

## Treball final de grau

**Estudi:** Grau en Enginyeria Elèctrica

**Títol:** DISSENY D'UNA MÀQUINA PER REALITZAR TESTS DE RESPOSTA TÈRMICA DEL TERRENY (T.R.T.) PER INSTAL·LACIONS GEOTÈRMiques

**Document:** 1.Memòria

**Alumne:** Jordi Franch Soler

**Director/tutor:** Albert Massaguer i Eduard Massaguer

**Departament :** EMCI

**Àrea:** MECÀNICA DE FLUIDS

**Convocatòria (mes/any) :** setembre/2015

**ÍNDEX DE LA MEMÒRIA**

1 INTRODUCCIÓ	2
1.1 Antecedents	2
1.2 Objecte	2
1.3 Especificacions i abast	3
2 USOS DE L'EQUIP	4
3 TEORIA DEL MÈTODE	5
3.1 Pous geotèrmics verticals tipus U	6
3.2 Pous geotèrmics verticals tipus doble U	7
3.3 Pous geotèrmics concèntrics	8
3.4 Concepte de resistència tèrmica	9
4 DETALLS CONSTRUCTIUS	13
4.1 Càlculs hidràulics i selecció de la bomba circulatòria	13
4.2 Vas d'expansió	21
4.3 Resistència elèctrica	25
4.4 Control i enregistrament de dades tèrmiques	29
4.5 Perfil de temperatures	35
4.6 Càlculs i maniobres elèctriques	36
5 PROCÉS OPERATIU	39
5.1 Obtenció del perfil de temperatura.	40
5.2 Connexió i operació de la màquina de T.R.T.	41
6 TRACTAMENT DE DADES I EXPRESSIÓ DELS RESULTATS	44
6.1 Resultats prova perfil de temperatura.	44
6.2 Resultats de la prova T.R.T.	46
7 RESUM DEL PRESSUPOST	54
8 CONCLUSIONS	55
9 RELACIÓ DE DOCUMENTS	56
10 BIBLIOGRAFIA	57

## 1 INTRODUCCIÓ

### 1.1 Antecedents

Les energies renovables es troben en un punt àlgid degut al constant increment de preu de les energies convencionals. Aquest fet fa que les grans inversions inicials en sistemes energètics eficients puguin ser amortitzades en períodes de temps raonables.

Així mateix les noves tècniques de fabricació en massa, conjuntament amb el pas que han experimentat els nous sistemes de producció energètica, de tecnologia experimental a sistemes consolidats amb costos d'inversió i producció provats, han permès la implantació a nivell usuari de sistemes d'energia renovable com la geotèrmia.

### 1.2 Objecte

L'objectiu d'aquest projecte és dissenyar una màquina que permeti obtenir dades reals de les condicions físiques del terreny on es pretén instal·lar un sistema de producció d'energia geotèrmica amb pous de circuit tancat.

Complexos programes de càlcul en funció a dades estadístiques, tipus de terreny, zones geogràfiques, etc., obtenen models aproximats de la resposta tèrmica que pot tenir un pou geotèrmic. Tot i ser una eina necessària, els programes no deixen de ser aproximacions que en general sobredimensionen el camp de captació.

Cal remarcar que a causa de la producció en sèrie de bombes geotèrmiques, la major inversió en aquest tipus d'instal·lacions, són les perforacions per instal·lar les sondes geotèrmiques, per aquest motiu és important no sobredimensionar el camp de captació allargant el període d'amortització. Tanmateix es pot donar el cas invers. Si el terreny és "molt dolent", pot succeir que la nostra instal·lació no funcioni per falta de camp de captació. Aquesta situació és encara pitjor ja que no es recupera la inversió.

### 1.3 Especificacions i abast

Es realitzarà el disseny complet de la màquina, amb els costos associats a la fabricació d'aquesta. Es simularà la resposta teòrica de la màquina amb possibles dades obtingudes d'un pou geotèrmic i es presentaran els valors necessaris per tal que els programes de simulació realitzin un dimensionat acurat del camp de captació geotèrmic.

## 2 USOS DE L'EQUIP

L'equip és apte per ser utilitzat als pous geotèrmics verticals de circuit tancat que s'usen per sistemes de climatització.

La característiques típiques d'aquests pous que determinen la limitació d'ús i marquen els criteris de disseny de l'equip que són:

Profunditat màxima de 200 metres, típica de 100 metres ( determinarà la potència elèctrica del nostre equip W/m )

Tres diàmetres típics de sonda, 25x2,3, 32 x 2,9 mm i 40 x 3,7 mm (determinarà el cabal de la bomba)

Temperatura de treball màxima 60 °C, típica 30°C (determinarà el tipus de sondes)

Pressió màxima de treball 3 bar, típica 1,5 bar (determina la resistència dels materials)

Durada màxima de la prova 120 hores, típica 72 hores (determina la capacitat d'enregistrament de dades del data logger)

Fluid de treball aigua o aigua amb glicol, típic aigua (determina el tipus de cabalímetre)

### 3 TEORIA DEL MÈTODE

Mogensen (1983) va dissenyar un sistema en el que un fluid circula a través del pou. El mètode TRT esta basat en el principi de que amb una potència de entrada coneguda i el seguiment de la temperatura mitja al llarg del temps, és possible mesurar el calor transmès al terra. Aquesta prova ens dona l'evolució de la temperatura al llarg del temps com una corba que es pot avaluar.

Aplicant un model matemàtic és possible extreure la conductivitat tèrmica del pou intercanviador de calor ( $\lambda$ ), la resistivitat tèrmica del pou intercanviador de calor ( $R_b$ ) i utilitzar aquestes dades per dissenyar sistemes de producció d'energia geotèrmica amb bomba de calor.

Tot seguit es mostren els tres tipus de sondes més utilitzades amb el seu corresponent esquema de resistències a la transmissió de calor, amb aquest esquema i coneixent les propietats dels diferents materials que actuen, els programes informàtics poden aproximar la resposta tèrmica del pou.

Aquesta aproximació informàtica és el primer dimensionat del camp de captació, on el dissenyador tria el tipus de sondes, la profunditat de cada sonda, fa una estimació del tipus de terreny que trobarà, entra la potència tèrmica necessària i rep una resposta en nombre de perforacions per satisfer la demanda.

En petites instal·lacions de caire domèstic, on els resultats oscil·len entre un o dos pous, no s'acostuma a realitzar el test de resposta tèrmica ja que encareix la instal·lació i no sol aportar estalvi. Malgrat això és molt recomanable fer-lo per si existissin aigües subterrànies o errors al omplir el pou amb zones sense segellar que afectin a la potència d'intercanvi del pou.

En instal·lacions de més envergadura és quasi obligat realitzar aquest test al primer pou que es construeix, com es considera que el terreny no varia entre pous, els resultats del test són introduïts al programa informàtic per tal de tornar a calcular el camp de captació.

D'aquesta manera s'assegura que no es sobredimensiona o subdimensiona el camp de captació.

### 3.1 Pous geotèrmics verticals tipus U

Cada perforació consta d'una única sonda en forma de U.

El conjunt està format per un tub d'anada (i1), un tub de tornada (o1), l'emplenat amb material conductor tèrmic (g1 i g2).

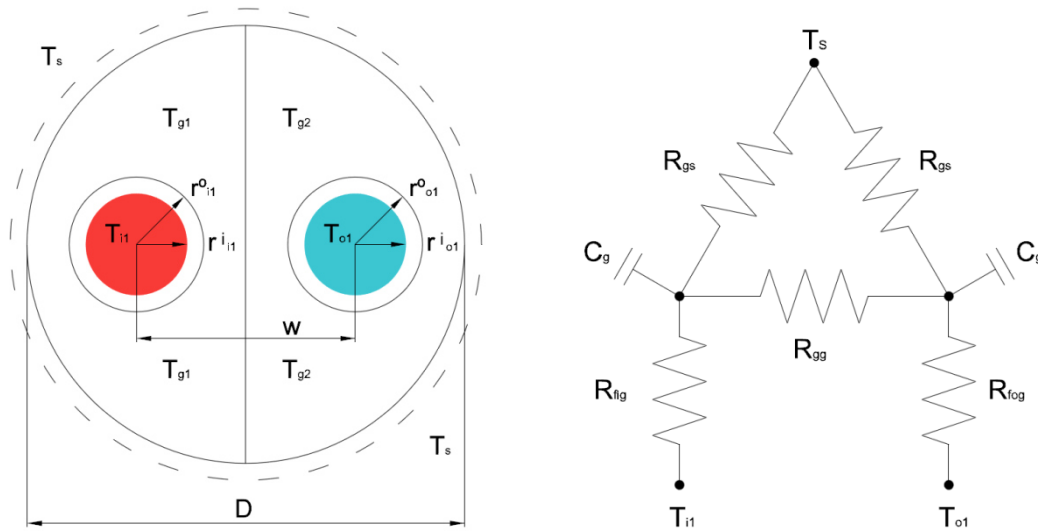


Figura 1 relacions de resistència de flux de calor de l'interior d'un pou de una U que consisteix en dues canonades i dues zones d'emplenat

### 3.2 Pous geotèrmics verticals tipus doble U

Cada perforació consta de dues sondes independents en forma de U.

El conjunt està format per un tub d'anada (i1), un tub de tornada (o1) i l'emplenat amb material conductor tèrmic (g1 i g2).

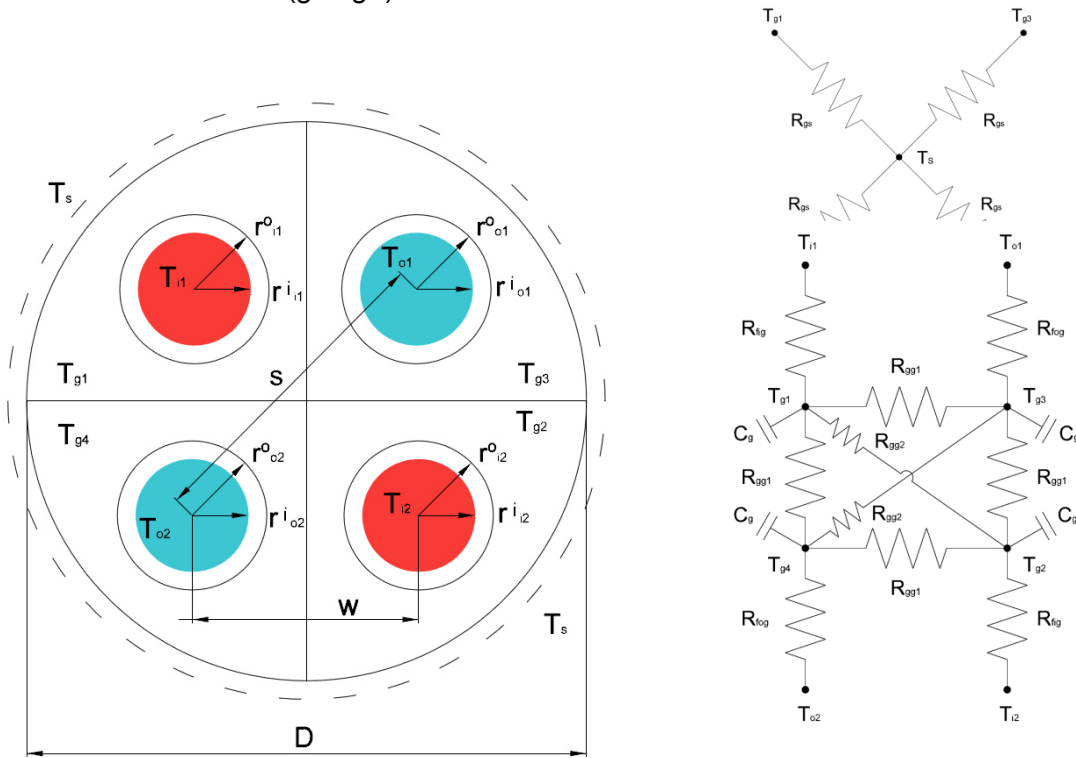


Figura 2 relacions de resistència de flux de calor de l'interior d'un pou de doble U que consta de quatre components de canonada i quatre zones d'emplenat (exemplificat amb forma de creu)

En aquest cas a la perforació s'hi introdueixen dues sondes amb forma de U i s'emplena l'espai lliure amb material conductor tèrmic.

L'esquema d'aquest pou consta de dos canonades d'entrada (i1, i2), dos canonades de sortida (o1, o2) i el material d'emplenat que es subdivideix en quatre zones.



### 3.3 Pous geotèrmics concèntrics

Aquest tipus de sonda està formada per un tub dins de l'altre obert que s'uneixen a la part inferior.

Està format per un conducte d'entrada rodó (i1) un tub de sortida anular (o1) i l'emplenat amb material conductor tèrmic (g1).

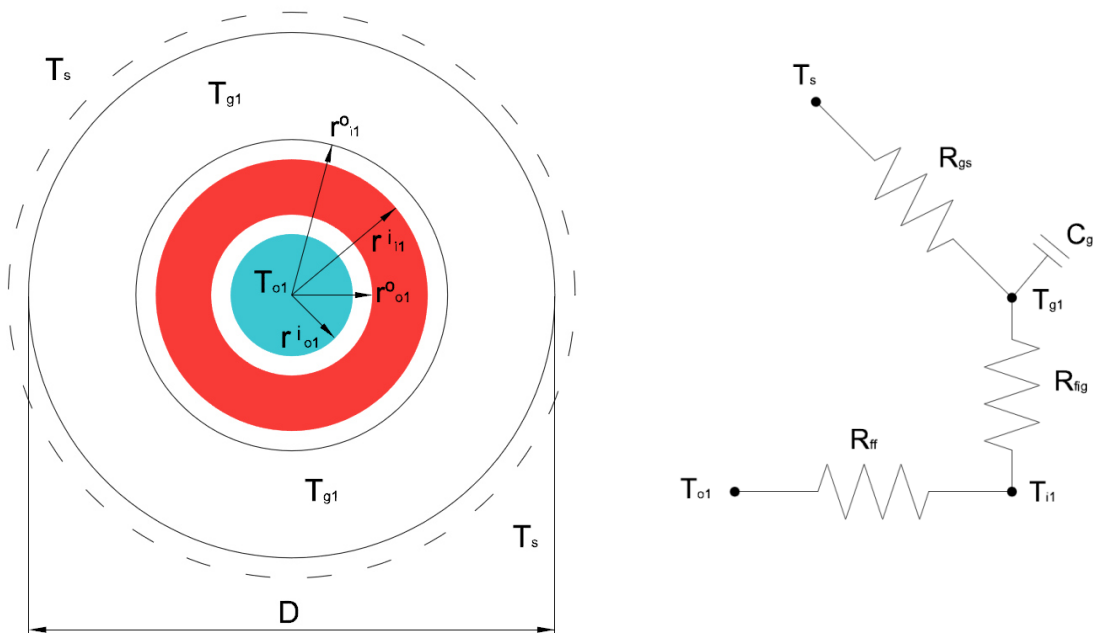


Figura 3 relacions de resistència de flux de calor de l'interior d'un pou coaxial.

### 3.4 Concepte de resistència tèrmica

Aquest tipus de sonda esta formada per un tub dins de l'altre obert que s'uneixen a la part inferior.

La resistència tèrmica (  $\text{KmW}^{-1}$  ) és la capacitat de qualsevol material per oposar-se a la transferència de calor a través seu. Com que l'objectiu del bescanviador de calor del pou geotèrmic és transportar el calor del terreny a la superfície, aquest paràmetre té una gran influència en el rendiment del sistema.

Cada material utilitzat en la construcció del pou geotèrmic té una pròpia resistència tèrmica. Aquesta resistència s'ha d'optimitzar per afavorir la transferència de calor entre el terreny i el fluid de les canonades.

En el cas del pou geotèrmic la transferència de calor es troba representada per dos etapes:

La resistència tèrmica del terreny circumdant  $R_g$ : on els paràmetres a tenir en compte són la conductivitat tèrmica del terreny al voltant del pou i el flux d'aigües subterrànies que l'afecten.

$$T_b - T_0 = R_g \cdot q \quad (\text{Eq. 1})$$

On:

$T_b$  : Temperatura de la paret del pou

$T_0$  : Temperatura del terreny

$q$  : taxa d'extracció de calor específic (  $\text{W/m}$  )

La resistència tèrmica del pou  $R_b$  : aquest paràmetre representa la transferència de calor específica en relació a la diferència de temperatura entre la paret del pou i el fluid a l'interior de les canonades:

$$T_f - T_b = R_b \cdot q \quad (\text{Eq. 2})$$

On:

$T_b$  : Temperatura de la paret del pou

$T_f$  : Temperatura del fluid

$q$  : taxa d'extracció de calor específic (  $\text{W/m}$  )

La següent figura mostra esquemàticament com la resistència tèrmica del pou ( $R_b$ ) és la suma de les següents resistències : la resistència tèrmica del material d'emplenar ( $R_{bhw}$ ), la resistència tèrmica de les canonades ( $R_{bhf}$ ) i la resistència tèrmica del fluid a l'interior de les canonades ( $R_f$ ).

$$R_b = R_{bhw} + R_{bhf} + R_f \quad (\text{Eq. 3})$$

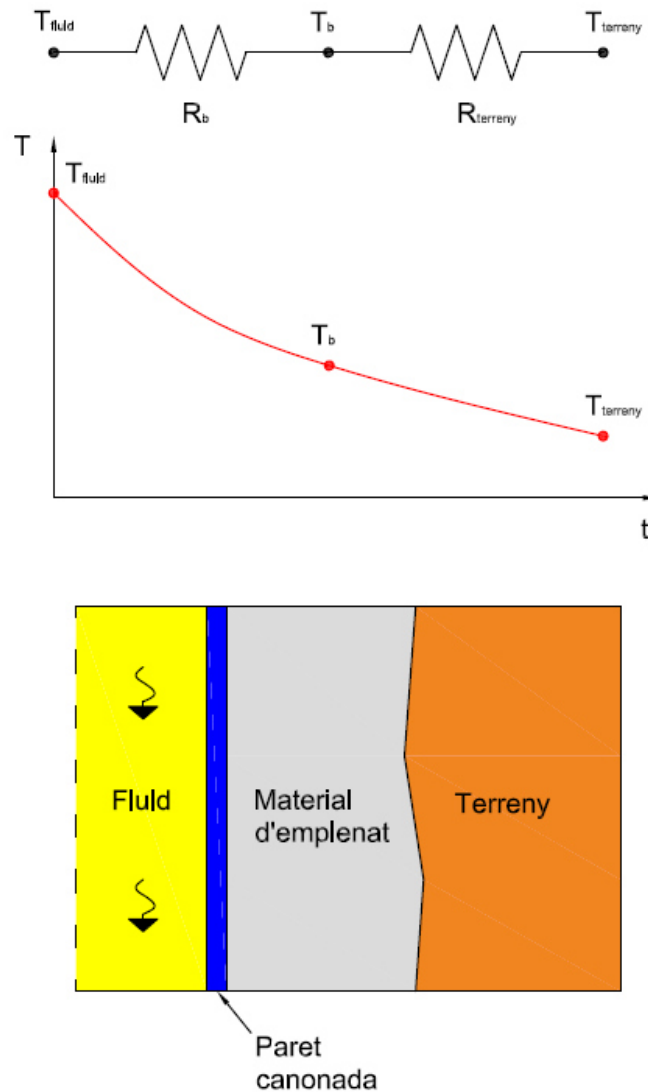


Figura 4 Secció de les resistències tèrmiques d'un pou geotèrmic.

En el cas ideal la resistència del pou hauria de ser zero  $R_b=0$ , però això és impossible, per tant hem de aconseguir que  $R_b$  sigui el més baixa possible.

Els paràmetres més importants que influeixen a la resistència tèrmica del pou geotèrmic són el cabal del fluid, el material de la canonada, el nombre de tubs i la conductivitat tèrmica del material d'emplenar.

Pel que fa al disseny de la nostra màquina, l'únic punt que ens interessa és el cabal òptim del fluid, ja que serà el que determinarà el punt de treball de la nostra bomba.

A la figura següent s'observa com els fluxos turbulents redueixen la resistència tèrmica del conjunt. La gràfica s'ha extret per una sistema típic format per una sonda simple U, de 40mm de polietilè, 100 metres de profunditat, dins un forat de 14 cm, material d'emplenar de 2 W/mK. El fluid utilitzat és una barreja del 28% etanol - aigua a 0°.

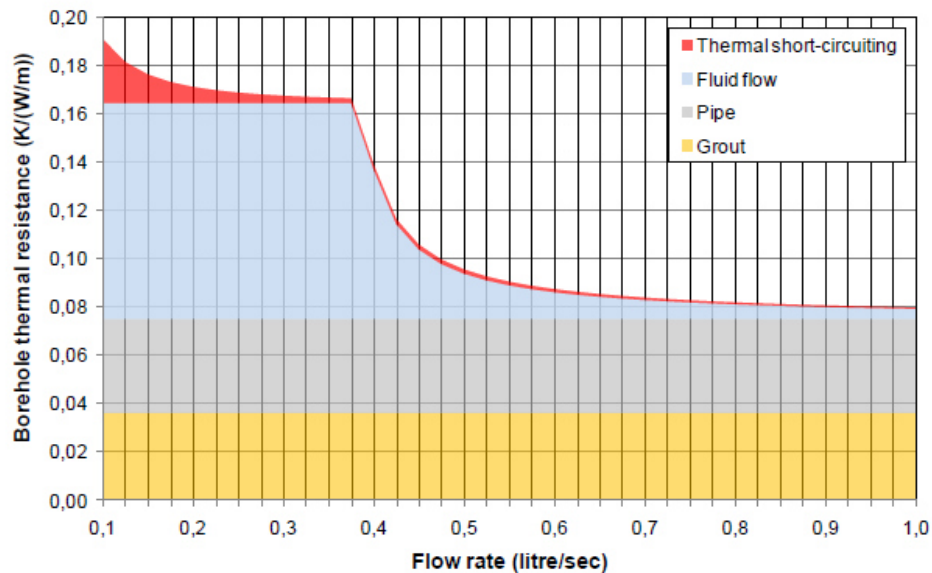


Figura 5 Relació de la resistència tèrmica del pou en funció del cabal (Geotrained Training Manual for designers of shallow Geothermal Systems, Published by GEOTRAINET, EFG, Brussels 2011).

La Figura 6 mostra la pèrdua de càrrega a la mateixa sonda simple U, 40mm de polietilè, 100 metres de profunditat i el fluid utilitzat és una barreja del 28% etanol - aigua a 0°.

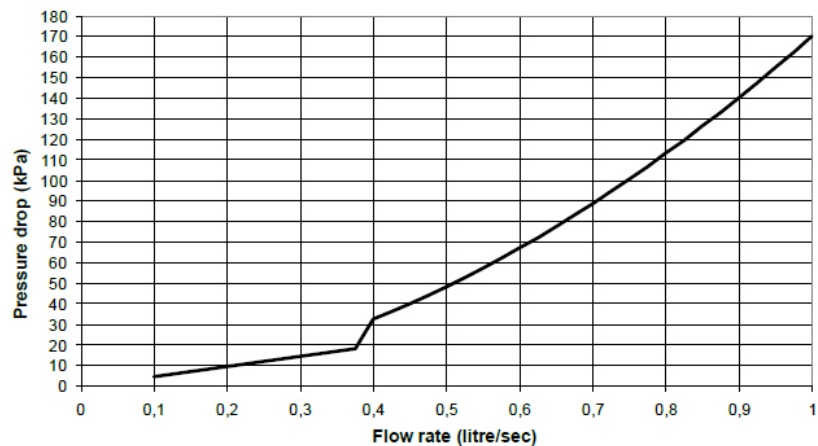


Figura 6 Relació de la pèrdua de càrrega de la sonda en funció del cabal (Geotrainet Training Manual for designers of shallow Geothermal Systems, Published by GEOTRAINET, EFG, Brussels 2011).

Les recomanacions de la guia de disseny ASHRAE (Kavanaugh i Rafferty, 1997) és dissenyar la circulació de fluid a un número de Reynolds de 2500-3000. Si es compleix aquesta regla s'assoleix un compromís raonable entre l'eficiència de la bomba de calor requerida i el consum d'energia de la bomba de circulació.

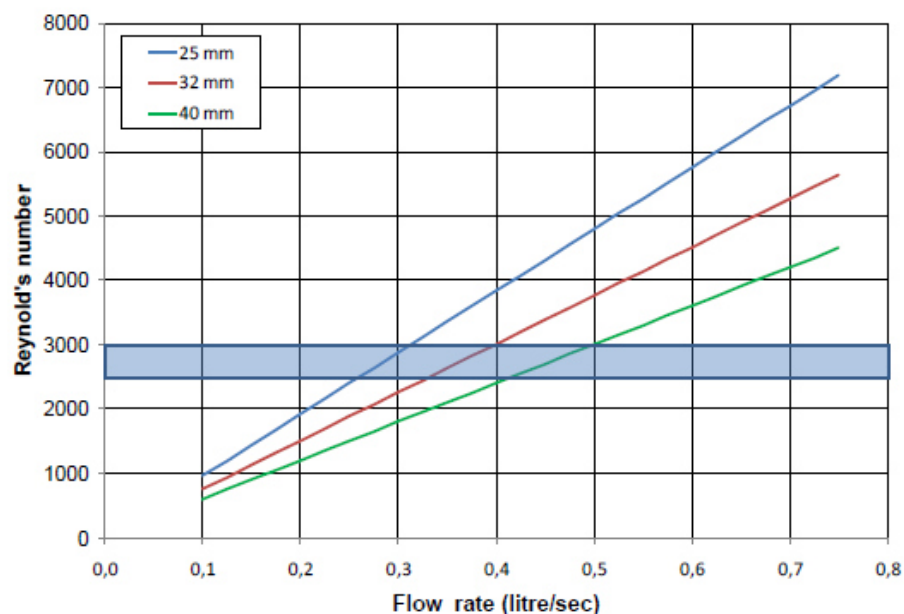


Figura 7 Número de Reynolds en funció del cabal per un fluid barreja de 28% etanol - aigua a 0° (Geotrainet Training Manual for designers of shallow Geothermal Systems, Published by GEOTRAINET, EFG, Brussels 2011).

## 4 DETALLS CONSTRUCTIUS

L'equip és apte per ser utilitzat als pous geotèrmics verticals del circuit tancat que s'usen per sistemes de climatització.

### 4.1 Càlculs hidràulics i selecció de la bomba circulatòria

Seguint la gràfica de la Figura 7, podem avaluar els cabals més desfavorables que ha de satisfer la nostra bomba per complir amb la següent equació:

$$R_e = \frac{\delta \times v \times D_H}{\mu} \approx 3000 \quad (\text{Eq. 4})$$

On :

v: velocitat del fluid (m/s)

	Aigua			30% Etilenglicol amb aigua		
	0° C	30° C	60° C	0° C	30° C	60° C
$\delta$ - Densitat del fluid (kg/m <sup>3</sup> )	999,8	995,6	999,8	1057	1048	1032
$\mu$ - viscositat del fluid (Ns/m <sup>2</sup> )	1,79x10 <sup>-3</sup>	0,79x10 <sup>-3</sup>	0,46x10 <sup>-3</sup>	3,5x10 <sup>-3</sup>	1,7x10 <sup>-3</sup>	0,85x10 <sup>-3</sup>

Taula 1 Densitat i viscositats dels fluids més habituals

	Polietilè PE100		
	25x2,3	32x2,9	40x3,7
D <sub>H</sub> - Diàmetre interior de canonada (mm)	20,4	26,2	32,6

Taula 2 Diàmetres comuns canonades sondes geotèrmiques

Amb les dades anteriors poden obtenir els diferents punts de treball per una única sonda simple U.

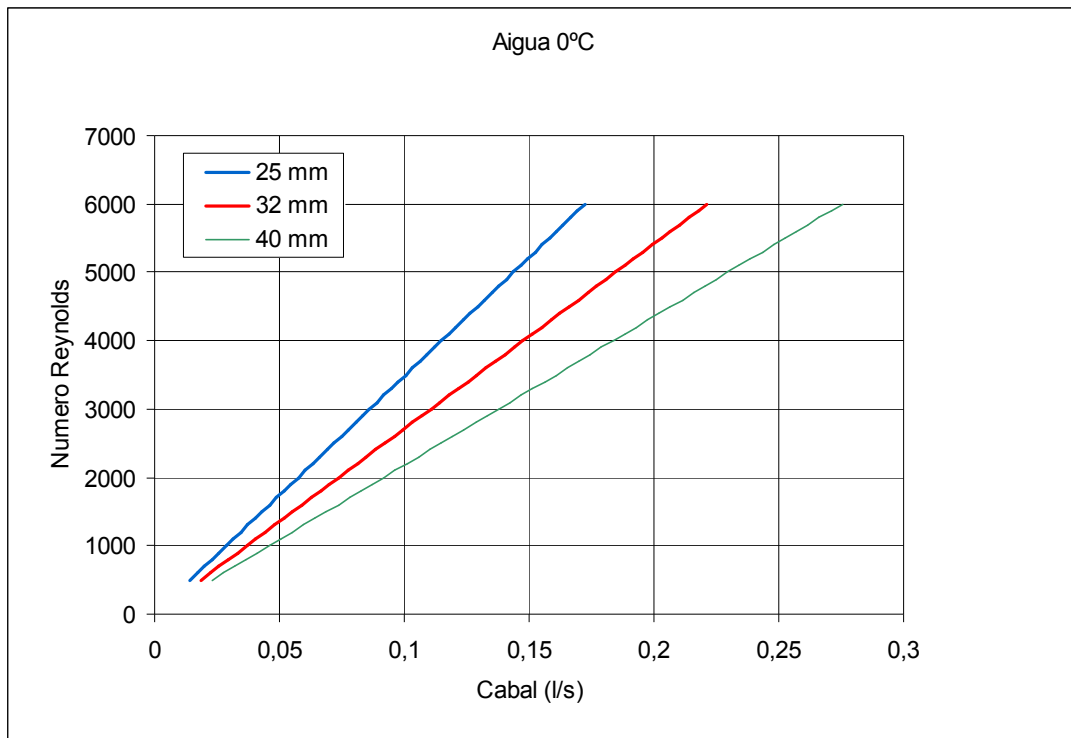


Figura 8 Número de Reynolds en funció del cabal per aigua a 0° C.

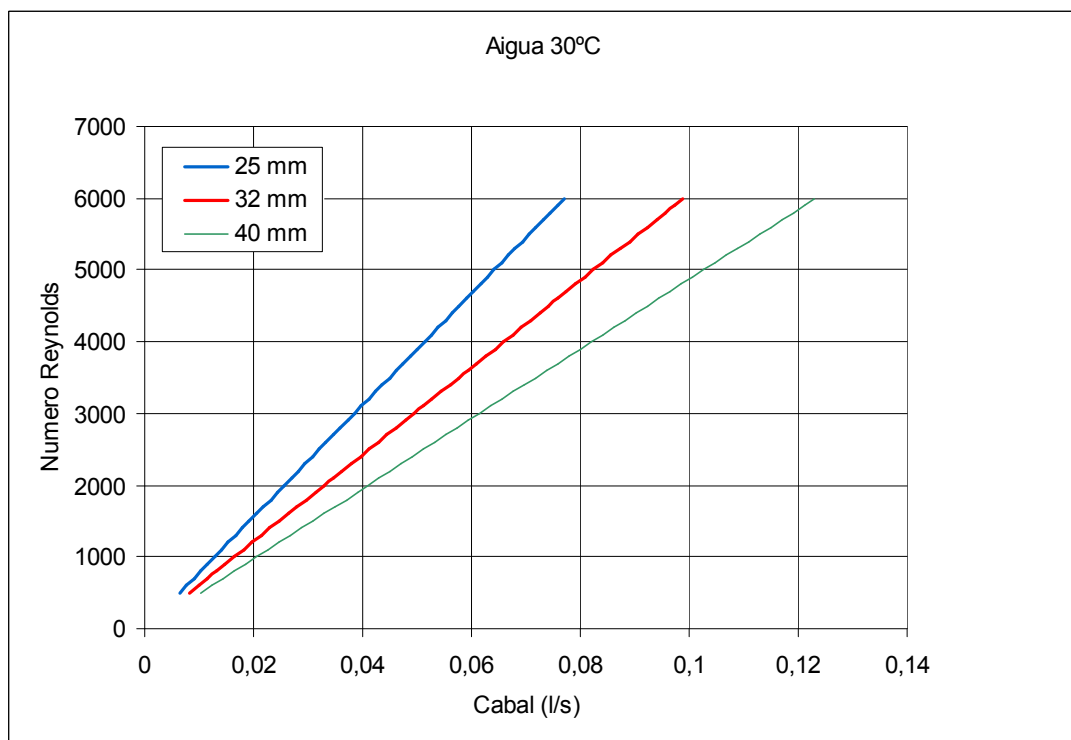


Figura 9 Número de Reynolds en funció del cabal per aigua a 30° C

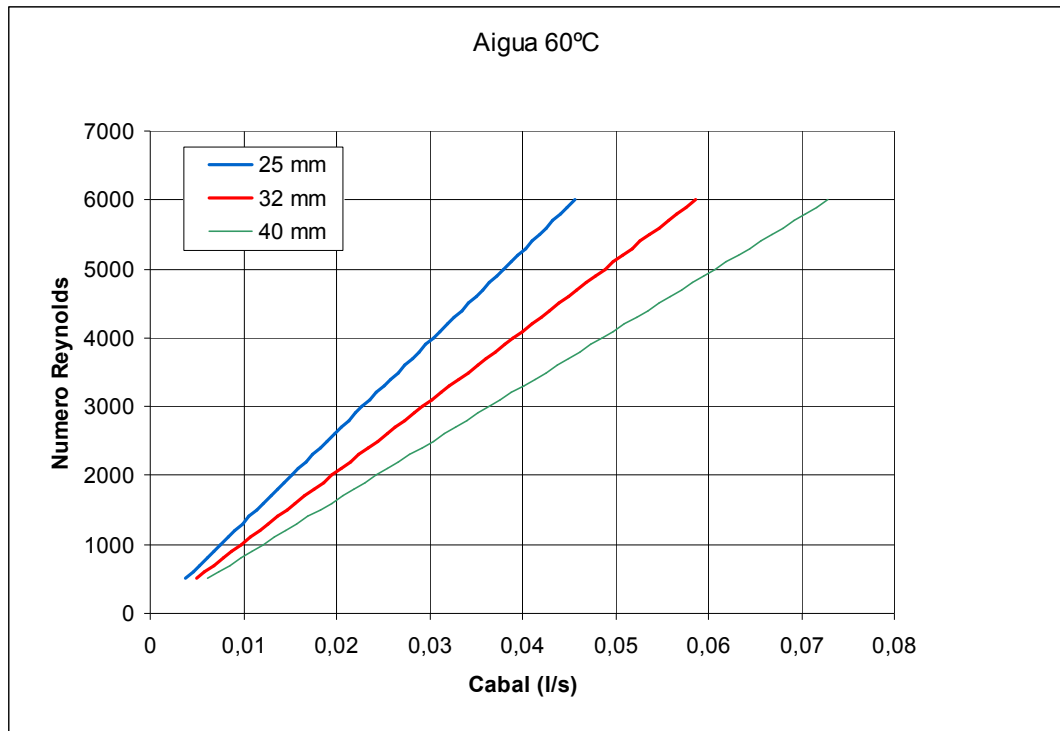


Figura 10 Número de Reynolds en funció del cabal per aigua a 60° C

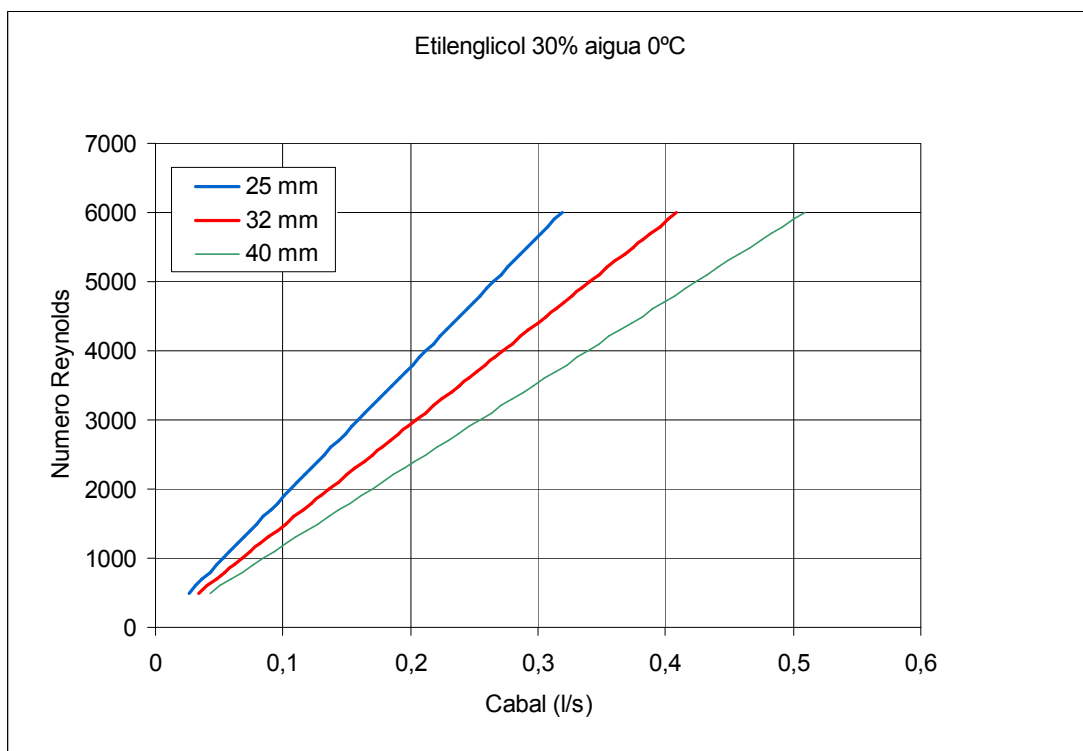


Figura 11 Número de Reynolds en funció del cabal per 30% etilenglicol amb aigua a 0° C



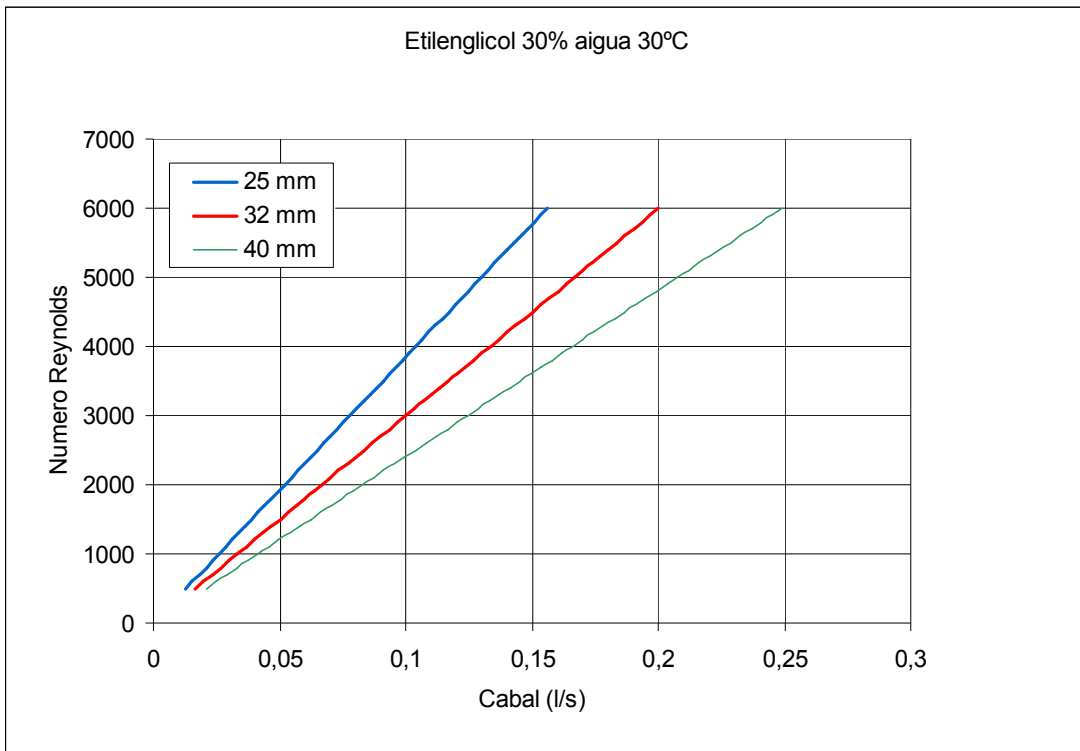


Figura 12 Número de Reynolds en funció del cabal per 30% etilenglicol amb aigua a 30° C

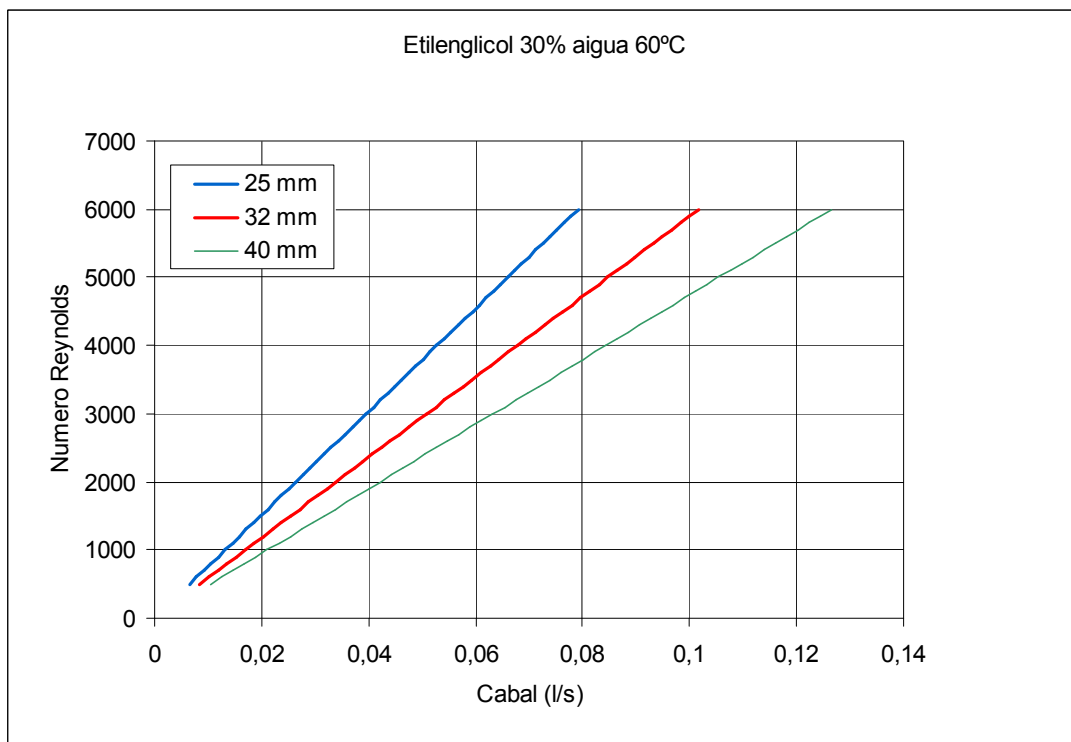


Figura 13 Número de Reynolds en funció del cabal per 30% etilenglicol amb aigua a 60° C

De les il·lustracions anteriors obtenim un mínim i un màxim de cabal per un punt de treball amb Reynolds = 3000.

	Canonada	Fluid	Temperatura Fluid (°C)	Cabal (l/s)	Velocitat (m/s)
Punt mínim	25 mm	Aigua	60	0,0228061	0,069775
Punt màxim	40 mm	Etilenglicol	0	0,254344	0,304717

Taula 3 Màxim i mínim de les gràfiques de cabal amb Reynolds = 3000.

Si considerem que els cabals anteriors són per una sonda simple U i el nostre equip ha de ser capaç de assajar sondes de doble U, el punt de màxim cabal de la bomba ha de ser com a mínim  $2 \times 0,254344 \approx 0,51$  l/s.

Per seleccionar la bomba necessitem també saber la pèrdua de càrrega de les sondes, com a límit d'ús de l'equip marquem sondes de 200 metres de fondària. Calculem la pèrdua de càrrega per una sonda típica de 40 mm seguint la següent fórmula de Colebrook-White (1937, 1939) :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[ \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71 \times d_i} \right] \quad (\text{Eq. 5})$$

On:

$\lambda$  : coeficient de fregament (adimensional)  
 $Re$  : número de Reynolds  
 $d_i$  : diàmetre interior (mm)  
 $k$  : rugositat absoluta de la canonada 0,007 mm.

Si recuperem la següent variant de la fórmula de càlcul de Reynolds:

$$Re = \frac{d_i \times V}{\nu} \times 10^{-3} \quad (\text{Eq. 6})$$

On:

$Re$  : número de Reynolds  
 $d_i$  : diàmetre interior (mm)  
 $V$  : velocitat de l'aigua (m/s)  
 $\nu$  : viscositat cinemàtica de la barreja de 30% etilenglicol amb aigua a 0°C = 3,31E-06 m<sup>2</sup>/s

Combinant les fórmules anteriors obtenim la següent expressió per el càlcul de la pèrdua de càrrega a les canonades:

$$J = \frac{\lambda}{d_i} \frac{V^2 \rho}{2 \times 10^{-3}} \quad (\text{Eq. 7})$$

On:

J : pèrdua de càrrega dels tubs (Pa/m)  
 $\lambda$  : coeficient de fregament (adimensional)  
 $d_i$  : diàmetre interior (mm)  
 V : velocitat de l'aigua (m/s)  
 $\rho$  : densitat de la barreja de 30% etilenglicol amb aigua a 0°C = 1057 kg/m<sup>3</sup>

Com la pèrdua anterior és unitària, s'ha de multiplicar per la longitud de canonada.

$$\Delta p = J \times l \quad (\text{Eq. 8})$$

On:

$\Delta p$  : pèrdua de càrrega a tota la longitud  
 J : pèrdua de càrrega dels tubs ( Pa/m )  
 l : longitud de canonada ( m )

Qt (l/s)	$d_i$ (mm)	V (m/s)	Re	Coeficient fregament	Pèrdua de càrrega (Pa/m)	Longitud (m)	Pèrdua total	
							(Pa)	(bar)
0,25	32,6	0,30	3000	0,0437	65,8	400	26320	0,2632

Taula 4 Resum càlculs pèrdua de càrrega total.

Aplicant les fórmules anteriors, obtenim una pèrdua de càrrega lineal de **65,8 Pa/m** per 400 metres de canonada (200 metres de profunditat) s'obté una pèrdua de càrrega total de 26320 Pa (0,26 bar). A aquesta última pèrdua de càrrega de la canonada, hi hem d'afegir les diferents pèrdues de càrrega de les pròpies canonades de la nostra màquina i del canvi de sentit del fons de la sonda, podem aproximar-ho a un 30% del total, per tant estimarem la pèrdua de càrrega total a 26320 x 1,3 que equival a **34216 Pa (0,34 bar)**.

Ara ja disposen de dues dades per triar la bomba que necessitem, cabal = 0,51 l/s (1,836m<sup>3</sup>/h) i pèrdua de càrrega = 34216 Pa ( $\approx$  3,4 m.c.a.). Amb aquestes dades podem buscar als catàlegs dels diferents fabricants la bomba que més se'ns adequa.

Ens hem decidit per triar una bomba de la marca Wilo, hem triat una bomba senzilla que treballarà a cabal fix. La variació de cabal no es considera important, sempre i quan estem dins d'un regim turbulent.

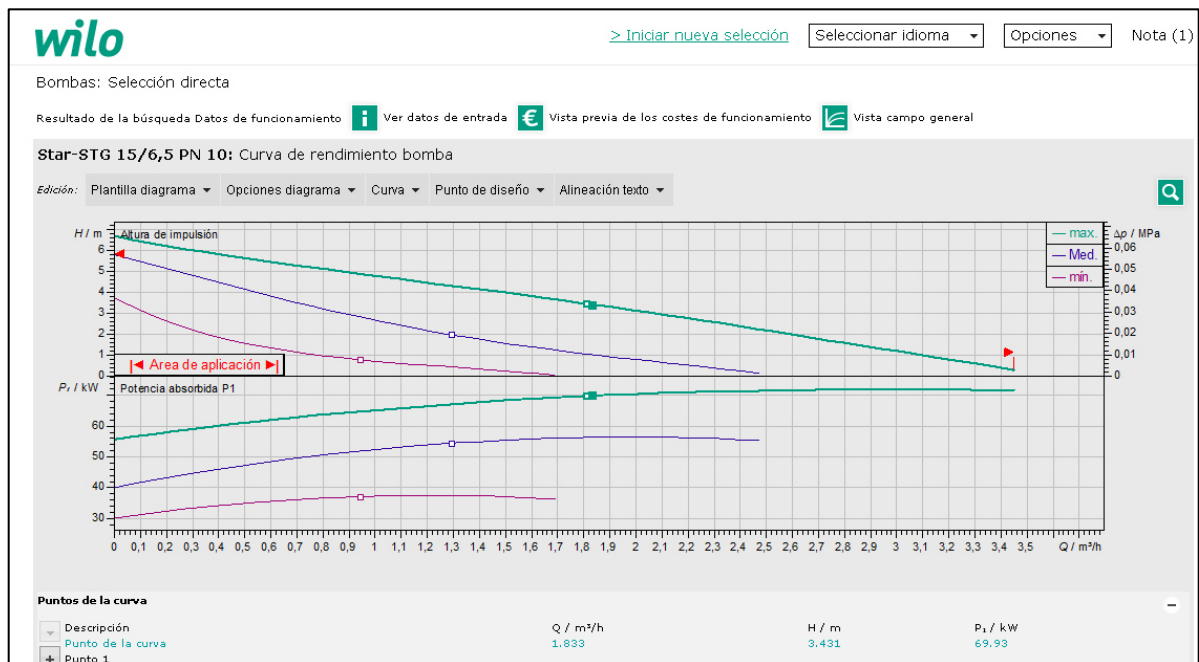


Figura 14 Corbes de rendiment de la bomba Wilo Star-STG 15/6,5 (Programa wilo-select, pàgina web wilo.es)

A la part inferior de la figura anterior, s'observa el punt de treball desitjat 1,83 m<sup>3</sup>/h i 3,4 m.c.a., com considerem que serà un màxim punt de treball, utilitzarem la bomba a velocitat màxima.

Un cop seleccionada la bomba, podem comprovar com es comportarà per diferents situacions. Per exemple amb les mateixes condicions de fluid (30% etilenglicol) i de temperatura (0°) per diferents canonades de sonda simple U i per una fondària típica de 100 metres.

Per fer la simulació, s'han de traçar les corbes pressió–cabal de les sondes i la característica de la bomba.

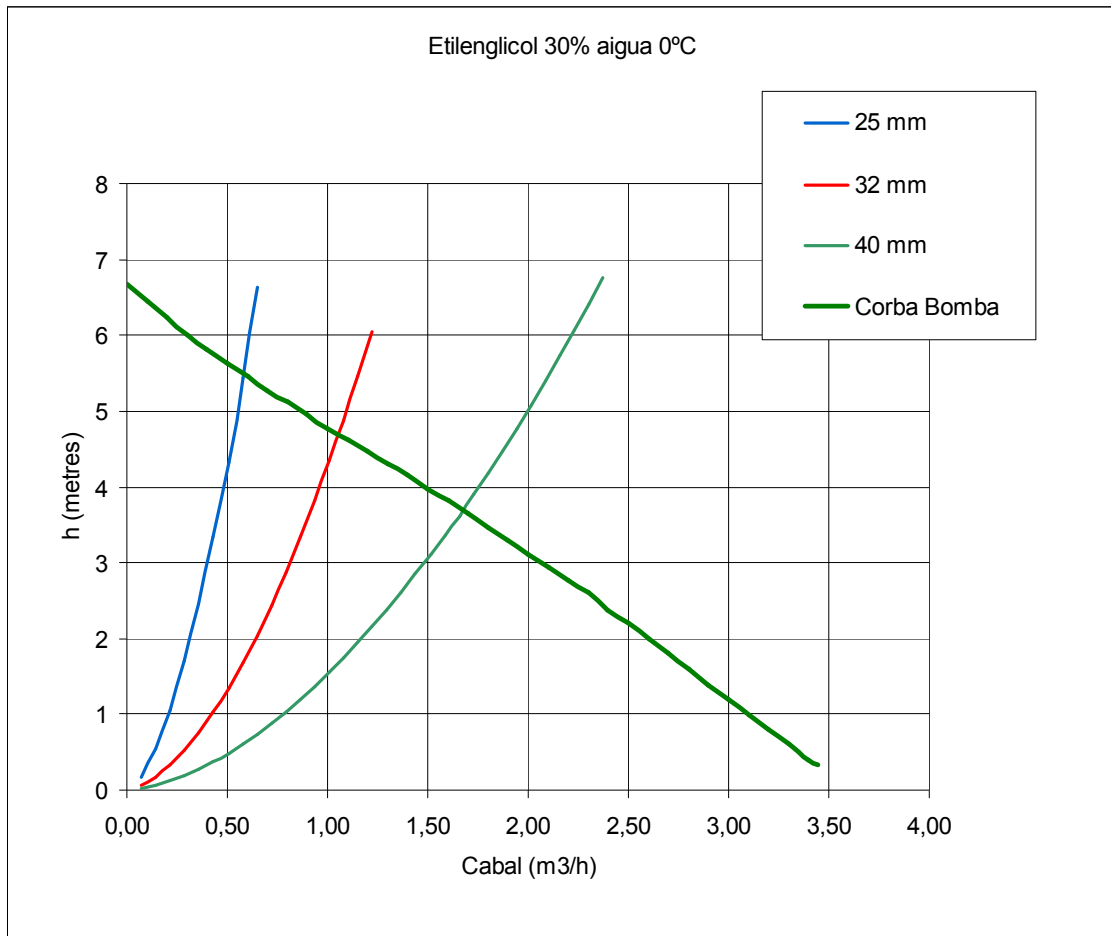


Figura 15 Punt de funcionament per cada tipus de canonada em funció a la corba de la bomba Wilo Star-STG 15/6,5

Les dades dels punts següents es mostren tot seguit:

Tipus sonda simple U	Qt (m³/h)	di (mm)	V (m/s)	Re	Coeficient fregament	Pèrdua de càrrega (Pa/m)	Longitud (m)	Pèrdua total	
								(Pa)	(m.c.a.)
DN 25	0,58	20,4	0,49	3015	0,0437	271,65	200	54329	5,43
DN 32	1,08	26,2	0,56	4403	0,0391	244,09	200	48817	4,88
DN 40	1,73	32,6	0,58	5661	0,0363	194,84	200	38968	3,89

Taula 5 Valors Figura 15.

## 4.2 Vas d'expansió

Com escalfem el fluid amb la resistència elèctrica, hem de preveure l'expansió d'aquest per evitar que salti la vàlvula de seguretat.

Per calcular el volum del vas d'expansió necessari fem servir les expressions de la norma UNE-100155. La fórmula per obtenir el valor del volum del vas d'expansió es presenta a continuació. Però no és una fórmula directe i requerirà fer uns càlculs previs amb altres expressions.

$$V_{\text{vas}} = \frac{V_u}{F_p} \quad (\text{Eq. 9})$$

Per tant trobar el valor del volum del vas d'expansió requereix un procediment ordenat de càlculs que es mostren a continuació.

El primer pas seria calcular el volum d'aigua que hi ha al circuit primari de la instal·lació tèrmica tenint en compte els volums d'aigua al interior de la sonda de major diàmetre i longitud prevista. Considerem que la sonda que conté més volum d'aigua és la sonda de DN 40 mm de doble U amb una longitud de 200 metres (800 metres de canonada). Aplicarem un 20% de seguretat per assumir el contingut de fluid de la màquina i altres imprevistos.

$$V_{\text{canonada}} = \pi \cdot \left(\frac{d_i}{2}\right)^2 \cdot \text{longitud} = \pi \cdot \left(\frac{32,6 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2 \cdot 400 = 0,106\text{m}^3 (106\text{litres}) \quad (\text{Eq. 10})$$

$$V_t = (V_{\text{canonada}}) \cdot 1,2 = 106 \cdot 1,2 = 127,2\text{litres} \quad (\text{Eq. 11})$$

El segon pas del càlcul seria calcular el volum útil del circuit primari que seria el volum màxim que podria arribar a tenir el circuit. L'expressió per calcular-ho es presenta a continuació.

$$V_u = V_t \cdot C_d \quad (\text{Eq. 12})$$

On  $C_d$  és el coeficient de dilatació del fluid que es calcula amb la següent expressió.

$$C_d = C_a \cdot a \cdot (1.8 \cdot T_{m\grave{a}x} + 32)^b \quad (\text{Eq. 13})$$

Per tant, primer s'haurien de calcular els coeficients a i b que es calculen de la següent manera.

$$a = -0,0134 \cdot ((\%G)^2 - 143,8 \cdot (\%G) + 1918,2) \quad (\text{Eq. 14})$$

$$b = 0,00025 \cdot ((\%G)^2 - 94,57 \cdot (\%G) + 500) \quad (\text{Eq. 15})$$

Les dades necessàries pels càlculs dels coeficients a, b i  $C_d$  es mostren a la taula següent.

%G	Tant per cent de etilenglicol contingut al fluid caloportador	30 %
$T_{m\grave{a}x}$	Temperatura màxima del fluid caloportador	60 °C
$C_a$	Constant de càlcul	0,0203

Taula 6 Dades per realitzar els càlculs dels coeficients a, b i  $C_d$

I els resultats parcials i final dels càlculs per determinar el volum útil es mostren en la taula següent.

a	Coeficient a	20,044
b	Coeficient b	-0,359
$C_d$	Coeficient de dilatació del fluid	0,0689
$V_u$	Volum útil del circuit primari	8,77 litres

Taula 7 resultats parcials i final dels càlculs per determinar el volum útil

Finalment l'últim càlcul que s'ha de realitzar és el del coeficient  $F_p$  que és un coeficient basat en la relació de pressions del sistema i es calcula amb la següent expressió.

$$F_p = 1 - \frac{P_{ai}}{P_{af}} \quad (\text{Eq. 16})$$

$P_{ai}$  es refereix a la mínima pressió que podria assolir el circuit primari que considerem de 0,5 kg/cm<sup>2</sup> més 1 kg/cm<sup>2</sup> de pressió atmosfèrica, en total 1,5 kg/cm<sup>2</sup>.  $P_{af}$  es refereix a la pressió màxima que es podria arribar a assolir, considerem el valor de la vàlvula de seguretat de 3 kg/cm<sup>2</sup> més 1 kg/cm<sup>2</sup> de pressió atmosfèrica, en total 4 kg/cm<sup>2</sup>.

Per tant el coeficient  $F_p$  té un valor de 0,625.

Ara ja es disposen de totes les dades per calcular el volum d'acumulació que es pot calcular tornant a l'expressió Eq 9 on els resultats parcials i final d'aquesta expressió es mostren a la taula següent.

$V_u$	Volum útil del circuit primari	8,77 litres
$F_p$	Coefficient $F_p$	0,625
$V_{vas}$	Volum vas d'expansió	14,032 litres

Taula 8 Valor final del volum del vas d'expansió



Un cop conegut el volum del vas, ja es pot procedir a triar un model que s'ajusti a les característiques. El model triat i les seves característiques principals es presenten a la taula següent.

Model	Ibaiondo 15 AMR	
Pressió màxima (bar)	10	
Temperatura min/màx (°C)	-10/+100	
Capacitat (litres)	15	
Precàrrega (bar)	1,5	

Taula 9 Dades i imatge del vas d'expansió seleccionat

### 4.3 Resistència elèctrica

El tipus de resistència elèctrica es tria en funció dels Watts/metre que pretenem injectar al terreny, com a referència els valors típics són de 20 a 80 Watts/metre, aquesta energia ha de ser suficient per obtenir un diferencial de temperatura de 3,7 °C a 7 °C.

Aquets valors estan directament relacionats amb el cabal, prenem com a cabal màxim 0,51 l/s calculat anteriorment per definir la bomba i apliquem la següent fórmula de pèrdues.

$$q = Q \cdot \Delta t \cdot C_e \cdot \alpha \quad (\text{Eq. 17})$$

On:

- q : pèrdues de calor (W)
- Q : cabal (l/h)
- $\Delta t$  : diferencial de temperatura (°C)
- Ce: calor específic del fluid (Wh/kg°C)
- $\alpha$ : Densitat del fluid (kg/l)

Q		$\Delta t$ (°C)	Etilenglicol 30%		q (W)	Longitud (m)	Energia injectada (W/m)
(l/s)	(l/h)		Ce (Wh/kg°C)	$\alpha$ (kg/l)			
0,51	1836	3,7	1,035	1,057	7432	200	37,1
0,51	1836	7	1,035	1,057	14060	200	70,3

Taula 10 Resum càlculs transmissió de calor al pou geotèrmic.

Tenint en compte els salts tèrmics de referència que van de 3,7 a 7 °C, la potència màxima que podem aplicar serà de 70 W/m amb una potència elèctrica de 14 kW.

El tipus de resistència elèctrica ha de ser regulable per adaptar-se a les diferents profunditats, com a referència triarem un valor aproximat de 50W per metre de fondària del pou, indiferentment si es tracta de sonda simple o doble. Aquest criteri serà vàlid si comprovem que un cop estabilitzat el sistema es mantingui el salt tèrmic entre 3,7 i 7 °C.

Hem de triar un escalonat de regulació ja que no podem fer una resistència vàlida per 50W metre a totes les fondàries, com a graó mínim fixem 1000 W. Definim un grup de 6 resistències,  $R1=R2=R3=1000W$  i  $R4=R5=R6=4000W$ . Hem de fer-ho amb dos commutadors per poder seleccionar amb graons de 1000W.

La següent taula mostra els valors provables de potència en funció de la fondària del pou.

Fondària (m)	Resist. implicades	Pot. (W)	Relació (W/m)	Fondària (m)	Resist. implicades	Pot. (W)	Relació (W/m)
10	R1	1000	100	110	R1+R4	5000	45
20	R1	1000	50		R2+R4	6000	54
30	R1	1000	33	120	R2+R4	6000	50
	R1+R2	2000	66	130	R2+R4	6000	46
40	R1+R2	2000	50		R3+R4	7000	54
50	R1+R2	2000	40	140	R3+R4	7000	50
	R1+R2+R3	3000	60	150	R3+R4	7000	47
60	R1+R2+R3	3000	50		R4+R5	8000	53
70	R1+R2+R3	3000	43	160	R4+R5	8000	50
	R4	4000	57	170	R4+R5	8000	47
80	R4	4000	50		R4+R5+R1	9000	53
90	R4	4000	44	180	R4+R5+R1	9000	50
	R1+R4	5000	55	190	R4+R5+R1	9000	47
100	R1+R4	5000	50		R4+R5+R1+R2	10000	53

Taula 11 Selecció de potència inicial en funció de la fondària del pou

La potència màxima total de 15kW no es preveu que s'utilitzi mai a no ser que la conductivitat dels pous sigui molt alta, pel cas de pous de 200 metres 75 W/m, tot i que possible, cas molt poc probable.

### POTÈNCIA RESISTÈNCIES WATS

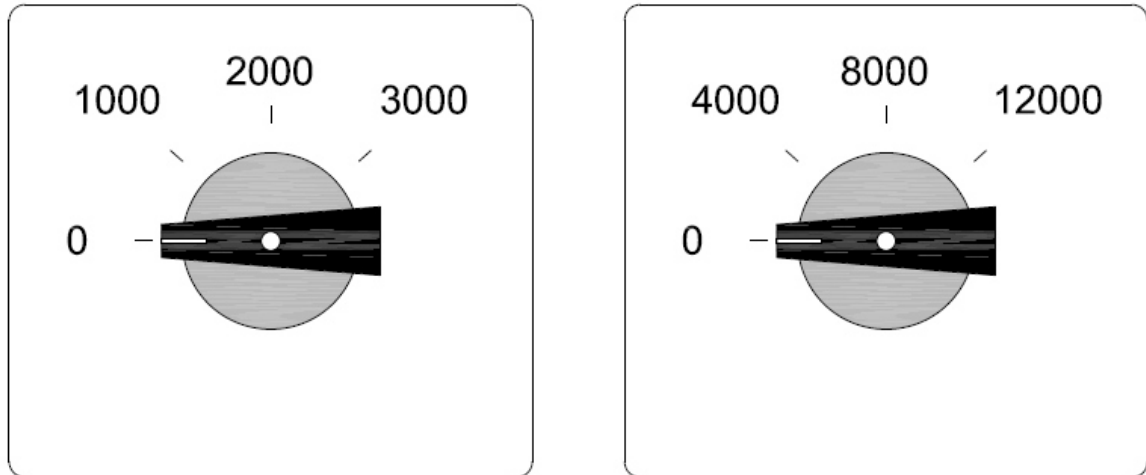


Figura 16 Detall selectors de potència aportada per les resistències

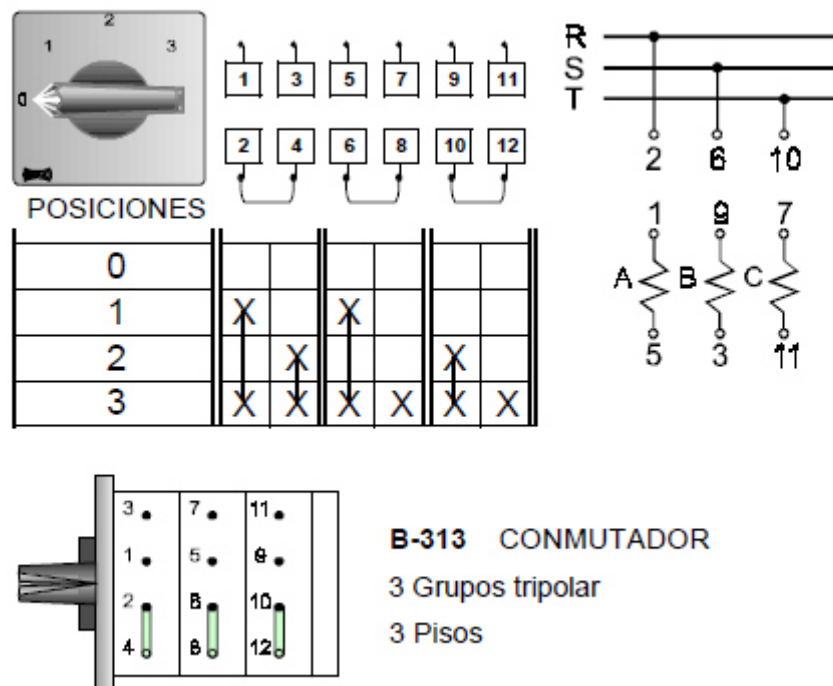


Figura 17 Detall connexió selectors de potència aportada per les resistències

La resistència es fabricarà a mida i tindrà una forma com la mostrada i anirà encapsulada dins un col·lector de 3 polzades. La mida del conjunt és aproximadament de diàmetre 100 mm i longitud de 500 mm. Les connexions d'entrada i sortida del col·lector és de 1".

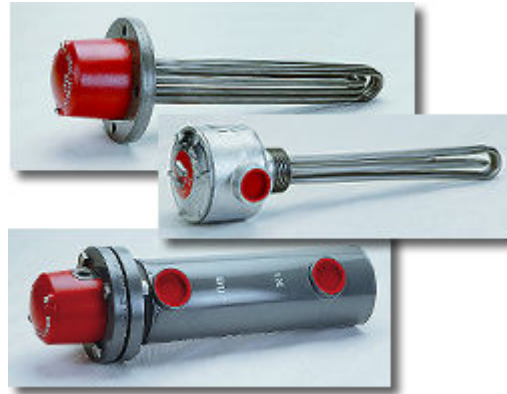


Figura 18 Imatge model de resistència i encapsulat similar, imatge extreta de WARREN ELECTRIC CORPORATION

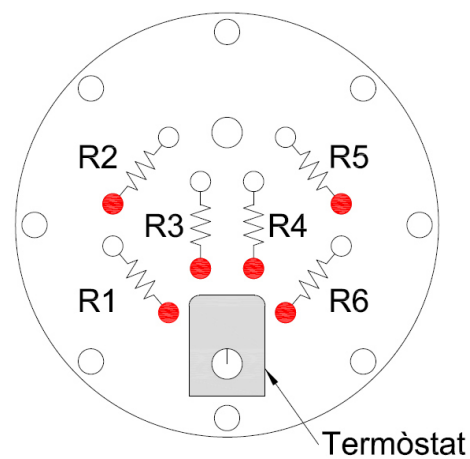


Figura 19 Detall col·locació de resistències a la platina

El termòstat inclòs a la platina, funciona com element de seguretat per si la temperatura puja per sobre de 60°C desconnecti el sistema, aquesta situació es pot donar si es connecten les resistències i la bomba està parada, al no circular el fluid la temperatura puja perillosament.

#### 4.4 Control i enregistrament de dades tèrmiques

A part de les dades horàries de data i hora, les dades necessàries per analitzar-les i determinar la conductivitat del terrenys es mostren a la taula següents:

Temperatures	T1	Temperatura d'entrada a la sonda geotèrmica
	T2	Temperatura de sortida de la sonda geotèrmica
	T3	Temperatura ambient
Cabal	Q1	Cabal total de fluid
	Q2	Cabal de la sonda 2 per sondes de doble U
Potència tèrmica	Pt	Calculada al moment

Taula 12 Dades necessàries de mesurar i enregistrar.

Per satisfer aquestes dades s'ha buscat una centralita electrònica amb capacitat per enregistrar dades, amb suficients entrades per satisfer les necessitats. El model seleccionat ha estat el Multical® 801 del fabricant kamstrup.



Figura 20 Imatge de la centralita Kamstrup Multical® 801

Entre d'altres, aquest equip permet la connexió de 3 entrades de sonda de temperatura de 2 o 4 fils i dos entrades de cabalímetre d'ultrasons del mateix fabricant. A més de una gran capacitat d'emmagatzemar dades de més de 460 dies.

Per les sondes de temperatura, es trien sondes PT500 amb 2 fils de 1,5 metres del mateix fabricant amb les següents característiques:

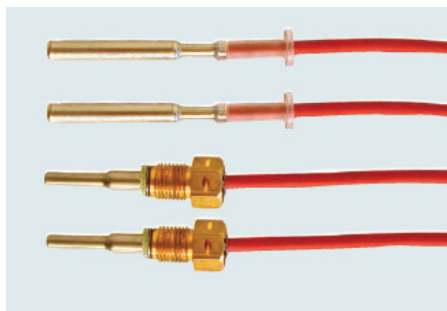


Figura 21 Imatge de la sonda PT500 de Kamstrup

## Datos técnicos

	Sonda para portasondas	Sonda directa corta
Elemento	Pt500 según EN60751	
Emparejamiento	EN1434	
Temperatura del medio	0...150°C corto plazo 160°C	
Temperatura ambiente	-10...70°C	
Temperatura almacenaje y transporte	-25...70°C	
Tiempo de respuesta $\tau_{0,5}$	5 seg.	2 seg.
Medio	Agua de calefacción	
Humedad	< 98% condensación RF	
Nivel de presión	Portasondas	PN16
Diámetro	ø5,8 mm	ø4/5,6 mm
Longitud del tubo de la sonda	47 mm	> 27,5 mm
Cable de silicona	2 x 0,25 mm <sup>2</sup> , 1,5 m, 3 m, 5 m y 10 m	2 x 0,25 mm <sup>2</sup> , 1,5 m y 3 m
Material del tubo de la sonda	AISI 304, W-no. 1.4301	AISI 316 Ti, W-no. 1.4571
Clase protección	IP65	IP67

Taula 13 Dades tècniques de les sondes PT500 de Kamstrup

El manual ens ofereix el detall de la connexió de les sondes de temperatura que es mostra tot seguit:

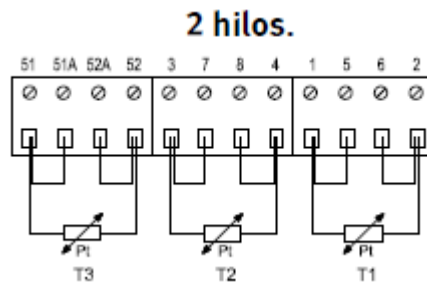


Figura 22 Detall connexió sondes de temperatura a la centralita

Pel que fa als mesuradors de cabal, el mateix fabricant ens facilita el model Ultraflow® 34 amb les següents característiques:



Figura 23 Imatge del cabalímetre Ultraflow® 34

### Flowdata

Nom. flow $q_p$	Nom. diameter	Meter factor <sup>1)</sup>	Dynamic range $q_i:q_p$	$q_s:q_p$	Flow@125 Hz <sup>2)</sup>	$\Delta p@q_p$	Min. cut off
[m <sup>3</sup> /h]	[mm]	[imp./l]			[m <sup>3</sup> /h]	[bar]	[l/h]
1.5	DN15 & DN20	100	1:100	2:1	4.5	0.22	3
2.5	DN20	60	1:100	2:1	7.5	0.03	5
3.5	DN25	50	1:100	2:1	9	0.07	7
6	DN25	25	1:100	2:1	18	0.20	12
10	DN40	15	1:100	2:1	30	0.06	20
15	DN50	10	1:100	2:1	45	0.14	30
25	DN65	6	1:100	2:1	75	0.06	50
40	DN80	5	1:100	2:1	90	0.05	80
60	DN100	2.5	1:100	2:1	180	0.03	120
100	DN100 & DN125	1.5	1:100	2:1	300	0.07	200

1) The meter factor can be seen on the ULTRAFLOW® label on the meter.

2) Saturation flow. Max. pulse frequency 128 Hz is maintained at higher flow rates.

Taula 14 Dades tècniques del cabalímetre Ultraflow® 34



La connexió elèctrica dels cabalímetres Ultraflow® 34 és directe amb tres terminals segons indica la següent taula:

	V1	V2
Red (3.6 V)	9	9
Yellow (signal)	10	69
Blue (GND)	11	11

Taula 15 Detall bonera de connexió Multical® 801 per cabalímetre Ultraflow® 34

Per la col·locació del cabalímetre s'ha de tenir en compte la posició a la que es troba, no funciona a totes les posicions, la següent imatge indiquen les posicions adients:

Installation angle for ULTRAFLOW® 34

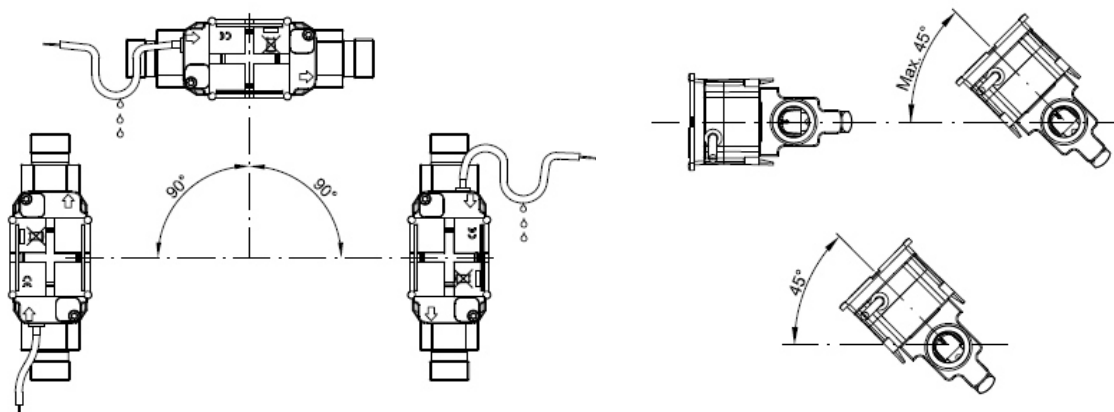


Figura 24 Posicions vàlides de col·locació pel cabalímetre Ultraflow® 34

Per tal de descarregar les dades del logger es preveu fer servir un cable USB connectat directament a la bonera com indica la següent figura que tot i que indica un connector RS232 existeix l'opció de que sigui USB.

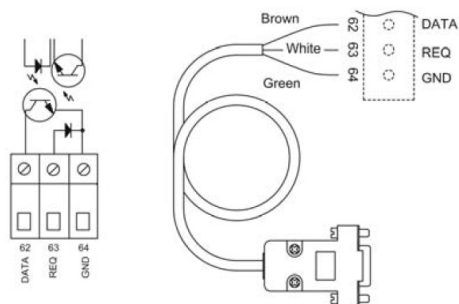


Figura 25 Cable de dades de connexió directe a Multical® 801 per RS232 o per USB

L'equip té la possibilitat d'afegir-hi altres targetes de comunicació sense fils com wifi o via ràdio que de moment no es preveu instal·lar.

Per l'alimentació elèctrica es preveu que sigui del tipus monofàsic a 24V amb transformador, la durada de la bateria del sistema és de 1 any si aquest no es troba alimentat i de 10 anys si es manté alimentat. Per aquest motiu quan l'equip no s'utilitzi es mantindrà endollat a la corrent, el consum màxim en repòs és de 9 Wats.

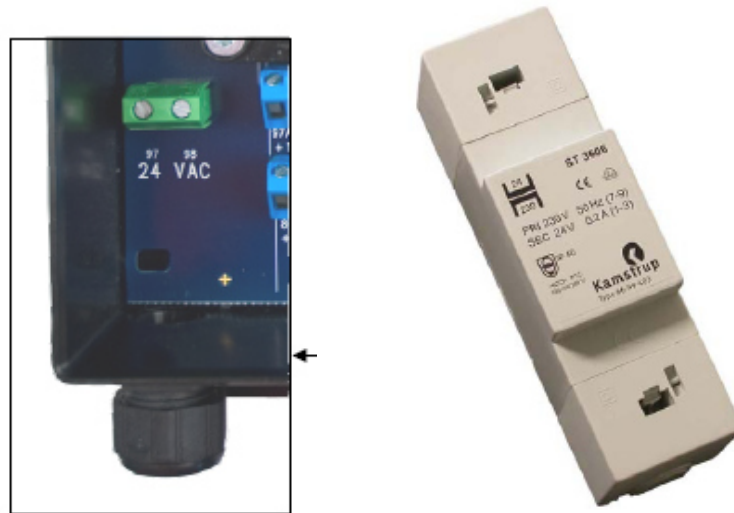


Figura 26 Detall alimentació Multical® 801 i transformador 230V-24V

Existeix una variant de l'equip que pot anar alimentat a 230V directament, però per major seguretat amb separació galvànica per part del transformador el triarem a 24 V.

El conjunt de connexions elèctriques a l'equip Multical® 801 es mostra a la següent figura:

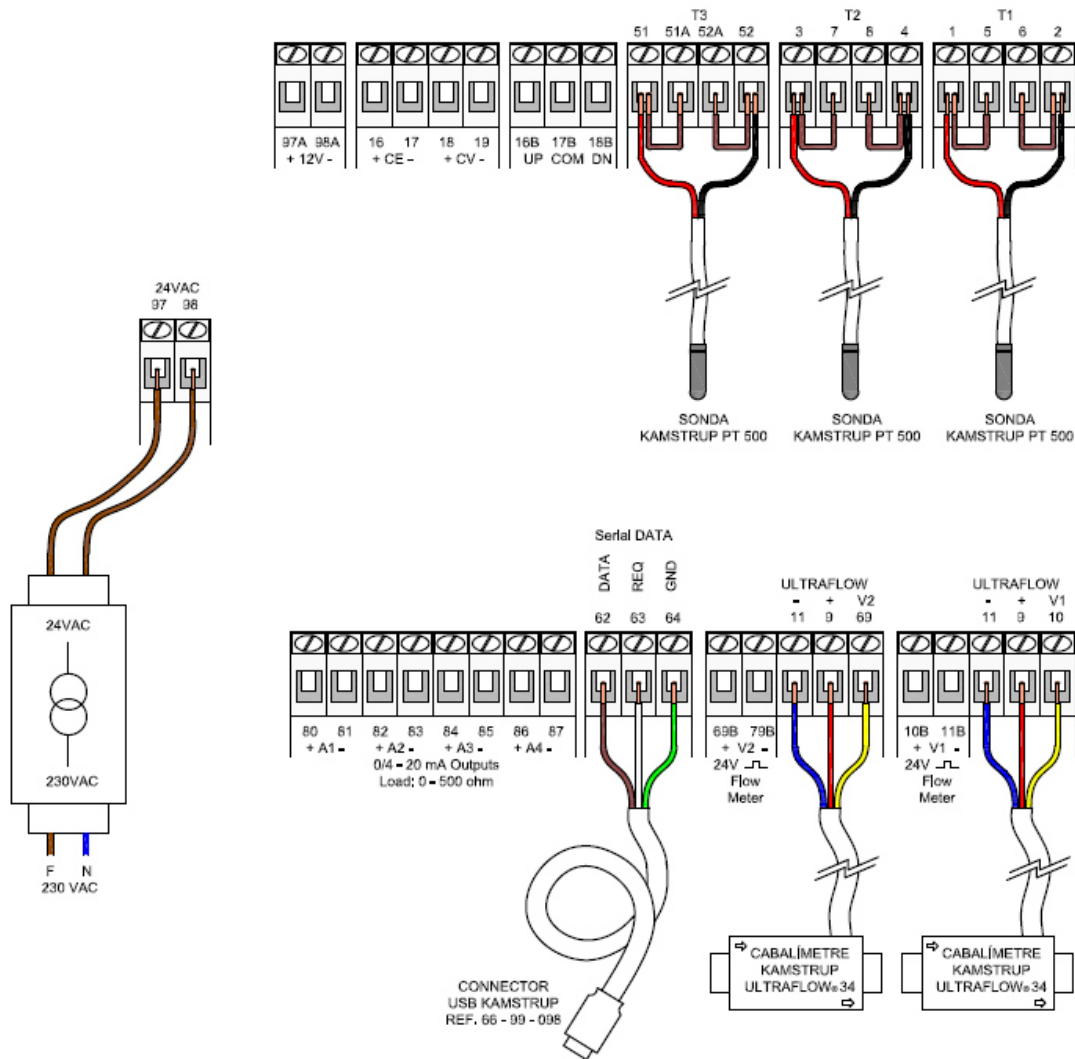


Figura 27 Detall connexions Multical® 801

#### 4.5 Perfil de temperatures

Abans de fer les proves amb la màquina T.R.T., s'ha de fer el perfil de temperatura del pou de sondeig. Aquesta prova consisteix en introduir un data-logger tipus submarí per l'interior de la canonada que mesura la temperatura i la fondària. Amb aquesta prova es poden detectar corrents d'aigua subterrània o buits al material d'emplenar.

L'equip que s'ha seleccionat és el Levellogger Edge del fabricant Solinst, aquest equip mesura temperatura i profunditat (pressió 200 m.c.a.) fina a 200 metres. Té un interval de lectures de fins a 0,125 segons i una rang de temperatura de -20 a 80°C.



Figura 28 Imatge Levellogger Edge

Amb el terreny estabilitzat, almenys 5 dies després de la perforació i amb el tubs de la sonda plens d'aigua, es va introduint poc a poc el Levellogger lligat amb una corda fins que faci fons. El temps de baixada ha de ser suficient com per que l'aparell enregistri una lectura de temperatura estable per metre de profunditat.

La bateria té una durada aproximada de 10 anys i per descarregar les dades es fa a través d'un cable de dades amb lector òptic.



Figura 29 Imatge cable lector òptic per Levellogger Edge

## 4.6 Càlculs i maniobres elèctriques

L'alimentació serà trifàsica 230/400V 50Hz i ha de ser suficient per els següents elements:

Element	Tipus	Potència activa	Cos $\varphi$	Intensitat		
				R	S	T
Resistències elèctriques	Trifàsic	15.000 W	1	21,65 A	21,65 A	21,65 A
Bomba elèctrica	Monofàsic	70 W	0,7	0,43 A		
Data logger Multical® 801	Monofàsic	9 W	0,7		0,06 A	
Maniobres, contactors, pilots...	Monofàsics	50 W	0,7		0,3 A	
Endoll previsió connexió portàtil	Monofàsic	150 W	0,7			0,93 A
Total				22,08 A	22,01 A	22,58 A

Taula 16 Consums de la màquina T.R.T.

Per realitzar els càlculs d'intensitat de la taula anterior per consums trifàsics s'ha aplicat l'equació 18 i per consums monofàsics l'equació 19:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos} \quad (\text{Eq. 18})$$

$$I = \frac{P}{U \cdot \cos} \quad (\text{Eq. 19})$$

La protecció general serà de 25 A tetrapolar i tot seguit és col·locarà un diferencial general també tetrapolar, per a la bomba és col·locarà un guarda motor de 0,4 a 0,63 A, per al datalogger i per a la maniobra, és col·locaran fungibles de 500 mA. Per a l'endoll es col·locarà un fusible de 3 A, que es el consum màxim premés pels 25A de la fase al interruptor general ( 21,65 A – 25A = 3,35 A).

Per al càlcul de les seccions dels cables, apliquem les taules de la ICT-BT-19 del Reglament de Baixa Tensió (REBT 2002). Per a l'alimentació de l'equip, es col·locarà un cable mànega de 5 fils amb una base tipus cetac també de 5 contactes i 32 A.



Figura 30 Imatge base tipus cetac de 32 A i 5 contactes

Segons el tipus d'instal·lació de la Taula 1 de la ICT – BT – 19 que més s'ajusta al nostre cas, és el tipus E per cables multi conductors al aire lliure. Segons aquesta taula, per una intensitat de 25A i considerant el pitjor dels casos amb cable P.V.C., amb una secció de 4 mm<sup>2</sup> aguanta fins a 30 A, per tant col·locarem una mànega multi conductora de 5x4mm<sup>2</sup> de 2 metres de llargada amb el cetac de 32A mascle al seu extrem.

Per a la resta de consums, com són tant baixos, es tria la mínima secció permessa de 1,5 mm<sup>2</sup>.

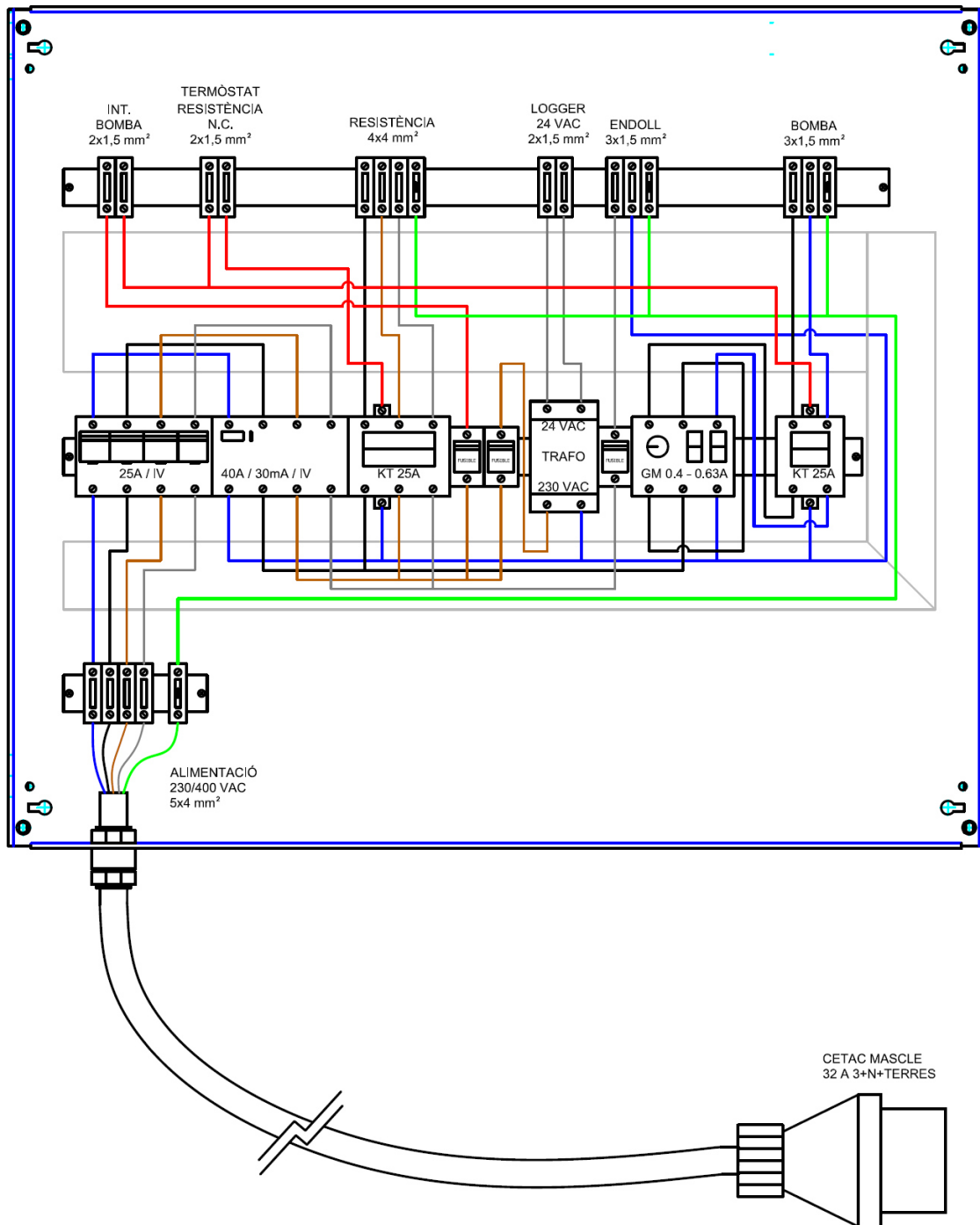


Figura 31 Detall muntatge quadre elèctric proteccions i maniobra

El contactor de les resistències elèctriques entra en funcionament sota dues condicions, la primera és que la bomba es trobi en marxa (interruptor bomba activat) i que el termòstat de seguretat no es trobi activat.

Quan el contactor es troba en marxa, dona corrent als selectors de potència de les resistències que activen les assignades en funció de la potència demanada.

## 5 PROCÉS OPERATIU

Abans d'anar a l'emplaçament s'han de preveure una sèrie de necessitats que es requereixen per poder fer funcionar la màquina.

El primer és que han d'haver passat almenys 5 dies des que es va emplenar el pou amb ciment, aquest tipus de ciment té un comportament exotèrmic mentre endureix. Aquesta calor despresa pel ciment falsejaria les proves.

El més important és disposar d'energia elèctrica estable i constant durant al menys 3 dies, en funció de la profunditat del pou establirem la potència necessària. Si és possible es demanarà que ens instal·lin una base femella cetac de 32A 3P+N+T just al cantó del pou. Si no és possible, haurem de menester un allargador trifàsic ja que la màquina s'ha d'instal·lar just sobre el pou.

Cal preveure que si l'obra no disposa de corrent elèctric de xarxa, haurem de llogar un grup electrogen, el màxim estabilitzat possible i amb autonomia suficient per mantenir la potència necessària durant un mínim de tres dies.

Un altre factor necessari és la necessitat de disposar d'aigua per emplenar el circuit un cop connectada la bomba, l'aigua ha de tenir una pressió de com a mínim 2 bar. En cas de no disposa d'aigua a l'obra, s'haurà de preveure l'ús de garrafes d'aigua i bombí de pressió per condicionar el circuit hidràulic.

D'altre banda, la màquina s'ha de protegir de les inclemències del temps, tant per pluja com per sol excessiu, que pot falsejar la mesura si la temperatura a la màquina és molt alta. Per aquest motiu es recomana disposar d'una tenda de campanya o d'un tendal per protegir-la.

Un cop assegurats els subministres i amb els materials necessaris, ja es pot planificar la prova en unes dates on la climatologia sigui el més favorable possible.



### 5.1 Obtenció del perfil de temperatura.

Tant bon punt s'arriba a l'emplaçament del pou objecte de prova, el primer que s'ha de fer abans de connectar hidràulicament la màquina pel T.R.T. és fer el perfil de temperatura.

Per realitzar el perfil de temperatura, a través del programa informàtic del levellogger Edge i el cable de connexió, s'ha de posar en marxa el submarí tot reiniciant-lo. Un cop preparat l'equip es lliga al rull de corda i s'introdueix a un dels tubs de la sonda que es troben plens d'aigua. Es deixa uns minuts submergit a l'extrem superior perquè aquest s'adeqüi a la temperatura de l'aigua. Passat aquest temps es va deixant baixar lentament per l'interior del tub fins arribar al fons.

No es defineix una velocitat de baixada perquè l'equip associa una temperatura a una profunditat, per tant la velocitat de baixada no influeix sempre i quan sigui prou lenta com perquè faci una lectura estable cada metre lineal. Com ja s'ha comentat anteriorment, la velocitat de lectura de l'equip és de l'ordre de 0,125 segons.

Un cop notem que el submarí ha fet fons l'extraiem de la canonada, l'eixuguem bé i descarreguem les dades per comprovar la temperatura i que la fondària registrada sigui aproximadament la mateixa que la que ens han dit que té el pou. D'aquesta manera podem assegurar que la sonda no es troba xafada o que no hem arribat al fons.



Figura 32 Detall d'un conjunt de cable més submarí logger que s'introdueix a una canonada de la sonda geotèrmica per realitzar la mesura de profunditat i temperatura.

## 5.2 Connexió i operació de la màquina de T.R.T.

Un cop feta la prova de perfil inicial de temperatura del pou geotèrmic, ja podem connectar la màquina per realitzar les proves.

La connexió ha de ser el més curta possible entre la sonda geotèrmica i la màquina, no interessa deixar tubs a l'aire ja que no responen a les temperatures internes del pou. Juntament amb la màquina es subministren 4 flexos 1" d'un metre i quatre ràcords connexió de 1" per cada una de les sondes més habituals ( 4xDN25-1"; 4xDN32-1"; 4xDN40-1")



Figura 33 Detall flexo i connectors de sonda a flexo.

L'equip disposa d'impulsions i de dos retorns amb aixetes per tal que es pugui connectar una sonda simple U o una sonda doble U, si és simple U s'han de tancar les dues aixetes sobrants.

Un cop feta la connexió hidràulica de la màquina amb la sonda geotèrmica, s'ha d'omplir el circuit per l'aixeta posterior prevista per tal operació, quan el manòmetre indiqui uns 1,5 bar considerem que el circuit ja es ple i es tanca l'aixeta d'omplir.

Cal comprovar que les connexions no perdin aigua i s'aïllarà tot el conjunt de connexió, del terra de la sonda fins a l'entrada a l'equip. És important aïllar aquest tram per evitar interferències de calor de l'ambient.

Si no s'observen fuites, es connecta elèctricament l'equip, es comprova que el logger funcioni i es posa en marxa la bomba sense cap resistència activada.

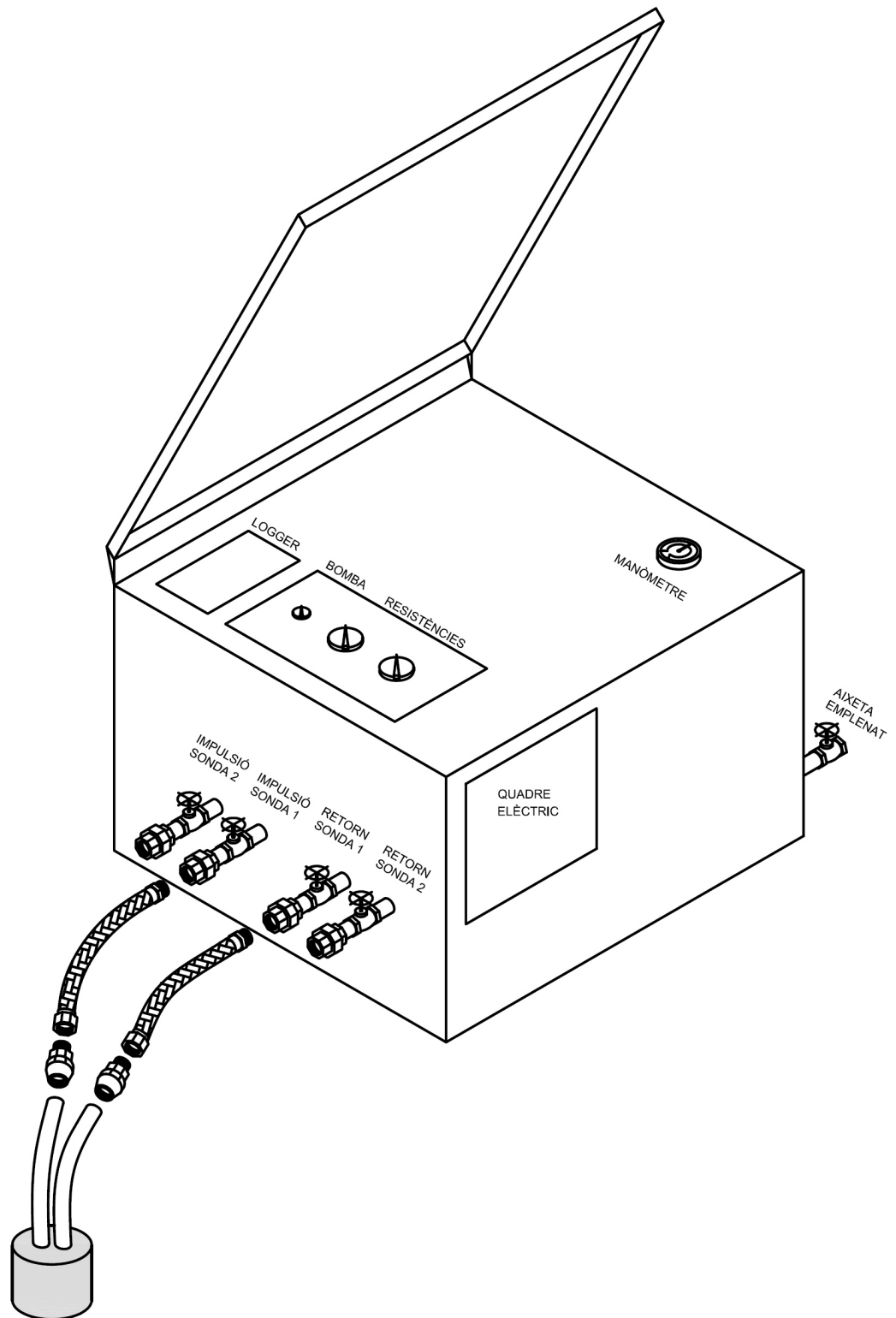


Figura 34 Detall connexió sonda simple U i ubicació elements a la màquina.

Cal comprovar que el cabal de la bomba sigui correcte, en funció del tipus de pou i sobre un valor entre 0,5 i 2,5 m<sup>3</sup>/h. Si no s'observa cabal, parar la bomba i comprovar les aixetes de sortida o les connexions de la sonda fins trobar perquè no circula cabal.

També cal comprovar que la pressió no ha disminuït, pot ser que hi hagi aire i els purgadors l'hagin evacuat amb la qual cosa la pressió baixa. Si és així, reomplir fins a 1,5 bar el circuit.

La bomba ha de funcionar sola, amb les resistències a "0", durant una mitja hora per tal de determinar la temperatura mitjana del pou geotèrmic.

Un cop passada la mitja hora, si no hi ha hagut cap problema, ja es poden engegar les resistències, la potència de referència que triarem per defecte serà de 50W per metre de fondària. Per exemple, per un pou de 100 metres activarem 5kW de resistències.

En aquest punt la màquina ja treballa, esperem 10 minuts i comprovem el salt tèrmic entre la temperatura d'entrada i la de sortida de la sonda per veure que es manté estable. Si observem que la temperatura de retorn s'apropa als 30°C, és millor baixar la potència de resistència a 4kW.

Tapar l'equip i protegir-lo al màxim possible per evitar interferències climàtiques. Passats de 3 a 5 dies, ja es pot procedir al desmuntat de l'equip.

Per desmuntar s'aturen les resistències, després la bomba, es desconnecta la tensió i es desfan les connexions hidràuliques. Passada mitja hora es realitza una mesura de perfil de temperatura del pou geotèrmic amb el levellogger, repetim la mesura passada 1 hora i passades dues hores.

Ara ja disposem de les dades per avaluar els resultats a l'oficina.

## 6 TRACTAMENT DE DADES I EXPRESSIÓ DELS RESULTATS

Ambdós loggers, el submarí i el propi de la màquina, permeten l'exportació de dades a fulla de càlcul tipus Excel. Sobre aquesta plataforma es realitzaran els càlculs i les gràfiques necessàries per exposar els resultats.

### 6.1 Resultats prova perfil de temperatura.

Com s'ha comentat abans, aquesta prova ens pot donar idea de l'execució del pou en quan al emplenat amb ciment tèrmic i a la possibilitat d'existència d'aigües subterrànies que ens afectin a la dispersió tèrmica.

Aquesta mesura es realitza amb el submarí level logger i un cop ordenades les dades s'obtenen el tipus de gràfiques següents:

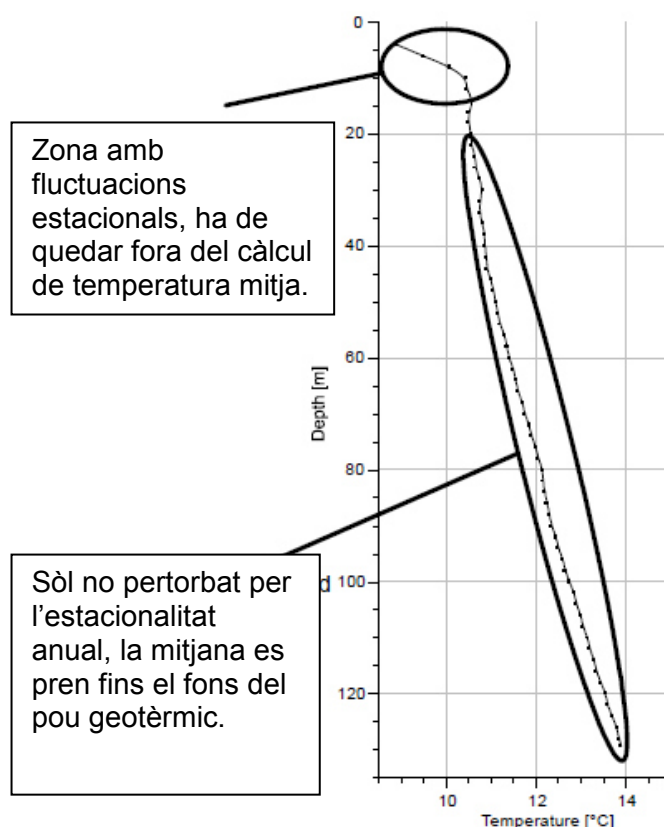


Figura 35 Exemple perfil de temperatura en funció de la profunditat (Innostock 2012, The 12th International Conference on Energy Storage).

A l'exemple s'observa com la part menys fonda de la sonda està molt influenciada per la temperatura exterior, aquesta és la zona no estable de temperatura, varia en qüestió d'hores, dies i l'estació de l'any en què ens trobem. Grans diferències de temperatura a la zona més estable, pot indicar que no s'ha segellat correctament el forat o que aigües subterrànies afecten la temperatura del sòl.

No només s'ha de fer aquest perfil abans de fer la prova de T.R.T., també és recomanable fer-lo després per veure com evoluciona el perfil de refredament del pou.

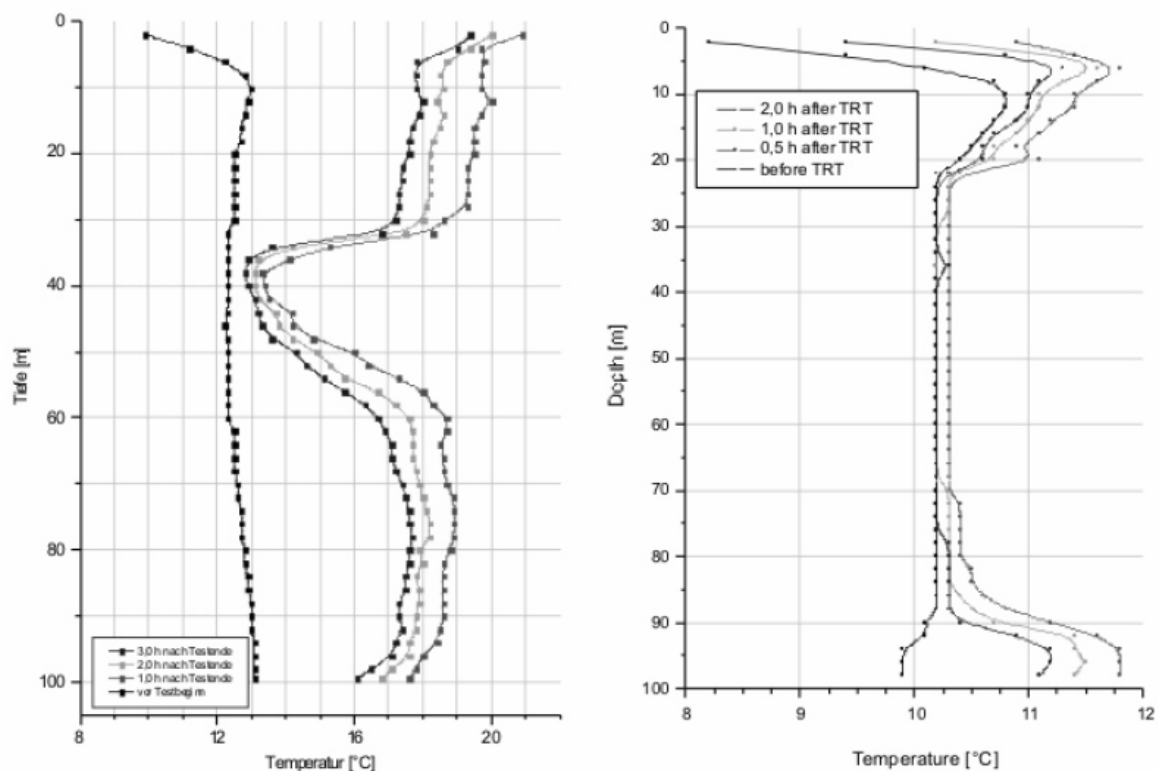


Figura 36 Exemple perfils de temperatura abans i després de la prova T.R.T. (Innostock 2012, The 12th International Conference on Energy Storage).

El primer dels perfils, s'observa un refredament molt brusc en uns punts concrets, això pot ser degut per cabals d'aigua soterrània que han desplaçat el ciment de emplenar quan es col·locava i es troba en contacte directe amb els tubs.

El perfil de la dreta pot indicar que el ciment d'omplir no ha arribat ben bé fins al fons del pou i per això la temperatura no s'estabilitza al mateix ritme que la resta.

### 6.2 Resultats de la prova T.R.T.

Un cop tractades les dades, es tractaran de forma gràfica, el primer que hem de fer és separar el temps que la bomba ha funcionat sense calefacció de la resta.

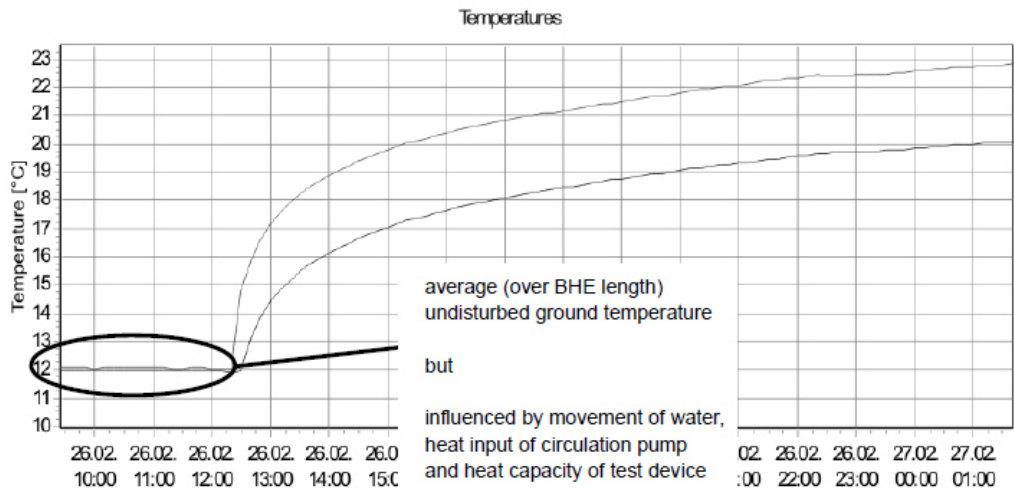


Figura 37 Exemple dades completes obtingudes de la prova T.R.T. (Innostock 2012, The 12th International Conference on Energy Storage).

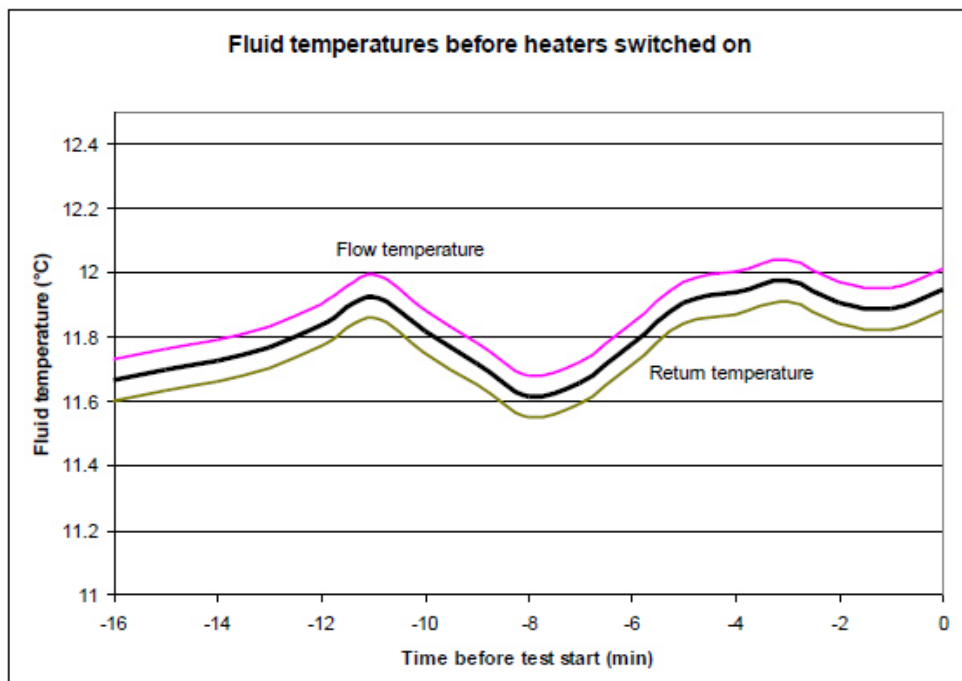


Figura 38 Detall de la mitja de la temperatura, en línia negra. (Geotrainet Training Manual for designers of shallow Geothermal Systems, Published by GEOTRAINET, EFG, Brussels 2011).

De la darrera gràfica, per fer la mitjana de temperatura del pou només agafarem els 8 primers minuts, ja que la segona rampa de pujada pot ser deguda pel propi escalfament de la bomba, que interfereix i tendeix a pujar.

De les dades del logger obtenim la temperatura d'impulsió (color rosa), la temperatura de retorn (color verd oliva), el cabal de circulació (color blau clar) i la potència d'entrada que la pot calcular el logger o la podem calcular nosaltres.

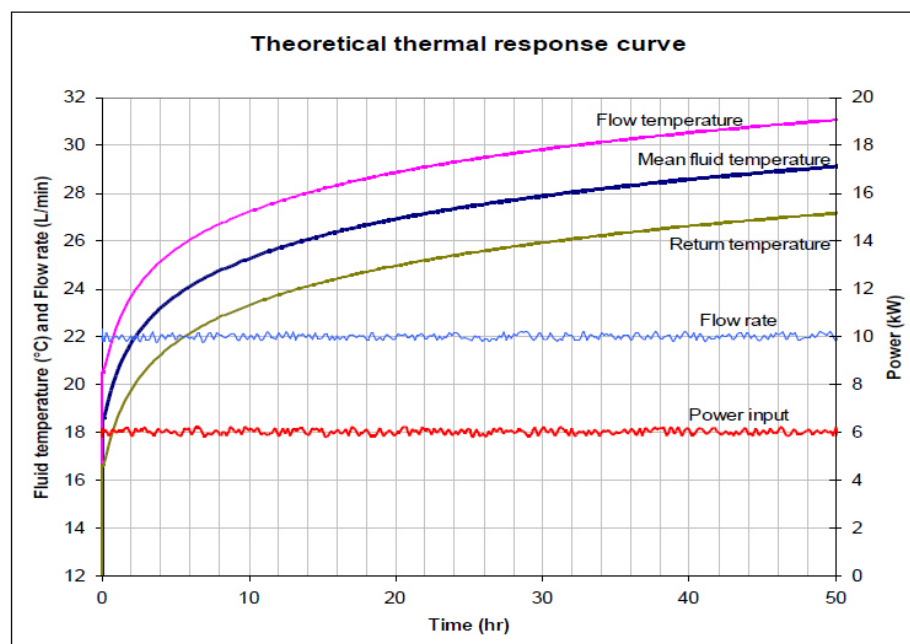


Figura 39 Exemple de gràfic de valors obtinguts amb una prova de T.R.T. (Geotrained Training Manual for designers of shallow Geothermal Systems, Published by GEOTRAINET, EFG, Brussels 2011).

La potència aportada al pou es pot determinar mesurant el voltatge i la intensitat ( $P=V \cdot I$ ) de la resistència elèctrica, però aquest mètode no tindria en compte l'escalfor aportada per la sonda. Per aquest motiu la potència es calcula en base al cabal i a les temperatures segons la següent fórmula utilitzada anteriorment:

$$q = Q \cdot \Delta t \cdot C_e \cdot \alpha \quad (\text{Eq.17})$$

On:

- q : pèrdues de calor (W)
- Q : cabal (l/h)
- $\Delta t$  : diferencial de temperatura (°C)
- Ce: calor específic del fluid (Wh/kg°C)
- $\alpha$ : Densitat del fluid (kg/l)



	Aigua			30% Etilenglicol amb aigua		
	0° C	30° C	60° C	0° C	30° C	60° C
$\alpha$ - Densitat del fluid (kg/l)	0,9998	0,9956	0,9998	1,057	1,048	1,032
Ce (Wh/kg°C)	1,171	1,161	1,162	1,035	1,049	1,07

Taula 17 Algunes dades exemple per calcular la potència aportada.

Per al càlcul de la temperatura mitjana (color blau fosc de l'anterior gràfic), es calcula amb la següent fórmula:

$$T_b = \frac{(T_{\text{impulsió}} + T_{\text{retorn}})}{2} \quad (\text{Eq. 20})$$

Del resultat d'aquest càlcul observem, a la gràfica anterior, que la temperatura mitjana evoluciona ràpidament al primer moment i més lentament posteriorment, si ho expressem en una gràfica logarítmica de temps obtenim una recta. D'aquesta recta hem d'obtenir la seva pendent tal i com mostra la figura següent:

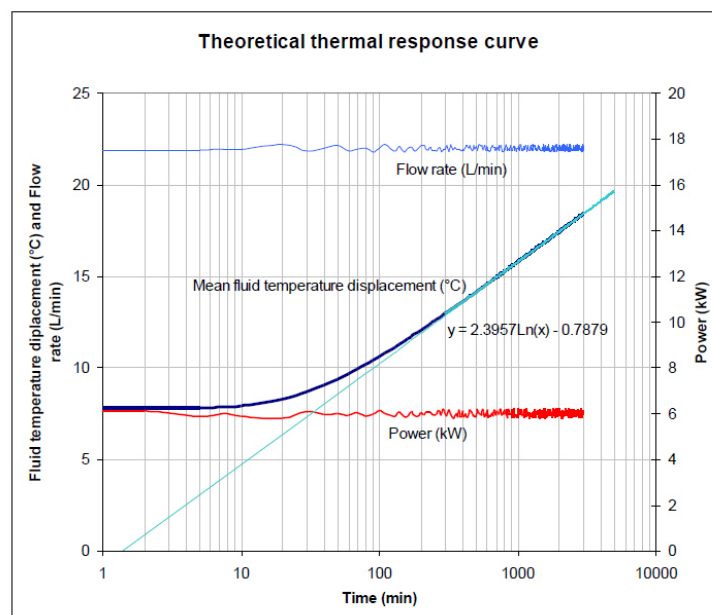


Figura 40 Exemple representació logarítmica temporal de la temperatura mitja i obtenció de la pendent de la recta. (Geotrained Training Manual for designers of shallow Geothermal Systems, Published by GEOTRAINET, EFG, Brussels 2011).

El període inicial que no és lineal, podem estimar-lo entre 7 i 15 hores i es pot determinar aproximadament amb la següent fórmula:

$$t_1 = \frac{5 \cdot r_0^2}{\alpha} \quad (\text{Eq. 21})$$

On:

$$\alpha = \frac{\lambda_{\text{est}}}{\rho c_p} \quad (\text{Eq. 22})$$

On:

$r_0$  : radi de la perforació (m)

$\lambda_{\text{est}}$  : Conductivitat tèrmica estimada (W/m/K)

$\rho c_p$  : Volum relatiu de capacitat tèrmica (típicament de 2 a 2,5 MJ/m<sup>3</sup>/K)

Amb els materials extrets a la perforació es pot aproximar aquest valor.

Amb la pendent (k) obtinguda i aplicant la següent fórmula ja podem obtenir la conductivitat tèrmica efectiva.

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{q}{k \cdot 4 \cdot \pi \cdot H} \quad (\text{Eq. 23})$$

On:

q : pèrdues de calor (W)

k : valor del pendent de la recta.

H : Longitud de la sonda geotèrmica (m)

$\lambda_{\text{eff}}$  : Conductivitat tèrmica efectiva (W/m/K, valors de l'ordre de 2 W/m/K)

Ara només ens falta calcular la resistència tèrmica de la perforació ( $R_b$ ) aplicant la següent fórmula:

$$R_b = \frac{H}{Q} \cdot (T_f - T_0) - \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left( \ln(t) + \ln\left(\frac{4 \cdot \alpha}{r_0^2}\right) - 0,5772 \right) \quad (\text{Eq. 24})$$

On:

- Q : pèrdues de calor (W)
- H : Longitud de la sonda geotèrmica (m)
- $T_0$ : Temperatura mitja inicial del pou sense escalfar ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_f$ : Temperatura mitja del fluid en funció de temps ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\lambda$  : Conductivitat tèrmica (W/m/K)
- $r_0$  : radi de la perforació (m)

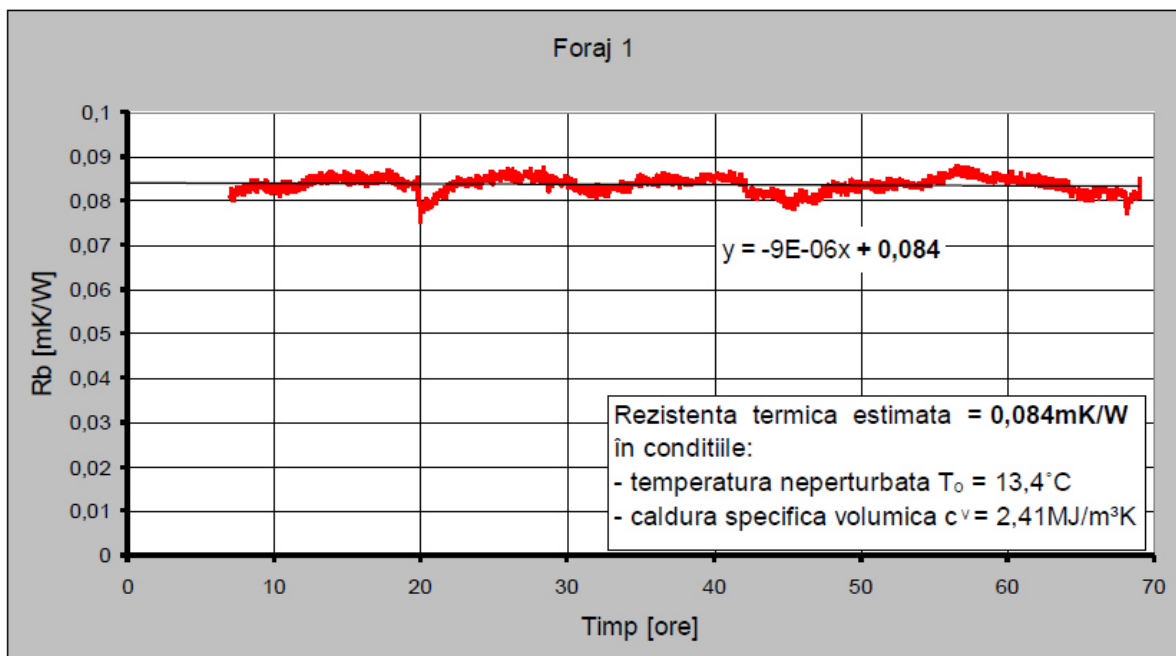


Figura 41 Exemple representació temporal de  $R_b$  i obtenció de la mitja.

Com el paràmetre  $\alpha$  (difusivitat tèrmica) és molt relatiu ja que depèn de la determinació del tipus de terreny que s'extreu quan es fa el forat, amb les dades del propi T.R.T. es pot aproximar aquest valor.

El valor  $R_b$  es determina en funció del temps que triga a fer un cicle de circulació l'aigua. Des del moment que posem en marxa el calefactor fins que aquesta aigua arriba a dalt. La següent fórmula determina el temps al que hem de calcular  $R_b$ .

$$t_w = \frac{Vol_{sonda} + Vol_{màquina}}{V} \quad (\text{Eq. 25})$$

On:

$t_w$  : temps em realitzar un cicle (s)

$V_{sonda}$  : Volum d'aigua a la sonda ( $m^3$ )

$V_{màquina}$ : Volum d'aigua acumulada a l'interior de la màquina T.R.T.

$V$  : Cabal de circulació ( $m^3/s$ )

Per tant les temperatures a tenir en compte són les registrades al moment de posta en marxa més  $t_w$ .

El valor de  $R_b$  també es pot interpretar en el primer canvi de la gràfica de temperatures entre la temperatura d'impulsió i la de retorn, que es quan respon el intercanvi de calor.

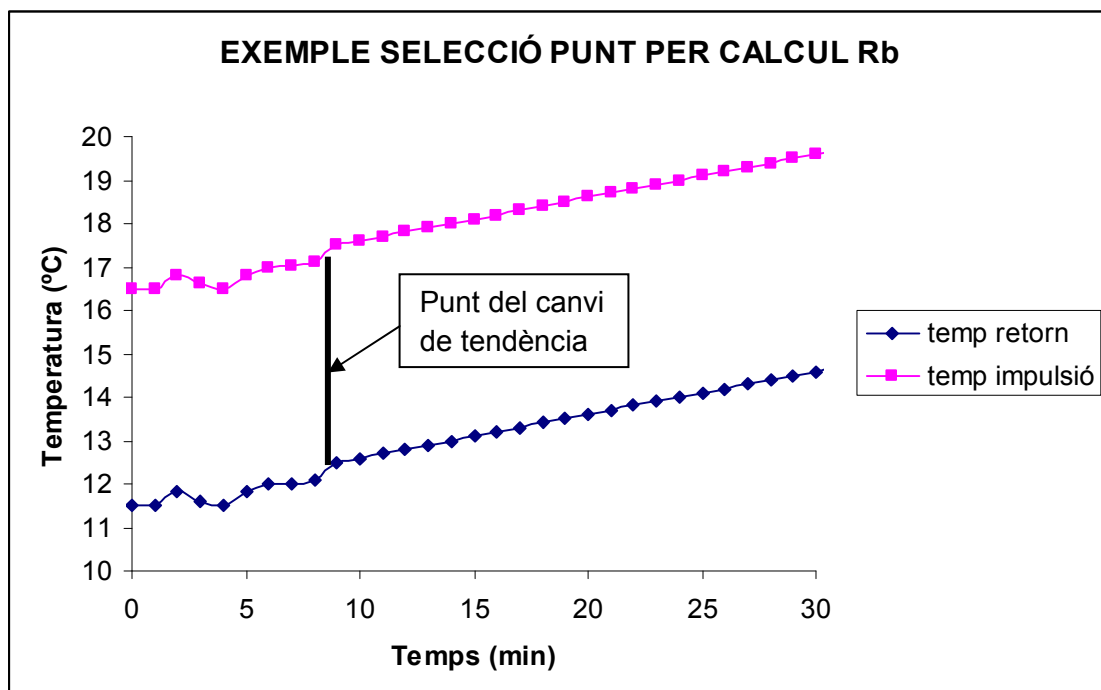


Figura 42 Exemple determinació gràfica del punt de canvi de temperatures.

A l'exemple anterior podríem determinar que el canvi de tendència es troba entre el temps de 9 i 10 minuts.

Com exemple de càlcul, podem triar una sonda de 50 metres de fondària (H) i un volum de circulació de 1,5 m<sup>3</sup>/h, valors mesurats abans d'activar l'escalfador. El fluid és aigua, el temps de canvi és 10,75 min i la temperatura mitja inicial del sòl és 11,5 °C (Tu).

Temps (min)	Temperatura impulsió Tv (°C)	Temperatura retorn TR (°C)
10,75	15,5	13,35

Taula 18 Dades dels punts anteriors i posteriors per l'exemple.

Un cop determinat el punt, s'ha d'aplicar la següent fórmula per calcular la diferència de temperatura logarítmica ( $\Delta_{LMTD}$ ).

$$\Delta_{LMTD} = \frac{T_V - T_R}{\ln\left(\frac{T_V - T_U}{T_R - T_U}\right)} \quad (\text{Eq. 26})$$

Aplicant la fórmula anterior amb les temperatures del nostre exemple, obtenim que el nostre  $\Delta_{LMTD} = 2,788193077$  °C.

El nostre cabalímetre es troba instal·lat abans de les resistències, aigües amunt, per tant hem de calcular els valors en funció de la temperatura d'aquest, 13,35°C. A aquesta temperatura la densitat de l'aigua és 999,3320 kg/m<sup>3</sup> i per calcular el calor específic hem d'interpolar entre aquests valors:

Cp aigua a 10°C	4,192 kJ/(kg K)
Cp aigua a 20°C	4,182 kJ/(kg K)

Taula 19 Valors del calor específic de l'aigua a 10°C i a 20°C.

$$a = \Delta C_p / \Delta T = \frac{4,182 - 4,192(\text{kJ}/(\text{kgK}))}{10^\circ \text{C}} = -0,001 \quad (\text{Eq. 27})$$

$$b = 4,192 + 0,001 \times 10 = 4,202 \quad (\text{Eq. 28})$$

$$C_p = -0,001 \times 13,35 + 4,202 = 4,18865 \text{kJ}/(\text{kgK}) \quad (\text{Eq. 29})$$

Calculem el calor específic volumètric amb la següent fórmula:

$$C_v = \rho \cdot C_p = 999,33 \text{ kg/m}^3 \cdot 4,18865 \text{ kJ/(kgK)} = 4185,85 \text{ kJ/(m}^3\text{K)} \quad (\text{Eq. 30})$$

Amb el cabal de  $V = 4,1667 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  ( $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ) i les dades anteriors ja podem calcular la calor aportada.

$$\begin{aligned} Q &= C_v \cdot V \cdot (T_v - T_R) = 4185,85 \text{ kJ/(m}^3\text{K)} \cdot 4,1667 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \cdot (15,5\text{K} - 13,15\text{K}) \\ Q &= 3,7498 \text{ kJ/s} = 3749,826 \text{ W} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 31})$$

Calculem la densitat de potència lineal amb la següent fórmula, tenint en compte que la fondària del nostre pou és de 50 metres.

$$Q_H = \frac{Q}{h} = \frac{3749,826 \text{ W}}{50 \text{ m}} = 74,99 \text{ W/m} \quad (\text{Eq. 32})$$

Ara apliquem la fórmula per calcular la resistència  $R_b$ , recordant que  $\Delta_{\text{LMTD}} = 2,788193077 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$R_b = \frac{2 \cdot \pi}{Q_H} \cdot \Delta_{\text{LMTD}} = 0,23359 \text{ mK/W} \quad (\text{Eq. 33})$$

## **7 RESUM DEL PRESSUPOST**

La realització del disseny i construcció d'aquesta màquina té un cost de quinze mil dos-cents cinquanta un euros amb set cèntims, cost sense IVA.

Aquest preu inclou l'equip muntat amb accessoris, també inclou la formació a casa del client amb un contracte d'assessorament pel primer any i els programes informàtics per descarregar les dades.

## **8 CONCLUSIONS**

Amb el presentat en aquest projecte es disposa de tot el necessari per a la construcció de la màquina de tests de resposta tèrmica (T.R.T.), l'equip és prou versàtil com per ser utilitzat en la majoria d'instal·lacions geotèrmiques destinades a climatització.

No només s'ha donat solució als elements físics de la màquina, sinó que s'han facilitat els coneixements teòrics i pràctics per interpretar les dades obtingudes facilitant un resultat final.

S'han projectat i pressupostat tots els elements constructius necessaris, la formació i el posterior assessorament davant dels dubtes que sorgiran a les primeres proves.

Per aquests motius es creu complert l'objectiu del projecte i està a punt per ser presentat a les empreses interessades perquè valorin la seva possible adquisició.

Jordi Franch Soler

Grau en Enginyeria Elèctrica

Girona , 3 de setembre de 2015



## **9 RELACIÓ DE DOCUMENTS**

El projecte consta de la memòria sense annexos.

Un apartat de plànols, amb dos plànols constructius, un esquema hidràulic i dos esquemes elèctrics.

Un plec de condicions, l'estat d'amidaments i el pressupost que inclou un annex del cost del projecte.

## 10 BIBLIOGRAFIA

VDI (06-2010), *Thermal use of the underground – Fundamentals, approvals, environmental aspects*, 4640 Blatt 1:2010-06, Alemanya, VDI.

CEN (05-2011), *Geotechnical investigation and testing – Geothermal testing – Determination of thermal conductivity of soil and rock using a borehole heat exchanger*, CEN/TC 341, Europa, ELOT

ATECYR (06-2012), *Guia técnica de diseño de sistemas geotérmico de circuito cerrado*, Madrid, IDAE.

Dr Maureen Mc Corry (2011), *Geotrained training manual for designers of shallow geothermal systems*, Brussels, GEOTRAINET EFG.

Llopis Trillo, G., Rodrigo Angulo, V., *Guía de la energía geotérmica*, Madrid, Fundación de la energía de la comunidad de Madrid.

Innostock (2012), *Thermal Response Test: Practical experience and extended range of application*, Germany, Innostock.

Sorensen, I. et al. (2013-2014), *Termal response test and geothermal modelling of the soil*, Horsens, VIA University College.

MEGlobal, *Ethylene Glycol Product Guide*.

REHAU, (2008), *Sistema raúgeo para el aprovechamiento geotérmico, información técnica 827600 ES*, REHAU.

Espanya, Real Decret 842/2002 pel qual s'aproba el Reglament Electrotècnic de Baixa Tensió (REBT).

Kamstrup, Catàleg de productes on-line, < <http://products.kamstrup.com/index.php#> >, [Consulta: Agost 2015]

Solinst, Catàleg de productes on-line, < <http://www.solinst.com/espanol/> >, [Consulta: Agost 2015]

Wilo, Catàleg de selecció de productes on-line, < <http://productfinder.wilo.com/es/ES/start> >, [Consulta: Agost 2015]

Ibaiondo, Catàleg de productes on-line, < <http://www.ibaiondo.es/productos.html> >, [Consulta: Agost 2015]

Warren Electric Corporation electric process heaters for industries, Catalog de productes on-line, < <http://www.warrenelectriccorp.com/products/circulation-heaters/default.asp> >, [Consulta: Agost 2015]