Escola Politècnica Superior
de Castelldefels
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL DE FI DE CARRERA

TÍTOL DEL TFC: Automatització d'un sistema de commutació d'elèctrodes per mesures de tomografia d'impedància elèctrica.

TITULACIÓ: Enginyeria Tècnica de Telecomunicació, especialitat Sistemes de Telecomunicació

AUTOR: Pere C. Pont Guiu

DIRECTOR: Josep Jordana Barnils

DATA: 21 de gener de 2005

Títol: Automatització d'un sistema de commutació d'elèctrodes per mesures de tomografia d'impedància elèctrica

Autor: Pere C. Pont Guiu

Director: Josep Jordana Barnils

Data: 21 de gener de 2005

Resum

L'objectiu d'aquest projecte és desenvolupar un sistema automàtic de commutació d'elèctrodes per a realitzar mesures d'impedància elèctrica i a partir d'aquí, obtenir la resistivitat aparent.

Per a fer aquestes mesures s'utilitzen 4 elèctrodes. Dos que injecten corrent alterna sinusoïdal i dos per a mesurar diferències de potencial. Com que disposem d'un array de 16 elèctrodes, podem realitzar diferents configuracions i així obtenir una distribució de resistivitat lateral o en profunditat.

El sistema desenvolupat bàsicament consta d'un generador de funcions, dos multímetres, dues targetes de 32 relès cadascuna i 16 elèctrodes. Tots aquests instruments estan connectats a l'ordinador a través de diferents busos de comunicacions. D'aquesta manera es controla tot el sistema sense haver de manipular directament cap instrument.

Per al control del sistema s'han utilitzat dos ordinadors. Un ordinador controla les targetes de relès amb el programa Labwindows i l'altre ordinador controla la resta del sistema i calcula la resistivitat aparent amb el programa LabVIEW.

Per a comprovar que aquest sistema funciona correctament, s'han fet una sèrie de mesures. En una cubeta plena d'aigua s'hi ha submergit objectes conductors i aïllants, i a partir de les mesures de resistivitat aparent s'ha detectat l'objecte introduït.

Title: Automatization of electrodes commutation system for measures of electric impedance in tomography.

Author: Pere C. Pont Guiu

Director: Josep Jordana Barnils

Date: January, 21st 2005

Overview

The aim of this project is to develop an automatic system of electrode commutation in order to make measures of electric impedance, and to calculate the apparent resistivity.

To perform these measures we need four electrodes. Two electrodes inject alternating current and the other two electrodes measure potential differences. We have a 16 electrodes array, therefore, we can set up different configurations so that we may get a resistivity distribution.

Our system basically consists of a function generator, two meters, two 32 relay targets and 16 electrodes. All these instruments are connected to a computer through different communication buses. When using this system we don't need to handle any instrument.

In order to control this system, two computers are used. One computer controls the relays targets with Labwindows program, and the other computer controls the rest of the system and makes calculations of apparent resistivity with LabVIEW program.

To check the system's correct performance many measures have been done. Conductor and insulating objects have been submerged in a water bucket, and thanks to the resistivity measures, we can detect these objects.

Als meus pares

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ..... 1

2. RESISTIVITAT ELÈCTRICA..... 2

2.1. Introducció..... 2

2.2. Mesura..... 3

2.3. Resistivitat aparent..... 4

2.4. Resistivitat aparent normalitzada i visibilitat..... 4

2.5. Configuracions dels elèctrodes..... 5
2.5.1. Configuració Schlumberger..... 5
2.5.2. Configuració Wenner..... 5
2.5.3. Configuració doble dipol..... 6

2.6. Tipus de mesures..... 6
2.6.1. Sondeig elèctric vertical..... 6
2.6.2. Calicata elèctrica..... 7

3. INSTRUMENTACIÓ..... 9

3.1. Components utilitzats..... 9
3.1.1. Busos de comunicacions..... 9
3.1.1.1. Bus RS-232..... 9
3.1.1.2. Metrabus..... 9
3.1.1.3. Bus USB..... 10
3.1.1.4. Bus GPIB..... 11
3.1.2. Targeta MID-64..... 11
3.1.3. Targeta MEM-32/A..... 11
3.1.4. Targeta USB Eagle 24/A.....13

3.2. Instruments utilitzats..... 13
3.2.1. Agilent 33120A..... 13
3.2.2. PREMA 5017..... 14

3.3. Sistema PR0GEO..... 15

3.4. Sistema proposat..... 17

3.5. Procediments seguits al laboratori..... 19

3.6. Sistema implementat..... 21

4. SOFTWARE..... 23

4.1. Introducció..... 23

4.2. Labwindows..... 23

4.3. LabVIEW..... 23
4.3.1. Concepte d'instrument virtual..... 23
4.3.2. El programa LabVIEW..... 24
4.3.3. Característiques..... 25
4.3.4. El panell de control..... 25
4.3.5. El diagrama de blocs..... 26
4.4. Programes realitzats en el projecte..... 27

5. MESURES AMB EL SISTEMA..... 32

5.1. Introducció..... 32

5.2. Simulació d'un medi homogeni..... 32

5.3. Mesura de les impedàncies amb la cubeta d'aigua..... 34

5.4. Resistivitat aparent..... 35

5.5.Teorema de reciprocitat..... 38

5.6. Sondeig elèctric vertical..... 39

5.7. Detecció d'objectes..... 40

6. CONCLUSIONS..... 46

7. BIBLIOGRAFIA..... 48

8. ANNEXOS..... 49

8.1. Programa en Labwindows per al control dels relès..... 49

8.2. Programes realitzats en LabVIEW..... 55

8.3. Fotografies 67

1. INTRODUCCIÓ

Per a detectar objectes que estan al subsòl sense utilitzar mètodes mecànics es poden realitzar diferents tècniques basades en detectar alguna propietat que diferenciï l'objecte del medi que l'envolta. Hi ha diferents propietats detectables com ara la densitat, la resistivitat, les propietats magnètiques, etc.

En aquest projecte es pretén desenvolupar un sistema automàtic per a realitzar mesures de tomografia d'impedància elèctrica. El seu funcionament es basa en injectar corrent sinusoïdal de baixa freqüència al subsòl a través de dos elèctrodes i mesurar diferències de potencial amb dos elèctrodes més. Amb aquesta senzilla operació es pot determinar la resistivitat aparent del medi, i per tant, variant la configuració dels elèctrodes podem obtenir variacions laterals o verticals de la resistivitat i d'aquesta manera detectar objectes que tenen una resistivitat diferent a la del medi que els envolta.

El departament d'enginyeria electrònica ja disposava d'un sistema automàtic per a fer mesures de tomografia d'impedància elèctrica, i inicialment els objectius d'aquest projecte eren fer funcionar aquest sistema i realitzar mesures. Però aquest sistema té molts anys i es va decidir actualitzar-lo tant en la part hardware com software. El funcionament del sistema és el següent; per a fer mesures es necessiten 4 elèctrodes, dos d'injecció i dos de detecció. Per tal de poder fer diferents configuracions de forma automàtica, es disposa d'un array de 16 elèctrodes, separats 2 cm entre ells, que es controlen amb 2 targetes de relès. Les targetes de relès estan controlades per un bus que es diu Metrabus i que només es pot connectar a un ordinador que hi ha al laboratori. Per tant es va decidir controlar els relès mitjançant una targeta USB d'adquisició de dades i així no dependre d'un ordinador en concret.
El software també s'ha actualitzat, ja que s'ha utilitzat un altre programa per a controlar tot el sistema.

El desenvolupament del sistema hardware i software m'ha ocupat la major part del temps en la realització d'aquest treball, de manera que els objectius inicials de realitzar mesures s'han limitat a comprovar que el sistema implementat funciona correctament.

Aquest treball està dividit en una sèrie de capítols ben diferenciats. El segon capítol explica els conceptes bàsics de resistivitat , mètodes per a la seva mesura, i diferents configuracions d'elèctrodes. El tercer capítol explica la part hardware del sistema, l'explicació dels components utilitzats i l'arquitectura del sistema final. En el quart capítol es descriu la part software, quins programes s'han utilitzat i funcions que fa el programa realitzat. Una vegada explicat tot el sistema, en el cinquè capítol s'expliquen les proves que s'han fet i les mesures obtingudes.

2. RESISTIVITAT ELÈCTRICA

2.1. Introducció

La resistivitat elèctrica (ρ) d'un material descriu el grau de dificultat que té la corrent elèctrica per passar a través d'aquest. El concepte invers a la resistivitat elèctrica és la conductivitat d'un material (σ). La conductivitat descriu la facilitat que té la corrent per a travessar un material.

En canvi la resistència elèctrica (R) d'un objecte conductor homogeni, ve determinada per la forma física del conductor i la seva resistivitat. En el cas d'un conductor homogeni i rectilini, la seva resistència es calcula a partir de la seva longitud, secció i la resistivitat del material.

$$R = \rho \frac{l}{s} \tag{2.1}$$

Per tant a partir de la fórmula anterior, podem determinar la resistivitat d'un material, i a partir d'aquí també podem calcular la conductivitat, ja que és la seva inversa. La resistivitat es mesura en ohms per metre (Ω·m), i la conductivitat en Siemens (S).

$$\rho = \frac{R \cdot s}{l} = \frac{1}{\sigma} \Rightarrow \sigma = \frac{1}{\rho} \tag{2.2}$$

La resistivitat és una propietat física que pot variar molt ja que depèn de factors com ara la temperatura la humitat o la pressió.
Un exemple de variabilitat de la resistivitat el tenim en l'aigua. L'aigua pura és poc conductora i té una resistivitat aproximada de $10^5 \Omega$·m, per la qual cosa es pot considerar aïllant. En canvi, l'aigua que es pot trobar en un llac o un riu presenta una conductivitat apreciable i pot tenir una resistivitat aproximada de $10^3 \Omega$·m. L'altre extrem és l'aigua de mar. Aquest tipus d'aigua té una resistivitat de 0,2 Ω·m.

La resistivitat elèctrica al sòl, també és variable. El factor que afecta més, és la humitat, per tant, a diferents graus d'humitat, el mateix terreny presenta resistivitats diferents.

2.2. Mesura

Per calcular la resistivitat d'una superfície s'ha de fer un estudi sobre la distribució dels corrents i els potencials. La figura 2.1 és un esquema del procediment que es segueix per a mesurar la resistivitat. S'injecta una corrent "I" al terra mitjançant els elèctrodes A i B, i es mesura la diferència de potencial que hi ha entre els elèctrodes M i N.

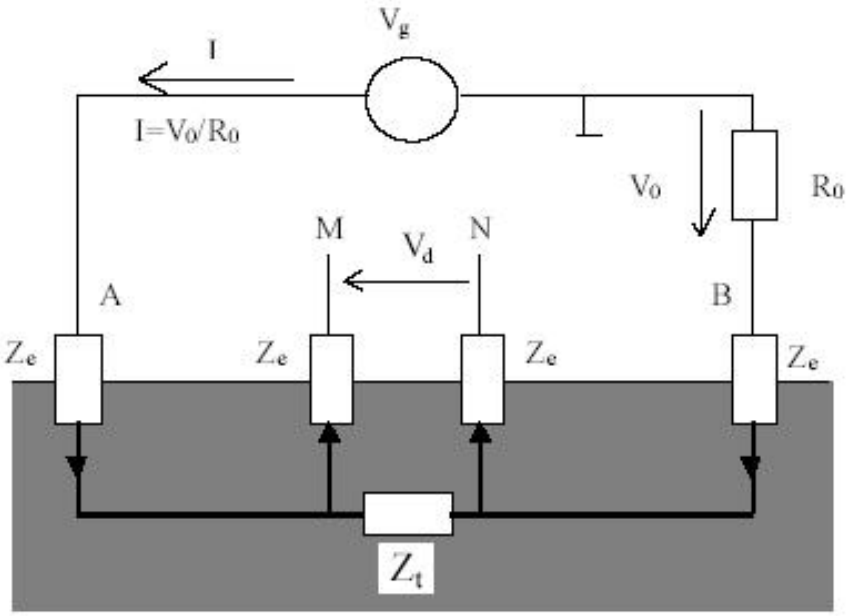


Fig. 2.1. Sistema de mesura de la resistivitat

En el cas que el medi sigui homogeni, la diferència de potencial mesurada entre els elèctrodes M i N és igual a la següent fórmula:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}\right) \tag{2.3}$$

Per tant, a partir de la fórmula 2.3 podem obtenir la resistivitat:

$$\rho = 2\pi\frac{\Delta v}{I}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}\right)^{-1} = g\frac{\Delta V}{I} \tag{2.4}$$

En l'expressió anterior, els termes AM, AN, BM i BN són les distàncies que hi ha entre aquests elèctrodes. En el nostre cas, els elèctrodes tenen una separació de 2 cm.

El terme "g" és el factor geomètric. Aquest terme depèn exclusivament de la configuració dels elèctrodes. Per tant, cada vegada que canviem la disposició dels elèctrodes, també variarà aquest terme.

La configuració electròdica té la propietat de reciprocitat, és a dir que si intercanviem els elèctrodes d'injecció i detecció, el factor geomètric no varia. Per tant, si fem mesures, la resistivitat mesurada no variarà en el cas que la posició dels elèctrodes d'injecció i detecció s'intercanviï.

$$g = 2\pi\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}\right)^{-1} = 2\pi\left(\frac{1}{MA} - \frac{1}{NA} - \frac{1}{MB} + \frac{1}{NB}\right)^{-1} \qquad (2.5)$$

2.3. Resistivitat aparent (ρ_a)

El concepte de resistivitat està basat en un medi homogeni, però quan el medi no és homogeni, el càlcul de la resistivitat variarà en funció de les heterogeneïtats del terreny. La resistivitat calculada per a medis heterogenis rep el nom de resistivitat aparent (ρ_a). Les unitats de mesura segueixen sent els ohms per metre (Ω·m).

La resistivitat aparent es considera com una variable que expressa els resultats de les mesures realitzades. A partir de la interpretació de les resistivitats aparents mesurades en un terreny es poden extreure conclusions sobre la composició del subsòl.

2.4. Resistivitat aparent normalitzada i visibilitat

Per a realitzar interpretacions qualitatives i quantitatives respecte la detecció d'un objecte, es defineixen els paràmetres resistivitat aparent normalitzada (Q) i visibilitat de l'anomalia (Q_o).

La resistivitat aparent normalitzada es defineix com

$$Q(x) = \frac{\rho_a - \rho_h}{\rho_h} \qquad (2.6)$$

On ρ_a és la resistivitat aparent i ρ_h és la resistivitat homogènia.

De fet, Q(x) aporta la mateixa informació que la resistivitat aparent, però permet comparar entre si resistivitats aparents obtingudes en medis de diferent conductivitat gràcies al seu efecte normalitzador.

La visibilitat de l'anomalia (Q_o) la definim com el valor màxim del valor absolut de la resistivitat aparent normalitzada.

$$Q_o = max(|Q(x)|) \qquad (2.7)$$

2.5. Configuracions dels elèctrodes

Com s'ha explicat en l'apartat 2.2, per a realitzar mesures de resistivitat són necessaris quatre elèctrodes. En aquest apartat s'explicaran diferents maneres de posicionar aquests elèctrodes. Per a calcular la resistivitat aparent a partir d'una configuració determinada hem de conèixer les distàncies entre els elèctrodes per tal de poder calcular el factor geomètric.

2.5.1. Configuració Schlumberger

Consisteix en posar els elèctrodes injectors A i B als extrems i els elèctrodes detectors M i N entre els injectors. La condició que ha de complir és que la distància dels elèctrodes detectors ha de ser molt menor que la distància que tenen els elèctrodes injectors (veure figura 2.2).

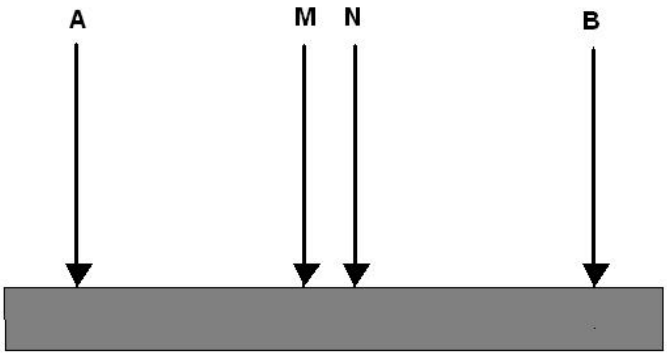


Fig. 2.2. Configuració Schlumberger

2.5.2. Configuració Wenner

Els elèctrodes es disposen de forma equidistant en l'ordre AMNB

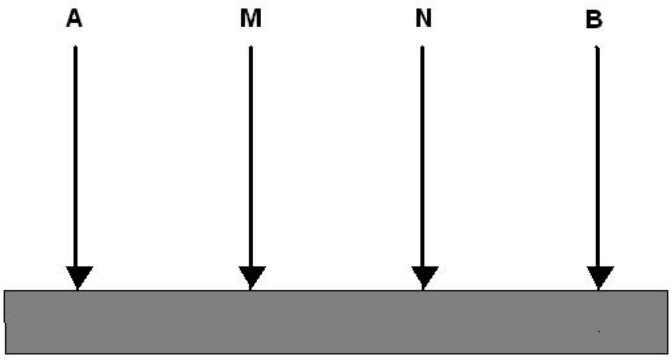


Fig. 2.3. Configuració Wenner

2.5.3. Configuració doble dipol

Els elèctrodes es disposen en l'ordre ABMN.

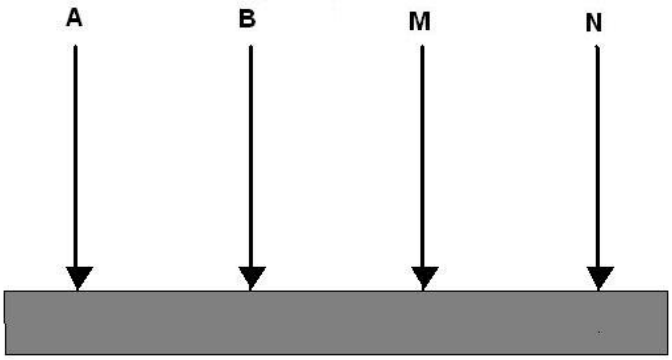


Fig. 2.4. Configuració doble dipol

2.6. Tipus de mesures

Hi ha dos tipus de mesures que es poden realitzar, el sondeig elèctric vertical (S.E.V.) i la calicata elèctrica (C.E.).

2.6.1. Sondeig elèctric vertical

Per a mirar la distribució en profunditat de les resistivitats. Com més es separin els elèctrodes injectors A i B, més penetra la corrent elèctrica al subsòl.

El sondeig Schlumberger consisteix en separar els elèctrodes injectors A i B deixant els elèctrodes M i N fixes.
En el cas de la configuració Wenner, el sondeig consisteix en augmentar la separació entre els elèctrodes mantenint un punt central fix de forma que estiguin equidistants .
Finalment el sondeig dipolar consisteix en separar els elèctrodes AB i MN d'un punt central fix.

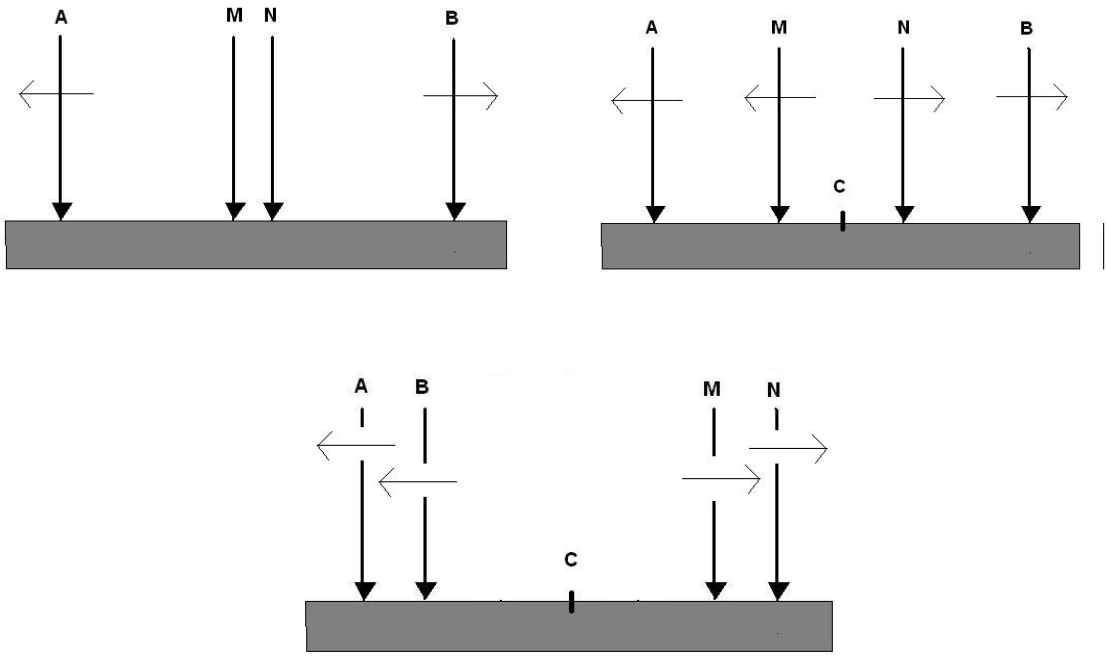


Fig. 2.5. Sondeig Schlumberger, Wenner i dipolar

2.6.2. Calicata elèctrica

Per mesurar variacions laterals de resistivitat. Consisteix en traslladar els 4 elèctrodes mantenint la seva separació.

La calicata Schlumberger consisteix en mantenir fixes els elèctrodes A i B i anar desplaçant M i N.
La calicata Wenner consisteix en desplaçar els 4 elèctrodes a la vegada mantenint la seva separació al llarg de tot el recorregut.
Finalment, la calicata doble dipol o dipolar també consisteix en desplaçar els 4 elèctrodes a la vegada mantenint la seva separació al llarg de tot el recorregut.

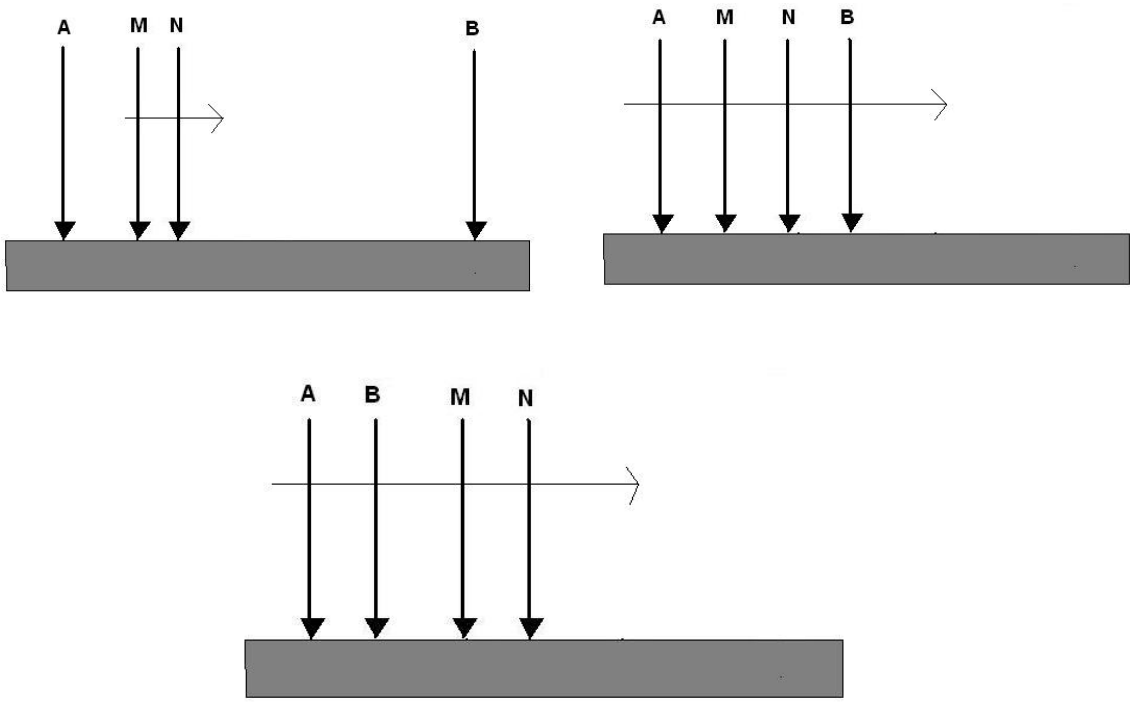


Fig. 2.6. Calicata Schlumberger, Wenner i dipolar

3. INSTRUMENTACIÓ

3.1. Components utilitzats

3.1.1. Busos de comunicacions

Un bus de comunicacions serveix per a comunicar l'ordinador amb els diferents instruments utilitzats. A través d'un bus viatja tota la informació descodificada que ens permetrà controlar els diferents aparells.

Actualment hi ha diferents tipus de busos. A continuació s'explicaran els busos utilitzats en aquest projecte.

3.1.1.1. Bus RS-232

És un bus sèrie, amb transmissió asíncrona. En aquest tipus de comunicacions, un bit identifica el començament de la dada i 1 ó 2 bits identifiquen el seu final, no és necessari cap caràcter de sincronisme. Els bits de dades són enviats al receptor després del bit de start. El bit de menys pes és transmet primer. Depenent de la configuració de la transmissió un bit de paritat és enviat després de cada bit de dades. S'utilitza per a corregir errors en els caràcters de dades. Finalment 1 ó 2 bits de stop són enviats.

Aquest estàndard ha estat adoptat per a transmissions sèrie entre l'ordinador i diferents perifèrics. Té un connector de 9 pins, els quals tenen funcions diferents.

Fig. 3.1. Connector RS232

3.1.1.2. Metrabus

El metrabus és un bus que té 50 línies de transmissió. Està dissenyat per la casa keithley per tal de poder interconnectar l'ordinador amb les diferents targetes de relès.

Com es pot veure a la figura següent, el Metrabus té 50 pins diferents, dels quals 8 són de dades, 6 d'adreces, 4 de control, i la resta són d'alimentació (5 V.) i conductors de massa.

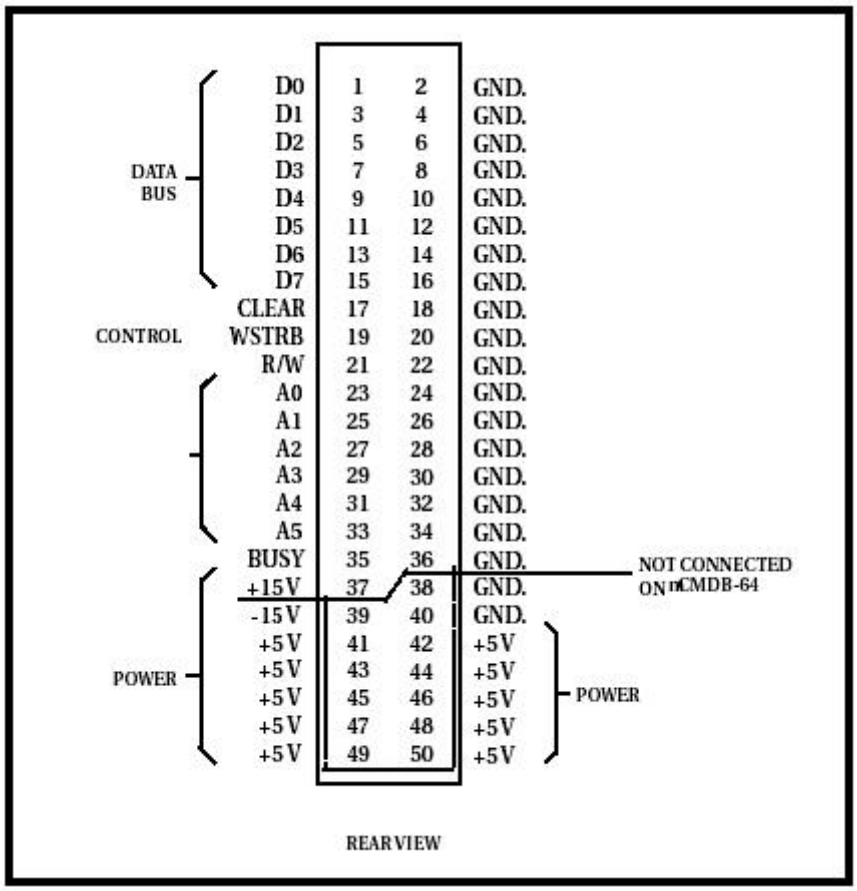


Fig. 3.2. Connexions del Metrabus

Com que té 6 bits d'adreces i cada targeta de relès utilitza 4 adreces , es poden controlar fins a 16 targetes diferents amb el mateix sistema.

Per tal de controlar els relès, les dades s'han d'enviar en el següent ordre:

- ✓ Elegir la targeta que volem controlar
- ✓ Seleccionar el bloc dins la targeta
- ✓ Dins del bloc seleccionat, canviar l'estat del relè que volem

És important recordar que totes les sortides del Metrabus funcionen a nivell baix

3.1.1.3. Bus USB

L'arribada d'ordinadors més potents i la necessitat de connectar-hi diferents tipus de perifèrics, han motivat el desenvolupament del bus USB (Universal Serial Bus). El sistema USB té molts avantatges respecte el port sèrie RS232:

- ✓ Facilitat d'ús. El nou hardware es configura automàticament i els drivers necessaris es carreguen al detectar la connexió del dispositiu.
- ✓ Connector unificat. Tots els fabricants han de seguir l'estàndard a l'hora de llençar un nou producte.
- ✓ Permet una velocitat de transmissió de dades molt superior respecte el port sèrie o paral·lel. Fins a 480 Mbps.
- ✓ Alimentació pel propi cable. Quan el perifèric requereix una petita alimentació, la pot subministrar el propi ordinador.
- ✓ Detecció i correcció d'errors per part del propi protocol de comunicacions.

3.1.1.4. Bus GPIB

GPIB (General Purpose Interface Bus). És un bus asíncron que segueix la normativa IEEE-488 que permet la interconnexió d'instruments de diversos fabricants en un bus comú per a poder realitzar sistemes d'instrumentació.

L'objectiu d'aquest bus és crear un sistema intel·ligent en el qual els perifèrics es puguin comunicar entre sí.

3.1.2. Targeta MID-64

És la targeta controladora del sistema Metrabus, és a dir, fa d'interfície entre el PC i el Metrabus.
Aquesta targeta està connectada al bus d'expansió del PC i controla totes les operacions d'entrada/sortida entre el Metrabus i l'ordinador ja que genera totes les senyals.

3.1.3. Targeta MEM-32/A

La targeta *Keithley* MEM-32/A conté 32 relès i està dissenyada per a ser controlada pel sistema Metrabus. Un relè és un interruptor mecànic accionat elèctricament. Els relès que conté la placa són de tipus SPST (Single Pole Single Throw) i normalment tenen els contactes oberts.

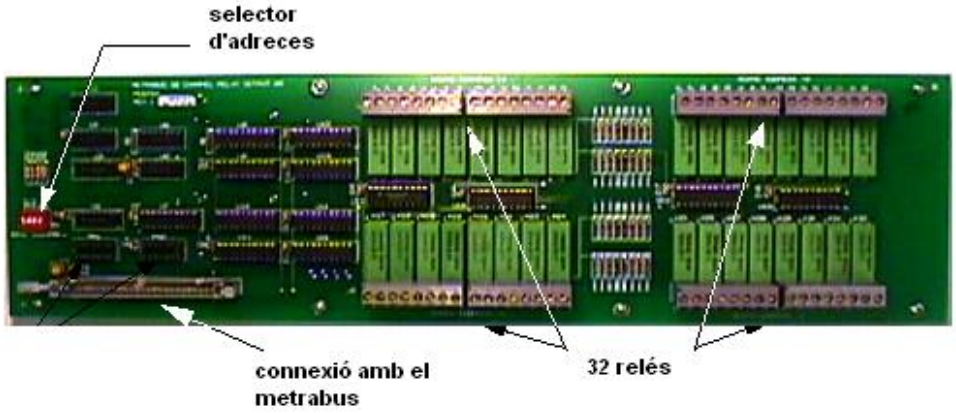


Fig. 3.3. Targeta de relès MEM-32/A

El control de la MEM-32/A es realitza a través del bus Metrabus. Cada targeta té 4 blocs de 8 relès. Cada bloc té una adreça, de tal manera que una targeta utilitza 4 adreces consecutives. D'aquesta manera es poden controlar fins a 16 targetes a la vegada, ja que tenim 6 bits de selecció d'adreces al Metrabus.

Mitjançant el selector d'adreces (veure figura 3.3) podem elegir el número d'adreça de la targeta i a partir de l'adreça seleccionada obtenim les adreces de cada bloc de relès(veure figura 3.4).

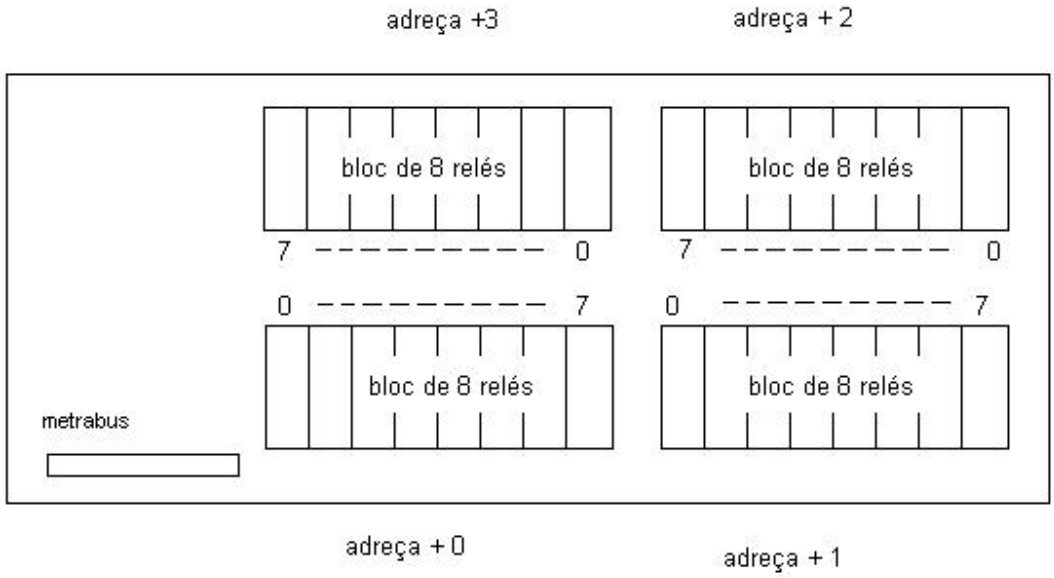


Fig. 3.4. Diagrama de blocs de la targeta MEM-32/A

Dins de cada bloc, hi ha 8 relès ordenats del 0 al 7 o viceversa, depenent del bloc, com es pot veure a la figura 3.4 . Per al control dels relès utilitzem 8 bits (bits de dades del Metrabus), o sigui que tenim un bit per a cada relè.

El procediment que es segueix per activar un relè és elegir el bloc de la targeta que volem, i una vegada dins del bloc, activem el relè que ens interessa.

3.1.4. Targeta USB *Eagle* 24/A

És una targeta d'adquisició de dades que es connecta a l'ordinador mitjançant el bus USB. Té 24 bits distribuïts en 3 ports de 8 bits.
Cada port es configura independentment, i es pot utilitzar de port d'entrada o de sortida. En el cas que es configuri com a port de sortida, les dues sortides lògiques són:

"0" → 0 volts
"1" → 5 volts

Un avantatge que té aquesta targeta és que té drivers per a treballar en labVIEW. Per tant es pot controlar fàcilment a través de l'ordinador.

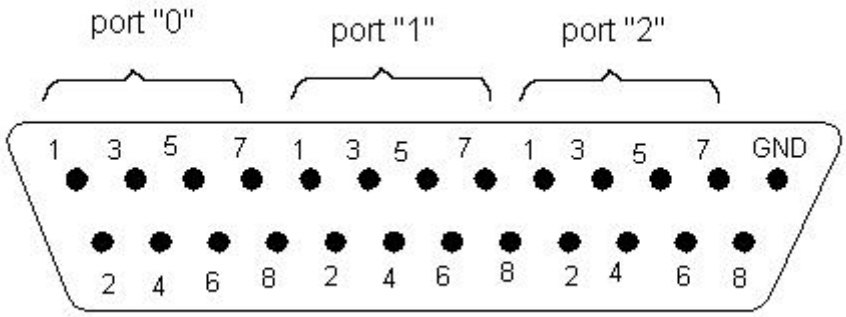


Fig. 3.5. Pins de la targeta USB 24/A

3.2. Instruments utilitzats

3.2.1. Agilent 33120 A

El generador de funcions utilitzat en aquest projecte és l'Agilent 33120A. Aquest aparell disposa de connexió via GPIB i RS-232, per tant es pot controlar des d'un ordinador sense la necessitat de manipular directament l'aparell.

La connexió utilitzada en aquest projecte és via RS-232, i per aquest motiu s'ha hagut de "construir" un connector que compleixi les característiques especificades per aquest generador.
La següent figura mostra com estan interconnectats els 9 pins del cable que connecta el PC amb el generador de funcions.

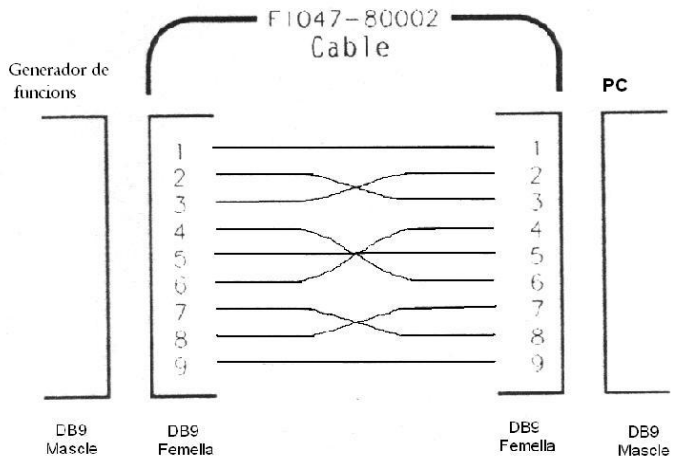


Fig. 3.6. Diagrama de pins del cable

S'ha fet un petit programa en labVIEW que implementa les funcions bàsiques d'aquest aparell.

3.2.2. PREMA 5017

El multímetre utilitzat en aquest projecte per a mesurar la diferència de potencial entre els elèctrodes detectors és el PREMA 5017. S'ha elegit aquest aparell perquè té una precisió de mesures de 7 dígits i mig i es pot controlar des d'un ordinador via RS-232 o GPIB.

Els pins del connector RS-232 estan creuats, i per tant s'ha hagut de fer un connector específic tal com mostra la figura 3.7. Inicialment només es pretenia utilitzar aquest multímetre, però a l'hora de fer les mesures ens hem adonat que necessitàvem un altre multímetre per tal de calcular la intensitat injectada. És per aquest motiu que també s'ha utilitzat el multímetre HP 3478A, que té una precisió de 5 dígits i mig i només es pot controlar via GPIB, per tant, en el sistema final els dos instruments s'han controlat pel bus GPIB.

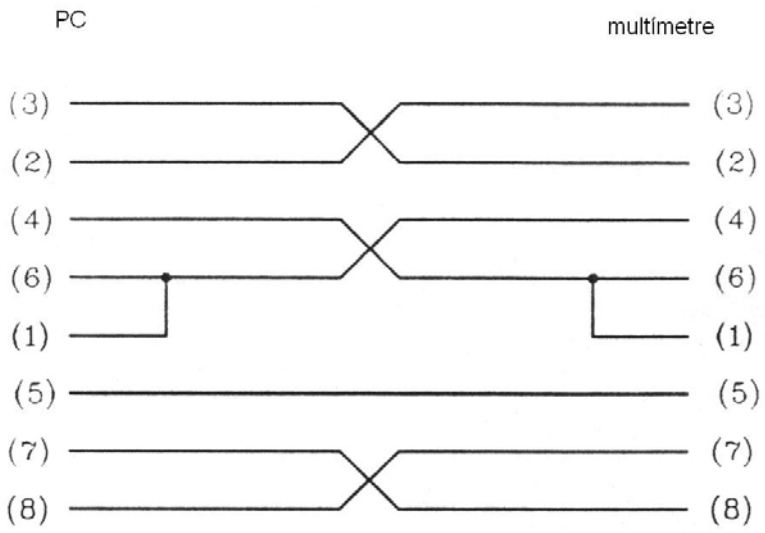


Fig. 3.7. Diagrama de pins del cable

3.3. Sistema PR0GEO

És un sistema desenvolupat pel Xavier Alberto l'any 1997 per tal de realitzar mesures automàtiques d'impedàncies elèctriques al laboratori.

El sistema PR0GEO està basat en el control d'instrumentació, i consta de tres blocs principals que ara s'explicaran en més detall:

- ✓ Generador de senyal. Aquesta etapa té per objectiu injectar corrent elèctrica al subsòl a través dels elèctrodes d'injecció A i B. Per a la injecció s'utilitza el generador de funcions HP3245A. Aquest aparell és programable, i injectarà una senyal de corrent alterna per tal d'evitar que els elèctrodes s'oxidin.
- ✓ Commutació. Aquesta etapa ens permet configurar de forma automàtica la disposició dels elèctrodes d'injecció i de detecció. D'aquesta manera podem implementar totes les configuracions possibles dels elèctrodes automàticament i així obtenir una gran quantitat de mesures diferents.
  Com que tenim 16 elèctrodes i cada elèctrode ha de poder-se configurar de 4 maneres diferents (ABMN), es necessita un sistema de commutació de 4 x 16 relès. És per aquest motiu que s'utilitzen 2 targetes keithley MEM-32/A per a fer la commutació.

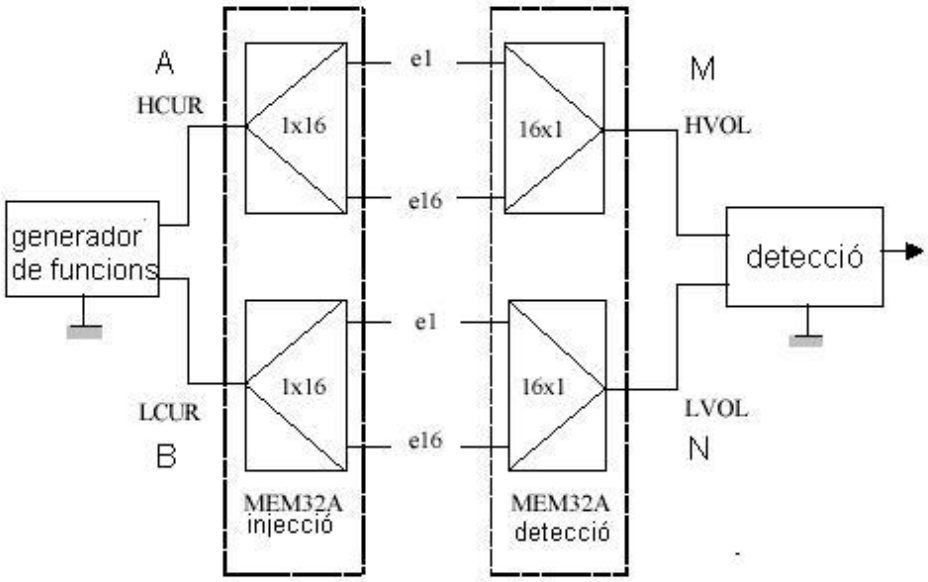


Fig. 3.8. Connexionat de les targetes de relès

Com es pot veure a la figura 3.8 , per encaminar les senyals injectades i les detectades, es necessiten 64 relès. Com que cada targeta té 32 relès, s'utilitza una targeta per a la injecció i una altra per a la detecció. Per tal de no connectar 4 cables diferents a cada elèctrode (ABMN), el que es fa és interconnectar els relès entre ells de tal manera que cada elèctrode només necessita estar connectat a un sol cable. Això s'ha aconseguit connectant totes les entrades dels 16 relès de cada bloc. D'aquesta manera la senyal arriba a totes les entrades però només surt per la que ens interessa. En canvi, les sortides d'un bloc estan connectades amb les sortides dels altres blocs. Així la senyal d'entrada arriba fins a elèctrode, i viceversa.

- ✓ Detecció. Aquesta etapa té per objectiu l'adquisició i el processat de la senyal que hi ha als elèctrodes detectors (M i N). Està formada per la sonda diferencial ADA400A i l'oscil·loscopi DSO TDS420 de Tektronix. Amb aquest sistema tenim una etapa de detecció que ens permet variar els guanys i calcular la fase i el mòdul de la impedància que volíem mesurar, gràcies a una desmodulació en fase i quadratura.

L'arquitectura del sistema es pot veure a la figura 3.9 . El sistema està controlat per un ordinador, a través d'un programa d'aplicació realitzat en Labwindows.
Des d'aquest programa d'aplicació es controlen el generador de funcions i l'oscil·loscopi mitjançant el bus GPIB, també es controlen les targetes de relès a través del bus Metrabus i finalment s'acondiciona la senyal obtinguda per tal de calcular el mòdul i la fase de la resistivitat aparent.

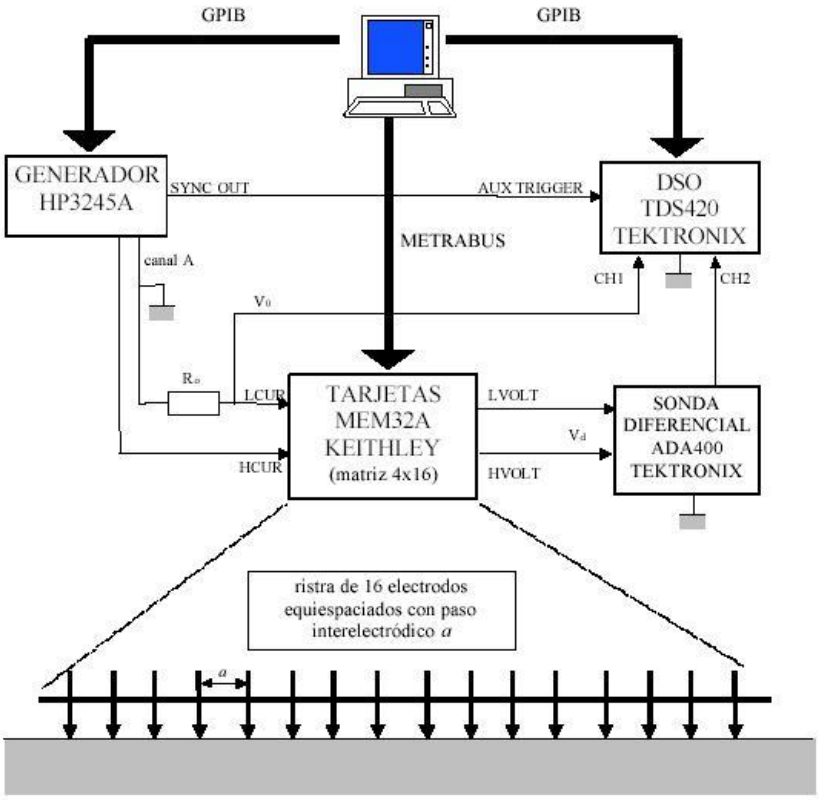


Fig. 3.9. Sistema PR0GEO

3.4. Sistema proposat

En aquest projecte, un dels objectius és fer un sistema automàtic de mesura d'impedàncies amb els instruments disponibles en el laboratori.
Aquest nou sistema està basat en el model creat el 1997 (PR0GEO), però conté unes petites modificacions.

En el sistema PR0GEO, les targetes de relès es controlen amb el Metrabus, i el Metrabus està connectat a l'ordinador a través de la targeta controladora MID-64. El problema que hi ha és que aquesta targeta no és compatible amb els ordinadors nous, i per tant el sistema PR0GEO només es pot fer funcionar amb un ordinador 286 que hi ha al laboratori.
Això suposa un inconvenient, ja que depenem d'un ordinador totalment desfasat. Per tant es va decidir fer un nou sistema que es pugui utilitzar en qualsevol ordinador.

El que s'ha fet és substituir la targeta MID-64 per la targeta USB *Eagle* 24/A d'adquisició de dades. D'aquesta manera el sistema es pot fer funcionar en qualsevol ordinador actual, ja que per a controlar els relès només es necessita un port USB. Als pins de sortida d'aquesta targeta s'hi ha connectat directament el Metrabus.

Un altre canvi que s'ha fet són els instruments utilitzats en l'etapa d'injecció i de detecció. En l'etapa d'injecció s'utilitza el generador de funcions

Agilent 33120A, que es controla amb l'ordinador a través del bus RS-232. En l'etapa de detecció, l'instrument utilitzat és el multímetre PREMA 5017, que també es controla amb l'ordinador a través del bus RS-232.

El software utilitzat també és diferent. En el sistema PR0GEO, es fa servir el programa Labwindows per al control d'instrumentació i l'adquisició de dades.
El software desenvolupat en aquest projecte està fet en labVIEW, tant els drivers dels instruments com el control de la targeta USB 24/A o l'adquisició i processat de les dades.

Finalment el que es pretén amb aquest sistema és calcular la resistivitat aparent de les diferents mesures efectuades, per tant no és necessari fer una desmodulació en fase-quadratura tal com es fa en l'anterior sistema. Simplement es llegeixen les dades del multímetre i a partir d'aquí es calcula la resistivitat aparent.

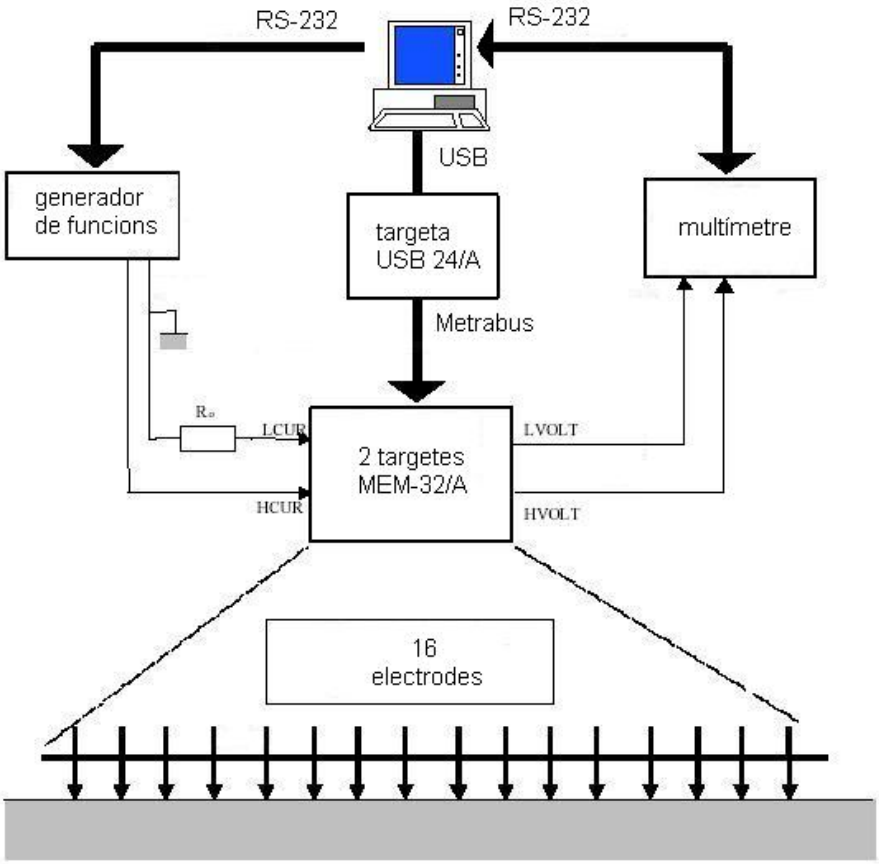


Fig. 3.10. Nou sistema a implementar

En el següent apartat s'expliquen els procediments que s'han seguit per a realitzar aquest sistema. Com es podrà veure, durant el projecte han sorgit nombrosos problemes, alguns dels quals no s'han pogut resoldre.

3.5. Procediments seguits al laboratori

El primer que s'ha fet és comprovar que les targetes de relès funcionen correctament, ja que feia molts anys que no s'utilitzaven. Per això s'ha fet un programa en Labwindows que obra i tanca els relès.

S'ha elegit una targeta d'adquisició de dades. En l'apartat 3.1.1.2 s'explica que és el Metrabus i com funciona. A l'hora d'elegir la targeta d'adquisició de dades USB Eagle 24/A es va mirar quantes sortides calia implementar al Metrabus. El Metrabus té 50 pins, dels quals 8 són de dades, 6 d'adreces, 4 de control i la resta són d'alimentació i massa. Per tant es va considerar que amb una targeta de 24 bits ja n'hi hauria prou per a controlar les targetes de relès. També es van mesurar els nivells de tensió als pins del Metrabús, i es va veure que treu clarament 2 sortides lògiques de 3.6 volts per als nivells alts i 0.2 volts en el cas dels nivells baixos, per tant es va suposar que eren sortides TTL i que la nova targeta USB amb sortides digitals de 0 i 5 volts funcionaria correctament.

La targeta USB *Eagle* 24/A té 24 bits distribuïts en 3 ports de 8 bits, per tant, el que s'ha fet és utilitzar un port per a les dades i un altre port per a les adreces.

El següent que es va fer és connectar el Metrabus a l'ordinador antic i a cada dada que s'envia, mesurar el nivell de tensió i intensitat a cada pin per tal d'implementar exactament les mateixes sortides amb la nova targeta. A la següent taula es mostren els resultats d'aquesta operació:

Taula 3.1. Nivells de tensió i intensitat als pins del Metrabus.

	D0	**D1**	**D2**	**D3**	**D4**	**D5**	**D6**	**D7**	**clear**	**control**	**R/W**
adreça 8 (V)	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	4.4	3.7	3.7
relè 1 (V)	0.2	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	4.4	3.7	3.7
adreça 4 (V)	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	4.4	3.7	3.7
relè 2 (V)	3.7	0.2	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	4.4	3.7	3.7
adreça 10 (V)	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	4.4	3.7	3.7
adreça 10 (mA)	56	54.8	55.1	55.1	54.8	54.5	54.4	54.0	67.5	58.8	61.1
relè 1 (V)	0.2	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	4.4	3.7	3.7
relè 1 (mA)	3.1	55.4	55.4	55.7	60.3	60.1	58.7	54.3	67.8	58.8	61.2

	A0	**A1**	**A2**	**A3**	**A4**	**A5**	**busy**	**+15V**	**+15V**	**+5 V**	**+5 V**	**+5 V**	**+5 V**	**+5 V**
adreça 8 (V)	3.7	3.7	3.7	0.2	3.7	3.7	4.9	0	0	5	5	5	5	5
relè 1 (V)	3.7	3.7	3.7	0.27	3.7	3.7	4.9	0	0	5	5	5	5	5
adreça 4 (V)	3.7	3.7	0.2	3.7	3.7	3.7	4.9	0	0	5	5	5	5	5
relè 2 (V)	3.7	3.7	0.2	3.7	3.7	3.7	4.9	0	0	5	5	5	5	5
adreça 10 (V)	3.7	0.2	3.7	0.2	3.7	3.7	4.9	0	0	5	5	5	5	5
adreça 10 (mA)	58.5	3.1	58.8	3.6	60.1	54.6	0.7	0	0	580	580	580	580	580
relè 1 (V)	3.7	0.2	3.7	0.2	3.7	3.7	4.9	0	0	5	5	5	5	5
relè 1 (mA)	58.6	3.1	58.6	3.6	60.0	54.6	0.7	0	0	580	580	580	580	580

A la taula 3.1 es poden veure tots els nivells de tensió i intensitat que hi ha als pins del Metrabus quan s'envien dades amb Labwindows i la targeta MID-64. Es pot apreciar que les sortides de la targeta MID-64 són a nivell baix, és a dir que si es vol enviar l'adreça 8 (que en 6 bits d'adreces és 001000), el que s'envia és 111011, de tal manera que a part d'invertir tots els bits, els envia començant pel de menys pes.

Una vegada estudiat aquest sistema d'enviar les dades, s'ha implementat un programa en labVIEW que envia les mateixes dades a través de la targeta USB *Eagle* 24/A. La única diferència que hi ha d'haver en teoria és que amb aquesta nova targeta els nivells alts tindran 5 volts en comptes de 3.7, i els nivells baixos tindran 0 volts en comptes de 0.2.

Una vegada connectat el Metrabus a les sortides de la targeta USB, es procedeix a enviar dades cap als relès sense èxit. Al mesurar els nivells de tensió als pins del Metrabus es veu que els nivells alts són correctes però els nivells baixos no. Aquest fet és atribuït a que la targeta USB no té suficient intensitat a la sortida dels pins.

Per a solucionar el problema es dissenya una etapa amplificadora amb transistors. Es connecta un circuit com el de la figura 3.11. a cada pin de sortida de la targeta USB.

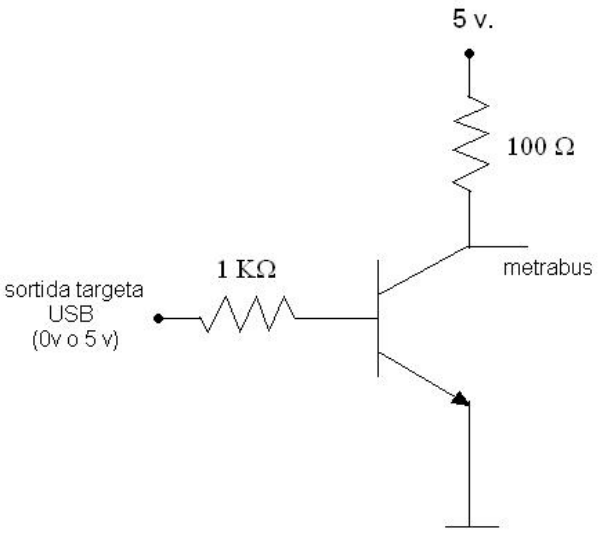


Fig. 3.11. Amplificació de la senyal de sortida de la tarja USB

La idea d'aquest circuit és posar la resistència del col·lector molt petita per tal que el transistor treballi en zona de saturació i tregui la màxima intensitat possible a la sortida. Les senyals d'entrada al transistor seran 0 i 5 volts.
En el cas que V_{in} sigui 5 V, el transistor es satura i la senyal a la sortida del col·lector és aproximadament 0.2 V

Si V_{in} és 0 V el transistor està en tall i la senyal a la sortida del col·lector és aproximadament de 5 V
Per tant aquest circuit ens inverteix les entrades. Per aquest motiu s'ha de modificar tot el software per a què inverteixi totes les senyals a la sortida de la targeta USB 24/A.

Amb aquesta etapa amplificadora s'aconsegueix que els nivells de tensió als pins del Metrabús siguin exactament els mateixos que amb la targeta MID-64 i els nivells d'intensitat són fins i tot una mica més elevats, però els relès no s'activen.

El programa realitzat en labVIEW segueix els mateixos procediments que el programa realitzat en Labwindows, és a dir, primer s'envia l'adreça i després el relè que es vol activar. Fins i tot es podria afirmar que les adreces les envia correctament perquè a l'enviar una adreça correcta, els pins de dades es posen automàticament a 3.6 volts sense que els enviï res, en canvi si s'envia una adreça incorrecta, els pins de dades es queden a 1.3 volts aproximadament. Per tant es pot dir que el problema està a l'hora d'activar el relè corresponent, però fins al moment no s'ha trobat el problema tot i les nombroses proves que s'han realitzat.

És per aquest motiu que el sistema de la figura 3.10 no es pot posar en marxa, tot i haver fet el software corresponent. Per tant, per a fer mesures m'he vist obligat a utilitzar el Labwindows per a controlar els relès, i el labVIEW per a controlar els instruments, adquirir les dades i calcular la resistivitat aparent.

3.6. Sistema implementat

Com s'ha explicat en l'apartat anterior, no s'ha aconseguit fer funcionar les targetes de relès amb la targeta d'adquisició de dades *Eagle 24/A* , i s'ha decidit muntar un altre sistema per tal de poder fer mesures i comprovar el correcte funcionament dels programes implementats.

En aquest sistema, es necessiten 2 ordinadors. Un ordinador controla les targetes de relès amb el Metrabus i el Labwindows, i un altre ordinador controla els instruments utilitzats i processa les dades amb el LabVIEW.

L'arquitectura del sistema es pot veure a la figura 3.12. Com es pot veure, al final s'han utilitzat dos multímetres, el PREMA 5017 i el HP3478a. Això és degut a que per a calcular la resistivitat aparent es necessita saber la intensitat injectada i també el voltatge mesurat entre els elèctrodes M i N. Per tant, el multímetre HP3478a, mesura el voltatge a la resistència Ro de 110 Ω i a partir d'aquí amb LabVIEW es calcula la intensitat injectada. En canvi el multímetre PREMA 5017 mesura la tensió als elèctrodes M i N. Els dos multímetres estan controlats a través del bus GPIB, perquè el multímetre HP3478a no disposa de connexió RS-232. L'adreça GPIB del multímetre PREMA és la número 7 i la del multímetre HP és la número 23.

S'injecta la senyal amb el generador de funcions Agilent 33120A, que està controlat pel bus RS-232. La senyal injectada és sinusoïdal, té una freqüència de 1 kHz i una amplitud de 10 volts de pic.

S'ha utilitzat un conversor USB-GPIB i un conversor USB-RS-232 per a controlar els instruments, perquè els ordinadors nous, no porten instal·lats aquests busos.

L'adquisició de dades dels multímetres es fa a través del programa LabVIEW. Les dades adquirides es processen i es calcula la resistivitat aparent. Un cop fetes les mesures, es poden guardar en un fitxer de tipus text.

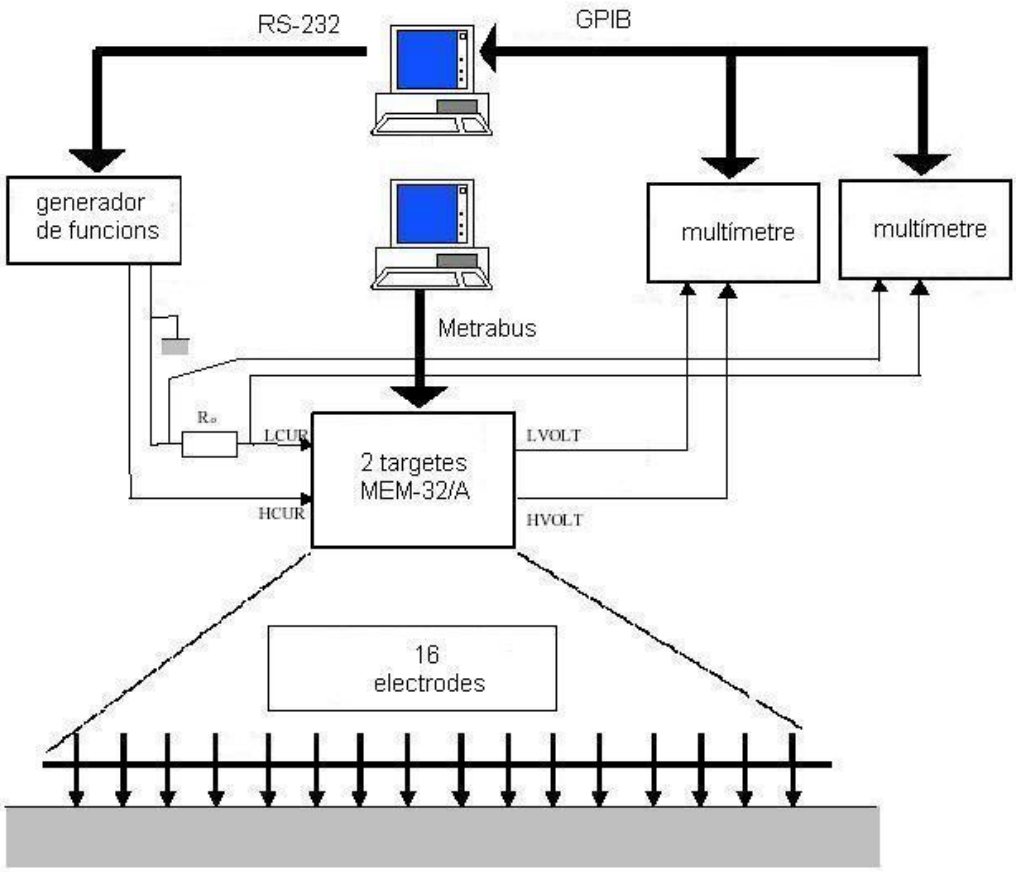


Fig. 3.12. Sistema de mesura implementat

4. SOFTWARE

4.1. Introducció

En aquest projecte s'han utilitzat bàsicament dos programes que ens permeten controlar instrumentació electrònica, el Labwindows i el LabVIEW. Els dos seran explicats amb més detall en els següents apartats.

4.2. Labwindows

Labwindows és un programari utilitzat per al control d'instrumentació que es programa en llenguatge C. Els programes realitzats en Labwindows han de respectar les especificacions d'ANSI C, de manera que totes les llibreries de dades (DLL) com ara llibreries en C o drivers d'instruments han de seguir escrupolosament les especificacions de l'estàndard d'ANSI C.

Un programa fet en entorn Labwindows consta bàsicament de dues parts ben diferenciades: una interfície gràfica i un programa en C que gestiona i controla l'aplicació.

El programa d'aplicació PR0GEO està realitzat en aquest entorn. Aquest programa controla el sistema de mesura d'impedàncies tomogràfiques, adquireix i processa les dades obtingudes en cada mesura.

Actualment el programa Labwindows s'acostuma a utilitzar menys, ja que hi ha software basat en programació gràfica com ara LabVIEW.

4.3. LabVIEW

4.3.1. Concepte d'instrument virtual

Un instrument virtual és un mòdul de programari que simula tots els aspectes funcionals d'un instrument real basant-se en tots els dispositius físics que poden ser accessibles per l'ordinador com ara targetes d'adquisició de dades o diferents instruments accessibles a través del bus RS-232 o GPIB. Quan s'executa un programa que representa un instrument virtual, l'usuari veu per la pantalla el panell que correspondria a l'instrument físic. Aquest panell en permet la visualització i el control. D'aquesta manera, l'usuari pot controlar l'instrument a través de l'ordinador.

Els instruments virtuals cada vegada estan més utilitzats en el camp de la instrumentació ja que el procés de creació d'un instrument virtual s'ha simplificat força. Un altre aspecte que afavoreix aquest mètode és la senzillesa amb que es pot accedir a qualsevol utilitat de l'instrument real sense haver d'actuar físicament sobre el mateix instrument.

Però sens dubte, l'avantatge més important és que cada usuari pot crear el seu propi panell frontal i adequar-lo a les seves necessitats. D'aquesta manera, l'accés a determinades funcions de l'instrument és molt més ràpid que si ho féssim a través dels botons del panell de l'instrument.

4.3.2. El programa LabVIEW

LabVIEW → Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench.
El programa LabVIEW de National Instruments és el successor del programa Labwindows.

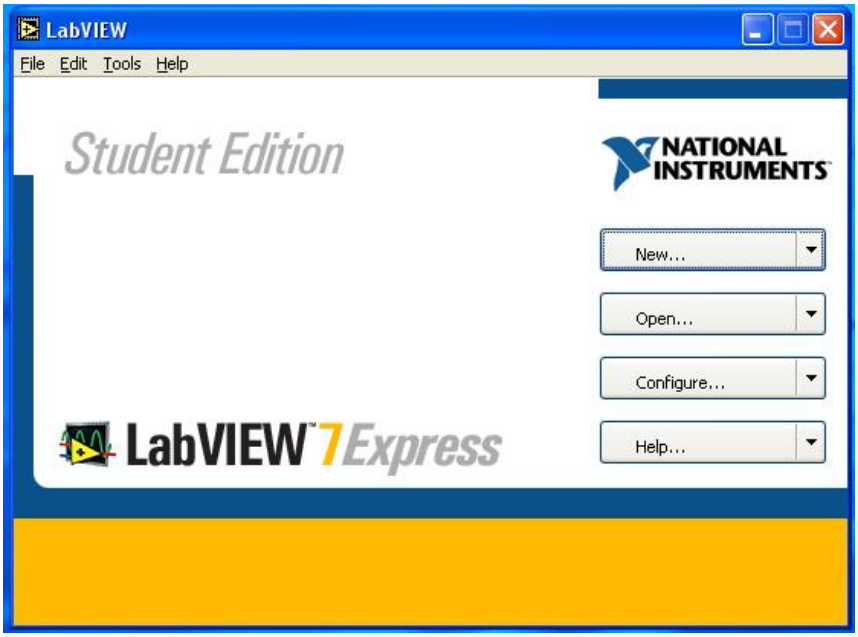


Fig. 4.1 Logotip del programa LabVIEW

LabVIEW utilitza un entorn de programació de tipus gràfic. Aquest llenguatge és fàcil d'entendre i d'utilitzar gràcies a l'ús d'icones. També ens permet visualitzar gràfiques de les dades que s'adquireixen, i aquest fet és molt positiu de cara a la presentació de cara a l'usuari.

Es presenta com un entorn de finestres que permet la gestió de llibreries de funcions de forma interactiva. Aquestes llibreries tenen aplicacions que ens seran de gran utilitat a l'hora de controlar un instrument virtual o un sistema d'adquisició de dades.

LabVIEW utilitza les estructures bàsiques de programació com ara els bucles *while*, *for* o estructures *case*. També conté llibreries amb aplicacions específiques per a la gestió de targetes d'adquisició de dades o per al control d'instruments. Permet l'anàlisi, la presentació i l'emmagatzemat de dades. Per a la depuració d'errors inclou eines de desenvolupament de programes, de manera que podem executar el programa pas a pas i veure com es "mouen" les dades.

4.3.3. Característiques

- És un mètode de programació no seqüencial, basat en objectes i flux de dades. La programació orientada a objectes consisteix a definir unes icones que efectuïn un treball pel seu propi compte, i que tinguin unes entrades i unes sortides per tal de poder-les utilitzar com a funcions de programes més complexes.

- Els programes realitzats en LabVIEW es diuen instruments virtuals (Virtual Instrument → VI). Un VI rep instruccions d'un diagrama de blocs construït en entorn gràfic. Aquest diagrama és el codi del VI.

- Les dades circulen per "cables" i es mouen simultàniament, de manera que poden arribar a diferents objectes al mateix temps. Això passa perquè no és un llenguatge seqüencial.

- Un VI el podem utilitzar com a programa principal o com a funció dins d'un altre programa. Un VI inclòs dins un altre VI s'anomena subVI, i és com si treballéssim amb funcions. Aquest sistema és molt útil per a programes molt complexos.

- La interfície interactiva amb l'usuari s'anomena panell de control, ja que simula el panell frontal d'un instrument físic. El panell de control conté botons, interruptors, gràfics, indicadors.... En canvi, la part on hi ha el codi s'anomena diagrama de blocs.

4.3.4. El panell de control

És la part on l'usuari treballarà a l'arrancar el programa i que ens simularà la nostra aplicació. El panell de control ens permet variar els paràmetres de l'instrument físic que estiguem controlant i que aquestes variacions es vegin reflectides al propi aparell.

El panell de control és on tenim tots els controls i indicadors. Per tant l'usuari pot introduir dades variant els controls o per teclat, i veure els resultats produïts a través dels indicadors.

La figura 4.2 ens mostra un exemple de panell de control:

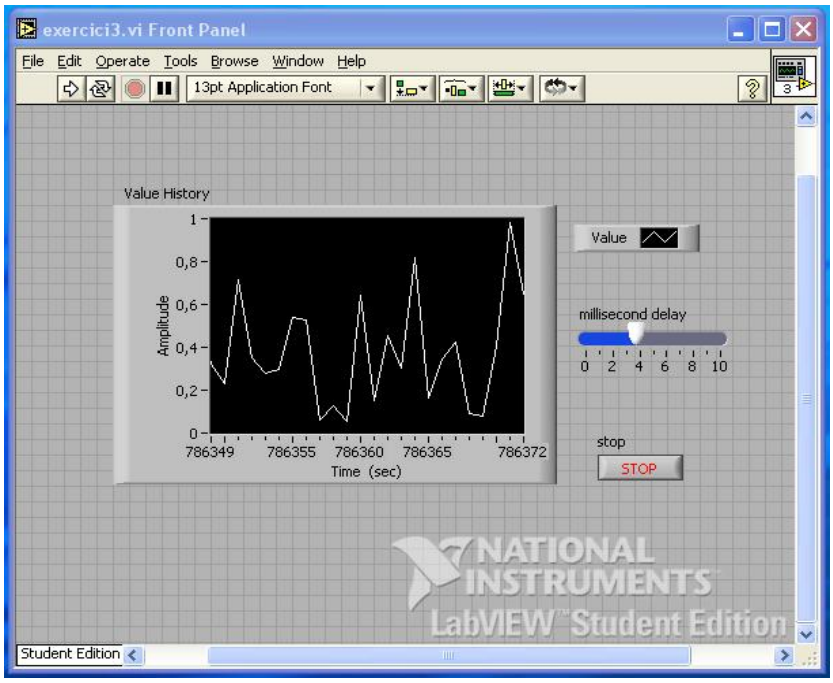


Fig. 4.2 Panell de control de LabVIEW

4.3.5 El diagrama de blocs

És on tindrem tot el codi del nostre VI, on hi ha tots els mòduls de la nostra aplicació i que ens simularan el funcionament d'un instrument. Cada element creat al panell de control apareix automàticament en el diagrama de blocs en forma de diferents icones, depenent de quin element o variable representen.

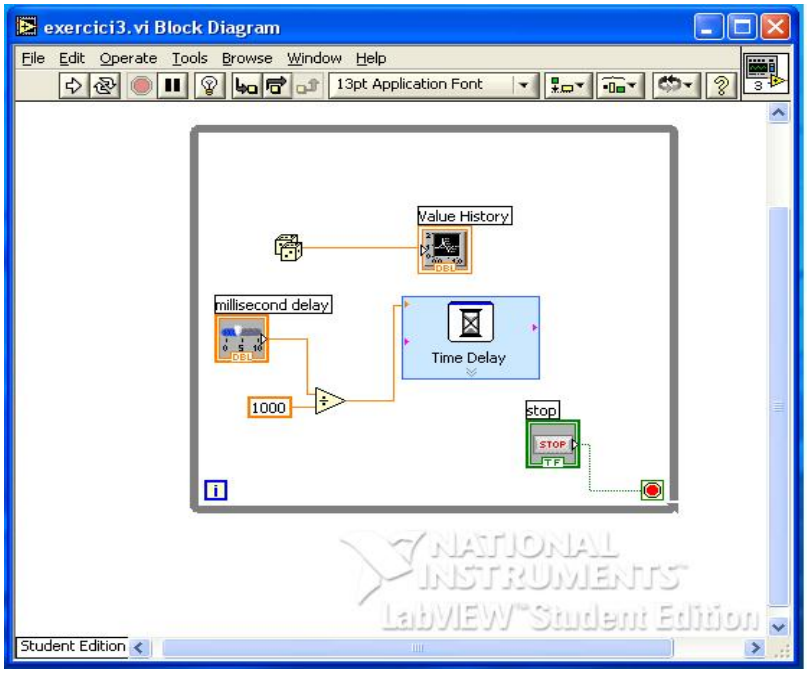


Fig. 4.3 Diagrama de blocs de LabVIEW

4.4. Programes realitzats en el projecte

Amb el Labwindows s'ha fet un programa per a controlar els relès. El programa està escrit en llenguatge C, i ens permet fer totes les configuracions d'elèctrodes possibles.
El procediment d'aquest programa és molt senzill, el que fa és enviar primer l'adreça que ens interessa de la targeta de relès i després envia el relè que es vol tancar. Les dades es posen en un vector i es van executant seqüencialment.
El codi d'aquest programa està a l'annex 8.1.

Amb el LabVIEW s'ha fet un programa que controla tot el sistema de mesura automàtic. Per a la realització d'aquest programa s'han utilitzat diferents subVI, o sigui que s'ha treballat amb diferents funcions per tal de facilitar la realització del programa principal.
Les diferents funcions implementades són les següents:

- ✓ A invertit.vi: Aquesta funció configura elèctrode d'injecció A.
- ✓ B invertit.vi: Aquesta funció configura elèctrode d'injecció B.
- ✓ M invertit.vi: Aquesta funció configura elèctrode de detecció M.
- ✓ N invertit.vi: Aquesta funció configura elèctrode de detecció N.
- ✓ Relès invertit.vi: És el programa principal del control dels relès. Aquest programa incorpora les funcions esmentades anteriorment. Com que s'ha posat una etapa d'amplificació amb transistors que és inversora, aquest programa treu totes les sortides invertides per tal que les dades arribin correctament al Metrabus. Per a la realització d'aquestes funcions s'han utilitzat els drivers de la targeta USB *Eagle* 24/A.
- ✓ Llegir.vi: Aquesta funció permet obrir un arxiu.
- ✓ Guardar.vi: Aquesta funció permet guardar la configuració elèctrodes i les mesures obtingudes en un fitxer de tipus text.
- ✓ Carregar configuració.vi: Aquest programa obra un fitxer ja existent de configuració elèctrodes i ens permet efectuar mesures amb aquesta configuració. També hi ha la opció de tornar a guardar les mesures obtingudes.
- ✓ Resistivitat aparent.vi: En el cas que vulguem crear una nova configuració dels elèctrodes d'injecció i detecció. Un cop realitzades les mesures, les podem guardar en un fitxer.
- ✓ Generador agilent.vi: Per al control del generador de funcions. S'ha utilitzat un driver ja existent.
- ✓ Prema.vi: Per al control del multímetre Prema. També s'ha utilitzat un driver per LabVIEW.
- ✓ Principal.vi: És el programa principal. Aquest programa incorpora totes les funcions esmentades en aquest apartat. Aquesta aplicació ens permet elegir diferents opcions.

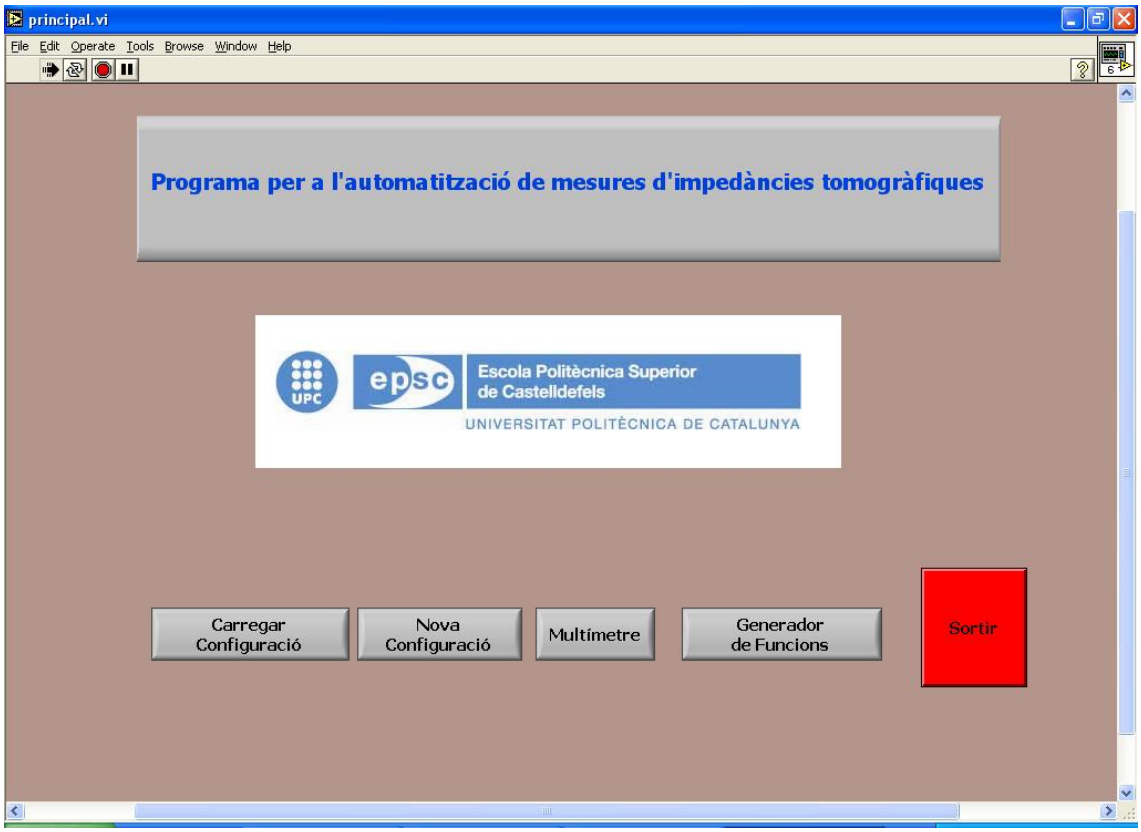


Fig. 4.4. Programa principal.vi

A l'annex 8.2 hi ha tots els detalls del codi de les diferents funcions implementades en labVIEW i la seva explicació, ja que és força extens. Per tant en aquest apartat em limitaré a explicar el funcionament d'aquest programa.

Com es veu a la figura 4.4, el programa principal ens permet elegir diferents opcions :

- ✓ Carregar configuració: Si elegim aquesta opció, es carrega el subVI carregar configuracio.vi. Aquesta aplicació ens permet obrir una configuració ja existent, realitzar les mesures amb aquesta configuració i guardar les mesures en un fitxer un cop realitzades. També es visualitza un gràfic de la resistivitat aparent mesurada. Un cop guardades les mesures per a tornar a la finestra principal s'ha de prémer el botó sortir.

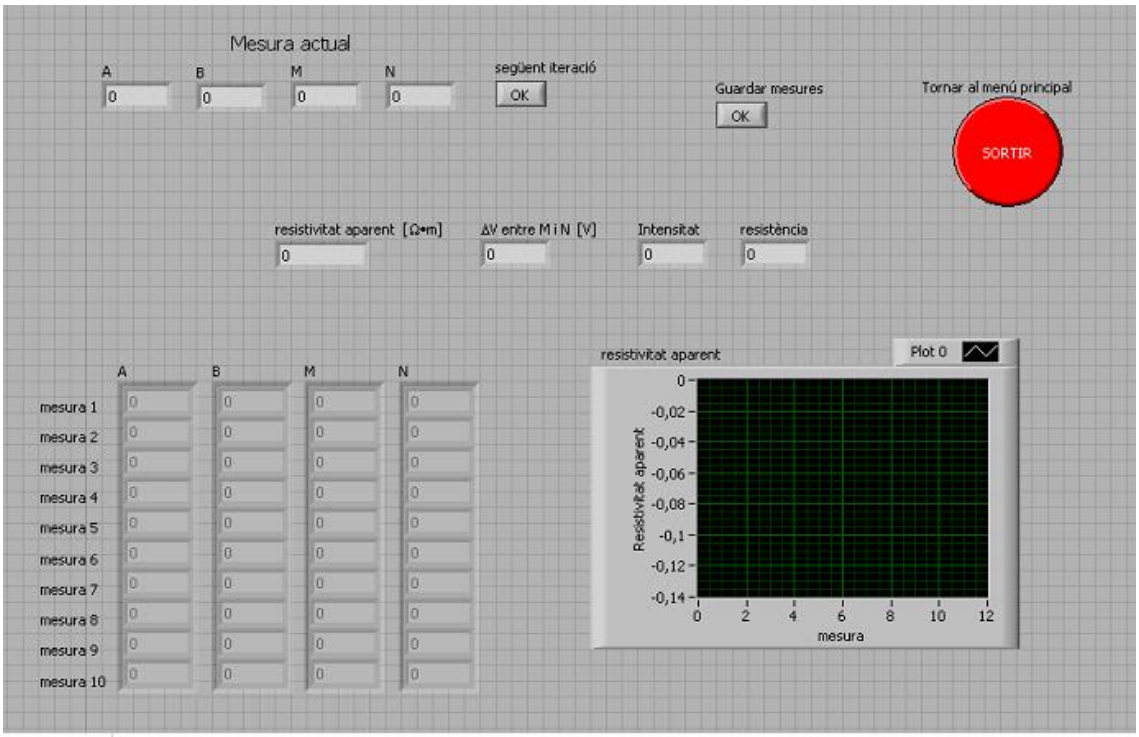


Fig. 4.5. Carregar configuracio.vi

- ✓ Nova configuració: A l'elegir aquesta opció s'obra el subVI resistivitat aparent.vi. Aquesta aplicació ens permet introduir les configuracions elèctrodes que vulguem. Un cop introduïdes, es comencen a fer les mesures, i finalment hi ha la opció de guardar la configuració creada i les mesures de resistivitat aparent obtingudes en un fitxer de tipus text. Com es pot veure a la imatge 4.6, el panell frontal d'aquest programa és molt similar al de carregar configuració, però l'aplicació és diferent, ja que les mesures les hem d'introduir manualment dins de la taula de mesures, en canvi a l'altra aplicació es carreguen automàticament des d'un fitxer.

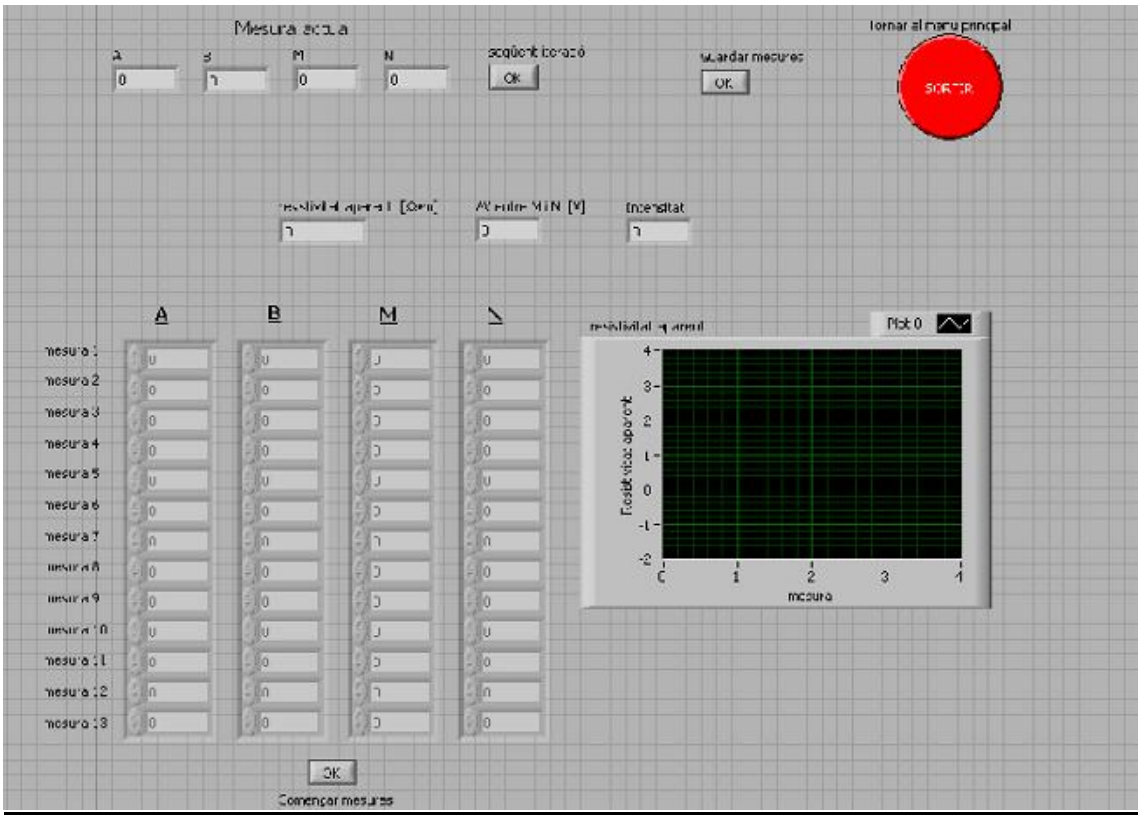


Fig. 4.6. resistivitat aparent.vi

- ✓ Multímetre: Aquesta opció obra la funció prema.vi. Ens permet controlar el multímetre Prema utilitzat en aquest projecte. En principi aquest opció no és necessària utilitzar-la, ja que a les aplicacions nova configuració i carregar configuració el multímetre ja es carrega automàticament.

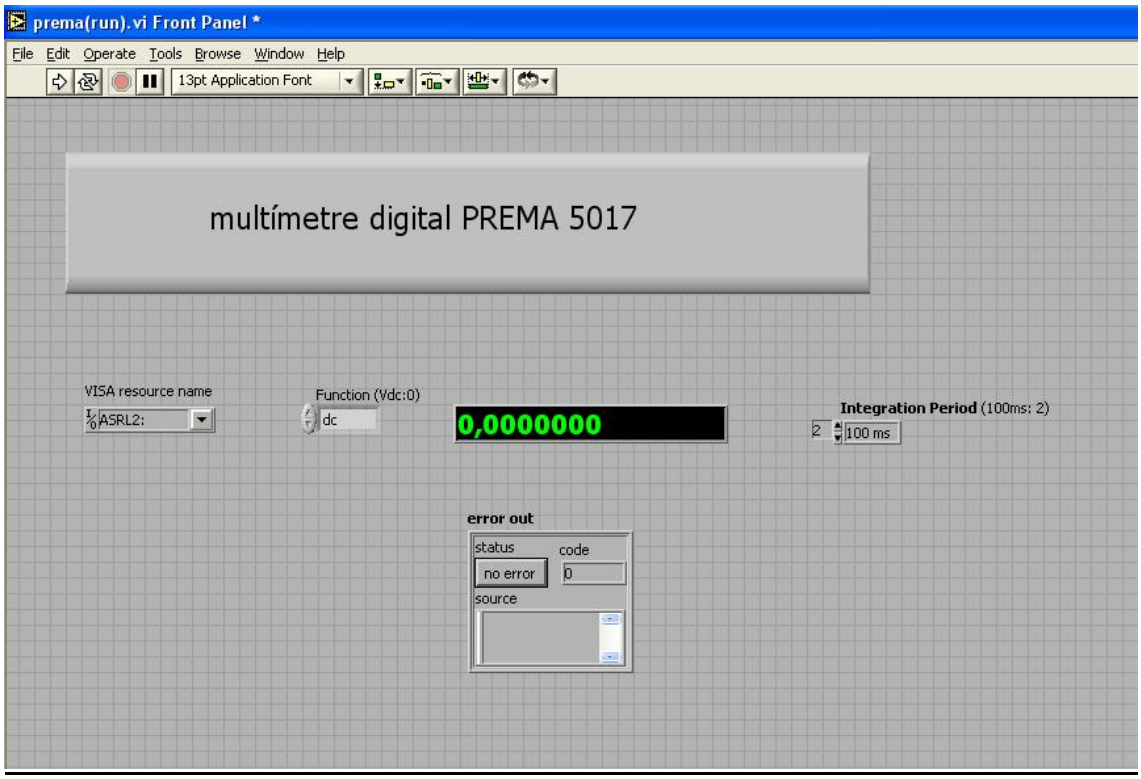


Fig. 4.7. prema.vi

- ✓ Generador de funcions: Aquesta opció obra la opció generador agilent.vi. Ens permet controlar el generador de funcions Agilent utilitzat en aquest projecte.

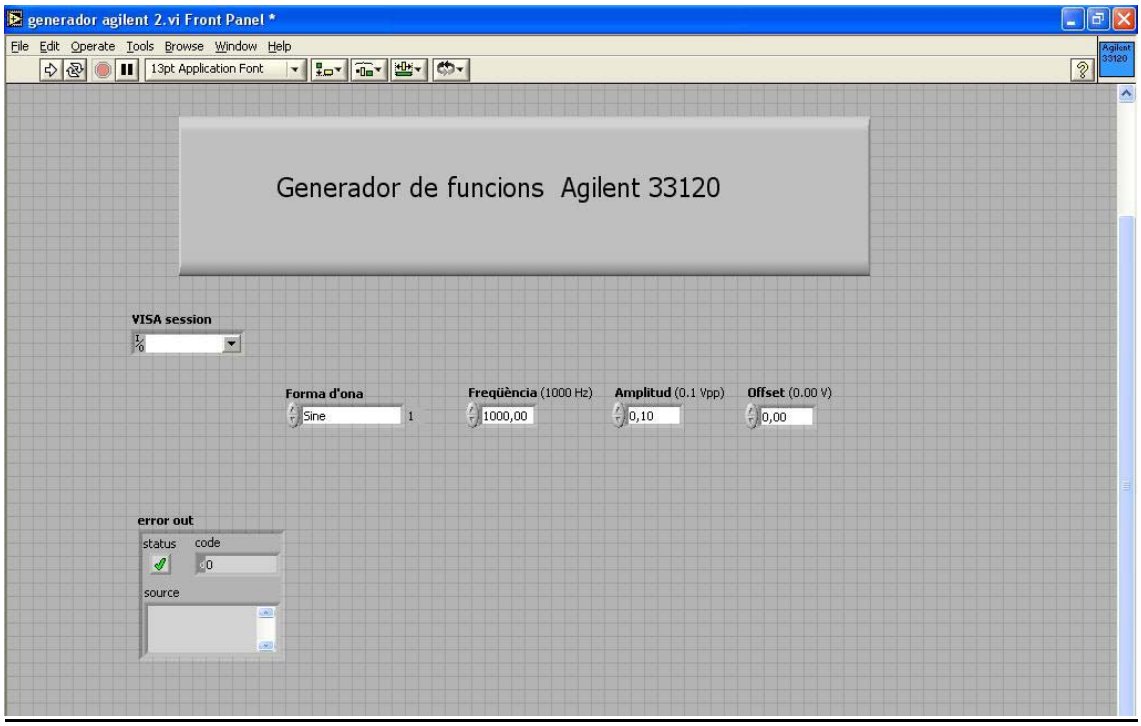


Fig. 4.8. generador agilent.vi

5. MESURES AMB EL SISTEMA

5.1. Introducció

Una vegada realitzat el sistema de mesura, s'ha de comprovar el seu correcte funcionament. Per aquest motiu s'han fet diferents proves i s'han comparat els resultats obtinguts amb uns altres resultats fets amb el sistema de mesura PR0GEO.

Per a la realització de les mesures de resistivitat aparent, amb el generador de funcions s'injecta una senyal sinusoïdal de 1 kHz i 10 V_p . La senyal injectada és de corrent alterna per evitar l'oxidació dels elèctrodes.

S'utilitza un multímetre per a mesurar la diferència de potencial entre els elèctrodes M i N, i un altre multímetre per a calcular la intensitat de senyal injectada. Amb l'adquisició de les dades dels multímetres i la configuració dels elèctrodes, es calcula el valor de la resistivitat aparent.

5.2. Simulació d'un medi homogeni

Abans de començar a fer mesures experimentals en una cubeta d'aigua, el que s'ha fet és realitzar un vector de resistències per a simular una calicata Schlumberger de 16 elèctrodes separats 2 cm realitzada en una cubeta d'aigua de l'aixeta. L'aigua de l'aixeta té una resistivitat aproximada de 6 Ω·m.

Per tant, com que coneixem la resistivitat, a partir de la fórmula 2.4 podem calcular els diferents valors de les resistències.

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta v}{I}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}\right)^{-1} = g\frac{\Delta V}{I} \qquad (5.1)$$

Aplicant la fórmula 5.2 calculem tots els valors de R:

$$R = \frac{\rho}{g} \qquad 2\pi\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}\right)^{-1} \qquad (5.2)$$

Com que es vol simular un medi homogeni, l'únic que ens variarà en la fórmula anterior, serà el factor geomètric g , que depèn directament de la configuració dels diferents elèctrodes i de la seva separació. Els elèctrodes utilitzats per a la realització de mesures estan separats 2 cm, i en aquest cas es vol simular una calicata Schlumberger:

Per exemple, en el cas A=1, B=16, M=2, N=3:

$$g = 2\pi\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}\right)^{-1} = 2\pi\left(\frac{1}{0.02} - \frac{1}{0.04} - \frac{1}{0.28} + \frac{1}{0.26}\right)^{-1} = 0.2485m$$

$$R = \frac{\rho}{g} = \frac{6\Omega \cdot m}{0.2485m} = 24.14\Omega \qquad (5.3)$$

Aquesta operació es repetirà per a totes les altres configuracions. Els resultats del vector estan indicats a la taula 5.1.

Taula 5.1. Càlcul del vector de resistències.

A	B	M	N	Resistència calculada (Ω)
1	16	2	3	24.14
1	16	3	4	8.26
1	16	4	5	4.34
1	16	5	6	2.82
1	16	6	7	2.12
1	16	7	8	1.80
1	16	8	9	1.70
1	16	9	10	1.80
1	16	10	11	2.12
1	16	11	12	2.82
1	16	12	13	4.34
1	16	13	14	8.26
1	16	14	15	24.13

Una vegada calculades les diferents resistències, s'ha fet un vector amb aquests valors. El problema és que aquest vector està implementat amb valors comercials de resistències, que s'aproximen a les calculades però que no són exactament iguals. Entre els elèctrodes 1-2 i 15-16 s'ha col·locat una resistència de 47 Ω per tancar el circuit

Taula 5.2. Resistències calculades i resistències utilitzades en la simulació

Calculades (Ω)		24.14	8.26	4.34	2.82	2.12	1.80	1.70	1.80	2.12	2.82	4.34	8.26	24.13	
Utilitzades (Ω)	47	27	8.2	3.7	2.9	2.9	1.5	1.5	1.5	2.9	2.9	3.7	8.2	27	47

La primera prova que s'ha fet amb aquest vector de resistències amb la configuració Schlumberger és comprovar que els voltatges mesurats entre els elèctrodes M i N són correctes. Com que en aquesta configuració els

elèctrodes injectors estan als extrems i no canvien de posició, el circuit que tenim és simplement un divisor de tensió com el de la figura 5.1.

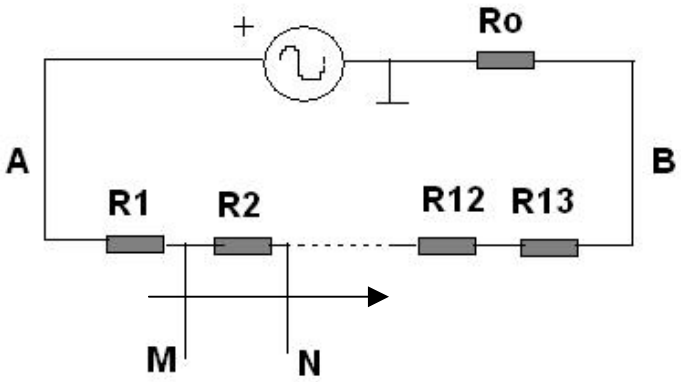


Fig. 5.1. Configuració Schlumberger

Es pot calcular teòricament quanta tensió cau a cada resistència aplicant el concepte de divisor de tensió:

$$V = Vg \cdot \frac{Rn}{Rtotal} \tag{5.4}$$

Una vegada calculats tots els valors teòrics, s'ha realitzat la configuració Schlumberguer, i els diferents valors de voltatge llegits entre els elèctrodes M i N han coincidit amb els calculats, per tant, amb aquesta prova hem comprovat que els elèctrodes es direccionen correctament amb les targetes de relès.

5.3. Mesura de les impedàncies amb la cubeta d'aigua

Aquesta prova consisteix en introduir els 16 elèctrodes en una cubeta plena d'aigua de l'aixeta i realitzar la configuració calicata Schlumberger. Amb aquesta prova obtenim les següents resistències:

Taula 5.3. Resistències mesurades en la cubeta d'aigua

A	B	M	N	Resistència mesurada (Ω)
1	16	2	3	28.14
1	16	3	4	10.89
1	16	4	5	6.45
1	16	5	6	4.85
1	16	6	7	4.50
1	16	7	8	3.91
1	16	8	9	3.83
1	16	9	10	3.78
1	16	10	11	4.44
1	16	11	12	4.76
1	16	12	13	6.81
1	16	13	14	11.00
1	16	14	15	27.36

Si comparem les resistències calculades amb les mesurades, podem veure a la figura 5.2. que les mesurades són més grans.

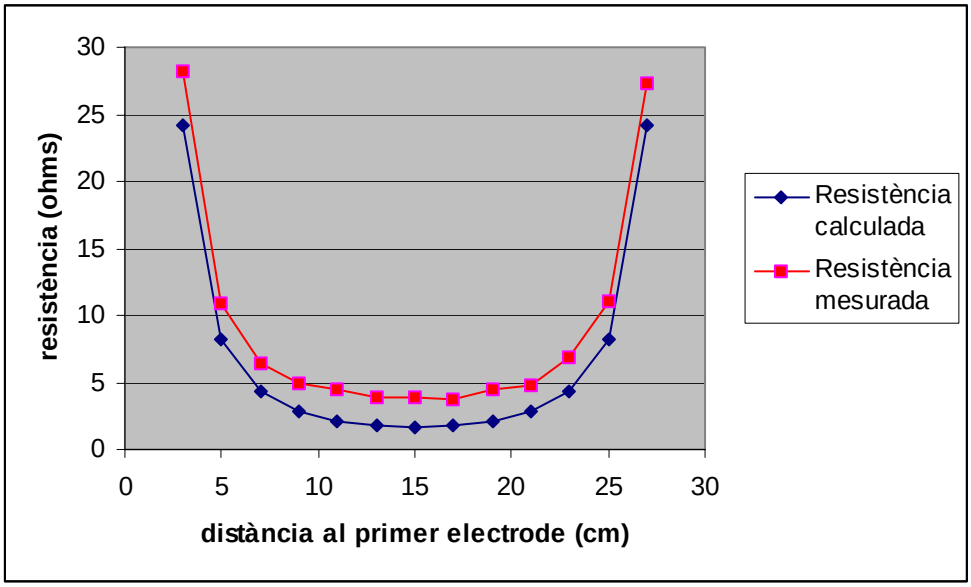


Fig. 5.2. Vector de resistències calculat i mesurat

5.4. Resistivitat aparent

La resistivitat aparent es calcula a partir de la fórmula 5.1, per tant, hem de saber quina configuració electròdica s'ha aplicat, la diferència de potencial entre els elèctrodes M i N i finalment la intensitat injectada. Si agafem els valors de les resistències de l'apartat anterior, per a obtenir la resistivitat aparent només cal que les multipliquem pel factor geomètric de cada mesura.

Per tant, en el cas de les resistències calculades, ens sortirà una resistivitat aparent constant de 6 Ω·m (veure figura 5.3).

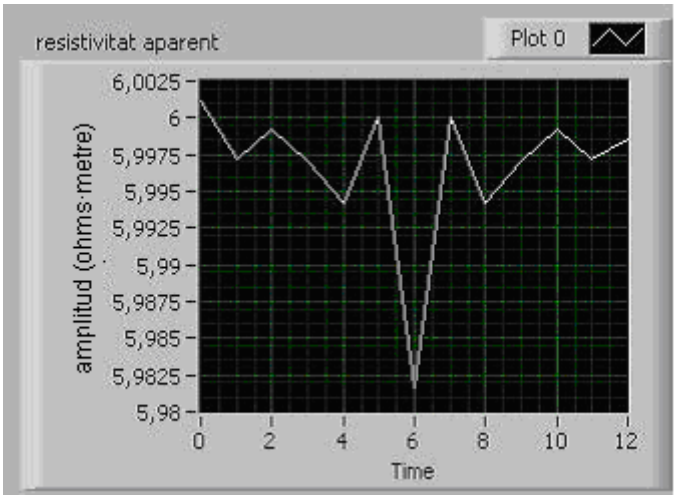


Fig. 5.3. Resistivitat aparent simulada en les resistències calculades

En canvi, la resistivitat aparent mesurada en el vector de resistències implementat al laboratori (figura 5.4), no dóna els valors esperats, ja que les resistències no són exactament les teòriques.

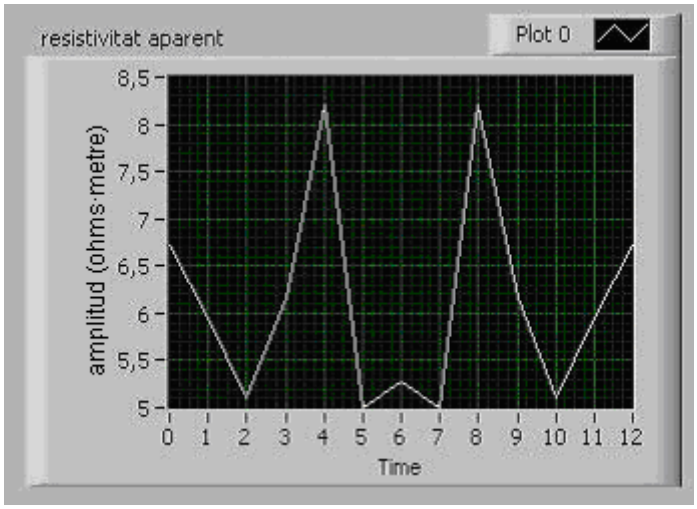


Fig. 5.4. Resistivitat aparent mesurada al vector de resistències utilitzat

Una vegada validat el sistema de mesura amb la simulació de les resistències calculades, passem a fer mesures a una cubeta d'aigua (figura 5.5). Es procedeix a fer una calicata Schlumberger a la cubeta plena d'aigua de l'aixeta sense cap objecte submergit.

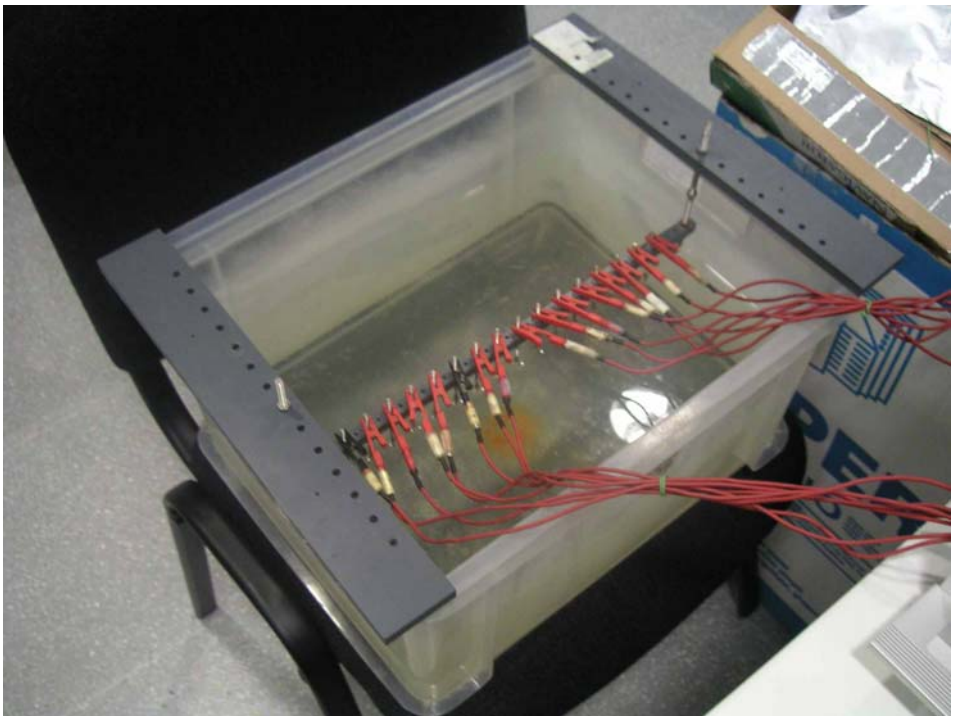


Fig. 5.5. Cubeta d'aigua on es fan les mesures de resistivitat aparent

Si el medi fos perfectament homogeni, la resistivitat aparent hauria de ser constant, però com es veu a la figura 5.6. això no és així. El fet que sigui màxima al centre probablement és degut a la poca fondària de la cubeta d'aigua, que al ser de plàstic, és aïllant.

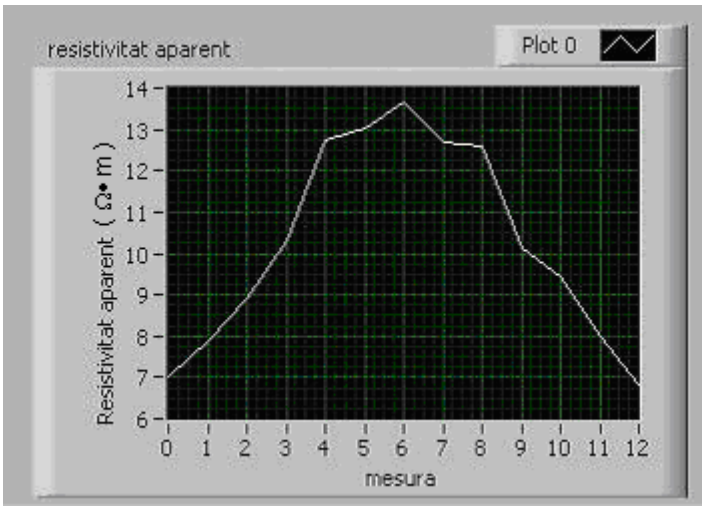
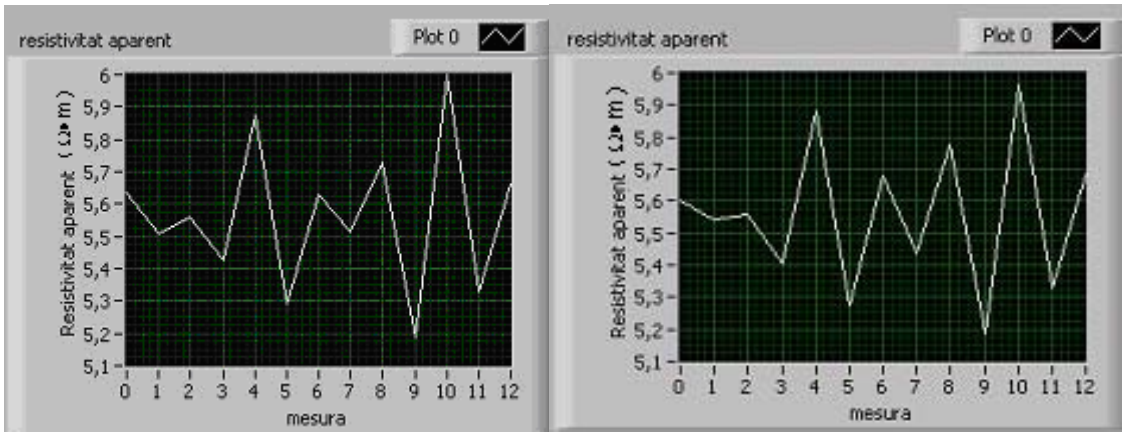


Fig. 5.6. Resistivitat aparent mesurada a la cubeta d'aigua.

5.5. Teorema de reciprocitat

En el capítol 2 s'ha explicat que les configuracions electròdiques tenen la propietat de reciprocitat, és a dir, que si s'intercanvien els elèctrodes d'injecció i detecció, el factor geomètric no varia, i per tant, la resistivitat mesurada en un medi homogeni tampoc varia.

Per comprovar aquesta propietat, s'han efectuat dues mesures. Una amb la configuració calicata Wenner i l'altra amb la seva corresponent recíproca.



a) b)

Fig. 5.7. Resistivitat aparent mesurada amb una calicata Wenner (a), i després amb la seva recíproca (b).

Per a obtenir els resultats de la figura 5.7. s'han utilitzat les configuracions electròdiques següents:

Taula 5.4. Mesures efectuades. Configuració calicata Wenner i calicata Wenner recíproca.

A	B	M	N		A	B	M	N
1	4	2	3		2	3	1	4
2	5	3	4		3	4	2	5
3	6	4	5		4	5	3	6
4	7	5	6		5	6	4	7
5	8	6	7		6	7	5	8
6	9	7	8		7	8	6	9
7	10	8	9		8	9	7	10
8	11	9	10		9	10	8	11
9	12	10	11		10	11	9	12
10	13	11	12		11	12	10	13
11	14	12	13		12	13	11	14
12	15	13	14		13	14	12	15
13	16	14	15		14	15	13	16

Podem observar en la figura 5.7. que els resultats no són exactament iguals, però s'assemblen molt, i per tant, es pot dir que compleixen la propietat de reciprocitat. Aquesta prova ens ha servit per a validar el sistema .

5.6. Sondeig elèctric vertical

El sondeig elèctric vertical consisteix en separar de manera progressiva els elèctrodes d'injecció. D'aquesta manera obtenim la resistivitat aparent a diferents profunditats.

S'ha realitzat un sondeig Schlumberger a la cubeta d'aigua, i a la figura 5.8. es pot observar que com més separats estan els elèctrodes d'injecció, més alta és la resistivitat aparent mesurada. Això és degut al fons de plàstic de la cubeta d'aigua.

Taula 5.5. Mesures realitzades per a la realització del sondeig Schlumberger.

A	B	M	N
7	10	8	9
6	11	8	9
5	12	8	9
4	13	8	9
3	14	8	9
2	15	8	9
1	16	8	9

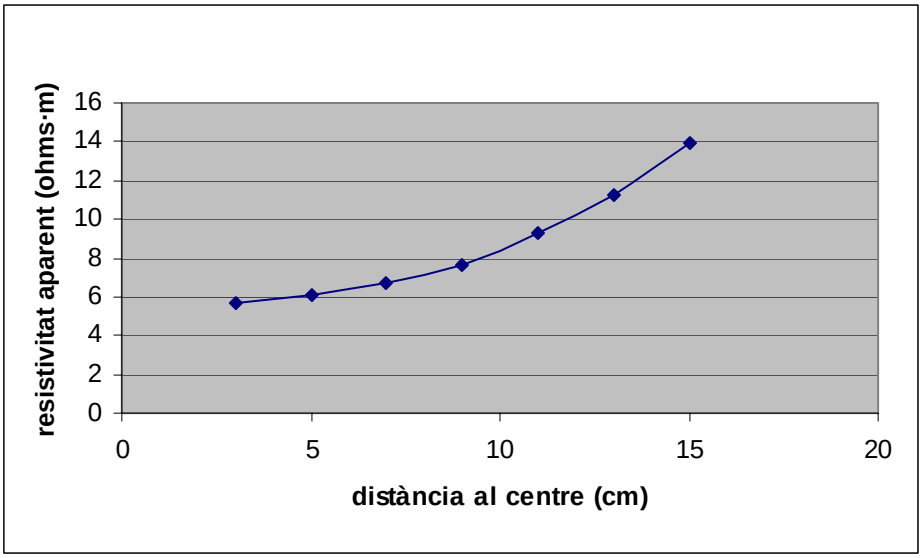
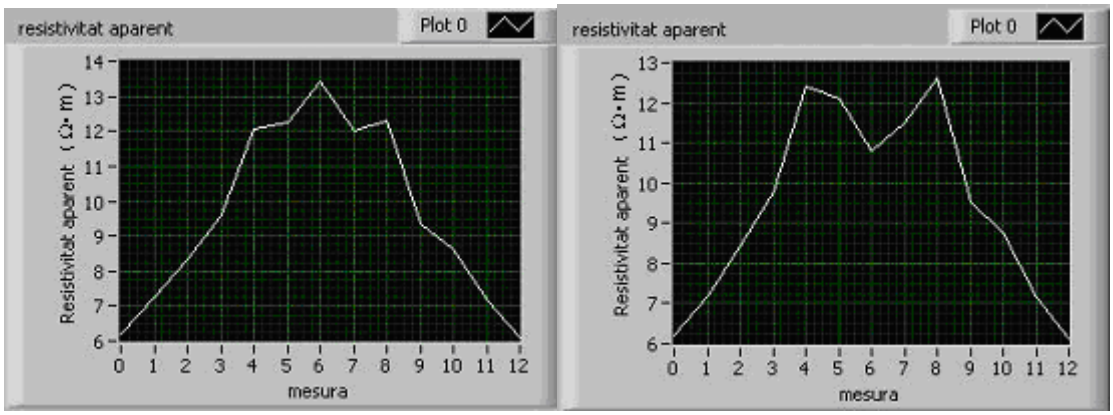


Fig. 5.8. Resistivitat aparent mesurada en un sondeig Schlumberger

5.7. Detecció d'objectes

Utilitzant una configuració electròdica calicata Schlumberger, s'han realitzat mesures de resistivitat aparent a la cubeta d'aigua. A diferència del sondeig elèctric vertical, una calicata ens permet obtenir les variacions laterals resistivitat aparent.
Una vegada obtinguda la resistivitat aparent de la cubeta plena d'aigua, s'ha submergit una bola metàl·lica de 4 cm de diàmetre entre els elèctrodes 8 i 9, i s'han tornat a fer mesures. Com que la bola té menys resistivitat que el medi que l'envolta (l'aigua), a les gràfiques obtingudes es pot veure clarament que hi ha una disminució de resistivitat aparent considerable.



a) b)

Fig. 5.9. Calicata Schlumberger a la cubeta d'aigua. a) sense cap objecte b) amb una bola de metall.

Si agafem els valors mesurats amb la bola conductora i calculem la seva resistivitat aparent normalitzada (Q(x)), es veu molt més clar que hi ha un objecte conductor (figura 5.10).

Podem determinar la profunditat i grandària dels objectes cilíndrics i esfèrics a partir de la resistivitat aparent normalitzada *Q(x)* . Els talls per zero de *Q(x)* permeten obtenir la profunditat de l'objecte. En el cas d'un cilindre això succeeix per $x = \pm h$ i en el cas d'una esfera per $x = \pm \frac{h}{\sqrt{2}}$.

Els altres punts característics de *Q(x)* són els seus màxims i mínims. A partir de la visibilitat (Q_o) és possible calcular la grandària dels objectes si es coneix la seva profunditat.

En el cas d'un cilindre $Q_o = 2\chi\left(\frac{R}{h}\right)^2$ (5.5)

En el cas d'una esfera $Q_o = 2\chi\left(\frac{R}{h}\right)^3$ (5.6)

On $\chi = \frac{1}{2}$ si és aïllant i $\chi = -1$ si és conductor/a

A partir de les expressions anteriors, procedirem a calcular la profunditat i el radi de la bola metàl·lica que hem submergit a la cubeta d'aigua. La figura 5.10 ens mostra la resistivitat aparent normalitzada. Si ens fixem en el cas de la bola que està submergida a 2cm de distància dels elèctrodes:

$$h = x \cdot \sqrt{2} = 3cm \cdot \sqrt{2} = 4.24cm$$

$$Q_o = 2\chi\left(\frac{R}{h}\right)^3 \rightarrow -0.2 = 2 \cdot (-1) \cdot \left(\frac{R}{4.24}\right)^3 \rightarrow R = 1.96cm \qquad (5.7)$$

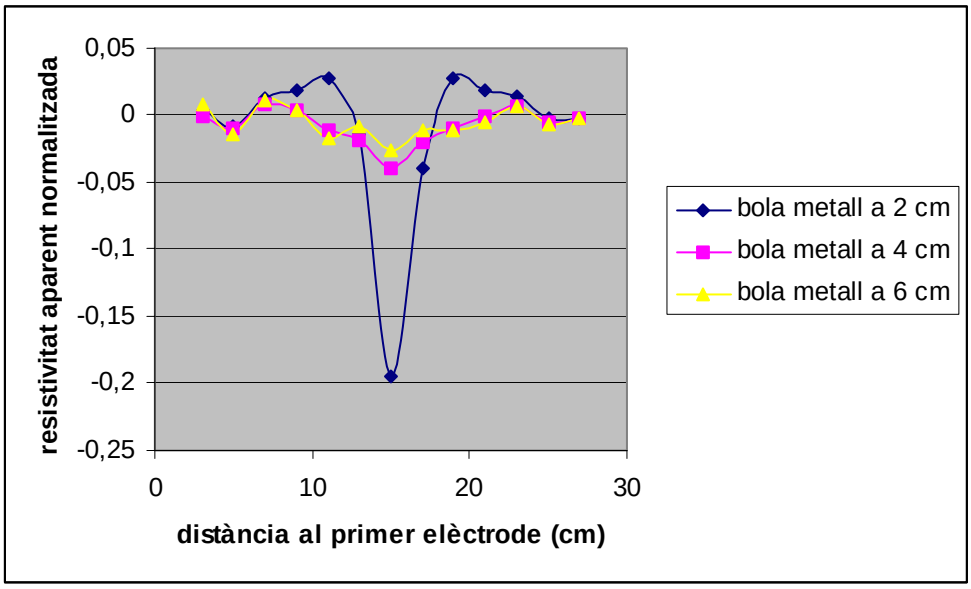
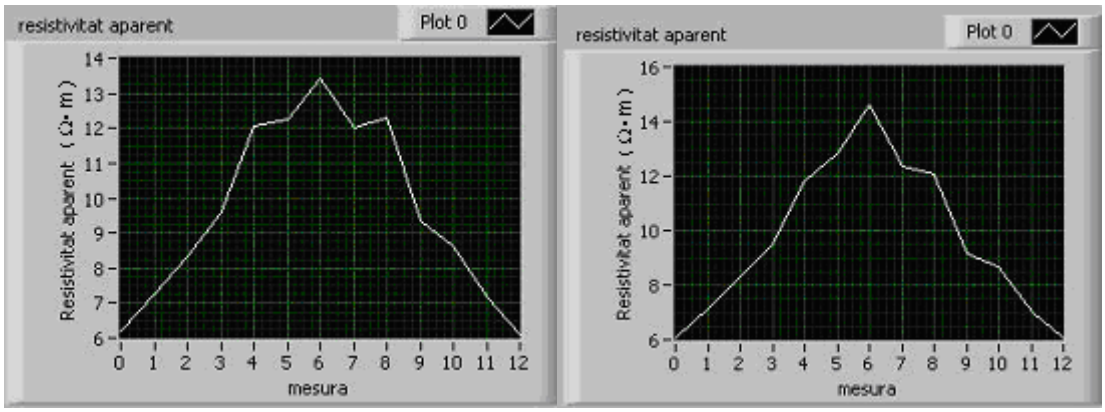


Fig. 5.10. Detecció a la cubeta d'aigua d'una bola metàl·lica submergida a diferents profunditats.

També s'han fet proves amb un objecte aïllant. En aquest cas, els resultats obtinguts són el contrari que en les proves anteriors. S'ha submergit una bola de goma de 5 cm de diàmetre entre els elèctrodes 8 i 9, a diferents profunditats, i s'ha realitzat una calicata Schlumberger.



a) b)

Fig. 5.11. Calicata Schlumberger a la cubeta d'aigua. a) sense cap objecte b) amb una bola de goma submergida.

La figura 5.12. mostra la detecció de la bola de goma per a diferents profunditats. Els valors de les dades estan en resistivitat aparent normalitzada.

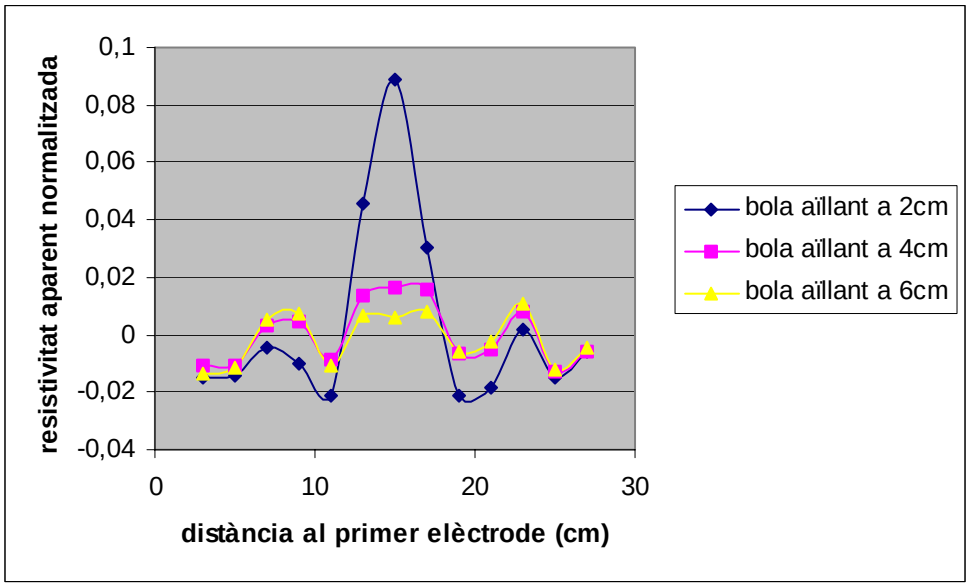


Fig. 5.12. Detecció a la cubeta d'aigua d'una bola aïllant submergida a diferents profunditats.

Les proves anteriors s'han repetit amb un cilindre de 2 cm de diàmetre i 25 cm de longitud.

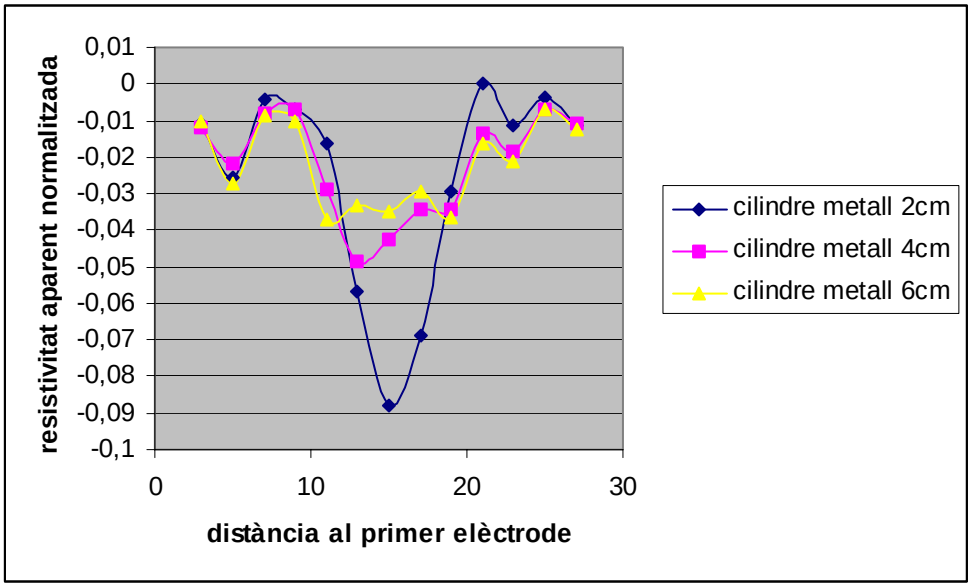


Fig. 5.13. Detecció a la cubeta d'aigua d'un cilindre metàl·lic submergit a diferents profunditats.

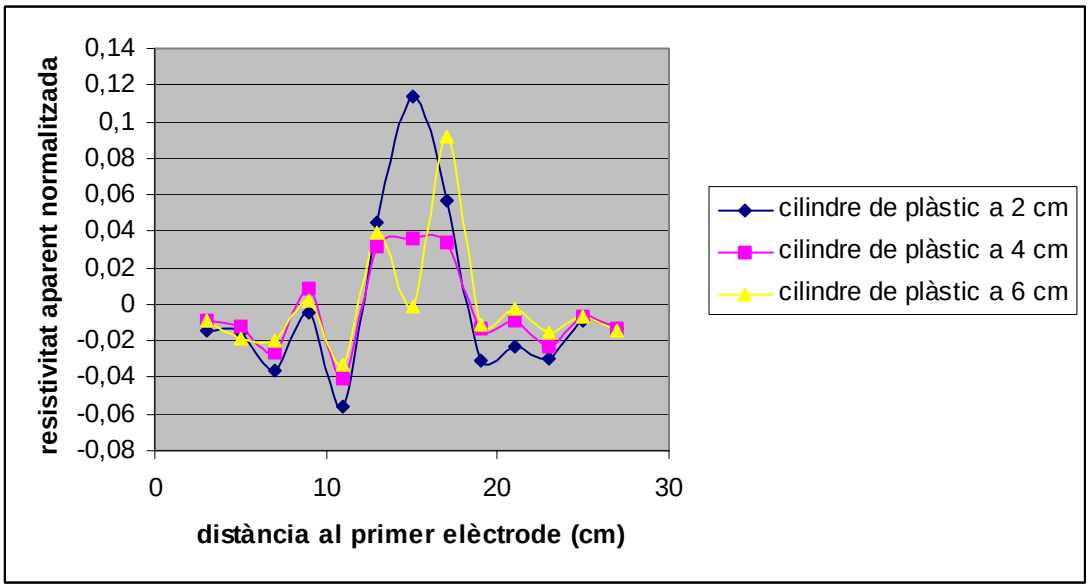


Fig. 5.14. Detecció a la cubeta d'aigua d'un cilindre de plàstic submergit a diferents profunditats.

Finalment, s'han col·locat els objectes utilitzats anteriorment entre els elèctrodes 3 i 4 i s'ha realitzat la calicata Schlumberger. Es pot apreciar que els objectes també es detecten, però amb menys visibilitat.

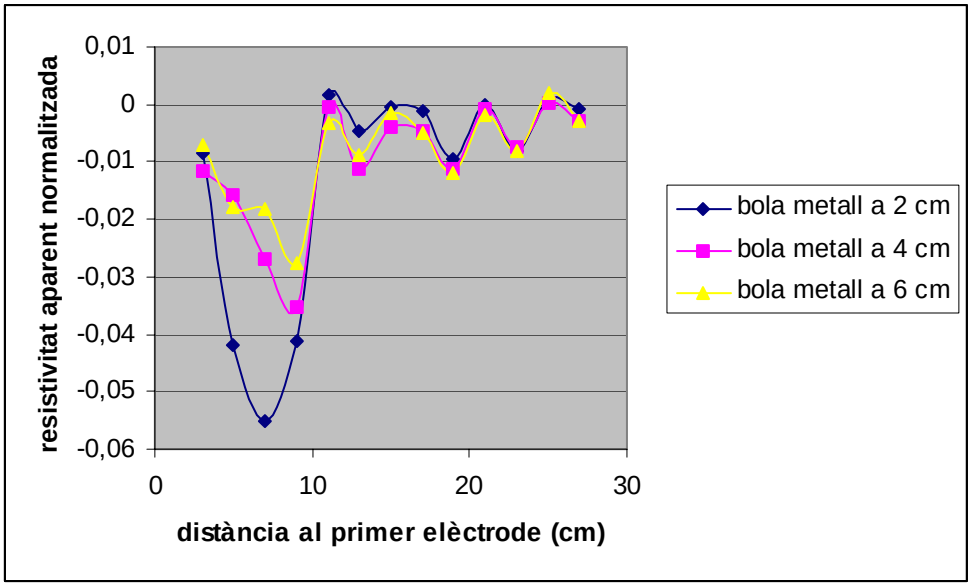
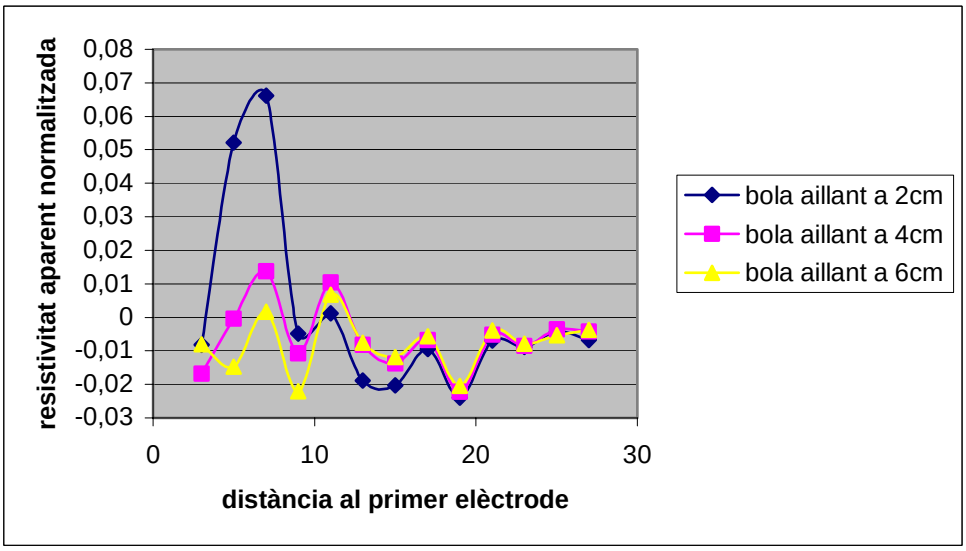


Fig. 5.15. Detecció a la cubeta d'aigua d'una bola metàl·lica col·locada entre els elèctrodes 3 i 4 a diferents profunditats.



.

Fig. 5.16. Detecció a la cubeta d'aigua d'una bola de goma col·locada entre els elèctrodes 3 i 4 a diferents profunditats.

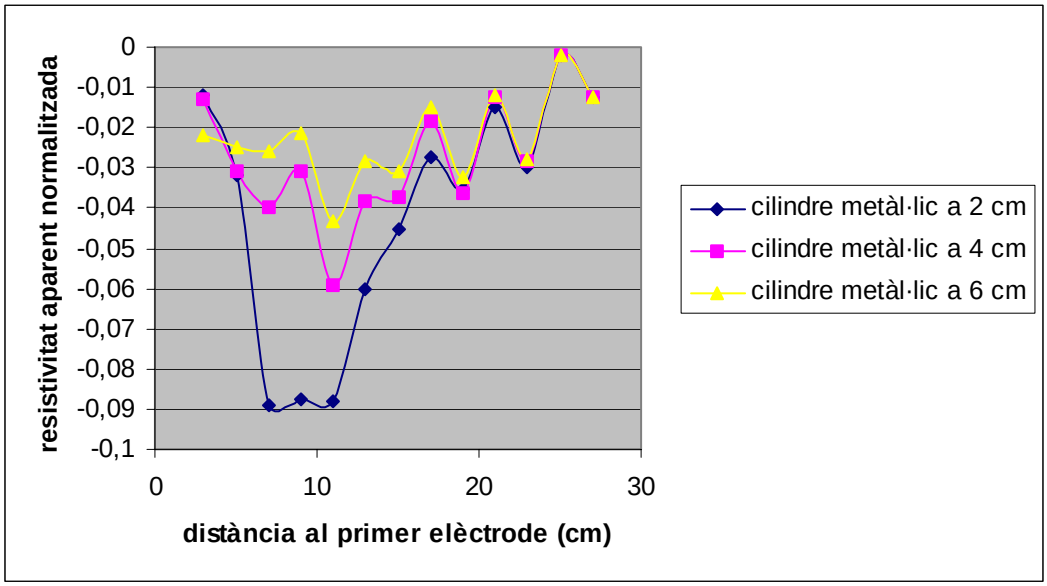


Fig. 5.17. Detecció a la cubeta d'aigua d'un cilindre metàl·lic col·locat entre els elèctrodes 3 i 4 a diferents profunditats.

6. CONCLUSIONS

En aquest projecte s'han aconseguit els següents resultats:

- ✓ Implementar un sistema hardware i software per a realitzar de forma automàtica mesures de resistivitat aparent.

- ✓ Fer diferents mesures amb el sistema per tal de comprovar el seu correcte funcionament

El procediment per a mesurar resistivitat aparent de manera experimental consisteix en injectar corrent mitjançant dos elèctrodes i mesurar tensió amb dos elèctrodes més, de manera que si canviem la posició d'aquests elèctrodes, obtenim diferents mesures. Per tal d'automatitzar aquestes mesures, disposem d'un array de 16 elèctrodes que configurem de la manera que ens interessa més. Hi ha dos tipus de mesures, la calicata i el sondeig. La calicata ens serveix per a fer mesures laterals de resistivitat, i el sondeig ens permet fer mesures a diferents profunditats.

En la realització d'aquest projecte s'han utilitzat instruments convencionals, com són un generador de funcions per injectar el senyal, un multímetre per a mesurar la tensió als elèctrodes detectors, i un altre multímetre per a mesurar la intensitat injectada. Els elèctrodes es configuren amb dues targetes de relès, que direccionen la senyal injectada cap als elèctrodes que ens interessa i el senyal detectat dels elèctrodes cap al multímetre.

La idea inicial era controlar les targetes de relès amb una targeta USB d'adquisició de dades, però finalment no s'ha aconseguit, i s'ha considerat que les dues targetes no són compatibles. Per tant, per a controlar els relès s'ha utilitzat un ordinador i per a tota la resta un altre ordinador. El programa implementat per al control de les targetes de relès està desenvolupat en Labwindows. Per altra banda, amb el programa LabVIEW s'ha realitzat un programa que adquireix les dades dels multímetres, i a partir d'aquí calcula la resistivitat aparent. Aquesta aplicació funciona correctament, ja que s'han comparat els resultats obtinguts amb altres resultats de projectes anteriors.

S'han fet diverses mesures per a comprovar el correcte funcionament d'aquest sistema. En una cubeta plena d'aigua s'hi ha submergit diferents objectes aïllants i conductors, i s'han fet mesures amb la configuració calicata Schlumberger. Com que l'objecte introduït té una resistivitat diferent a la de l'aigua, a les gràfiques realitzades amb les diferents resistivitats aparents obtingudes, es pot apreciar que hi ha un màxim si l'objecte és aïllant o un mínim si l'objecte és conductor. D'aquesta manera s'ha comprovat que es poden detectar objectes soterrats realitzant mesures de resistivitat aparent.

La continuació d'aquest projecte seria buscar una targeta USB d'adquisició de dades compatible amb les targetes de relès o canviar el sistema de direccionament (targetes de relès) per un d'actual, de manera que només es necessiti un ordinador per a la realització automàtica de mesures.

Pel que fa a la ambientalització, en aquest projecte s'han utilitzat instruments que ja eren al laboratori, com és el cas dels multímetres, i el generador de funcions, es a dir que una vegada acabat el projecte es continuaran utilitzant. Les targetes de relès ja s'havien fet servir en projectes anteriors, per tant, no s'han hagut de comprar de nou.
El desmantellament del sistema hardware és senzill i tots els components són aprofitables en futurs projectes.

7. BIBLIOGRAFIA

[1] Alberto Sastre, X., "*Sistema automático de prospección geoeléctrica*". Projecte fi de carrera ETSETB 1997.

[2] Floyd, T., "*Fundamentos de sistemas digitales*" . Prentice Hall 2000.

[3] Gasulla Forner, M., "*Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica en el subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales*". Tesis doctoral presentada a la UPC l'any 1999.

[4] Guía del usuario. Generador de funcions HP33120A. 1994.

[5] Jeffrey, Y., "*LabVIEW programming, data acquisition and analysis*". Prentice Hall 2001.

[6] Jordana Barnils, J., "*Obtenció d'imatges de la distribució d'impedància elèctrica en el subsòl per a la detecció d'anomalies extenses. Aplicació a la detecció d'humitat i de contaminants* ". Tesis doctoral presentada a la UPC l'any 1999.

[7] *LabVIEW 7 Express. Getting started with LabVIEW*. National Instruments 2003.

[8] LabVIEW introduction – six hours version – 7

[9] LabVIEW interface for EDR Enhanced. Third party interface driver user's manual.

[10] Lluís P.,ed. , "*Circuits i dispositius electrònics. Fonaments d'electrònica*". Edicions UPC 1998.

[11] Metrabus user's guide. Keithley Metrabyte.

[12] Pallàs Areny, R., "*Adquisición y distribución de señales*". Marcombo Boixareu Editores 1993.

[13] Universal Serial Bus devices user's manual for USB24/A

[14] User's manual. Multímetre digital PREMA DMM 5017.

8. ANNEXOS

8.1. Programa en Labwindows per al control dels relès

```
#define DATAIO 768   /* direcció I/O de PC per a la transmissió e/s de dades */
#define ADRPTR 769   /* direcció I/O de PC per a seleccionar les targetes del
                        sistema */
#define ADRRST 770   /* direcció I/O de PC per a reinicialitzar el sistema
                        METRABUS */
#define MEM32_OUT  4     /* direcció base d'una targeta de relès */
#define MEM32_IN   8       /* direcció base de l'altra targeta de relès*/
#define MAX 80


main()
{
int i,a,c,d;
int direccion,byte;
int vector [MAX];

/*Les dades al vector les he d'entrar una per una perquè labwindows només ho
permet d'aquesta manera*/

vector[0]=1;
vector[1]=16;
vector[2]=2;
vector[3]=3;
vector[4]=1;
vector[5]=16;
vector[6]=3;
vector[7]=4;
vector[8]=0;


cls();


/************* selecció de bloc i de la targeta d'entrada*****************/

i=0;
while (vector[i]!=0)
{
  FmtOut("\t A= %i ,B= %i ,M= %i, N= %i\n",
vector[i],vector[i+1],vector[i+2],vector[i+3]);

  /* ==========  HCUR  (A)   ================== */
  if (vector[i]<= 8)
```

```
 {
   a=0;
   c=vector[i]-1;
 }
 else
 {
   a=1;
   c=vector[i]-9;
 }


  outp (ADRPTR,MEM32_IN+a);  /*targeta d'entrada de corrent*/
  direccion=inp (ADRPTR);
  FmtOut("port = %i\n\r",direccion);


/* selecció del relè a tancar dins del bloc de 8  */
  byte = pow (2,c);
  outp(DATAIO, byte );
  byte=inp(DATAIO);
  FmtOut("byte = %i\n\r",byte);

  i++;


 /* ==========  LCUR  (B)   ================== */
 if (vector[i]<= 8)
 {
   a=3;
   d=vector[i];
   switch (d)
   { case (1):
       c=7;
        break;

     case (2):
       c=6;
        break;

     case (3):
       c=5;
        break;

     case (4):
       c=4;
        break;

     case (5):
       c=3;
        break;
```

```
      case (6):
        c=2;
         break;

      case (7):
         c=1;
          break;

      case (8):
        c=0;
         break;

   }
}
else
{
   a=2;
   d=vector[i]-8;
   switch (d)
   { case (1):
       c=7;
        break;

     case (2):
       c=6;
        break;

     case (3):
       c=5;
        break;

     case (4):
       c=4;
        break;

     case (5):
       c=3;
        break;

     case (6):
       c=2;
        break;

     case (7):
        c=1;
         break;

     case (8):
       c=0;
```

```
        break;

    }

  }


    outp (ADRPTR,MEM32_IN+a);  /*targeta d'entrada de corrent*/
    direccion=inp (ADRPTR);
    FmtOut("port = %i\n\r",direccion);


       /* selecció del relè a tancar dins del bloc de 8  */
    byte = pow (2,c);
    outp(DATAIO, byte );
       byte=inp(DATAIO);
       FmtOut("byte = %i\n\r",byte);

    i++;

/******************selecció del bloc i la targeta de sortida****************/
   /* ==========  HVOLT  (M)   ================== */
   if (vector[i]<= 8)
   {
      a=0;
      c=vector[i]-1;
   }
   else
   {
      a=1;
      c=vector[i]-9;
   }


    outp (ADRPTR,MEM32_OUT+a);  /*targeta d'entrada de corrent*/
    direccion=inp (ADRPTR);
    FmtOut("port = %i\n\r",direccion);


       /* selecció del relè a tancar dins del bloc de 8  */
    byte = pow (2,c);
    outp(DATAIO, byte );
       byte=inp(DATAIO);
       FmtOut("byte = %i\n\r",byte);

    i++;


   /* ==========  LVOLT  (N)   ================== */
   if (vector[i]<= 8)
```

```
{
   a=3;
   d=vector[i];
   switch (d)
   { case (1):
       c=7;
        break;

     case (2):
       c=6;
        break;

     case (3):
       c=5;
        break;

     case (4):
       c=4;
        break;

     case (5):
       c=3;
        break;

     case (6):
       c=2;
        break;

     case (7):
        c=1;
         break;

     case (8):
       c=0;
        break;

  }
}
else
{
   a=2;
   d=vector[i]-8;
   switch (d)
   { case (1):
       c=7;
        break;

     case (2):
       c=6;
        break;
```

```
      case (3):
        c=5;
         break;

      case (4):
        c=4;
         break;

      case (5):
       c=3;
         break;

      case (6):
        c=2;
         break;

      case (7):
         c=1;
          break;

      case (8):
        c=0;
         break;

   }

 }


   outp (ADRPTR,MEM32_OUT+a);  /*targeta d'entrada de corrent*/
   direccion=inp (ADRPTR);
   FmtOut("port = %i\n\r",direccion);


      /* selecció del relè a tancar dins del bloc de 8  */
   byte = pow (2,c);
   outp(DATAIO, byte );
      byte=inp(DATAIO);
      FmtOut("byte = %i\n\r",byte);

   i++;


   GetKey (); /* polsar tecla per a continuar */


}
FmtOut("aplicació finalitzada");
}
```

8.2. Programes realitzats en LabVIEW

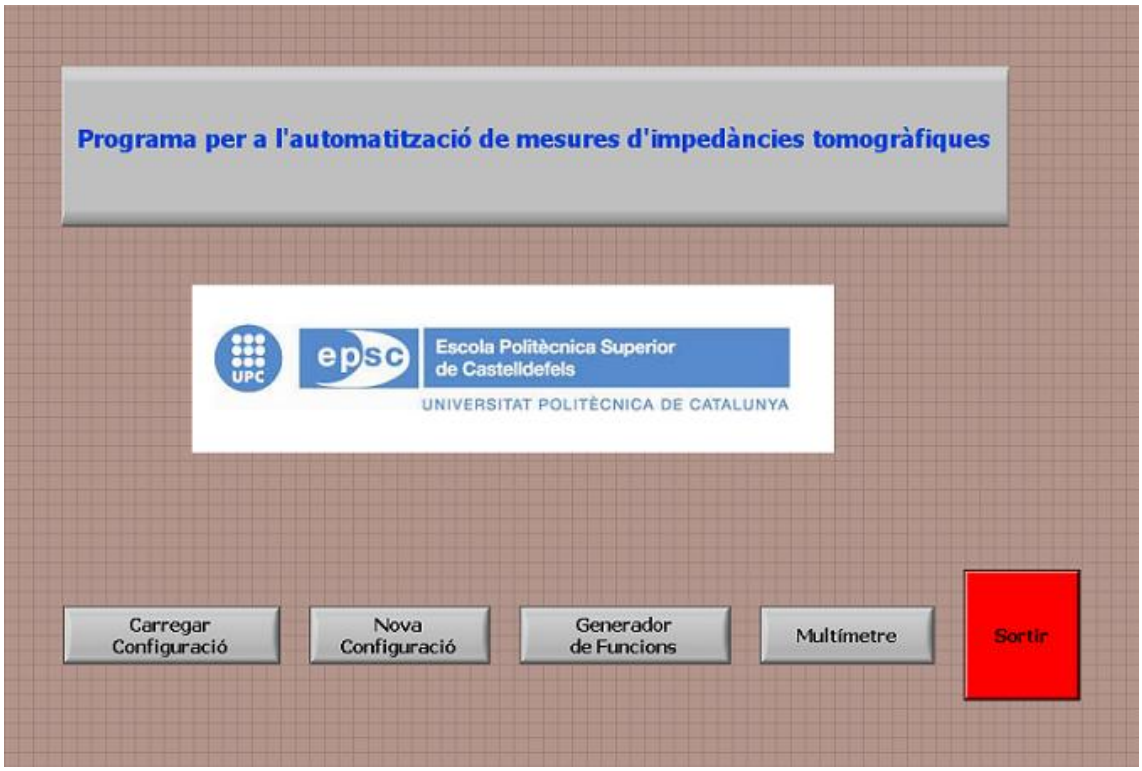


Fig. 8.1. Panell frontal del programa principal

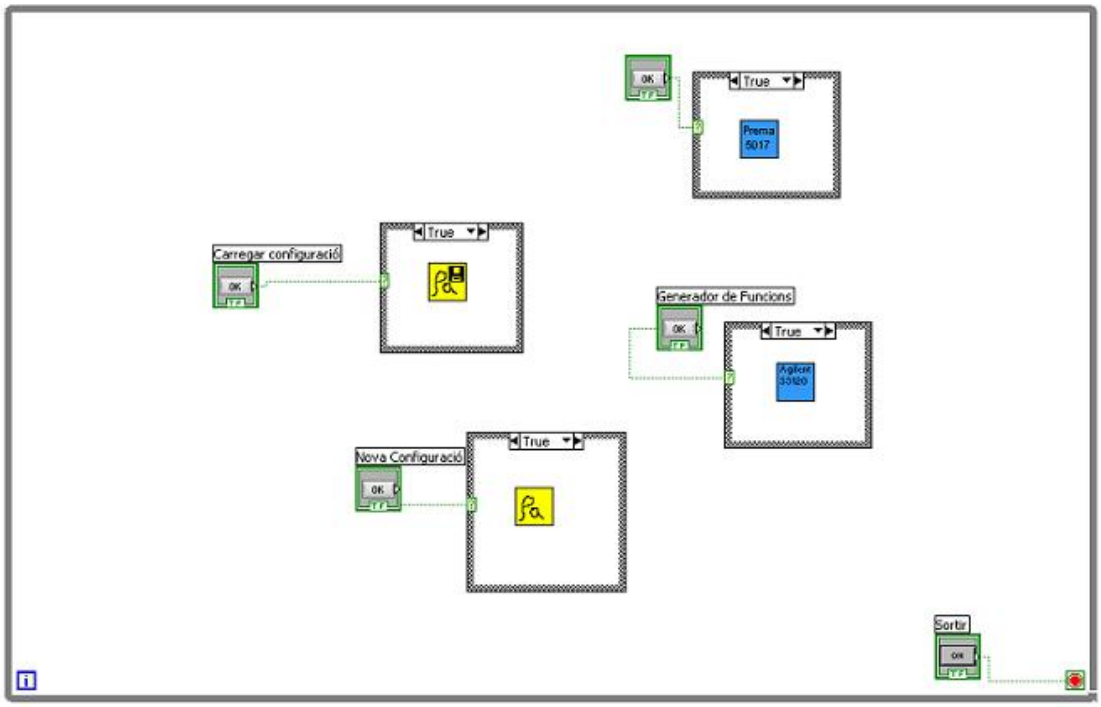


Fig. 8.2. Codi visual del programa principal

L'aplicació resistivitat aparent, s'obra si s'elegeix l'opció "nova configuració", al programa principal. Aquesta opció permet realitzar una nova configuració dels elèctrodes i tot seguit realitzar les mesures introduïdes. A cada mesura s'indica la resistivitat aparent, la intensitat injectada i la diferencia de potencial entre els elèctrodes M i N. Un cop finalitzades les mesures, es mostra un gràfic amb totes les resistivitats aparents calculades, i es pot guardar les mesures en un fitxer tipus text.

La figura 8.4 mostra el codi que implementa aquesta aplicació. Com es pot veure, està compost de diferents sub-Vis o funcions que s'expliquen més endavant com per exemple el control dels relès, guardar fitxer o el control dels dos multímetres.

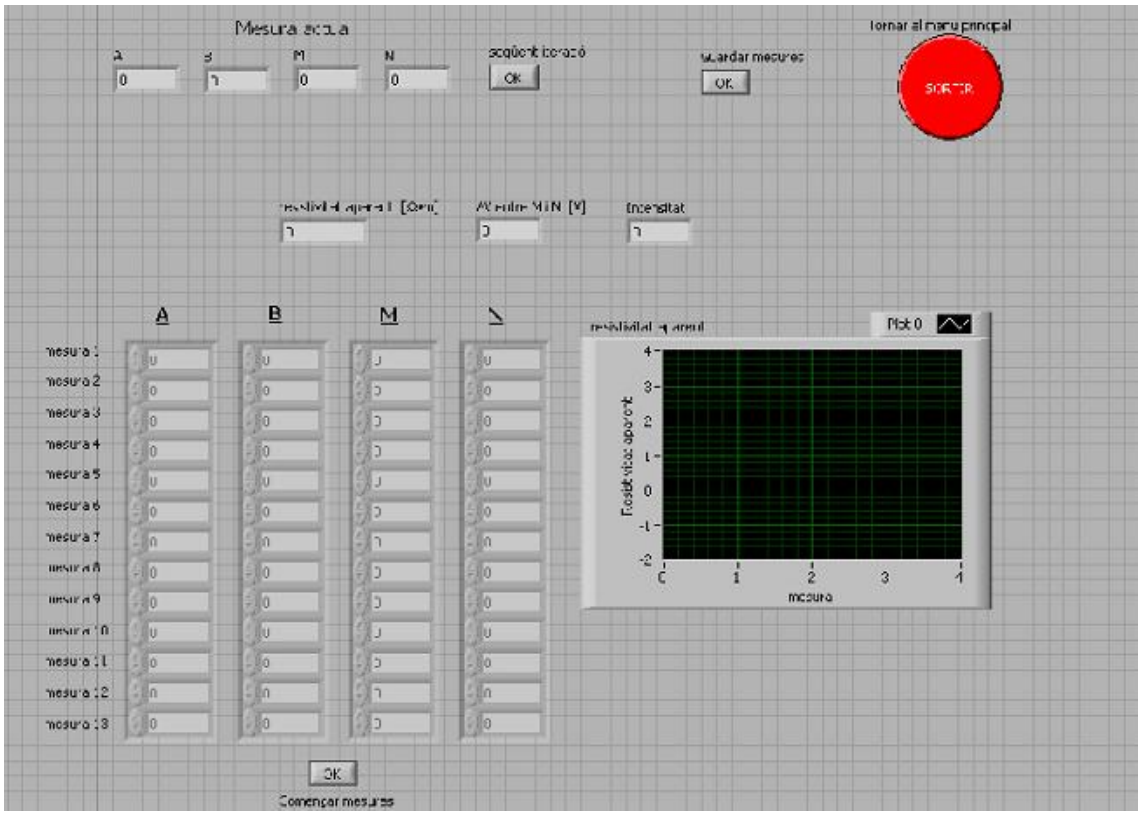


Fig. 8.3. Panell frontal de resistivitat aparent.vi

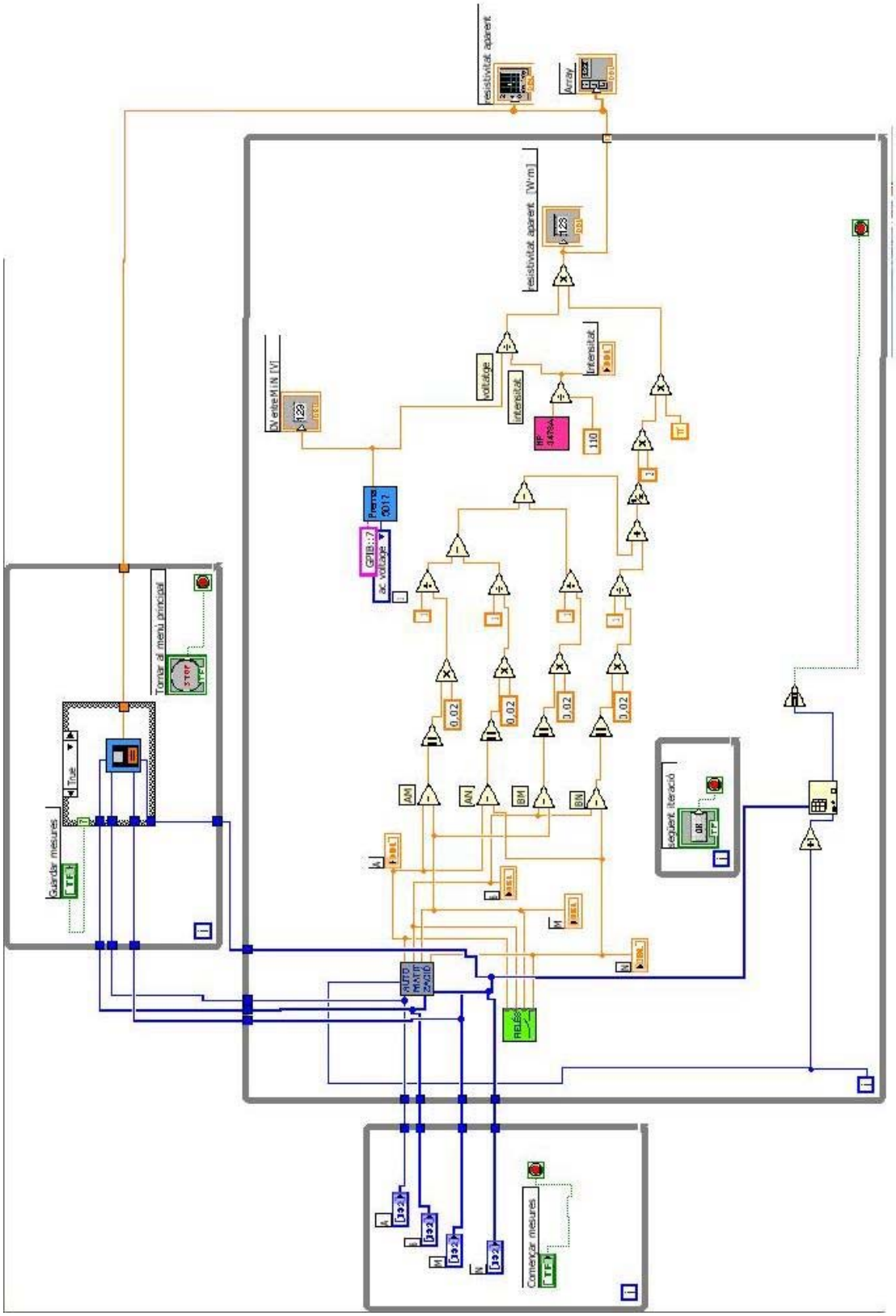


Fig. 8.4. Codi visual de resistivitat aparent.vi

L'aplicació carregar configuració, es carrega a l'elegir l'opció "carregar configuració " del programa principal. Com es pot veure a la figura 8.5, és una aplicació molt semblant a la de nova configuració, però en aquesta opció, les configuracions dels relès no es poden introduir manualment, sinó que es carreguen des d'un fitxer ja existent.

Una vegada carregat el fitxer, ja funciona exactament igual que l'aplicació resistivitat aparent. També hi ha la opció de tornar a guardar les mesures realitzades.

Si mirem el codi visual d'aquesta aplicació (fig. 8.6) veiem que la diferència amb el codi de resistivitat aparent és que s'utilitza una funció per a obrir un fitxer.

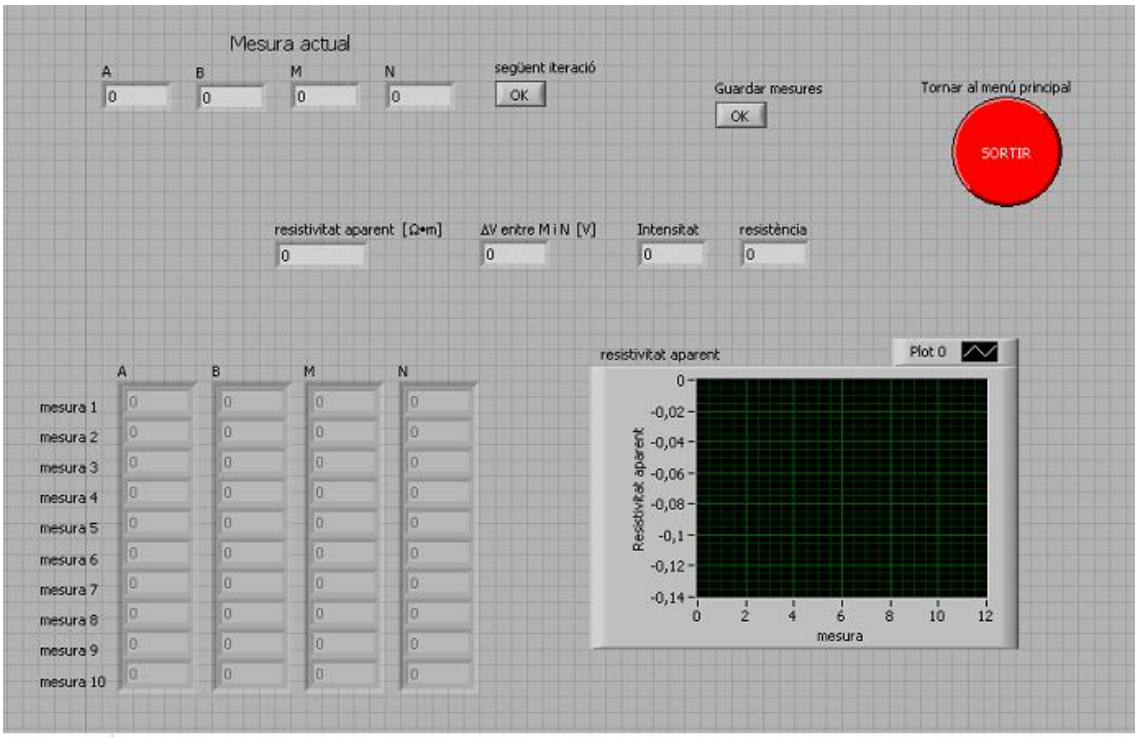


Fig. 8.5. Panell frontal de carregar configuració.vi

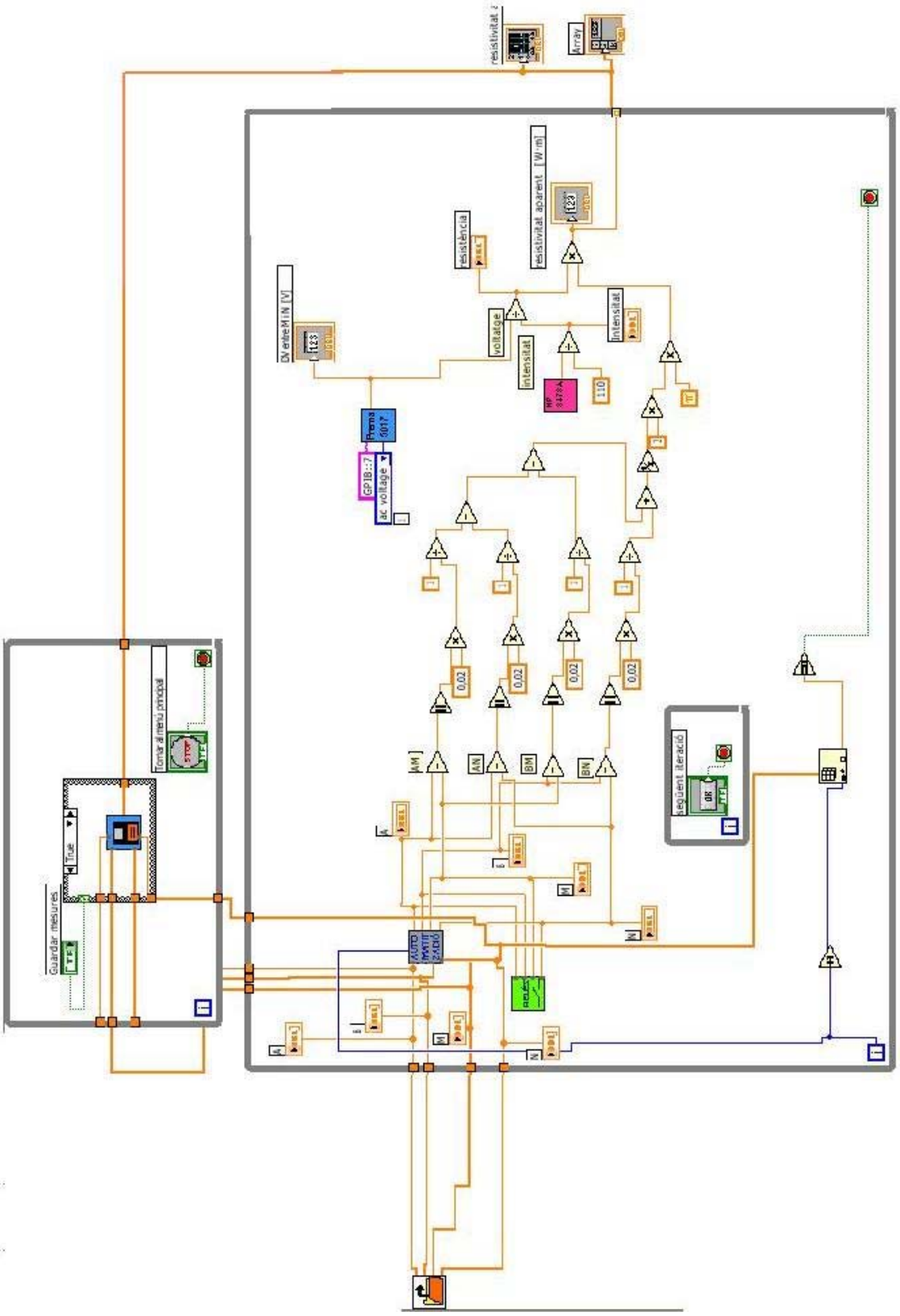


Fig. 8.6. Codi visual de carregar configuració.vi

La funció llegir, el que fa és poder llegir un fitxer de tipus text i posar les dades del fitxer en els arrays de la configuració electròdica.

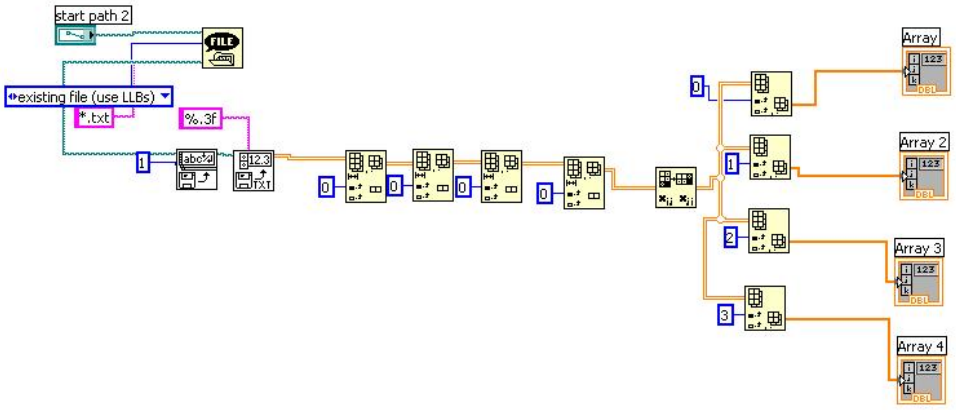


Fig. 8.7. Codi visual de llegir.vi

En canvi la funció guardar, agafa la configuració electròdica i les resistivitats aparents calculades, i les guarda en un fitxer de tipus text.

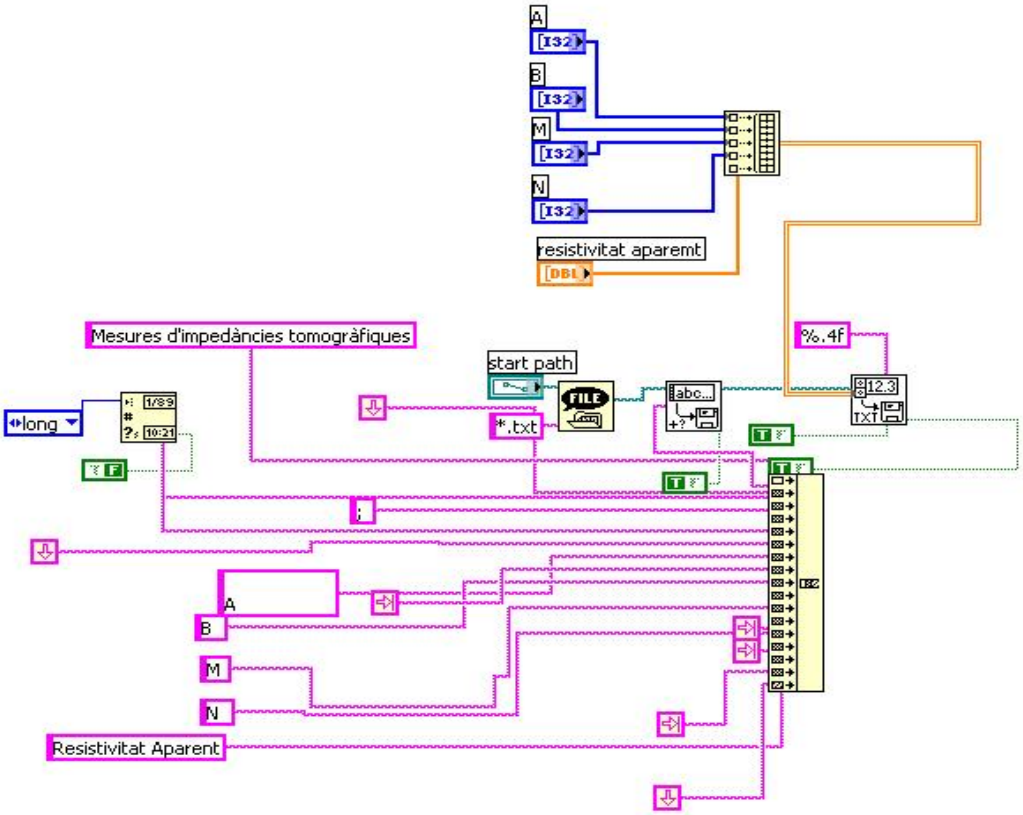


Fig. 8.8. Codi visual de guardar.vi

L'aplicació Agilent, és un driver que controla el generador de funcions Agilent 33120A a través del bus RS-232.

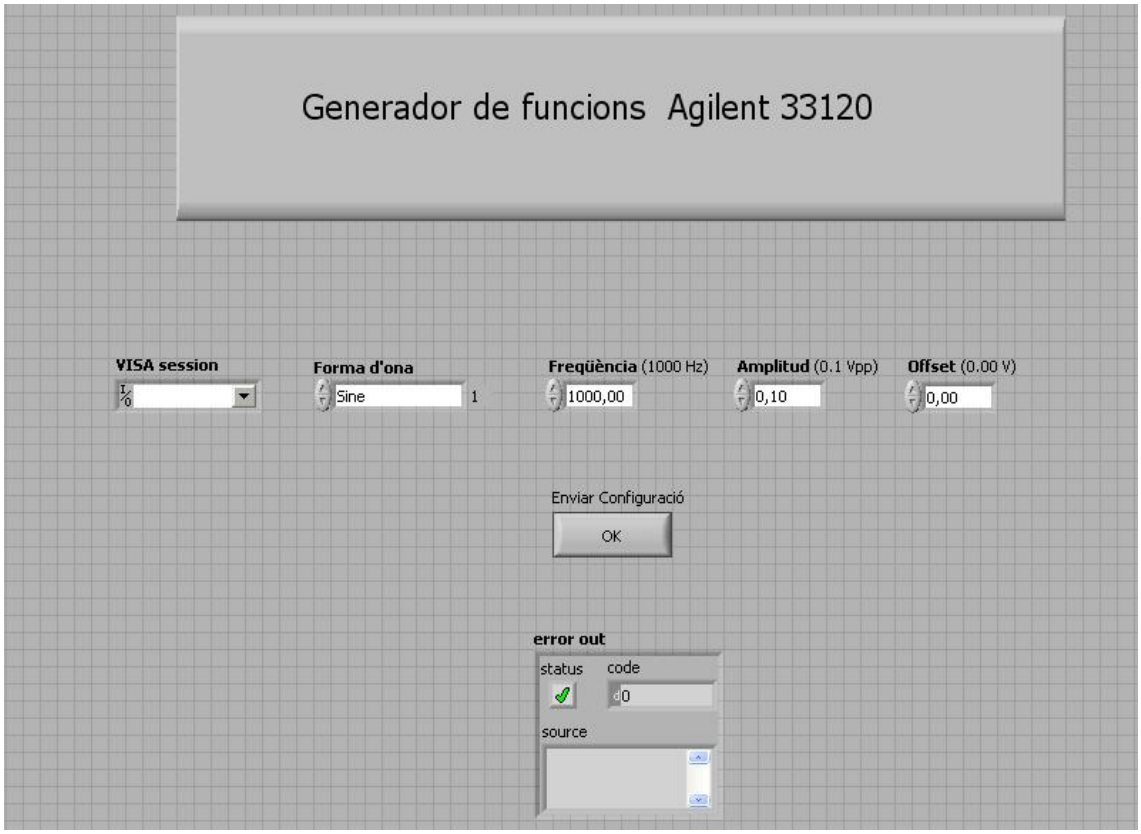


Fig. 8.9. Panell frontal de Agilent.vi

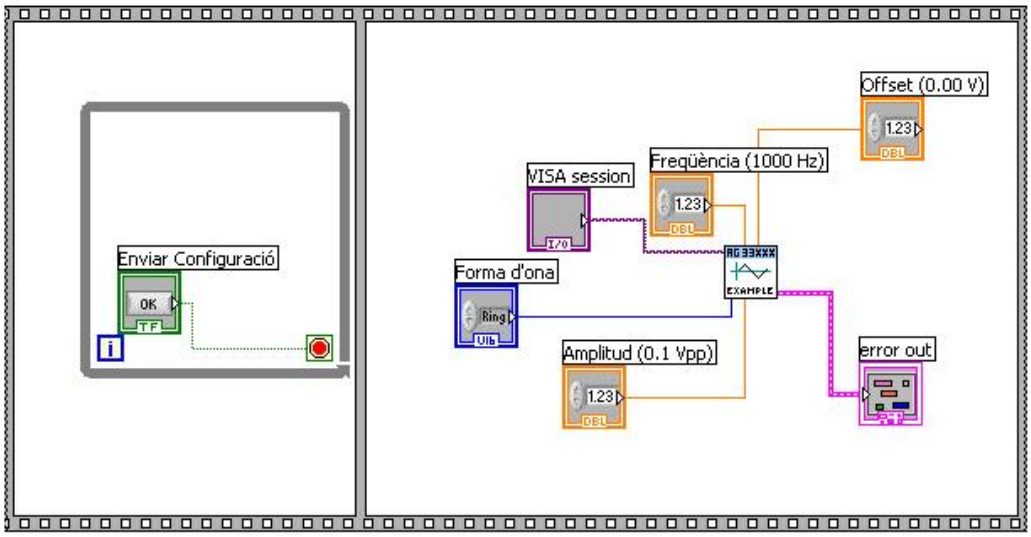


Fig. 8.10. Codi visual de Agilent.vi

L'aplicació Prema, és un driver que controla el multímetre PREMA 5017 a través del bus GPIB. L'adreça GPIB d'aquest instrument és 7.

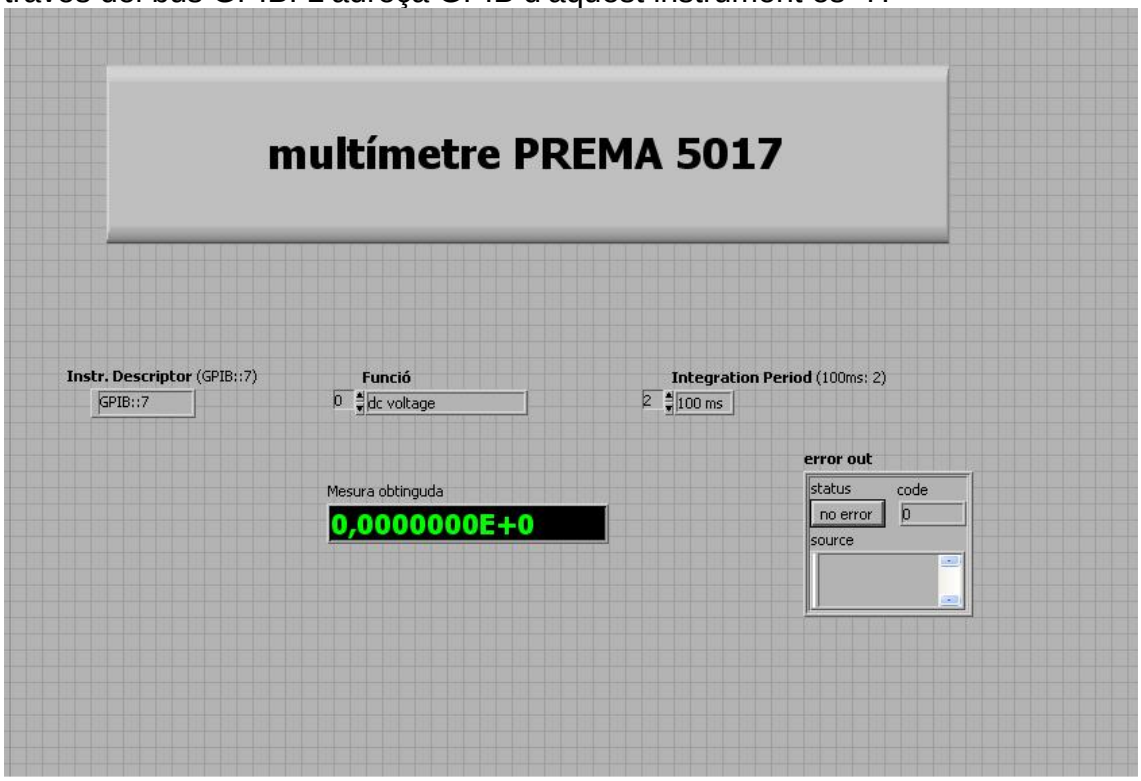


Fig. 8.11. Panell frontal de prema.vi

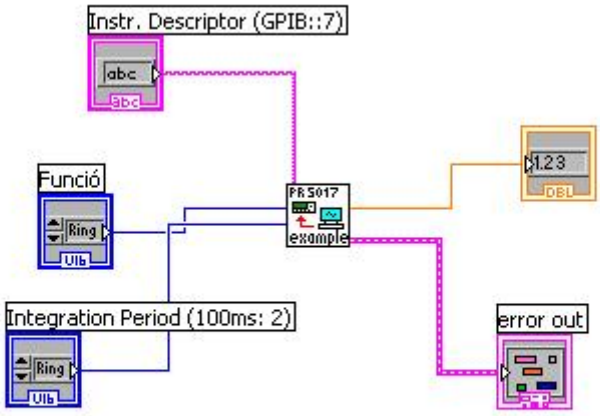


Fig. 8.12. Codi visual de prema.vi

La funció HP, és un petit driver que només ens permet llegir el voltatge en alterna que llegeix el mutímetre HP 3478a . El driver que controla completament l'instrument no s'ha pogut fer funcionar, i per tant, s'ha fet un petit programa (fig. 8.13), que simplement llegeix les dades del multímetre a través del bus GPIB. L'instrument té l'adreça GPIB número 23.

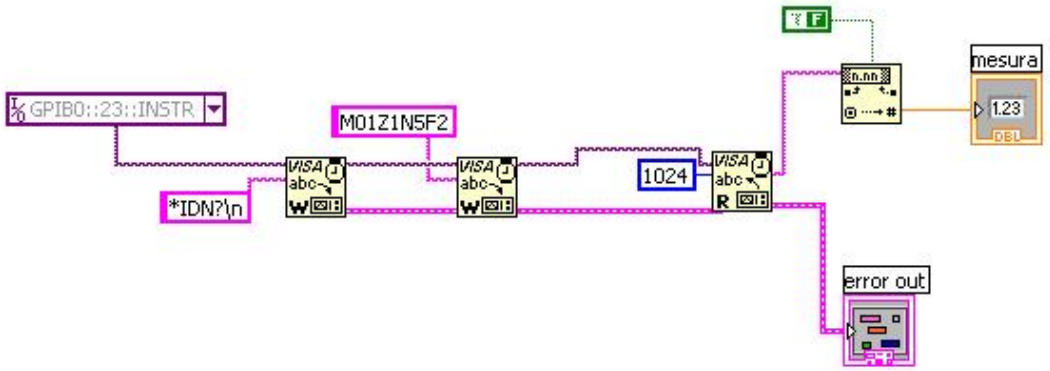


Fig. 8.13. Codi visual de HP.vi

Tot i que no s'han pogut fer funcionar els relès amb la targeta USB 24/A, s'ha implementat un programa que treu les mateixes sortides lògiques que el Metrabus. Només cal introduir la configuració electròdica desitjada i el programa treu les sortides correctes per la targeta USB.

El programa *relès* està compost per les funcions A, B, M i N. Cada funció implementa les sortides corresponents per tal de manipular el relè que correspon a cada elèctrode.

Com es pot veure al codi visual del programa (fig. 8.15), les funcions A, B, M i N s'executen de manera seqüencial, amb el mateix ordre que es fa amb el Labwindows. Per tant, el programa *relès* és exactament el mateix programa que el de l'apartat 8.1. però implementat amb LabVIEW.

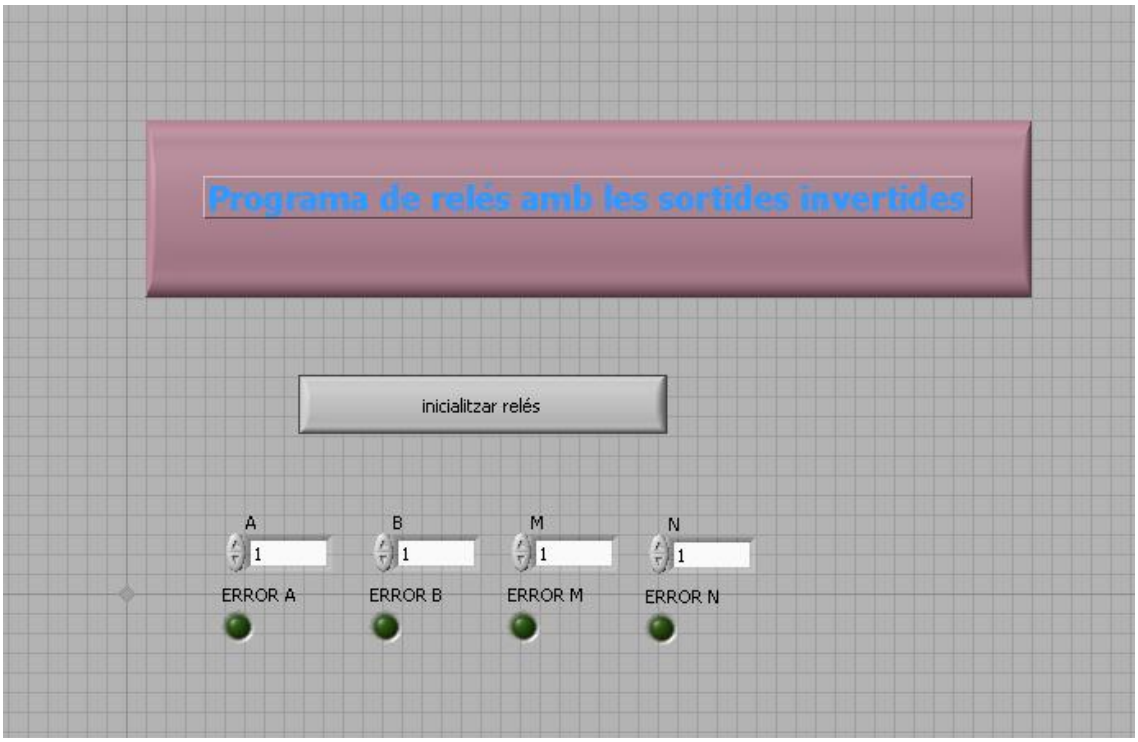


Fig. 8.14. Panell frontal de relès.vi

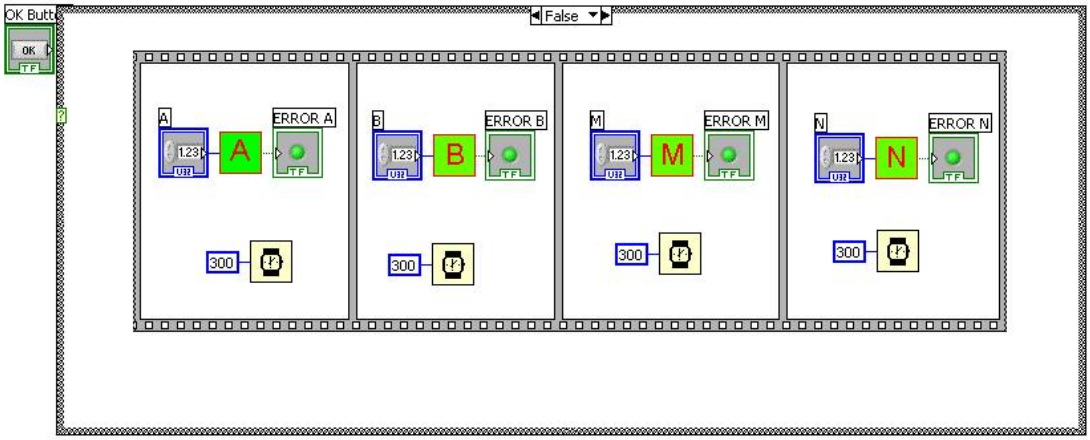


Fig. 8.15. Codi visual de relès.vi

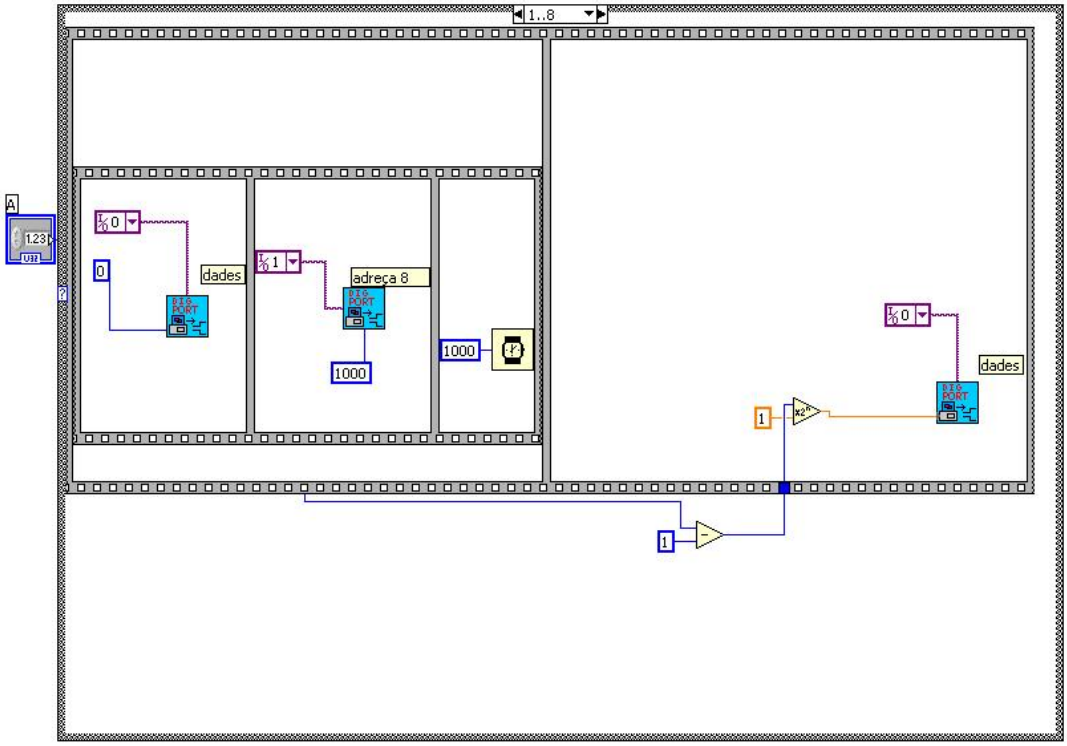


Fig. 8.16. Codi visual de elèctrode A.vi

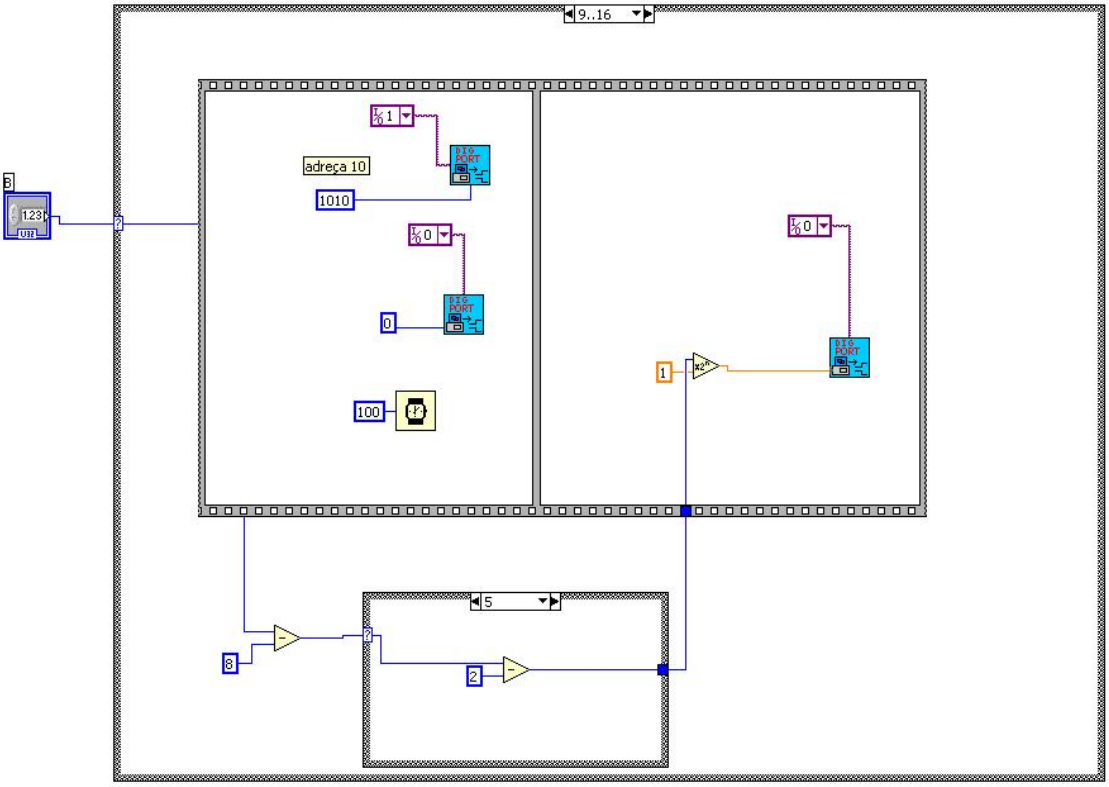


Fig. 8.17. Codi visual de elèctrode B.vi

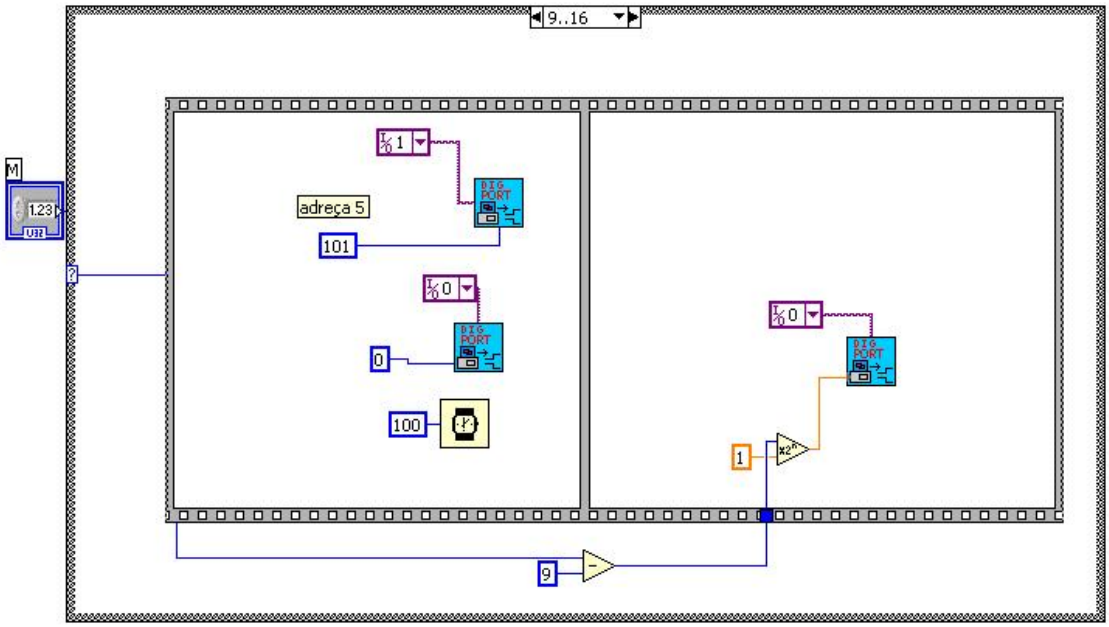


Fig. 8.18. Codi visual de elèctrode M.vi

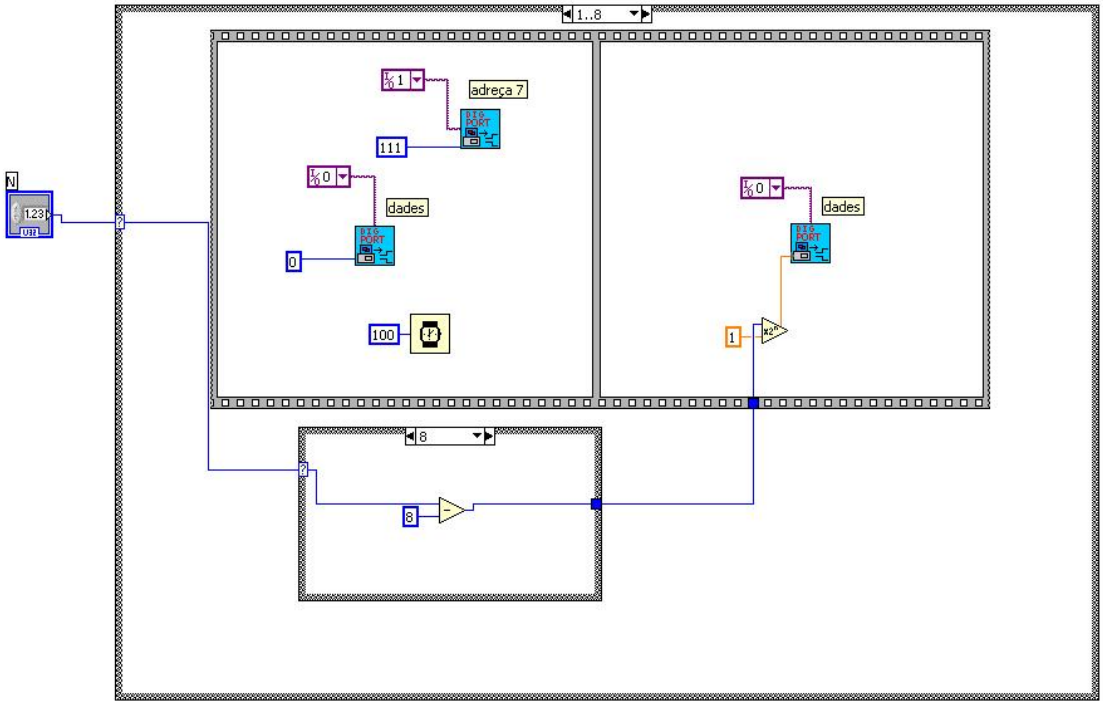


Fig. 8.19. Codi visual de elèctrode N.vi

8.3. Fotografies

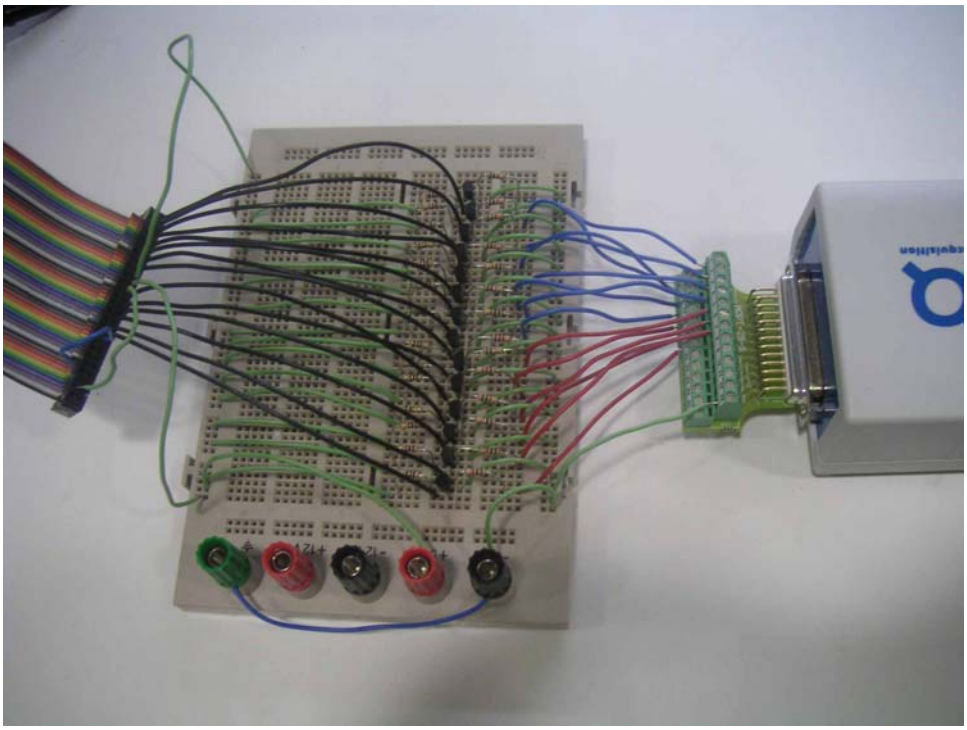


Fig. 8.20. Etapa d'amplificació amb transistors

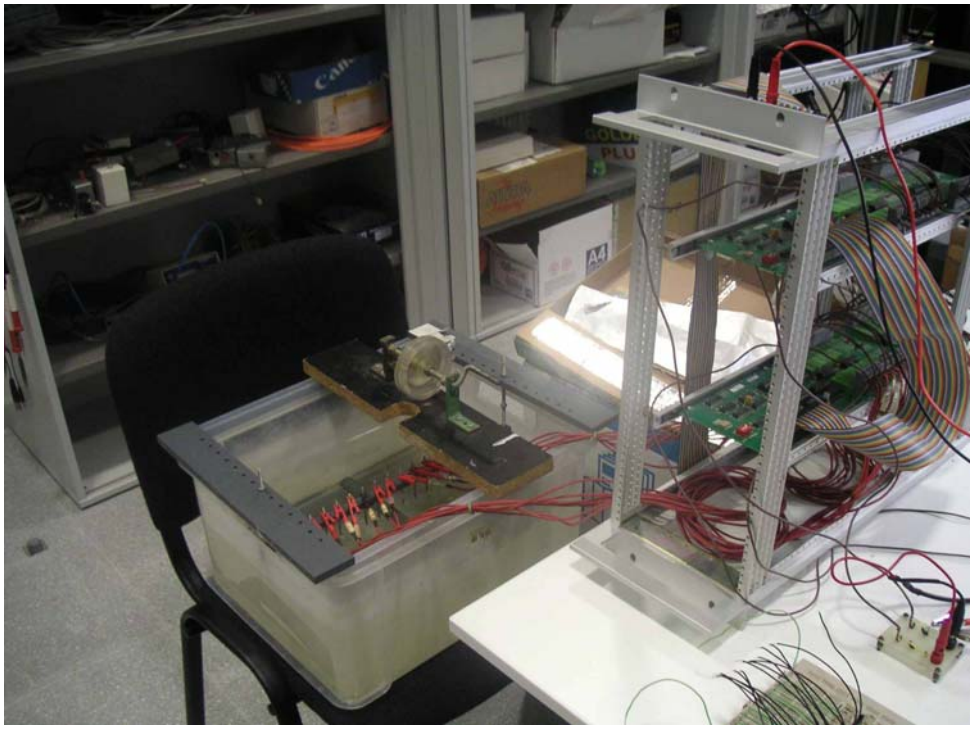


Fig. 8.21. Targetes de relès i cubeta d'aigua

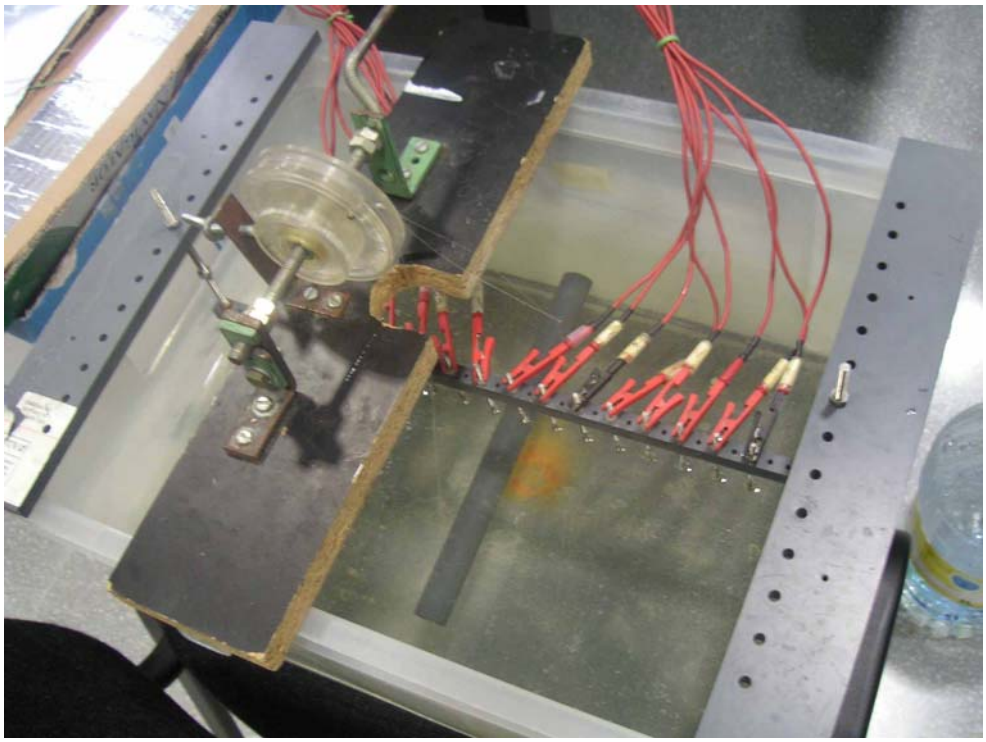


Fig. 8.22. Mesura de la resistivitat aparent amb un cilindre de plàstic submergit a la cubeta d'aigua.

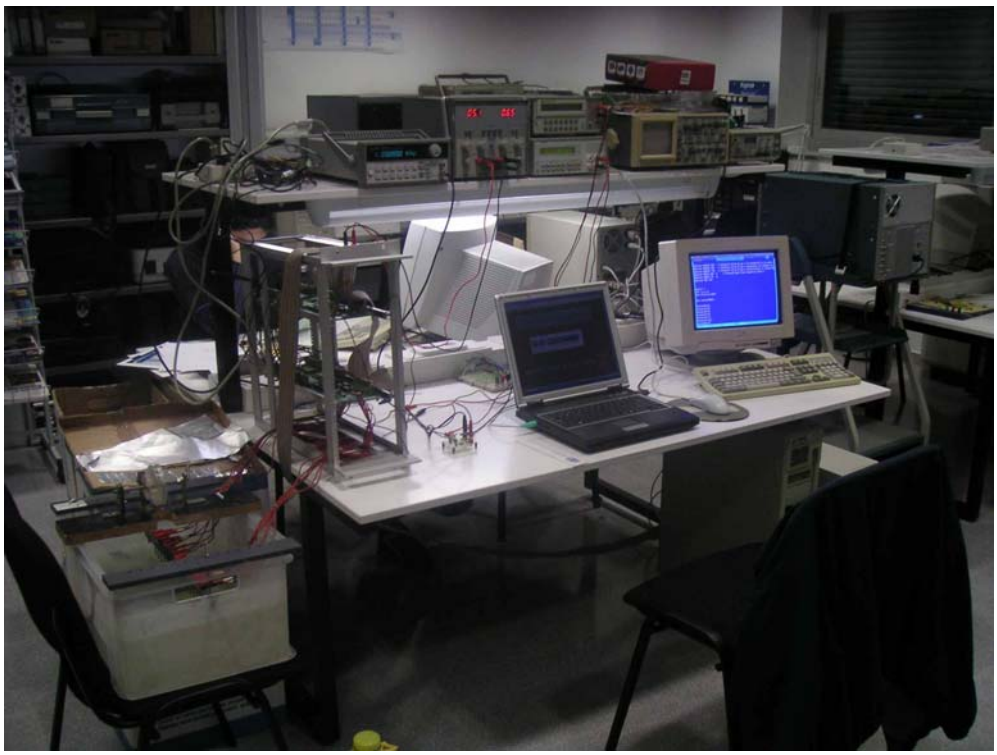


Fig. 8.23. Vista general del lloc de treball