

Problemàtiques i tecnologies emprades en les Estacions Meteorològiques Automàtiques

Cas pràctic



Autor: Roger Vendrell i Soler

Tutor: Dr. Àngel Redaño i Xipell



Màster en Meteorologia

Octubre de 2007

Índex

0. Introducció i objectius	4
1. Sistema d'adquisició, processament, emmagatzematge i transmissió de dades: <i>Datalogger</i>	5
1.1. Definició	5
1.2. Funcionament d'un <i>datalogger</i>	5
1.3. Exemple de funcionament d'un <i>datalogger</i> en una EMA	17
1.4. El <i>datalogger</i> Campbell CR1000	18
2. Temperatura	21
2.1. Definició	21
2.2. Mesura de la temperatura	21
3. Humitat relativa	61
3.1. Definició	61
3.2. Mesura de la humitat relativa	63
4. Precipitació	74
4.1. Definició	74
4.2. Mesura de la precipitació	74
5. Vent	97
5.1. Definició	97
5.2. Mesura del vent	97
6. Pressió atmosfèrica	113
6.1. Definició	113
6.2. Mesura de la pressió atmosfèrica	113
7. Radiació solar global	123
7.1. Definició	123
7.2. Mesura de la radiació solar global	123
8. Gruix de neu	135
8.1. Definició	135
8.2. Mesura del gruix de neu	135

9.	Estació Meteorològica Automàtica (EMA): cas pràctic	144
9.1.	Elecció dels sensors	144
9.2.	Elecció del <i>datalogger</i>	145
9.3.	Elecció del sistema de comunicacions i alimentació	145
9.4.	Criteris d'ubicació d'una EMA i d'instal·lació de sensors.....	149
9.5.	Mostreig i registre dels sensors	152
9.6.	Programa de l' EMA.....	154
9.7.	Manteniment EMA.....	158
10.	Característiques sensors segons l'OMM i el SMC.....	159
10.1	Sensor de Temperatura de l'aire.....	159
10.2	Sensor d'Humitat Relativa de l'aire	159
10.3	Anemòmetre (sensor de velocitat del vent).....	160
10.4	Penell (sensor de direcció del vent)	160
10.5	Pluviòmetre	160
10.6	Baròmetre	161
10.7	Piranòmetre	161
11.	Informació referent a possibles fabricants de sensors i <i>dataloggers</i> i els seus subministradors	163
12.	Conclusions	172
13.	Bibliografia.....	173
	Annex: figures i taules.....	175

0. Introducció i objectius

La proliferació d'Estacions Meteorològiques Automàtiques (EMA) a nivell mundial, lligada a les millores tecnològiques de les últimes dècades, ha comportat un creixent interès per aquest tipus d'instal·lacions. La possibilitat de disposar de mesures automàtiques i contínues, sense la necessitat de dependre d'una xarxa d'observadors manuals disponibles tots els dies de l'any, ha ajudat a que es produís aquesta expansió.

En l'actualitat es poden trobar gran varietat d'EMA i de sensors en un ampli rang de prestacions i preus; aixamplant també la quantitat i el tipus d'usuaris. Des d'EMA enfocades als aficionats a la meteorologia per uns quants centenars d'euros, fins a EMA de tipus professional (serveis meteorològics, empreses d'infraestructures, etc.) o per investigació (universitats, recerca, etc.) des d'uns cinc mil euros (bàsiques) fins a desenes de milers d'euros; depenent del tipus i la qualitat de l'equipament emprat.

L'objectiu d'aquest projecte és el de donar una visió global de les tecnologies emprades en l'obtenció de les diverses variables meteorològiques d'una EMA, proporcionar exemples pràctics de com es realitza la mesura dels sensors amb un sistema d'adquisició, processament, emmagatzematge i transmissió de dades, i acabar realitzant un exemple pràctic que inclogui tots els elements que engloben una EMA: la localització, el sistema d'alimentació, el sistema de comunicacions, els sensors i la seva ubicació dins l'EMA, l'adquisició, el mostreig, la programació i el manteniment.

En resum, aprofundir en tot el procés de mesura a nivell teòric i pràctic i en tots aquells aspectes relacionats amb la instal·lació d'una EMA.

1. Sistema d'adquisició, processament, emmagatzematge i transmissió de dades: *Datalogger*

1.1. Definició

És l'encarregat d'adquirir i convertir els diversos senyals proporcionats pels sensors en dades intel·ligibles per poder-les processar, emmagatzemar i transmetre-les.

En anglès s'utilitza el terme *datalogger* (o *data logger*), que és com s'hi farà referència a partir d'ara en aquest treball.

1.2. Funcionament d'un datalogger

De *dataloggers* se'n poden trobar per a múltiples aplicacions, per la qual cosa no existeix un *datalogger* genèric que serveixi de referència universal. El que sí que es poden definir, però, són els components bàsics dels quals consten la major part de *dataloggers* i concretar-ho en els diversos sensors que incorpora una Estació Meteorològica Automàtica (EMA) bàsica.

Tenir present que el plantejament que es realitza en aquest treball és el d'un sistema únic per a tots els sensors - una unitat centralitzada d'adquisició, processament, emmagatzematge i transmissió de dades -, però que aquest no és necessàriament l'únic plantejament, malgrat que sí el més estès. Es pot optar, doncs, per treballar amb sensors que ja incorporen l'adquisició i/o el processament i/o l'emmagatzematge i/o la transmissió de dades, per la qual cosa poden funcionar de forma autònoma i independent.

Segons l'esquema de la figura 1-1, en el qual es basa aquest apartat, els components bàsics d'un *datalogger* són: **Excitació (EXC)**, **Multiplexor (MUX)**, **Comptador (COUNTER)**, **Port digital (DIGITAL I/O PORTS)**, **Convertidor analògic digital (ADC)** i **digital analògic (DAC)**, **Amplificador (G)**, **Microprocessador (MICROPROCESSOR)**, **Memòria, Instruccions i Dades (MEMORY, INSTRUCTIONS & DATA)**, **Relotge (CLOCK)** i **Port sèrie (SERIAL PORT)**.

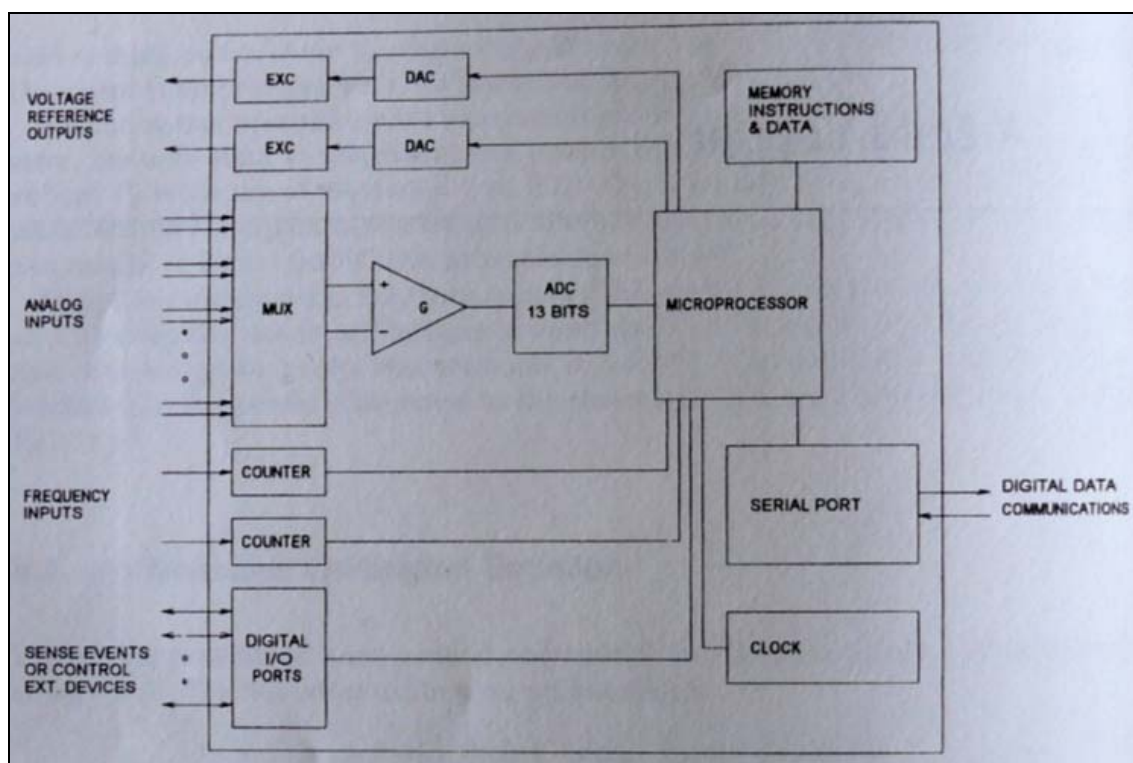


Fig. 1-1. Estructura bàsica datalogger
(Font: Meteorological Measurement Systems, 2001)

1.2.1 Sortida d'excitació

Genera voltatges de precisió en el rang de treball del *datalogger* per ser aplicats en ponts de resistències, divisors de tensió o potenciómetres.

La resolució del voltatge aplicat dependrà del DAC.

1.2.2 Multiplexor

Un multiplexor és un dispositiu que permet que diversos senyals comparteixin un mateix canal de transmissió.

Aquest aparell defineix el número d'entrades analògiques (*ANALOG INPUTS*) de les quals disposa el *datalogger* i que permetran connectar-hi un número determinat de sensors analògics.



Fig. 1-2. Multiplexor
(Font: Campbell Scientific)

Les mesures dels sensors analògics es poden realitzar utilitzant connexions en **single-ended** (d'una única terminació) o en mode **diferencial** (amb dues terminacions). En el primer cas el senyal analògic d'entrada es referencia al terra analògic del *datalogger*; en el segon cas el senyal es referencia a un altre canal analògic. Així doncs, si es disposa de vuit canals analògics, es podran connectar vuit sensors en mode *single-ended* i quatre en mode diferencial.

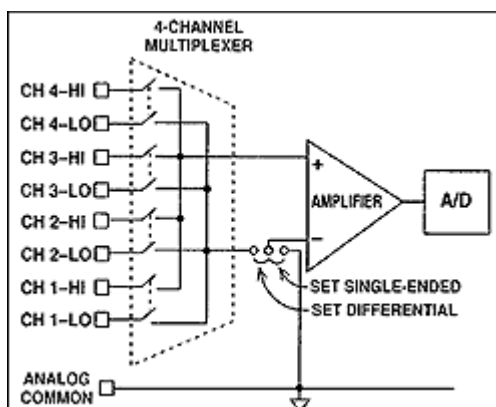
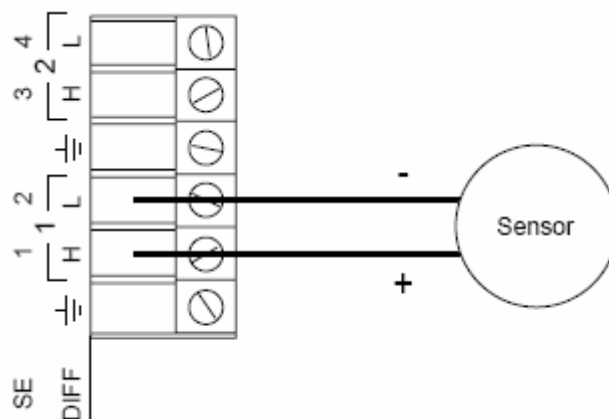
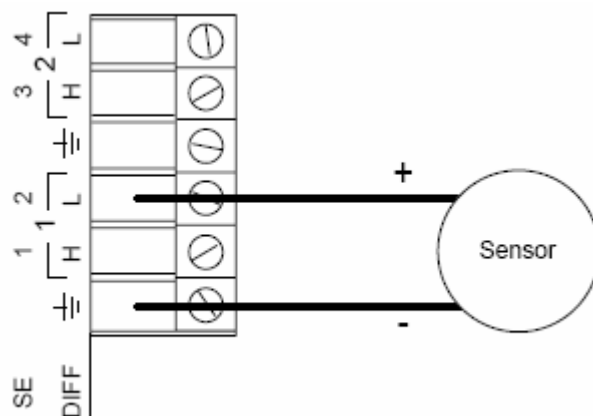


Fig. 1-3. Canals analògics en diferencial o en *single-ended*
(Font: Analog dialogue)

Les mesures de voltatge en mode diferencial utilitzen en el *datalogger* un canal H (*high*) i un altre L (*low*) per mesurar la diferència de potencial entre ambdues entrades.



Per altra banda, les mesures de voltatge en *single-ended* usen un sol canal, ja sigui H o L, i mesuren la diferència de potencial entre aquesta entrada analògica i el terra analògic del *datalogger*.



Quins són, llavors, els avantatges o inconvenients que presenten aquests dos tipus de connexions?

L'avantatge principal de la connexió en *single-ended* és, òbviament, que es poden connectar el doble de sensors que en diferencial.

L'inconvenient principal de la connexió en *single-ended* és la diferència entre la massa pròpia del sensor i la referència, la massa analògica, del *datalogger*. Aquestes petites diferències poden comportar una petita caiguda de voltatge que generi un error en la lectura. Aquest error serà poc important en voltatges relativament grans (10V), però força més en la mesura de petits voltatges (10 mV).

En les mesures diferencials aquest error és del tot despreciable degut a que s'utilitzen dues entrades analògiques d'alta impedància, les quals no permeten més que un insignificant fluxe de corrent.

Un altre avantatge de la connexió en mode diferencial és que l'amplificador elimina el soroll comú a les dues entrades gràcies al que es coneix com a rebuig en mode comú (CMRR: *Common Mode Rejection Ratio*); que es comentarà més endavant. Per aquest motiu és recomenable utilitzar parells de cables trenats, que en veure's afectats de la mateixa manera pel soroll, ajudin a minimitzar els efectes d'interferències electromagnètiques rebutjant aquests valors comuns als dos cables.

En general, per tant, es recomana utilitzar mesures diferencials sempre que s'hagin de mesurar voltatges petits.

1.2.3 Comptador

Per a senyals en els quals la informació ve continguda en la freqüència o el període d'un senyal.

Poden comptar transicions de senyal (alt-baix, baix-alt, etc) en el temps, o mesurar la freqüència d'un senyal determinat.

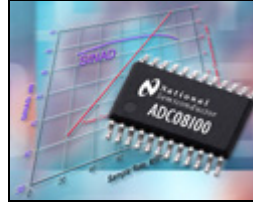
1.2.4 Ports digitals

Serveixen bàsicament com a ports de control. Generalment els *dataloggers* incorporen vuit ports digitals de control d'entrada o sortida.

1.2.5 Convertidor analògic digital (ADC) i digital analògic (DAC)

La majoria de sensors proporcionen un senyal analògic que és proporcional a la variable que es vol mesurar. Un sensor de temperatura, per exemple, pot variar la seva senyal de sortida entre 0 - 5 V en el rang que va de -40 °C a + 40°C de forma proporcional. El problema, però, és que els microprocessadors només poden processar informació digital, binària (0 o 1), per la qual cosa és necessari un dispositiu que converteixi

una mesura analògica (de tensió, en aquest cas), en una mesura digital, formada per zeros o uns. Aquest dispositiu és el Convertidor Analògic Digital (*Analog to Digital Converter ADC*).



Convertidor Analògic Digital (ADC)
(Font: National Semiconductor)

Un ADC consta bàsicament d'un grup de resistències divisores de tensió que tenen com a entrada una tensió de referència, i es caracteritza pel número de bits de sortida i per la seva resolució.

Un convertidor podrà tenir 2^n combinacions possibles. En el cas que sigui de 10 bits serà de 2^{10} combinacions, és a dir, 1024.

La resolució d'un convertidor de 10 bits amb unes tensions de referència $V_{ref+} = +5\text{ V}$, i $V_{ref-} = 0\text{ V}$ serà:

- V_{oFS} : Voltatge per obtenir una conversió màxima (tots els bits a 1)

- n : número de bits del convertidor

$$\text{Resolució} = V_{oFS} / (2^n - 1)$$

$$\text{Resolució} = 5 / (1024 - 1) = 4.89\text{ mV}$$

Així doncs, el ADC podrà representar els 5 V de sortida del sensor de temperatura en 1023 números binaris que tindran una resolució de 4.89 mV.

voltatge	Conversió binari										Decimal
5v	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1023
1v	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	205
9.76mV	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2
4.88mV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
0v	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Taula 1-1. Valors convertidor 10 bits en un rang de 5 V

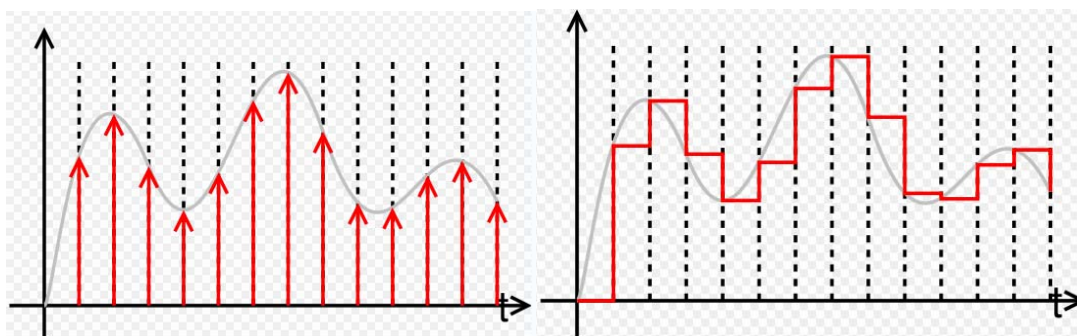


Fig. 1-4. Gràfic convertidors ADC o DAC

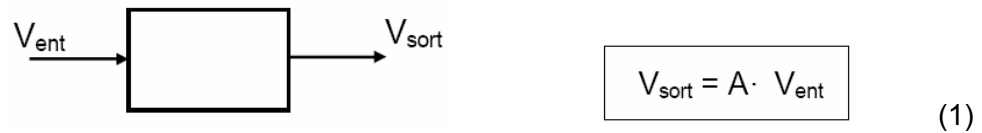
De la mateixa manera que es converteix un senyal analògic provinent d'un sensor de temperatura en un valor digital, es pot convertir un valor digital provinent del microprocessador en un valor analògic. Per exemple, per excitar, un pont de resistències d'un altre sensor de temperatura amb 5 V.

El procés de conversió que gràficament es pot veure en la figura 1-4, es pot realitzar, doncs, en ambdós sentits.

1.2.6 Amplificador

Un amplificador és un dispositiu o circuit que dona a la sortida un senyal proporcional a la senyal d'entrada (normalment més gran la sortida que l'entrada).

En aquest cas es tracta d'un amplificador de tensió, en el qual l'entrada i la sortida són tensions.



On A és el que s'anomena el guany de l'amplificador.

Tornant a l'exemple de convertidor ADC

El símbol de l'amplificador diferencial és el següent:

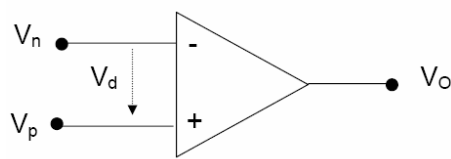


Fig. 1-5. Amplificador diferencial

L'entrada diferencial $V_d = V_p - V_n$, per la qual cosa:

$$V_O = A \cdot V_d = A (V_p - V_n) \quad (2)$$

L'esquema bàsic de funcionament d'un amplificador operacional es pot representar amb el següent circuit:

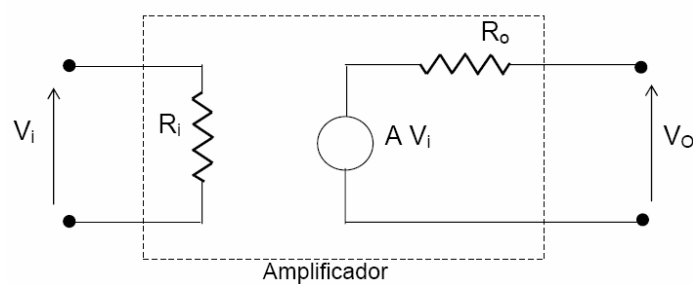


Fig. 1-6. Representació interna amplificador diferencial

On

$$V_o = A \cdot V_i \quad (3)$$

R_i = resistència d'entrada

R_o = resistència de sortida

Idealment, un amplificador operacional tindrà un guany A infinit, una resistència d'entrada infinita i una resistència de sortida zero, el que comportarà que el corrent a les dues entrades de l'amplificador sigui zero.

A la pràctica, però, això no serà així, i els valors habituals d' A , R_i i R_o seran d'uns 10^6 , d'alguns $M\Omega$ i menors de 100Ω respectivament. A més a més, existeix un petit voltatge afegit a l'entrada anomenat voltatge d'entrada offset, que actua com una font de voltatge afegida a l'entrada, i és el voltatge necessari perquè la sortida sigui zero.

També és molt important que un amplificador diferencial rebutgi els senyals comuns a ambdues entrades, és a dir, que si s'aplica un mateix voltatge a les dues entrades, la sortida sigui zero. La capacitat d'un amplificador de rebutjar aquests senyals es coneix com a rebuig en mode comú (CMRR: *Common Mode Rejection Ratio*), i interessa que sigui com més alt millor. Es tracta de la relació de la resposta produïda per un senyal en mode diferencial a la resposta produïda per un senyal en mode comú del mateix valor.

En general, es parla d'amplificador d'instrumentació quan s'aconsegueixen uns bons valors de totes aquestes variables, és a dir, un bon amplificador diferencial.

Hi ha *dataloggers* que permeten invertir les entrades, és a dir, realitzar dues mesures diferencials; la primera del canal alt (H) contra el baix (L), i la segona del canal baix (L) contra l'alt (H). Amb això es redueix l'*offset* d'entrada i s'eliminen els errors de CMRR de l'amplificador d'instrumentació. Per veure com s'aconsegueix aquest objectiu s'agafa un exemple dels *dataloggers* de Campbell Scientific.

L'esquema de mesura és el següent:

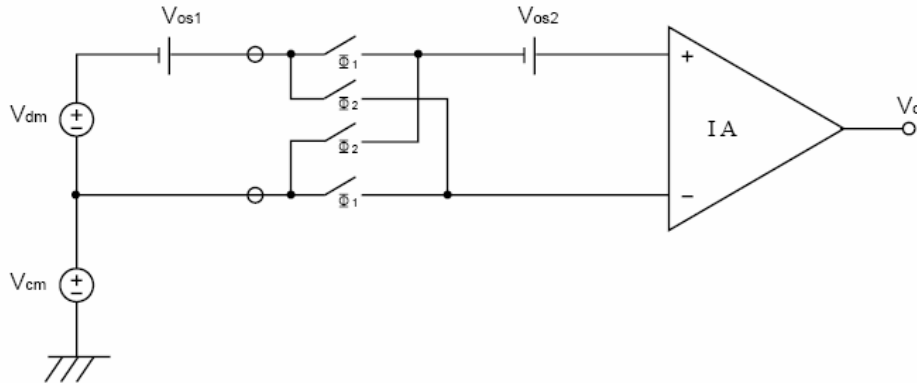


Fig. 1-7.1 Inversió de les entrades analògiques
(Font: Campbell Scientific)

$$V_o(\Phi_1) = A_{dm}(V_{dm} + V_{os1} + V_{os2}) + A_{cm}V_{cm} \quad (4)$$

$$V_o(\Phi_2) = A_{dm}(-V_{dm} - V_{os1} + V_{os2}) + A_{cm}V_{cm} \quad (5)$$

On

V_{dm} = differential-mode signal

V_{cm} = common-mode signal

A_{dm} = differential-mode gain of IA

A_{cm} = common-mode gain of IA

V_{os1} = dc offset voltage error occurring before input reversal switches

V_{os2} = dc offset voltage error occurring after input reversal switches.

Sumant les dues mesures (les dues equacions) i dividint-les per dos (fent-ne la mitjana) s'obté:

$$\frac{1}{2}V_o(\Phi_1 - \Phi_2) = A_{dm}V_{dm} + A_{dm}V_{os1} \quad (6)$$

Per tant, invertint les entrades s'eliminen els errors de rebuig en mode comú i els valors d'offset que apareixen a posteriori de la inversió de les

entrades. No s'eliminen, però, els valors d'*offset* anteriors a la inversió de les entrades (V_{os1}).

Per eliminar aquests errors, en un pont de mesura, es pot invertir la polaritat del voltatge d'excitació V_x :

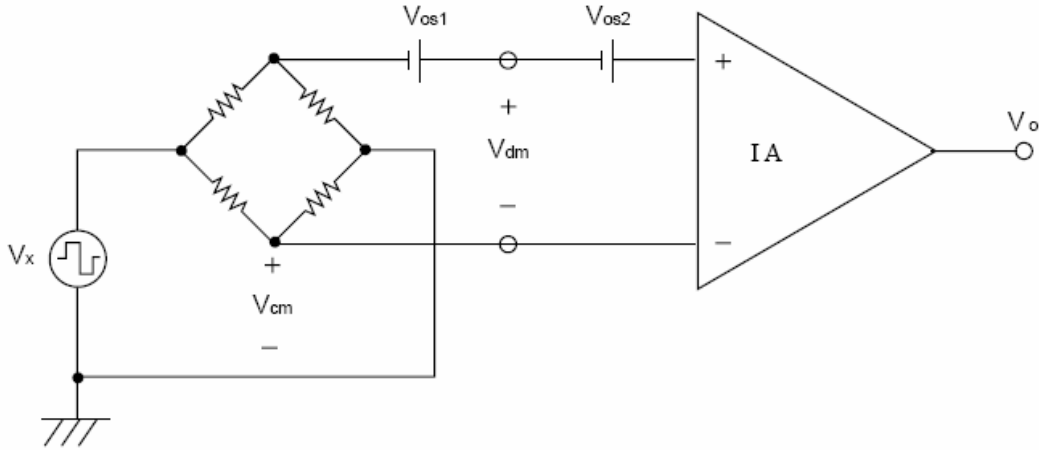


Fig. 1-7.2 Inversió de la polaritat de voltatge d'excitació
(Font: Campbell Scientific)

$$V_o(\Phi_1) = A_{dm}(V_{dm} + V_{os1} + V_{os2}) + A_{cm}V_{cm} \quad (7)$$

$$V_o(\Phi_2) = A_{dm}(-V_{dm} + V_{os1} + V_{os2}) + A_{cm}(-V_{cm}) \quad (8)$$

$$\frac{1}{2}V_o(\Phi_1 - \Phi_2) = A_{dm}V_{dm} + A_{cm}V_{cm} \quad (9)$$

Invertint la polaritat s'eliminen els error de voltatge d'*offset*, però no pas els errors en mode comú.

En conclusió, combinant la inversió de les entrades i la inversió de la polaritat d'excitació es poden eliminar completament aquest dos tipus d'errors. Això comporta realitzar quatre mesures, la qual cosa també ajuda a reduir els efectes del soroll.

1.2.7 Microprocessador

És el cervell i el cor del *datalogger*. Permet a l'usuari programar l'EMA a partir d'un llenguatge més o menys senzill i controlar des del mostreig dels sensors fins a l'emmagatzematge de dades.

1.2.8 Memòria, Instruccions i Dades

La memòria del *datalogger* permet emmagatzemar les dades provinents dels sensors meteorològics i els programes realitzats pels usuaris.

Normalment, com en qualsevol sistema basat en microcontrolador, existeix una part de la memòria que és no volàtil (EEPROM, per exemple, per emmagatzemar el sistema operatiu del sistema) i una altra de volàtil (SRAM, per exemple, per emmagatzemar les dades i els programes realitzats pels usuaris).

1.2.9 Relotge

Imprescindible pel funcionament del microprocessador i per bona part dels elements que formen part del *datalogger*.

Sense el rellotge tampoc es podria programar el mostreig periòdic dels sensors.

1.2.10 Port sèrie

El port sèrie permet les comunicacions entre el microprocessador del *datalogger* i el sistema de comunicacions de l'EMA (mòdem, ràdio, ordinador, etc.).

Cada vegada més, hi ha certs sensors que incorporen les comunicacions via port sèrie en les seves opcions, permetent la configuració de derts paràmetres i/o la transmissió de les dades amb aquest protocol estandaritzat.

1.3. Exemple de funcionament d'un datalogger en una EMA

Partint de la figura 1-1, i incorporant els sensors més habituals que es poden trobar en una EMA, es pot obtenir un esquema com el de la figura 1-8.

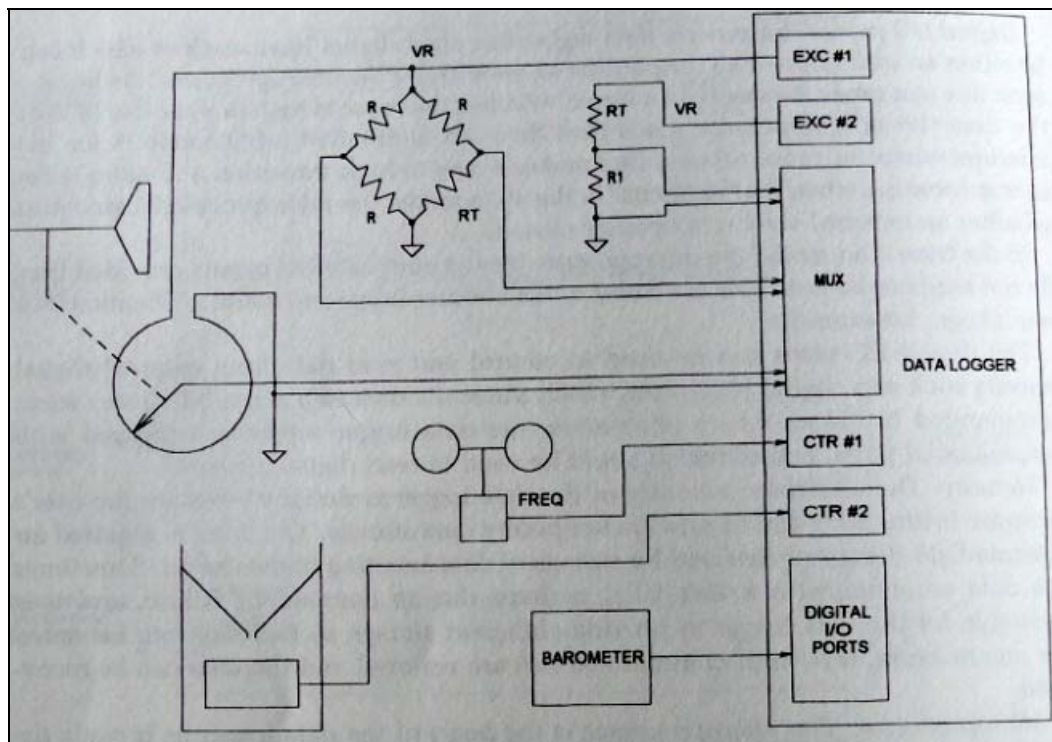


Fig. 1-8. Esquema bàsic mesura sensors amb un datalogger
(Font: Meteorological Measurement Systems, 2001)

Aquesta EMA genèrica incorpora una sèrie de sensors i un *datalogger* que permeten l'obtenció de les diverses variables meteorològiques a partir dels components explicats amb anterioritat.

En apartats posteriors es podran veure en molt més detall i per a un *datalogger* Campbell CR1000 exemples detallats dels sensors aquí exposats i d'altres no presents en aquest esquema.

a) Sensor resistiu de temperatura RTD en un pont de resistències

La sortida d'excitació 1 (EXC #1) del *datalogger* subministra la tensió de referència necessària perquè es pugui obtenir la dada per les entrades analògiques del multiplexor, que amplifica l'amplificador d'instrumentació,

que converteix en una dada digital el convertidor analògic digital ADC, i que finalment processa el microprocessador i emmagatzema a la memòria SRAM.

b) Sensor resistiu de temperatura RTD en un divisor de tensió

La sortida d'excitació 2 (EXC #2) del *datalogger* subministra la tensió de referència necessària per a l'obtenció de la dada seguint els mateixos passos que en l'apartat anterior.

c) Sensor de direcció del vent potenciomètric

La sortida d'excitació 1 (EXC #1) del *datalogger* subministra la tensió de referència necessària perquè es pugui obtenir la dada seguint els mateixos passos que en l'apartat anterior.

d) Sensor de velocitat del vent de culleres

El comptador 1 (CTR #1) permet comptar la freqüència de gir de l'anemòmetre per obtenir-ne la velocitat.

e) Sensor de precipitació de balancí

El comptador 2 (CTR #2) permet comptar el número de bolcades de cada cullereta del pluviòmetre i obtenir-ne la intensitat i els totals de precipitació.

f) Sensor digital de pressió atmosfèrica

El senyal d'un baròmetre amb una sortida sèrie digital és llegida pel port digital.

1.4. El datalogger Campbell CR1000

Campbell Scientific és una empresa que fabrica una àmplia gamma de *dataloggers* per a tota mena d'aplicacions a nivell mundial. Els seus aparells

s'utilitzen en estudis científics, serveis meteorològics, empreses d'enginyeria, serveis de carreteres, etcètera, etcètera.

La raó principal per la qual s'ha triat un *datalogger* d'aquesta empresa és per la seva gran interactivitat amb l'usuari. Les possibilitats de configuració i programació són molt àmplies per un usuari avançat, i la transparència de l'aparell permet tenir-ne un bon coneixement i un important control. Els manuals d'aquests *dataloggers* són força exhaustius i els seus sistemes operatius s'actualitzen periòdicament de forma gratuïta a través del lloc web de l'empresa (<http://www.campbellsci.com>).

Aquest projecte incorpora diversos exemples d'adquisició de dades de sensors suposant que el *datalogger* de l'EMA d'estudi és el CR1000 de Campbell Scientific, per la qual cosa en aquest apartat es presenta molt breument aquest aparell.

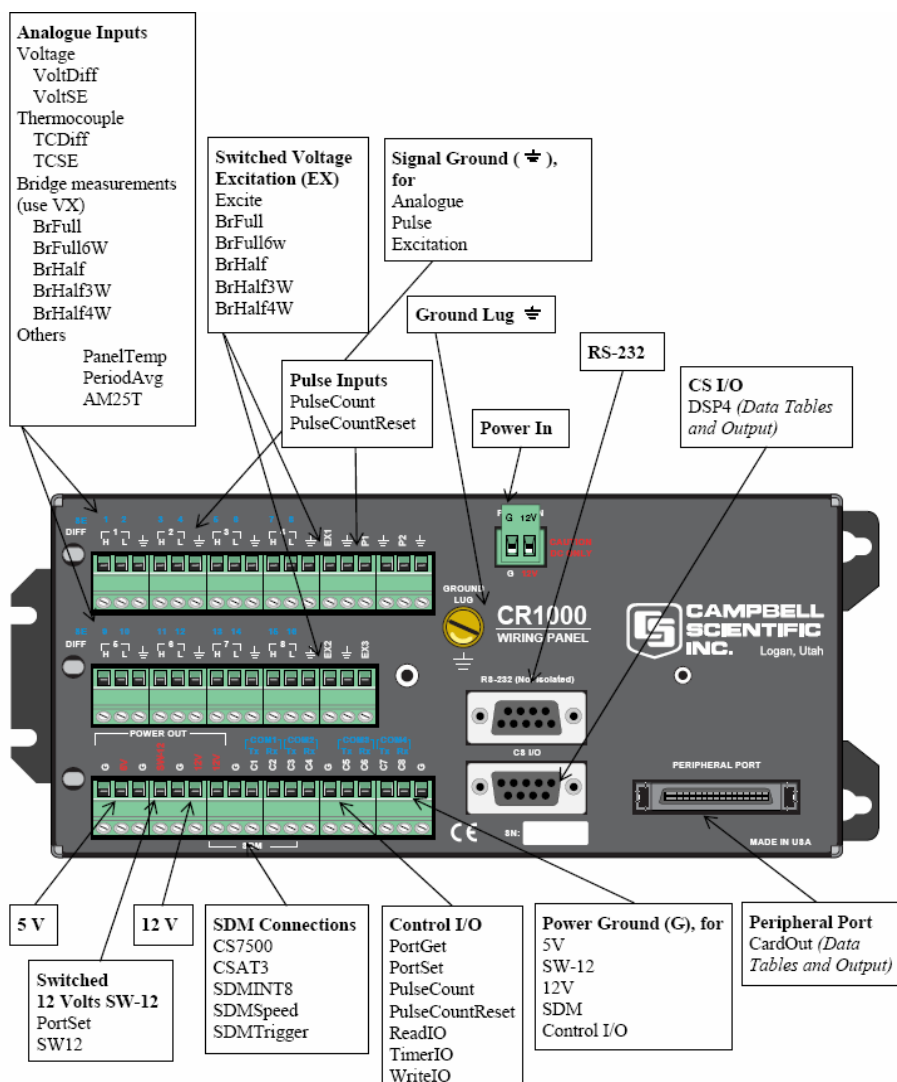


Fig. 1-9. Esquema datalogger Campbell CR1000

Com es pot comprovar a simple vista, un *datalogger* “real” és força més complex que el presentat en els apartats anteriors. Això fa que les seves possibilitats també siguin molt més àmplies i variades.

Aquest *datalogger* incorpora vuit entrades analògiques diferencials (setze en *single-ended*), dos comptadors d’impulsos, tres sortides d’excitació, 2 Mbytes de memòria SRAM, vuit ports digitals I/O i un port sèrie RS232.

La programació del *datalogger* es pot realitzar directament a partir de l’editor de Campbell CRBasic, o es pot fer a través del programa Shortcut, que permet configurar tota una sèrie de paràmetres i realitzar les lectures dels sensors sense haver d’escriure ni una sola línia de codi.

2. Temperatura

2.1. Definició

Segons l'Organització Meteorològica Mundial (OMM) es pot definir la temperatura com *la condició que determina el fluxe net de calor entre dos cossos. En un sistema d'aquest tipus, doncs, es diu que el cos que globalment perd calor a favor de l'altre està a major temperatura.*

2.2. Mesura de la temperatura

Tota propietat física d'una substància que sigui funció de la temperatura pot servir per construir un termòmetre. Les més utilitzades són:

2.2.1. Dilatació de materials

La mesura es realitza a partir de la diferència d'expansió entre dos materials produïda per la temperatura.

2.2.1.1 Termòmetres de líquid en càpsula de vidre

Els canvis de volum d'un líquid respecte al seu recipient es traduiran en canvis en la columna de líquids.

S'acostuma a utilitzar el mercuri per a temperatures superiors al seu punt de congelació ($-38,3^{\circ}\text{C}$), o l'alcohol etílic (o altres líquids orgànics purs) per a temperatures més baixes, fins a -62°C .



Fig. 2-1. Termòmetre d'alcohol etílic

2.2.1.2 Termòmetres bimetal·lics

Es basa en la diferent deformació experimentada per dos metalls amb diferents coeficients de dilatació tèrmica.

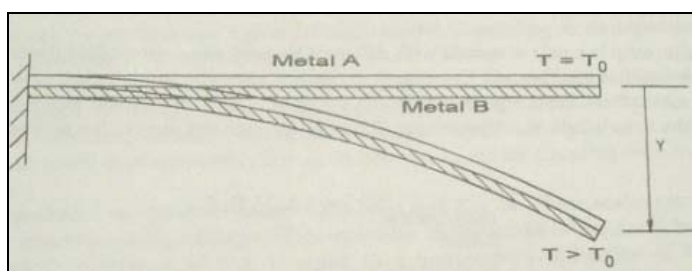


Fig. 2-2. Termòmetre bimetal·lic
(Font: Meteorological Measurement Systems, 2001)

2.2.2 Variació de la resistència elèctrica d'un conductor

Es realitza la mesura a partir dels canvis en la resistència d'un material conductor en funció de la temperatura.

2.2.2.1 Termoresistències

La resistència elèctrica dels metalls augmenta amb la temperatura, però aquest augment no és el mateix per a tots els metalls, i varia en augmentar la temperatura.

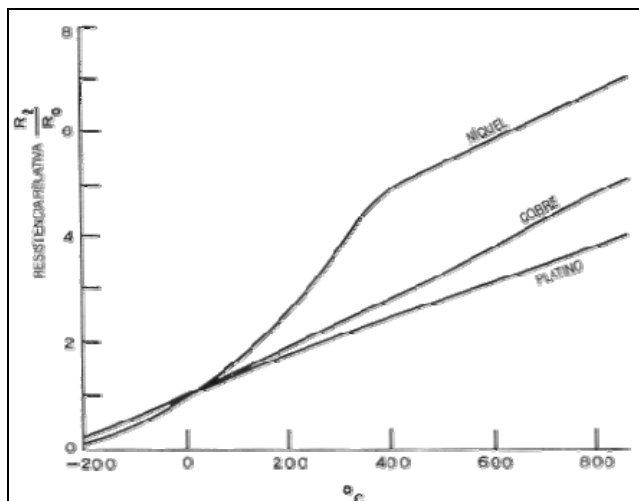


Fig. 2-3. Variació de la resistència de diferents metalls amb la temperatura

També es coneixen com a *RTD: resistance temperature detectors*.

El metall més utilitzat per aquest tipus de sensor és el platí: estable, precís, lineal, fàcil d'obtenir de forma pura, dúctil, amb un punt de fusió alt i resistent a la corrosió.

Els altres metalls més utilitzats són el coure i el níquel.

El coure és estable i barat, però té una sensibilitat inferior a la del platí i al níquel, presentant una baixa resolució.

El níquel és menys lineal que el platí però amb major sensibilitat. Pateix, però, problemes d'oxidació o deteriorament químic.

La denominació de les resistències de platí és PtX, on Pt és el símbol químic del platí i X el valor de la resistència en ohms a 0°C. Per exemple Pt100, Pt500 o Pt1000.

El termòmetre de platí és el sensor recomanat com a patró per l'Escala Internacional de Temperatura (ITS)-90 entre -259.34°C i 630.74°C.

Entre 0°C i 630.74°C, el valor de la resistència a la temperatura T ve donada per l'equació:

$$R_T = R_0 (1 + a T + b T^2) \quad (10)$$

On :

- R_T és la resistència d'un fil de platí a la temperatura T
- R_0 és la seva resistència a 0°C
- a i b són constants que depenen de la puresa del platí

Entre $-189,344^\circ\text{C}$ i 0°C , el valor de la resistència a la temperatura T ve donada per l'equació:

$$R_T = R_0 (1 + a T + b T^2 + c (T-100) T^3) \quad (11)$$

On c és una altra constant que depèn de la puresa del platí.

En aplicacions meteorològiques (-50°C a $+50^\circ\text{C}$) l'equació (10) és suficientment acurada.

Per a la mesura de la temperatura a partir de la variació d'una resistència amb la temperatura, és necessari crear un circuit en el qual es mesuri, per exemple, el voltatge de sortida en aplicar un determinat corrent d'excitació. Aquest voltatge serà funció de la resistència (o resistències) que formin part del circuit. Segons la Llei D'Ohm $\Delta V = R \cdot I$.

En general, com que el valor de la resistència a mesurar és petit i el canvi amb la temperatura és baix, s'acostuma a utilitzar un pont de resistències (*bridge circuit*).

De ponts de resistència n'hi ha de tota mena, però habitualment es classifiquen com ponts mitjos (*half bridges*) o ponts complets (*full bridges*).

A la figura 2-4 es poden veure diferents configuracions de ponts mitjos que es poden mesurar amb el *datalogger* CR1000 de Campbell Scientific.

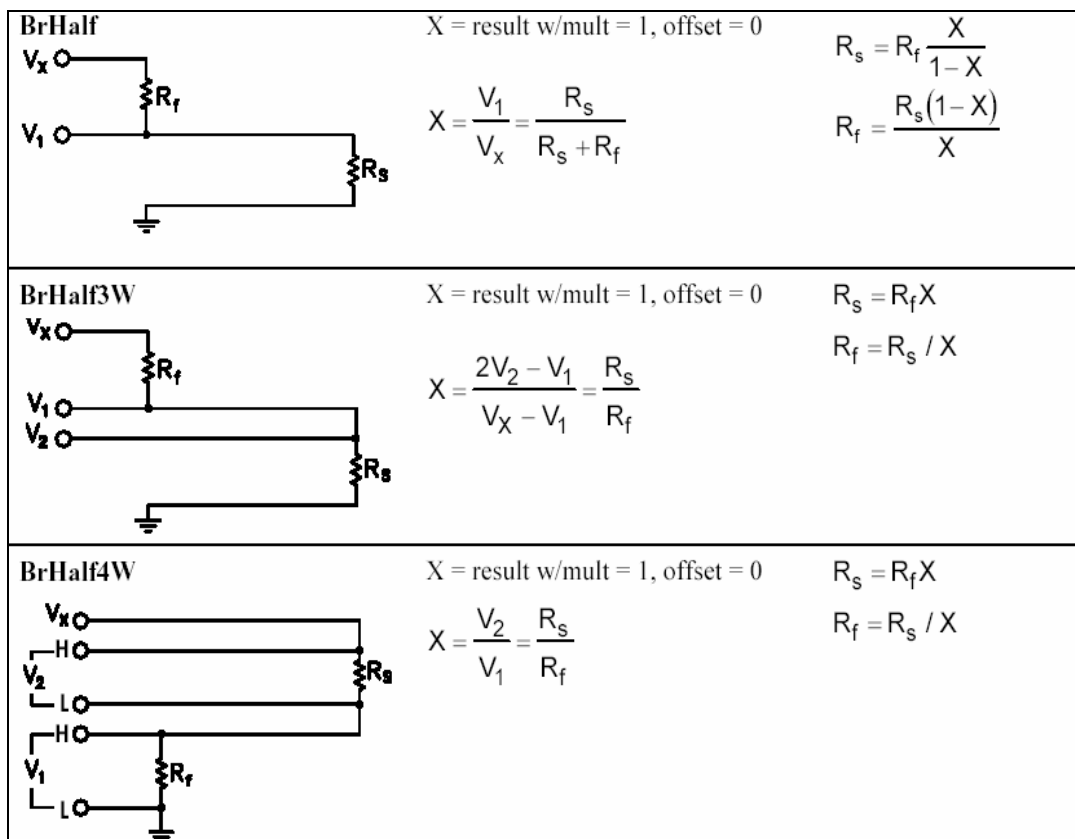


Fig. 2-4. Ponts mitjos de resistències (*half bridges*)

(Font: Manual Datalogger CR1000, Campbell Scientific)

R_s és la resistència variable (en aquest cas seria la RTD), i R_f la resistència fixe, coneguda.

La primera configuració (BrHalf) és el que s'anomena una connexió a dos fils (figura 2-5), i té l'inconvenient que a la resistència variable (R_s o RTD) s'hi sumen les resistències pròpies dels cables de connexió (R_{c1} i R_{c2}).

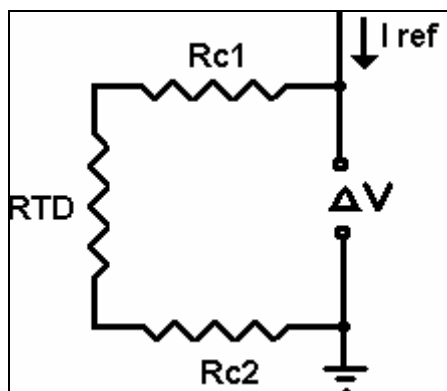


Fig. 2-5. Mesura a dos fils d'una resistència

La tercera configuració (BrHalf4W) és el que s'anomena una connexió a quatre fils (figura 2-6), i ja no se li sumen els valors dels cables de connexió, ja que l'excitació i la mesura són independents.

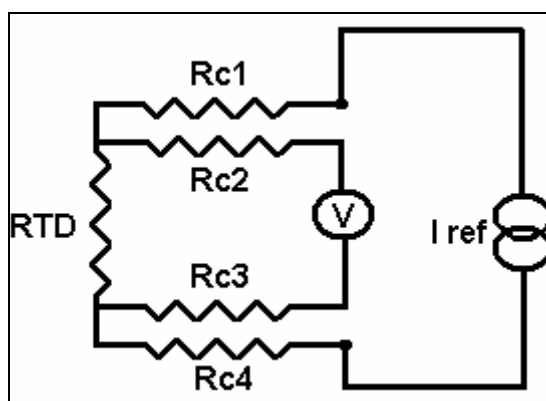


Fig. 2-6. Mesura a quatre fils d'una resistència

En aquest cas es fa passar un corrent conegut per la RTD (R_s) pels cables 1 i 4 provocant una diferència de potencial entre els cables 2 i 3, és a dir, pels extrems de la RTD. Aquests dos cables estan connectats a un voltímetre d'alta impedància pels quals no circula corrent i, per tant, el voltímetre mesurarà exactament el voltatge als extrems de la RTD, sense interferència dels cables 1 i 4.

La segona configuració (BrHalf3W) és un entremig de les dues vistes anteriorment.

També es pot optar per ponts complets de resistències (figura 2-7).

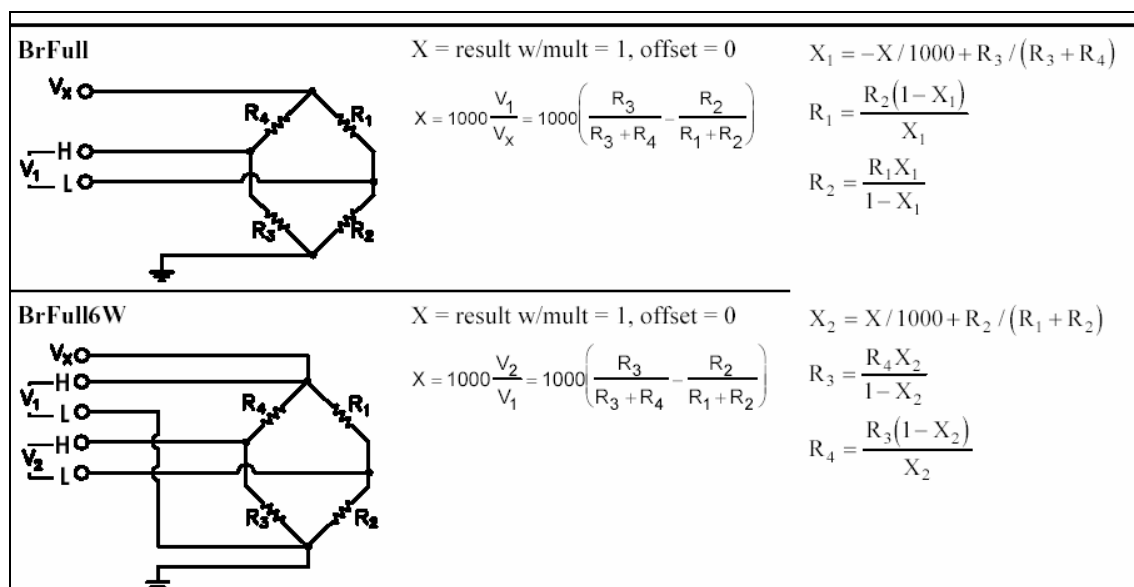


Fig. 2-7. Ponts complets de resistències (full bridges)
 (Font: Manual Datalogger CR1000, Campbell Scientific)

Els sensors de temperatura que existeixen al mercat normalment donen diverses opcions de sortida. Les més comunes són resistiva (Pt100, Pt1000, etc.) i voltatge (0 a +1V, -0.4 a +0.6V, etc.).

Exemple 2-1.

Mesura de la temperatura a partir d'una RTD amb un datalogger Campbell CR1000

El pont de resistències escollit és un pont mig a 4 fils, i l'element sensor és una Pt100.

En aquest cas s'ha triat el mòdul de Campbell 4WPB100 (pont mig per a Pt100), i el sensor utilitzat és un Rotronic MP106A T7 (Pt100 amb sortida resistiva).



Fig. 2-8. Sensor T_U Rotronic MP106A
(Font: Manual Rotronic)

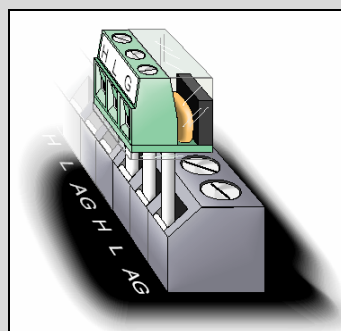


Fig. 2-9. Mòdul mesura 4 fils 4WPB100
(Font: Campbell Scientific Ltd.)

Rotronic MP106A T7

Sensor combinat de temperatura i humitat relativa.

El rang de mesura és de -40 a $+60$ °C

Exactitud ± 0.3 °C

Mòdul 4WPB100 Campbell Scientific

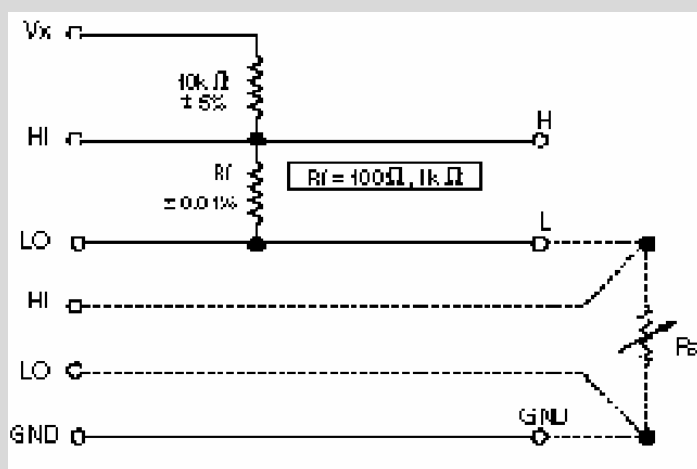


Fig. 2-10. Esquema mòdul mesura 4 fils 4WPB100
(Font: Manual mòdul 4WPB100, Campbell Scientific)

Current limiting 10k Ohm Resistor

Tolerance @ 25°C:	±5%
Power rating:	0.25W

Completion Resistor

Tolerance @ 25°C:	±0.01%
Temperature coefficient:	
0 to +60°C	4 ppm/°C
-55 to +125°C	8 ppm/°C
Power rating:	0.25W

Fig. 2-11. Especificacions tècniques mòdul mesura 4 fils 4WP100

(Font: Manual mòdul 4WPB100, Campbell Scientific)

Analitzant les equacions per a la mesura de la PRT es comprenen els valors i les característiques tècniques del pont mig.

Amb aquest objectiu s'utilitzen dues instruccions: **BrHalf4W** i **PRT**.

El resultat d'aplicar la instrucció BrHalf4W és

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{I \times R_s}{I \times R_f} = \frac{R_s}{R_f}$$

La instrucció PRT fa la mesura en °C per a una PRT estàndard d'acord amb la normativa DIN 43760. Per fer-ho utilitza la raó entre la resistència variable R_s i la seva resistència a 0 °C (R_0). És a dir, R_s/R_0 .

De manera que

$$R_s/R_0 = (R_s/R_f \times R_f/R_0)$$

Si $R_f = R_0$ (en aquest cas 100 ohms)

$$R_s/R_0 = 1 \times (R_s/R_f)$$

Per tant, el multiplicador és 1 i el resultat de la instrucció PRT és:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{R_s}{R_0}$$

El que és important és que R_f sigui tèrmicament estable, ja que així no influencii el resultat de la mesura, i tingui un valor de 100 ohms fixe; una tolerància baixa.

El mòdul de Campbell dona un coeficient de temperatura de 4 ppm/°C de 0 a 60°C, i 8 ppm/°C de -55 a + 125 °C. Això suposa uns errors de 0.05°C a 60°C i 0.33°C a 125°C. Així mateix, la tolerància de R_f (100 ohms) a 25°C és de 0.01%.

Només falta per analitzar el voltatge d'excitació que s'ha d'aplicar a les resistències.

La caiguda de voltatge a través de R_s és

$$V_2 = I * R_s$$

Si la mesura es fa a una temperatura màxima de 40°C llavors la caiguda màxima de voltatge serà per aquest valor, quan la resistència és màxima, que segons l'estàndard anterior és 115.54 ohms.

Per trobar el voltatge d'excitació màxim per a un rang de mesura de ± 25 mV, s'assumeix que $V_2 = 25$ mV, amb la qual cosa s'obté

$$I = 25\text{mV}/R_s = 25\text{mV}/115.54 \text{ ohms} \\ = 0.216\text{mA}$$

Amb la qual cosa V excitació, V_x

$$V_x = I(R_1 + R_s + R_f) = 2.21\text{V}$$

R_1 (10K Ω) permet la utilització d'un voltatge d'excitació alt (2V) amb un rang de mesura petit (25mV), i així s'eviten problemes de soroll provocats per l'excitació, i problemes d'auto-escalfament de R_s , ja que la intensitat d'excitació és petita (0.2 mA).

Campbell Scientific proporciona una taula per saber les V_x segons les temperatures màximes a les quals es vulgui treballar.

En aquest exemple es tria la taula del mòdul de 100 ohms 4WPB100, per a una temperatura màxima de 50°C i un rang de mesura de ± 25 mV (l'utilitzat pels dataloggers CR10X i CR1000); de la que en resulta un voltatge d'excitació de 2035 mV.

Table 1 Excitation Voltage for 100 Ohm PRT in 4WPB100 Based on Maximum Temperature and Input Voltage Range			
Max. Temp °C	PRT Resistance Ohms	Excitation Voltage, mV	
		±25mV Input Range (CR10/10X)	±50mV Input Range (21X, CR7, CR23X, CR9000)
50	119.4	2035	4070
100	138.5	1758	3516
150	157.31	1551	3101
200	175.84	1390	2780
250	194.07	1262	2523
300	212.02	1157	2314
350	229.67	1070	2140
400	247.04	997	1993
450	264.11	934	1867
500	280.9	879	1759
550	297.39	832	1664
600	313.59	790	1581
650	329.51	753	1507
700	345.13	720	1441
750	360.47	691	1382
800	375.51	664	1328
850	390.26	640	1280

Taula 2-1. Voltatges excitació mòdul mesura 4 fils 4WPB100

(Font: Manual mòdul 4WPB100, Campbell Scientific)

Com s'ha vist anteriorment la mesura es realitza amb les instruccions **BrHalf4W** i **PRT**.

Analitzant-les en detall s'obtenen tots els paràmetres necessaris per definir completament la instrucció.

BrHalf4W (Dest, Reps, Range1, Range2, DiffChan, ExChan, MeasPEx, ExmV, RevEx, RevDiff, SettlingTime, Integ, Mult, Offset)

Parameter & Data Type	Enter			
Dest <i>Variable or Array</i>	The Variable in which to store the results of the instruction. When Reps are used the results are stored in an array with the variable name. An array must be dimensioned to have elements for all the Reps.			
Reps <i>Constant</i>	The number of repetitions for the measurement or instruction.			
Range <i>Constant</i>	Alpha Code	Voltage Range		
	mV5000	± 5000 mV		
	mV2500	± 2500 mV		
	mV250	± 250 mV		
	mV25	± 25 mV		
	mV7_5	± 7.5 mV		
	mV2_5	± 2.5 mV		
	Autorange	mV2_5 – mV5000	Selects range (Sect. 3.1)	
	mV250C	± 250 mV	The mV250C, mV25C, mV7_5C, and	
	mV25C	± 25 mV	mV2_5C ranges pull the channel into	
	mV7_5C	± 7.5 mV	common mode range and check for open	
	mV2_5C	± 2.5 mV	input	
	AutorangeC	mV2_5 – mV250	Selects C range	
SEChan <i>Constant</i>	The single-ended channel number on which to make the first measurement. When Reps are used, subsequent measurements will be automatically made on the following single-ended channels. If the channel is entered as a negative number, all reps occur on that channel.			
ExChan <i>Constant</i>	Enter the excitation channel number to excite the first measurement.			
	Alpha Code	Code/ Channel	Result	
	VX1	1	Switched excitation channels, are switched to the excitation voltage.	
	VX2	2	for the measurement and switched off between measurements.	
	VX3	3		
MeasPEX <i>Constant</i>	The number of sensors to excite with the same excitation channel before automatically advancing to the next excitation channel. To excite all the sensors with the same excitation channel, the number should equal the number of Reps.			
ExmV <i>Constant</i>	The excitation voltage in millivolts. Allowable range ± 2500 mV. RevEx may be used to excite with both a positive and negative polarity to cancel offset voltages.			
RevEx <i>Constant</i>	Code	Value	Result (Reversing requires twice as much time to complete)	
	False	0	Excite only with the excitation voltage entered	
	True	≠0	A second measurement is made with the voltage polarity reversed to cancel offsets	
RevDiff <i>Constant</i>	Code	Value	Result (Reversing requires twice as much time to complete)	
	False	0	Signal is measured with the high side referenced to the low	
	True	≠0	A second measurement is made after reversing the inputs to cancel offsets	
Parameter & Data Type	Enter			
SettlingTime <i>Constant</i>	The time in microseconds to delay between setting up a measurement (switching to the channel, setting the excitation) and making the measurement. (1 microsecond resolution)			
	Entry	Voltage Range	Integration	Settling Time
	0	All	250 μS	450 μS (default)
	0	All	_50Hz, _60 Hz	3 mS (default)
	≥100	All	All	μS entered
Integ <i>Constant</i>	The time spent on integration in microseconds for each of the channels measured.			
	Entry		Integration	
	250		250 μS	
	_60Hz or 16667		16,667 μS (reject 60 Hz noise)	
	50 Hz or 20000		20,000 μS (reject 50 Hz noise)	
Mult, Offset <i>Constant, Variable, Array, or Expression</i>	A multiplier and offset by which to scale the raw results of the measurement.			

Taula 2-2. Paràmetres instrucció BrHalf4W
(Font: Manual CR1000, Campbell Scientific)

BrHalf4W (Rs_R0,1,mV25,mV25,1,Vx1,1,2035,True ,True ,0,_50Hz,1,0)

Paràmetre 1 – Dest

Rs_Ro Nom de la variable en la qual es guarda el resultat

Paràmetre 2 – Reps

1 Un sol sensor

Paràmetre 3 – Range 1

mV25 Rang d'entrada pel canal 1. Com s'ha vist, 25mV

Paràmetre 4 – Range 2

mV25 Rang d'entrada pel canal 2. Com s'ha vist, 25mV

Paràmetre 5 – Differential Channel

1 Canal diferencial on connectem el sensor per la mesura

Paràmetre 6 – Excitation Channel

Vx1 Canal d'excitació número 1

Paràmetre 7 – MeasPEX Measurement per excitation

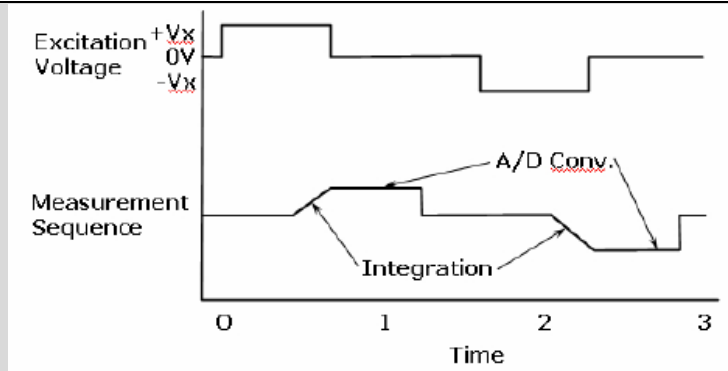
1 Número de sensors a excitar amb el mateix canal d'excitació

Paràmetre 8 – ExmV Excitation in mV

2035 Valor extret de la **taula 2-1**

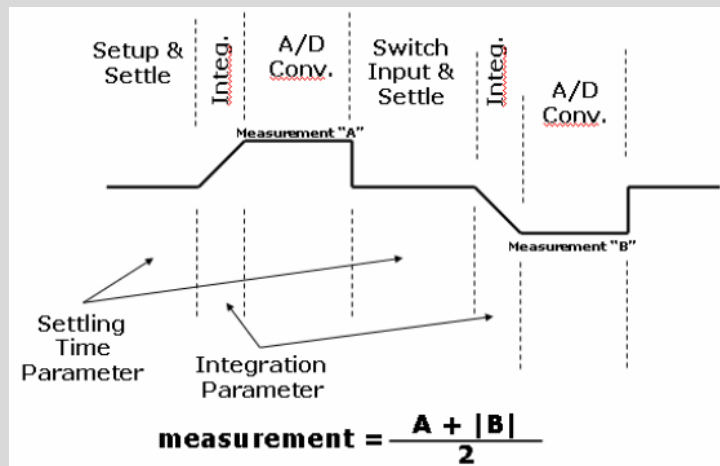
Paràmetre 9 – RevEx Reverse excitation

True Es realitza una segona mesura amb l'excitació canviada de signe per eliminar els possibles *offset* deguts al sensor, el cablejat o el circuit d'excitació



Paràmetre 10 – RevDiff Inputs reversed

True Es realitza una segona mesura canviant l'ordre dels canals d'entrada. Primer el canal alt contra el baix (1 respecte el 2), després el baix contra l'alt (el 2 respecte l'1). El resultat de la mesura és la mitjana aritmètica.



Paràmetre 11 – Settling Time

0 Temps d'establiment. És el temps necessari per començar a realitzar la mesura. Des que s'excita el pont fins que s'aconsegueix el valor real de la lectura existeix un temps, finit, que permet el senyal establir-se en el valor correcte.

En aquest cas el paràmetre val 0, que correspon a un *delay* de 3 ms.

El temps total, però, serà de 12 ms, ja que en les instruccions anteriors s'ha imposat que es fes una excitació inversa i s'invertissin els canals d'entrada. Per tant, l'ordre és el següent:

S'activa l'excitació ----> pausa de 3 ms -----> mesura

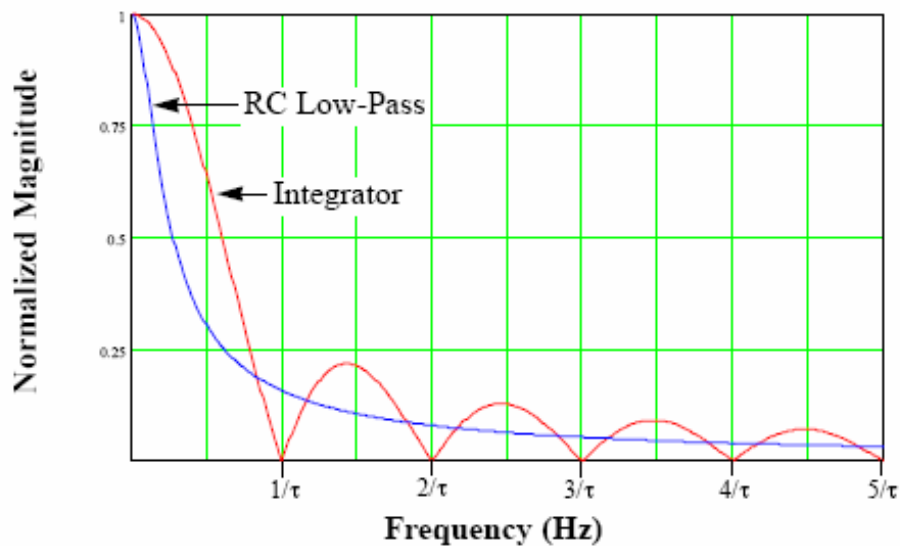
S'inverteix l'excitació ----> pausa de 3 ms -----> mesura

S'inverteix l'excitació ----> s'inverteixen les entrades ---->
 pausa de 3 ms -----> mesura

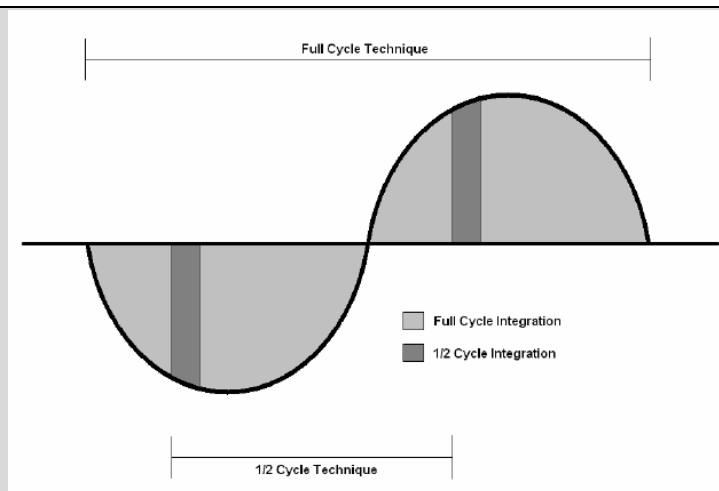
S'inverteix l'excitació ----> pausa de 3 ms -----> mesura

Paràmetre 12 – Integ Integration

_50Hz Per realitzar la mesura del senyal s'integra durant un temps determinat, i s'utilitza aquests temps per reduir el soroll.
 En aquest cas el temps d'integració és de 20ms, que redueix el soroll de línia d'alimentació (50Hz AC).



Magnitude of Frequency Response of Analog Integrator and Simple RC Low-Pass Filter



Paràmetre 13 – Mult Multiplicador

1 Com s'ha vist anteriorment, el multiplicador val 1.

Paràmetre 14 – Offset

0

PRT (Dest, Reps, Source, Mult, Offset)

Parameter & Data Type	Enter
Dest <i>Variable or Array</i>	The variable in which to store the temperature in degrees C.
Reps <i>Constant</i>	The number of repetitions for the measurement or instruction.
Source <i>Variable or Array</i>	The name of the variable or array that contains the Rs/RO value(s).
Mult, Offset <i>Constant, Variable, Array, or Expression</i>	A multiplier and offset by which to scale the raw results of the measurement. See the measurement description for the units of the raw result; a multiplier of one and an offset of 0 are necessary to output in the raw units. For example, the TCDiff instruction measures a thermocouple and outputs temperature in degrees C. A multiplier of 1.8 and an offset of 32 will convert the temperature to degrees F.

Taula 2-3. Paràmetres instrucció PRT
(Font: Manual CR1000, Campbell Scientific)

PRT (T,1,RS_R0,1,0)

Paràmetre 1 – Dest

T Nom de la variable en la qual es guarda el resultat

Paràmetre 2 – Reps

1 Un sol sensor

Paràmetre 3 – Source

Rs_R0 Nom de la variable que conté el valor de Rs/R0

Paràmetre 4 – Mult Multiplicador

1

Paràmetre 5 – Offset

0

Connexió del sensor al *datalogger*

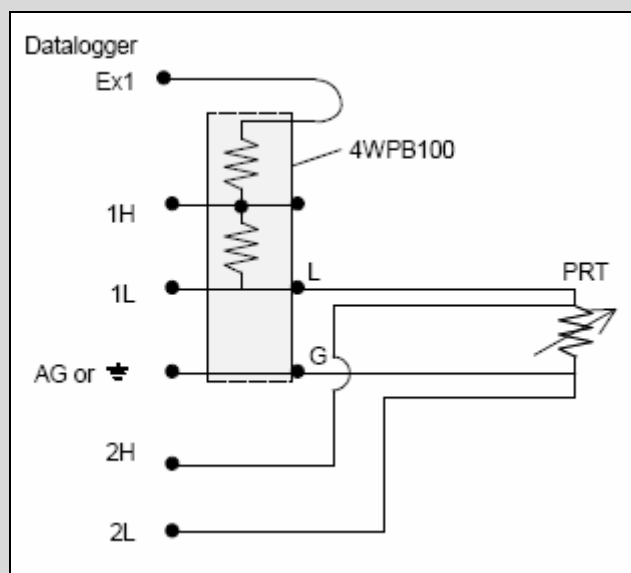


Fig. 2-12. Esquema connexió *datalogger* mesura 4 fils 4WPB100
 (Font: Manual mòdul 4WPB100, Campbell Scientific)

Els colors dels cables i els canals del *dataloggers* estan definits específicament per aquest exemple.

Cable blau: alimentació 12V

Cable violeta o rosa: G ----- power GND

Cable groc (Pt100): canal d'entrada número 2 (1L) ----- L del pont mig

Cable blanc (Pt100): canal d'entrada número 3 (2H)

Cable verd (Pt100): canal d'entrada número 4 (2L)

Cable vermell (Pt100): $\perp$ ----- G del pont

Cable marró: canal d'entrada número 5 (3H) ----- senyal d'humitat relativa

Cable negre (del pont): EX1 ----- voltatge d'excitació del pont

Malla: $\perp$ ----- malla

El sensor Rotronic MP106A T7 té la següent relació de pins.

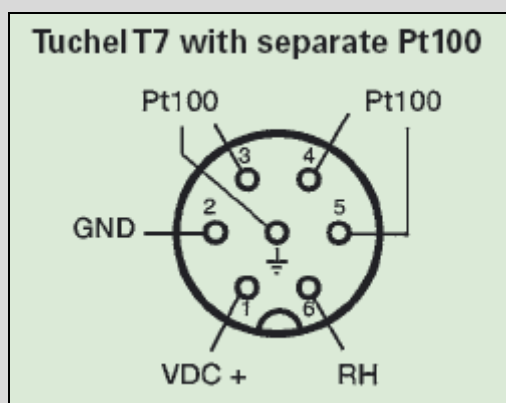


Fig. 2-13. Pins del connector T7 Pt100 del sensor Rotronic MP106A
(Font: Manual Rotronic)

Que, en el cas de l'exemple, corresponen a

1. + 12 V ----- blau
3. GND ----- violeta o rosa
4. Pt100 ----- verd
5. Pt100 ----- blanc
6. Pt100 ----- groc
7. RH ----- marró
8. $\perp$ i malla ----- vermell

Com s'ha comentat en l'exemple anterior la intensitat d'excitació era inferior a 1 mA (0.2 mA) per evitar l'auto-escalfament de la resistència de platí. Per què, doncs, aquest escalfament?

Un punt clau en el disseny d'un circuit de mesura és l'escalfor dissipada per efecte Joule en la resistència. La intensitat que circula per la

resistència produeix una potència calorífica P que tendeix a augmentar la temperatura del sensor per sobre de la del medi que es vol mesurar fins que la potència calorífica transmesa des del sensor al medi iguala a la rebuda per efecte Joule.

$$P = R \cdot I^2 \quad (12)$$

Per quantificar l'augment de temperatura es pot suposar, en una primera aproximació, que la velocitat a la qual es transfereix calor del sensor al medi és proporcional a la diferència de temperatura entre ambdós.

$$I_{q1} = C_d \cdot \Delta T = C_d \cdot (T_s - T) \quad (13)$$

On :

I_{q1} : Intensitat calorífica = quantitat de calor que passa de l'interior del sensor al medi per unitat de temps

C_d : Coeficient de dissipació que mesura la capacitat del flux de calor entre l'interior del sensor i el medi.

T_s : Temperatura del sensor

T : Temperatura del medi

En règim estacionari, la potència dissipada per efecte Joule ha de ser igual a la intensitat calorífica que passa al medi

$$P = R \cdot I^2 = I_{q1} \quad (14)$$

el que implica que la diferència de temperatures entre el sensor i el medi sigui:

$$\Delta T = T_s - T = (1 / C_d) \cdot R \cdot I^2 \quad (15)$$

que indica que la diferència de temperatures és proporcional al quadrat de la intensitat que circula pel sensor.

El coeficient de dissipació C_d es mesura típicament en $\text{mW}/^\circ\text{C}$ o en mW/K , i és una dada habitualment subministrada pel fabricant del sensor. C_d no depèn únicament del sensor, sinó també del medi, i és molt més gran per líquids que per sòlids, augmentant quan el medi està en moviment relatiu amb el sensor.

Els seus valors típics oscil·len entre 1 i $200 \text{ mW}/^\circ\text{C}$.

Alguns fabricants donen l'error per dissipació o coeficient d'auto-escalfament, que no és res més que la inversa de C_d , $1/C_d$, i s'expressa en $^\circ\text{C}/\text{mW}$ o K/mW .

Així doncs, per disminuir al mínim aquesta font d'error s'intenta que el corrent d'excitació de la resistència utilitzat per a la mesura sigui ben petit, des de centenars de μA (10^{-6} A) fins a pocs mA (10^{-3} A).

2.2.3 Variació de la resistència elèctrica d'un semiconductor

Es realitza la mesura a partir dels canvis en la resistència d'un material semiconductor en funció de la temperatura.

2.2.3.1 Termistors

Es tracta de semiconductors amb un coeficient tèrmic resistiu força elevat, que tan pot ser positiu com negatiu, depenent del material.

En el primer cas es parla de **NTC** (*negative temperature coefficient*), i la resistència del semiconductor disminueix amb la temperatura.

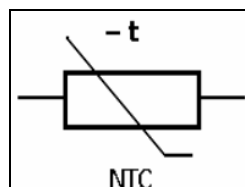


Fig. 2-14. Símbol d'un termistor NTC

En el segon de **PTC** (*positive temperature coefficient*), i la resistència augmenta amb la temperatura.

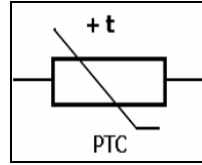


Fig. 2-15. Símbol d'un termistor PTC

Normalment es fabriquen amb òxids metàl·lics, i la majoria formen part de les *NTC*.

La relació entre la temperatura i la seva resistència ve donada per l'expressió

$$R = a * \exp (b/T) \quad (16)$$

- R és la resistència del termistor a la temperatura T
- a i b són dues constants

També es pot expressar aquesta relació amb l'expressió empírica matemàtica de Steinhart-Hart, més acurada que l'anterior.

$$T = 1/(A+B(\ln R)+C(\ln R)^3) - 273.15 \quad (17)$$

On:

- T és la temperatura en °C
- R la resistència del termistor
- A, B i C són tres constants d'ajust que proporciona el fabricant

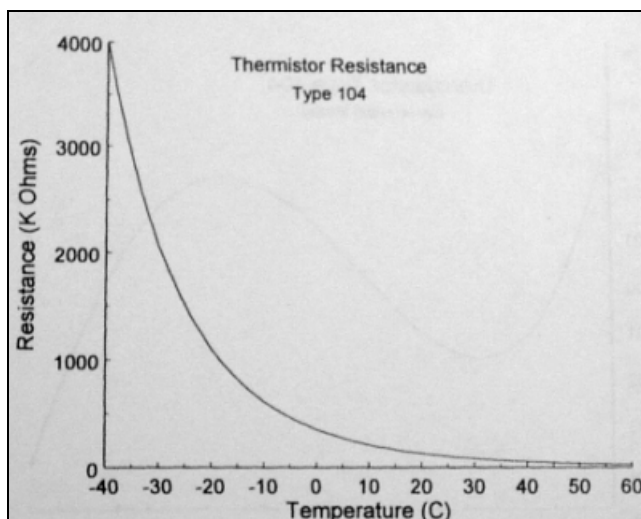


Fig. 2-16. Relació resistència-temperatura d'un termistor tipus 104
 (Font: *Meteorological Measurement Systems*, 2001)

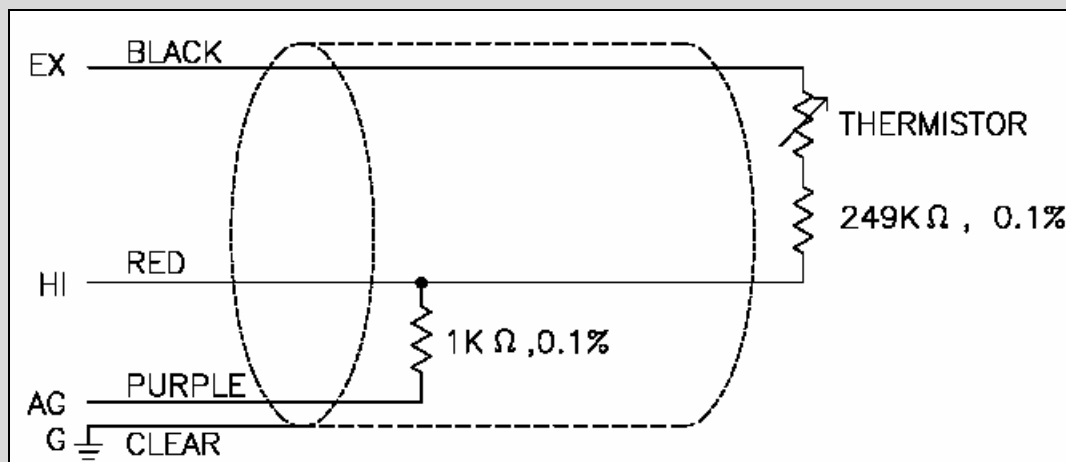
Els termistors es caracteritzen per la seva resistència a 25°C de temperatura, que normalment oscil·la entre els 10Ω i els 400KΩ.

Exemple 2-2.
Mesura de la temperatura a partir d'un termistor tipus 107 amb un datalogger Campbell CR1000

Sensor:	BetaTherm 100K6A Thermistor
Temperature Measurement Range:	-35° to +50°C
Thermistor Interchangeability Error:	Typically $\leq \pm 0.2^\circ\text{C}$ over 0°C to 60°C ; ± 0.4 @ -35°C
Temperature Survival Range:	-50°C to $+100^\circ\text{C}$
Steinhart-Hart Equation Error:	$\leq \pm 0.01^\circ\text{C}$ over -35° to $+50^\circ\text{C}$ (CRBasic dataloggers only)

Fig. 2-17. Característiques termistor 107 de Campbell Scientific

(Font: Manual Campbell Scientific)


Fig. 2-18 Esquema del termistor 107 de Campbell Scientific

(Font: Manual Campbell Scientific)

Es tracta d'un sensor dissenyat per ser utilitzat en la mesura de la temperatura de l'aire, del sol o de l'aigua.

L'error del sensor és una combinació de la tolerància del termistor (*interchangeability*), la precisió del pont de resistències i l'equació de Steinhart-Hart.

En el pitjor dels casos el fabricant especifica que pel rang que va de -24°C a $+48^\circ\text{C}$ la suma de tots els errors és de $\pm 0.4^\circ\text{C}$.

La mesura de la temperatura es realitza amb la instrucció **Therm107**.

Aquesta instrucció realitza la mesura del voltatge d'un pont mig i processa el resultat utilitzant l'equació de Steinhart-Hart.

Per fer-ho aplica un voltatge d'excitació de 2500 mV i mesura la caiguda de voltatge a la resistència de 1KΩ de manera que

$$V_s/V_x = 1000/(R_s+249000+1000)$$

d'on es calcula el valor de R_s .

Finalment s'aplica la fórmula de Steinhart-Hart per conèixer la temperatura.

$$T = 1/(A+B(\ln R_s)+C(\ln R_s)^3) - 273.15$$

En aquest cas el fabricant proporciona els següents valors de A, B i C.

$$A = 8.271111E-4$$

$$B = 2.088020E-4$$

$$C = 8.059200E-8$$

Therm107 (Dest, Reps, SEChan, ExChan, SettlingTime, Integ, Mult, Offset)

Parameter & Data Type	Enter																				
Dest	Dest is the variable in which the results of the measurement will be stored. If the Reps parameter is greater than one, Dest must be an array dimensioned large enough to hold the results for all repetitions.																				
Reps	The Reps parameter is the number of times the measurement should be made. Measurements are made on consecutive channels. If the Reps parameter is greater than 1, the Dest parameter must be a variable array.																				
SEChan	The SEChan argument is the number of the single-ended channel on which to make the first measurement (1-16). If the Reps parameter is greater than 1, the additional measurements will be made on sequential channels.																				
ExChan	The ExChan is the excitation channel number (1-3) to use to excite the thermistor. If multiple thermistors are measured with one instruction, all repetitions will use the same excitation channel. An alphanumeric or numeric code can be entered.																				
SettlingTime	The SettlingTime parameter is the amount of time to delay after setting up a measurement and before making the measurement. Refer to the table below for default SettlingTimes. <table><tr><th>Entry</th><th>Range</th><th>Integration</th><th>Settling Time</th></tr><tr><td>0</td><td>All</td><td>250 ms</td><td>450 ms (default)</td></tr><tr><td>0</td><td>All</td><td>50Hz</td><td>3 ms (default)</td></tr><tr><td>0</td><td>All</td><td>60Hz</td><td>3 ms (default)</td></tr><tr><td>>100</td><td>All</td><td>All</td><td>ms entered</td></tr></table>	Entry	Range	Integration	Settling Time	0	All	250 ms	450 ms (default)	0	All	50Hz	3 ms (default)	0	All	60Hz	3 ms (default)	>100	All	All	ms entered
Entry	Range	Integration	Settling Time																		
0	All	250 ms	450 ms (default)																		
0	All	50Hz	3 ms (default)																		
0	All	60Hz	3 ms (default)																		
>100	All	All	ms entered																		
Integ	The Integ parameter is the amount of time, in microseconds, to integrate a signal for the channel being measured. <table><tr><th>Option</th><th>Description</th></tr><tr><td>250</td><td>Performs a 250 microsecond integration.</td></tr><tr><td>60Hz</td><td>Performs a 16.667 millisecond integration; filters 60 Hz noise.</td></tr><tr><td>50Hz</td><td>Performs a 20 millisecond integration; filters 50 Hz noise.</td></tr></table>	Option	Description	250	Performs a 250 microsecond integration.	60Hz	Performs a 16.667 millisecond integration; filters 60 Hz noise.	50Hz	Performs a 20 millisecond integration; filters 50 Hz noise.												
Option	Description																				
250	Performs a 250 microsecond integration.																				
60Hz	Performs a 16.667 millisecond integration; filters 60 Hz noise.																				
50Hz	Performs a 20 millisecond integration; filters 50 Hz noise.																				
Mult, Offset	The Mult and Offset parameters are each a constant, variable, array, or expression by which to scale the results of the measurement. With a multiplier (mult) of 1 and an offset of 0, the output is temperature in degrees C. With a multiplier of 1.8 and an offset of 32, the output is temperature in degrees F.																				

Taula 2-4. Paràmetres instrucció mesura termistor Therm107
(Font: Manual CR1000, Campbell Scientific)

Therm107 (T,1,1,Vx1,0,_50Hz,1,0)

Paràmetre 1 – Dest

T Nom de la variable en la qual es guarda el resultat

Paràmetre 2 – Reps

1 Un sol sensor

Paràmetre 3 – SEChan Single Ended Channel

1 Es connecta al canal 1

Paràmetre 4 – ExChan Excitation Channel

Vx1 Canal d'excitació número 1

Paràmetre 5 – SettlingTime

0 Temps d'establiment. És el temps necessari per començar a realitzar la mesura.

En aquest cas el paràmetre val 0, que correspon a un *delay* de 3 ms.

Paràmetre 6 – Integ Integration

_50Hz Per realitzar la mesura del senyal s'integra durant un temps determinat, i s'utilitza aquests temps per reduir el soroll.

En aquest cas el temps d'integració és de 20ms, que redueix el soroll de línia d'alimentació (50Hz AC).

Paràmetre 7 – Mult Multiplicador

1

Paràmetre 8 – Offset

0

Connexió del sensor al *datalogger*

Els colors dels cables i els canals del *dataloggers* estan definits específicament per aquest exemple.

Cable negre: Ex1 ----- voltatge d'excitació

Cable vermell: canal d'entrada número 1 ----- senyal temperatura

Cable lila: $\perp$ ----- terra de senyal

Malla: $\perp$ ----- malla

2.2.3.2 Força electro-motriu (f.e.m) generada per dos metalls diferents

Es basa en l'anomenat efecte Seebeck (descobert pel mateix Seebeck l'any 1821), segons el qual en el punt de contacte entre dos metalls que es troben a diferent temperatura es genera una petita força electro-motriu (f.e.m). Aquesta dependrà de la naturalesa dels materials i de la diferència de temperatures.

2.2.3.2.1 Termoparells

La unió de dos metalls diferents forma el que anomenem un termoparell.

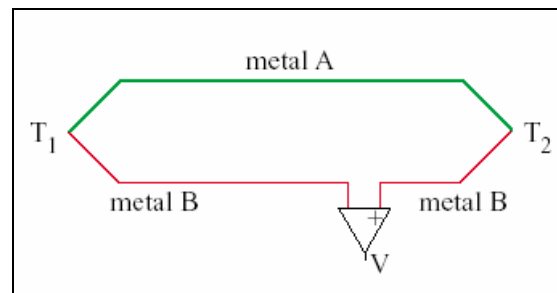


Fig. 2-19. Esquema de mesura amb un termoparell
(Font: Medida de temperaturas. Jaime Planas, 2002)

Quan les dues unions es troben a diferent temperatura apareix un voltatge a través de la unió $V = E(T_1) - E(T_2)$

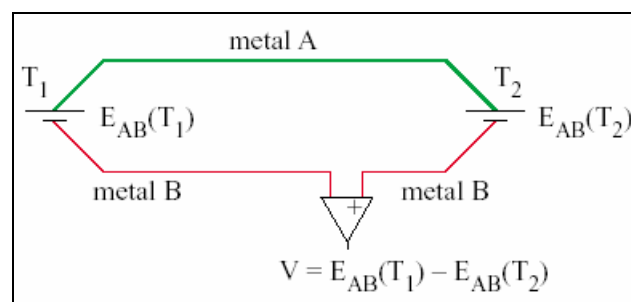


Fig. 2-20. Esquema de forces electromotrius en un termoparell
(Font: Medida de temperaturas. Jaime Planas, 2002)

Mesurant aquesta diferència de voltatge es podrà conèixer la diferència de temperatura entre les dues unions.

Així mateix, si es coneix la temperatura d'una de les unions i es mesura la diferència de voltatge entre les dues unions, es pot calcular la temperatura de l'altra unió.

Per a la realització de circuits de mesura és important tenir en compte la llei dels metalls intermedis, per la qual si s'introdueix un metall C en el termoparell AB no s'altera la f.e.m generada pel termoparell AB mentre no hi hagi diferència de temperatura entre les extremitats de contacte del material C amb el termoparell. És a dir, si les unions AC i BC estan a la mateixa temperatura.

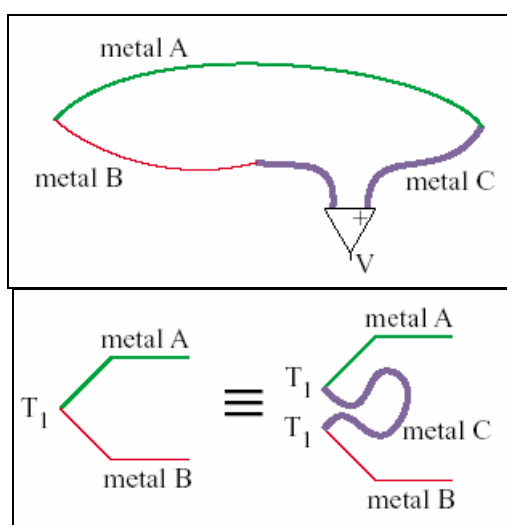


Fig. 2-21. Neutralitat d'un metall inserit en un termoparell
(Font: *Medida de temperaturas. Jaime Planas, 2002*)

El termoparell és, per tant, un sensor inherentment diferencial. Per a la mesura absoluta de temperatures es necessita referenciar una de les dues unions a una temperatura coneguda.

Tipus	Metal A	Metal B
B	Pt-30%Rh	Pt-6%Rh
E	Ni-10%Cr	Constantan (45Ni-55Cu)
J	Fe	Constantan
K	Cromel (Ni-10%Cr)	Alumel (Ni-5%[Al,Si])
N	Ni-14%Cr-1.5%Si	Ni-4.5%Si-0.1%Mn
R	Pt-13%Rh	Pt
S	Pt-10%Rh	Pt
T	Cu	Constantan

Fig. 2-22. Termoparells més comuns i la seva composició
(Font: *Medida de temperaturas. Jaime Planas, 2002*)

Amb aquest propòsit es pot situar una de les unions en un bany de gel (punt de fusió del gel o de solidificació de l'aigua, $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$), col·locar-la en un bloc d'un metall conductor (alumini per exemple) i mesurar la temperatura del metall amb un termistor (o qualsevol altre sensor), o utilitzar una unió de referència electrònica (que consisteix en generar un corrent d'igual magnitud i diferent polaritat en una de les unions per simular que la unió es manté a una temperatura coneguda).

L'equació que relaciona la diferència de temperatura amb el voltatge ve donada per:

$$\Delta V = (a + b \Delta T) \Delta T \quad (18)$$

Suposant que la unió de referència es manté a 0°C (amb un dispositiu electrònic o un bany de gel).

Per un termoparell del tipus T (coure-constantà):

$$a = 38.58\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$$

$$b = 0.0428\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$$

Per la qual cosa s'observa que la diferència de voltatge és proporcional a la diferència de temperatura i que depèn dels coeficients a i b .

Una de les principals desavantatges dels termoparells és el baix valor de la seva sortida, de l'ordre de $40\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, el que obliga a l'ús d'amplificadors (augmentant el guany del senyal de sortida del sensor).

Selecciónant un amplificador de guany G de manera que la sortida sigui 5V per a $+50^{\circ}\text{C}$ i 0V per a 0°C s'obté que $G = 2456$, ja que veient la sortida en voltatge de la taula 1-5 a $+50^{\circ}\text{C}$ ($\Delta V = 2036\text{ }\mu\text{V}$), s'obté $G = 5 / (2036 \cdot 10^{-6}) = 2456$.

Així mateix, si es coneix la temperatura d'una de les unions i es mesura la diferència de voltatge entre les dues unions, es pot calcular la temperatura de l'altra unió.

Per a la realització de circuits de mesura és important tenir en compte la llei dels metalls intermedis, per la qual si s'introdueix un metall C en el termoparell AB no s'altera la f.e.m generada pel termoparell AB mentre no hi hagi diferència de temperatura entre les extremitats de contacte del material C amb el termoparell. És a dir, si les unions AC i BC estan a la mateixa temperatura.

El termoparell és, per tant, un sensor inherentment diferencial. Per a la mesura absoluta de temperatures es necessita referenciar una de les dues unions a una temperatura coneguda.

Amb aquest propòsit es pot situar una de les unions en un bany de gel (punt de fusió del gel o de solidificació de l'aigua, $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$), col·locar-la en un bloc d'un metall conductor (alumini per exemple) i mesurar la temperatura del metall amb un termistor (o qualsevol altre sensor), o utilitzar una unió de referència electrònica (que consisteix en generar un corrent d'igual magnitud i diferent polaritat en una de les unions per simular que la unió es manté a una temperatura coneguda).

L'equació que relaciona la diferència de temperatura amb el voltatge ve donada per:

Suposant que la unió de referència es manté a 0°C (amb un dispositiu electrònic o un bany de gel).

Per un termoparell del tipus T (coure-constantà):

$$a = 38.58\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$$

$$b = 0.0428\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$$

Per la qual cosa s'observa que la diferència de voltatge és proporcional a la diferència de temperatura i que depèn dels coeficients a i b.

Una de les principals desavantatges dels termoparells és el baix valor de la seva sortida, de l'ordre de $40\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, el que obliga a l'ús d'amplificadors (augmentant el guany del senyal de sortida del sensor).

Selecció d'un amplificador de guany G de manera que la sortida sigui 5V per a $+50^{\circ}\text{C}$ i 0V per a 0°C s'obté que $G = 2456$, ja que veient la sortida en voltatge de la taula 1-5 a $+50^{\circ}\text{C}$ ($\Delta V = 2036\text{ }\mu\text{V}$), s'obté

$$G = 5 / (2036 \cdot 10^{-6}) = 2456.$$

$T (^{\circ}\text{C})$	$\Delta V = V_1 - V_2 (\mu\text{V})$	$V_3 (\text{V})$
-50	-1822	-4.475
-40	-1475	-3.622
-30	-1119	-2.748
-20	-755	-1.853
-10	-382	-0.937
0	0	0.000
10	390	0.958
20	789	1.937
30	1196	2.937
40	1612	3.959
50	2036	5.000

Taula. 2-5. Sortida en voltatge del termoparell Tipus T quan la temperatura de la unió de referència és 0 °C.

(Font: *Meteorological Measurement Systems*, 2001)

Amplificadors amb alts guanys produeixen problemes de soroll en la mesura, disminució de la sensibilitat i augment de cost del sensor.

Amb tot, es poden realitzar associacions en sèrie de termoparells (anomenades termopiles), ja que la f.e.m produïda per dos metalls AB i BC és la mateixa que la d'un circuit AC si les temperatures d'unió són les mateixes.

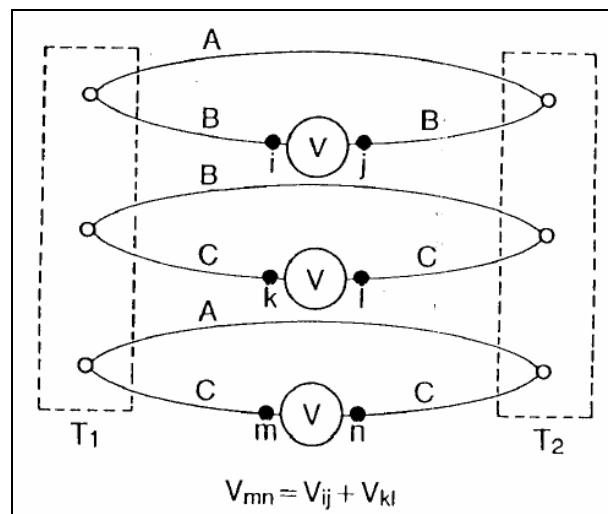


Fig. 2-23. Termopila. Associació sèrie de termoparells

Aquestes associacions sèrie són molt útils per a la construcció de piranòmetres, ja que permeten augmentar el voltatge generat per cada termoparell a valors més adequats per a la seva mesura.

Exemple 2-3.

Mesura d'un termoparell tipus T amb un datalogger Campbell CR1000

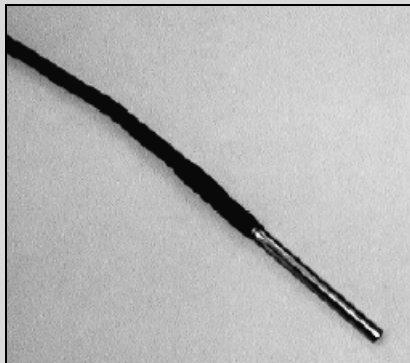


Fig. 2-24. Fotografia del termoparell 105T

(Font: Manual Campbell Scientific)

Thermocouple Type:	Copper-constantan (Type T)
Calibration:	The thermocouple wire is calibrated using a 4-point calibration over the range -70°C to +100°C. A calibration certificate is provided with each probe.
Typical Accuracy:	±0.5°C (Complete sensors can be calibrated to special order)
Time Constant:	Approx. 16 seconds (90%) in water.
Cable Length:	3m as standard (extension cable A3537 available)
Cable Insulation:	6mm diameter heavy plastic sheath, impermeable to water. Bonded polyolefin tubing strain relief.
Sensing Junction:	Soldered thermocouple junction encapsulated in potting compound within stainless steel outer sheath.

Fig. 2-25. Especificacions tècniques del termoparell 105T

(Font: Manual Campbell Scientific)

Per a la realització de la mesura s'utilitzarà com a temperatura de referència el termistor que incorpora el mateix *datalogger* CR1000 sota el panell de connexions.

Es tracta d'un termistor Betatherm 10K3A1A, d'exactitud ± 0.3 °C en el rang -25°C a +50°C.

La temperatura de referència es calcula amb la instrucció **PanelTemp**, i la temperatura del termoparell amb la **TCDiff**, que mesura de forma diferencial el

voltatge del termoparell i calcula la temperatura en °C pel tipus de termoparell seleccionat, T, en aquest cas.

PanelTemp (Dest, Integ)

Parameter & Data Type	Enter	
Dest <i>Variable</i>	The Variable in which to store the results of the instruction.	
Integ <i>Constant</i>	The time spent on integration in microseconds for each of the channels measured.	
	Entry	Integration
	250	250 μS
	_60Hz or 16667	16,667 μS (reject 60 Hz noise)
	_50 Hz or 20000	20,000 μS (reject 50 Hz noise)

Taula 2-6. Paràmetres instrucció PanelTemp
(Font: Manual CR1000, Campbell Scientific)

PanelTemp (T_ref,_50Hz)

Paràmetre 1 – Dest

T_ref Nom de la variable en la qual es guarda el resultat

Paràmetre 2 – Integ

_50Hz Per realitzar la mesura del senyal s'integra durant un temps determinat, i s'utilitza aquests temps per reduir el soroll.
En aquest cas el temps d'integració és de 20ms, que redueix el soroll de línia d'alimentació (50Hz AC).

TCDiff (Dest, Reps, Range, DiffChan, TCType, TRef, RevDiff, SettlingTime, Integ, Mult, Offset)

Parameter & Data Type	Enter			
Dest Variable or Array	The Variable in which to store the results of the instruction. When Reps are used the results are stored in an array with the variable name. An array must be dimensioned to have elements for all the Reps.			
Reps Constant	The number of repetitions for the measurement or instruction.			
Range Constant	Alpha Code	Voltage Range		
	mV5000	± 5000 mV		
	mV2500	± 2500 mV		
	mV250	± 250 mV		
	mV25	± 25 mV		
	mV7_5	± 7.5 mV		
	mV2_5	± 2.5 mV		
	Autorange	mV2_5 – mV5000	Selects range (Sect. 3.1)	
	mV250C	± 250 mV	The mV250C, mV25C, mV7_5C, and mV2_5C ranges pull the channel into common mode range and check for open input	
	mV25C	± 25 mV		
	mV7_5C	± 7.5 mV		
	mV2_5C	± 2.5 mV		
	AutorangeC	mV2_5 – mV250	Selects C range	
DiffChan Constant	The differential channel number on which to make the first measurement. When Reps are used, subsequent measurements will be automatically made on the following channels. If the channel is entered as a negative number, all reps occur on that channel.			
TCType Constant	Alpha Code	Thermocouple Type		
	TypeT	Copper Constantan		
	TypeE	Chromel Constantan		
	TypeK	Chromel Alumel		
	TypeJ	Iron Constantan		
	TypeB	Platinum Rhodium		
	TypeR	Platinum Rhodium		
	TypeS	Platinum Rhodium		
TRef Variable	The name of the variable that is the reference temperature for the thermocouple measurements.			
Parameter & Data Type	Enter			
RevDiff Constant	Code	Value	Result (Reversing requires twice as much time to complete)	
	False	0	Signal is measured with the high side referenced to the low	
	True	≠0	A second measurement is made after reversing the inputs to cancel offsets	
MeasOfs Constant	Code	Value	Result the Ground offset voltage is subtracted from single ended measurements.	
	False	0	Offset voltage is corrected from background calibration	
	True	≠0	Offset voltage is measured each scan	
SettlingTime Constant	The time in microseconds to delay between setting up a measurement (switching to the channel, setting the excitation) and making the measurement. (1 microsecond resolution)			
	Entry	Voltage Range	Integration	Settling Time
	0	All	250 μS	450 μS (default)
	0	All	_50Hz, _60 Hz	3 mS (default)
	≥100	All	All	μS entered
Integ Constant	The time spent on integration in microseconds for each of the channels measured.			
	Entry		Integration	
	250		250 μS	
	_60Hz or 16667		16,667 μS (reject 60 Hz noise)	
	_50 Hz or 20000		20,000 μS (reject 50 Hz noise)	
Mult, Offset Constant, Variable, Array, or Expression	A multiplier and offset by which to scale the raw results of the measurement. See the measurement description for the units of the raw result; a multiplier of one and an offset of 0 are necessary to output in the raw units. For example, the TCDiff instruction measures a thermocouple and outputs temperature in degrees C. A multiplier of 1.8 and an offset of 32 will convert the temperature to degrees F			

Taula 2-7. Paràmetres instrucció TCDiff
(Font: Manual CR1000, Campbell Scientific)

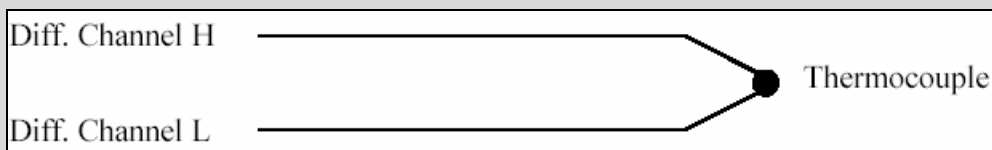


Fig. 2-26. Esquema termoparell
(Font: Manual CR1000, Campbell Scientific)

TCDiff (T,1,mV2_5C,1,TypeT,T_ref,True ,0,_50Hz,1,0)

Paràmetre 1 – Dest

T Nom de la variable en la qual es guarda el resultat

Paràmetre 2 – Reps

1 Un sol sensor

Paràmetre 3 – Range

mV25 Rang d'entrada de ± 25 mV.

Paràmetre 4 – Differential Channel

1 Canal diferencial on connectem el sensor per la mesura

Paràmetre 5 – TCType Tipus de termoparell

TypeT Tipus T

Paràmetre 6 – TRef Temperatura de referència

T_ref Temperatura de referència del termoparell

Paràmetre 7 – RevDiff Inputs reversed

True Es realitza una segona mesura canviant l'ordre dels canals d'entrada. Primer el canal alt contra el baix (1 respecte el 2), després el baix contra l'alt (el 2 respecte l'1)

Paràmetre 8 – Settling Time Temps d'establiment

0 3ms

Paràmetre 9 – Integ Integration

_50Hz Per realitzar la mesura del senyal s'integra durant un temps determinat, i s'utilitza aquests temps per reduir el soroll.
 En aquest cas el temps d'integració és de 20ms, que
 redueix el soroll de línia d'alimentació (50Hz AC).

Paràmetre 10 – Mult Multiplicador

1

Paràmetre 14 – *Offset*

0

Connexió del sensor al *datalogger*

Els colors dels cables i els canals del *dataloggers* estan definits específicament per aquest exemple.

Cable negre: canal d'entrada número 1 (1H)

Cable vermell: canal d'entrada número 2 (1L)

2.2.4 Intensitat de radiació generada per un cos

Es realitza la mesura a partir de la radiació que emet el cos del qual en volem saber la temperatura.

2.2.4.1 Piròmetres de radiació

Estan basats en la llei de Stefan Boltzmann, que diu que la intensitat de l'energia radiant emesa per la superfície d'un cos augmenta proporcionalment a la quarta potència de la temperatura absoluta del cos, és a dir: $W = K * T^4$.

Per tant, tots els cossos amb una temperatura superior al 0 absolut emeten radiació electromagnètica en funció de la seva temperatura.

Per mesurar la temperatura s'utilitza un sistema òptic que recol·lecta part de la radiació provinent d'una mostra de la superfície i la dirigeix al detector. Aquest la converteix en un senyal elèctric que serà convertit a una mesura de temperatura per un circuit electrònic.

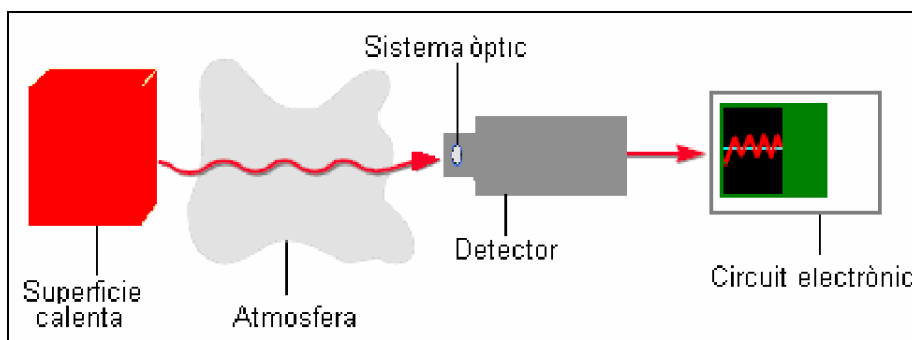


Fig. 2-27. Esquema de mesura temperatura amb un piròmetre de radiació

(Font: MetAs & Metrólogos asociados)

A la pràctica, quasi tots els sensors destinats a aplicacions meteorològiques en estacions meteorològiques automàtiques (EMA) són termoresistències (RTD), termistors o termoparells.

El rang de mesura dels tres és suficient per abastar el rang recomanat per l'OMM (Organització Meteorològica Mundial), que va de -60°C a $+60^{\circ}\text{C}$.

	Termoresistències (RTD)	Termistors	Termoparells
Rang habitual	-260 to 850°C	-80 to 150°C	-270 to 1800°C

Taula 2-8.. Rang mesura RTD, termistors i termoparells

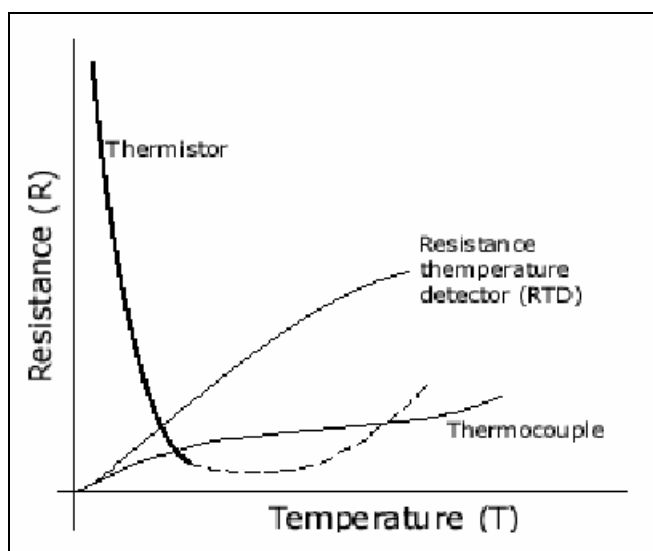


Fig. 2-28. Relació R-T termistor, RTD i termoparell
(Font: *Enfunda, engineering fundamentals*)

Per aquesta raó la tria d'un o altre dependrà força del sensor en concret i les seves característiques, malgrat que el més estès de tots és la termoresistència de platí, que, com s'ha vist anteriorment, és molt estable, lineal i exacte.

En general, però, les avantatges i desavantatges dels tres tipus de sensors es poden veure a la taula 2-9.

Sensor	Avantatges	Desavantatges
Termoresistències (RTD) Platí, Níquel, Coure	Les més estables Les més exactes Les més lineals (relació T-R)	Moderadament cars Es necessita font d'excitació Valors absoluts de resistència baixos Sensibilitat (variació R respecte T) baixa Auto-escalfament
Termistors Silici – Arsènic (NTC)	Força exacte Temps de resposta elevat Alta sensibilitat Rang de sortida elevat En general, connexió a dos fils (R termistor respecte cable molt més elevada)	Es necessita font d'excitació Resposta poc lineal (relació T-R) Fràgil Auto-escalfament
Termoparells Tipus T: Coure-Constantà (Cu-Ni)	No necessita alimentació Robust Moltes configuracions possibles Ampli rang de temperatures Barats	Resposta poc lineal (relació V-T) Poc voltatge Necessitat temperatura referència La menys estable La menys sensible

Taula 2-9. Avantatges i desavantatges termistor, RTD i termoparell

3. Humitat relativa

3.1. Definició

Segons l'Organització Meteorològica Mundial (OMM) es pot definir la humitat relativa (U) com la raó, expressada en percentatge, entre la pressió de vapor observada (e) i la tensió del vapor saturant (e_s) respecte a l'aigua, a la mateixa temperatura i pressió.

$$U = \frac{e}{e_s} \cdot 100$$

(19)

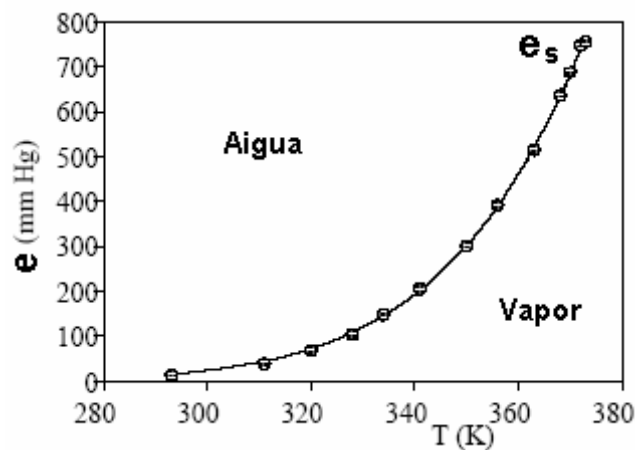


Fig. 3-1. Equilibri aigua-vapor

Per tant, la humitat relativa depèn de la temperatura i de la quantitat de vapor d'aigua.

A la definició s'especifica que és respecte l'aigua, ja que també pot ser respecte al gel (a temperatures inferiors a 0 °C), quan el canvi de fase és de vapor d'aigua a gel o de gel a vapor d'aigua, procés que es coneix com a sublimació. De fet, el vapor d'aigua se satura abans sobre el gel que sobre l'aigua.

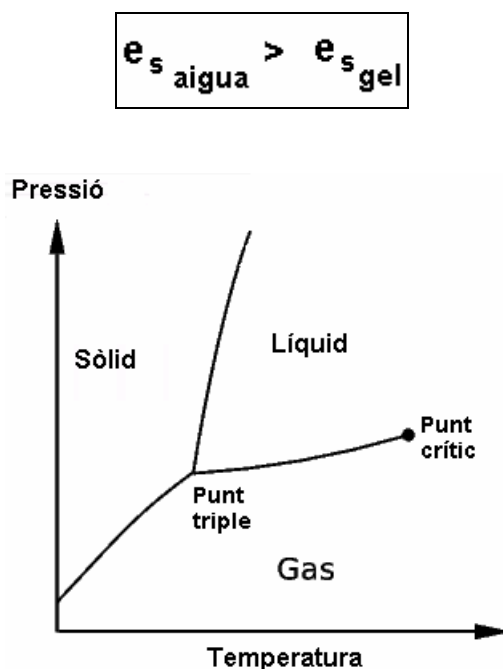


Fig. 3-2. Equilibri de fases: punt triple de l'aigua

Llavors, per què es calcula la humitat reltiva respecte l'aigua i no respecte el gel?

Les diverses raons, segons la *Guia número 8 d'instruments meteorològics i mètodes d'observació de l'OMM del 1996*, són les següents:

- a) La major part d'higròmetres, aquells especialment sensibles a la humitat relativa, indiquen la humitat relativa respecte l'aigua a totes les temperatures;
- b) la major part dels núvols a temperatures inferiors a 0 °C estan formats totalment o quasi totalment per aigua;
- c) en general, no s'observen humitats relatives superiors al 100 per cent. Això és particularment important en els informes sinòptics, doncs l'atmosfera es troba sovint sobresaturada respecte al gel a temperatures inferiors a 0 °C;

- d) la major part d'observacions de la humitat relativa realitzades a temperatures inferiors a 0 °C s'expressen a partir de la saturació respecte a l'aigua.

3.2. Mesura de la humitat relativa

Per a la mesura de la humitat relativa existeixen diversos mètodes basats en principis físics:

3.2.1 Addició de vapor d'aigua

L'aparell més comú i conegut que es basa en aquest principi és el psicròmetre, que a partir del que s'anomena un termòmetre sec i un termòmetre humit mesura la humitat relativa.

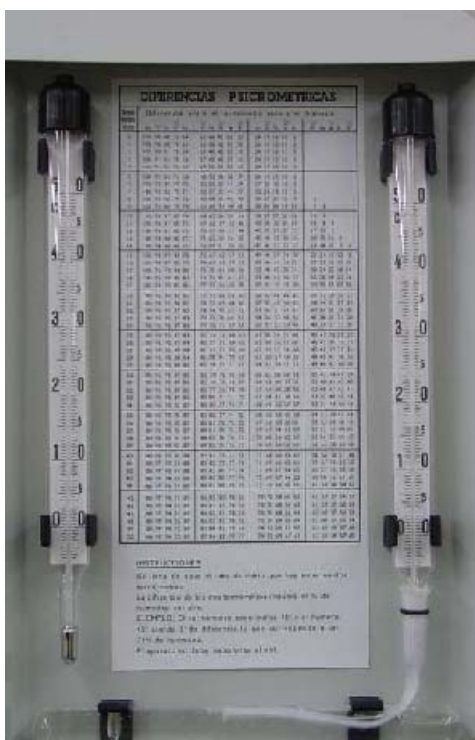


Fig. 3-3. Psicròmetre

Segons la diferència de temperatures dels dos termòmetres (el que mesura la temperatura de l'aire i el que mesura la temperatura de l'aigua segons

l'evaporació d'aquesta) es coneix la humitat relativa a partir d'unes taules que relacionen les dues mesures (vegeu fig.2-3).

3.2.2 Substracció de vapor d'aigua

Es realitza la mesura a partir del càlcul de la massa del vapor d'aigua extreta. Amb aquesta finalitat s'utilitzen, per exemple, dessecants per absorbir el vapor d'aigua.

3.2.3 Sorció en equilibri del vapor d'aigua

Es realitza la mesura a partir de l'adsorció i/o l'absorció del vapor d'aigua. De vegades, també, per reacció química.

D'aquesta manera es provoca l'expansió o contracció d'una substància, o es modifica la resistència elèctrica o la capacítància.

La major part de sensors per a xarxes d'Estacions Meteorològiques Automàtiques (EMA) existents al mercat es basen en aquest principi i utilitzen higròmetres elèctrics de resistència i/o capacítància.

3.2.3.1 Sensors de resistència elèctrica

La mesura de la humitat relativa es realitza a partir del canvi en la impedància - oposició que ofereix un circuit al pas del corrent elèctric altern - d'un medi higroscòpic, com pugui ser un polímer conductor.

Habitualment s'utilitzen sensors de plàstic tractats químicament, amb una capa superficial conductora d'electricitat sobre el substrat aïllant. Aquests sensors inclouen diversos tipus d'instruments electrolítics. L'electròlit pot presentar-se de diverses formes, per exemple com una solució líquida, o gel, i inclús una resina que intercanvia ions. Si s'utilitza corrent altern justament és per evitar la polarització de l'electròlit, és a

dir, la disminució del potencial d'un elèctrode en adherir-se a la seva superfície ions del mateix signe que el seu.

Com que la part sensible del sensor es limita a la capa superficial, el procés d'adsorció predomina per sobre del d'absorció. Per tant, aquest tipus de sensor és capaç de respondre ràpidament a les variacions d'humitat ambiental. Típicament, presenten una resposta d'entre 10 i 30 segons per assolir un 63% del valor final.

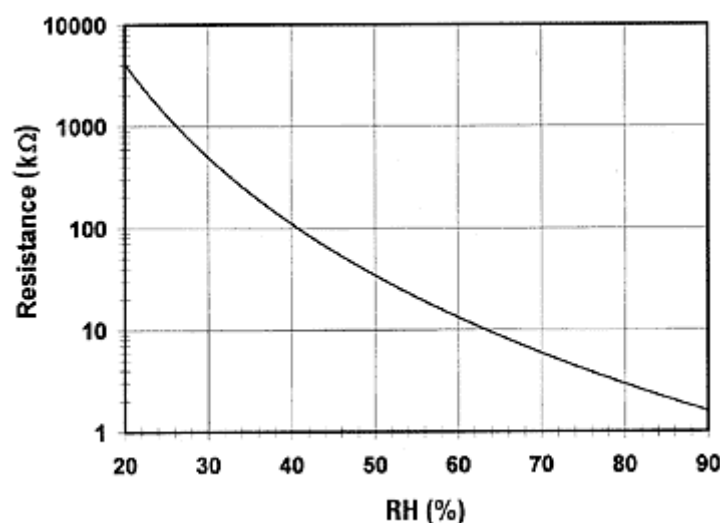


Fig. 3-4. Relació R-U en un polímer conductor

El rang d'impedància típic dels elements resistius varia entre 1KΩ i 100 MΩ per unes freqüències nominals d'excitació d'entre 30 Hz i 10 kHz. Això vol dir que els sensors resistius no són purament resistius, ja que els efectes capacitius (10 – 100 MΩ) fan de de la resposta una mesura d'impedància. Per exemple, el sensor UPS-600 de la casa *Ohmic Instruments Co.* mesura la humitat relativa entre el 10% i el 90%.



Fig. 3-5. Sensor d'humitat relativa resistiu UPS-600
(Font: *Ohmic Instruments Co.*)

Aquest sensor utilitza unes freqüències nominals d'excitació que van dels 33 als 1000 Hz i, a partir de la següent relació entre la impedància i la temperatura obté la humitat relativa.

$$\%RH = A(CZ)^{\frac{T+459.7}{D(T+459.7)+B}} \quad (20)$$

Z = the impedance of the UPS-600 sensor in MΩ.
A, B, C, D = constants for specific impedance ranges (see table below).
T = dry bulb temperature in °F.

Z in MΩ	A	B	C	D
0.4 < Z	5.587129	-5315.366	192689.2	5.895
0.005 < Z ≤ 0.4	2.269574	-7781.989	74643.52	9.2477
Z ≤ 0.005	6.385429	-4788.52	189596900	2.5813

The equation is valid over the temperature range of 41 to 113°F (5 to 45°C). Agreement to the empirical data is about 2% from 25 to 90% RH and 3% from 10 to 25% RH.

Taula 3-1. Impedàncies (Z) i constants d'un sensor d'humitat relativa resistiu

(Font: Ohmic Instruments Co.)

3.2.3.2 Sensors de capacitància elèctrica

Es basen en les variacions de les propietats dielèctriques d'un material sòlid, higroscòpic, en funció de la humitat relativa.

En general s'utilitzen polímers que varien les seves propietats dielèctriques en funció de l'aigua absorbida (augmenten la capacitància en augmentar la humitat relativa).

La part sensible del sensor consisteix en una fina fulla polímera disposada entre dos elèctrodes formant un condensador. La impedància elèctrica d'aquest proporciona una mesura de la humitat relativa.



Fig. 3-6 Sensor d'humitat relativa capacitiu HUMICAP® Vaisala
(Font: Vaisala)

El valor nominal de la capacitància pot ser de pocs a centenars de picofarats (pF), segons la mida dels elèctrodes i el gruix del material dielèctric. A la vegada, aquest valor influeix en la freqüència d'excitació utilitzada per mesurar la impedància de l'instrument, que normalment és de, com a mínim, uns quants KHz i, per tant, requereix que es realitzin connexions curtes entre el sensor i l'interfície elèctrica per reduir la capacitància paràsita. Per aquest motiu, l'interfície elèctrica està normalment integrada en el sensor, i és necessari considerar la temperatura ambient en el rendiment dels components del circuit.

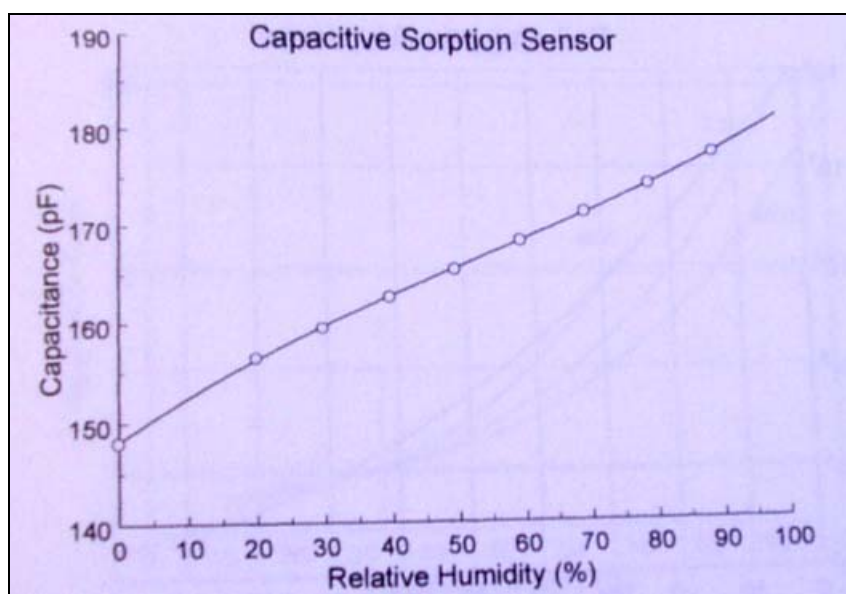


Fig. 3-7. Gràfica capacitància-humitat relativa
(Font: Meteorological Measurement Systems, 2001)

Per a un intercanvi òptim entre la capa polímera i l'aire que l'envolta, l'elèctrode metàl·lic és una capa porosa d'uns 0.1 – 1 µm de gruix. D'aquesta manera el vapor d'aigua pot sortir i entrar ràpidament del sensor i, si és el cas, assecar-se amb força rapidesa.

$$C(U) = \varepsilon U * \varepsilon_o * A / d \quad (21)$$

On:

C= Capacitància del condensador

εU = Permitivitat dielèctrica en funció de la humitat relativa U

ε_o = Permitivitat en el buit

A = àrea de les plaques

d = distància entre els elèctrodes

La pols, la condensació de l'aigua sobre el sensor, els contaminants atmosfèrics, la conversió electrònica de capacitància a freqüència i, després, a voltatge, afecten l'exactitud d'aquest tipus de sensors.

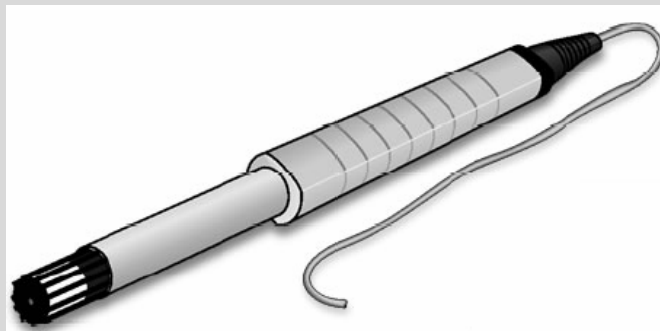
Tot plegat fa que les exactituds típiques dels sensors operatius en xarxes meteorològiques estiguin al voltant del 2%-3%, i que puguin aparèixer, per exemple, valors superiors al 100% (sobresaturació) no reals.

És important, per tant, que quan es mulli l'element sensor l'aigua s'evapori el més ràpid possible (hi hagi un bon intercanvi amb el medi) i recuperi les característiques prèvies (segueixi calibrat).

Exemple 3-1.

Mesura d'un sensor d'humitat relativa capacitiu amb un datalogger Campbell CR1000

En aquest cas s'ha triat el sensor de temperatura i humitat relativa de Vaisala HMP45.



Sensor: HUMICAP® 180

Relative Humidity Measurement Range: 0 to 100% non-condensing

RH Output Signal Range: 0.008 to 1 VDC

Accuracy at 20°C

±2% RH (0 to 90% Relative Humidity)

±3% RH (90 to 100% Relative Humidity)

Temperature Dependence of Relative Humidity Measurement: ±0.05% RH/°C

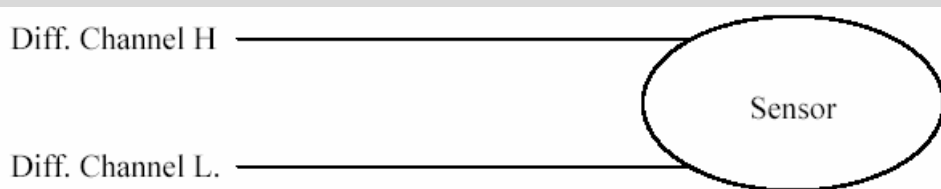
Typical Long Term Stability: Better than 1% RH per year

Response Time (at 20°C, 90% response): 15 seconds with membrane filter

Fig. 3-8 Característiques sensor T_U Vaisala HMP45

(Font: Campbell Scientific)

La sortida del sensor és en voltatge (0 – 1 V), per la qual cosa es fa la lectura amb la instrucció **VoltDiff**.



VoltDiff (Dest, Reps, Range, DiffChan, RevDiff, SettlingTime, Integ, Mult, Offset)

Parameter & Data Type	Enter			
Dest Variable or Array	The Variable in which to store the results of the instruction. When Reps are used the results are stored in an array with the variable name. An array must be dimensioned to have elements for all the Reps.			
Reps Constant	The number of repetitions for the measurement or instruction.			
Range Constant	Alpha Code	Voltage Range		
	mV5000	± 5000 mV		
	mV2500	± 2500 mV		
	mV250	± 250 mV		
	mV25	± 25 mV		
	mV7_5	± 7.5 mV		
	mV2_5	± 2.5 mV		
	Autorange	mV2_5 – mV5000	Selects range (Sect. 3.1)	
	mV250C	± 250 mV	The mV250C, mV25C, mV7_5C, and mV2_5C ranges pull the channel into common mode range and check for open input	
	mV25C	± 25 mV		
	mV7_5C	± 7.5 mV		
	mV2_5C	± 2.5 mV		
AutorangeC	mV2_5 – mV250	Selects C range		
DiffChan Constant	The differential channel number on which to make the first measurement. When Reps are used, subsequent measurements will be automatically made on the following channels. If the channel is entered as a negative number, all reps occur on that channel.			
RevDiff Constant	Code	Value	Result (Reversing requires twice as much time to complete)	
	False True	0 ≠0	Signal is measured with the high side referenced to the low A second measurement is made after reversing the inputs to cancel offsets	
SettlingTime Constant	The time in microseconds to delay between setting up a measurement (switching to the channel, setting the excitation) and making the measurement. (1 microsecond resolution)			
	Entry	Voltage Range	Integration	Settling Time
	0	All	250 μS	450 μS (default)
	0	All	_50Hz, _60 Hz	3 mS (default)
	≥100	All	All	μS entered
Integ Constant	The time spent on integration in microseconds for each of the channels measured.			
	Entry		Integration	
	250		250 μS	
	_60Hz or 16667		16,667 μS (reject 60 Hz noise)	
	_50 Hz or 20000		20,000 μS (reject 50 Hz noise)	
Mult, Offset Constant, Variable, Array, or Expression	A multiplier and offset by which to scale the raw results of the measurement. See the measurement description for the units of the raw result; a multiplier of one and an offset of 0 are necessary to output in the raw units. For example, the TCDiff instruction measures a thermocouple and outputs temperature in degrees C. A multiplier of 1.8 and an offset of 32 will convert the temperature to degrees F.			

Taula 3-2. Paràmetres instrucció VoltDiff
(Font: Manual CR1000, Campbell Scientific)

VoltDiff (HR,1,mV2500,1,True ,0,_50Hz,0.1,0)

Paràmetre 1 – Dest

HR Nom de la variable en la qual es guarda el resultat

Paràmetre 2 – Reps

1 Un sol sensor

Paràmetre 3 – Range

mV2500 Rang d'entrada.

$\pm 2.5V$ és suficient per la lectura d'un sensor amb una sortida que va de 0 a 1V.

Paràmetre 4 – Differential Channel

1 Canal diferencial on es connecta el sensor per la mesura

Paràmetre 5 – RevDiff Inputs reversed

True Es realitza una segona mesura canviant l'ordre dels canals d'entrada. Primer el canal alt contra el baix (1 respecte el 2), després el baix contra l'alt (el 2 respecte l'1)

Paràmetre 6 – Settling Time

0 Temps d'establiment. És el temps necessari per començar a realitzar la mesura

En aquest cas el paràmetre val 0, que correspon a un *delay* de 3 ms, que en invertir les entrades s'haurà de multiplicar per dos. Per tant, 6 ms.

Paràmetre 7 – Integ Integration

_50Hz Per realitzar la mesura del senyal s'integra durant un temps determinat, i s'utilitza aquests temps per reduir el soroll.

En aquest cas el temps d'integració és de 20ms, que redueix el soroll de línia d'alimentació (50Hz AC).

Paràmetre 8 – Mult Multiplicador

0.1 Per convertir la sortida de voltatge en humitat relativa el fabricant especifica un multiplicador de 0.1.

Paràmetre 9 – Offset

0

Per evitar que es tinguin en compte lectures superiors al 100% no reals s'aplica un filtre en la lectura per valors superiors al 100% i inferiors a 108% (rang en el qual el fabricant dóna com a valors possibles).

If HR>100 and HR<108 then HR=100

Connexió del sensor al *datalogger*

Els colors dels cables i els canals del *datalogger* estan definits específicament per aquest exemple.

Cable vermell: alimentació 12V

Cable blanc: canal d'entrada número 1 (1H) ----- senyal temperatura

Cable negre: $\perp$ ----- power GND

Cable blau: $\perp$ (terra anàlogic, analog ground) ----- referència senyal

Cable verd: canal d'entrada número 2 (1L) ---- senyal d'humitat relativa

Malla: $\perp$ ----- malla

3.2.3.3 Higròmetres mecànics

Es basen en la variació dimensional de materials diversos: cabell humà, seda, cotó, paper, etcètera.

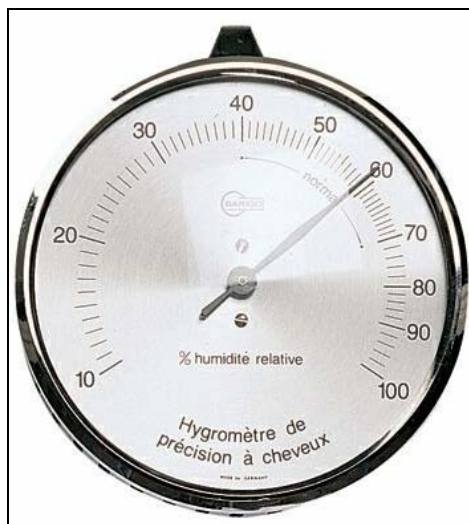


Fig. 3-9. Higròmetre mecànic de cabell sintètic



Fig. 3-10. Higròmetre mecànic de cabell (higròmetre del frare)

3.2.4 Mesura de les propietats físiques de l'aire humit

Es basa en les propietats físiques de l'aire: conductivitat tèrmica, densitat, viscositat, índex de reflexió, velocitat del so.

4. Precipitació

4.1. Definició

Segons l'Organització Meteorològica Mundial (OMM) es pot definir la precipitació com *els productes de la condensació del vapor d'aigua, sòlids o líquids, que cauen dels núvols o de l'aire i es dipositen al terra.*

Això inclou la pluja, la pedra, la calamarsa, la neu, la rosada, el gebre, la gelada envidriada i la precipitació de la boirina.

4.2. Mesura de la precipitació

Per a la mesura de la precipitació existeixen diverses i variades tecnologies i aparells.

En general, però, en les Estacions Meteorològiques Automàtiques (EMA) la major part d'instruments per a la seva mesura són pluviòmetres de pesada o de balanci. Els primers poden mesurar tota mena de precipitació, mentre que els segons només són aptes per a la mesura de la pluja, malgrat puguin incorporar un sistema de calefacció per desfer la precipitació sòlida.

Cada vegada més, també, es van utilitzant sensors òptics (*disdrometers*: captador de gotes) i petits radars per a la mesura de tot tipus de precipitació i la seva identificació.

Un dels principals errors en la mesura de la precipitació és degut a la deformació del camp de vent per sobre de la boca del pluviòmetre. Segons l'Organització Meteorològica Mundial (OMM), normalment l'error se situa del 2 al 10% per la pluja, i del 10 al 50% per la neu. Segons el disseny del pluviòmetre es pot observar una major o menor deformació del camp de vent.

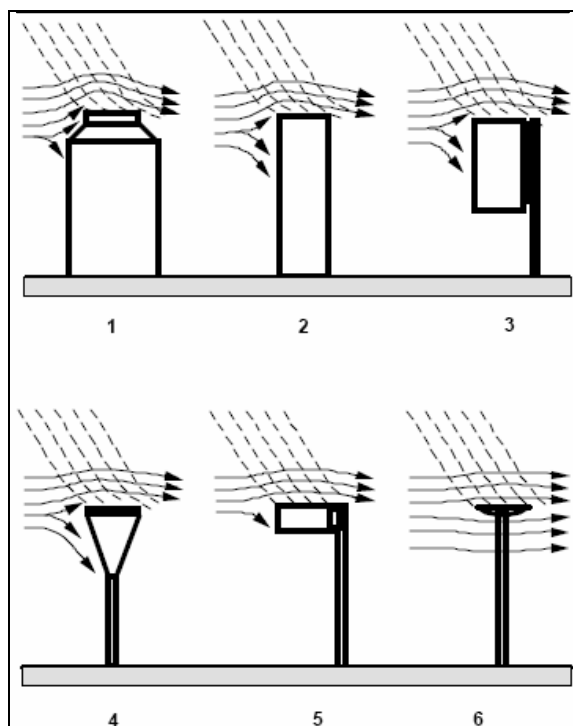


Fig. 4-1. Deformació del camp de vent segons diverses formes de pluviòmetres

(Font: Guia n° 8 de l'OMM)

De la figura 4-1, el primer pluviòmetre és el que presenta una major deformació del camp de vent i, conseqüentment, un major error per aquesta causa; mentre que l'últim és el que menys deformació i error presenta.

Per aquest motiu hi ha sensors (sobretot per a la mesura de la neu, en la qual, com s'ha vist, la influència del vent és més elevada) que incorporen paravents.



Fig 4-2. Paravents en un pluviòmetre de pesada

(Font: Geonor)

Per minimitzar l'efecte del vent sobre els pluviòmetres l'OMM recomana situar-los a nivell del terra per captar la precipitació líquida (per la sòlida ha de situar-se de manera que la boca quedi per sobre del nivell màxim esperat de la capa de neu).



Fig 4-3. Fotografia d'un pluviòmetre de balanci amb la boca situada a nivell de terra

(Font: UKEnvironmental Change Network (ECN) AWS protocol)

El reixat de la figura 4-3 serveix per evitar les turbulències al voltant de la boca del pluviòmetre i la possible entrada de precipitació causada pel rebot de les partícules sobre el terra.

4.2.1 Pluviòmetres de pesada

Aquest tipus de pluviòmetres s'engloben en el que s'anomenen pluviòmetres totalitzadors, que s'utilitzen per mesurar la precipitació total durant un període de temps en una estació meteorològica. En aquest cas, però, només es fa referència a aquells pluviòmetres que es basen en el pesatge de la precipitació.

Amb aquest propòsit habitualment s'utilitzen galgues extensiomètriques (*load cells*, canvien la seva resistència en funció de l'esforç, en aquest cas, el provocat pel pes de la precipitació) o cordes vibrants (*vibrating wires*, canvien la freqüència de vibració).

La precipitació (sòlida o líquida) es va acumulant dins del pluviòmetre fins que s'omple el recipient. Llavors és necessari fer una visita a l'estació meteorològica per buidar-ne el contingut. És convenient posar en el dipòsit una barreja anticongelant que converteixi tota la precipitació a estat

líquid (per exemple, una barreja d'etilè-glicol i metanol), i n'impedeixi la congelació, així com algun oli que en redueixi l'evaporació.

Max. temperature before freezing, °C	Ethylene- glycol, liter	Methanol, liter	Precipitation capacity, mm	Collected volume capacity, l
0°C	0.0	0.0	600	12.0
-5°C	0.6	0.9	525	10.5
-10°C	1.0	1.6	470	9.4
-15°C	1.5	2.1	420	8.4
-20°C	1.7	2.5	390	7.8
-25°C	2.0	3.0	350	7.0
-30°C	2.3	3.3	320	6.4
-35°C	2.4	3.6	300	6.0

Taula 4-1. Mescla d'anticongelant en funció de la temperatura
(Font: Geonor)

L'avantatge clara d'aquest tipus de pluviòmetre és la seva capacitat per mesurar tot tipus de precipitació. Per contra, l'addició d'aquests productes impedeix el buidatge automàtic del pluviòmetre, ja que caurien sobre el sòl i el contaminarien.

Una altra avantatge respecte els pluviòmetres de balancí (vegeu punt 4.2.2) és que la mesura de la precipitació no depèn de la intensitat d'aquesta, com sí succeeix en els primers, que a major intensitat major és l'error de mesura.

Exemple 4-1.
Mesura d'un pluviòmetre de pesada amb un datalogger
Campbell CR1000

En aquest cas s'ha triat el pluviòmetre Geonor T-200B.



Fig. 4-4. Fotografia pluviòmetre Geonor T-200B ja instal·lat
 (Font: Servei Meteorològic de Catalunya (SMC))

T-200B	600mm capacity, 1 sensor, (original)
T-200B3	600mm capacity, 3 sensors
T-200BM	1000mm capacity, 1 sensor
T-200BM3	1000mm capacity, 3 sensors

Taula 4-2. Diferents models de pluviòmetre Geonor T-200B
 (Font: Geonor)

Per tant, amb un sensor i 600 mm de capacitat.

L'àrea col·lectora és de 200 cm², i incorpora protectors per minimitzar l'efecte del vent.

TECHNICAL SPECIFICATIONS			
Capacity:	0 - 600 mm (including antifreeze liquid)	Temperature range:	Sensor -25°C to 60°C (standard, can be shifted upon request)
Collecting area:	200 cm ²	Temperature drift:	0.001% FS/°C
Sensitivity:	0.1 mm	Materials:	Aluminum alloy
Accuracy:	0.1% FS	Size:	Ø = 390 mm, H = 760 mm
Repeatability:	0.1 mm	Mounting:	Universal 3-point with leveling system incorporated in base

ORDER REFERENCES			
Part No.	Equipment	Part No.	Equipment Interfacing
470000	Precipitation gauge	455000	Hybrid circuit (frequency output)
470200	Wind shield	470050	Hybrid circuit board, stand-alone interface box (square-shaped output signal)
470400	Pedestal, galvanized steel	586000	Interface card with RS232 and analogue output
	Accessory		
470410	Connection flange for pedestal		

Fig. 4-5. Especificacions tècniques pluviòmetre Geonor T-200B
(Font: Geonor)



Fig. 4-6. Galleda col·lectora i sensor Geonor T-200B
(Font: Geonor)

El sensor es basa en el canvi en la vibració d'una corda o fil tensat en funció del pes de la precipitació.

Perquè aquesta corda o fil ressoni, vibri, és necessari que el fil tingui propietats magnètiques (per exemple, l'acer) i excitar-lo amb un electroimant.

Per altra banda, és necessari un altre electroimant que realitzi la lectura d'aquesta vibració.

Quan el cable oscil·la, s'indueix un corrent altern en aquest segon electroimant que posseeix la mateixa freqüència que la freqüència natural de vibració del fil.

La freqüència augmenta en augmentar la tensió del fil, fenomen que es pot comprovar escoltant el soroll que genera el sensor, més agut quan més pes hi ha a la galleda.

La llargada del fil és de 50 mm, i el seu diàmetre de 0.3 mm. La tensió màxima que pot aguantar el cable és de 50N.

L'avantatge principal és que malgrat l'ús d'equipament electrònic per realitzar la mesura, el principi de funcionament és estrictament mecànic (la vibració d'una corda, com en un instrument), per la qual cosa els problemes d'inestabilitat, humitat relativa, resistència del cable, canvis en la capacitància, etc. són insignificants.

La dependència de la llargada del fil amb la temperatura es pot expressar com:

$$L = L_a (1 + c (T - T_a))$$

On:

L és la llargada del fil

L_a és la llargada del fil a temperatura ambiental

T és la temperatura del fil

T_a és la temperatura ambient

c és el coeficient lineal d'expansió

Aquesta dependència, però, és molt petita segons el fabricant, de només un 0.001% del fons d'escala per cada °C. Malgrat tot, Geonor recomana instal·lar el sensor cara el nord, per evitar, en la mesura del possible, canvis en la temperatura deguts a la incidència de la radiació solar.

A la figura 3-7 es pot observar la deriva del sensor en mm segons la temperatura ambient, que en total suposa un 0.12 % de la lectura.

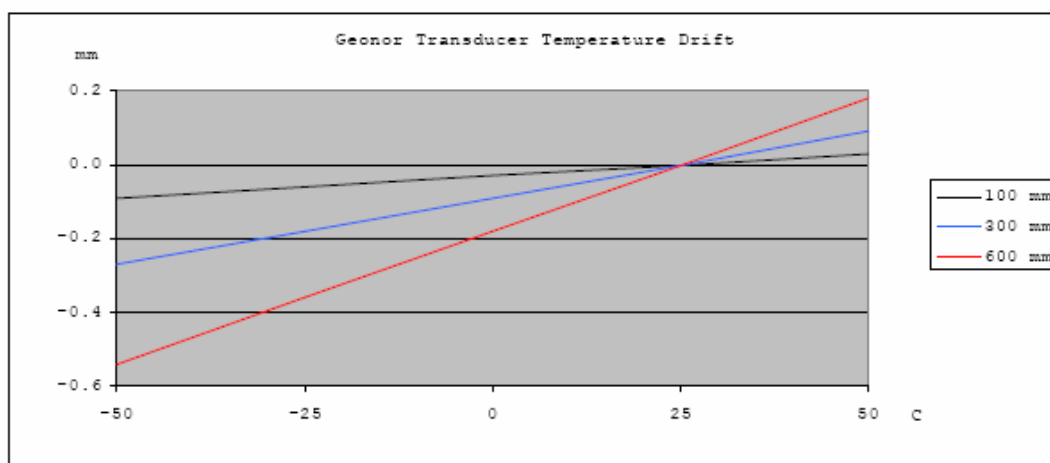


Fig. 4-7. Corba de deriva del pluviòmetre Geonor T-200B en funció de la temperatura i la quantitat de precipitació acumulada
(Font: Campbell Scientific)

És molt important que el sensor estigui instal·lat en un lloc ben estable per evitar vibracions o moviments que puguin distorsionar l'anivellament del sensor. A més a més, pels petits canvis en la llargada del fil deguts als canvis de temperatura i per la importància de garantir l'estabilitat i verticalitat del sensor hi ha l'opció de muntar 3 sensors en comptes d'un. D'aquesta manera, els diversos problemes originats per aquests queden compensats i, a la vegada, es té la certesa de no quedar-se sense dades si algun dels sensors falla.

Per a la lectura de les dades existeixen diverses possibilitats de sortida del sensor: RS232C, 0-10V, 4-20 mA, o interfícies específiques per a diferents unitats d'adquisició.

En aquesta cas s'utilitza l'adaptador de senyal 455055 dissenyat per a *dataloggers* Campbell.

Per convertir la freqüència en valors de precipitació el fabricant proporciona la següent fórmula.

$$P = A(f - f_0) + B(f - f_0)^2$$

On:

P = precipitació (en cm)

A = constant del sensor

B = constant del sensor

f_0 = freqüència del sensor amb la galleda buida (freqüència zero)

f = freqüència del sensor

A, B i f_0 vénen determinats en el certificat de calibratge que el fabricant lliura amb el sensor.

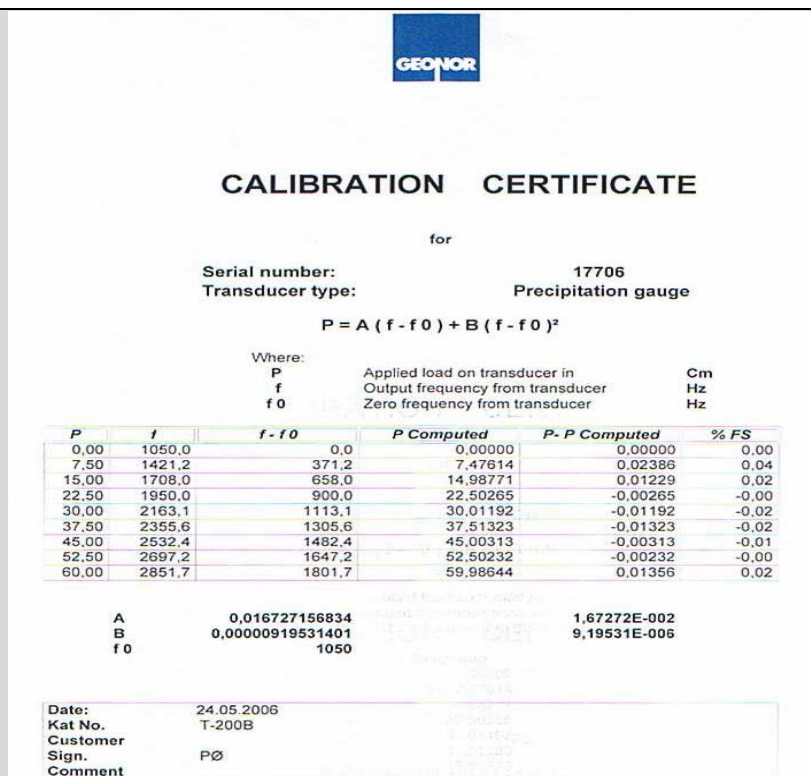


Fig. 4-8. Certificat calibratge pluviòmetre Geonor T-200B
(Font: Geonor)

El valor de f_0 es pot conèixer llegint la freqüència de sortida amb la galleda buida, per la qual cosa abans d'instal·lar el sensor s'ha de comparar amb el valor que es té del certificat de calibratge. Per fer-ho es recomana prendre valors durant uns 10 segons i fer-ne la mitjana. Si la diferència entre ambdós és menor de 10 Hz no és necessari realitzar cap canvi, però si aquesta diferència és superior s'ha de calcular de nou el valor de la constant A de la següent manera.

$$A' = A + 2B(f'_0 - f_0)$$

On:

A' = nou valor de la constant A

f'_0 = nou valor de la freqüència zero

Geonor recomana comprovar el bon funcionament del sensor amb els nous valors abocant a la galleda 1 l exacte d'aigua. Aquest litre representa 50 mm de precipitació. Si la lectura del sensor té una desviació major al 0.5 % respecte als 50 mm el fabricant insta a re calibrar-lo de nou a les seves pròpies instal·lacions.

Per realitzar la lectura de la freqüència de sortida del sensor s'utilitza la instrucció **PeriodAvg**, malgrat que també ho podríem fer amb la instrucció **PulseCount**, configurada per la lectura de freqüència.

La instrucció **PeriodAvg** mesura un període de temps per a un determinat número de cicles d'una freqüència d'entrada (la del sensor). Llavors, divideix el període de temps mesurat pel número de cicles que s'hagi determinat i obté la mitjana del període per a un cicle en concret. El període obtingut s'expressa, finalment, en Hz (f).

PeriodAvg (Dest, Reps, Range, SEChan, Threshold, PAOption, Cycles, Timeout, Mult, Offset)

Parameter & Data Type	Enter																														
Dest <i>Variable or Array</i>	The Variable in which to store the results of the instruction. When Reps are used the results are stored in an array with the variable name. An array must be dimensioned to have elements for all the Reps.																														
Reps <i>Constant</i>	The number of repetitions for the instruction on adjacent channels.																														
Range <i>Constant</i>	The voltage range for the measurement, which determines the gain applied to the signal prior to a zero-crossing detector. Maximum frequency decreases with increasing gain.<table><tr><th>Range Code</th><th>Gain</th><th colspan="2">Signal (pk-pk)¹</th><th>Minimum Pulse Width</th><th>Maximum Frequency²</th></tr><tr><td>mV250</td><td>1</td><td>500 mV</td><td>10.0 V</td><td>2.5 μs</td><td>200 kHz</td></tr><tr><td>mV25</td><td>10</td><td>10 mV</td><td>2.0 V</td><td>10 μs</td><td>50 kHz</td></tr><tr><td>mV7_5</td><td>33</td><td>5 mV</td><td>2.0 V</td><td>62 μs</td><td>8 kHz</td></tr><tr><td>mV2_5</td><td>100</td><td>2 mV</td><td>2.0 V</td><td>100 μs</td><td>5 kHz</td></tr></table> ¹ Signals must cross threshold to trigger the voltage comparator. ² Maximum frequency equals 1/(Twice Minimum Pulse Width) for 50% duty cycle signals.	Range Code	Gain	Signal (pk-pk) ¹		Minimum Pulse Width	Maximum Frequency ²	mV250	1	500 mV	10.0 V	2.5 μs	200 kHz	mV25	10	10 mV	2.0 V	10 μs	50 kHz	mV7_5	33	5 mV	2.0 V	62 μs	8 kHz	mV2_5	100	2 mV	2.0 V	100 μs	5 kHz
Range Code	Gain	Signal (pk-pk) ¹		Minimum Pulse Width	Maximum Frequency ²																										
mV250	1	500 mV	10.0 V	2.5 μs	200 kHz																										
mV25	10	10 mV	2.0 V	10 μs	50 kHz																										
mV7_5	33	5 mV	2.0 V	62 μs	8 kHz																										
mV2_5	100	2 mV	2.0 V	100 μs	5 kHz																										
SEChan <i>Constant</i>	The single-ended channel number on which to make the first measurement. If the channel is entered as a negative number, all reps occur on that channel.																														
Threshold <i>Constant</i>	The voltage in millivolts that the input must cross for a count to occur. For a signal centred around CR1000 ground (Figure 7.7-1) the threshold should be 0. If the input signal is a 0 to 5 V CMOS signal then a threshold of 2500 mV would result in the voltage comparator switching at 2.5 V.																														
PAoption	Specifies whether to output the period in μs or the frequency in Hz.<table><tr><th>Numeric Code</th><th>Voltage Range</th></tr><tr><td>0</td><td>Period of the signal is returned</td></tr><tr><td>1</td><td>Frequency of the signal is returned</td></tr></table>	Numeric Code	Voltage Range	0	Period of the signal is returned	1	Frequency of the signal is returned																								
Numeric Code	Voltage Range																														
0	Period of the signal is returned																														
1	Frequency of the signal is returned																														
Cycles <i>Constant</i>	The number of cycles to be measured for the average calculation.																														
Timeout <i>Constant</i>	The maximum time duration (in msec) that the logger will wait for the number of Cycles to be measured for the average calculation.																														
Mult, Offset <i>Constant, Variable, Array, or Expression</i>	A multiplier and offset by which to scale the raw results of the measurement.																														

Taula 4-3. Paràmetres instrucció PeriodAvg
(Font: Manual CR1000, Campbell Scientific)

PeriodAvg (f,1,mV250,1,0,1,500,500,1000,0)

Paràmetre 1 – Dest

f Nom de la variable en la qual es guarda el resultat

Paràmetre 2 – Reps

1 Un sol sensor

Paràmetre 3 – Range

mV250 Rang d'entrada.

De 500 mV a 10 V pic a pic.

200 KHz de freqüència màxima

Paràmetre 4 – SEChan Single Ended Channel

1 Canal on es connecta el sensor per la mesura (1H)

Paràmetre 5 – Threshold Llindar

0 Permet fixar un llindar diferent dels 0 V, per senyals que no estiguin centrades en el 0, a partir del qual es computin les transicions. En aquest cas els 0 V ja convenen.

Paràmetre 6 – PAoption

1 Permet triar la sortida en freqüència (Hz) o en període.

En aquest cas 1, en freqüència.

Paràmetre 7 – Cycles

500 El número de cicles en el qual es calcula el període de temps.

En aquest cas, s'han triat 500 cicles.

Paràmetre 8 – Timeout Multiplicador

500 Temps màxim necessari, en mili-segons, que el datalogger espera per mesurar el període en el número de cicles determinat (500).

En aquest cas, 500 ms (0.5 segons).

Paràmetre 8 – Mult Multiplicador

1000 Per convertir la sortida de KHz a Hz es multiplica per 1000.

Paràmetre 9 – Offset

0

Obtinguda la freqüència del sensor, f , s'ha d'aplicar la fórmula que proporciona el fabricant per obtenir la precipitació en cm.

Es defineixen les tres constants de calibratge:

CONST Constant_A = $1.67272 \cdot 10^{-2}$

CONST Constant_B = $9.19531 \cdot 10^{-6}$

CONST Freq_zero = 1050

I s'aplica l'expressió del càlcul de precipitació:

$$\text{Precipitació} = \text{Constant_A} * (f - \text{Freq_zero}) + \text{Constant_B} * (f - \text{Freq_zero})^2$$

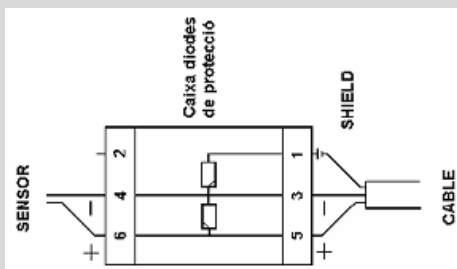
Connexió del sensor al *datalogger*

El connexió del sensor està constituït per tres parts:

a) El sensor



b) La caixa de díodes de protecció (*Juntcion Box*)



c) L'adaptador de senyal 455055



En el següent esquema es pot comprovar la ubicació dels díodes (*Junction Box*) i del sensor.

L'adaptador de senyal s'instal·la a la mateixa caixa del *datalogger*.

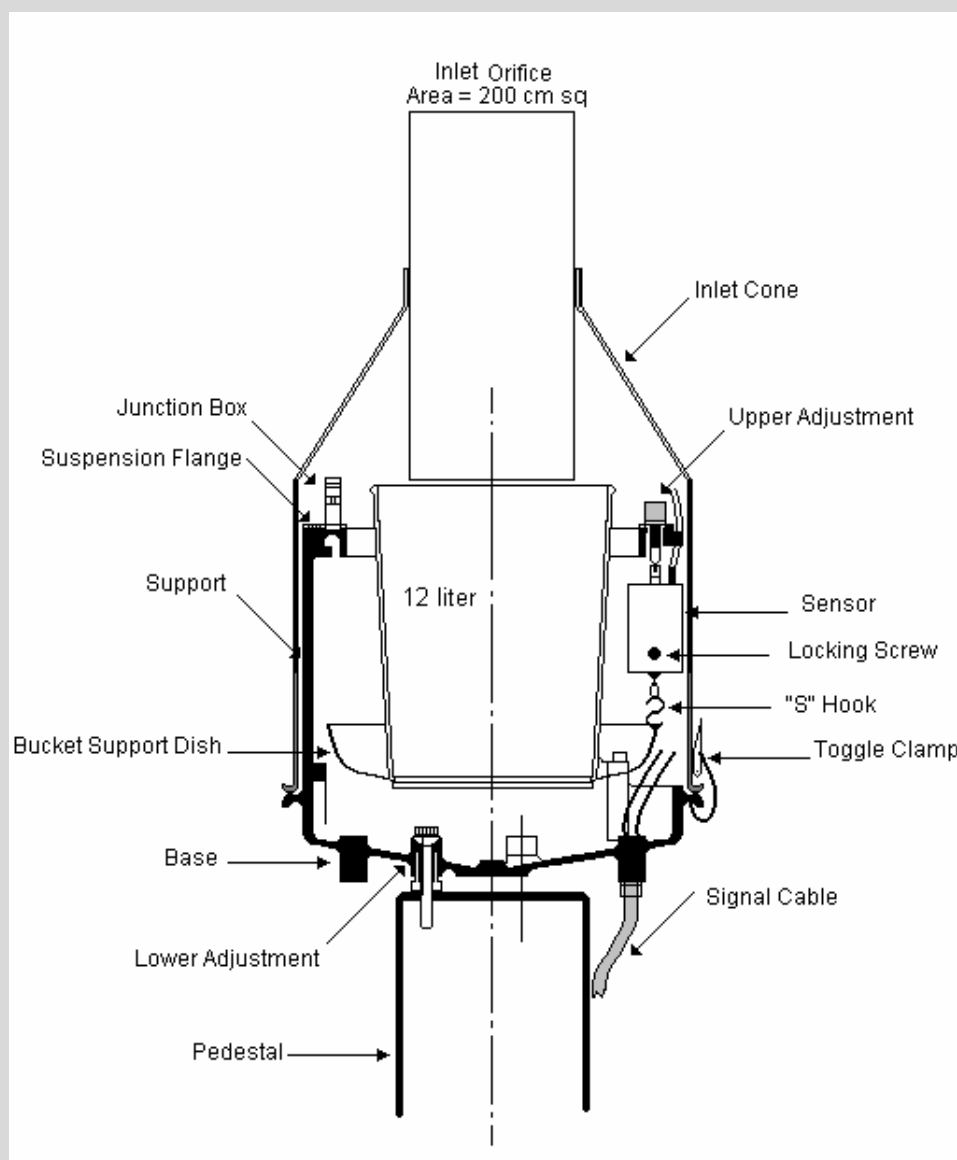


Fig. 4-9. Esquema pluviòmetre Geonor T-200B
(Font: Geonor)

El sensor es connecta primer a la caixa de díodes de protecció i, des d'allà, el cable sortint (preferiblement amb malla) a l'adaptador de senyal 455055 que es troba a la caixa del *datalogger*.

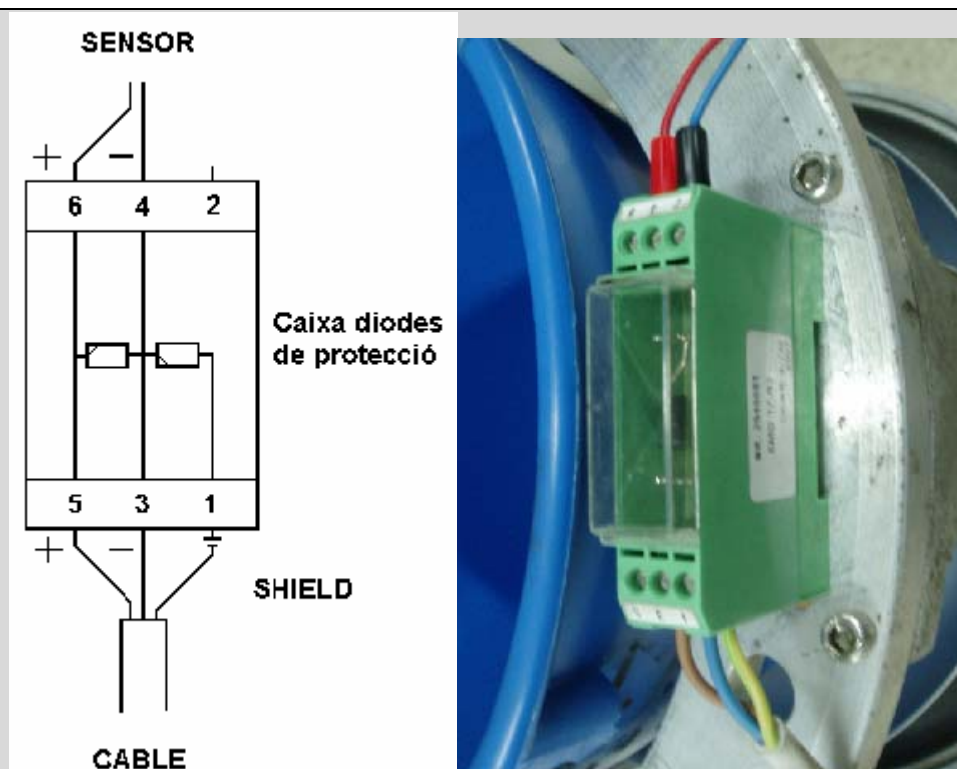


Fig. 4-10. Esquema de connexió sensor - *junctions* box –cable pluviòmetre pesada Geonor T-200B
(Font: Geonor i SMC)

El cable, doncs, es connecta a la interfície 455055 de la següent manera:



Fig. 4-11. Fotografia adaptador senyal 455055 Geonor T-200B
(Font: SMC)

- A Connexió del cable marró, el +, de sortida del *Junction Box*
- B Connexió del cable blau, el -, de sortida del *Junction Box*
- C Connexió al *datalogger* 12 V
- D Connexió al canal d'entrada del *datalogger* 1 (1H)
- E Connexió a la massa de senyal del *datalogger* $\perp$

4.2.2 Pluviòmetres de balancí

Els pluviòmetres de balancí són àmpliament utilitzats en les xarxes d'Estacions Meteorològiques Automàtiques (EMA) gràcies al seu senzill principi de funcionament i al seu cost relativament baix.



Fig. 4-12. Pluviòmetre de balancí CSI TB4
(Font: Campbell Scientific.)

La basculació del balancí cada vegada que s'omple d'aigua tanca un contacte magnètic (*contact reed*) que en formar part d'un circuit es computa com una certa quantitat d'aigua per part del *datalogger*.

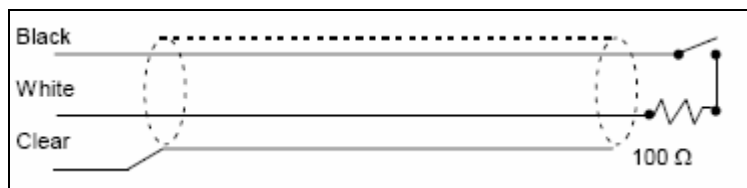


Fig. 4-13. Esquema tancament contacte magnètic
(Font: Campbell Scientific.)

Així doncs, mesuren la quantitat i la intensitat de precipitació a partir del número de basculacions que realitza una cullereta amb un volum d'aigua conegut en un temps determinat

Un dels problemes pràctics més habituals d'aquest tipus de pluviòmetres és l'obstrucció del forat d'entrada de l'aigua cap als balancins. Normalment els fabricants ja col·loquen un filtre a l'entrada de l'orifici per

evitar l'entrada de pols, fulles, defecacions d'ocells, etc, però si el forat és massa petit la probabilitat que s'acabi embussant és alta.

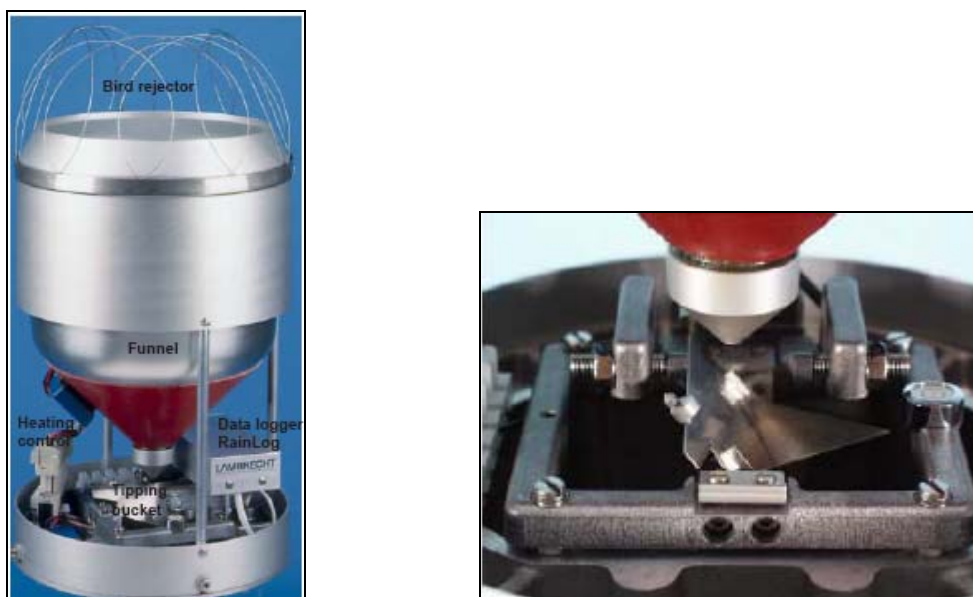


Fig. 4-14. Pluviòmetre Lambrecht amb protecció contra els ocells
(Font: Lambrecht.)

D'altra banda, la resposta dels pluviòmetres de balancí no és lineal, i això es deu, principalment, al temps que triga el dispositiu (la cullereta) a realitzar la basculació, que no és zero. Aquest interval de temps provocarà una pèrdua de precipitació, ja que aquesta no podrà ser recollida per cap de les dues culleretes.

Per tant, en general, els pluviòmetres de balancí infravaloren la precipitació; en major quantitat per a majors intensitats.

En l'estudi realitzat per l'OMM el 2004 titulat "WMO Laboratory intercomparison of rainfall intensity gauges" en el qual es comparava la resposta de diversos pluviòmetres en funció d'una intensitat simulada en tres laboratoris (el DIAM italià, Météo France, i el KNMI holandès) es van arribar a observar subestimes de la precipitació de fins al 30% per intensitats d'uns 600 mm/h en un model concret de pluviòmetre de balancí. Errors del 20% van ser observats, també, en més d'un sensor.

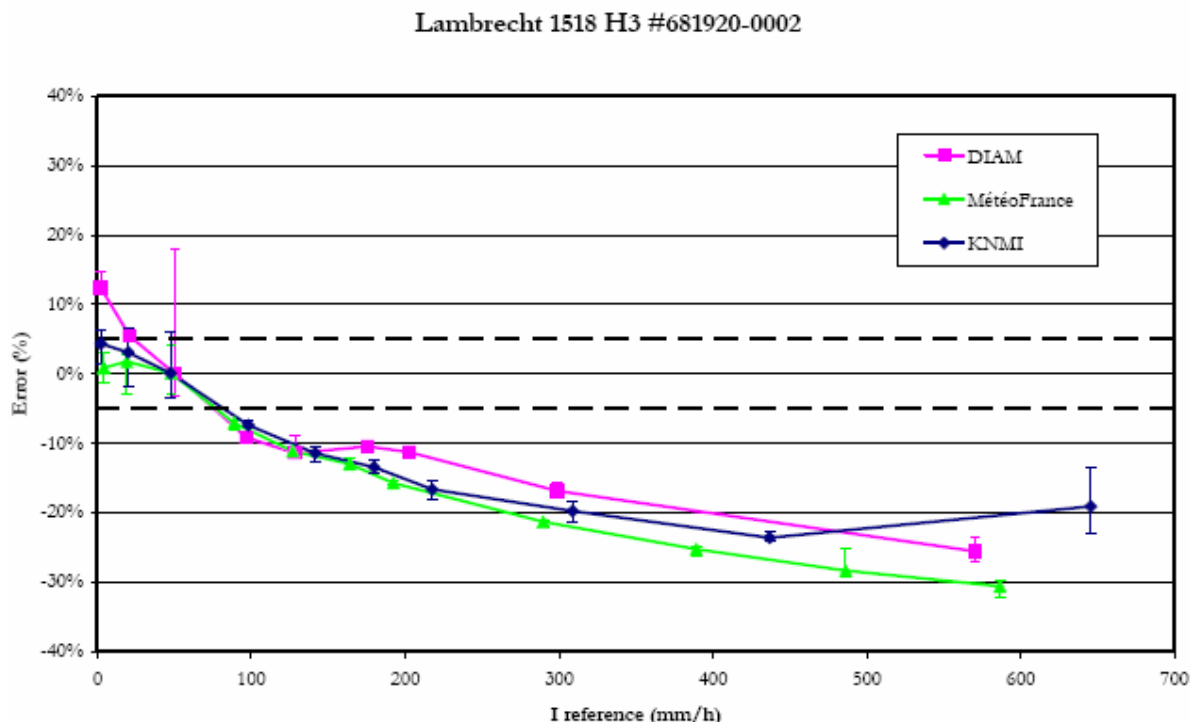


Fig. 4-15. Error segons la intensitat de precipitació del pluviòmetre de balancí Lambrecht 15183
(Font: OMM)

En el cas d'aquest pluviòmetre Lambrecht 15183 el fabricant proporciona una taula perquè el propi usuari realitzi les correccions pertinents de la lectura en funció de la intensitat.

Altres fabricants, però, no proporcionen cap gràfica ni taula per a realitzar aquestes correccions, per la qual cosa l'error pot arribar a ser força important. Aquests realitzen, només, un calibratge estàtic; sense tenir en compte les diverses intensitats de precipitació. És a dir, calibren l'aparell de manera que per a una quantitat d'aigua coneguda realitzi un número de bolcades determinat; però per a una sola intensitat de precipitació (normalment mitjana).

Per intentar disminuir l'error en la resposta dels pluviòmetres, doncs, és necessari realitzar, també, un calibratge dinàmic, i així considerar els efectes causats en la mesura per les diverses intensitats.

A partir d'un sistema que permeti simular les diverses intensitats de precipitació es pot obtenir la corba mitjana de calibratge del pluviòmetre.

A partir d'aquesta es pot corregir, a posteriori o en el mateix sistema d'adquisició, les dades obtingudes en camp pels sensors en qüestió.

A la fotografia següent es pot veure part del sistema de calibratge al laboratori de la Universitat de Gènova (DIAM). A l'esquerra, la manxa permet controlar diversos nivells de l'aigua, i a la dreta, tres electrovàlvules proporcionen un ampli rang d'intensitats.

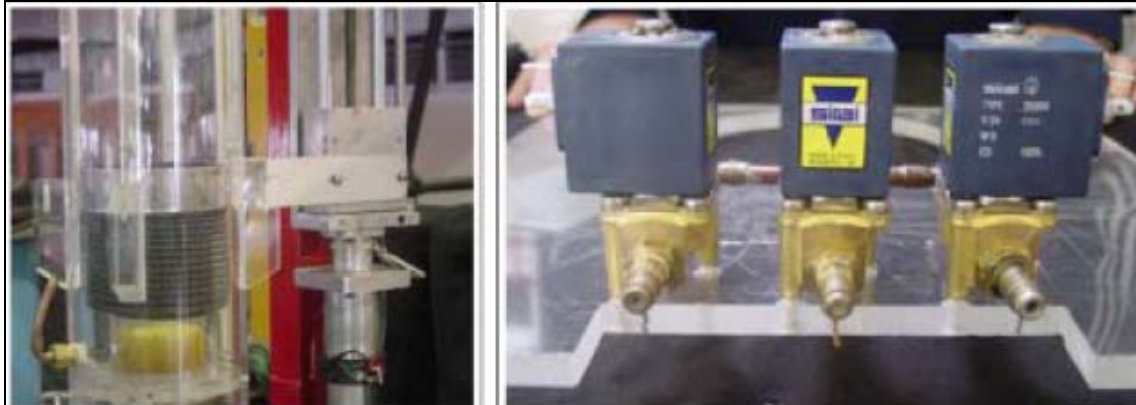


Fig. 4-16. Sistema calibratge pluviòmetres de balancí al DIAM
(Font: OMM)

Exemple 4-2.
Mesura d'un pluviòmetre de balancí amb un datalogger
Campbell CR1000

En aquest cas s'ha triat el pluviòmetre de Theodor Friedrichs 7051 sense calefacció



Fig. 4-17. Pluviòmetre de balancí Theodor Friedrichs 7051
 (Font: Theodor Friedrichs)

L'àrea de captació és de 200 cm², i la resolució de 0.1 mm.

El rang de mesura és de 0 -15 mm/min, però l'error va en augment amb la intensitat segons la gràfica que adjunta el fabricant.

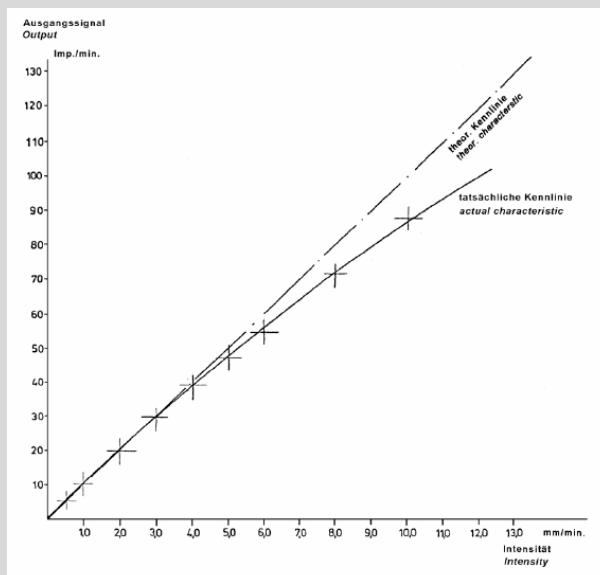
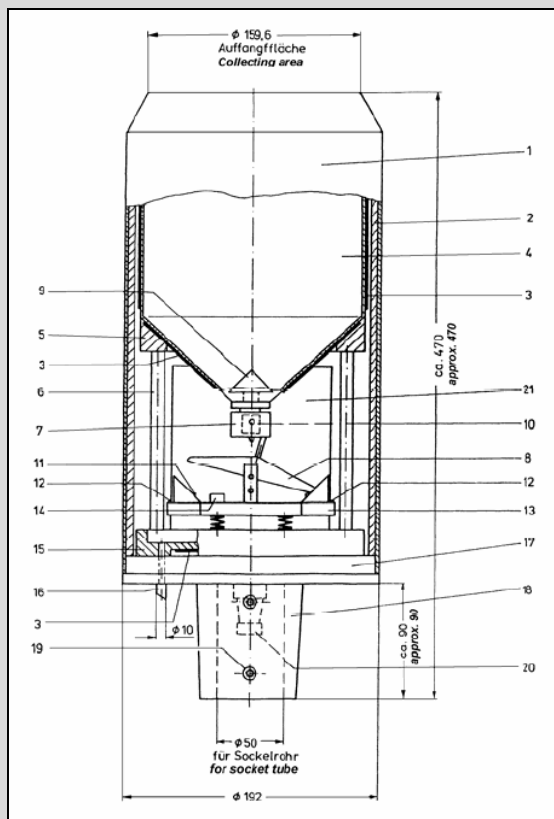


Fig. 4-18. Gràfica impulsos/min intensitat precipitació Pluviòmetre de balancí
Theodor Friedrichs 7051
 (Font: Theodor Friedrichs)

Així doncs, s'especifica una exactitud del 3% per intensitats de precipitació de fins a 4 mm/min.



- (1) Carcasa externa de aluminio anodizado, que se puede extraer fácilmente sacando los tres tornillos situados en su zona baja, dejando todas las partes del instrumento fácilmente accesibles. La parte superior de la carcasa externa está formada por un anillo afilado, que define perfectamente el área de recolección de 200 cm².
- (2) La versión calefactada está equipada con un sistema de aislamiento.
- (3) El sistema de calefacción se extiende por todo el área lateral mediante tres placas de metal.
- (4) Embudo de recogida.
- (5) El cilindro interior es también de aluminio anodizado y está soportado por anillos
- (6) Soportes de acero inoxidable (tres).
- (7) Tobera ajustable
- (8) Balancín
- (9) El agua de lluvia pasa al balancín a través de un filtro, para eliminar las impurezas
- (10) Interruptor (señal de pulso).
- (11) Sistema de sujeción.
- (12) Área ajustable con un set de tornillos.
- (13) Base.
- (14) Nivel de burbuja.
- (15) Zona de recogida del agua en la base.
- (16) Tubo de desagüe de aluminio.
- (17) La versión calefactada lleva una lámina circular de plástico como aislamiento.
- (18) Boca para la sujeción del soporte cilíndrico de 50 mm de diámetro.
- (19) Tornillos de sujeción del soporte (seis)
- (20) Conector de 7 contactos con protección IP67.
- (21) Placa de aluminio que sirve como soporte a la electrónica.

Fig. 4-19. Esquema pluviòmetre de balancí Theodor Friedrichs 7051
(Font: Theodor Friedrichs)

El senyal de sortida del sensor és tipus interruptor (*switch*) a través d'un relé de làmines (*contact reed*).

Per a la lectura de cadascun dels contactes (quan el balancí bascula) s'utilitzarà el comptador de polses en mode tancament de contacte.

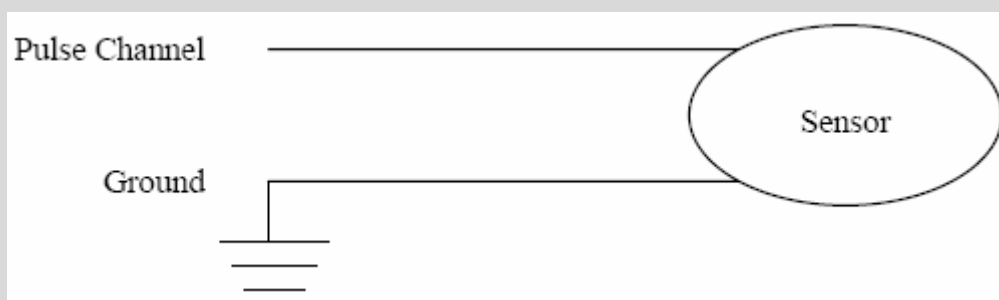
Quan l'interruptor és obert, el CR1000 col·loca el canal de polses a 5V a través d'una impedància de 100KΩ. Així que es tanca, el canal P1 es col·loca a terra.

El comptador s'incrementa quan s'obra l'interruptor de nou.

Els temps necessari per obrir i tancar el contacte és:

Minimum Switch Closed Time: 5 ms
 Minimum Switch Open Time: 6 ms
 Maximum Bounce Time: 1 ms open without being counted

PulseCount (Dest, Reps, PChan, PConfig, POption, Mult, Offset)



Parameter & Data Type	Enter
Dest <i>Variable or Array</i>	The Variable in which to store the results of the instruction. When Reps are used the results are stored in an array with the variable name. An array must be dimensioned to have elements for all the Reps.
Reps <i>Constant</i>	The number of repetitions for the measurement or instruction.
PChan <i>Constant</i>	The number of the pulse channel (1 or 2) for the measurement. Control ports can be used to measure high frequency or switch closure configurations. A 1 is placed in front of the control port number to specify the control port, i.e., control port 7 is specified by entering 17.

PConfig <i>Constant</i>	A code specifying the type of pulse input to measure.	
	Code	Input Configuration
	0	High Frequency
	1	Low Level AC
POption <i>Constant</i>	2	Switch Closure
	A code that determines if the raw result (multiplier = 1, offset = 0) is returned as counts or frequency. The running average can be used to smooth out readings when a low frequency relative to the scan rate causes large fluctuations in the measured frequency from scan to another.	
	Code	Result
	0	Counts
	1	Frequency (Hz) counts/scan interval in seconds
	>1	Running average of frequency. The number entered is the time period over which the frequency is averaged in milliseconds.
Parameter & Data Type	Enter	
Mult, Offset <i>Constant, Variable, Array, or Expression</i>	A multiplier and offset by which to scale the raw results of the measurement. See the measurement description for the units of the raw result; a multiplier of one and an offset of 0 are necessary to output in the raw units. For example, the TCDiff instruction measures a thermocouple and outputs temperature in degrees C. A multiplier of 1.8 and an offset of 32 will convert the temperature to degrees F.	

Taula 4-4. Paràmetres instrucció PulseCount

(Font: Manual CR1000, Campbell Scientific)

PulseCount (Pluja,1,1,2,0,0.1,0)

Paràmetre 1 – Dest

Pluja Nom de la variable en la qual es guarda el resultat

Paràmetre 2 – Reps

1 Un sol sensor

Paràmetre 3 – PChan Pulse channel

1 Comptador de polses P1

Paràmetre 4 – PConfig Pulse configuration

2 Mesura per tancament de contacte

Paràmetre 5 – POption Pulse option

0 Que retorni el resultat en número de contacte

Paràmetre 6 – Mult Multiplicador

0.1 Per cada basculació de balancí ha de comptar 0.1 mm

Paràmetre 7 – *Offset*

0

Connexió del sensor al *datalogger*

Els colors dels cables i els canals del *datalogger* estan definits específicament per aquest exemple.

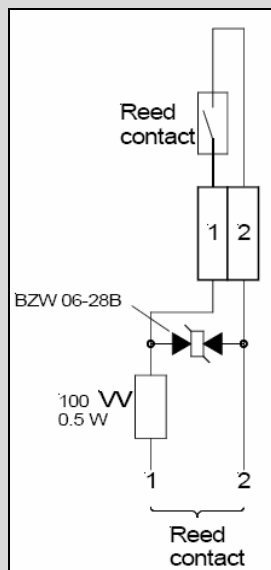


Fig. 4-20. Esquema contacte reed pluviòmetre de balancí Theodor Friedrichs 7051

(Font: Theodor Friedrichs)

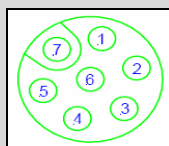


Fig. 4-21. Esquema connector pluviòmetre de balancí Theodor Friedrichs 7051

(Font: Theodor Friedrichs)

En escollir-se el model sense calefacció només s'utilitzen els pins 1 i 2. Per tant.

Cable vermell: comptador de polses P1

Cable negre: $\perp$

Que corresponen als següents pins del connector.

1. P1 ----- vermell

2. $\perp$ ----- negre

5. Vent

5.1. Definició

Segons l'Organització Meteorològica Mundial (OMM) es pot definir el vent com una *magnitud vectorial tridimensional amb fluctuacions aleatòries de petita escala en l'espai i el temps, que se superposen a un flux organitzat de major escala*. No obstant, la Guia també deixa clar que *el vent en superfície serà considerat principalment com una quantitat vectorial bidimensional definida per dos números que representen la direcció i la velocitat*.

5.2. Mesura del vent

Per a la mesura del vent en superfície s'utilitzen majoritàriament penells i anemòmetres d'hèlixs o de culleres. També les diverses formes combinades d'anemopenells.

Aquests instruments comprenen dos subsistemes: el rotor i el generador de senyal. En els sistemes ben dissenyats, la velocitat angular del rotor de culleres o d'hèlixs és directament proporcional a la velocitat del vent, o més precisament, en el cas del rotor d'hèlice, a la component de la velocitat del vent paral·lela a l'eix de rotació. Malgrat tot, quan la velocitat del vent s'apropa al llindar d'arrencada de l'instrument pot succeir que les senyals no es transmetin en absolut de manera lineal.

A més a més, aquests anemòmetres tenen l'avantatge de presentar una resposta lineal independent de la densitat de l'aire, un bon zero i una gran estabilitat, i es poden fabricar fàcilment en sèrie.

Aquest tipus de resposta dels anemòmetres de culleres i d'hèlixs als canvis de velocitat del vent es poden expressar pel temps de reacció, que és directament proporcional al moment d'inèrcia del rotor i depèn a més d'una sèrie de factors geomètrics (Busch i Kristensen, 1976; Coppin, 1982).

Com que la seva velocitat angular és directament proporcional a la velocitat del vent o a la component axial, els rotors de culleres i els d'hèlixs es presten particularment per a moure gran varietat de generadors de senyal. S'han obtingut bons resultats amb generadors de corrent altern i continu, generadors d'impulsos, òptics i magnètics, i també amb comptadors i registradors de voltes. L'elecció del generador de senyal o transductor depèn en gran mesura del tipus de dispositiu utilitzat per al tractament i la lectura de sortida de dades. Convé assegurar-se de que els coixinets i els generadors de senyal tinguin baixos parells d'arrencada i de fregament, i de que el moment d'inèrcia del generador de senyals no disminueixi excessivament la velocitat de resposta.

A la vegada, amb l'avenç progressiu de la tecnologia es va estenent cada vegada més l'ús d'anemòmetres i penells (normalment anemopenells) d'ultrasons.

En general, els anemòmetres mecànics tenen problemes amb els llindars d'arrencada i de frenada per la seva pròpia naturalesa. A l'hora de fabricar un aparell d'aquestes característiques el que habitualment s'intentarà és obtenir uns llindars d'arrencada i de frenada el més petits possibles; ja sigui per a poder mesurar velocitats del vent horitzontal ben baixes quan aquest comenci a bufar, com per aconseguir que l'anemòmetre deixi de marcar així que el vent pari. Lògicament, el llindar d'arrencada serà major que no pas el de frenada, ja que quan el rotor es pari amb una certa velocitat del vent ja portarà associada una inèrcia i, en canvi, perquè engegui haurem de proporcionar-li una energia extra perquè partirà d'un estat de repòs.

Que el llindar d'arrencada sigui petit ens permetrà discernir de la millor manera possible la calma (0 a 0.2 m/s) de la ventolina (0.3 a 1.5 m/s) definides per l'escala de Beaufort; i que ho sigui el de frenada ens ajudarà a no sobreestimar tant el vent per culpa de la inèrcia i aconseguir una resposta el més lineal possible. El problema principal sorgeix de voler aconseguir anemòmetres amb rangs de treball elevats (de 0 a 60 m/s, o més) amb llindars d'arrencada i frenada petits (de 0.5 m/s, o inferiors), per la qual cosa, si es construeixen massa pesats i robusts compleixen el primer objectiu, però no el segon, i si es construeixen massa lleugers succeeix tot el contrari.

Com sempre, serà qüestió d'intentar arribar a un equilibri, un consens, entre les dues característiques desitjades i valorar en cada ocasió què és el que més ens interessa obtenir.

Una altra qüestió a tenir sempre en compte en qualsevol instrument, directament relacionada amb els paràgrafs anteriors, és l'exactitud de l'anemòmetre. No servirà de res tenir un ampli rang de treball i uns lindars molt petits si l'exactitud de l'anemòmetre no és suficientment bona, especialment en l'arrencada, ja que l'error en la mesura invalidarà els resultats obtinguts per a distingir la calma de la ventolina.

Per contra, els anemopenells d'ultrasons tenen uns lindars d'arrencada i frenada virtualment zero, malgrat que en condicions de precipitació la seva mesura pot resultar menys fiable.

Pels penells mecànics es desitjarà que estigui ben equilibrat, és a dir, que no prengui una posició de preferència quan l'eix no estigui vertical i, a més a més, que estigui dissenyat de manera que tingui una sola posició d'equilibri per a cada direcció del vent.

Els anemopenells d'ultrasons tampoc tindran aquest problema, però sí el comentat anteriorment.

5.2.1 Anemòmetres de culleres



Fig. 5-1. Anemòmetre de culleres Vaisala
(Font: Vaisala)

En general, i tenint en compte tot el que s'ha comentat anteriorment, els anemòmetres de culleres tendeixen a sobreestimar el vent degut a la seva resposta no lineal (el seu lllindar d'acceleració acostuma a ser més petit que el de desacceleració, per culpa, principalment, de la inèrcia) i a la seva sensibilitat parcial a la component vertical del vent.

Malgrat aquests inconvenients, el seu ús està molt estès i existeixen al mercat anemòmetres de culleres amb molt bones prestacions.

5.2.2 Anemopenells d'hèlixs

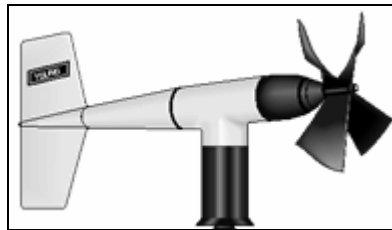


Fig. 5-2. Anemopenell d'hèlixs Young
(Font: Campbell Scientific)

Els anemòmetres d'hèlixs, en canvi, no sobreestimen tant el vent, ja que pràcticament no es veuen afectats per la component vertical del vent, però només operen quan apunten directament en la direcció del vent, raó per la qual quasi sempre van units a un penell.

Exemple 5-1.
Mesura d'un anemopenell d'hèlix amb un datalogger
Campbell CR1000

En aquest cas s'ha triat el sensor de velocitat i direcció del vent Young 05103.

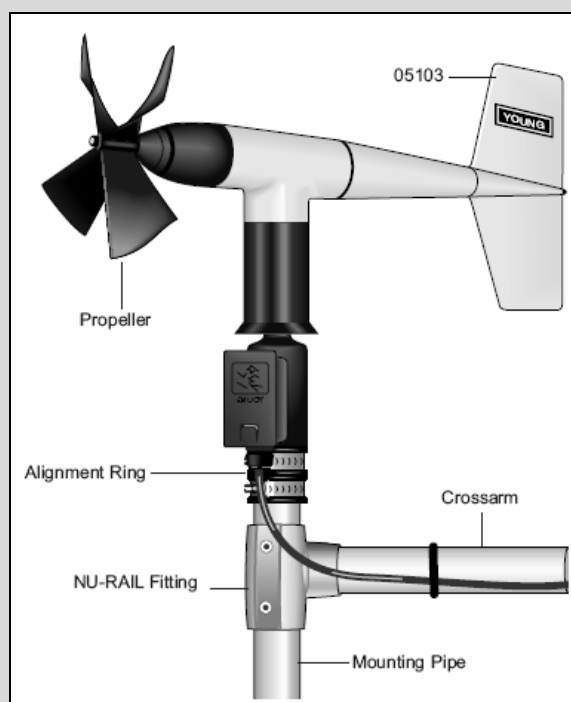


Fig. 5-3. Sensor velocitat i direcció del vent Young 05103
 (Font: Campbell Scientific)

Wind Speed	
Range:	0-134 mph (0-60 m s ⁻¹)
Accuracy:	±0.6 mph (±0.3 m s ⁻¹)
Starting threshold:	2.2 mph (1.0 m s ⁻¹) 05103; 2.4 mph (1.1 m s ⁻¹) 05106
Gust survival:	220 mph (100 m s ⁻¹)
Distance constant (63% recovery):	8.9 ft (2.7 m)
Output:	ac voltage (3 pulses per revolution). 1800 rpm (90 Hz) = 19.7 mph (8.8 m s ⁻¹)

Fig. 5-4. Especificacions tècniques sensor velocitat del vent Young 05103
 (Font: Campbell Scientific)

Wind Direction	
Range:	0-360° mechanical, 355° electrical (5° open)
Accuracy:	±3°
Starting threshold at 10° displacement:	2.2 mph (1.1 m s ⁻¹)
Delay distance (50% recovery):	4.3 ft (1.3 m)
Damping ratio:	0.25
Damped natural wavelength:	24.3 ft (7.4 m)
Undamped natural wavelength:	23.6 ft (7.2 m)
Output:	Analog dc voltage from potentiometer – resistance 10 kΩ, linearity 0.25%, life expectancy 50 million revolutions.

Fig. 5-5. Especificacions tècniques velocitat del vent Young 05103

(Font: Campbell Scientific)

Mesura de la velocitat del vent

La rotació de les hèlixs produeix una ona sinusoïdal de senyal altern (AC) amb la freqüència proporcional a la velocitat del vent. Aquest senyal és induït en una bobina immòbil per un imant de sis pols muntat a l'eix del propulsor.

L'equació per al càlcul de la velocitat del vent és

$$U = MX + B$$

where

M = multiplier

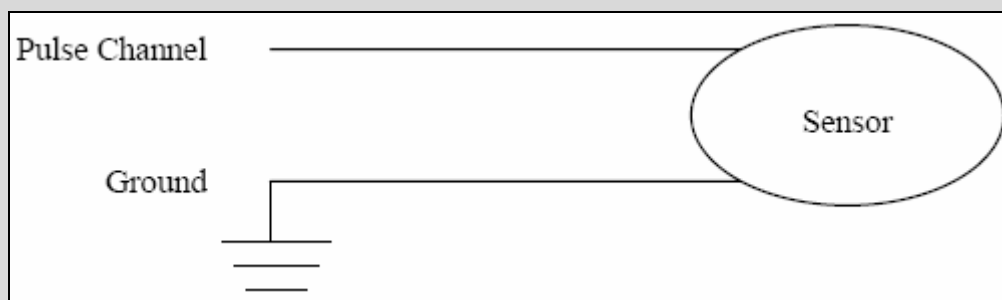
X = number of pulses per second (Hertz)

B = offset

Per a una configuració de sortida en Hertz, el multiplicador per obtenir la velocitat en m/s és 0.098, i l'offset 0.

Així doncs, per mesurar el número de polses per segon s'ha d'utilitzar la instrucció **PulseCount**.

PulseCount (Dest, Reps, PChan, PConfig, POption, Mult, Offset)



Parameter & Data Type	Enter								
Dest <i>Variable or Array</i>	The Variable in which to store the results of the instruction. When Reps are used the results are stored in an array with the variable name. An array must be dimensioned to have elements for all the Reps.								
Reps <i>Constant</i>	The number of repetitions for the measurement or instruction.								
PChan <i>Constant</i>	The number of the pulse channel (1 or 2) for the measurement. Control ports can be used to measure high frequency or switch closure configurations. A 1 is placed in front of the control port number to specify the control port, i.e., control port 7 is specified by entering 17.								
PConfig <i>Constant</i>	A code specifying the type of pulse input to measure. <table border="1"> <thead> <tr> <th>Code</th><th>Input Configuration</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td><td>High Frequency</td></tr> <tr> <td>1</td><td>Low Level AC</td></tr> <tr> <td>2</td><td>Switch Closure</td></tr> </tbody> </table>	Code	Input Configuration	0	High Frequency	1	Low Level AC	2	Switch Closure
Code	Input Configuration								
0	High Frequency								
1	Low Level AC								
2	Switch Closure								
POption <i>Constant</i>	A code that determines if the raw result (multiplier = 1, offset = 0) is returned as counts or frequency. The running average can be used to smooth out readings when a low frequency relative to the scan rate causes large fluctuations in the measured frequency from scan to another. <table border="1"> <thead> <tr> <th>Code</th><th>Result</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td><td>Counts</td></tr> <tr> <td>1</td><td>Frequency (Hz) counts/scan interval in seconds</td></tr> <tr> <td>>1</td><td>Running average of frequency. The number entered is the time period over which the frequency is averaged in milliseconds.</td></tr> </tbody> </table>	Code	Result	0	Counts	1	Frequency (Hz) counts/scan interval in seconds	>1	Running average of frequency. The number entered is the time period over which the frequency is averaged in milliseconds.
Code	Result								
0	Counts								
1	Frequency (Hz) counts/scan interval in seconds								
>1	Running average of frequency. The number entered is the time period over which the frequency is averaged in milliseconds.								
Parameter & Data Type	Enter								
Mult, Offset <i>Constant, Variable, Array, or Expression</i>	A multiplier and offset by which to scale the raw results of the measurement. See the measurement description for the units of the raw result; a multiplier of one and an offset of 0 are necessary to output in the raw units. For example, the TCDiff instruction measures a thermocouple and outputs temperature in degrees C. A multiplier of 1.8 and an offset of 32 will convert the temperature to degrees F.								

Taula 5-1. Paràmetres instrucció PulseCount
(Font: Manual CR1000, Campbell Scientific)

PulseCount (VV,1,1,1,1,0.098,0)

Paràmetre 1 – Dest

VV Nom de la variable en la qual es guarda el resultat

Paràmetre 2 – Reps

1 Un sol sensor

Paràmetre 3 – PChan Pulse channel

1 Comptador de polses P1

Paràmetre 4 – PConfig Pulse configuration

1 Low Level AC.

Admet fins a 20 V pic a pic, mentre que el sensor dóna 8.0 V a 10.000 rpm (3 cicles per revolució, 0.098 m/s per Hz), uns 9.82 V a 60 m/s (612Hz).

Low Level AC (Pulse Channels Only)

Input Hysteresis: 15 mV

Maximum Input Voltage: 20 V peak-to-peak

Input Voltage and Frequency Range

20 mV 1.0 Hz to 20 Hz

200 mV 0.5 Hz to 200 Hz

2000 mV 0.3 Hz to 10,000 Hz

5000 mV 0.3 Hz to 20,000 Hz

Paràmetre 4 – POption Pulse option

0 Que retorni el resultat en Hz (comptes per segon)

Paràmetre 5 – Mult Multiplicador

0.098 0.098 m/s per Hz

Paràmetre 6 – Offset

0

Connexió del sensor de velocitat i direcció del vent al datalogger

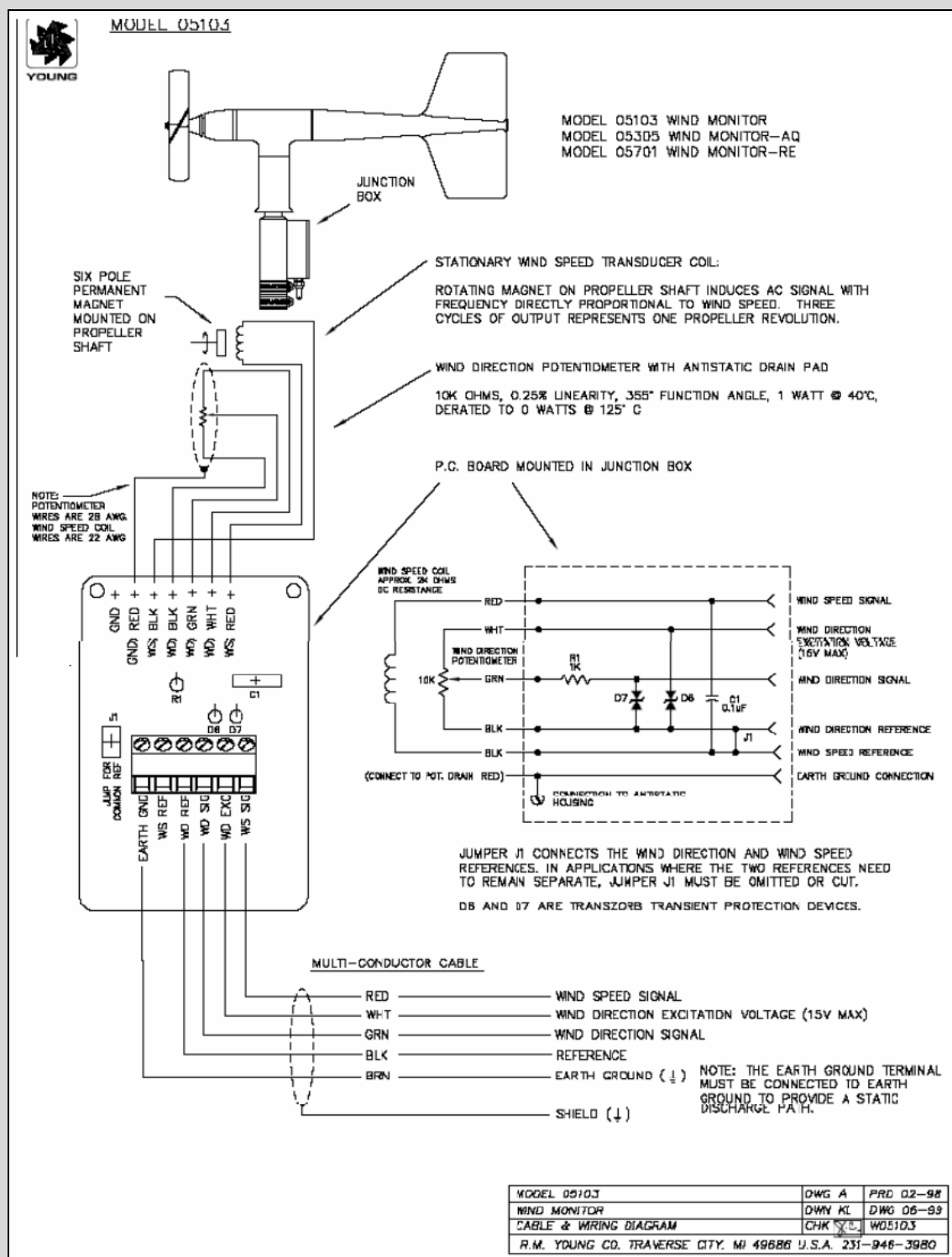


Fig. 5-6. Esquema i connexió anemopenell Young 05103
(Font: Young)

Els colors dels cables i els canals del *datalogger* estan definits específicament per aquest exemple.

Cable Vermell: comptador de polses P1 ----- WS SIG senyal velocitat vent

Cable Negre: $\perp$ ----- WS REF referència velocitat del vent

Cable groc: Earth Ground ----- $\perp$

Malla: Malla connectada només a un extrem, al *datalogger* ----- $\perp$

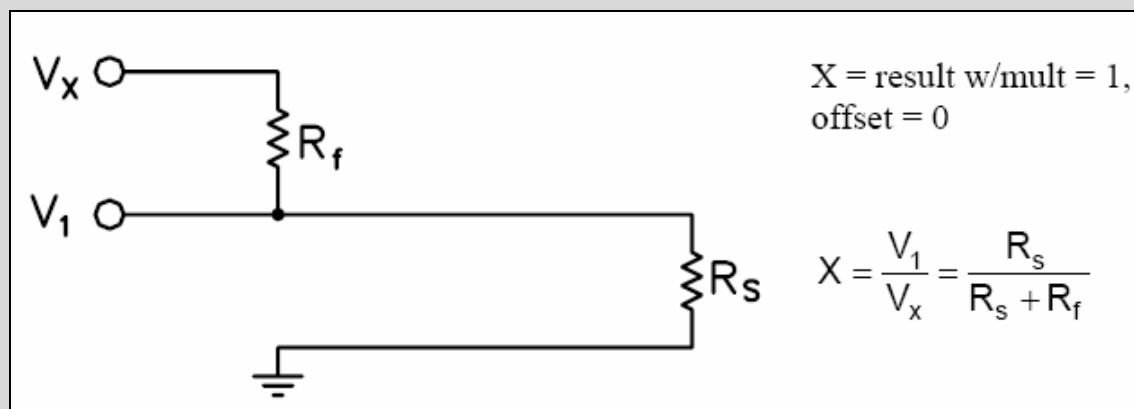
Mesura de la direcció del vent

La posició del penell és transmesa per un potenciòmetre (resistència variable) de plàstic conductor de precisió de 10 K Ω ($\pm 20\%$), el qual requereix un voltatge d'excitació regulat. Amb un voltatge constant aplicat al potenciòmetre la senyal de sortida és un voltatge analògic directament proporcional a l'angle de la direcció del vent.

El sensor té una banda morta de 5°, dels 355° als 360°, per la qual cosa només mesurarà de 0 a 355°.

Així doncs, per mesurar la direcció del vent s'utilitza la instrucció **BrHalf**.

BrHalf (Dest, Reps, Range, SEChan, ExChan, MeasPEx, ExmV, RevEx, SettlingTime, Integ, Mult, Offset)



Parameter & Data Type	Enter			
Dest <i>Variable or Array</i>	The Variable in which to store the results of the instruction. When Reps are used the results are stored in an array with the variable name. An array must be dimensioned to have elements for all the Reps.			
Reps <i>Constant</i>	The number of repetitions for the measurement or instruction.			
Range <i>Constant</i>	Alpha Code	Voltage Range		
	mV5000	± 5000 mV		
	mV2500	± 2500 mV		
	mV250	± 250 mV		
	mV25	± 25 mV		
	mV7_5	± 7.5 mV		
	mV2_5	± 2.5 mV		
	Autorange	mV2_5 – mV5000	Selects range (Sect. 3.1)	
	mV250C	± 250 mV	The mV250C, mV25C, mV7_5C, and mV2_5C ranges pull the channel into common mode range and check for open input	
	mV25C	± 25 mV		
	mV7_5C	± 7.5 mV		
	mV2_5C	± 2.5 mV		
	AutorangeC	mV2_5 – mV250	Selects C range	
SEChan <i>Constant</i>	The single-ended channel number on which to make the first measurement. When Reps are used, subsequent measurements will be automatically made on the following single-ended channels. If the channel is entered as a negative number, all reps occur on that channel.			
ExChan <i>Constant</i>	Enter the excitation channel number to excite the first measurement.			
	Alpha Code	Code/ Channel	Result	
	VX1	1	Switched excitation channels, are switched to the excitation voltage for the measurement and switched off between measurements.	
	VX2	2		
VX3	3			
MeasPEX <i>Constant</i>	The number of sensors to excite with the same excitation channel before automatically advancing to the next excitation channel. To excite all the sensors with the same excitation channel, the number should equal the number of Reps.			
ExmV <i>Constant</i>	The excitation voltage in millivolts. Allowable range ± 2500 mV. RevEx may be used to excite with both a positive and negative polarity to cancel offset voltages.			
RevEx <i>Constant</i>	Code	Value	Result (Reversing requires twice as much time to complete)	
	False	0	Excite only with the excitation voltage entered	
	True	≠0	A second measurement is made with the voltage polarity reversed to cancel offsets	
RevDiff <i>Constant</i>	Code	Value	Result (Reversing requires twice as much time to complete)	
	False	0	Signal is measured with the high side referenced to the low	
	True	≠0	A second measurement is made after reversing the inputs to cancel offsets	
Parameter & Data Type	Enter			
SettlingTime <i>Constant</i>	The time in microseconds to delay between setting up a measurement (switching to the channel, setting the excitation) and making the measurement. (1 microsecond resolution)			
	Entry	Voltage Range	Integration	Settling Time
	0	All	250 μS	450 μS (default)
	0	All	_50Hz, _60 Hz	3 mS (default)
	≥100	All	All	μS entered
Integ <i>Constant</i>	The time spent on integration in microseconds for each of the channels measured.			
	Entry	Integration		
	250	250 μS		
	_60Hz or 16667	16,667 μS (reject 60 Hz noise)		
	50 Hz or 20000	20,000 μS (reject 50 Hz noise)		
Mult, Offset <i>Constant, Variable, Array, or Expression</i>	A multiplier and offset by which to scale the raw results of the measurement.			

Taula 5-2. Paràmetres instrucció BrHalf
(Font: Manual CR1000, Campbell Scientific)

La instrucció BrHalf aplica un voltatge d'excitació, espera un temps determinat i fa una mesura de voltatge en single ended.

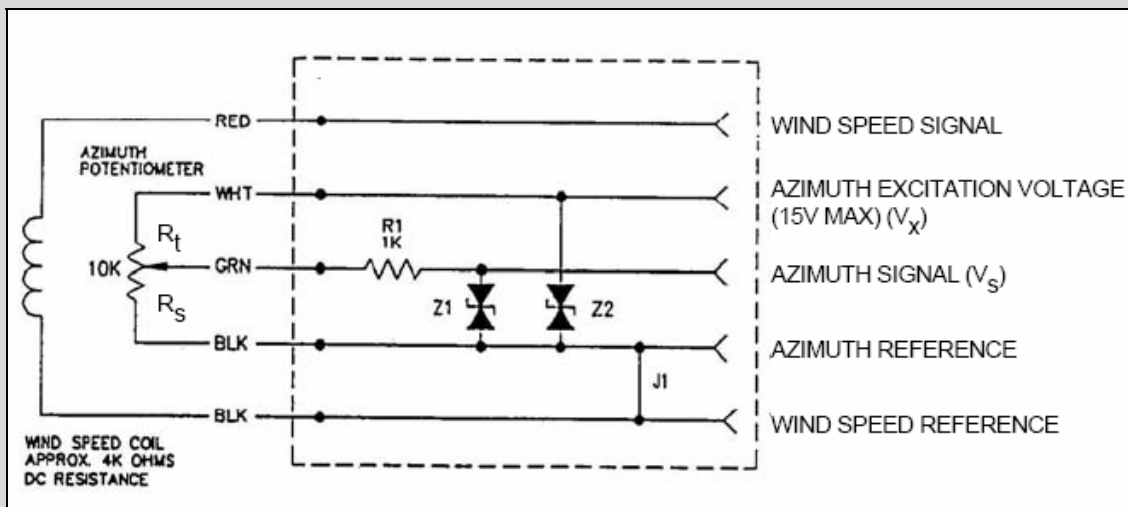


Fig 5-7. Young 05103 potenciòmetre en la instrucció BrHalf

(Font: Campbell Scientific)

Concretament, aplica el voltatge d'excitació (V_x) i mesura el voltatge entre el terminal variable del potenciòmetre i terra (V_s).

La resistència entre el terminal variable i terra, R_s , i V_s , varien amb la direcció del vent.

El resultat de la mesura és el ràtio del voltatge mesurat (V_s) respecte el voltatge d'excitació (V_x). És a dir:

$$V_s / V_x = R_s / (R_t + R_s)$$

El valor màxim de R_s és quan $R_t = 0$, just quan el valor de la direcció del vent és 355° . Com que V_s/V_x assoleix el màxim valor a 1.0 mv/mv, el multiplicador per tenir la direcció en graus ha de ser $355/1.0 = 355$.

El voltatge d'excitació V_x per al CR1000 és de 2500mV.

BrHalf (DV,1,mV2500,1,Vx1,1,2500,True,0,_50Hz,355,0)

Paràmetre 1 – Dest

DV Nom de la variable en la qual es guarda el resultat

Paràmetre 2 – Reps

1 Un sol sensor

Paràmetre 3 – Range

mV2500 Rang d'entrada.

Paràmetre 4 – SEChan Single ended channel

1 Canal on es connecta el sensor per la mesura

Paràmetre 5 – Excitation Channel

Vx1 Canal d'excitació número 1

Paràmetre 6 – MeasPEX Measurement per excitation

1 Número de sensors a excitar amb el mateix canal d'excitació

Paràmetre 7 – ExmV Excitation in mV

2500 Voltatge d'excitació 2500mV

Paràmetre 8 – RevEx Reverse excitation

True Es realitza una segona mesura amb l'excitació canviada de signe per eliminar els possibles *offsets* deguts al sensor, el cablejat o el circuit d'excitació

Paràmetre 9 – Settling Time

0 Temps d'establiment. És el temps necessari per començar a realitzar la mesura. Des que s'excita el pont fins que s'aconsegueix el valor real de la lectura existeix un temps, finit, que permet el senyal estabilitzar-se en el valor correcte.

Paràmetre 10 – Integ Integration

_50Hz Per realitzar la mesura del senyal s'integra durant un temps determinat, i s'utilitza aquests temps per reduir el soroll. En aquest cas el temps d'integració és de 20ms, que redueix el soroll de línia d'alimentació (50Hz AC).

Paràmetre 11 – Mult Multiplicador

1 Com s'ha vist anteriorment, el multiplicador val 355.

Paràmetre 14 – *Offset*

0

Connexió del sensor de direcció del vent al *datalogger*

(Vegeu esquema i connexió anemopenell Young 05103 de la Figura 4-6)

Els colors dels cables i els canals del *datalogger* estan definits específicament per aquest exemple.

Important: Per longituds de cable superiors a 33 m, el temps d'establiment (settling time) necessari per realitzar la mesura de la direcció del vent amb la instrucció BrHalf s'ha d'incrementar a 20 ms (20.000 µs).

Cable Verd: canal d'entrada número 1 (1H) ----- WD SIG senyal direcció vent

Cable Negre: $\perp$ ----- WD REF massa analògica direcció vent

Cable Blanc: Excitació EX1 ----- WD EXC. excitació direcció vent

Cable groc: Earth Ground ----- $\perp$

Malla: Malla connectada només a un extrem, al *datalogger* ----- $\perp$

5.2.3 Anemopenells d'ultrasons

Els sensors d'ultrasons es basen en el temps emprat per un impuls ultrasònic en viatjar des d'un transductor situat en un extrem del sensor fins a un altre transductor situat en un altre extrem.

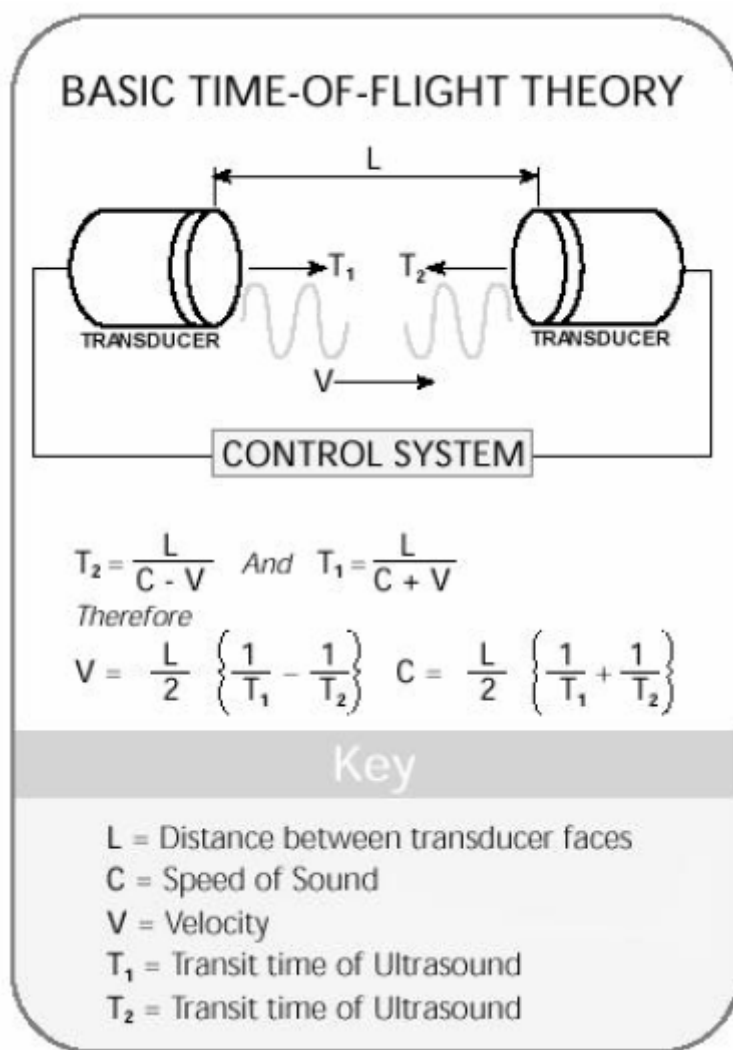


Fig. 5-8. Esquema principis funcionament sensor de vent d'ultrasons
 (Font: Gill Instruments)

Aquest temps es compara amb l'emprat per una altra parella de transductors i s'obté la velocitat i la direcció del vent.

Depenent de l'aparell s'utilitzen tres o quatre transductors per fer diverses combinacions i calcular els diversos temps emprats per l'impuls d'ultrasons i per extreure'n les components del vent horitzontal.



Fig. 5-9. Fotografia de dos sensors de vent d'ultrasons
(Font: Vaisala (esquerra) i Gill Instruments (dreta))

Una de les principals avantatges dels sensors d'ultrasons és que no tenen parts mòbils que es puguin deteriorar o canviar la seva resposta amb el temps, a la vegada que el seu llindar d'arrencada és virtualment zero i no presenten els problemes d'inèrcia dels sensors mecànics.

Contràriament, és difícil detectar-ne mal funcionaments, malgrat que cada vegada més ja incorporen sistemes per verificar si les lectures del vent es poden considerar com a bones o no. A més a més, com s'ha dit anteriorment, les seves prestacions disminueixen en presència de precipitació.

6. Pressió atmosfèrica

6.1. Definició

Segons l'Organització Meteorològica Mundial (OMM) es pot definir la *pressió atmosfèrica en superfície com la força per unitat d'àrea que exerceix sobre aquesta superfície el pes de l'atmosfera que està per sobre seu*.

6.2. Mesura de la pressió atmosfèrica

Per a la mesura de la pressió atmosfèrica existeixen gran varietat d'aparells i tecnologies diverses. Històricament s'han utilitzat baròmetres de mercuri, tubs de Bourdon i càpsules aneroides (sense fluid), i en l'actualitat s'hi han afegit baròmetres electrònics, capacitius, piezoelèctrics (fenomen característic de certs cristalls que consisteix en l'aparició de càrregues elèctriques o d'una diferència de potencial entre llurs cares oposades per efecte d'una deformació) i variants o combinacions dels anteriorment anomenats.

Els baròmetres aneroides són de gran utilització en diferents tipus de sensors, i no són res més que una càpsula, en la qual s'ha fet el buit, amb un diafragma flexible que es mou en funció de la pressió aplicada (figura 6-1).

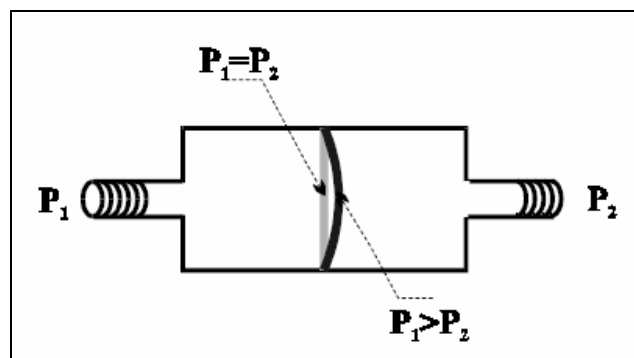


Fig. 6-1. Esquema baròmetre aneroide

Per mesurar aquest desplaçament de la membrana i extreure'n la pressió atmosfèrica existeixen gran quantitat de tècniques i possibilitats diverses.

Un esquema típic de mesura és el de la Fig. 5-2., en el qual es mesura la pressió a partir del desplaçament d'una membrana que canvia la resistència

d'un pont de Wheastone, modificant el voltatge de sortida del pont, i amplificant aquest voltatge amb un condicionador de senyal que proporciona, finalment, una sortida de 4 – 20 mA relacionada amb la pressió inicial que es volia mesurar.

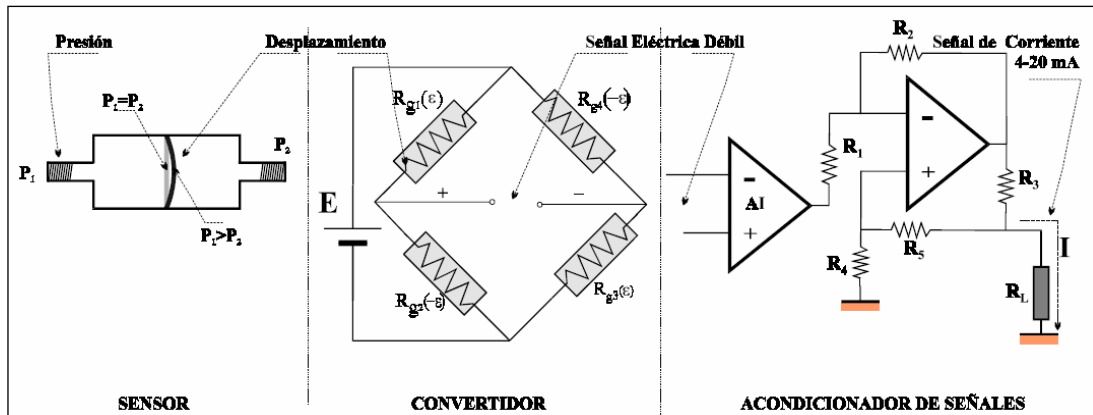


Fig. 6-2. Esquema transductor pressió basat en una càpsula aneroide

El silici és un material perfecte com a diafragma, ja que és un cristall que no pateix deformació permanent en el seu rang d'utilització. Els sensors Vaisala Barocap® (*veure exemple 5-1*) estan basats en una membrana de silici.

Un dels sensors més precisos i exactes del mercat és de la marca Paroscientific, i està construït amb la tecnologia Digiquartz®, que incorpora alguns dels elements i tecnologies comentats fins ara.

La tecnologia Digiquartz® per a sensors de pressió consisteix en un cristall de quars ressonador la freqüència d'oscil·lació del qual varia amb la pressió. La lectura d'aquesta freqüència es manté i realitza amb un aparell electrònic.

A la vegada, s'utilitza un altre cristall per a la lectura de la temperatura a partir de l'efecte piezoelèctric, compensant així els errors induïts per l'efecte de la temperatura en la mesura de la pressió (figura 6-3).

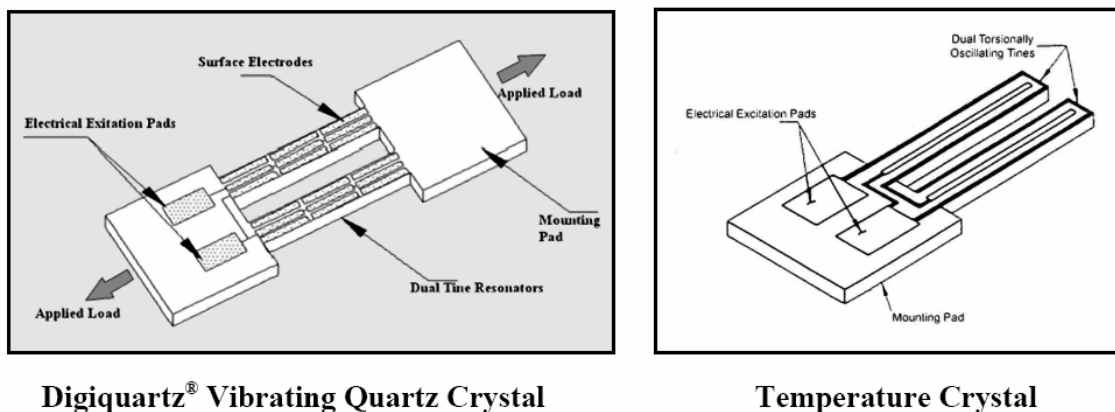


Fig. 6-3. Esquema cristall vibrador de Digiquartz® i del cristall de temperatura

Si s'estudia el mecanisme del baròmetre de forma completa es pot apreciar la seva complexitat i, a la vegada, simplicitat.

Una petita manxa transmet els canvis de pressió atmosfèrica a la resta d'elements del sistema, generant una força i una torsió sobre aquests.

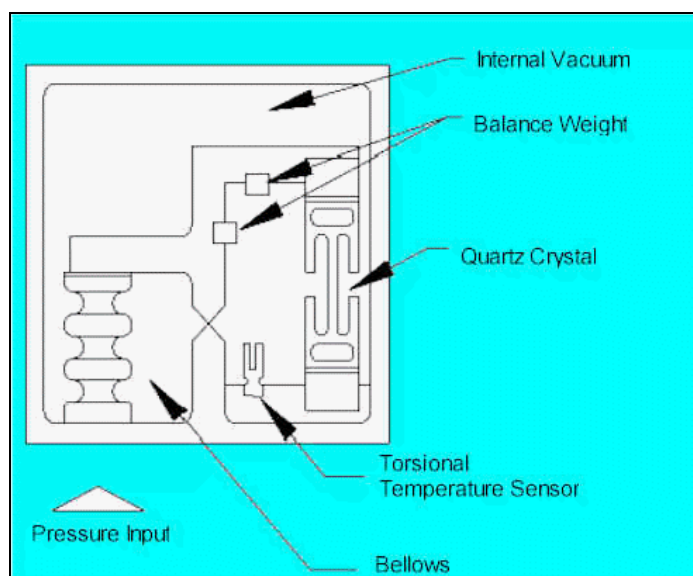


Fig. 6-4. Esquema sensor de pressió amb tecnologia Digiquartz®

El mecanisme està compensat per gravetat a partir d'un parell de pesos per evitar els efectes de la vibració i els cops.

L'exactitud d'aquest sensor és, segons el fabricant, de 0.008 hPa en tot el rang d'operació.

Exemple 6-1.

Mesura d'un sensor de pressió atmosfèrica capacitiu amb un datalogger Campbell CR1000

En aquest cas s'ha triat el sensor de pressió atmosfèrica de Vaisala PTB101B.

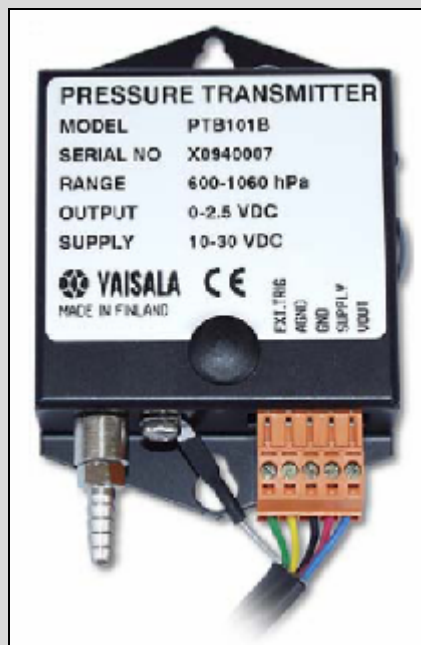


Fig. 6-5. Fotografia sensor pressió Vaisala PTB101B
(Font: Campbell Scientific)

Operating range:	600mB to 1060mB (hPa)
Temperature range:	-40°C to +60°C
Humidity range:	Non-condensing
Linearity*:	±0.45mB
Hysteresis*:	±0.05mB
Repeatability*:	±0.05mB
Calibration uncertainty**:	±0.15mB
Total accuracy at 20°C***:	±0.50mB
Total accuracy:	
+20°C	±0.50mB
0°C to +40°C	±1.5mB
-20°C to +60°C	±2.0mB
-40° to +60°C	±3.0mB
Drift:	<±0.1mB per year
Overpressure limit:	2000mB

Fig. 6-6. Especificacions tècniques sensor pressió Vaisala PTB101B
(Font: Campbell Scientific)

El sensor Vaisala Barocap® està format per una membrana de silici que en funció de la pressió canvia la capacitança del sensor.

Existeix una altra versió del mateix sensor, la PTB101C, amb un rang més petit, de 900 a 1100 hPa (per instal·lar a una altitud de fins a uns 500 m), que, lògicament, ofereix unes especificacions tècniques d'exactitud, linealitat, etc. més bones.

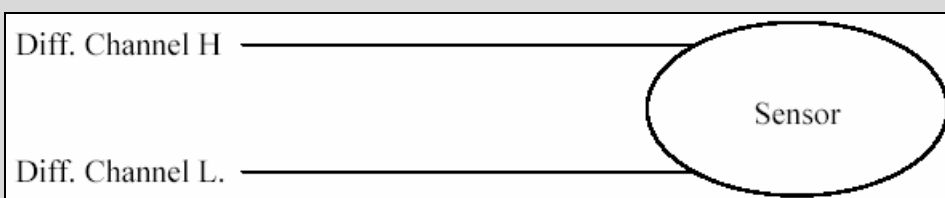
La sortida del sensor és 0 – 2.5 V, per la qual cosa es realitza la mesura amb la instrucció **VoltDiff**.

La relació entre la pressió i el voltatge de sortida del sensor ve donada per:

$$P = 600 \text{ hPa} + (460 \text{ hPa} / 2.5 \text{ V}) * V_{\text{out}} \quad V = 600 \text{ hPa} + 184 * V_{\text{out}}$$

$$V = 600 \text{ hPa} + 0.184 * V_{\text{out}} \text{ mV}$$

Per tant, el multiplicador **Mult = 0.184** i l'**offset = 600**



VoltDiff (Dest, Reps, Range, DiffChan, RevDiff, SettlingTime, Integ, Mult, Offset)

Parameter & Data Type	Enter		
Dest Variable or Array	The Variable in which to store the results of the instruction. When Reps are used the results are stored in an array with the variable name. An array must be dimensioned to have elements for all the Reps.		
Reps Constant	The number of repetitions for the measurement or instruction.		
Range Constant	Alpha Code	Voltage Range	
	mV5000	± 5000 mV	
	mV2500	± 2500 mV	
	mV250	± 250 mV	
	mV25	± 25 mV	
	mV7_5	± 7.5 mV	
	mV2_5	± 2.5 mV	
	Autorange	mV2_5 – mV5000	Selects range (Sect. 3.1)
	mV250C	± 250 mV	The mV250C, mV25C, mV7_5C, and mV2_5C ranges pull the channel into common mode range and check for open input
	mV25C	± 25 mV	
	mV7_5C	± 7.5 mV	
	mV2_5C	± 2.5 mV	
	AutorangeC	mV2_5 – mV250	Selects C range
DiffChan Constant	The differential channel number on which to make the first measurement. When Reps are used, subsequent measurements will be automatically made on the following channels. If the channel is entered as a negative number, all reps occur on that channel.		

RevDiff <i>Constant</i>	Code	Value	Result (Reversing requires twice as much time to complete)	
	False	0	Signal is measured with the high side referenced to the low	
	True	≠0	A second measurement is made after reversing the inputs to cancel offsets	
SettlingTime <i>Constant</i>	The time in microseconds to delay between setting up a measurement (switching to the channel, setting the excitation) and making the measurement. (1 microsecond resolution)			
	Entry	Voltage Range	Integration	Settling Time
	0	All	250 μS	450 μS (default)
	0	All	_50Hz, _60 Hz	3 mS (default)
	≥100	All	All	μS entered
Integ <i>Constant</i>	The time spent on integration in microseconds for each of the channels measured.			
	Entry		Integration	
	250		250 μS	
	_60Hz or 16667		16,667 μS (reject 60 Hz noise)	
	_50 Hz or 20000		20,000 μS (reject 50 Hz noise)	
Mult, Offset <i>Constant, Variable, Array, or Expression</i>	A multiplier and offset by which to scale the raw results of the measurement. See the measurement description for the units of the raw result; a multiplier of one and an offset of 0 are necessary to output in the raw units. For example, the TCDiff instruction measures a thermocouple and outputs temperature in degrees C. A multiplier of 1.8 and an offset of 32 will convert the temperature to degrees F.			

Taula 6-1. Paràmetres instrucció VoltDiff

(Font: Manual CR1000, Campbell Scientific)

VoltDiff (Patm,1,mV2500,1,True,0,_50Hz,0.184,600)

Paràmetre 1 – Dest

Patm Nom de la variable en la qual es guarda el resultat

Paràmetre 2 – Reps

1 Un sol sensor

Paràmetre 3 – Range

mV2500 Rang d'entrada.

±2.5V.

Paràmetre 4 – Differential Channel

1 Canal diferencial on es connecta el sensor per la mesura (1H-1L)

Paràmetre 5 – RevDiff Inputs reversed

True Es realitza una segona mesura canviant l'ordre dels canals d'entrada. Primer el canal alt contra el baix (1 respecte el 2), després el baix contra l'alt (el 2 respecte l'1)

Paràmetre 6 – Settling Time

0 Temps d'establiment. És el temps necessari per començar a realitzar la mesura

En aquest cas el paràmetre val 0, que correspon a un *delay* de 3 ms, que en invertir les entrades s'haurà de multiplicar per dos, per tant, 6 ms.

Paràmetre 7 – Integ Integration

_50Hz Per realitzar la mesura del senyal s'integra durant un temps determinat, i s'utilitza aquests temps per reduir el soroll.

En aquest cas el temps d'integració és de 20ms, que redueix el soroll de línia d'alimentació (50Hz AC).

Paràmetre 8 – Mult Multiplicador

0.184 Per convertir la sortida a hPa.

Paràmetre 9 – Offset

600

Connexió del sensor al datalogger

Els colors dels cables i els canals del *datalogger* estan definits específicament per aquest exemple.

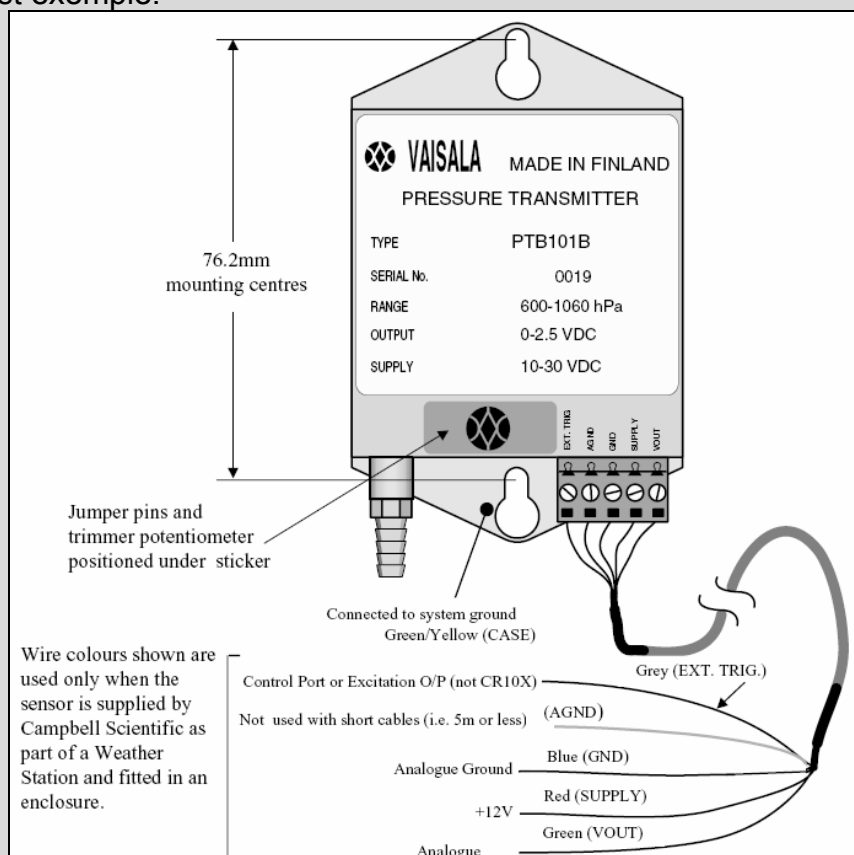


Fig. 6-7. Connexió sensor pressió Vaisala PTB101B
(Font: Campbell Scientific)

Com es pot veure en l'esquema de connexió del sensor, aquest incorpora un *jumper* en el seu interior. Quan aquest no està instal·lat, permet alimentar el sensor només quan es vol realitzar la mesura (per exemple cada minut) a partir d'un port de control o un canal d'excitació del *datalogger*.

Quan el *jumper* està instal·lat l'alimentació és en continu.

Cable vermell (alimentació - supply): alimentació 12V

Cable verd (Vout): canal d'entrada número 1 (1H) (senyal pressió)

Cable blau (AGND): canal d'entrada número 2 (1L)

Cable negre (GND): G

Malla: $\perp$

Reducció de la pressió a nivell del mar

La pressió calculada pel sensor és la pressió de l'estació. En moltes ocasions, es desitja conèixer la pressió d'aquella estació reduïda al nivell del mar o a un nivell comú de referència que permeti fer comparacions a una mateixa altitud. És a dir, la pressió que mesuraria aquell sensor si, sense moure's del lloc on estigués instal·lat el sensor, es trobés a una altitud de 0 m (o a una altitud de referència).

Per realitzar aquest càlcul hi ha fórmules diverses que determinen la pressió amb més o menys exactitud. Al web del Servei Meteorològic de Catalunya (www.meteo.cat) es poden trobar algunes d'aquestes aproximacions (http://www.meteo.cat/marcs/marc_xemec.html), que aquí mateix es detallen:

Reducció de la pressió atmosfèrica a un nivell de referència

L'Assaig d'un Vocabulari Meteorològic Català d'Eduard Fontseré defineix la pressió com la "força per unitat de superfície" i en concret la pressió atmosfèrica com "la pressió de l'aire deguda al seu pes i que es mesura amb el baròmetre". Moltes de les EMA de la Xemec (Xarxa d'Estacions Meteorològiques de Catalunya) mesuren aquesta variable meteorològica. Per tal que els diferents valors de pressió atmosfèrica puguin ser comparables entre ells, es fa necessari referenciar-los a un mateix nivell i eliminar d'aquesta forma els canvis de pressió atmosfèrica deguts a les diferents altituds.

En un estat d'equilibri, la força de la gravetat està compensada a qualsevol punt per les forces de pressió. L'expressió matemàtica d'aquest principi és el que s'anomena "equació hidrostàtica" i ve expressada de la forma:

$$dp = -\rho g dz$$

on g és la gravetat i ρ és la densitat de l'aire. La integració d'aquesta equació permet reduir les diferents pressions a un mateix nivell de referència. Aquesta integració es fa assumint diverses hipòtesis on a banda de la pressió hi ha altres variables que entren en joc.

Les expressions que s'utilitzen per tal de reduir la pressió atmosfèrica són:

- Quan es coneix la temperatura i la humitat de l'estació s'estima una temperatura virtual mitjana entre el nivell de referència Z_0 i el nivell de l'estació Z .

$$P_0 = P_z \frac{273 + T - Z_0}{273 + T_z}$$

$$T_v = T_z + \frac{H_0}{2} (Z - Z_0)$$

$$T_v = T \cdot \left(1 + 0.378 \frac{e}{P} \right)$$

$$U = 100 \frac{e}{e_{\text{sat}}}$$

$$e_{\text{sat}} = 6.1078 \cdot 10^{\frac{7.5 \cdot (T - 273.15)}{257.3 \cdot T - 273.15}}$$

- Si es coneix la temperatura de l'estació però no es disposa de la dada d'humitat relativa es fa la suposició d'una atmosfera tipus OACI a excepció de la temperatura al nivell de referència Z_0 que es calcula a partir de la temperatura de l'estació una altitud Z .

$$P_0 = P \left[1 - \frac{\beta_0 (Z - Z_0)}{T_1} \right]^{\frac{\beta_0}{\gamma_0}}$$

$$T_0 = T + \beta_0 (Z - Z_0)$$

- Si no es disposa de dades de temperatura i humitat relativa s'assumeix una atmosfera tipus OACI.

$$P_z = P_0 \left[1 - \frac{\beta_0 (Z - Z_0)}{T_0} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

$$T_0 = T_{OACI} - \beta_0 \cdot Z_0$$

En tots els casos:

P_0 (hPa): pressió atmosfèrica al nivell de referència

P (hPa): pressió atmosfèrica al nivell de l'estació

Z_0 (m): nivell de referència

Z (m): nivell de referència de l'estació

T (K): temperatura al nivell de l'estació

T_V (K): temperatura virtual al nivell de l'estació

e : pressió de vapor a nivell de l'estació

e_{sat} : pressió de vapor saturant a nivell de l'estació

U (%): humitat relativa al nivell de l'estació

β_0 (K m⁻¹): gradient vertical de temperatura a l'atmosfera OACI 6.5·10⁻³ K m⁻¹

T_{OACI} (K): temperatura OACI a nivell mig del mar 288.15 K

R_d (Jkg⁻¹K⁻¹): constant d'aire sec 287.05 J kg⁻¹ K⁻¹

g_0 (ms⁻²): valor estandar de l'acceleració de la gravetat al nivell mig del mar 9.80665 ms⁻²

Per les estacions a una nivell de referència inferior a 1500 metres, la pressió atmosfèrica es reduirà al nivell del mar, és a dir, la Z_0 serà de 0 metres. En el cas d'estacions situades per sobre de 1500 metres, la reducció es farà a 1500 metres, és a dir, la Z_0 serà de 1500 metres.

7. Radiació solar global

7.1. Definició

L'Organització Meteorològica Mundial (OMM) conté una nomenclatura de les magnituds radiomètriques i fotomètriques. Aquesta, està basada en les definicions recomanades per la Comissió de la Radiació de l'Associació Internacional de Metrologia i Ciències de l'Atmosfera (AIMCA) i per la Comissió Internacional de la Il·luminació (CIE).

Segons aquesta nomenclatura, doncs, es pot definir la radiació global com la *radiació hemisfèrica sobre una superfície horitzontal*, i la irradiància com el *flux radiant de qualsevol origen incident sobre un element de superfície*.

En el cas d'estudi es parla de la radiació solar global com de la irradiància solar rebuda sobre una superfície horitzontal, i és la suma de la radiació solar directe i la radiació difusa.

7.2. Mesura de la radiació solar global

Angström va ser el primer de reeixir en la construcció d'un aparell capaç de mesurar la radiació solar directe (pirheliòmetre) a principis de segle XX.

A partir d'aquest èxit, els primers treballs orientats a realitzar un aparell per a la mesura de la radiació global (directe i difusa) van ser d'Abbot i Aldrich cap a l'any 1913. El van anomenar piranòmetre, de les paraules gregues pir (foc), áno (amunt), metre (mesura).

Actualment, s'entén per piranòmetre un radiòmetre dissenyat per a la mesura de la irradiància (en W/m^2) en una superfície plana resultant dels fluxos radiants en el rang de longitud d'ona 0.3 a 3 μm , que correspondria a l'espectre que va de l'UV a l'infraroig, passant pel visible (figures 7-2 i 7-2).

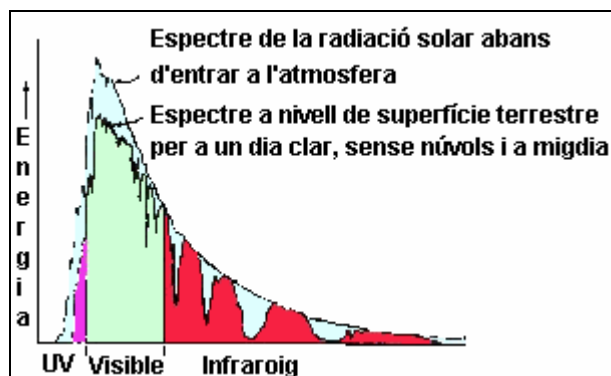


Fig. 7-1. Espectre electromagnètic radiació solar
(Font: www.infomet.fcr.es)

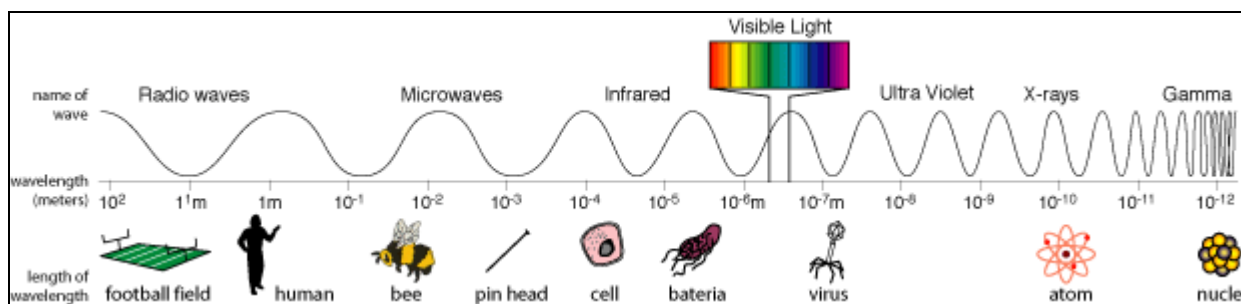


Fig. 7-2. Espectre electromagnètic
(Font: NASA)

De piranòmetres n'hi ha de diverses classes segons el seu principi de funcionament, però per a xarxes d'Estacions Meteorològiques Automàtiques (EMA) els més comuns són els termoelèctrics i els fotoelèctrics.

7.2.1 Piranòmetres termoelèctrics

Es basen en l'electricitat generada a partir de la diferència de temperatura entre dues parts del sensor.

La força electromotriu (f.e.m) generada per diversos termoparells (normalment de coure-constantà) associats en sèrie formen el que s'anomena termopiles (per augmentar el petit voltatge que cadascun dels termoparells genera per ell mateix, de l'ordre de $22\mu\text{V}/^\circ\text{C}$).

Cada termoparell està format per dos conductors metàl·lics diferents units pels seus extrems formant un circuit elèctric. La f.e.m generada depèn de

la naturalesa dels conductors i de la diferència de temperatures en les seves unions.

La relació entre la f.e.m i la temperatura s'estableix amb una llei quadràtica de la forma:

$$\boxed{\varepsilon = a + b \Delta T + c \Delta T^2} \quad (22)$$

On ΔT és la diferència de temperatures entre les dues unions (la freda i la càlida) i a , b i c són tres constants.

Així doncs, els termoparells es basen en l'anomenat *Efecte Seebeck*; efecte termoelèctric pel qual dos conductors metàl·lics units pels seus extrems per mitjà de soldadures formant un circuit elèctric generen una f.e.m si la seva temperatura és diferent.

Normalment els diversos termoparells (habitualment entre 64 i 100) s'imprimeixen a sobre d'un disc ceràmic d'alúmina (Al_2O_3), zirconia (ZrO_2), o d'algun altre compost ceràmic.

La manera de generar l'electricitat necessària per a la mesura del flux radiant a partir de la diferència de temperatures de les unions dels metalls varia segons l'instrument. Uns pinten tot el disc ceràmic de negre connectant unes unions al centre del disc (unions càlides) i les altres al seu extrem en contacte amb el cos de l'aparell (pintat de blanc per dissipar el calor) de forma concèntrica i simètrica (unions fredes), i d'altres fan franges blanques i negres per a connectar les diverses unions en cadascuna de les franges; les fredes blanques i les negres calentes. Aquests segons s'anomenen piranòmetres de Blanc i Negre (Black and White, B&W), com es pot comprovar a la figura 7-4.

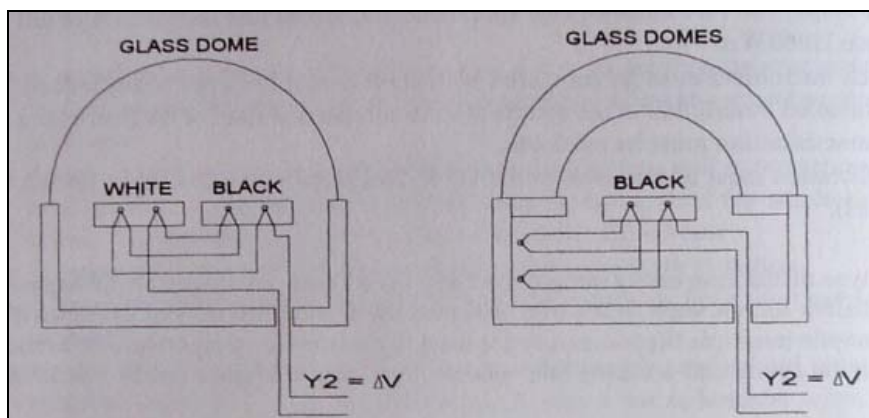


Fig. 7-3. Piranòmetres tipus Black&White
(Font: *Meteorological Measurement Systems*, 2001)

La radiació solar és absorbida pel disc ceràmic negre i, en menor mesura, pel cos del piranòmetre, que farà de dissipador de calor, o per les franges blanques del disc ceràmic (figura 7-4). En el cas de l'alúmina tenir en compte que al centre del disc pintat de negre l'augment de la temperatura serà només d'uns 3°C per a una irradiància de 1000 W/m² generant un voltatge de 4-6 mV, força petit (segons el model CM6B first Class (OMM) de Kipp & Zonen).



Fig. 7-4. Piranòmetre B&W Schenck
(Font: Schenck)

La diferència de temperatures entre les unions càlides i fredes genera un voltatge proporcional a la radiació incident. Així doncs, no és necessari alimentar el piranòmetre per obtenir-ne la mesura, sinó que serà el mateix

aparell que a partir de la radiació generarà un corrent i un voltatge que es podrà mesurar i emmagatzemar.



Fig. 7-5. Piranòmetre Kipp&Zonen CM11
(Font: Kipp&Zonen)

Com que l'element sensor és sensible en un ampli rang de l'espectre de radiació, els piranòmetres porten una, o dues (la majoria de piranòmetres), semiesferes de vidre o quars (anhídrid de silici, SiO_2 ; mineral) que filtren les longituds d'ona fora del rang de treball desitjat (figura 7-5), bàsicament les d'ona llarga en l'espectre de l'infraroig.

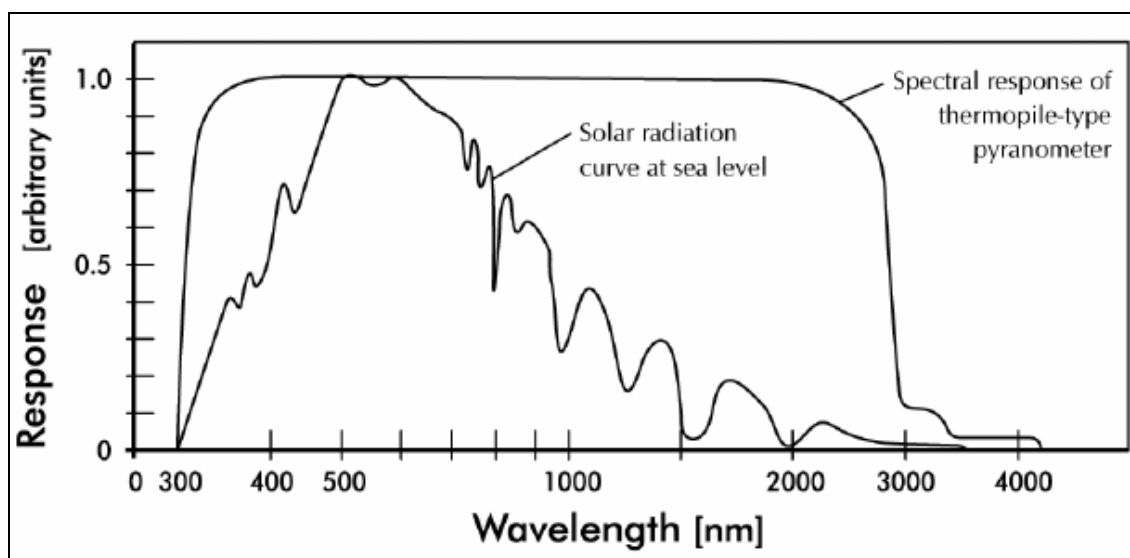


Fig. 7-6. Espectre d'irradiància solar a la superfície terrestre i resposta espectral d'un piranòmetre de termopila
(Font: Kipp&Zonen)

A més a més, protegeixen els sensors del vent, la precipitació o qualsevol altre element extern que influeixi en la mesura i permeten la transmissió equitativa de la radiació solar directe per a cada posició del sol. Quan l'aparell no està hermèticament segellat de forma permanent s'acostuma a col·locar un dessecant a la base de l'instrument per evitar la condensació i la influència del vapor d'aigua (figura 7-7).

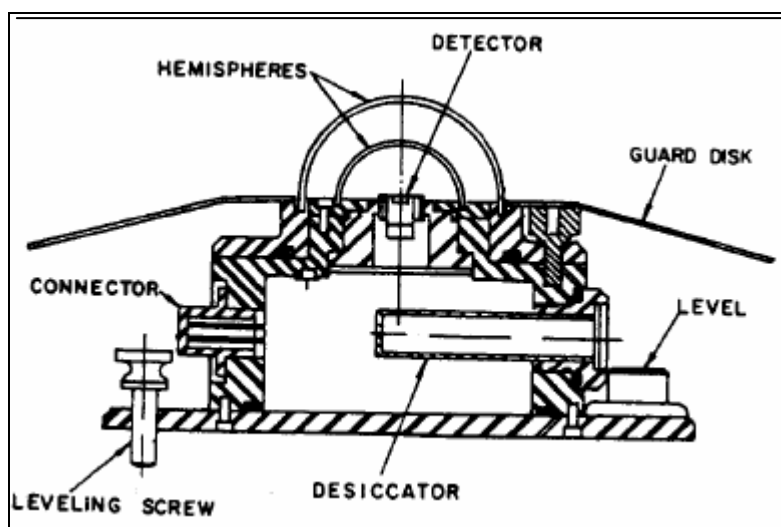


Fig. 7-7. Esquema piranòmetre Eppley
 (Font: Eppley Laboratories)

Exemple 7-1

Mesura d'un piranòmetre termoelectric amb un datalogger Campbell CR1000

S'ha triat el piranòmetre Kipp&Zonen CMP6.



Fig. 7-8. Piranòmetre Kipp&Zonen CMP6
(Font: Kipp&Zonen)

Specification	Unit	CMP 6/ CMA 6	Definition
Spectral range	μm	310 - 2800	50 % response point
Sensitivity	$\mu\text{V/W/m}^2$	5 to 15	Signal output for 1 W/m^2 irradiance
Impedance	Ω	20 to 200	At instrument housing connector
Response time	s	< 18	95% of final value
		< 6	63 % of final value
Non-linearity	%	< 1	From 0 to 1000 W/m^2 irradiance
Temperature dependence of sensitivity	%	< 4	Variation in range - 10 °C to + 40 °C from value at + 20 °C *(- 20 °C to + 50 °C)
Tilt error	%	< 1	Deviation when facing downwards
Zero offset A	W/m^2	< 15	At 0 to - 200 W/m^2 of IR net radiation
Zero offset B	W/m^2	< 4	At 5 K/h temperature change rate
Operating temperature	°C	-40 to +80	Storage temperature is the same
Field of view		180°	Hemispherical
Directional error	W/m^2	< 20	At 80° with 1000 W/m^2 irradiance
Maximum irradiance	W/m^2	2000	Level above which damage may occur
Non-stability	%	< 1	Variation in sensitivity per year
Humidity	% RH	0 - 100	Relative Humidity
Uncertainty in daily total	%	< 5	95 % confidence level

Taula 7-1. Especificacions piranòmetre Kipp&Zonen CMP6
(Font: Kipp&Zonen)

El voltatge màxim de sortida del sensor depèn del seu factor de calibratge. Considerant un factor de $15.56 \mu\text{V/Wm}^2$ es pot conèixer el voltatge màxim multiplicant aquest valor per la irradiància màxima esperada, uns 1100 W/m^2 .

$$15.56 \mu\text{V/Wm}^2 * 1100 \text{ W/m}^2 = 17116 \mu\text{V} = 17.116 \text{ mV}.$$

En general, els valors de sortida del sensor no superaran mai els 25mV.

La sortida del sensor és en voltatge, per la qual cosa es fa la lectura amb la instrucció **VoltDiff**.

VoltDiff (Dest, Reps, Range, DiffChan, RevDiff, SettlingTime, Integ, Mult, Offset)

Parameter & Data Type	Enter			
Dest Variable or Array	The Variable in which to store the results of the instruction. When Reps are used the results are stored in an array with the variable name. An array must be dimensioned to have elements for all the Reps.			
Reps Constant	The number of repetitions for the measurement or instruction.			
Range Constant	Alpha Code	Voltage Range		
	mV5000	± 5000 mV		
	mV2500	± 2500 mV		
	mV250	± 250 mV		
	mV25	± 25 mV		
	mV7_5	± 7.5 mV		
	mV2_5	± 2.5 mV		
	Autorange	mV2_5 – mV5000	Selects range (Sect. 3.1)	
	mV250C	± 250 mV	The mV250C, mV25C, mV7_5C, and mV2_5C ranges pull the channel into common mode range and check for open input	
	mV25C	± 25 mV		
mV7_5C	± 7.5 mV			
mV2_5C	± 2.5 mV			
AutorangeC	mV2_5 – mV250	Selects C range		
DiffChan Constant	The differential channel number on which to make the first measurement. When Reps are used, subsequent measurements will be automatically made on the following channels. If the channel is entered as a negative number, all reps occur on that channel.			
RevDiff Constant	Code	Value	Result (Reversing requires twice as much time to complete)	
	False	0	Signal is measured with the high side referenced to the low	
	True	≠0	A second measurement is made after reversing the inputs to cancel offsets	
SettlingTime Constant	The time in microseconds to delay between setting up a measurement (switching to the channel, setting the excitation) and making the measurement. (1 microsecond resolution)			
	Entry	Voltage Range	Integration	Settling Time
	0	All	250 μS	450 μS (default)
	0	All	_50Hz, _60 Hz	3 mS (default)
	≥100	All	All	μS entered
Integ Constant	The time spent on integration in microseconds for each of the channels measured.			
	Entry		Integration	
	250		250 μS	
	_60Hz or 16667		16,667 μS (reject 60 Hz noise)	
	_50 Hz or 20000		20,000 μS (reject 50 Hz noise)	
Mult, Offset Constant, Variable, Array, or Expression	A multiplier and offset by which to scale the raw results of the measurement. See the measurement description for the units of the raw result; a multiplier of one and an offset of 0 are necessary to output in the raw units. For example, the TCDiff instruction measures a thermocouple and outputs temperature in degrees C. A multiplier of 1.8 and an offset of 32 will convert the temperature to degrees F.			

Taula 7-2. Paràmetres instrucció VoltDiff
(Font: Manual CR1000, Campbell Scientific)

VoltDiff (RS,1,mV25,1,True,0,_50Hz,64.267352,0)

Paràmetre 1 – Dest

RS Nom de la variable en la qual es guarda el resultat

Paràmetre 2 – Reps

1 Un sol sensor

Paràmetre 3 – Range

mV25 Rang d'entrada.

Com s'ha vist, 25mV és suficient per la lectura del sensor.

Paràmetre 4 – Differential Channel

1 Canal diferencial on connectem el sensor per la mesura (1H-1L).

Paràmetre 5 – RevDiff Inputs reversed

True Es realitza una segona mesura canviant l'ordre dels canals d'entrada. Primer el canal alt contra el baix (1 respecte el 2), després el baix contra l'alt (el 2 respecte l'1)

Paràmetre 6 – Settling Time

0 Temps d'establiment. És el temps necessari per començar a realitzar la mesura

En aquest cas el paràmetre val 0, que correspon a un *delay* de 3 ms, que en invertir les entrades s'haurà de multiplicar per dos, per tant, 6 ms.

Paràmetre 7 – Integ Integration

_50Hz Per realitzar la mesura del senyal s'integra durant un temps determinat, i s'utilitza aquests temps per reduir el soroll.

En aquest cas el temps d'integració és de 20ms, que redueix el soroll de línia d'alimentació (50Hz AC).

Paràmetre 8 – Mult Multiplicador

64.267352 Per convertir la sortida de voltatge en W/m²/mV s'ha de realitzar la següent operació:

$$\text{Mult} = 1000 / S$$

S = factor calibratge sensor en $\mu\text{V}/\text{Wm}^2$.

En aquest cas $\text{Mult} = 1000 / 15.56 = 64.267352 \text{ Wm}^2/\text{mV}$

Per obtenir les lectures en altres unitats:

TABLE 5-1. Multipliers Required for Flux Density and Total Fluxes		
Units	Multipliers	Output Processing
Wm^{-2}	m	Average
MJm^{-2}	$m \cdot t \cdot 0.000001$	Total
kJm^{-2}	$m \cdot t \cdot 0.001$	Total
$cal\ cm^{-2}$	$m \cdot t \cdot 0.0239 \cdot 0.001$	Total
$cal\ cm^{-2}\ min^{-1}$	$m \cdot 1.434 \cdot 0.001$	Average
m = calibration factor in Wm^{-2}/mV t = datalogger program execution interval in seconds		

Taula 7-3. Multiplicadors piranòmetres Kipp&Zonen unitats
 (Font: Manual Campbell CMP6)

Paràmetre 9 – *Offset*

0

Connexió del sensor al *datalogger*

Els colors dels cables i els canals del *datalogger* estan definits específicament per aquest exemple.

Cable vermell: Canal d'entrada número 1 (1H)

Cable blau: Canal d'entrada número 2 (1L)

Malla: $\perp$

Pont: S'ha de fer un pont entre el canal d'entrada número 2 i la massa analògica $\perp$ per mantenir el senyal dins del rang en mode comú.

7.2.2 Piranòmetres fotoelèctrics

Es basen en l'efecte fotovoltaic, a partir del qual es pot convertir l'energia solar en electricitat (figura 7-8).



Fig. 7-9. Piranòmetre fotovoltaic LI-200
(Font: LI-Cor)

Els fotons procedents de la radiació solar bombardegen electrons de la banda de valència a la banda de conducció, de manera que s'entreguin els electrons de la banda de conducció a la càrrega.

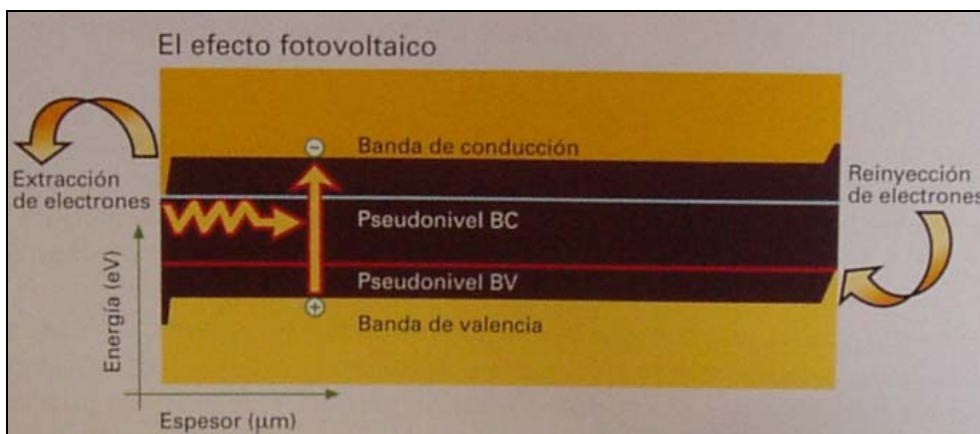


Fig. 7-10. Esquema Efecte fotoelèctric
(Font: Fundació Gas Natural)

Els piranòmetres fotovoltaics normalment utilitzen semiconductors de silici o seleni, i el seu rang de mesura s'acostuma a estendre dels 400 als 1100 nm; un rang força més petit que els termoelèctrics.

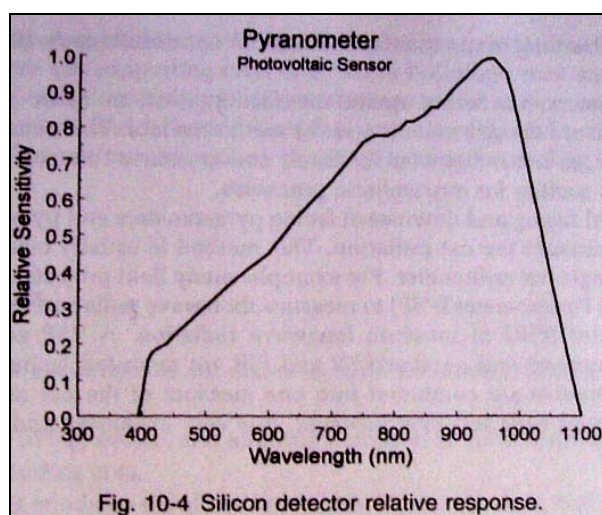


Fig. 7-11. Rang mesura piranòmetre fòtovoltaic de silici
 (Font: *Meteorological Measurement Systems*, 2001)

A més a més, la seva resposta no és lineal, obtenint un màxim als 1000 nm.

Malgrat aquests inconvenients, són força més barats que els sensors basats en termopiles.

8. Gruix de neu

8.1. Definició

Distància perpendicular des del sensor a la superfície de mesura; en aquest cas, la neu.

8.2. Mesura del gruix de neu

La mesura del gruix de neu en les Estacions Meteorològiques Automàtiques (EMA) es realitza principalment amb sensors d'ultrasons.

8.2.1 Sensors ultrasònics de gruix de neu

El sensor té un transductor que envia impulsos d'ultrasons (més enllà del que és capaç de captar l'oïda humana, normalment dels 16 Hz als 20 KHz) amb una freqüència d'entre 40 kHz i 250 kHz i, en funció del temps que empra l'impuls en anar i tornar (eco) al sensor, es calcula la distància a la superfície a mesurar.

$$D = \frac{1}{2} * V * t$$

(23)

D = Distància

V = Velocitat del so

t = temps transcorregut entre l'emissió i la recepció de l'impuls

Com que la velocitat del so varia de forma significativa en funció de la temperatura la lectura del sensor s'ha de compensar a partir d'una equació del tipus:

$$V_s = V_{so} \sqrt{1 + \frac{T}{273}}$$

(24)

Vs = velocitat ona sonora

V_{so} = velocitat ona sonora a 0°C

T = temperatura absoluta (en graus Kelvin)

Els impulsos d'ultrasons que emeten els sensors tenen forma cònica, per la qual cosa el sensor està subjecte a una sèrie de problemàtiques que s'han de tenir en compte:

- a) El sensor ha d'estar perpendicular a la superfície que ha de mesurar.



Fig. 8-1. Perpendicularitat del feix d'ultrasons
(Font: Manual SR50 Campbell Scientific)

- b) La superfície a mesurar ha de ser suficientment gran i l'eco suficientment potent.
- c) La superfície no pot ser rugosa o incompleta.



Fig. 8-2. Rugositat de la superfície
(Font: Manual SR50 Campbell Scientific)

- d) La superfície a mesurar no pot ser una mala reflectora del so (la neu de baixa densitat, per exemple).
- e) En els sensors d'ultrasons en els quals s'utilitza el mateix transductor com a emissor i com a receptor existeix un temps mínim d'espera entre l'emissió i

la lectura. Això implica una distància mínima (D_{min}) proporcional al temps de relaxació del transductor a partir de la qual el sensor mesura dins de les especificacions tècniques.

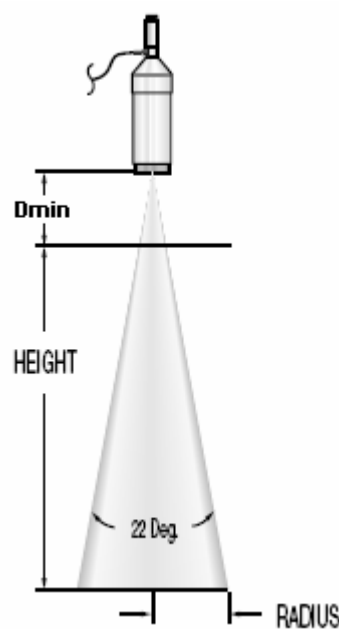


Fig. 8-3. Distància mínima mesura sensor distància ultrasònic
 (Font: Manual SR50 Campbell Scientific)

Exemple 8-1

Mesura d'un sensor de gruix de neu d'ultrasons amb un datalogger Campbell CR1000

En aquest cas s'ha triat el sensor de gruix de neu de Campbell Scientific SR50.

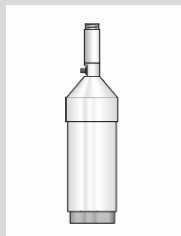


Fig. 8-4. Sensor de gruix de neu SR50

(Font: Manual SR50 Campbell Scientific)

Measurement Time:	0.6 seconds typical 3.0 seconds max.
Measurement Range:	0.5 to 10 metres
Accuracy:	±1 cm or 0.4% of distance to target (whichever is greater) requires external temperature compensation
Resolution:	0.1mm
Beam Acceptance Angle:	Approximately 22°
Operating Temperature:	-30°C to +50°C Standard (extended temperature available)

Fig. 8-5. Especificacions tècniques gruix de neu SR50

(Font: Manual SR50 Campbell Scientific)

Com es pot veure en les especificacions del fabricant, la distància mínima de mesura és de 0.5 m, i el rang total màxim de 9.5 m.

El sensor té un transductor que envia impulsos d'ultrasons amb una freqüència de 50 KHz i, en funció del temps que empra l'impuls en anar i tornar (eco) al sensor, es calcula la distància a la superfície a mesurar. A més a més, permet configurar diversos tipus de sortida i de comunicacions a través d'una sèrie de *jumpers* localitzats a l'interior del sensor. En el manual d'aquest es pot trobar el procés detallat per poder accedir-hi.

ADDRESS	OUTPUT FORMAT
0	Pulse Train 1000 Hz 2.5mm/Pulse
1	Pulse Train 100 Hz 2.5mm/Pulse
2	Pulse Train 1000 Hz 1cm/Pulse
3	Pulse Train 100 Hz 1cm/Pulse
4	Pulse Train 1000 Hz 0.1 inch/Pulse
5	Pulse Train 100 Hz 0.1 inch/Pulse
6	RS-232 1200 BAUD (3 Targets (Meters) with Quality Numbers)
7	RS-232 300 BAUD (3 Targets (Meters) with Quality Numbers)
8	TTL 1200 BAUD (3 Targets (Meters) with Quality Numbers)
9	TTL 300 BAUD (3 Targets (Meters) with Quality Numbers)
10	RS-232 1200 BAUD (First Target (Meters))
11	RS-232 300 BAUD (First Target (Meters))
12	TTL 1200 BAUD (First Target (Meters))
13	TTL 300 BAUD (First Target (Meters))
14	RS-232 9600 BAUD (Single Target (Meters))
15	Factory Test Mode

Fig. 8-6. Formats sortida gruix de neu SR50
(Font: Manual SR50 Campbell Scientific)

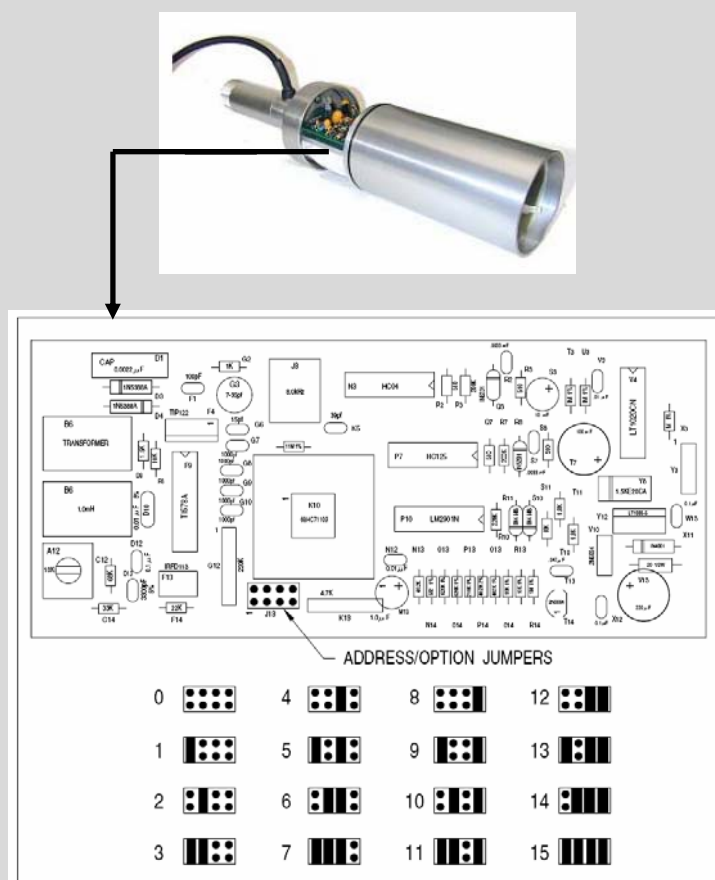


Fig. 8-7. Localització jumpers configuració gruix de neu SR50
(Font: Manual SR50 Campbell Scientific)

El sensor ve de fàbrica amb la configuració 0, que en aquest cas ja es considera correcta.

La lectura es realitza amb el protocol de comunicacions SDI-12, que a partir d'una sèrie de comandes permet programar la informació de sortida segons el que es vulgui obtenir. Les diverses opcions són:

CR10X and CR23X P105 Parameter 2 Options	SDI-12 COMMANDS When using non-Campbell Loggers	FUNCTION	DATA OUTPUT
0	aM	First Target (Metres)	D1
1	aM1	First Target (Metres) with Quality Number	D1,Q1
2	aM2	Multiple Targets (Metres)	D1,D2,D3
3	aM3	Multiple Targets (Metres) with Quality Numbers	D1,D2,D3,Q1,Q2,Q3
4	aM4	First Target (Feet)	D1
5	aM5	First Target (Feet) with Quality Number	D1,Q1
6	aM6	Multiple Targets (Feet)	D1,D2,D3
7	aM7	Multiple Targets (Feet) with Quality Numbers	D1,D2,D3,Q1,Q2,Q3
8	aM8	First Target (Metres) No Retries	D1
N/A	aD0	Send Data	DEPENDENT UPON COMMAND SENT
10	aV	Start Verification calculates ROM Signature	NUMERIC SIGNATURE
	aI	Send Identification	012CAMPBELLSR50 1.1 NOTE: There are 2 spaces between SR50 and 1.1
0--	aC	Concurrent Measurement*	D1
n--	aCn	Concurrent Measurements*	Same as M – M8

Where a = address of SDI-12 device.
Where n = numbers 1 to 8.
* = see APPENDIX A for details about Concurrent Measurements.

Fig. 8-8. Opcions sortida i programació SDI-12 gruix de neu SR50
(Font: Manual SR50 Campbell Scientific)

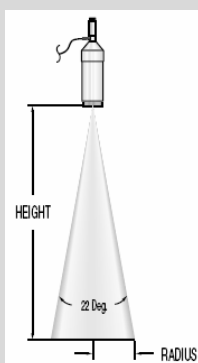
L'opció escollida és la 1, que proporciona una lectura del gruix de neu i un valor de qualitat de la mesura (*quality number*). Aquests valors varien entre 162 i 600, sent 0 quan no s'aconsegueix realitzar la mesura.

Valors inferiors a 210 es consideren de bona qualitat, i superiors a 300 que hi ha un cert grau d'incertesa en la mesura. Algunes de les causes que provoquen deficiències en la lectura són les que s'han comentat en el punt 7.2.1. ePer tant, s'hauran de tenir en compte el terreny i l'alçada a la qual s'instal·la el sensor per garantir-ne el bon funcionament.

És recomanable, doncs, aplicar certs filtres per garantir la qualitat de les dades i, també, per evitar que quan no s'aconsegueix fer la mesura (el *quality number* val 0) es registri la distància entre el sensor i la superfície a mesurar (la distància inicial).

El feix d'impulsos del SR50 surt amb un angle de 22°, per la qual cosa, la relació entre el radi del con i l'alçada del sensor ve donada per l'equació:

$$\text{CONE}_{\text{radius}} = 0.194 (\text{CONE}_{\text{height}})$$



En aquest cas, s'instal·larà el sensor a una alçada de 4 m, per la qual cosa no pot haver-hi cap obstacle en un radi respecte la perpendicular de:

$$R = 0.194 * 4 = 0.776 \text{ m}$$

La lectura del sensor es realitza amb la instrucció **SDI12recorder**.

SDI12Recorder (Dest, SDIPort, SDIAddress, SDICommand, Multiplier, Offset)

The SDI12Recorder instruction is used to retrieve the results from an SDI-12 sensor.

Each execution of the SDI12Recorder instruction sends an (address)M! and then an (address)D0!

M! instructs the sensor to make the measurement; D0! is a request for the data.

SDI12recorder (SR50(),1,0,"M1!",1,0)

Paràmetre 1 – Dest

SR50() Nom de la variable en la qual es guarda el resultat

En aquest cas s'ha definit una variable del tipus:

Public SR50(2)

Fromada per

Alias SR50(1)=Lectura_sensor

Alias SR50(2)=Qualitat_del_Senyal

Paràmetre 2 – SDIPort

1 Es connecta en el port de control 1

Paràmetre 3 – SDIAddress

0 Configuració 0

Paràmetre 4 – SDICommand

M1! Una lectura i un *quality number*

Paràmetre 5 – Multiplier

1

Paràmetre 6 – *Offset*

0

Un cop feta la lectura i emmagatzemada a la variable *Lectura_sensor* cal obtenir la distància real del gruix de neu i aplicar els filtres pertinents:

Primer es corregeix la lectura segons la temperatura actual (*T1seg*), la qual cosa implica que s'ha de disposar d'un sensor de temperatura.

$\text{Distancia_sensor_a_neu} = \text{Lectura_sensor} * (\text{SQR}((\text{T1seg} + 273.15) / 273.15))$

Seguidament es defineix la distància inicial (altura sensor).

Const Distancia_inicial=2.50

I finalment es fa el càlcul del gruix de neu

$\text{Gruix_neu} = \text{Distancia_inicial} - \text{Distancia_sensor_a_neu}$

Ja només queda aplicar els filtres: el primer segons la distància mínima de 0.5 m entre transductor i l'objecte de mesura, i el segon segons la qualitat de la mesura (*quality number*).

Const limit=0.50

If Gruix_neu >(Distancia_inicial - limit) then Gruix_neu=-6999

If Qualitat_del_senyal >=300 or Qualitat_del_senyal <1 then Gruix_neu=-6999

Connexió del sensor al *datalogger*

Els colors dels cables i els canals del *datalogger* estan definits específicament per aquest exemple.

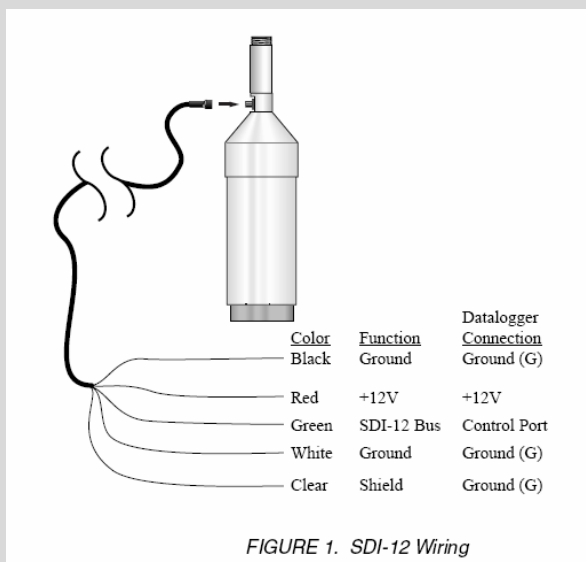


Fig. 8-9. Cablejat gruix de neu SR50 segons fabricant
(Font: Manual SR50 Campbell Scientific)

Cable vermell: Alimentació + 12V

Cable verd: Port de control C1

Cable blanc: G

Cable negre: G

Malla: ⊥

9. Estació Meteorològica Automàtica (EMA): cas pràctic

9.1. *Elecció dels sensors*

Els sensors triats estan extrets dels exemples inclosos en les diverses variables meteorològiques ja exposades.

En aquest cas, s'han escollit els següents sensors:

- a) Sensor de temperatura ambient Rotronic MP106A T7 (Pt100 amb sortida resistiva) amb pont mig 4WPB100 de Campbell (exemple 2-1).



- b) Sensor d'humitat relativa Vaisala HMP45A (exemple 3-1).



- c) Sensor de precipitació de balancí Theodor Friedrichs 7051 (exemple 4-2).



- d) Sensor de direcció i velocitat del vent Young 05103 (exemple 5-1).



- e) Sensor de pressió atmosfèrica de Vaisala PTB101B (exemple 6-1).



- f) Sensor de radiació solar global Kipp&Zonen CMP6 (exemple 7-1).



9.2. Elecció del datalogger

Com s'ha comentat a l'apartat 1, el *datalogger* triat és el CR1000 de Campbell Scientific.

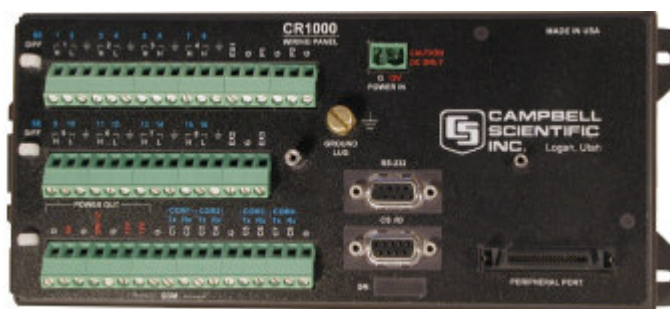


Fig. 9-1. Datalogger Campbell CR1000
(Font: Campbell Scientific)

9.3. Elecció del sistema de comunicacions i alimentació

9.3.1 Sistema de comunicacions

Si no es vol haver d'anar a l'EMA periòdicament a recollir les dades obtingudes dels sensors es pot optar per enviar-les via remota en un centre de recollida. Aquest, només haurà de disposar d'un ordinador amb el programa de Campbell Loggernet (realitza les trucades i extreu les dades del *datalogger*, entre d'altres funcions), i d'un mòdem GSM (amb una antena més o menys gran en funció de la cobertura de l'operador en qüestió) per poder efectuar les trucades a l'EMA; en el cas que es vulguin les comunicacions via mòdem, com en aquest exemple.

Per tant, serà necessari un mòdem i una antena per a l'EMA i un altre mòdem i antena pel centre de recollida.

S'ha triat el mòdem Siemens MC35i.



Fig. 9-2. Mòdem GSM/GPRS 900/1800 Siemens MC35i
(Font: Siemens)

El mòdem s'ha de configurar perquè funcioni amb el CR1000. Per fer-ho s'han de seguir els següents passos:

- a) Connectar el mòdem amb el PC pel port sèrie amb un cable RS232.
- b) Obrir l'Hyperterminal de l'ordinador de la següent manera:

Programes ---> Accessoris ---> Comunicacions ---> Hyperterminal

- c) Obrir una nova connexió amb el nom que es vulgui
- d) Configuració del port amb els valor predeterminats

Anar a Arxius ---> Propietats ---> Configuració ASCII --->
Selecció ---> i marcar: Ecos dels caràcters escrits localment

Ara ja es poden escriure les comandes Hayes (conegudes com AT) per configurar el mòdem adequadament.

Al manual del mòdem (o per internet) es poden trobar les diverses comandes.

Per tant, s'haurà d'escriure a la pantalla de l'Hyperterminal les següents instruccions (totes seguides de la tecla d'enter):

- e) AT

Comprovació de que hi ha comunicació amb el mòdem

- f) AT&F=0

Es carrega la configuració per defecte que porta el mòdem de fàbrica

g) ATV0

El mòdem retornarà resultats numèrics, no pas paraules

h) ATX0

Codis bàsics de connexió: *OK, CONNECT, RING, NO CARRIER / ERROR*

i) ATS0=1

El valor de S0 = 1. El número de trucades (*rings*) a partir del qual ha de contestar el mòdem és 1. Si el valor fos 0 el mòdem no contestaria mai automàticament.

j) AT&W

Guarda la configuració actual en el perfil 0 de la memòria RAM

Mòdem configurat per establir comunicacions amb el *datalogger* Campbell CR1000. Ja es pot sortir de l'Hyperterminal.

L'antena per les comunicacions GSM de l'EMA que s'ha triat és omnidireccional (radia en quasi totes les direccions), i és de la casa Grauta, model GT-900/1800.



Fig. 9-3. Antena Grauta FT-900/1800

Pel centre de recepció de dades és probable que amb una petita antena que pot venir amb el mateix mòdem n'hi hagi prou per a realitzar les trucades a l'EMA. Si no és el cas, s'hauran de comprar dues antenes com l'anterior.

9.3.2 Sistema d'alimentació

S'ha triat l'alimentació a través de placa solar Siemens SP 10 (12V 12W) per tenir total autonomia en l'elecció de la ubicació de l'EMA.



Fig. 9-4. Panell solar 10W Siemens SP10

Per regular el flux d'energia entre la placa solar i l'acumulador (la bateria) és necessari incorporar un regulador de càrrega. S'ha triat el Solsum 5.0, que admet un corrent màxim de 5 A, suficient per regular el corrent subministrat per plaques solars de fins uns 75 W.



Fig. 9-5. Regulador de càrrega Solsum 5.0

Per emmagatzemar l'energia subministrada per la placa solar s'ha triat una bateria de 12V i 12 Ah de la casa Enerbat.



Fig. 9-6. Bateria plom Enerbat 12V 12Ah

9.4. Criteris d'ubicació d'una EMA i d'instal·lació de sensors

Resum dels criteris d'ubicació d'Estacions Meteorològiques Automàtiques (EMA) i instal·lació de sensors meteorològics que utilitza el SMC:

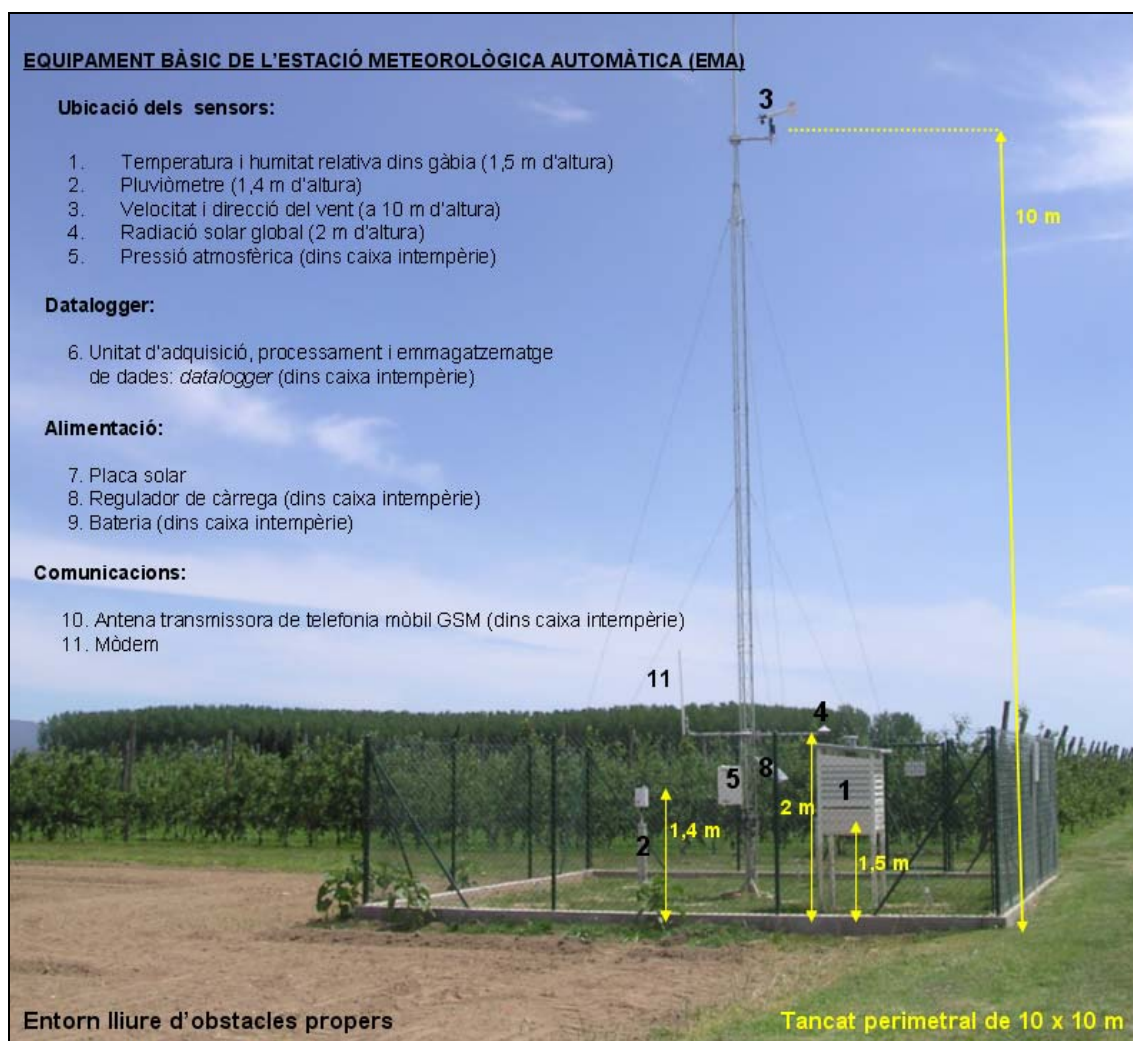
A) Referent a la ubicació EMA:

- La ubicació de l'estació ha de ser en un lloc prou lliure d'obstacles perquè les seves dades puguin ser representatives de l'entorn. L'emplaçament d'una estació meteorològica automàtica ha de situar-se en llocs amb lliure circulació de l'aire i visibilitat en totes les direccions. El terreny ha d'estar suficientment allunyat d'obstacles, edificacions i arbres per evitar que la seva influència pugui modificar les observacions meteorològiques.
- És recomanable que el terreny sobre el que s'assenta una estació sigui horitzontal, amb gespa o coberta vegetal pròpia de la zona i de curta alçada (menor a 10 cm).
- Ha d'evitar-se la instal·lació d'estacions en llocs on les condicions meteorològiques estiguin fortament influenciades per factors locals (com fondalades, vessants de gran inclinació, proximitat d'estancs i de llacs de petita extensió, etc.) de manera que les observacions no siguin representatives de l'àrea circumdant, menys en aquells casos en els que, precisament, es pretengui mesurar la influència d'aquests factors sobre les variables meteorològiques.

B) Referent a la instal·lació dels sensors:

- Els sensors de temperatura i humitat relativa han de situar-se a una alçada entre 1,25 i 2,00 m respecte a la superfície del sòl. Han de protegir-se de l'acció directa del sol i de la pluja mitjançant una gàbia o abric meteorològic (el més recomanable es posar una gàbia meteorològica de fusta amb doble persiana de fusta i orientada al nord, o un abric amb aspiració que faci circular l'aire al seu través, però existeixen abrics de plàstic en forma de platets que també fan aquesta funció). Els termòmetres han d'estar allunyats de fonts artificials de calor perquè no afectin a la mesura de la temperatura de l'aire.
- El pluviòmetre ha d'instal·lar-se en terreny horitzontal i a una distància de qualsevol obstacle de com a mínim dos vegades d'alçada del mateix. El pluviòmetre ha de situar-se de manera que la boca quedi per sobre del nivell màxim esperat de la capa de neu (en aquells llocs on es produeixi) i a una alçada a la que no arribi l'aigua que pugui esquitxar des del sòl. En condicions normals la boca del pluviòmetre s'ha de situar a una alçada no superior a 150 cm, assegurant la seva horitzontalitat.

Els sensors per a la mesura del vent han d'estar instal·lats, sempre que sigui possible, a 10 m d'alçada. Perquè el vent mesurat sigui representatiu, l'anemòmetre ha d'estar allunyat dels obstacles més pròxims a una distància de com a mínim 10 vegades l'altura d'aquests.



Font: SMC

Fig. 9-7. Esquema equipament bàsic d'una EMA

9.5. *Mostreig i registre dels sensors*

A partir de les recomanacions de l'OMM i de la norma UNE 500520 es fa un mostreig cada segon, i un registre deu minutal de tots els sensors.

De la temperatura de l'aire i de la humitat relativa es fa un càlcul intermig per extreure'n el valor instantani representatiu, que és una mitjana minutal de les seixanta mostres; que servirà per calcular el valor deu minutal fent la mitjana de les deu mostres minutals.

De la velocitat i la direcció del vent es fa un registre cada deu minuts de les següents variables:

Velocitat del vent vectorial, direcció del vent vectorial utilitzant un vector unitari, i desviació estàndard de la direcció del vent utilitzant l'algorisme de Yamartino.
Velocitat del vent escalar, direcció del vent vectorial, i desviació estàndard de la direcció del vent utilitzant l'algorisme de Campbell.

El càlcul de totes aquestes variables té relació amb les diverses aplicacions que es pugui donar als registres del vent (models de dispersió, energètics, meteorologia, etcètera). En general, però, per aplicacions meteorològiques es recomana utilitzar els valors escalars del vent, que sempre seran iguals o superiors als vectorials.

Per aquest motiu, el valor de la ratxa o ràfega màxima s'obté escollint el valor màxim del promig vectorial de la velocitat del vent en 3 segons registrat en cada període d'un minut.

El càlcul de la ratxa a partir d'aquest registre promig efectuat cada 3 segons és la conseqüència de considerar el mínim interval de temps que l'aire en moviment pot tenir l'extensió horitzontal suficient necessària per causar tot el seu efecte. Es tracta, doncs, d'un conveni establert segons el qual les ratxes succeïdes en intervals menors a aquests 3 segons no són prou significatives per a ser considerades com a tals.

El valor de direcció de la ratxa o ràfega màxima s'obté escollint el valor mig escalar de les mostres utilitzades per al càlcul de la ratxa màxima de la velocitat del vent.

Els registre extrem màxim de la velocitat i la direcció del vent va acompanyat de l'hora a la qual s'ha donat l'extrem, i es genera cada deu minuts.

Per la temperatura i la humitat relativa es genera un registre extrem màxim i mínim (amb l'hora a la qual s'han produït) cada deu minuts.

Pel pluviòmetre de balanci es fa un registre continu del total de pluja cada deu minuts i el valor màxim de precipitació en un minut (en ambdós casos zero, si no se n'ha produït), i un registre discret cada minut només si s'ha produït precipitació..

Tenir registres minutals pot servir per aplicar a posteriori les corbes de calibratge del pluviòmetre i corregir la dada original; en el cas que es disposi d'elles o es puguin obtenir en un futur.

Per la irradiància solar global es fa un registre promig de període i la seva desviació estàndar cada deu minuts.

Per la pressió atmosfèrica es fa un registre promig de període, el valor màxim i el valor mínim.

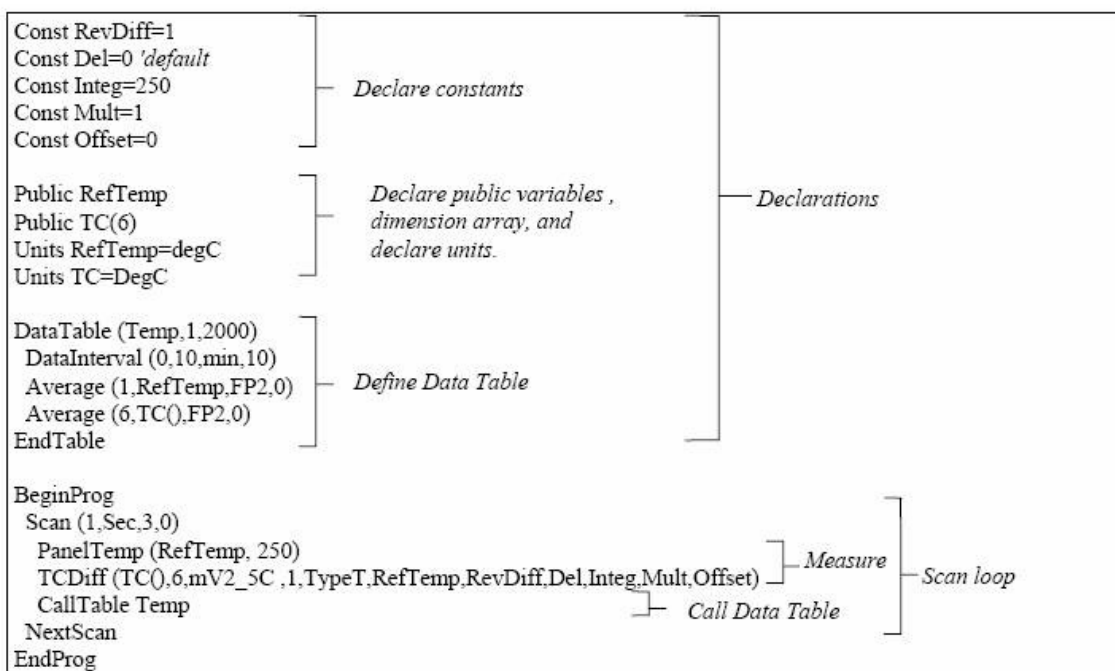
Finalment, comentar la variable *booleana* de manteniment (Flag_manteniment) i els dos registres auxiliars: Flag_m, i Flag2_m. Amb un registre de 0 (sense manteniment) o de -1 (fent manteniment), etiquetem els valors que es generen durant els manteniments per a un tractament diferent, ja que sovint es veuen condicionat per la manipulació dels sensors.

El tècnic de camp activarà el Flag_manteniment (el posarà a *true*) quan comenci a realitzar el manteniment, i el tornarà a *false* quan acabi.

S'han incorporat dues variables auxiliars (Flag_m, Flag2_m) perquè si en qualsevol moment del període en qüestió s'activa el flag de manteniment, les variables auxiliars de manteniment romanguin actives fins que no s'acabi el període de registre, de manera que el tècnic no s'hagi d'esperar a que es produeixin els registres abans no pugui desactivar el Flag_manteniment.

9.6. Programa de l' EMA

Abans del programa de l'estació es presenta un esquema de programa tipus extret del manual del CR1000 per familiaritzar-se amb la seva nomenclatura i estructura.



'CR1000 Series Datalogger

'Programa del projecte: "Problemàtiques i tecnologies emprades en les estacions meteorològiques automàtiques (EMA). Cas pràctic"

'Autor: Roger Vendrell i Soler

'Declaracio de variables

```

Public T1seg,HumR1seg,RS,RSacum,Bat,Patm,Pluja,PL1m
Public T1min,HumR1min,VV3Seg,DV3Seg,Pluja1m
Public DV10m,VV10m,VV10mesc,DV10mesc
Public Rs_R0
    
```

```

Public Flag_manteniment as boolean
Public Flag_m,Flag2_m
    
```

'Unitats

```

Units T1seg=Graus C
Units T1min=Graus C
Units HumR1min=%
Units RS=W/m2
Units RSacum=W/m2
Units Patm=hPa
    
```

Units Bat=Volts
 Units Pluja=mm
 Units Pluja1m=mm
 Units DV10m=Graus
 Units VV10m=m/seg
 Units VV3Seg=m/seg
 Units DV3seg=Graus

'Taula periode deuminutal

```
DataTable (deuminut,1,-1)
    DataInterval (0,10,Min,0)
    Sample (1,Flag_m,boolean)
    Sample (1,Bat,FP2)
    Average (1,T1min,FP2,False)
    Maximum (1,T1min,FP2,False,True)
    Minimum (1,T1min,FP2,False,True)
    Average (1,HumR1min,FP2,False)
    Minimum (1,HumR1min,FP2,False,True)
    Maximum (1,HumR1min,FP2,False,True)
    WindVector (1,VV10m,DV10m,FP2,False,0,0,2)
    WindVector (1,VV10mesc,DV10mesc,FP2,False,0,0,0)
    Maximum (1,VV3Seg,FP2,False,True)
    SampleMaxMin (1,DV3Seg,FP2,False)
    Totalize (1,Pluja,FP2,False)
    Maximum (1,PL1m,FP2,False,True)
    Average (1,RS,FP2,False)
    StdDev (1,RS,FP2,False)
    Average (1,Patm,IEEE4,False)
    Maximum (1,Patm,IEEE4,False,True)
    Minimum (1,Patm,IEEE4,False,True)
EndTable
```

'Taula pluja minutal

```
DataTable (Pluja1m,PL1min,-1)
    Datainterval (0,1,Min,0)
    Sample(1,PL1min,FP2)
EndTable
```

'Taula vent minutal dimensionada a 1 valor (es borra, actualitza, cada minut)

```
DataTable (Mitjanes,1,1)
    DataInterval (0,1,Min,0)
    Average (1,T1seg,FP2,False)
    Average (1,HumR1seg,FP2,False)
EndTable
```

'Taula vent maxim 3 seg dimensionada a 1 valor (es borra, actualitza, cada 3 segons)

```
DataTable (VentMax,1,1)
    DataInterval (0,3,Sec,0)
    WindVector (1,VV,DV,FP2,False,0,0,1)
EndTable
```

'Mostreig dels sensors cada segon

```
BeginProg
    Scan (1,Sec,3,0)
```

'Mesura del voltatge de la Bateria

Battery (Bateria)

'Mesura pont mig resistencies

BrHalf4W (Rs_R0,1,mV25,mV25,1,Vx1,1,2035,True,True,0,_50Hz,1,0)

'Mesura temperatura segons RS/Ro per una PRT

PRT (T1seg,1,RS_R0,1,0)

'Mesura humitat relativa per voltatge amb dos canals analogics

VoltDiff (HumR1seg,1,mV2500,1,True,0,_50Hz,0.1,0)

'Si es mulla l'element sensor pot donar valors entre 100 i 108 que no son atribuïbles a la sobresaturació de l'aire i que no s'han d'incloure per fer el valor mig minutal i deuminutal

If HumR1seg>100 **and** HumR1seg<108 **then** HumR1seg = 100

'Mesura pluviometre de balanç per tancament de contacte

PulseCount (Pluja,1,1,2,0,0.1,0)

'Mesura de la velocitat del vent a partir de la freqüència de gir de les helixs

PulseCount (VV,1,2,1,1,0.098,0)

VV10mesc=VV10m

'Mesura de la direcció del vent amb un pont mig de resistencies

BrHalf (DV,1,mV2500,1,Vx1,1,2500,True,0,_50Hz,355,0)

DV10mesc=DV10m

'Mesura pressió atmosfèrica per voltatge

VoltDiff (Patm,1,mV2500,1,True,0,_50Hz,0.184,600)

'Mesura de la radiació solar global per voltatge amb dos canals analogics

VoltDiff (RS,1,mV25,1,True,0,_50Hz,64.267352,0)

'Variables intermitges a partir de les quals es construeix la taula deuminutal

T1min=Mitjanes.T1seg_Avg(1,1)
HumR1min=Mitjanes.HumR1seg_Avg(1,1)
VV3Seg=VentMax.VV_WVc(2,1)
DV3Seg=VentMax.VV_WVc(3,1)

'Calcul pluja minutal

PL1min=PL1min+Pluja

'Variables auxiliars Flag Manteniment

If Flag_manteniment = true
 Flag_m = -1
 Flag2_m = -1
EndIf

'Reset de l'alimentació del modem al minut 29 (per evitar que si es queda penjat obligui a visitar l'EMA)

If TimeIntoInterval (29,60,Min)

SW12 (0)

```

EndIf

If TimeIntoInterval (30,60,Min)

    SW12 (1)

EndIf

'Deteccio valors erronis variables

If T1seg=NAN then T1seg=-6999
If HumR1seg=NAN then HumR1seg=-6999
If RS=NAN then RS=-6999
If Bat=NAN then Bat=-6999
If Patm=NAN then Patm=-6999
If DV10m=NAN then DV10m=-6999
If VV10m=NAN then VV10m=-6999
If Pluja=NAN then Pluja=-6999
If T1min=NAN then T1min=-6999
If HumR1min=NAN then HumR1min=-6999
If VV3Seg=NAN then VV3Seg=-6999
If DV3Seg=NAN then DV3Seg=-6999

'Crida de les taules

CallTable Mitjanes
CallTable VentMax
CallTable Deuminut
CallTable Pluja1m

'Reinicialització del comptador de pluja cada minut

If TimeIntoInterval (0,1,Min)

    PL1min=0

EndIf

'Inicialitzacio flags manteniment

'De periode

If TimeIntoInterval (0,10,Min)

    Flag_m=0

EndIf

'Precipitacio minutal

If TimeIntoInterval (0,10,Min)

    Flag2_m=0

EndIf

NextScan
EndProg
    
```

9.7. *Manteniment de l' EMA*

El manteniment de l'EMA és tan o més important que la seva instal·lació.

És bàsic realitzar un manteniment periòdic de la instal·lació (males herbes del recinte, suports rovellats, etc..) i de l'equipament (neteja sensors, comprovació bona connexió, etc.).

Qualsevol aparell electrònic de mesura (sensors, *datalogger*, etc.) ha de ser entregat pel fabricant amb un certificat de calibratge que serveixi de garantia del seu bon funcionament durant un període de temps determinat segons les especificacions tècniques indicades. Amb l'ús, tots els aparells pateixen desviacions respecte a les seva resposta característica. Per aquest motiu és molt important tenir present que s'hauran de realitzar calibratges periòdics en laboratoris acreditats o de la nostra confiança de tots els sensors i dispositius. La cadència de calibratge serà funció de les condicions en les quals hagin de treballar els equips, el seu ús, la tecnologia en qüestió, etc.

10. Característiques sensors segons l'OMM i el SMC

Durant tot el projecte s'han vist diversos sensors treballant amb principis físics i tecnologies ben diferents. Amb tot, enlloc s'ha fet gaire èmfasi de quines són les característiques tècniques (les prestacions) que ens poden proporcionar aquests sensors. Per aquest motiu s'ha optat per incorporar les especificacions tècniques recomanades per l'OMM i pel SMC. En qualsevol cas, malgrat que la intenció no sigui que compleixin aquestes recomanacions, qualsevol usuari podrà tenir una idea de la qualitat de les seves mesures en funció de la diferència amb aquestes recomanacions.

Per últim, recordar que l'exactitud (*accuracy*), o millor dir-ne incertesa (*uncertainty*), és a dir, la capacitat d'apropar-nos al valor real d'allò que es vol mesurar, no només depèn de la qualitat dels sensors, sinó de tot el sistema de mesura: sensor + cablejat + *datalogger*.

10.1 Sensor de Temperatura de l'aire

Unitat de mesura: grau Celsius (°C)

Característiques del sensor

- Rang d'operació: -40 a +55 °C
- Constant de temps (τ): ≤ 20 s

Sistema de mesura i sensor

- Tecnologia: Resistència de platí normalitzada
- Resolució: 0.1 °C
- Exactitud: ± 0.2 °C

Segons l'OMM el rang d'operació hauria de ser de -60 a + 60 °C i l'exactitud de ± 0.1 °C.

El SMC ha restringit el rang i ha augmentat la tolerància amb l'exactitud perquè amb les tecnologies actuals és fa difícil aconseguir una exactitud de ± 0.1 °C en tot el rang d'operació que estableix l'OMM. A més a més, valors per sota de -40 °C i per sobre de +55°C són pràcticament impossibles a les ubicacions de la xarxa d'estacions meteorològiques de Catalunya (Xemec).

10.2 Sensor d'Humitat Relativa de l'aire

Unitat de mesura: en percentatge (%)

Característiques del sensor

- Rang d'operació: 5 a 100%
- La constant de temps (τ): $\leq 40s$

Sistema de mesura i sensor

- Tecnologia: sensor capacitiu, resistiu, etc.
- Resolució: 1%
- Exactitud: $\pm 3\%$

10.3 Anemòmetre (sensor de velocitat del vent)

Unitat de mesura: ($m s^{-1}$)

Característiques del sensor

- Rang d'operació: 0-60 m/s
- Constant de distància: 2 - 5 m
- Llindar de funcionament: $\leq 0.5 m/s$

Sistema de mesura i sensor

- Tecnologia: cassoletes, hèlixs, ultrasònics, dispositiu optoelectrònic per tall de feix de llum, etc.
- Resolució: 0.5 m/s
- Exactitud: $\pm 0.5 m/s$ o el 10% de la lectura, el que sigui major.

Segons l'OMM el rang d'operació hauria de ser de 0 a 75 m/s.

El SMC ha limitat el rang fins a 60 m/s perquè les tecnologies actuals no garanteixen el bon funcionament dels sensors per sobre d'aquest valor. A més a més, la possibilitat que a les ubicacions de la Xemec es puguin produir cops de vent de més de 60 m/s és remota.

10.4 Penell (sensor de direcció del vent)

Unitat de mesura: graus ($^{\circ}$)

Característiques del sensor

- Rang de mesura: 0 a 360°
- Rang d'operació: 0.75 - 60 m/s
- Constant de temps: 1 s
- Llindar de funcionament: 0.5 m/s

Sistema de mesura i sensor:

- Tecnologia: potenciòmetres, dispositiu optoelectrònic per tall de feix de llum, ultrasònics
- Resolució: 3°
- Exactitud: $\pm 5^{\circ}$
- Linealitat: $\pm 2^{\circ}$ a $\pm 5^{\circ}$
- Longitud d'ona no amortida: $< 10 m$
- Relació d'amortiment: 0.3 a 0.7 m

10.5 Pluviòmetre

Unitat de mesura: mil·límetres (mm)

Característiques del sensor

- Superfície de captació: 200 cm² - 500 cm²

Sistema de mesura i sensor

- Tecnologia: sistema de balancí, de pesada, etc.
- Resolució: entre 0,1 mm i 0,2 mm
- Exactitud: $\pm$ resolució, o $\pm 2\%$ de la lectura, el que sigui major

10.6 Baròmetre

Unitat de mesura: hectoPascal (hPa)

Característiques del sensor

- Rang d'operació: 920 -1080 hPa. Si l'EMA s'ha d'ubicar en altitud superiors als 500 m, és aconsellable que el rang sigui major (650 – 1080 hPa)
- Constant de temps (τ): ≤ 20 s
- Deriva: ± 0.1 hPa/any

Sistema de mesura i sensor

- Tecnologia: aneroide, piezoresistiu, etc.
- Resolució: 0.1 hPa
- Exactitud: ± 0.2 hPa

Segons l'OMM l'exactitud del sensor hauria de ser de ± 0.1 hPa.

El SMC amplia fins a ± 0.2 hPa l'exactitud requerida perquè poquíssims fabricants poden garantir per tot el rang d'operació el que estableix l'OMM.

10.7 Piranòmetre

Ha de verificar les especificacions que l'OMM determina com a acceptables per a xarxes operatives, "first class" o "bona qualitat", tal com consta a la 6a. Edició de la "Guide to meteorological instruments and Methods of Observation".

Unitat de mesura: W/m²

Sistema de mesura i sensor

- Tecnologia: termoelèctric, fotoelèctric, piroelèctric, bimetàl·lic

Característiques del sensor

- Rang de mesura: 0.3 -3 μ m
- Temps de resposta (95% del senyal): < 30 s
- Zero offsets:
 - a) Resposta a 200 W/m² de radiació tèrmica neta (ventilat): ± 15 W/m⁻²
 - b) Resposta a un canvi de 5 K/h a temperatura ambient : ± 4 W/m⁻²
- Resolució: 5 W/m⁻²
- Estabilitat (canvi per any, percentatge de l'escala completa): $\pm 1,5$
- Resposta direccional a la radiació que arriba a la cúpula (El rang d'error és degut a l'assumpció que la resposta de l'aparell a la incidència normal és vàlida per a totes les direccions de mesura, prenent com a referència una radiació de 1000 W/m² d'irradiància que entra a la cúpula amb incidència normal): ± 20 W/m²
- Resposta de temperatura (percentatge d'error màxim degut a qualsevol canvi de temperatura ambient dins d'un interval de 50 K): ± 4

-
- No linealitat (Percentatge de desviació de la sensibilitat a 500 Wm^{-2} degut a qualsevol canvi d'irradiància entre 100 y 1000 Wm^{-2}): ± 1
 - Sensibilitat espectral (percentatge de desviació del producte del coeficient d'absorbància espectral pel factor de transmissió espectral de la mitja corresponent en el rang $0,3$ a $3 \mu\text{m}$): ± 5
 - Resposta d'inclinació (percentatge de desviació respecte a la sensibilitat a 0° d'inclinació (horitzontal) degut a un canvi en la inclinació de 0° a 90° a 1000 W/m^2 d'irradiància): ± 2
 - Incertesa aconseguida, 95 per cent de nivell de confiança:
 - Hores totals: 8%
 - Dies totals: 5%

11. Informació referent a possibles fabricants de sensors i *dataloggers* i els seus subministradors

a) *Dataloggers*: Aanderaa, Almos Systems, Campbell Scientific, Casella CELL, Delta-T, Lambrecht, Lufft, Met One Instruments, Mierij Meteo, Sutron Cooperation, Theodor Friedrichs, Thies Clima, ...

b) Sensors de Temperatura de l'aire i Sensors d'Humitat Relativa de l'aire: Aanderaa, Casella CELL, Delta-T, Lambrecht, Lufft, Met One Instruments, Meteolabor AG, Mierij Meteo, Paroscientific, Theodor Friedrichs, Thies Clima, Vaisala Oyj, Vector Instruments, YES Inc., ...

c) Anemòmetres i Penells: Aanderaa, Casella CELL, Delta-T, FT Technologies LTD, Gill Instruments, Irdam, Lambrecht, Lufft, Meteolabor AG, Met One Instruments, Mierij Meteo, Theodor Friedrichs, Thies, Young, Vaisala, Vector Instruments, ...

d) Pluviòmetres: Aanderaa, Campbell Scientific, Casella CELL, Delta-T, Lambrecht, Lufft, Met One Instruments, Mierij Meteo, Theodor Friedrichs, Thies Clima, YES Inc., Young, ...

e) Piranòmetres: Delta Ohm, Eppley, Hukseflux, Kip & Zonen, Shenk, Sutron Cooperation, YES Inc., ...

f) Baròmetres: Aanderaa, Casella CELL, Delta-T, Druck, Honeywell, Lambrecht, Meteolabor AG, Met One Instruments, Paroscientific, Theodor Friedrichs, Vaisala,...

- **AANDERAA**

Nesttunbrekken 97, 5221
Nesttun
Norway
Tel: +47 55 60 48 00
Fax: +47 55 60 48 00
E-mail: info@aadi.no
<http://www.aanderaa.com>

- **ALMOS SYSTEMS**

4/41 King Edward Rd, Osborne Park, 6017
Western Australia
Tel: (61 8) 9244 2346
E-mail: steve@almos.com.au

Landzichtweg 70, 4105 DP, Culemborg
The Netherlands
Tel: (31) 345 544 080
E-mail: Kuikf@almosystems.com
<http://www.almosystems.com>
Adquirir durant el 2005 per l'empresa:

TELVENT

Tamarguillo, 29
41006 Sevilla
Tel.: +34 95 492 09 92
Fax: +34 95 492 39.21
E-mail: info@telvent.com
<http://www.telvent.com>

- **CAMPBELL SCIENTIFIC SPAIN**

Passatge Font 14, local 8
08013 Barcelona
Tel.: 93-2323938
Fax: 93-2328081
E-mail: info@campbellsci.es
<http://www.campbellsci.co.uk>
<http://www.campbellsci.es>

- **CASELLA ESPAÑA**

Polígono Europlis
Calle C, No4B
28230 Las Rozas. Madrid.
Tel: +34 91 640 75 19 / 67

Fax: +34 91 636 01 96
 E-mail: online@caella-es.com
<http://www.casella-es.com>
<http://www.casellacel.com>

- **DELTA-OHM**

Via G. Marconi 5
 35020 Caselle di Selvazzano (PD)
 Tel: 00 39 – 0498977150
 Fax: 00 39 – 049635596
 E-mail: deltaohm@tin.it
<http://www.deltaohm.com>

- **DELTA-T**

128 Low Road
 Burwell
 Cambridge
 CB05 0EJ
 UK
 Tel: +44 1638 742922
 Fax: +44 1638 743155
 E-mail: sales@delta-t.co.uk
<http://www.delta-t.co.uk/index.html>

- **DRUCK LIMITED**

Fir Tree Lane
 Groby
 Leicester
 LE6 0FH
 England
 Tel: +44(0)1162317100
 Fax: +44 (0)116 2317103
 E-mail: sales@druck.com
<http://www.druck.com>

- **THE EPPLEY LABORATORY, INC.**

12 Shieffield Avenue, PO Box 419
 Newport, Rhode Island
 02840 USA
 Tel: 401-847-1020
 Fax: 401-847-1031
 E-mail: info@eppleylab.com
<http://www.eppleylab.com/>

- **FT TECHNOLOGIES LTD**

Church Lane
 Teddington, Middlesex
 TW11 8PA
 England
 Tel: (+44) (0)20 8943 0801

Fax: (+44) (0)20 8943 3283
 E-mail: sales@fttech.co.uk
<http://www.fttech.co.uk/index.html>

- **GILL INSTRUMENTS**

Saltmarsh Park
 67 Gosport Street
 Lymington
 Hampshire
 S041 9EG
 England
 Tel: +44 (0)1590 613500
 Fax: +44 (0)1590 613501
 E-mail: gill@gill.co.uk
<http://www.gill.co.uk/>

El distribuïdor oficial és:

DILUS Instrumentación y Sistemas S.A.

C/ Juan Hurtado de Mendoza, 13
 28036- MADRID
 Tel.: 91-3450006
 Fax: 91-3450186
 E-mail: dilus@dilus.es
<http://www.dilus.es>

- **HUKSEFLUX THERMAL SENSORS B.V**

P.O Box 2816
 2601 CV Delft
 The Netherlands
 Tel: +31-15-2142669
 Fax: +31-152574949
 E-mail: info@hukseflux.com
<http://www.hukseflux.com>

- **IRDAM S.A**

PO Box 764
 CH-1401 Yverdon-les-Bains
 Switzerland
 Tel: +41 24 447 21 31
 Fax: +41 24 447 21 30
 E-mail: p.schlaepfer@irdam.ch
<http://www.irdam.ch/>

- **KIPP & ZONEN B.V.**

Röntgenweg 1 2624 BD Delft

P.O. Box 507 2600 AM Delft
 The Netherlands
 Tel: +31-(0)15-2698000
 Fax: +31-(0)15-2620351
 E-mail: info@kippzonen.com
<http://www.kippzonen.com>

El distribuïdor oficial és:

DILUS Instrumentación y Sistemas S.A.

C/ Juan Hurtado de Mendoza, 13
 28036- MADRID
 Tel.: 91-3450006
 Fax: 91-3450186
 E-mail: dilus@dilus.es
<http://www.dilus.es>

- **LAMBRECHT**

Friedländer Weg 65-67
 37085 Göttingen
 GERMANY
 Tel.: ++49-(0)551-4958-0
 Fax: ++49-(0)551-4958-312
 E-mail: info@lambrecht.net
www.lambrecht.net

Els distribuïdors oficials són:

OTT HIDROMETRIA SL

Avda. de Colmenar Viejo
 Sector Foresta 43, Ofc. 26
 28760 Tres Cantos/ Madrid
 Contact:
 Tel: 0034-(0)91-804-94-56
 Fax: 0034-(0)91-804-94-57
 E-Mail: info@ott-hidrometria.com

HERTER INSTRUMENTS SL

C/ Caracas 15
 08030 Barcelona
 Tel: 93 3468203
 Fax: 93 3460618
 E-mail: herter@herter.es
<http://www.herter.es/>

- **LUFFT**

Guttenbergstrasse 20
 D-70736 FELLBACH
 POSTFACH 4252

D-70719 FELLBACH
 Germany
 Tel: +49 (0)711/51822-0
 Fax: +49 (0)711/51822-41
 E-mail: info@lufft.de
http://www.lufft.de/s_index.htm

- **MET ONE INSTRUMENTS, INC.**

1600 Washington Blvd.
 Grants Pass, Oregon 97526
 USA
 Tel: 541/471-7111
 Fax: 541/471-7116
 E-mail: jpottberg@metone.com
<http://www.metone.com/>

- **METEOLABOR AG**

Hofstrasse 92
 CH-8620 Wetzikon
 Switzerland
 Tel: +41 44 934 40 40
 Fax: +41 44 934 40 99
 E-mail: info@meteolabor.ch
<http://www.meteolabor.ch>

El distribuïdor oficial és:

GRUPO REDISLOGAR

C/Lanzarote No 2
 Poligono Industrial Norte
 E- 28700 San Sebastian de los Reyes
 Madrid
 Tel: +34 91 659 00 63
 Fax: +34 91 659 14 36
 E-mail: : rdventas@redislogar.es
<http://www.redislogar.es>

- **MIERIJ METEO NEDERLAND BV**

Weltevreden 4-C
 3731 AL De Bilt
 PO Box 97
 3730 AB De Bilt
 The Netherlands
 Tel: +31 30 2200064
 Fax: +31 30 2204264
 E-mail: info@mierijmeteo.nl
<http://www.mierijmeteo.nl>

El distribuïdor oficial és:

CONTROL LLEVANT

C/Mayor 98 (Canteras)
E-30394 Cartagena
Persona de contacte: José M^a Ramundo
Tel: 968162005
E-mail: comercial@sensovant.com
<http://www.sensovant.com>

- **PAROSCIENTIFIC**

4500 148th Ave. N.E. Redmond
WA, 98052
USA
Tel: (425) 883-8700
Fax: (425) 867-5407
E-mail: support@paroscientific.com
<http://www.paroscientific.com>

El distribuïdor oficial és:

EXTEN CONTROL, S.L.

Exteco
Avda. Alfonso XIII, 72
28016 Madrid
Tel: 91-510-27-70
Fax: 91-415-0908
E-mail: exten@exteco.com
<http://www.exteco.com>

- **PHILIPP SCHENK GmbH Wien & Co KG**

Jedleseer Straße 59
A-1210 Wien, Austria
Tel: (+43/1) 271 51 31 - 0
FAX: (+43/1) 271 12 28 12
E-mail: office@schenk.co.at
<http://www.schenk.co.at>

El distribuïdor oficial és:

MCV, SA

Ctra. N-II, km. 575 (08293 - Collbató)
Tel. 93 7770500,
Fax: 93 7770550
E-mail: mcv@mcvsa.com
<http://www.mcvsa.com>

- **ROTRONIC AG**

Grindelstrasse 6
CH-8303 Bassersdorf
E-mail: info@rotronic.ch
<http://www.rotronic.ch>

El distribuïdor oficial és:

PERTEGAZ, SL

c. Josep Pla, 163, 2n 6a (08020 Barcelona)
Tel. 93 3036980 Fax. 93 3081539
E-mail: bcn@pertegazsl.com
<http://www.pertegazsl.com>

- **SUTRON CORPORATION**

21300 Ridgetop Circle
Sterling, Virginia 20166
Tel: (703) 406-2800
Fax: (703) 406-2801
E-mail: sales@sutron.com
<http://www.sutron.com>

- **THEODOR FRIEDERICHS GMBH & CO.**

Borgfelde 6
22869 Schenefeld
Germany
Tel: 040 / 83 96 00 - 0
Fax : 040 / 83 96 00 – 18
E-mail: info@th-friedrichs.de
<http://www.th-friedrichs.de>

- **THIES CLIMA**

P.O. Box: 35 36
D-37025 Goettingen
Germany
Phone: +49 551 79001-0
Fax: +49 551 79001-65
E-mail: info@thiesclima.com
<http://www.thiesclima.com/>

El distribuïdor oficial és:

DILUS Instrumentación y Sistemas S.A.

C/ Juan Hurtado de Mendoza, 13
28036- MADRID
Tel.: 91-3450006
Fax: 91-3450186
E-mail: dilus@dilus.es

<http://www.dilus.es>

- **VAISALA OYJ**

P.O. Box 26, FIN-00421 Helsinki, Finland
 Street address: Vanha Nurmijärventie 21, 01670 Vantaa
 Phone: +358 9 894 91
 Fax: +358 9 8949 2227
 E-mail: info@vaisala.com
<http://www.vaisala.com>

El distribuïdor oficial és:

ALAVA INGENIEROS

Còrsega , 411
 08037 Barcelona
 Tel: 93 459 42 50 Fax: 93 459 42 62
 E-mail: info@alava-ing.es
<http://www.alava-ing.es/>

- **VECTOR INSTRUMENTS**

Windspeed limited
 115 Marsh Road
 RHYL Denbighshire LL18 2AB
 UK
 Tel: +44 (0)1745 350700
 Fax: +44 (0)1745 344206
 E-Mail: sales@windspeed.co.uk
<http://www.windspeed.co.uk>

- **YANKEE ENVIRONMENTAL SYSTEMS, INC**

Airport Industrial Park
 101 Industrial Blvd.
 Turners Falls, MA 01376 USA
 Tel: (413) 863-0200
 Fax: (413) 863-0255
 Email: info@yesinc.com
<http://www.yesinc.com>

- **YOUNG**

R. M. Young Company
 2801 Aero Park Drive
 Traverse City, Michigan
 49686 USA
 Tel: 231-946-3980
 Fax: 231-946-4772
 Email: met.sales@youngusa.com
<http://www.youngusa.com>

12. Conclusions

Les Estacions Meteorològiques Automàtiques (EMA) permeten disposar d'un registre de dades amb una resolució temporal molt petita (minutal, deu minutal, semi horària, etc.) sobre les condicions atmosfèriques d'un indret representatiu d'una zona determinada.

Per a l'obtenció de tot aquest volum de dades meteorològiques són necessaris uns sensors basats en una gran varietat de principis físics, un cablejat, un *datalogger* amb molts i diversos components electrònics, un sistema d'alimentació, una instal·lació adequada, un bon mostreig, etcètera, etcètera.

Aprofundir en tot aquests aspectes comporta un gran volum d'informació i fer referència a moltes i variades àrees de coneixement.

Amb aquest treball s'ha intentat facilitar una informació detallada de tot el procés necessari per a obtenir la dada meteorològica final. Conèixer aquest procés permet controlar el bon funcionament de tots els elements implicats i millorar la qualitat de les dades obtingudes. Només amb un coneixement profund i integrat de tot el llaç de mesura es pot proporcionar una dada fiable, objectiu últim de les xarxes d'estacions meteorològiques automàtiques.

13. Bibliografia

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. *UNE 500510- 500520:2005* IN. Madrid: AENOR

BLAUVELT, K. (2000). *Maintenance and Calibration Manual for the Automated Weather Data Network*.

BROCK, F.V; RICHARDSON, S.J (2001). *Meteorological Measurement Systems*. New York: Oxford University Press, Inc. ISBN 0-19-513451-6.

CENER (2006). *Las energías renovables en España. Diagnóstico y perspectivas*. Barcelona: Fundació Gas Natural. ISBN-10: 84-611-2288-7.

DEMROW; R.I. *Settling Time of Operational Amplifiers*. Analog Dialogue, vol. 4, núm.1: p. 32-42.

EPA (200). *Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications*.

FLUXNET (2003). *Canada Measurement Protocols. Working Draft. Version 1.3*.

FONTSERÉ i RIBA, E.. *Assaig d'un Vocabulari Meteorològic Català*. ACAM Associació Catalana de Meteorologia.

GARCIA, C ; GAVALDÀ, J ; JARA, J.A ; MARTÍNEZ, P. (2003) *An Automatic Snow and Weather Stations Network for the Avalanche Prediction in the Catalan Pyrenees*.

IRIBARNE, J.V ; GODSON, W.L. *Termodinámica de la atmósfera*. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General del Instituto Nacional de Meteorología.

KNMI (2000). *Handbook for the Meteorological Observation*.

P. DE FELICE, T. (1998). *An Introduction to Meteorological Instruments and Measurement*

PALLÁS ARENY, R. (1998). *Sensores y acondicionadores de señal*. 3a ed. Barcelona: Marcombo, Boixareu Editores. ISBN 84-267-1171-5.

PINDADO, R. (1997). *Electrónica analógica integrada*. Barcelona: Marcombo, Boixareu Editores. ISBN 84-267-1108-1.

SHAFFER, M.A ; FIEBRICH, C.A ; ARNDT, D.S ; FREDRICKSON, S.E (1999). *Quality Assurance Procedures in the Oklahoma Mesonet*.

WMO (2006). *Training Material on Automated Weather Observing Systems. Reports number 84, 86 i 87.*

WMO (1996). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Sixth edition. Geneva: WMO. ISBN 92-63-16008-2.

A més a més s'han consultat els manuals dels sensors, dels *dataloggers*, i les notes tècniques, dels fabricants de l'apartat 11.

Annex: figures i taules

Figures

1. Datalogger

Fig. 1-1. Estructura bàsica <i>datalogger</i>	Pg.6
Fig. 1-2. Multiplexor	Pg.7
Fig. 1-3. Canals analògics en diferencial o en <i>single-ended</i>	Pg.7
Fig. 1-4. Gràfic convertidors ADC o DAC	Pg.11
Fig. 1-5. Amplificador diferencial	Pg.12
Fig. 1-6. Representació interna amplificador diferencial	Pg.12
Fig. 1-7.1 Inversió de les entrades analògiques	Pg.14
Fig. 1-7.2 Inversió de la polaritat de voltatge d'excitació	Pg.15
Fig. 1-8. Esquema bàsic mesura sensors amb un <i>datalogger</i>	Pg.17
Fig. 1-9. Esquema <i>datalogger</i> Campbell CR1000	Pg.20

2. Temperatura

Fig. 2-1. Termòmetre d'alcohol etílic	Pg.22
Fig. 2-2. Termòmetre bimetàl·lic	Pg.22
Fig. 2-3. Variació de la resistència de diferents metalls amb la temperatura	Pg.23
Fig. 2-4. Ponts mitjos de resistències (<i>half bridges</i>)	Pg.25
Fig. 2-5. Mesura a dos fils d'una resistència	Pg.26
Fig. 2-6. Mesura a quatre fils d'una resistència	Pg.26
Fig. 2-7. Ponts complets de resistències (<i>full bridges</i>)	Pg.27
Fig. 2-8. Sensor T_U Rotronic MP106A	Pg.28
Fig. 2-9. Mòdul mesura 4 fils 4WPB100	Pg.28
Fig. 2-10. Esquema mòdul mesura 4 fils 4WPB100	Pg.28
Fig. 2-11. Especificacions tècniques mòdul mesura 4 fils 4WP100	Pg.29
Fig. 2-12. Esquema connexió <i>datalogger</i> mesura 4 fils 4WPB100	Pg.37

Fig. 2-13. Pins del connector T7 Pt100 del sensor Rotronic MP106A	<i>Pg.38</i>
Fig. 2-14. Símbol d'un termistor NTC	<i>Pg.40</i>
Fig. 2-15. Símbol d'un termistor PTC	<i>Pg.41</i>
Fig. 2-16. Relació resistència-temperatura d'un termistor tipus 104	<i>Pg.42</i>
Fig. 2-17. Característiques termistor 107 de Campbell Scientific	<i>Pg.43</i>
Fig. 2-18 Esquema del termistor 107 de Campbell Scientific	<i>Pg.44</i>
Fig. 2-19. Esquema de mesura amb un termoparell	<i>Pg.47</i>
Fig. 2-20. Esquema de forces electromotrius en un termoparell	<i>Pg.47</i>
Fig. 2-21. Neutralitat d'un metall inserit en un termoparell	<i>Pg.48</i>
Fig. 2-22. Termoparells més comuns i la seva composició	<i>Pg.48</i>
Fig. 2-23. Termopila. Associació sèrie de termoparells	<i>Pg.51</i>
Fig. 2-24. Fotografia del termoparell 105T	<i>Pg.53</i>
Fig. 2-25. Especificacions tècniques del termoparell 105T	<i>Pg.53</i>
Fig. 2-26. Esquema termoparell	<i>Pg.56</i>
Fig. 2-27. Esquema de mesura temperatura amb un piròmetre de radiació	<i>Pg.58</i>
Fig. 2-28. Relació R-T termistor, RTD i termoparell	<i>Pg.59</i>

3. Humitat relativa

Fig. 3-1. Equilibri aigua-vapor	<i>Pg.61</i>
Fig. 3-2. Equilibri de fases: punt triple de l'aigua	<i>Pg.62</i>
Fig. 3-3. Psicròmetre	<i>Pg.63</i>
Fig. 3-4. Relació R-U en un polímer conductor	<i>Pg.65</i>
Fig. 3-5. Sensor d'humitat relativa resistiu UPS-600	<i>Pg.65</i>
Fig. 3-6 Sensor d'humitat relativa capacitiu HUMICAP® Vaisala	<i>Pg.67</i>
Fig. 3-7. Gràfica capacitància-humitat relativa	<i>Pg.67</i>
Fig. 3-8 Característiques sensor T_U Vaisala HMP45	<i>Pg.69</i>
Fig. 3-9. Higròmetre mecànic de cabell sintètic	<i>Pg.73</i>
Fig. 3-10. Higròmetre mecànic de cabell (higròmetre del frare)	<i>Pg.73</i>

4. Precipitació

Fig. 4-1. Deformació del camp de vent segons diverses formes de pluviòmetres	<i>Pg.75</i>
Fig 4-2. Paravents en un pluviòmetre de pesada	<i>Pg.75</i>
Fig 4-3. Fotografia d'un pluviòmetre de balancí amb la boca situada a nivell de terra	<i>Pg.76</i>
Fig. 4-4. Fotografia pluviòmetre Geonor T-200B ja instal·la	<i>Pg.78</i>
Fig. 4-5. Especificacions tècniques pluviòmetre Geonor T-200B	<i>Pg.79</i>
Fig. 4-6. Galleda col·lectora i sensor Geonor T-200B	<i>Pg.79</i>
Fig. 4-7. Corba de deriva del pluviòmetre Geonor T-200B en funció de la temperatura i la quantitat de precipitació acumulada	<i>Pg.80</i>
Fig. 4-8. Certificat calibratge pluviòmetre Geonor T-200B	<i>Pg.82</i>
Fig. 4-9. Esquema pluviòmetre Geonor T-200B	<i>Pg.86</i>
Fig. 4-10. Esquema de connexió sensor - <i>junctions</i> box –cable pluviòmetre pesada Geonor T-200	<i>Pg.87</i>
Fig. 4-11. Fotografia adaptador senyal 455055 Geonor T-200B	<i>Pg.87</i>
Fig. 4-12. Pluviòmetre de balancí CSI TB4	<i>Pg.88</i>
Fig. 4-13. Esquema tancament contacte magnètic	<i>Pg.88</i>
Fig. 4-14. Pluviòmetre Lambrecht amb protecció contra els ocells	<i>Pg.89</i>
Fig. 4-15. Error segons la intensitat de precipitació del pluviòmetre de balancí Lambrecht 15183	<i>Pg.90</i>
Fig. 4-16. Sistema calibratge pluviòmetres de balancí al DIAM	<i>Pg.91</i>
Fig. 4-17. Pluviòmetre de balancí Theodor Friedrichs 7051	<i>Pg.92</i>
Fig. 4-18. Gràfica impulsos/min intensitat precipitació Pluviòmetre de balancí Theodor Friedrichs 7051	<i>Pg.92</i>
Fig. 4-19. Esquema pluviòmetre de balancí Theodor Friedrichs 7051	<i>Pg.93</i>
Fig. 4-20. Esquema contacte reed pluviòmetre de balancí Theodor Friedrichs 7051	<i>Pg.96</i>
Fig. 4-21. Esquema connector pluviòmetre de balancí Theodor Friedrichs 705	<i>Pg.96</i>

5. Vent

Fig. 5-1. Anemòmetre de culleres Vaisala	<i>Pg.99</i>
Fig. 5-2. Anemopenell d'hèlix Young	<i>Pg.100</i>

Fig. 5-3. Sensor velocitat i direcció del vent Young 05103	<i>Pg.101</i>
Fig. 5-4. Especificacions tècniques sensor velocitat del vent Young 05103	<i>Pg.101</i>
Fig. 5-5. Especificacions tècniques velocitat del vent Young 05103	<i>Pg.102</i>
Fig. 5-6. Esquema i connexió anemopenell Young 05103	<i>Pg.107</i>
Fig 5-7. Young 05103 potenciòmetre en la instrucció BrHalf	<i>Pg.108</i>
Fig. 5-8. Esquema principis funcionament sensor de vent d'ultrasons	<i>Pg.111</i>
Fig. 5-9. Fotografia de dos sensors de vent d'ultrasons	<i>Pg.112</i>

6. Pressió atmosfèrica

Fig. 6-1. Esquema baròmetre aneroide	
Fig. 6-2. Esquema transductor pressió basat en una càpsula aneroide	<i>Pg.114</i>
Fig. 6-3. Esquema cristall vibrador de Digiquartz® i del cristall de temperatura	<i>Pg.115</i>
Fig. 6-4. Esquema sensor de pressió amb tecnologia Digiquartz®	<i>Pg.115</i>
Fig. 6-5. Fotografia sensor pressió Vaisala PTB101B	<i>Pg.116</i>
Fig. 6-6. Especificacions tècniques sensor pressió Vaisala PTB101B	<i>Pg.116</i>
Fig. 6-7. Connexió sensor pressió Vaisala PTB101B	<i>Pg.119</i>

7. Radiació solar global

Fig. 7-1. Espectre electromagnètic radiació solar	<i>Pg.124</i>
Fig. 7-2. Espectre electromagnètic	<i>Pg.124</i>
Fig. 7-3. Piranòmetres tipus Black&White	<i>Pg.126</i>
Fig. 7-4. Piranòmetre B&W Schenck	<i>Pg.126</i>
Fig. 7-5. Piranòmetre Kipp&Zonen CM11	<i>Pg.127</i>
Fig. 7-6. Espectre d'irradiància solar a la superfície terrestre i resposta espectral d'un piranòmetre de termopila	<i>Pg.127</i>
Fig. 7-7. Esquema piranòmetre Eppley	<i>Pg.128</i>
Fig. 7-8. Piranòmetre Kipp&Zonen CMP6	<i>Pg.129</i>
Fig. 7-9. Piranòmetre fotovoltaic LI-200	<i>Pg.133</i>
Fig. 7-10. Esquema Efecte fotoelèctric	<i>Pg.133</i>

Fig. 7-11. Rang mesura piranòmetre fotovoltaic de silici	Pg.134
--	--------

8. Gruix de neu

Fig. 8-1. Perpendicularitat del feix d'ultrasons	Pg.136
Fig. 8-2. Rugositat de la superfície	Pg.136
Fig. 8-3. Distància mínima mesura sensor distància ultrasònic	Pg.137
Fig. 8-4. Sensor de gruix de neu SR50	Pg.138
Fig. 8-5. Especificacions tècniques gruix de neu SR50	Pg.138
Fig. 8-6. Formats sortida gruix de neu SR50	Pg.139
Fig. 8-7. Localització <i>jumpers</i> configuració gruix de neu SR50	Pg.139
Fig. 8-8. Opcions sortida i progrmació SDI-12 gruix de neu SR50	Pg.140
Fig. 8-9. Cablejat gruix de neu SR50 segons fabricant	Pg.143

9. Estació Meteorològica Automàtica (EMA): cas pràctic

Fig. 9-1. <i>Datalogger</i> Campbell CR1000	Pg.145
Fig. 9-2. Mòdem GSM/GPRS 900/1800 Siemens MC35i	Pg.145
Fig. 9-3. Antena Grauta FT-900/1800	Pg.148
Fig. 9-4. Panell solar 10 W Siemens SP10	Pg.148
Fig. 9-5. Regulador de càrrega Solsum 5.0	Pg.149
Fig. 9-6. Bateria plom Enerbat 12V 12Ah	Pg.149
Fig. 9-7. Esquema equipament bàsic d'una EMA	Pg.151

Taules

1. *Datalogger*

Taula 1-1. Valors convertidor 10 bits en un rang de 5 V	Pg.11
---	-------

2. Temperatura

Taula 2-1. Voltatges excitació mòdul mesura 4 fils 4WPB100	Pg.31
Taula 2-2. Paràmetres instrucció BrHalf4	Pg.32
Taula 2-3. Paràmetres instrucció PRT	Pg.36

Taula 2-4. Paràmetres instrucció mesura termistor Therm107	<i>Pg.45</i>
Taula. 2-5. Sortida en voltatge del termoparell Tipus T quan la temperatura de la unió de referència és 0 °C.	<i>Pg.51</i>
Taula 2-6. Paràmetres instrucció PanelTem	<i>Pg.54</i>
Taula 2-7. Paràmetres instrucció TCDiff	<i>Pg.55</i>
Taula 2-8.. Rang mesura RTD, termistors i termoparells	<i>Pg.59</i>
Taula 2-9. Avantatges i desavantatges termistor, RTD i termoparell	<i>Pg.60</i>

3. Humitat relativa

Taula 3-1. Impedàncies (Z) i constants d'un sensor d'humitat relativa resistiu	<i>Pg.66</i>
Taula 3-2. Paràmetres instrucció VoltDiff	<i>Pg.70</i>

4. Precipitació

Taula 4-1. Mescla d'anticongelant en funció de la temperatura	<i>Pg.77</i>
Taula 4-2. Diferents models de pluviòmetre Geonor T-200B	<i>Pg.78</i>
Taula 4-3. Paràmetres instrucció PeriodAvg	<i>Pg.83</i>
Taula 4-4. Paràmetres instrucció PulseCount	<i>Pg.96</i>

5. Vent

Taula 5-1. Paràmetres instrucció PulseCount	<i>Pg.103</i>
Taula 5-2. Paràmetres instrucció BrHalf	<i>Pg.103</i>

6. Pressió atmosfèrica

Taula 6-1. Paràmetres instrucció VoltDiff	<i>Pg.118</i>
---	---------------

7. Radiació solar global

Taula 7-1. Especificacions piranòmetre Kipp&Zonen CMP6	<i>Pg.129</i>
Taula 7-2. Paràmetres instrucció VoltDiff	<i>Pg.129</i>
Taula 7-3. Multiplicadors piranòmetres Kipp&Zonen unitats	<i>Pg.132</i>