



Anexo 1: Código de EES

Como se ha explicado con anterioridad en este trabajo de fin de grado, todos los cálculos que se han realizado, se han hecho con ayuda del Software, Engineering Equation Solver o EES. En este anexo se pone en conocimiento cual ha sido el código implementado, así como los resultados obtenidos. Además, se incluirán pequeñas explicaciones sobre el código.

1. Cálculo del intercambiador secundario.

Para el intercambiador secundario de placas, como se comenta en la memoria, se realiza el dimensionamiento mediante el método de las temperaturas medias logarítmicas. Como las condiciones termo físicas de los fluidos varían según si se está utilizando el intercambiador secundario como calefactor de la emulsión de parafina o como refrigerador, se deben realizar dos cálculos que, si bien serán simétricos, las condiciones de los fluidos serán diferentes.

1.1 Intercambiador secundario como calentador.

Si se desconoce este programa de cálculo ingenieril, se debe saber que es un software de resolución de sistemas de ecuaciones. El texto entre comillas que queda coloreado en azul no tiene ningún propósito en términos de cálculo y solo sirve como una pequeña orientación para el lector del código. Sin embargo, el texto en negro, son las ecuaciones que el programa tendrá en cuenta para realizar los cálculos pertinentes.

En esta primera parte del código, se añaden las dimensiones del intercambiador LPIC-01, que se usarán para obtener tanto el factor de fricción como para determinar las condiciones de transmisión de calor en su interior.

"DIMENSIONES DEL I.C."

H=0,001 "m"	
L=0,192 "m"	
W=0,073 "m"	
Np=20	
phi=1,22	"factor de corrección de la corrugación"
Dh=2*H/phi "m"	"Diámetro hidráulico"
Nc=Nf-1	"Número de canales calientes"
Np=Nc+Nf+1	"Número de canales fríos"
At=W*H "m ² "	"Área transversal de un canal"
Area_IC = Np*L*W*phi	"Área de contacto"



A continuación, se introducen las propiedades de los fluidos. En primer lugar, las del PCM que obtuvo Jorge Torrubia en su investigación. En segundo lugar, las condiciones del agua. Para las condiciones del agua se utiliza una función realmente útil de este software que es el cálculo de propiedades de distintos fluidos teniendo como input otras dos propiedades.

"DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS"

"CONDICIONES DEL PCM (fluído frío)"

$\mu_{pcm}=0,044 \text{ "Pa*s"}$	"Viscosidad"
$\rho_{pcm}=912 \text{ "Kg/m}^3\text{"}$	"Densidad"
$c_p_{pcm}=7462 \text{ "J/(kg*K)"}$	"Capacidad calorífica"
$\lambda_{pcm}=0,2923 \text{ "W/(m*K)"}$	"Conductividad"
$Pr_{pcm}=(c_p_{pcm}*\mu_{pcm})/\lambda_{pcm}$	"Número de Prandtl"
$G_z_{pcm}=(Re_{pcm}*Pr_{pcm})/(L/Dh)$	"Graetz del pcm"

$T_{pcm_e}=35 \text{ "C"}$ "En rojo las variables que vienen fijadas porque así tienen que entrar en el intercambiador de ensayo"

$T_{pcm_s}=50 \text{ "C"}$	
$C_{au_pcm}=0,0001 \text{ "m}^3/\text{s"}$	"CAUDAL PCM" "Que es igual a 6 l/min"
$C_{au_pcm_1c}=C_{au_pcm}/N_c \text{ "m}^3/\text{s"}$	"Caudal pcm por un solo canal"
$V_{pcm_1c}=C_{au_pcm_1c}/A_t \text{ "m/s"}$	"Velocidad del pcm por uno de los canales"
$V_{pcm}=C_{au_pcm}/(A_t * N_c)$	

$Re_{pcm}=\rho_{pcm} \cdot V_{pcm} \cdot 1c \cdot D_h / \mu_{pcm}$ "Reynolds del pcm"
 $m_{pcm}=C_{au_pcm} \cdot \rho_{pcm} \text{ "kg/s"}$ "Flujo másico del pcm"

"CONDICIONES DEL AGUA (fluído caliente)"

$P = 3 \text{ "bar"}$

$\mu_{agua} = \text{VISCOSITY}(\text{Water}; T=Tagua_e; p=P) \text{ "Pa*s"}$
 $\mu_{p_agua} = \text{VISCOSITY}(\text{Water}; T=T_p; p=P) \text{ "Pa*s"}$
 $\rho_{agua} = \text{DENSITY}(\text{Water}; T=Tagua_e; p=P) \text{ "Kg/m}^3\text{"}$
 $c_p_{agua} = c_p(\text{Water}; T=Tagua_e; p=P) \text{ "J/(kg*K)"}$
 $\lambda_{agua} = \text{conductivity}(\text{Water}; T=Tagua_e; p=P) \text{ "W/(m*K)"}$
 $Pr_{agua} = \text{prandtl}(\text{Water}; T=Tagua_e; p=P) \text{ "-"}$

$Tagua_e=74$
 $Tagua_s=-((q/(m_{agua} \cdot c_p_{agua}) - Tagua_e))$ "-----> si el pcm entra a 35 y tiene que salir a 50 y disponemos de agua a 74 grados para calentarla, con los caudales actuales de agua y pcm el agua saldrá a 61,5 grados"

$T_p=(T_{pcm_e}+Tagua_e)/2$ "Temperatura en la pared = la media de las entradas"
 $C_{au_agua}=0,0002 \text{ "m}^3/\text{s"}$ "CAUDAL AGUA" "El doble que de PCM. 12 l/min"
 $C_{au_agua_1c}=C_{au_agua}/N_f$
 $V_{agua_1c}=C_{au_agua_1c}/A_t$
 $V_{agua}=C_{au_agua}/(A_t * N_f)$

$Re_{agua}=\rho_{agua} \cdot V_{agua} \cdot 1c \cdot D_h / \mu_{agua}$
 $m_{agua}=\rho_{agua} \cdot C_{au_agua} \text{ "Kg/s"}$

Tras tener determinados todas las propiedades de los fluidos, se procede al cálculo de los números adimensionales de Nusselt para ambos fluidos que son necesarios para calcular los coeficientes de transferencia de calor convectiva. Además, como para los cálculos de los números de Nusselt requieren del cálculo del factor de fricción se incluyen en este apartado y se usarán más adelante para la obtención de las pérdidas de carga del intercambiador.



"CALCULO DE LOS NUMEROS DE NUSSELT Y LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR CONVECTIVOS"

Nupcm = 0,2987*Re_pcm^(0,5276)*Pr_pcm^(1/3) "Nusselt del pcm con la correlación obtenida por Torrubia para el pcm. El Reynolds ideal para usar esa correlación es 20 y el actual es 5 por lo que lo tomo como valido, aunque Torrubia indique que esa correlación se ha elegido para Reynolds entre 20 y 40"

$$h_{pcm} = Nupcm * \lambda_{pcm} / Dh$$

Nuagua =

$$0,122 * (Pr_{agua})^{(1/3)} * (\mu_{agua}/\mu_{p_agua})^{(1/6)} * (f_{agua} * Re_{agua}^{(2)} * \sin(2 * \beta))^{0,374}$$
$$h_{agua} = Nuagua * \lambda_{agua} / Dh$$

$$1/f_{agua} = ((\cos(\Beta)) / (\sqrt{b * \tan(\beta)} + c * \sin(\beta) + f_{0agua} / \cos(\beta))) + ((1 - \cos(\beta)) / (\sqrt{f_{1agua}}))$$

beta = 65

$$f_{0agua} = B_0 / Re_{agua} \quad \text{"Para } Re < 2000\text{"}$$

$$f_{1agua} = a * (597 / Re_{agua} + 3,85) \quad \text{"Para } Re < 2000\text{"}$$

B_0 = 93

a = 3,8

b = 0,18

c = 0,36

$$1/f_{pcm} = ((\cos(\Beta)) / (\sqrt{b * \tan(\beta)} + c * \sin(\beta) + f_{0pcm} / \cos(\beta))) + ((1 - \cos(\beta)) / (\sqrt{f_{1pcm}}))$$

$$f_{0pcm} = B_0 / Re_{pcm} \quad \text{"Para } Re < 2000\text{"}$$

$$f_{1pcm} = a * (597 / Re_{pcm} + 3,85) \quad \text{"Para } Re < 2000\text{"}$$

Una vez obtenidos ambos números de Nusselt ya se puede proceder a aplicar el método MLTD para hallar el área de intercambio necesaria.

"CALCULO MLDT"

$$U = (1/h_{pcm} + 1/h_{agua})^{(-1)} \quad \text{"W/(m2*K)" "Coeficiente de transmisión global"}$$

$$ATml = (Tagua_s - Tpcm_e - (Tagua_e - Tpcm_s)) / (\ln((Tagua_s - Tpcm_e) / (Tagua_e - Tpcm_s)))$$

"Diferencia de temperaturas media logarítmica"

$$q = \rho_{pcm} * C_{au_pcm} * c_{p_pcm} * (Tpcm_s - Tpcm_e) \quad \text{"W" "Flujo de calor"}$$

$$A_{necesaria} = q / (U * ATml) \quad \text{"m2" "Área necesaria"}$$

Por último, se procede al cálculo de las pérdidas de carga en el intercambiador de calor.

"CALCULO PERDIDAS DE CARGA"

$$\Delta p_{PCM} = f_{PCM} \cdot 0,5 \cdot \rho_{PCM} \cdot V_{PCM} \cdot c^2 \cdot L / Dh \text{ "Pa"}$$

$$\Delta p_{\text{agua}} = f_{\text{agua}} \cdot 0,5 \cdot \rho_{\text{agua}} \cdot V_{\text{agua}} \cdot c^2 \cdot L / D_h \text{ "Pa"}$$

hf_pcm=delta_p_pcm*1E-5*10,22 "mca"

hf_agua=delta_p_agua*1E-5*10,22 "mca"

Con este código ya estarían cubiertos todos los valores de interés y solo hay que compilar el código por si hay errores gramaticales y calcular el sistema de ecuaciones. A continuación, se muestra una captura de la pantalla de resultados:

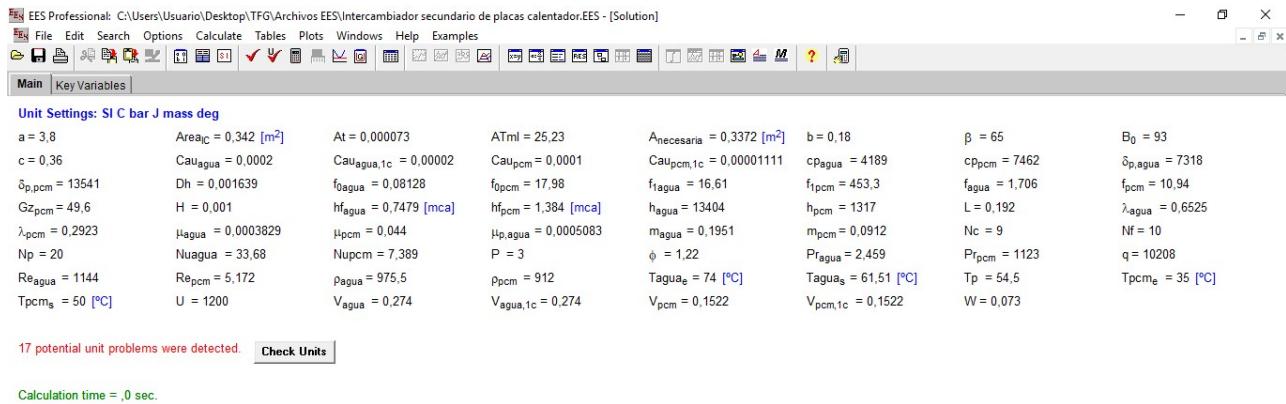


Ilustración 1 Resultados generales

Como se puede observar, hay una gran cantidad de variables para las cuales se ha hallado un resultado. En la pestaña “Key variables” se pueden encontrar las que el usuario haya seleccionado como variables clave. En este caso, las siguientes:

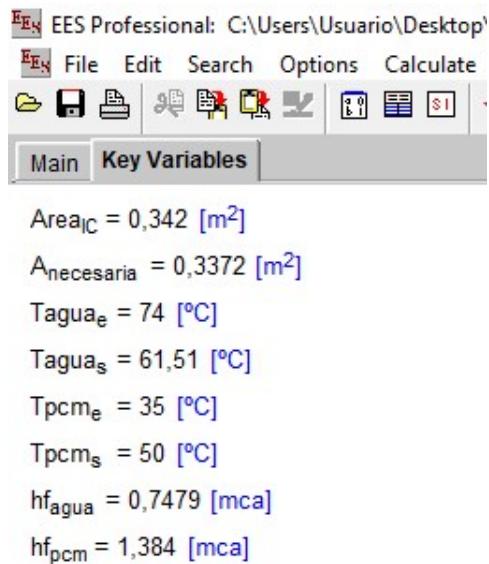


Ilustración 2 Resultados clave

En esta pestaña se pueden observar los resultados obtenidos, los cuales se consideraron satisfactorios.

2. Cálculo de pérdidas de carga de la instalación

Como se comenta en la memoria, utilizando también este programa, se calculan cuales son las pérdidas de carga de la instalación. En función de los accesorios se puede observar que hay dos circuitos, susceptibles de ser los más desfavorables. Estos son los que pasan por un intercambiador de calor de placas y por la resistencia calefactora debido a que estos dos elementos ofrecen una notable resistencia al paso del fluido y los circuitos que mayor número de componentes y derivaciones en racores con forma de T contengan. Los circuitos mas desfavorables se comentan a continuación:

El circuito que realiza el agua caliente por el intercambiador primario:

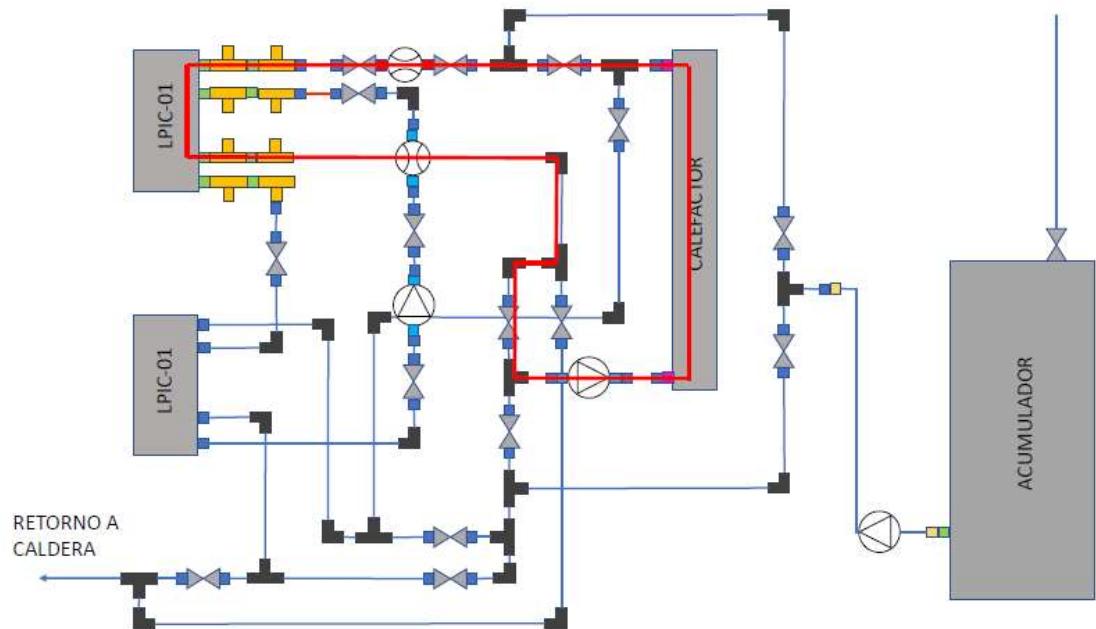


Ilustración 3 Circuito de agua caliente

Y el que resulta ser el circuito con mayores pérdidas de carga que es el del agua fría:

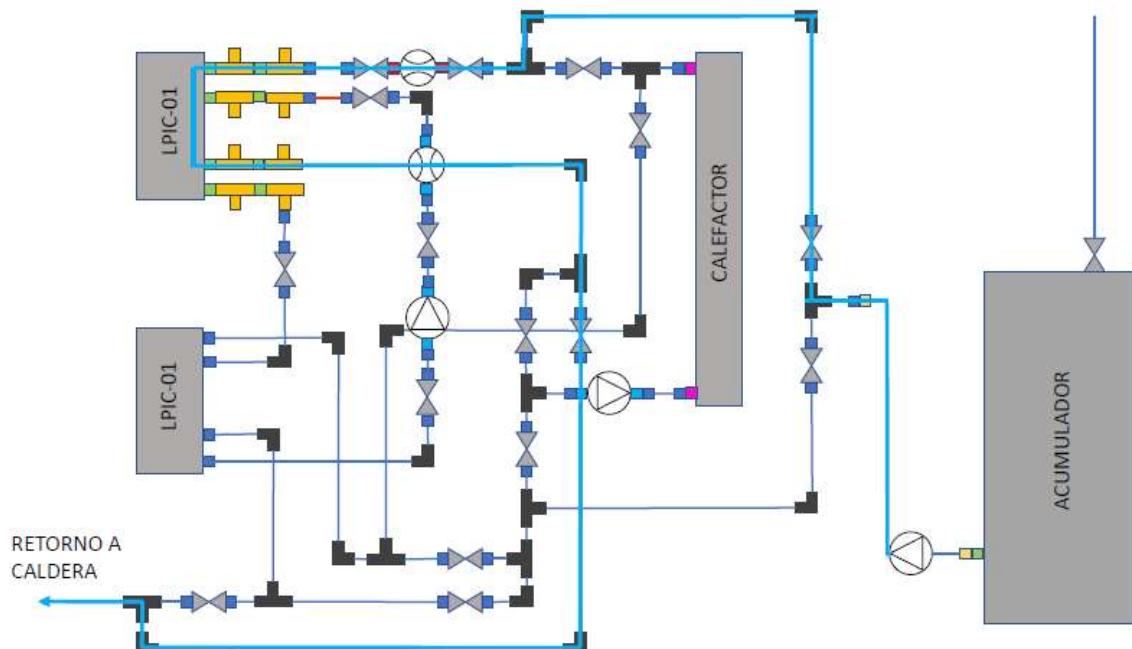


Ilustración 4 Circuito de agua fría



El código de EES que se implementa para su cálculo es el siguiente:

"CALCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA DEL CIRCUITO DEL AGUA"

"Datos"

```
q_lm=12 "L/min"
q=q_lm*((0,1^3)/60) "m3/s"
g=9,81 "m/s2"
rho=1000 "kg/m3"
d=0,02 "m"
l=3,2 "m" "aproximadamente"
```

```
s=pi*(d/2)^2 "m2"
v=q/s "m/s"
```

"Coeficientes de pérdidas de accesorios"

```
k_val=0,29
k_cod=0,63
k_tdir=0,29
k_tder=3
```

"Cálculo de las perdidas en accesorios"

```
h_val=k_val*(v^2)/(2*g) "m.c.a"
h_cod=k_cod*(v^2)/(2*g) "m.c.a"
h_tdir=k_tdir*(v^2)/(2*g) "m.c.a"
h_tder=k_tder*(v^2)/(2*g) "m.c.a"
```

"Otras perdidas"

```
h_calef=130/(rho*g) "m.c.a"
h_cau=(60*(101300/1000))/(rho*g) "m.c.a"
h_lpic=0,75 "m.c.a"
```

"Altura total de los accesorios"

```
h_tot_acc=h_val*4+h_cod*5+h_tdir*5+h_tder*3+h_cau+h_lpic
h_tot_acc_2=h_val*4+h_cod*5+h_tdir*5+h_tder*3+h_lpic "sin el caudalímetro"
```

"Cálculo de perdidas en los conductos"

h_cond=f*(l/d)*((v^2)/(2*g))

f=0,3164/(Re^(1/4))

Re=rho*v*dh/mu

dh=s/pm

pm=2*pi*(d/2)

mu=0,0004



"Pérdidas totales del circuito"

$$hf = h_{\text{cond}} + h_{\text{tot_acc}}$$

Y los resultados, los siguientes:

$$h_{\text{tot,acc}} = 1,674 \text{ [m]} \quad \text{Altura total de los accesorios}$$

$$h_{\text{cond}} = 0,1107 \text{ [m]} \quad \text{Perdidas en la tubería}$$

$$hf = 1,785 \text{ [m]} \quad \text{Perdidas totales}$$

$$l = 3,2 \text{ [m]} \quad \text{metros de tubo}$$

Ilustración 5 Resultados clave



Anexo 2: Análisis económico

En el apartado reservado para las conclusiones del trabajo de fin de grado, se concluye que se ha ahorrado diseñando y montando la instalación si se compara con la compra de una instalación a medida en distintas compañías. Un punto clave para lograr el abaratamiento de la instalación ha sido la compra de materiales a distintos proveedores en función del precio, adaptando la instalación a las necesidades. Esto es que al margen de la elección del sistema de racorería, véase el apartado 3.3.4.2 de la memoria, se buscó optimizar el precio final investigando con diferentes configuraciones de racorería. A modo de ejemplo, para conectar la resistencia GCP-TR-INOX-II0120 con conexiones de 1" a la instalación con diámetros nominales de tubo de 3/4", existen dos maneras:

1. La primera es utilizar un adaptador macho 1" – macho 3/4" para a continuación, roscar un racor de compresión hembra 3/4" y finalmente el tubo de cobre.
2. La segunda opción es utilizar un adaptador macho 1" – Hembra 3/4", roscar un racor de compresión macho 3/4" y finalmente el tubo de cobre.

Estas dos maneras no comparten el mismo coste ya que los racores no tienen por qué valer lo mismo y en muchas ocasiones no lo hacen. Debido a esta situación, en la fase de diseño de la instalación y durante la fase de elección de componentes, se realizó en una tabla de Excel un análisis de costes en función de los elementos elegidos y el proveedor elegido.

Por otra parte, dependiendo del proveedor, los componentes se entregan en packs indivisibles que pueden provocar que se adquieran componentes que finalmente no serán utilizados. Esto también se tiene en cuenta para elegir el proveedor que menos elementos sobrantes proporcione.

Calculo de costes de racorería y optimización

El funcionamiento de la tabla de Excel que se menciona con anterioridad es el siguiente:

1. En primer lugar, se elige un proveedor y se rellena la columna con los precios para los componentes que se necesitan.
2. A continuación, se especifica que cantidad de elementos son entregados en el pack indivisible.
3. Por último, se introduce que tipo de conexiones tienen los elementos de la instalación.

A continuación, se muestran las columnas de la tabla que contienen inputs resaltadas en azul claro:

Diseño, construcción y puesta en marcha de un banco
de ensayos de intercambiadores de calor de
suspensiones de PCM – agua, ANEXO 2: Análisis
económico



Escuela de
 Ingeniería y Arquitectura
 Universidad Zaragoza

Producto	Cantidad	Precio unidad (+IVA)	Unidades pack
Valvulas de cierre 3/4"	17	9,63	1
racor compresion macho 3/4"	52	5,37	2
racor compresion hembra 3/4"	7	3,73	2
T compresion 3/4"	10	6,69	2
Machón 1/2"-3/4"	2	8,4	5
Machón 1"-3/4"	2	9,5	10
Machón 3/4"	9	7,25	1
T hembra 3/4"	8	3,8	5
Tubo de cobre 22mm** * *	4	20,137	10
Codos	16	5,306	2
Racores de espiga 3/4" - 14mm	2		
Valvulas de control 3/4"	3		
Adaptador de H3/4 a npt 1/2?	2		

Ilustración 1 Inputs de precio y unidades/pack

Datos auxiliares	
conexiones directas tipo 1(valvula cor	1
conexiones directas tipo 2(dos hembr	8
bombas macho 3/4"	2
bombas espiga 14mm	1
caudalimetros macho 3/4"	1
caudalimetros macho 1/2"	0
caudalimetros hembra 1/2"	1
grupos calefactores hembra 1"	1
lpic-01	2
acumulador	1

Ilustración 2 Conexiones de los elementos de la instalación

Como se observa en la Ilustración 2 en las dos primeras filas, se mencionan conexiones directas del tipo 1 y 2. Estas son conexiones de una válvula directamente con la conexión de un elemento sin la necesidad de adaptador y las conexiones entre dos racores hembra usando solo un machón de 3/4". Como se concluirá al final de este anexo, aunque parezca anti – intuitivo, realizar un número concreto de conexiones directas es la opción mas barata puesto que se aprovecha un mayor número de elementos sobrantes. También se observa que existen distintas opciones de conexión para el mismo elemento. Así se comprueba que conexiones son más beneficiosas económicamente.

Tras llenar los datos de entrada, las formulas programadas en el archivo .csv, calculan cual es la cantidad de elementos necesaria para realizar todas las conexiones teniendo en cuenta cuales son las de los elementos y calculan el precio total, así como el sobrecoste por elementos sobrantes.

Diseño, construcción y puesta en marcha de un banco
de ensayos de intercambiadores de calor de
suspensiones de PCM – agua, ANEXO 2: Análisis
económico



Escuela de
 Ingeniería y Arquitectura
 Universidad Zaragoza

Datos auxiliares	
conexiones directas tipo 1(valvula cor	1
conexiones directas tipo 2(dos hembr	8
bombas macho 3/4"	2
bombas espiga 14mm	1
caudalimetros macho 3/4"	1
caudalimetros macho 1/2"	0
caudalimetros hembra 1/2"	1
grupos calefactores hembra 1"	1
lpic-01	2
acumulador	1
Conexiones macho 3/4"	6
Conexiones macho 1/2"	0
Conexiones hembra 1/2"	2
Conexiones hembra 1"	2
Conexiones hembra 3/4"	25
Conexiones macho 3/4" tras poner ma	6
conexiones espiga 14mm	2

Ilustración 3 Calculo del número de conexiones

Producto	Cantidad	Precio unidad (+IVA)	Unidades pack	Cantidad de packs	Precio pack	Precio
Valvulas de cierre 3/4"	17	9,63	1	17	9,63	163,71
racor compresion macho 3/4"	52	5,37	2	26	10,74	279,24
racor compresion hembra 3/4"	7	3,73	2	4	7,46	29,84
T compresion 3/4"	10	6,69	2	5	13,38	66,9
Machón 1/2"-3/4"	2	8,4	5	1	42	42
Machón 1"-3/4"	2	9,5	10	1	95	95
Machón 3/4"	9	7,25	1	9	7,25	65,25
T hembra 3/4"	8	3,8	5	2	19	38
Tubo de cobre 22mm***	4	20,137	10	1	201,37	201,37
Codos	16	5,306	2	8	10,612	84,896

Ilustración 4 Cálculo de unidades, packs y precio por componente



Producto	Unidades sobrantes	Sobrecoste por producto
Valvulas de cierre 3/4"	0	0
racor compresion n	0	0
racor compresion h	1	3,73
T compresion 3/4"	0	0
Machón 1/2"-3/4"	3	25,2
Machón 1"-3/4"	8	76
Machón 3/4"	0	0
T hembra 3/4"	2	7,6
Tubo de cobre 22m	6	120,822
Codos	0	0
Sobrecoste total		233,352

Ilustración 5 Cálculo de unidades sobrantes y sobrecostos

Se puede observar en las ilustraciones 4 y 5 que los elementos que más sobrecoste generan están resaltados en naranja. Estos elementos serán susceptibles de ser comprados en un proveedor distinto que ofrezca un menor precio o que ofrezca packs mas reducidos que permitan comprar un número de elementos más próximo al número exacto.

Precio total	1066,206	eur
Descuento	0	%
Precio final	1066,206	eur
Precio sin sobrecoste	832,854	eur

Ilustración 6 Coste final

Por último, los costes totales calculados. Este método es el que explica la lista de componentes que se observa en la memoria en el apartado 4.1.

Además, cabe añadir que el precio total indicado en la ilustración 6 no corresponde con el precio final de la instalación. Es el precio total resultante de la compra de únicamente los elementos de racorería si estos se hubiesen adquirido en RS. Los costes finales se desglosan al final de este anexo.



Producto	Cantidad	Referencia
Válvulas de cierre 3/4"	17	AA 03 802
racor compresión macho 3/4"	52	285-8693
racor compresión hembra 3/4"	11	369-1592
T compresión 3/4"	10	369-1665
Machón 1/2"-3/4"	2	AA 25 013
Machón 1"-3/4"	2	AA 25 014
Machón 3/4"	9	AA 25 004
T hembra 3/4"	8	AA 25 123
Tubo de cobre 22mm** **	8	19303004
Codos	16	369-1643
Racores de espiga h1/2" - 14mm	2	82109518
Adaptador de H3/4 a npt 1/2?	2	
Racor h1/2 – m3/4	2	
Racor espiga m3/4 – 14mm	2	

Ilustración 7 Lista de componentes de racorería

En la ilustración 7 se puede comprobar que los elementos que más sobrecoste generaban, resaltados en la figura 5, fueron comprados a un proveedor distinto. En azul, los elementos comprados a RS, en naranja, los comprados a Saltoki y en verde los que se compraron en Leroy Merlin. Esta fue la combinación mas barata hallada mediante este tipo de cálculo. No obstante, cabe añadir que, tras realizar este análisis, se añadió un proveedor mas a la lista de posibles proveedores con el que se consiguió rebajar el precio final de los elementos de racorería. Este proveedor es J Pinilla Usón S.L.

Costes totales de la instalación

Finalmente, en este apartado se desglosan los costes totales finales del proyecto. Estos son los relativos a los elementos de racorería, las resistencias calefactoras, los sensores, las bombas, válvulas, vasos de expansión e instalación eléctrica. Existen algunos elementos que, aunque se incluyen en la instalación, no aparecen en los costes finales. Esto se debe a que eran elementos ya presentes en el laboratorio del área de montaje y que fueron reciclados de otras instalaciones destinadas a ser desmontadas.

Diseño, construcción y puesta en marcha de un banco
de ensayos de intercambiadores de calor de
suspensiones de PCM – agua, ANEXO 2: Análisis
económico



Escuela de
 Ingeniería y Arquitectura
 Universidad Zaragoza

Componente	Suministradores	Precio (con IVA)
Elementos de fontanería y racorería	Saltoki	151,84
	Leroy Merlin	40,79
	Pinilla	39,29
	RS	127,08
		6,33
		473,59
		55,39
		894,31
Resistencias calefactoras	Brototermic	2429,66
Sensores de presión	RS	284,11
Sensores de temperaturas y racores	TC Direct	270,80
Instalación eléctrica	Ferrovial	437,73
Bombas hidráulicas	Iwaki	470,00
Intercambiadores de calor	Sumicar	399,30
Válvulas de regulación de caudal	Comercial Arpe	304,63
Vasos de expansión	Laboaragón	122,80
PID temperatura	SAI Unizar	645,38
TOTAL		6258,72

Ilustración 8 Costes finales de la instalación