Indicates the first inlet location is at the bottom of the tank
- “Exit node for Outlet 1” = 1 : Indicates the first outlet location is at the top of the tank
- “Entry node for Inlet 2” = 3 : Indicates the second inlet location is at the middle of the tank
- “Exit node for Outlet 2” = 1 : Indicates the second outlet location is at the top of the tank

A Type 11 flow mixer is then used to mix the two outlet streams from the tank (they are both at the same temperature) and you have now effectively modeled a two inlet, 1 outlet storage tank.

Fractional Inlets with Fixed Outlets (“Inlet Flow Mode” = 2):

The user must specify the outlet locations (nodes) for each of the streams. The temperatures at the outlets at any time are simply the average temperatures of the nodes containing the outlets over the simulation timestep. The user provides the inlet temperature and flow rate through each of the inlets. The inlet and outlet locations are also fixed throughout the simulation – they cannot be changed. The outlet flow rate from any outlet is simply the inlet flow rate from its paired inlet (for example 100 kg/h into inlet 1 causes 100 kg/h to exit the tank through outlet 1). The user also has the ability in this model to dictate which tank nodes receive the inlet fluid flow. This feature is useful to simulate cases where some of the inlet flow is not completely mixed within a node before moving on to the next node. For example, in high flow rate inlets, some of the inlet fluid may effectively “jet” past the inlet node and into several nodes beyond the inlet node. For this inlet fluid mode, the user must specify the fraction of unmixed inlet flow rate that ends up in each of the tank nodes as parameters to the model. For example let us consider the case where 1000 kg/h of cold mains water enters a warm storage tank (5 nodes) with high enough velocity to cause some of the fluid to “jet” into the two nodes above (nodes 4 and 3). Let us assume that 50% of the inlet fluid enters the bottom node and mixes with the fluid in that node and 35% of the inlet fluid mixes with the fluid in the node above the inlet node, and the remaining 15% of the inlet fluid mixes with the node 2 above the inlet (node 3). If the outlet from the tank is in node 2 we have the following flow pattern established for the model:

TYPE 531: RECTANGULAR STORAGE TANK WITH IMMERSED HEAT EXCHANGER



Temperature Seeking Inlets with Fixed Outlets (“Inlet Flow Mode” = 3):

The user must specify the outlet locations (nodes) for each of the streams. The temperatures at the outlets at any time are simply the average temperatures of the nodes containing the outlets over the simulation timestep. The user provides the inlet temperature and flow rate through each of the inlets. The inlet locations are then found by finding the tank node closest in temperature to the inlet temperature and directing the entire inlet flow stream into this tank node. The outlet flow rate from any outlet is simply the inlet flow rate from its paired inlet (for example 100 kg/h into inlet 1 causes 100 kg/h to exit the tank through outlet 1). In this model, the inlet fluid into a node is completely mixed with the storage tank fluid at every timestep before this fluid moves on to the next node (the fluid flow path is directly from the inlet node to the outlet mode). For example, water at 10 C and at a flow rate of 200 kg/h enters node 4 (outlet = node 1) of a storage tank which has an initial temperature of 30 C. The 10 C inlet flow stream mixes with the 30 C water in the tank node causing the tank node to fall to 25 C (for example). 200 kg/h of 25 C water then crosses the boundary into node 3 where it mixes with the fluid in this boundary before moving on towards node 2 and eventually out through the outlet in node 1. This inlet flow mode is very similar to the first inlet mode except the inlet location is not specified by the user but rather found from the corresponding temperatures.

The heat transfer due to flow into a tank node is then expressed as:

$$Q_{\text{flow},ij} = \dot{m}_{\text{in}} * \text{frac}_{\text{in},j} * C_p * T_{\text{in}} + \dot{m}_{\text{in},j-1} * C_p * T_{j-1} + \dot{m}_{\text{in},j+1} * C_p * T_{j+1} - \dot{m}_{\text{push}} * C_p * T_j$$

Eq. 531.31

where:

TYPE 531: RECTANGULAR STORAGE TANK WITH IMMERSED HEAT EXCHANGER

\dot{m}_{in} = inlet mass flow rate into the tank
 $\dot{m}_{in,j-1}$ = mass flow rate of fluid into node from node above
 $\dot{m}_{in,j+1}$ = mass flow rate of fluid into node from node below
 $frac_{in,j}$ = fraction of inlet fluid flow that enters this tank node
 C_p = specific heat of the fluid
 T_{in} = the temperature of the inlet fluid entering the storage tank
 T_j = temperature of the tank node
 T_{j-1} = the temperature of the tank node above the current node
 T_{j+1} = the temperature of the tank node below the current node

Mixing Effects:

At times, the nodes in the storage tank may become thermally unstable (a node has a higher temperature than the node above). If this happens, the model allows the user to "mix" the unstable nodes at a user-defined rate. While many of the tank models allow this instability mixing, most of the models calculate the effects using a simplifying assumption that speeds up the calculations but introduces some energy balance problems. The two most common tank models in TRNSYS calculate the temperatures of the nodes, then completely mix any nodes that are unstable at the end of the timestep to avoid problems. While this "averaging" of the tank temperatures (and hence an infinite flow mix between the nodes) is not a bad assumption, the energy balance is not correct as the tank losses, and other heat flows, are calculated with the tank temperatures before the mixing takes place. This model allows the user to utilize this method of mixing by specifying a negative value for the mixing flow rate input.

This model also allows the user a second method of calculating the mixing effect. In the second method the model calculates the elapsed time into the current timestep at which adjacent tank nodes would become unstable and then starts to mix the nodes at a user-defined flow rate until the nodes stabilize. In this manner (as separate differential equations for each unique mixing period are calculated by the model), the overall energy balance is calculated correctly. Once two nodes begin to mix, they keep mixing until the temperatures stabilize or until the end of the current timestep; whichever occurs later.

The formulation of the mixing heat transfer between nodes is:

$$Q_{mix,j} = \dot{m}_j * C_{p_j} * (T_j - T_{j+1}) + \dot{m}_{j-1} * C_{p_{j-1}} * (T_j - T_{j-1}) \quad \text{Eq. 531.32}$$

where

\dot{m}_j = mixing flow rate between this node and the one below
 \dot{m}_{j-1} = mixing flow rate between this node and the one above
 C_{p_j} = average specific heat of fluid between this node and the one below
 $C_{p_{j-1}}$ = average specific heat of fluid between this node and the one above
 T_j = temperature of current node
 T_{j+1} = temperature of node below current node
 T_{j-1} = temperature of node above current node

Care should be taken when specifying large mixing flows between nodes as small temperature differences between node calculation iterations can lead to relatively large energy balance errors. The model reports the energy balance closure at each timestep so the user should check the results upon changing the mixing flow rate.

Auxiliary Heating Effects:

This storage tank relies on external controls to add (or possibly remove) heat from the storage tank. This feature can be used to model auxiliary heating effects (electrical element, combustion heating, etc.). The user supplies heat input rates for each of the nodes in the storage tank through INPUTs to the model. For example, an aquastat model may sense the top node temperature of the storage tank and send a control signal to an auxiliary heater model that adds heat to the bottom node of the storage tank until the top node reaches its setpoint; at which time the control signal from the aquastat is disabled and input energy to the tank is ceased.

Miscellaneous Heat Inputs/Losses:

This model allows the user to specify the magnitude and location of miscellaneous heat flows into (positive value) and out of the storage tank. This feature was added to account for things such as a pilot light in a gas storage tank or other unaccounted for gains or losses.

Solving the Tank Equations

The differential equations for the tank nodes can be written as:

$$dT_{\text{Tank},j}/dt = (Q_{\text{in},\text{Tank},j} - Q_{\text{out},\text{Tank},j})/C_{\text{Tank},j} \quad \text{Eq. 531.33}$$

or expanded to:

$$dT_{\text{Tank},j}/dt = (Q_{\text{aux},j} - Q_{\text{hx},j \rightarrow k} - Q_{\text{loss},\text{top},j} - Q_{\text{loss},\text{bottom},j} - Q_{\text{loss},\text{edges},j} - Q_{\text{cond},j} - Q_{\text{flow},i,j} - Q_{\text{mix},j}) / C_{\text{Tank},j} \quad \text{Eq. 531.34}$$

These equations are then placed in the form:

$$dT/dt = aT+b \quad \text{Eq. 531.35}$$

and a and b values are found for each node. The b term holds the temperatures of other tank nodes and heat exchanger nodes. These temperatures in the b term are assumed to be constant for the solution of the nodal differential equations at their average value over the timestep. The nodal differential equation is then solved (as described earlier), new final and average nodal temperatures are calculated and the entire process is repeated until a converged solution is obtained. Then the heat exchanger nodal calculations are repeated until all tank and heat exchanger nodes are converged.

As described earlier, mixing may initiate during the timestep if temperature inversions are observed between adjacent nodes. If a temperature inversion occurs, the time into the timestep at which the nodal temperatures become unstable is calculated. The results at this point are stored and a new solution is calculated with mixing occurring between the two offending nodes. Temperature inversions are again checked and a new time at which inversions occur may be found. This process is repeated until no new temperature inversions are calculated at which time the results from the model are reported. As in all

TYPE 531: RECTANGULAR STORAGE TANK WITH IMMERSED HEAT EXCHANGER

TRNSYS components, the OUTPUTs from the model are assumed to be average values over the timestep.

A.3.4. Hoja técnica máquina de adsorción Sortech AC08



Clean Air Conditioning with Adsorption Chillers

Solar cooling • Trigeneration
District cooling • Cooling with process or waste heat



ACS 08 ✓



ACS 15 ✓

Using excess heat for room air-conditioning and process cooling

SorTech applies one of the oldest technology for cold generation – adsorption. Like in conventional air conditioning systems, cold is generated through evaporation of a refrigerant – in our case pure water. However, our machine consumes heat instead of electricity for driving the process.

Savings of up to 80% of power consumption and CO₂-emission

Our adsorption chillers contain neither compressors nor pumps. Only the electronic control unit and valve control consume electrical power of 7 or 14 W. Overall, seasonal electrical efficiency ratios of 10 and beyond can be achieved with the subsystem chiller and re-cooler.

Due to this energy savings our chillers avoid substantial CO₂-emissions. Water as natural refrigerant additionally reduces the impact on global warming, which is caused by leakage of conventional chillers.

Product series ACS – Adsorption chillers for small scale thermal cooling

Our chillers (ACS) – optionally in combination with an optimized re-cooler (RCS) – are available in two sizes with 8 and 15 kW nominal cooling capacity:

Basic performance data	ACS 08	ACS 15
Cooling capacity, max.	11 kW	23 kW
COP _{therm} , max.	0.65	0.65
Cooling capacity, nominal	8 kW	15 kW
COP _{therm} , nominal	0.60	0.60
Power consumption \varnothing	7 W	14 W
Nominal working conditions	Temperature in/out	
Driving heat circuit	72/65°C	
Heat rejection circuit	27/32°C	
Chilled water circuit	18/15°C	
Optimized re-cooler RCS 08 and RCS 15		

By interconnecting single modules larger capacities can be achieved.

☛ Cooling and heating as standard

Our ACS chillers can also be used for heating assistance. Heating capacities of 10-25 kW (ACS 08) or 20-50 kW (ACS 15) as well as an efficiency increase of 30-50% of conventional heating sources can be achieved.



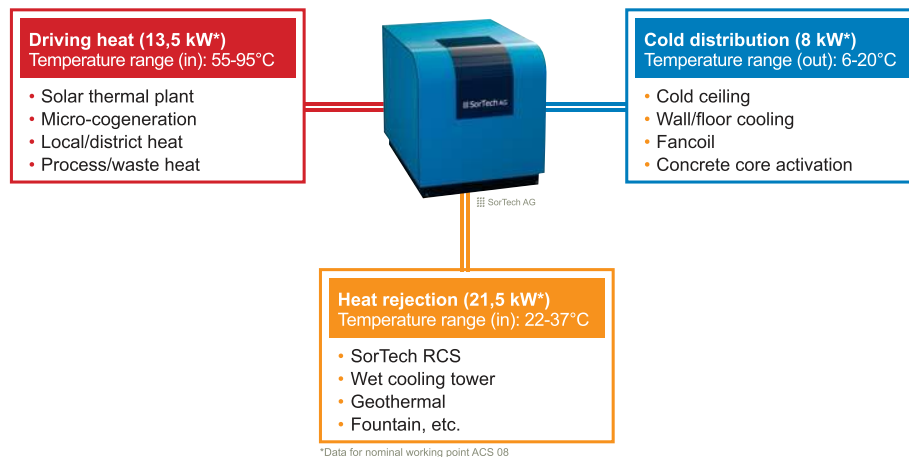
Broad range of applications for SorTech adsorption chillers

SorTech adsorption chillers can be used for a broad range of air-conditioning and cooling applications in small and medium-sized buildings and systems:

- Solar cooling
- Trigeration
- District cooling
- Cooling with process or waste heat

System of thermal cooling with wide possibilities of integration

The thermal cooling system based on adsorption technology consists of three hydraulic circuits: driving heat, cold distribution and heat rejection. Each system can consist of different components: e.g. solar thermal plant or micro-cogeneration as driving heat, cold ceiling or wall cooling as cold distribution and SorTech re-cooler RCS or geothermal as heat rejection.



Heat rejection – SorTech RCS

Both driving heat as well as the energy taken from the object to be cooled (= cold produced) have to be rejected to the environment. SorTech offers an optimized re-cooler (product series RCS) with highly efficient EC-fans, fresh water spraying for peak temperatures and integrated control for an energy efficient heat rejection.



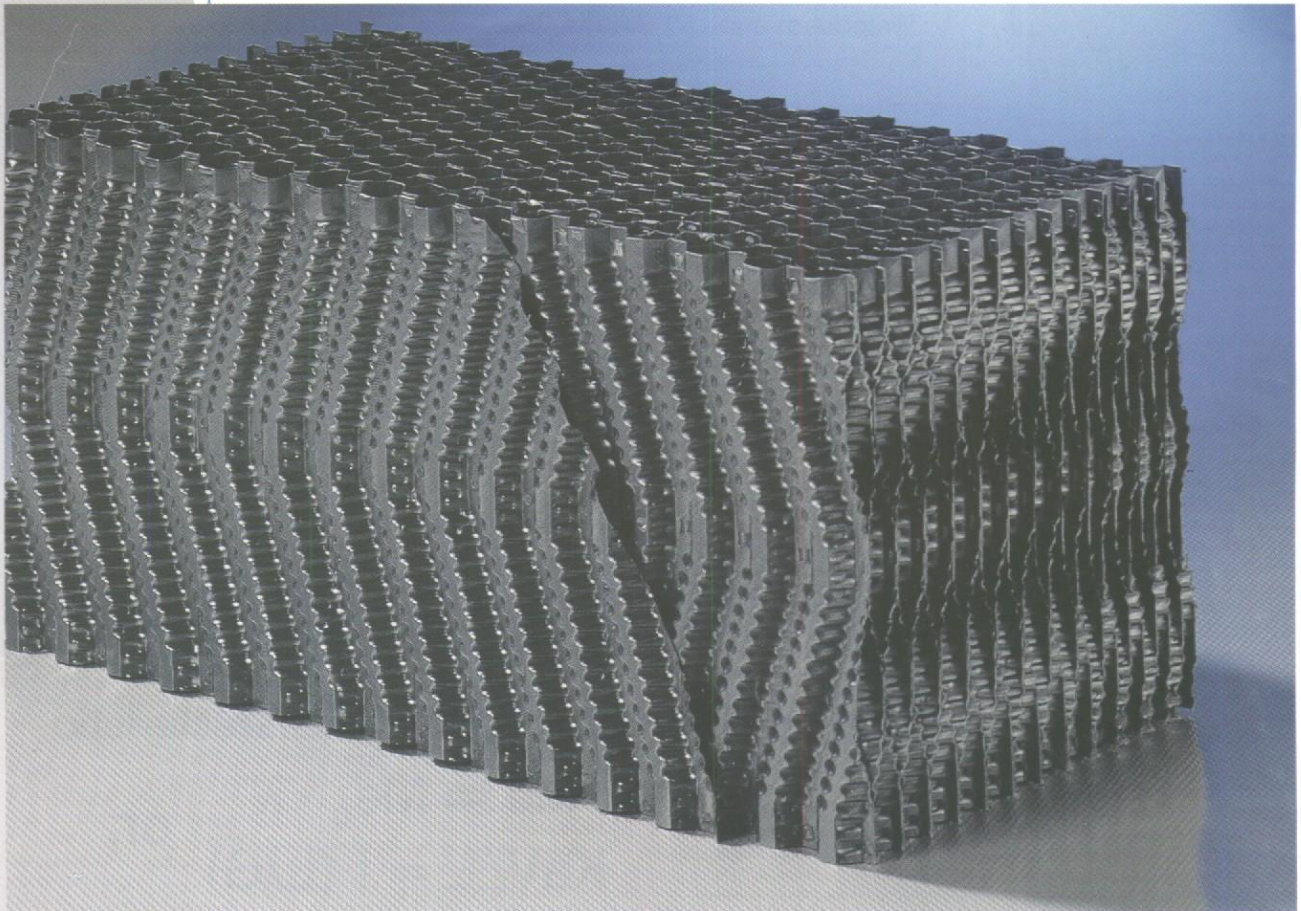
Main advantages and distinctive features at a glance

- Compact, high performing chiller
- Nominal cooling capacity already at 72°C, operation starting at 55°C driving energy possible
- Robust operations also with varying temperatures in all circuits
- High electrical efficiency of optimized subsystem (seasonal electrical efficiency ratios of 10 and beyond)
- Easy integration into overall system
- Up to 80% savings in primary energy and CO₂
- Completely clean technology - water as refrigerant
- Robust and proven technology
- Silent (ACS)
- Cooling and heating

A.3.5. Hoja técnica relleno de torre FKP 312/612

2 H PP Cooling Tower Fill FKP 312/612

welded polypropylene structured media



High temperature resistant
Minimum pressure drop
Environmental friendly
Longest service life
Superior heat exchange properties

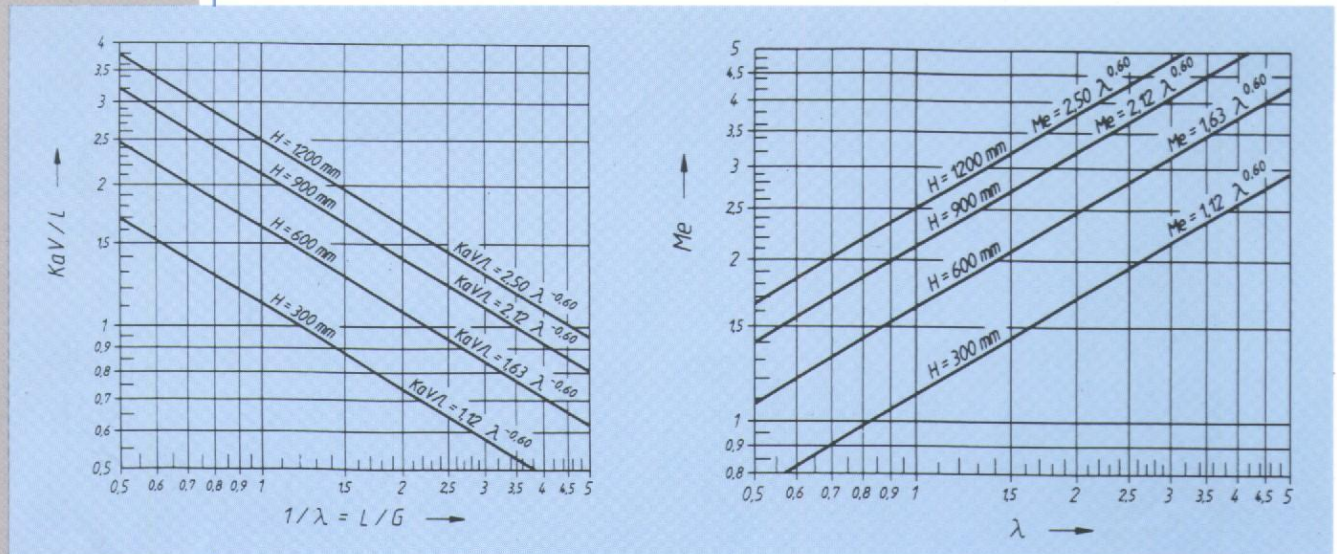
2H Kunststoff GmbH

Dieselweg 5
D-48493 Wettringen
Telefon 02557/9390-0

2H PP Cooling Tower Fill FKP 312/612 for counterflow applications

Standard dimensions L/W/H:
2.400 x 300 x 600 (or 300) mm
Surface of exchange: 240 m²/m³
Flute size: 12 mm
Material: Polypropylene UV resistant
Waterload: max. 30 t/m²/hr.

Distance of supports : max. 1.000 mm
Width of supports : 50 mm
Spec. weight : 1,03 gr/cm³
Dry weight : 29 kg/m³
Average foil thickness : 0,35 mm
Max. service temp. : 80 °C. (short)



Options for cooling tower fill characteristic

$$Me = Me_0 \cdot \lambda^m \quad \text{or,}$$

$$KaV/L = f(L/G)$$

Applications: Heat exchanging, serial modular cooling towers, counter- or crossflow.

Cross flow scrubbers, gaswashers.

Biotowers, nitrification.

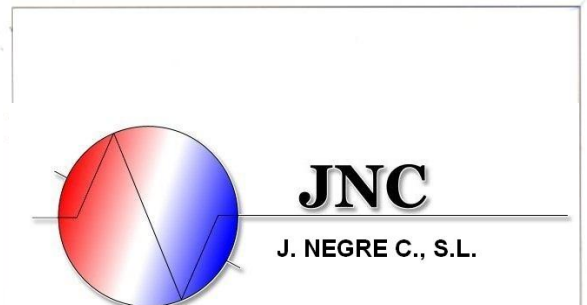
Humidifiers.

Biorotors.

Our PP fills can also be delivered for high temp. application, permanent exposure to 100 °C.

On request we also deliver special compounded PP fills meeting fire retardant grade B₂ (DIN 4102) or UL 94 V₂.

FKP 312/612 is also available in rigid PVC version (FKC 312/612) with absolute identical heat transfer performance as showed above.



A.3.6. Hoja técnica radiador



Shanghai Shenglin M&E Technology Co., Ltd.

Fin Type	Copper Tube O.D. (mm)	Row Space (mm)	Hole Space (mm)	Fin Thickness (mm)	Fin Space(mm)				
					Flat fin	Sine wave with blade fin	Smooth sine wave fin	Window fin	Sesamoid fin
A	7	12.7	21	0.105	/	/	1.3	1.3	/
B	7	13.2	17.6	0.105	/	/	1.3	1.3	/
C	7	12.7	20.4	0.105	/	/	1.3~1.8	1.3~1.8	/
D	7.94	15.88	25.4	0.105	1.8~3.0	1.8~3.0	1.8~3.0	1.8~3.0	/
E	7.94	19.05	22	0.105~0.13	1.4~3.0	1.4~3.0	1.4~3.0	1.4~3.0	/
E	9.52	22	25.4	0.105~0.15	1.6~3.2	1.6~3.2	1.6~3.2	1.6~3.2	/
F	9.52	22	25.4	0.18~0.4	3.5~6.35	/	/	/	/
G	9.52	21.65	25	0.105~0.18	1.6~3.2	1.6~3.2	1.6~3.2	1.6~3.2	/
H	9.52	21.65	25	0.15~0.24	3.2~6.35	3.2~6.35	3.2~6.35	/	/
I	12.75	27.5	31.75	0.115~0.15	1.5~3.5	1.5~3.5	1.5~3.5	1.5~3.5	1.6~3.2
J	15.88	33	38.1	0.115~0.15	1.5~4.0	1.5~4.0	1.5~4.0	/	/
K	15.88	34.64	40	0.115~0.15	/	2.6~3.5	2.6~3.5	/	/

Anexo B.

Modelado CAD

En este proyecto una de las dificultades principales consiste en crear el dispositivo disipador y someterlo a diferentes cálculos. En el caso que ocupa este anexo se expondrá el proceso de diseño de esos modelos 3D.

B.1. Solidworks

El modelo está compuesto por piezas diseñadas para la ocasión. El programa utilizado para ello es el *Solidworks* en este caso. También para la integración de las piezas extraídas del catálogo virtual y el ensamblaje del conjunto de piezas se ha utilizado el programa informático que ocupa este apartado.

El diseño de las piezas del prototipo no seleccionadas del catálogo virtual, cumplen los siguientes requisitos:

- Diseño que facilite el montaje posterior
- Minimizar las operaciones de mecanizado en las piezas

Hay que destacar que se han implementado en el diseño diferentes detalles con el objetivo de conseguir el flujo deseado en el dispositivo, un montaje siguiendo la metodología poka-yoke o de montaje a prueba de errores.

Las piezas diseñadas han sido las siguientes:

- El estanque (ver figura [B.1](#)) se ha realizado uniendo piezas sencillas: base, laterales, frontal, caja de registro para bomba, rebosadero y paredes. En un diseño posterior se podría realizar un diseño integrado, sobre el que simplemente se encajen y fijen las paredes y así reducir el tiempo de montaje.

En la figura [B.1](#) se puede observar una pared lateral con aspecto transparente para poder mostrar la caja de registro de la bomba, así como el biselado del rebosadero. El diseño de dicho rebosadero tiene en cuenta la posibilidad de lluvia al utilizarse en el exterior.



Figura B.1: Piezas diseñadas ex profeso: estanque

- La estructura que permite el bombeo de fluido desde el estanque hasta el techo esta formada por las dos paredes paralelas que forman un conducto rectangular por cuyo interior asciende el agua. Dichas paredes pueden observarse en la figura [B.2](#).
- El techo del dispositivo es la pieza por la que tras ascender, el fluido, discurrirá por su superficie dirigido hacia los pilares en los que se producirá el efecto cascada. En la figura [B.2](#) se observan las diferentes ranuras en las que se posicionarán los pilares. Además se han incluido dos aberturas adicionales: superior e inferior. En la abertura superior emanará el agua bombeada. Mientras que la ranura inferior se ha incluido en el diseño para evitar cascadas fuera del estanque en situaciones de lluvia o de que exista fluido sobrante de las cascadas.



Figura B.2: Piezas diseñadas ex profeso: pared y techo

- Se ha buscado un montaje sencillo y simple, de manera que los 9 pilares del diseño se pueden dividir en 2 grupos:
 - ◇ El pilar central incluido en la mejora del diseño inicial.
 - ◇ Las 4 parejas de pilares iguales, cada pareja distribuida simétricamente en el prototipo. como se ha observado en la figura [B.2](#).

Como se ha comentado anteriormente se ha utilizado la metodología poka-yoke, así que cada pareja de pilares es diferente y sólo se puede ensamblar en una posición, ya que el diseño impide su correcta colocación si no es en la posición adecuada. En la figura [B.3](#) en la imagen de la derecha se ha marcado el perfil de dos pilares diferentes, en los que se muestra la diferencia de ángulos de ensamblaje.

Un detalle que se debe de tener en cuenta en el diseño de los pilares es la adherencia del fluido en las cascadas, para ello como se observa en la figura [B.3](#) en la imagen de la derecha la curvatura del espacio de caída de la cascada, favoreciendo dicha adherencia.

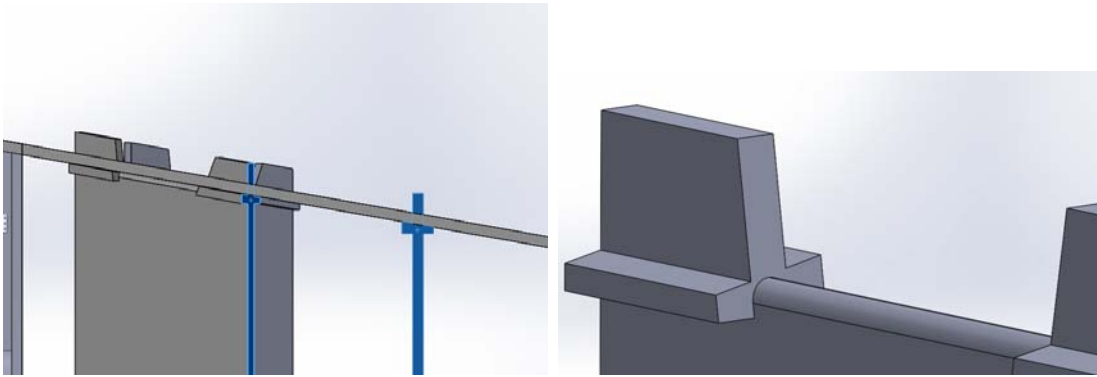


Figura B.3: Detalle del diseño de los pilares

Los planos en formato digital, así como los archivos digitales de las piezas y del montaje se encuentran en el CD anexo.

B.2. Hilti Profis

La marca comercial *Hilti* desarrolla, manufactura y comercializa productos para la construcción y para las industrias de mantenimiento de edificación, principalmente profesionales.

Su catálogo permite seleccionar entre una amplia gama de productos. Con el objetivo de facilitar a los profesionales una elección eficiente de sus artículos. La marca dispone de forma gratuita la plataforma *Hilti Profis*, la cual permite la descarga de diversas herramientas de cálculo como son: *Anchor Design Center*, *Descking Design Center*, *Firestop Design Center*, *Fastening Design Center* y *Strut Design Center*. La función de estos programas son el cálculo y la selección de anclajes, cubiertas, barreras antiincendios, tornillería, uniones y puntales. Utilizando como base el módulo BIM/CAD donde se dispone de todo el catálogo en versión digital en multitud de formatos CAD 2D y 3D como se observa en la figura [B.4](#).

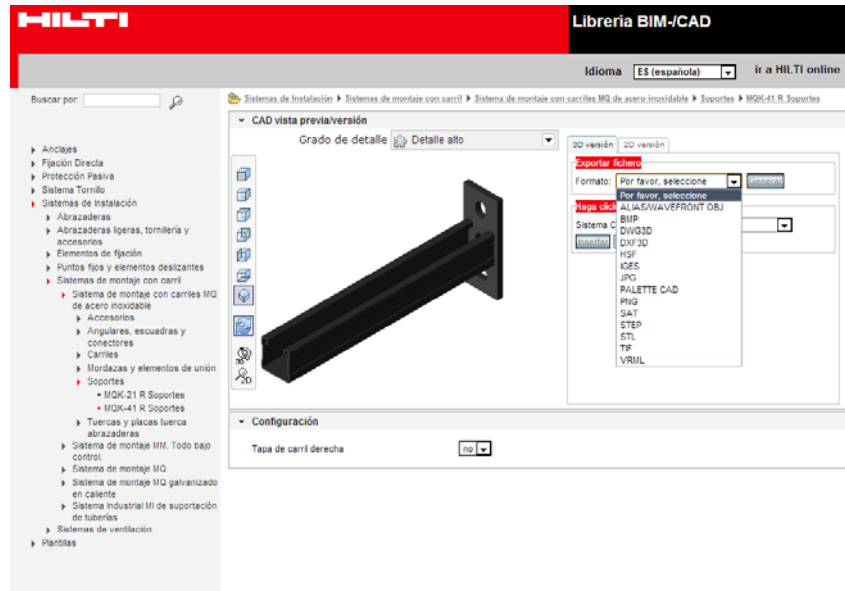


Figura B.4: Librería BIM/CAD del programa Hilti Profis

La estructura interna del prototipo está compuesta por elementos seleccionados de este catálogo con las referencias de la tabla B.1

Referencia Hilti	Descripción
MQK-21	Soporte de estructura de un carril
MQK-21D	Soporte de estructura de doble carril
MQW-3	Pletina de unión entre barras a 90°
MQN	Tornillo autoblocante y autofijante
MQ-21	Barra estructural
MQ3D-W90	Unión entre barras a mismo nivel a 90°
MQM-M8	Tuerca autofijante para tornillo de métrica 8
MQM-M12	Tuerca autofijante para tornillo de métrica 12
MQZ-R1	Cubierta de estructura interna

Tabla B.1: Tabla de referencias Hilti utilizadas.

Se puede visualizar en la figura B.5 dicha estructura interna formada por los componentes citados en la tabla B.1

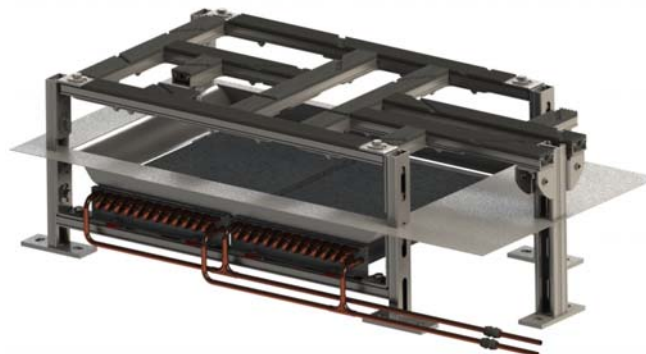


Figura B.5: Estructura interna del prototipo

B.3. Ensamblaje

La unión de las piezas diseñadas ex profeso y las de catálogo se realiza en el programa *Solidworks* utilizando las operaciones pertinentes. Se muestra la vista explosionada del conjunto en la figura B.6, en la que se distinguen los principales grupos de montaje:

- Estanque
- Estructura interior
- Pilares
- Grupo ventilador
- Paredes posteriores
- Techo

De esta manera, se puede observar un montaje sencillo de los elementos, ya que los pilares están encajados entre la estructura interna y el techo en los alojamientos diseñados para ese propósito.



Figura B.6: Vista explosionada del ensamblaje completo.

Anexo C.

Guía de Usuario para Autodesk Flow Desing

Autodesk Flow Design simula el flujo de aire alrededor de vehículos, edificios, equipamiento de exteriores o de otros objetos que puedan ser susceptibles de ser experimentados en un túnel de viento virtual. Dicho túnel permite:

- Visualización fácil y sencilla de la interacción del diseño con el viento.
- Permite conocer resultados de presión y velocidad desde el primer momento, permitiendo realizar comparativas de forma sencilla.
- Dispone de una gran integración con multitud de formatos CAD, lo que facilita el uso entre programas.
- Visualización de resultados de forma directa sobre el diseño en 2D y 3D.

En este anexo se realiza una breve guía de usuario especificando las principales características y variables del programa, utilizando como ejemplo una de las geometrías del proyecto.

El uso del programa es sencillo, desde el menú de inicio tenemos la posibilidad de acceder a diferentes ejemplos de prueba o de importar la geometría a calcular como se puede observar en la figura [C.1](#).

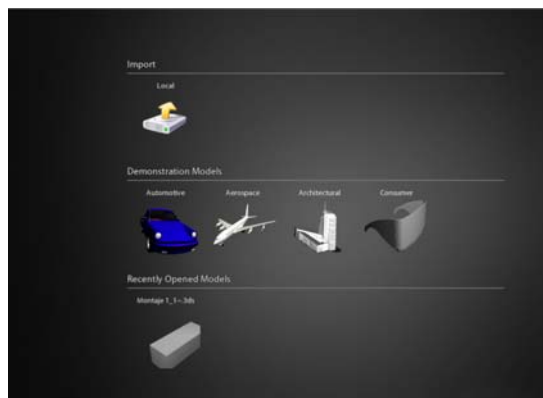


Figura C.1: Menú de inicio del programa *Autodesk Flow Desing*.

C. Guía para Autodesk Flow Desing

Una vez importado el diseño al programa se comprueba que la orientación es la correcta respecto al flujo de viento. En caso de que no sea el idóneo se reorienta en la pestaña *orientation*. Una vez orientado correctamente el programa comenzara a ofrecer resultados en la representación por defecto, como se muestra en la figura [C.2](#).

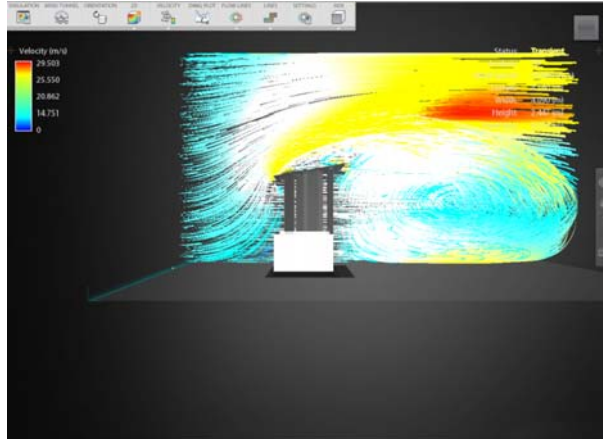


Figura C.2: Representación por defecto en *Autodesk Flow Desing*.

La resolución de la simulación así como las unidades del cálculo quedan definidas en la pestaña *simulation settings*.

Con el objetivo de establecer las condiciones de contorno apropiadas al cálculo que se desea simular en la pestaña *wind tunnel* se puede modificar la velocidad del viento, mientras que en la visualización aparece un volumen traslúcido azul y unas flechas en cada lado del túnel, cada una de ellas permitirá modificar la dimensión de dicho túnel en esa dirección. En la figura [C.3](#) se puede visualizar la situación descrita.

Cabe destacar que al profundizar en la guía de usuario se recomienda que para realizar procesos comparativos la velocidad por defecto de 10 m/s es la más rápida en converger en una solución estable.

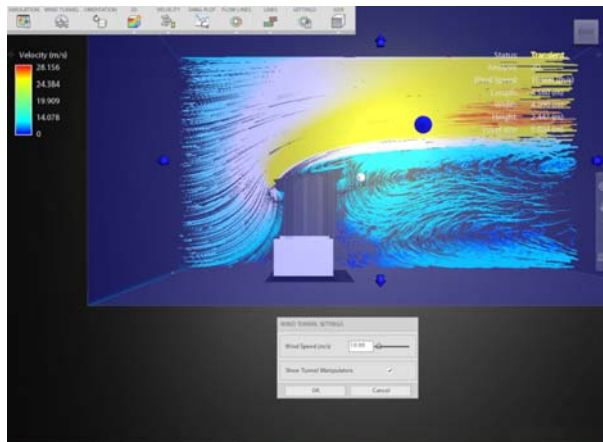


Figura C.3: Representación de la pestaña *wind tunnel* en *Autodesk Flow Desing*.

C.1. Representación

El programa *Autodesk Flow Desing* permite la visualización de resultados en 2D y 3D como se observa en la figura [C.4](#).

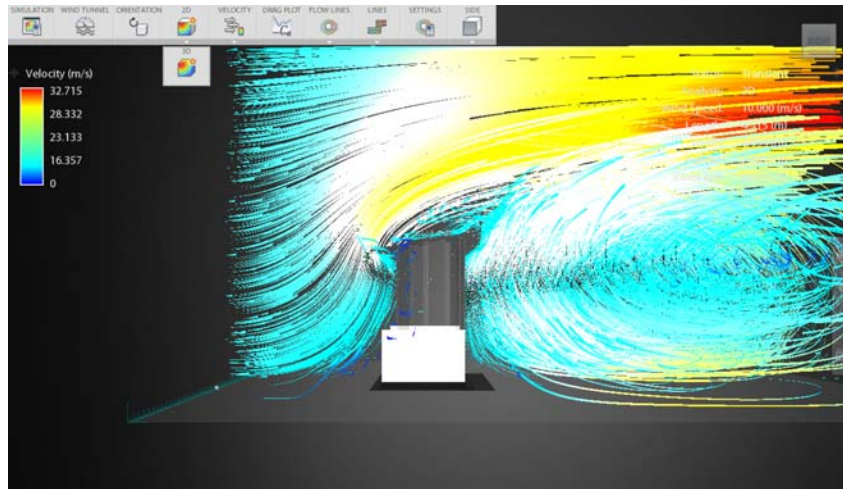


Figura C.4: Representación de la pestaña *2D/3D* en *Autodesk Flow Desing*.

Además dicha representación es posible atendiendo a las variables de velocidad (*velocity*) y presión (*pressure*) (ver figura [C.5](#)).

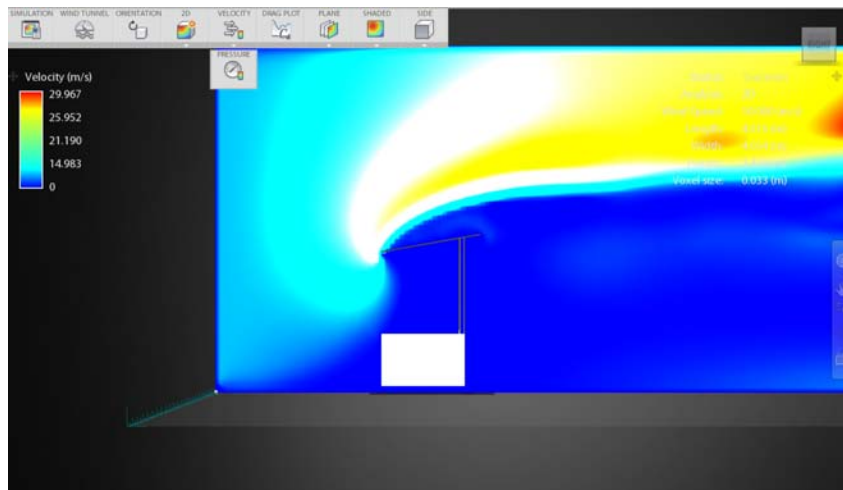


Figura C.5: Representación de la pestaña *velocity/pressure* en *Autodesk Flow Desing*.

Junto a todas las posibilidades anteriores se puede adjuntar la gráfica correspondiente al cálculo del coeficiente de arrastre (*drag coefficient*) y del coeficiente de arrastre medio (*average drag coefficient*) que el propio *Autodesk Flow Desing* también calcula. Una ejemplo de esta representación conjunta es la figura [C.6](#).

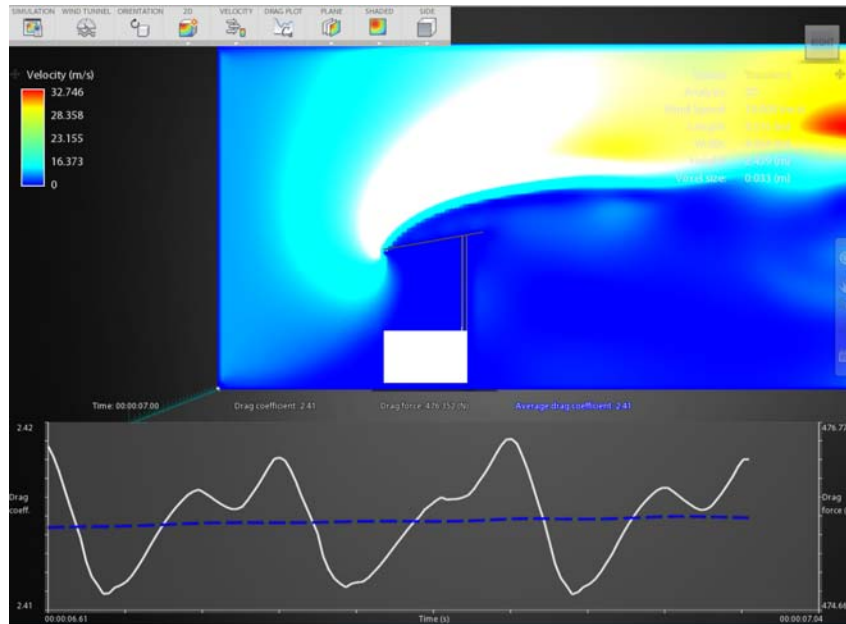


Figura C.6: Representación del coeficiente de arrastre en *Autodesk Flow Desing*.

Autodesk Flow Desing permite diferentes tipos de visualizaciones de los resultados. Estos son plano de corte (*plane*) o líneas de flujo (*flow lines*).

La visualización *plane* permite dos configuraciones visuales como se muestra en la figura [C.7](#).

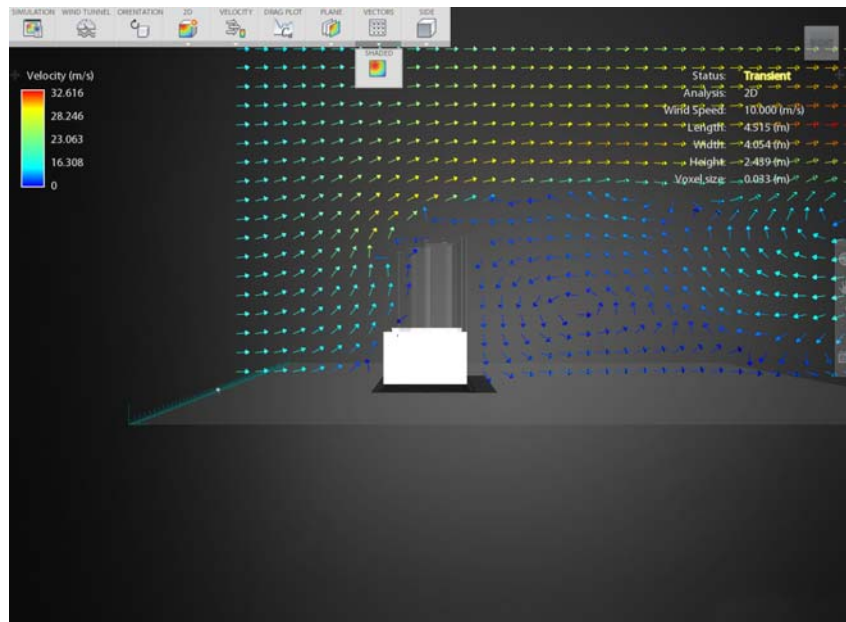


Figura C.7: Representación de la visualización tipo *plane* *Autodesk Flow Desing*.

Las líneas de flujo o *flow lines* tienen más posibilidades de configuración como se representa en la en la figura [C.8](#).

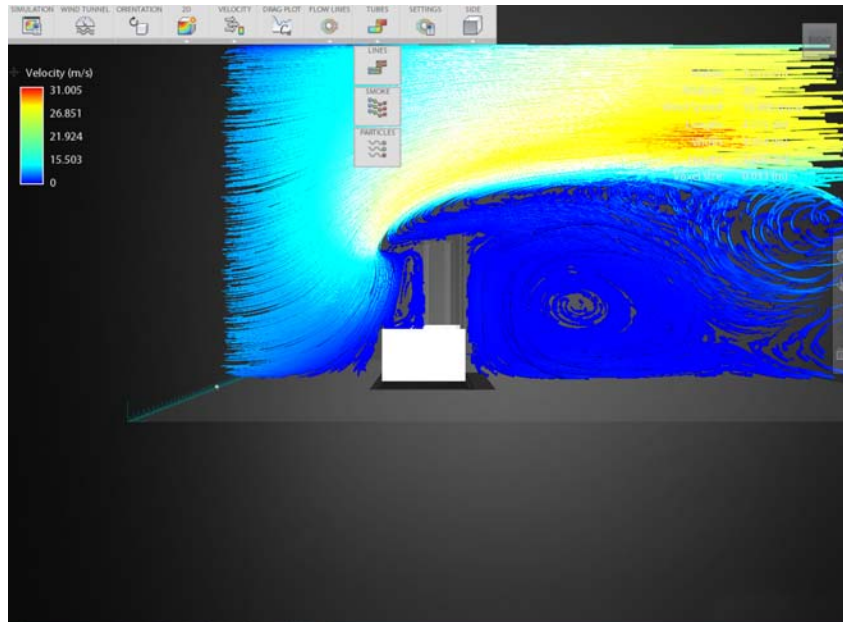


Figura C.8: Representación de la visualización tipo *flow lines* Autodesk Flow Desing.

Cualquiera de estas representaciones cuya visualización se ha realizado en el plano vertical puede realizarse también en el plano horizontal. La opción de cambio se encuentra en el último botón de la barra superior. El programa además nos permite la elección de la altura de este plano simplemente moviendo la esfera gris situada sobre la barra graduada en el lateral derecho del dibujo. Esta opción se puede visualizar en la figura [C.9](#) mostrada a continuación.

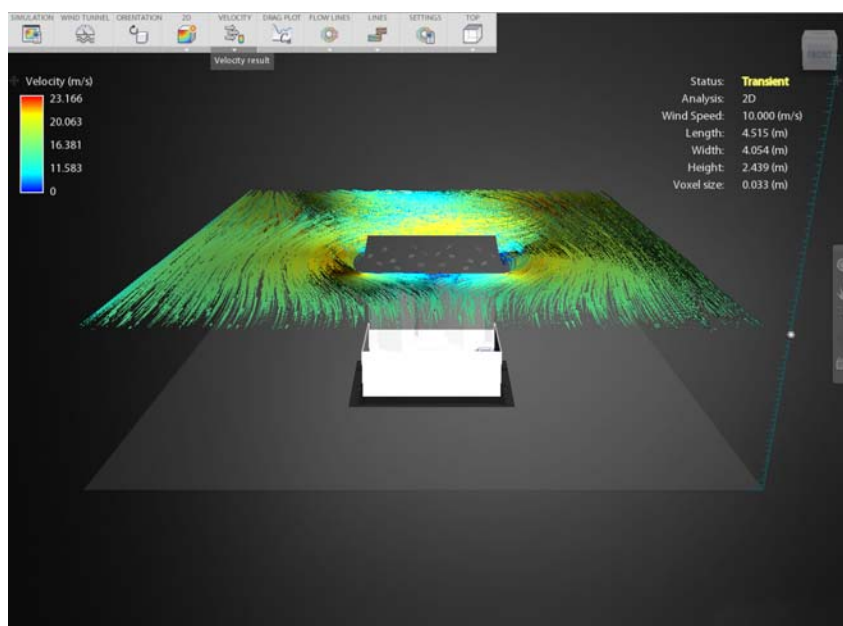


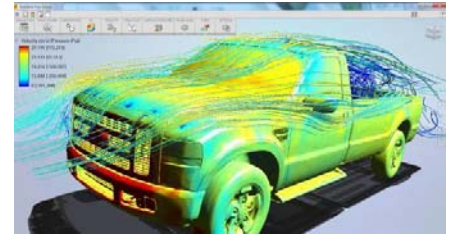
Figura C.9: Representación del plano horizontal en Autodesk Flow Desing.

C.2. Documentación Oficial

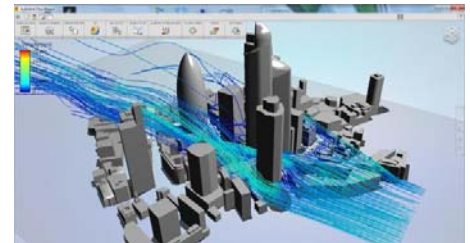
Autodesk® Flow Design

Autodesk® Flow Design (formerly Project Falcon) simulates air flow around vehicles, buildings, outdoor equipment, consumer products, or other objects of your choosing in a virtual wind tunnel. Flow Design technology is extremely geometry tolerant and easy to use, enabling you to begin seeing and understanding air flow behavior within seconds of starting the application. Flow Design allows you to:

- Quickly and easily visualize how your design will interact with the wind. See where wakes and high and low pressure regions will form in a virtual wind tunnel.
- Start with results. Flow Design enables you to see results almost immediately and then allows you to explore the effect of different conditions.
- Use your existing design data. Flow Design reads a variety of CAD file types and can accept everything from conceptual designs all the way to fully detailed models with little or no preparation necessary.
- Get results within CAD. Inventor and Revit users have the option to use Flow Design right inside their design environment; making it easier to get insight during the design process.
- Visualize results interactively by creating dynamic 2D and 3D flow line animations, vector plots, iso surfaces, and velocity or pressure results on planes.



In automotive applications Flow Design shows regions where air will recirculate, provide an understanding of the size and location of the wake region, and identifies high and low pressure regions on the body, and approximates the drag force and coefficient.



Flow Design can quickly model wind behavior around closed buildings and provide an understanding of where there may be risks of elevated velocities and/or stagnant regions.

Below are several resources for helping you learn more about Flow Design and where and how to access it.

Flow Design Application Overview: <http://www.autodesk.com/flowdesign-overview>

Brief overview of Flow Design and what it's used for.

Autodesk Store: <http://www.autodesk.com/store/flow-design>

If you don't have Flow Design, you can go here to get access.

Autodesk Education Community: <http://students.autodesk.com>

We are committed to our student users. If you qualify for educational use, you can get access here.

Flow Design Online Help: <http://www.autodesk.com/flowdesign-help>

Searchable text and video based help documentation on how to use Flow Design

Flow Design Forum: <http://www.autodesk.com/flowdesign-forum>

The place to go to ask questions and find answers alongside other Flow Design users

Flow Design IdeaStation: <http://www.autodesk.com/flowdesign-ideas>

The place to go to share your ideas and enhancement requests with the Flow Design development team

Account Management Page: <https://accounts.autodesk.com/>

Review and manage your account details, named users, and contract. Download the product installer.

Anexo D.

OpenFOAM

OpenFOAM (*Open Field Operation and Manipulation*) es un programa informático de código abierto (open-source software) dedicado al cálculo CFD. Código abierto significa que *OpenFOAM* es un programa distribuido y desarrollado libremente. Esto implica que los usuarios son capaces de leer, modificar y redistribuir la nueva versión de código fuente.

Dicho programa contiene una cantidad importante de solvers, donde el usuario tiene libertad para modificarlos, personalizarlos e incluso implementar los suyos propios. Este factor es importante a nivel académico y profesional.

Los solvers numéricos implementados por defecto son capaces de simular una gran cantidad de tipos de flujo, lo que incluye reacciones químicas, sistemas turbulentos, transferencia de calor, etc. Además, dispone de herramientas específicas para el mallado y post procesado de resultados .

Una característica negativa es que sólo está disponible para el sistema operativo *Gnu/Linux*. Este factor puede ser inicialmente negativo, pero existen versiones de distribuciones muy desarrolladas como *Ubuntu* de instalación rápida y enfocadas al usuario común.

Las instrucciones para la instalación de *OpenFOAM* se pueden encontrar en su pagina web oficial (www.openfoam.com), la cual se muestra en la figura D.1.

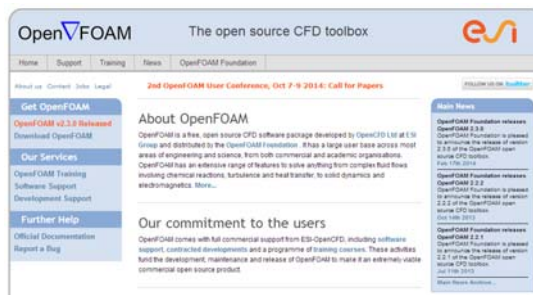


Figura D.1: Página Web www.openfoam.org

En dicha página web es posible consultar el manual de usuario (www.openfoam.org/docs/user/), ver los solvers disponibles junto con una breve descripción del fenómeno físico para el que han sido diseñados; acceder a los modelos físicos empleados a través de librerías, etc.

Acerca del modo de empleo de *OpenFOAM* por parte del usuario, decir que el software no presenta una interfaz genérica como la mayoría de gente está acostumbrada. Su modo de trabajar está basado en la ejecución de una serie de comandos específicos en el terminal de *GNU/Linux*, así como en disposición característica de carpetas y archivos. El aprendizaje de este programa de cálculo no es tan difícil si se utiliza la guía de usuario y los tutoriales, con ellos se puede asimilar los aspectos básicos de ejecución, simulación y post-procesado de resultados, siempre que las simulaciones se ajusten a los solvers proporcionados. Para ello se utilizan ejemplos prácticos incluidos en la instalación del programa. Se debe tener en cuenta que dichos ejemplos no incluyen ni guía de planteamiento ni explicación aclaratoria.

Este punto no hace que el empleo de *OpenFOAM* sea más complejo sino que hace que su curva de aprendizaje sea grande y costosa en tiempo. Se recomienda visitar una de las paginas web más importantes sobre el cálculo computacional, como es *CFD Online* (www.cfd-online.com/). En la página principal del foro se puede consultar información sobre cualquier tema relacionado con el calculo CFD.

Este foro es seguido y utilizado por una gran cantidad de personas a nivel internacional. Es una herramienta de solución de dudas ya que es posible encontrar la solución que se ha planteado a un problema similar al buscado y en caso contrario plantearlo libremente.

D.1. Estructura de archivos

En este apartado se describe la estructura de archivos necesaria para que al ejecutar una aplicación o solver, este funcione correctamente.

En los párrafos comentados a continuación se realiza una descripción básica de la estructura y del contenido del directorio base del problema para poder efectuar el análisis numérico. La correcta codificación de cada uno de los archivos precisa de un estudio exhaustivo del manual de usuario, o en el caso de que el fenómeno físico a analizar coincida con alguno de los ejemplos disponibles en OpenFOAM podría bastar con adaptar el código a las condiciones buscadas.

De este modo sin perder el esquema mostrado [D.2](#), se procede a detallar cada uno de los archivos y subdirectorios que debe presentar el directorio principal del estudio.

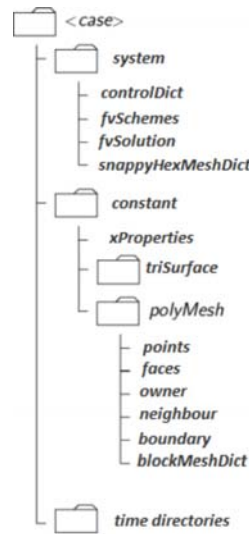


Figura D.2: Estructura de archivos de un caso genérico en OpenFOAM

Los directorios de las diferentes simulaciones deberán situarse dentro de una carpeta con nombre *run*. Dicha carpeta está en el directorio propio del usuario de *OpenFOAM* siendo la dirección completa *home/user/OpenFOAM/user-2.2.2/run/case*. Una vez posicionada la carpeta denominada CASE, dicha carpeta será el directorio en el cual se encuentran todos los demás archivos y subdirectorios del estudio. Normalmente el usuario asigna un nombre relacionado con el estudio a realizar a este directorio CASE.

Se deben crear dentro de «CASE» los siguientes subdirectorios que se comentan a continuación, siguiendo la disposición de la figura [D.2](#) si se desea realizar un análisis similar al del proyecto:

- Subdirectorio *system*. Mediante los archivos de esta carpeta se establecen los parámetros asociados al proceso de resolución numérica.
 - ◇ *controlDict* describe los parámetros de control de la ejecución, como son el tiempo de inicio y de fin de la ejecución, el paso temporal y la monitorización de datos.
 - ◇ *fvSchemes* controla los esquemas de discretización a utilizar en el proceso de cálculo.
 - ◇ *fvSolution* determina los solvers para cada una de las ecuaciones, las tolerancias, los coeficientes de relajación y otros controles de algoritmo.
 - ◇ *snappyHexMeshDict* definirá la configuración de la función *snappyHexMesh*, los ejemplos para el aprendizaje de esta herramienta y las diferentes opciones de su configuración se detallan en el recurso bibliográfico [\[6\]](#). La función *snappyHexMesh* incluida en *OpenFOAM*, es un generador de malla tridimensional basado en hexahedros (*hexaedra*) y sus divisiones (*split-hexaedra*) triangulados automáticamente desde la superficie de una geometría en un formato CAD («*.stl», «*.obj», etc).

- Subdirectorio *constant*. Este subdirectorio contiene una descripción completa del mallado y de las propiedades pertinentes de modelos de simulación y/o de los fluidos que interactúan en dicha simulación.
 - ◊ *triSurface* subdirectorio en el que se guardará el modelo CAD al que acudirá la función *snappyHexMesh* para crear el mallado. Los requisitos del modelo guardado en esta carpeta se especifican en el apartado [3.2](#).
 - ◊ *Polymesh* subdirectorio encargado de indexar la descripción del mallado.
 - *points*
 - *faces*
 - *cells*
 - *neighbour*
 - *boundary*
 - *blockMeshDict* merece mención especial, puesto que describirá el tamaño del túnel que se busca simular, siendo este mismo el dominio del cálculo. Como parámetros se deberá especificar en el archivo la división superficial y exterior del mallado de dicho dominio. En el caso del fenómeno físico que se busca simular, para obtener una validez de los datos, se deberá considerar las medidas características de cada dimensión del modelo a tratar y escalar el tamaño del túnel como se especifica en el recurso bibliográfico [\[15\]](#).
- Estos archivos contienen una gran cantidad de elementos geométricos y la información que los sitúa en el espacio, ordena y relaciona entre ellos componiendo el mallado.
- ◊ *RASProperties* define el modelo de turbulencia que se va a emplear en la simulación y las propiedades necesarias para el cálculo de dicha turbulencia.
 - ◊ *transportProperties* contempla las propiedades de los fluidos que intervienen en la simulación, así como las propiedades necesarias para que el solver escogido desarrolle su cálculo.
- Subdirectorio *time*. Cada uno estos subdirectorios dispone de un conjunto de archivos con datos numéricos correspondientes a campos de velocidades, presiones y a cualquier otra variable física presente en el estudio. Si los datos proceden por parte del usuario como valores iniciales y condiciones de contorno, se deberán guardar dentro de una carpeta designada como «0». Los resultados numéricos obtenidos por *OpenFOAM* aparecen en unas carpetas cuyos nombres son números. El número guarda relación con el número de iteración en que finaliza el cálculo, ya sea porque ha alcanzado cierta precisión o un número determinado de iteraciones o en el caso de analizar un problema transitorio, el número corresponde al tiempo físico en que se almacenan los datos.

Después de enumerar los directorios y subdirectorios necesarios para formar la estructura del problema. Desde el terminal de *GNU/Linux* una vez posicionado en el directorio «case» se ejecuta el solver escogido, lo que da lugar al comienzo del cálculo computacional.

D.2. Aplicación al proyecto

En el caso que nos compete se ha usado un generador de malla incluido por defecto en el sistema llamado *snappyhexmesh* como se ha comentado anteriormente su función es la de realizar el mallado de un volumen definido y un archivo tipo «*.obj» alojado en dicho volumen. También se hace uso de la función *parallel* utilizada para repartir el cálculo den varios procesadores.

El método de computación paralela utilizada en *OpenFOAM* se conoce como descomposición por dominios, en el cual la geometría y los campos asociados a ella, se rompen en fragmentos destinados cada uno de ellos a procesadores separados para su cálculo. El proceso de computación paralela sigue los siguientes pasos:

- Descomposición de la malla y los campos de variables.
- Ejecutar el solver en paralelo
- Realizar el post-procesado de los datos de cada campo.

D.2.1. Caso práctico motorBike

En la base de datos de casos prácticos se dispone de un túnel de viento caracterizado para una motocicleta a una velocidad a 20 m/s (72 km/h). Para este caso llamado en la guía «motorBike» el mallado se genera también con *snappyHexMesh*. En este caso la configuración de su mallado es mucho más refinado como se puede observar en la figura [D.3](#) lo que aumenta significativamente el tiempo de cálculo.



Figura D.3: Malla superficial del caso práctico motorBike en *OpenFOAM*

Debido a la semejanza de las simulaciones tomaremos la estructura del tutorial y modificaremos los ficheros pertinentes para adaptar dicha estructura a nuestro caso particular. Para que los resultados sean válidos se debe modificar:

- Las dimensiones del volumen considerado, la posición y medidas del mallado y su contorno en los ficheros *blockMeshDict* y *boundary*
- Las consideraciones respecto al generador de malla en el fichero *snappyHexMeshDict* reduciendo la cantidad de células de cálculo, las diferentes capas de refinado sobre la superficie del modelo final y adaptar sus parámetros a dominio definido en *blockMeshDict*.

Modificar en el fichero *snappyHexMeshDict* la capacidad del cálculo en paralelo adaptándolo al hardware disponible de 1 procesador a 4 procesadores, especificando que dimensiones se asignan a cada procesador, de esta manera se consigue reducir el tiempo físico de cálculo.

- Adaptar las condiciones de contorno y las propiedades del fluido considerado, en la carpeta «0» y en los ficheros *transportProperties* y *RASProperties*.
- Incluir el archivo del modelo «*.obj» en la carpeta *triSurface*.
- Adecuar los parámetros del fichero *controlDict* a las nuevas condiciones de simulación.

D.3. Resultados

Tras ejecutar el solver y realizar un post-procesado adecuado en los datos se obtienen las conclusiones gráficas representadas en la figura [D.4](#) y [D.5](#) para las simulaciones del tutorial y la efectuada en el proyecto.

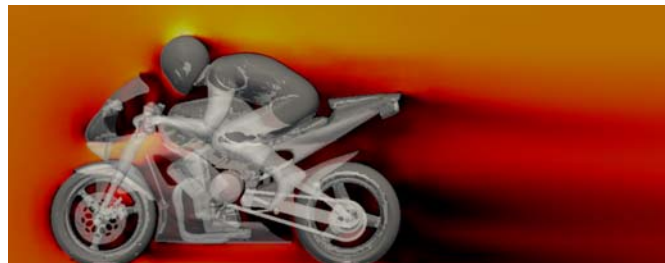


Figura D.4: Resultados del caso práctico motorBike en *OpenFOAM*

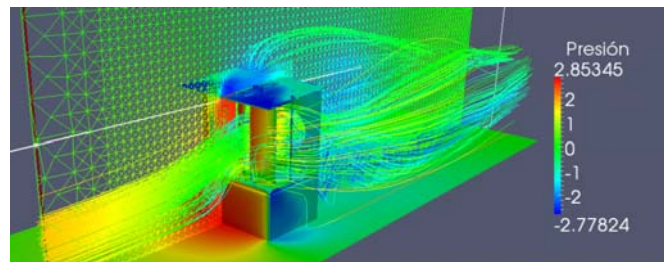


Figura D.5: Resultados del caso del proyecto en *OpenFOAM*

D.4. Tutorial de postprocesado: Paraview

Paraview es un programa libre y multiplataforma de análisis y visualización de datos. Permite una construcción rápida y sencilla de visualizaciones de datos. Las diferentes imágenes del proyecto se han realizado con este programa, utilizando los datos de los resultados de los cálculos de *OpenFOAM*. A continuación se explicará mediante una pequeña guía como alcanzar esas visualizaciones.

Para comenzar a confeccionar la visualización se debe realizar el volcado de datos a representar en el programa (como se observa en la imagen de la izquierda de la figura [D.6](#)). Esto se realizará desde el desplegable *file* y a continuación *open* ó desde el icono de la carpeta de la esquina superior izquierda.

Para poder acceder a los datos desde la ventana *Object Inspector* se deberá clicar en *Apply*, de esta manera se podrá acceder a las diferentes partes del mallado y de los resultados como se representa en la imagen de la derecha en la figura [D.6](#).

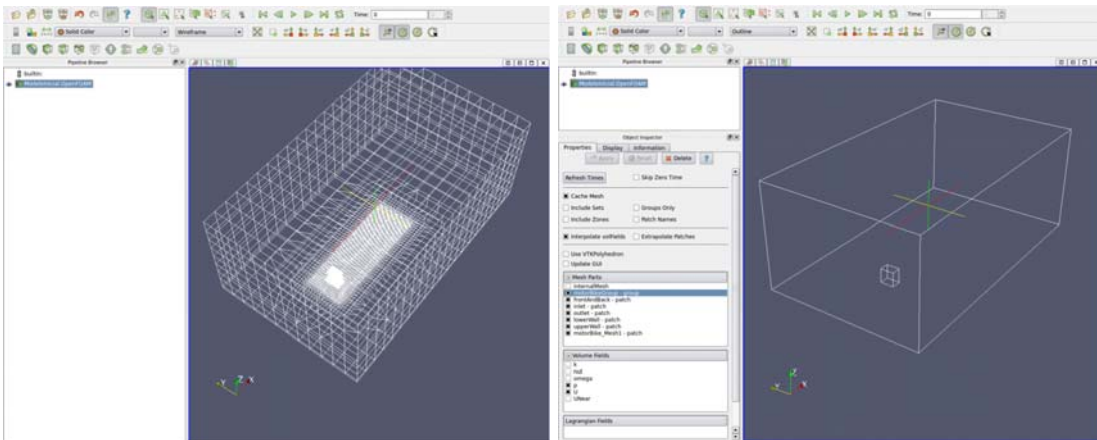


Figura D.6: Imágenes de la selección de la malla a representar en *Paraview*

Con el objetivo de realizar la representación sólo sobre unas superficies determinadas, se utiliza la función *Extract Block* a la que se puede acceder desde la siguiente ruta *Filters/Recent/Extract Block* y seleccionar las superficies oportunas. En el caso ejemplo (ver figura [D.7](#)) se seleccionan la malla correspondiente al suelo (*lowerWall*) y la del modelo (*motorBikeMesh1*) y se representan con la estética «wireframe» y «surface» respectivamente. Destacar que en la codificación de los resultados se han respetado los nombres del tutorial de inicio, ya que no se ha considerado importante el nombre, sino que la codificación matemática fuese la correcta.

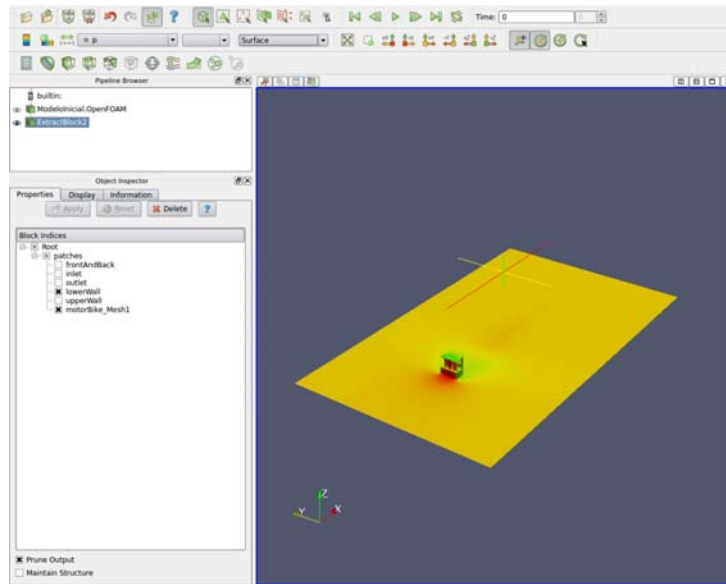


Figura D.7: Imagen de la función *Extract Block* a representar en *Paraview*

Una función utilizada para reducir la imagen representada es *Clip*. Se muestra en la figura [D.8](#) y a lo largo de la guía se utilizará en diferentes aspectos, sin incidir de nuevo gráficamente.

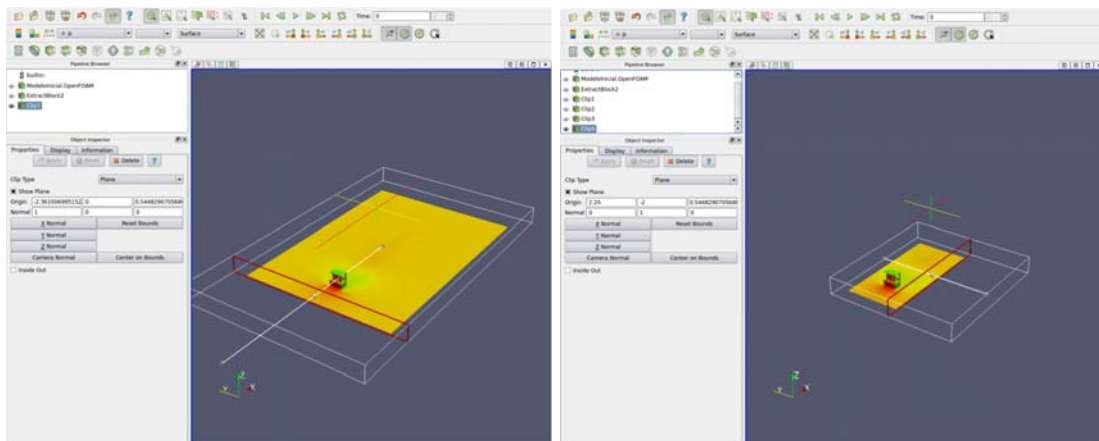


Figura D.8: Imágenes de la función *Clip* a representar en *Paraview*

La representación visual de las líneas de corriente se puede conseguir usando la función *StreamTracer*. Destacar la importancia de tres parámetros en la pestaña *Properties* como son:

- *Point*. Localizará el punto central desde el que se emitirán las líneas de corriente
- *Number of Points*. Representa la cantidad de líneas de corriente representadas.
- *Radius*. Valor en metros del radio de emisión de líneas de corriente medido desde el valor localizado en el parámetro *Point*.

Para que adquieran la característica de representar una variable, se le deberá asignar dicha variable en la pestaña *Display*. Ambas características de la función *SteamTracer* están ilustradas en la figura [D.9](#).

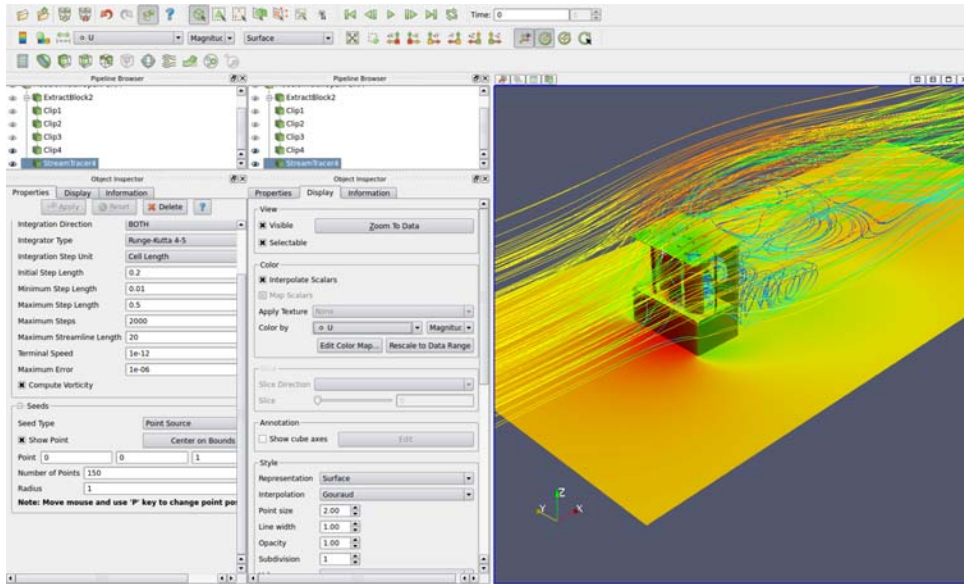


Figura D.9: Imagen de la función *SteamTracer* a representar en *Paraview*

En las representaciones mostradas en los apartados correspondientes a *OpenFOAM* se utiliza la posibilidad de superponer resultados, en este caso se superpone el plano de corte de las velocidades situado en el directorio */CASE/postprocessing*. Repitiendo el primer paso de esta guía se consigue la representación mostrada en la figura [D.10](#)

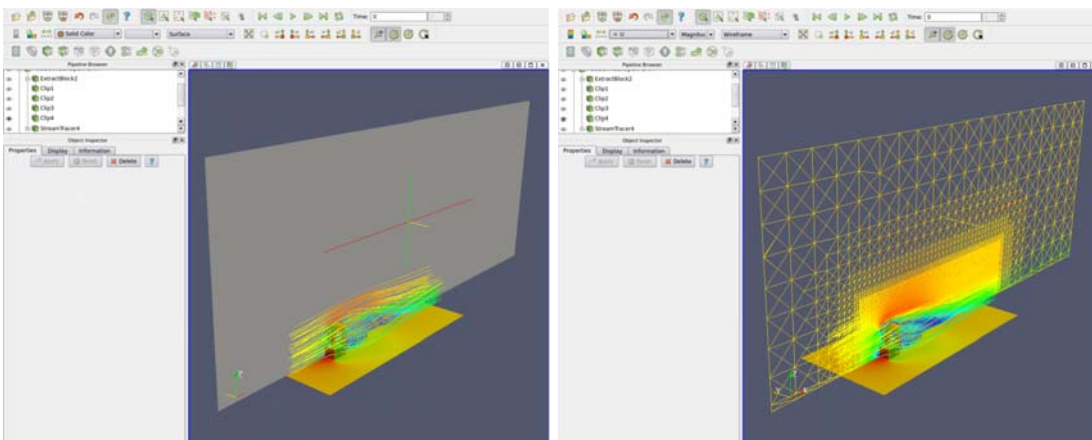


Figura D.10: Imágenes del plano de resultados añadido sobre la representación en *Paraview*

Se deberá utilizar la función *Clip* para cada nueva función. Se puede contemplar variar el tipo de representación y las variables del plano mostrado.

Para alcanzar una comprensión numérica de la o las variables representadas se debe introducir una leyenda en la imagen, a esta función se accede desde el primer icono de la segunda fila de iconos de la esquina izquierda de la imagen como se observa en la figura [D.11](#).

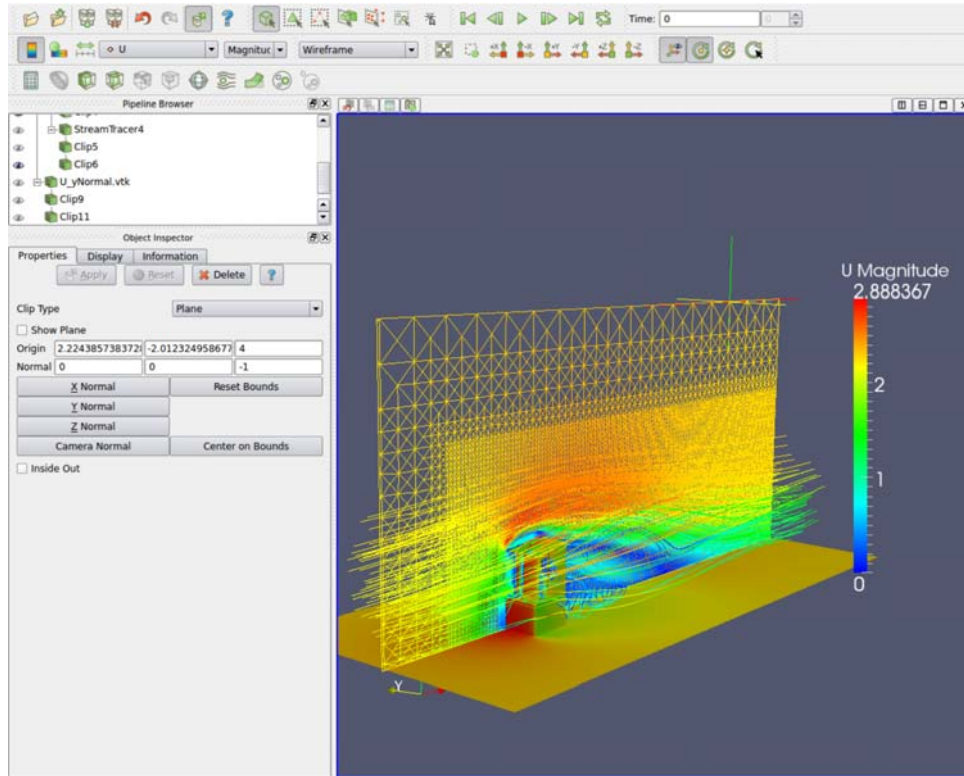


Figura D.11: Imagen de la representación final en *Paraview*

Con los pasos de esta guía y haciendo uso de uno o varios de sus pasos, se han conseguido todas las representaciones numéricas del apartado correspondiente a *OpenFOAM*.

Anexo E.

Entorno Autodesk Simulation CFD 2014

Desarrollado desde 1992 desde el programa *CFdesign*, *Autodesk Simulation CFD 2014* es un entorno de cálculo cuya función es realizar análisis de ingeniería para CFD ó análisis computacional de fluidos de alto nivel. Un entorno informático de cálculo de dinámica de fluidos y de transmisión de calor diseñado de una manera comprensible y escalable que permite utilizar diferentes formatos de archivos CAD en el sistema operativo *Windows*. Los principales de análisis que maneja son:

- Flujos, laminar, turbulencia, internos, externos, incompresibles, subsónicos y transónicos.
- Calor, por conducción, convección, conjugado.

Además puede afrontar problemas de variaciones de propiedades de materiales, fluidos variables, múltiples fluidos, etc.

Es un sistema completo que permite manejar diferentes escenarios en problemas de flujo y térmico desde el programa CAD. El entorno de cálculo se compone de diferentes partes que ayudan a establecer un método en el análisis, como se puede observar en la figura [E.1](#).

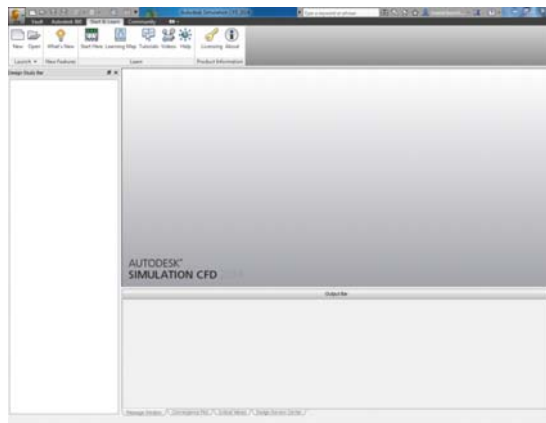


Figura E.1: Pantalla principal del programa *Autodesk Simulation CFD 2014*

El método de trabajo que hay que seguir para poder ejecutar el cálculo sin errores en el entorno seleccionado se describe paso a paso de forma resumida a continuación:

- **Definición de la geometría.** Es necesario definir una geometría y sus límites en un formato CAD, como se describe en el apartado 3.2 (Para realizar los cálculos, este modelo deberá tener una calidad descrita como «completamente cerrado» ó «watertight»).
- **Adaptación del modelo al entorno.** Al generar el caso de estudio, el entorno solicita una geometría CAD para importarla y conformar los diferentes volúmenes. Si el programa detecta un volumen cerrado y no especificado en el CAD, lo crea el entorno y se deberá especificar sus propiedades para realizar el cálculo. Además el entorno ofrece las herramientas siguientes : *Edge Merge*, *Small Object*, *Void Fill*, *Ext. Volume*.
 - ◇ La herramienta *Edge Merge* unifica las aristas que tienen en común un vértice y están separadas un ángulo menor de una tolerancia especificada como se muestra en la imagen de la izquierda de la figura E.2. Esta herramienta ayuda a reducir el número de aristas, especialmente las más pequeñas lo que reduce la densidad de malla, y mejora la velocidad del análisis.
 - ◇ *Small Object* es una aplicación para reparar la geometría. Esta herramienta esta diseñada para eliminar superficies muy pequeñas y las aristas que la delimitan, unificando la geometría que las rodea (ver figura E.2). La mayor parte de los modelos que se diseñan consisten en piezas sólidas. Las regiones fluidas normalmente están contenidas por sólidos, pero en la mayoría de los casos el modelo CAD no especifica qué parte es la correspondiente a un fluido y cuál a un sólido.

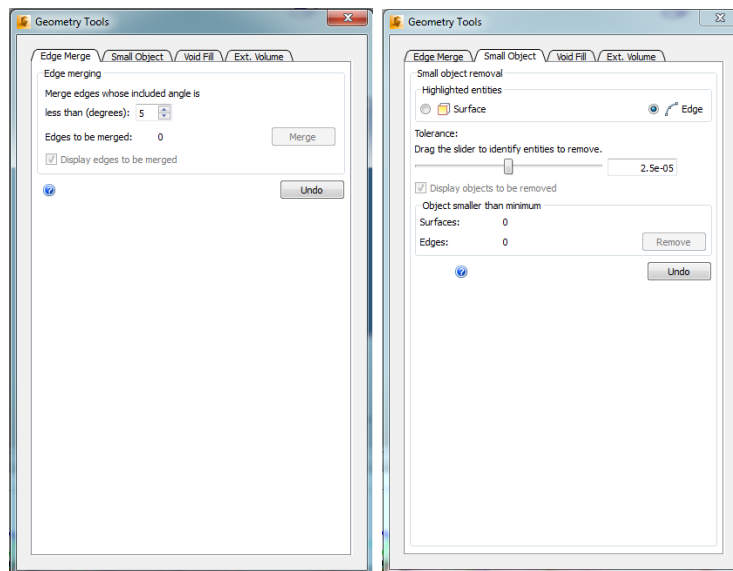


Figura E.2: Funciones *Edge Merge* y *Small Object* del programa *Autodesk Simulation CFD 2014*

- ◊ La herramienta *Void Fill* permite rellenar esos espacios, y especificar la amplitud de superficie en la que se extenderá el volumen fluido; ya que cerrará las aristas seleccionadas formando una superficie de entrada y otra de salida y creará el volumen contenido por el modelo CAD y las nuevas aristas, considerándolo fluido en el entorno de cálculo. El menú de dicha función se representa en la figura [E.3](#)
- ◊ La herramienta *Ext. Volume* permite crear un volumen alrededor del modelo importado. Esta aplicación se utiliza para flujos de aire externos como se describe a la derecha de la figura [E.3](#). En este proyecto, no ha sido requerido el uso de esta herramienta puesto que todos los flujos eran internos.

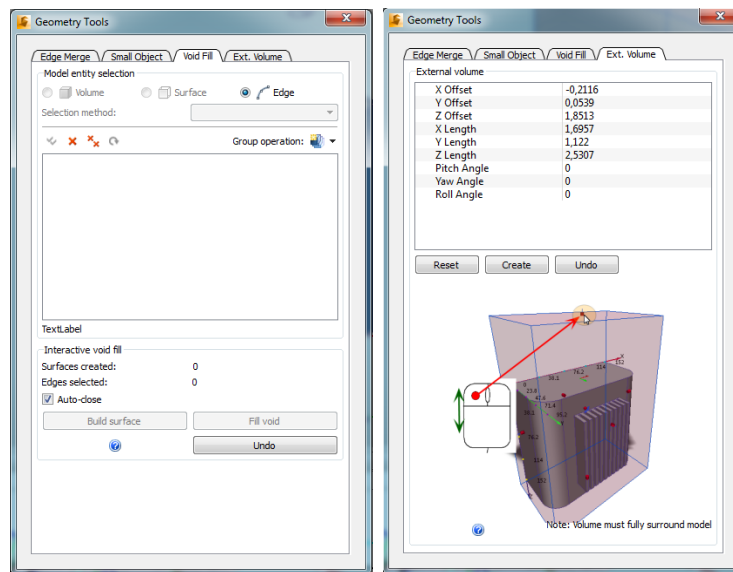


Figura E.3: Funciones *Void Fill* y *Ext. Volume* del programa *Autodesk Simulation CFD 2014*

- **Especificación de los materiales sólidos y fluidos.** Una vez adaptada la geometría al entorno de cálculo, para poder calcular es necesario especificar los materiales de todos los objetos identificados como se muestra en la figura [E.4](#), ya que por defecto ninguno viene especificado.
- **Condiciones de contorno.** Las condiciones de contorno son los valores asignados a objetos o superficies en el modelo que tienen influencia en algún material fluido o en el valor de alguna transferencia de calor. Todas las entradas y salidas que permiten a los fluidos fluir dentro y fuera del modelo deberán ser asignadas. De la misma manera, todos los flujos intervinientes en la transferencia de calor deberán ser definidos. Se visualiza el problema completamente definido en la figura [E.5](#).
- **Condiciones transitorias.** En este caso se fija la temperatura inicial del volumen fluido en 22°C de forma arbitraria.

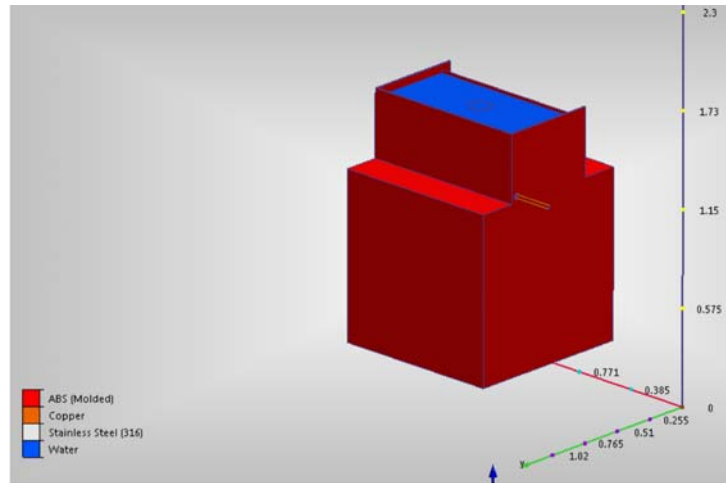


Figura E.4: Ejemplo de especificación de materiales en el programa *Autodesk Simulation CFD 2014*

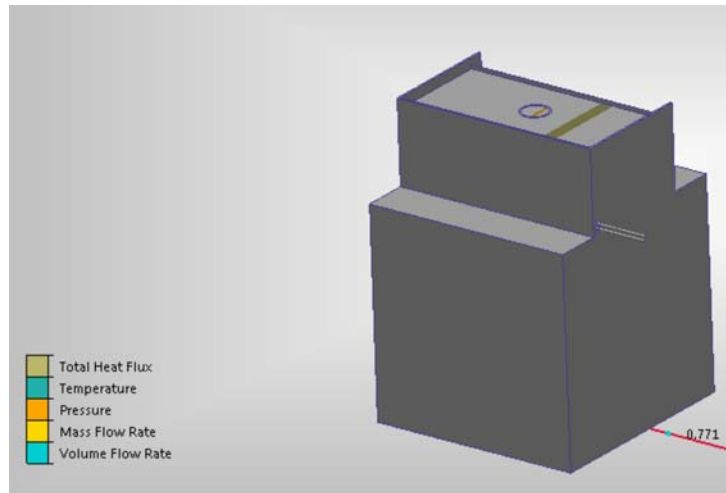


Figura E.5: Ejemplo de aplicación de condiciones de contorno en el programa *Autodesk Simulation CFD 2014*

- **Mallado.** Una vez definidos todos los elementos y sus propiedades térmicas y dinámicas, el paso siguiente es el mallado. La malla está directamente relacionada con la geometría y el modelo, por este motivo una geometría limpia es muy importante. En el entorno *Autodesk Simulation CFD 2014* el mallado es muy sencillo. Si se han seguido correctamente los pasos anteriores, no debería existir ningún problema con el mallado automático (ver figura [E.6](#)). Esta función crea la malla, permitiendo además de una forma sencilla ajustar el grosor que se decida que sea, mediante la barra *Size Adjustment*. Destacar que una malla muy fina no tiene porque ser más precisa que otra, pero si sera más costosa de calcular, tanto en tiempo de cálculo como en potencia necesaria.

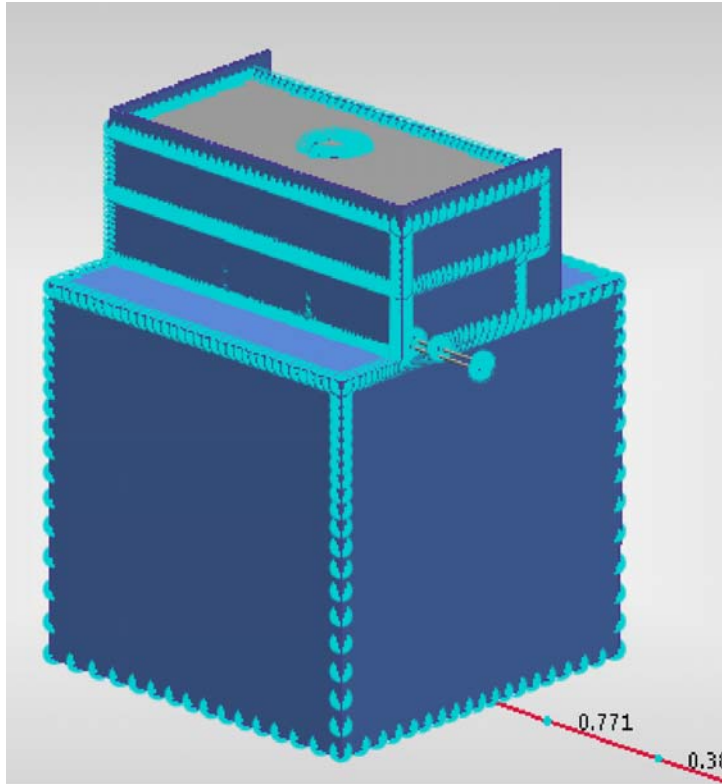


Figura E.6: Ejemplo de mallado automático en el programa *Autodesk Simulation CFD 2014*

- o **Cálculo.** La orden para desarrollar el cálculo es *Solve*. Los modos de cálculos permitidos son estacionario y transitorio, tanto para flujo, como para transferencia de calor. El entorno permite un cálculo simultáneo de las ecuaciones transitorias de flujo y de transferencia de calor, pero no se recomienda, ya que los cálculos en el modo transitorio son más complejos y requieren de más iteraciones. El manual propone un proceso para los cálculos de transferencia conjugada de calor, se recomienda resolver el flujo en modo estacionario y una vez que las variables sean estables o ya se ha detenido el cálculo. Posteriormente y sobre ese cálculo previo, se realizan las iteraciones en modo transitorio únicamente de la parte térmica. En la representación de la figura E.7, se observa cada uno de los posibles modos de cálculo así como los cálculos permitidos.

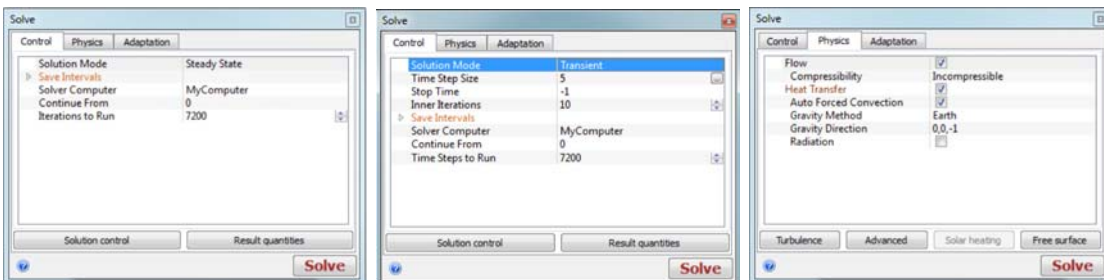


Figura E.7: Ventanas de selección de cálculo del programa *Autodesk Simulation CFD 2014*

- **Postprocesado de resultados.** Poder observar los resultados de una forma concreta y apropiada es tan importante como el cálculo. Hay muchas opciones para visualizar estos resultados, las más comunes son: planos (*planes*), trazas (*traces*) e isosuperficies (*isosurfaces*).
 - ◇ **Planos:** Son cortes en una dirección característica generalmente la de un eje al volumen de cálculo que permiten observar los gradientes de temperatura. Si se decide representar sobre los planos los gradientes de velocidad se puede optar por la opción de la representación vectorial sobre el plano, como se muestra en la figura [E.8](#).

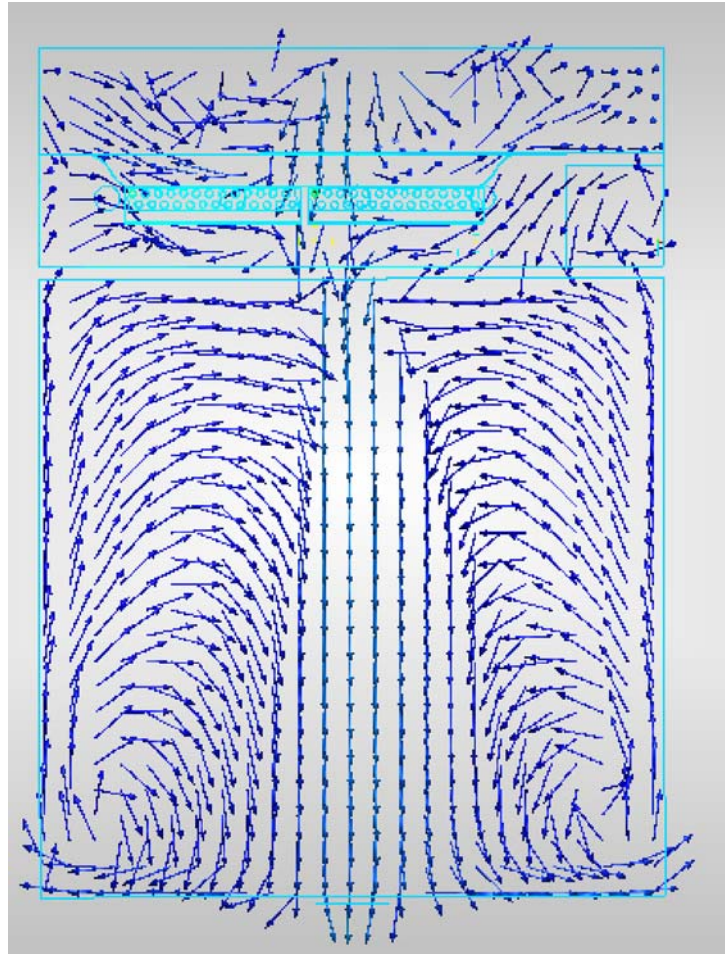


Figura E.8: Representación de resultados en un plano en el programa *Autodesk Simulation CFD 2014*

- ◇ **Trazas:** Son una extensión de los planos. Son puntos que pueden ser seleccionados en un plano para crear una curva que siga el trayecto del fluido de un punto a otro, como puede aclarar la figura [E.9](#).
- ◇ **Isosuperficies:** Crean una forma tridimensional mostrando el área dentro del modelo que coincide con unos valores definidos como se muestra en la imagen [E.10](#).

Para cada variable se puede asignar una o varias representaciones y diferentes gamas de colores a criterio del usuario.

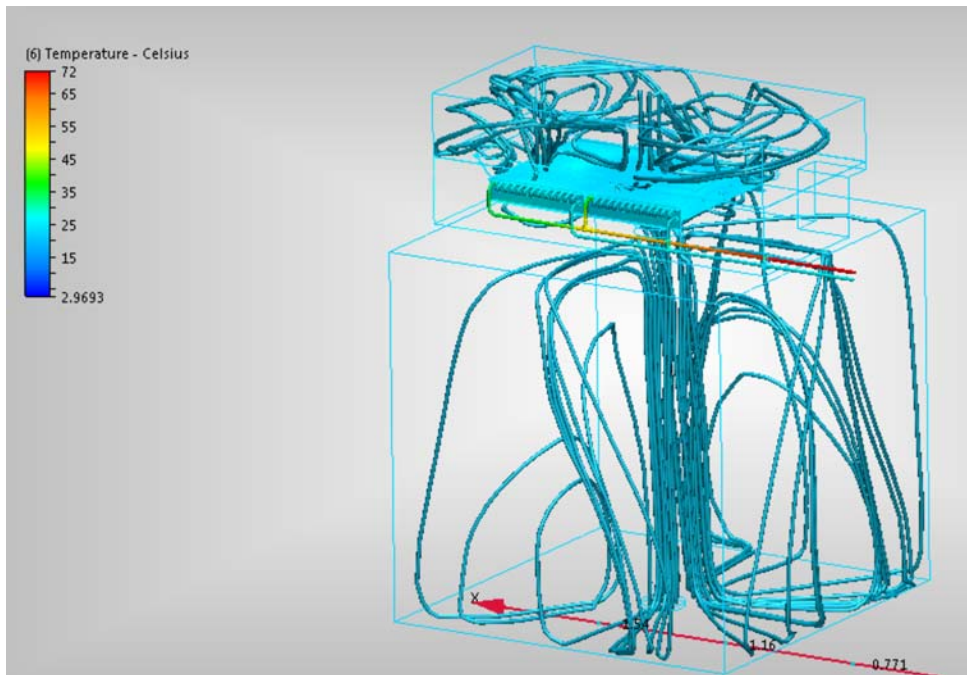


Figura E.9: Representación de resultados en trazas en el programa *Autodesk Simulation CFD 2014*

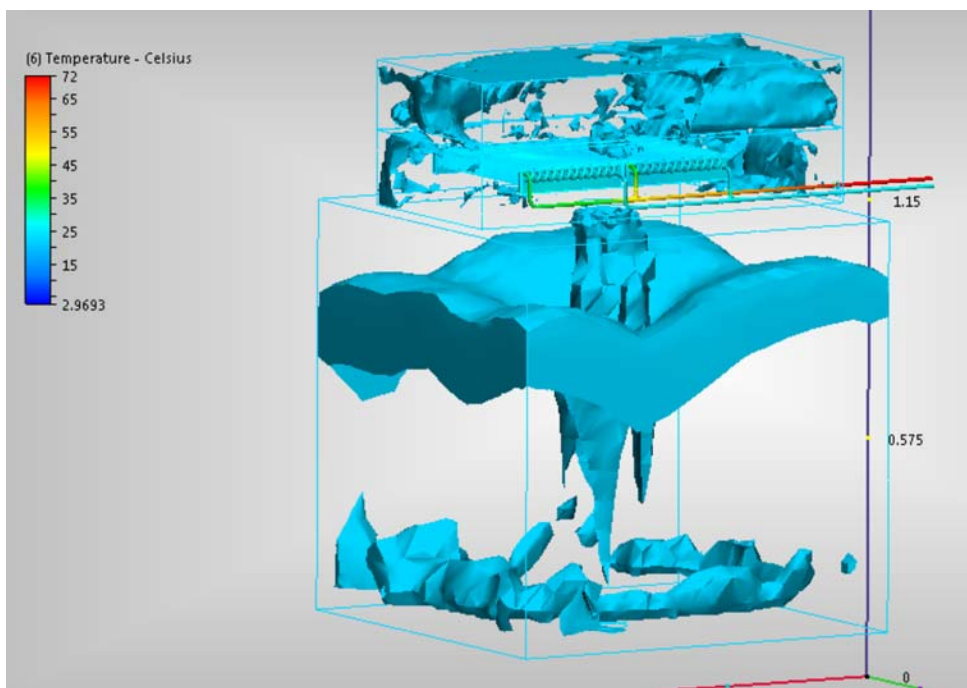


Figura E.10: Representación de resultados en isosuperficies en el programa *Autodesk Simulation CFD 2014*