

Premessa

La convergenza di interessi tra la ricerca nell'ambito dei fenomeni radio-naturali in gamma ELF, a cui mi dedico da anni, e l'osservazione delle variazioni del campo magnetico terrestre ha stimolato la mia curiosità riguardo ai possibili strumenti per la misura e la valutazione dei campi magnetici in generale. A seguito di un lungo periodo di ricerca e sperimentazione, ho sintetizzato le mie esperienze nelle

rebbero in seno al nucleo terrestre, considerato fluido e dotato di movimento rotatorio: la differenza tra la velocità della parte esterna e di quella interna darebbe origine a queste correnti elettriche.

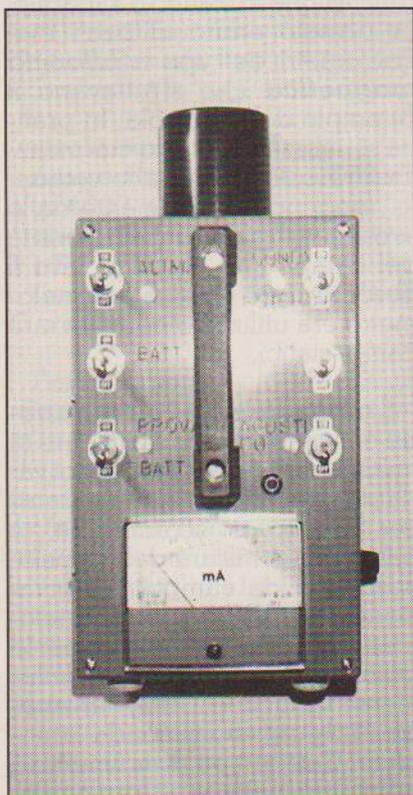
I campi magnetici possono essere inoltre **statici** o **variabili**. Statici sono i campi magnetici costanti nel tempo come il campo magnetico terrestre o le calamite, variabili quelli che variano più o meno rapidamente provocando il fenomeno dell'**induzio-**

1ª puntata

# Campo magnetico e magnetometri

di Marco Ibridi I4IBR

Magnetometro ad induzione ELIRCA3



note che seguono descrivendo alcuni magnetometri di realizzazione non troppo impegnativa. Ciò premesso è bene sottolineare il taglio esplicitamente amatoriale e non-professionale di tale trattazione, ricordando che questo non è, e non vuole essere, un testo di fisica....

## Campi magnetici

I campi magnetici sono prodotti da cariche elettriche in movimento e quindi da correnti che scorrono in conduttori; se la corrente varia nel tempo, alla stessa maniera varia il campo magnetico. Ma anche per la **magnetite** o **calamita** e tutte le sostanze che si convertono in calamite (ferro, acciaio, cobalto, nichel etc...), e che sono dette **ferromagnetiche**, il campo magnetico ha origine dal moto di elettroni che crea correnti elettriche al loro interno. Per il campo magnetico terrestre l'origine è sempre dovuta al movimento, ma le teorie sono varie: il fisico britannico **P.M.S. Blackett** lo ritiene una conseguenza della rotazione del nostro pianeta mentre per i fisici **W.M. Elsasser** ed **E.C. Bullard** sarebbe dovuto a correnti elettriche che si genere-

**ne magnetica** ovvero inducendo una corrente elettrica nei conduttori soggetti al campo. Un campo magnetico statico provoca, invece, l'orientamento di calamite (sostanze ferromagnetiche) evidenziando una polarità **Nord-Sud**. Ma anche le sostanze non ferromagnetiche sono orientate, più o meno debolmente, da un campo magnetico statico. Le sostanze non ferromagnetiche si dividono in **paramagnetiche** e **diamagnetiche**. Se si avvicina un polo di una sbarra calamitata (campo magnetico statico) ad una sostanza paramagnetica, la attrae debolmente, mentre se è diamagnetica (es. il bismuto) la respinge.

## Unità di misura

Le tavole seguenti sintetizzano

Tab.1 - Tabella di conversione unità di misura della densità del flusso magnetico

	Tesla	Gauss	Gamma
Tesla	1	10 000	1 000 000 000 (10 <sup>9</sup> )
Gauss	0,0001 (10 <sup>-4</sup> )	1	100 000 (10 <sup>5</sup> )
Gamma	10 <sup>-9</sup>	0,00001 (10 <sup>-5</sup> )	1

le unità di misura normalmente utilizzate per la valutazione del campo magnetico.

Tab.2 - Sottomultipli comunemente utilizzati

sottomultiplo	equivalenza
1 nT (nanotesla)	1 gamma
1 milligauss	100 gamma
1 millitesla	10 gauss
100 $\mu$ T (microtesla)	1 gauss

Tab.3 - Tabella di conversione unità di misura dell'intensità del campo magnetico

	amp./metro	oersted
Amp./metro	1	0,01257
Oersted	79,58	1

Tab.4 - Altre definizioni

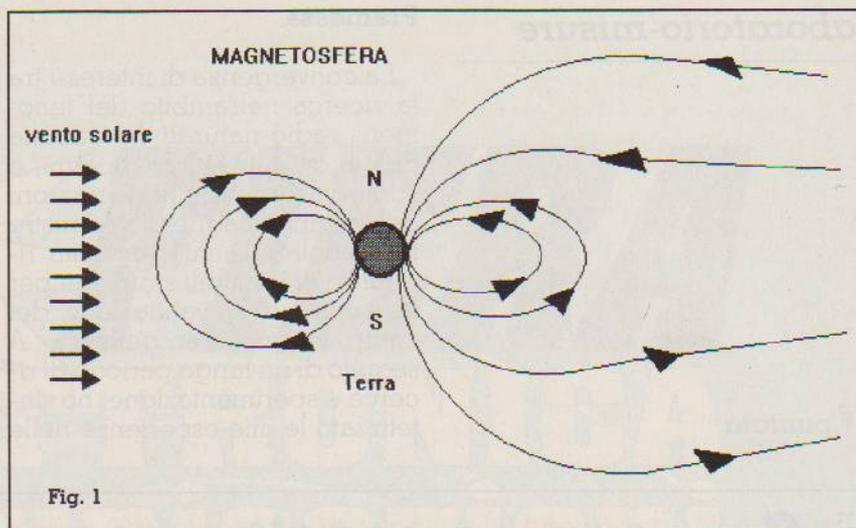
u.m.	equivalenza	
1 gauss	1 oersted	(nel vuoto e virtualmente nell'aria)
1 tesla	1 weber/metro q.	

## Magnetosfera

L'attività geomagnetica terrestre è un fenomeno indotto dal **vento solare**. Il vento solare è costituito da un plasma di elettroni liberi e ioni espulsi dal Sole, grazie al suo moto di rotazione, nello spazio interplanetario. Il vento solare non raggiunge di-

Tab.5 - Valori tipici di riferimento

fenomeno	range / u.m.
campo magnetico terrestre ai poli	circa 600 milligauss
campo magn.terrestre all'equatore	circa 300 milligauss
variazioni del campo magn.terrestre	$\pm 600$ nT ( $\pm 6$ milligauss)
una corrente di 100 mA in un solenoide di 10 spire	1 gauss
piccole calamite	100/200 gauss
soglia di sicurezza consigliata dal National Council on Radiation Protection Usa per le radiazioni elettromagnetiche	0,25 $\mu$ T
soglia di sicurezza fissata in Italia per le radiazioni elettromagnetiche	100 $\mu$ T (1 gauss)
campo magnetico indotto sotto linee ad alta tensione a 132 000 V	circa 7 $\mu$ T
campo magnetico indotto sotto linee ad alta tensione a 380 000 V	circa 40 $\mu$ T



rettamente la Terra, ostacolato dall'atmosfera terrestre e dal campo geomagnetico, ma fluttua attorno al campo magnetico terrestre formando una sfera distorta con la terra al centro, la parte «bombata» verso il sole e con la parte a «coda di cometa» in direzione opposta. Questa sfera è conosciuta come **magnetosfera**. (fig.1) Lo scontro con la magnetosfera, da parte del vento solare, avviene in condizioni normali a circa 10 raggi terrestri mentre la coda della magnetosfera si allunga dal lato della Terra non esposto al sole per circa 100 raggi terrestri. In presenza di forti perturbazioni sul Sole, il vento solare (che normalmente avanza a circa 400 km/s) aumenta vertiginosamente in velocità e lo scontro può comprimere la magnetosfera sino anche a 5

raggi terrestri dalla terra, alterando il campo magnetico intorno alla stessa e producendo brusche ed improvvise variazioni del campo. (**sudden impulse**)

## Magnetometri

La tipologia di strumenti utilizzabili per la misura del campo magnetico è normalmente legata alla natura del campo stesso ed in particolare alla sua differenziazione in statico o variabile. In passato erano utilizzati magnetometri del tipo a **bilancia magnetica** che sfruttavano il principio della bussola. In pratica si utilizzava un ago magnetizzato vincolato nel piano verticale, leggendo direttamente dallo scostamento dell'ago l'intensità del campo che ne bilanciava il peso. Questo tipo di magnetometro era utilizzato per misurare campi statici.

Il **magnetometro ad induzione** è invece il tipico strumento di misura per i campi magnetici variabili. Detto a «bobina cercatrice» (in inglese «search coil»), è basato sulla misura della tensione indotta, dal campo in osservazione, sulla bobina del magnetometro. Un ottimo strumento per la misura dei campi statici o lentamente variabili è il **magnetometro fluxgate** o «a seconda armonica». Questo tipo di strumento è costituito, nella sua forma ele-

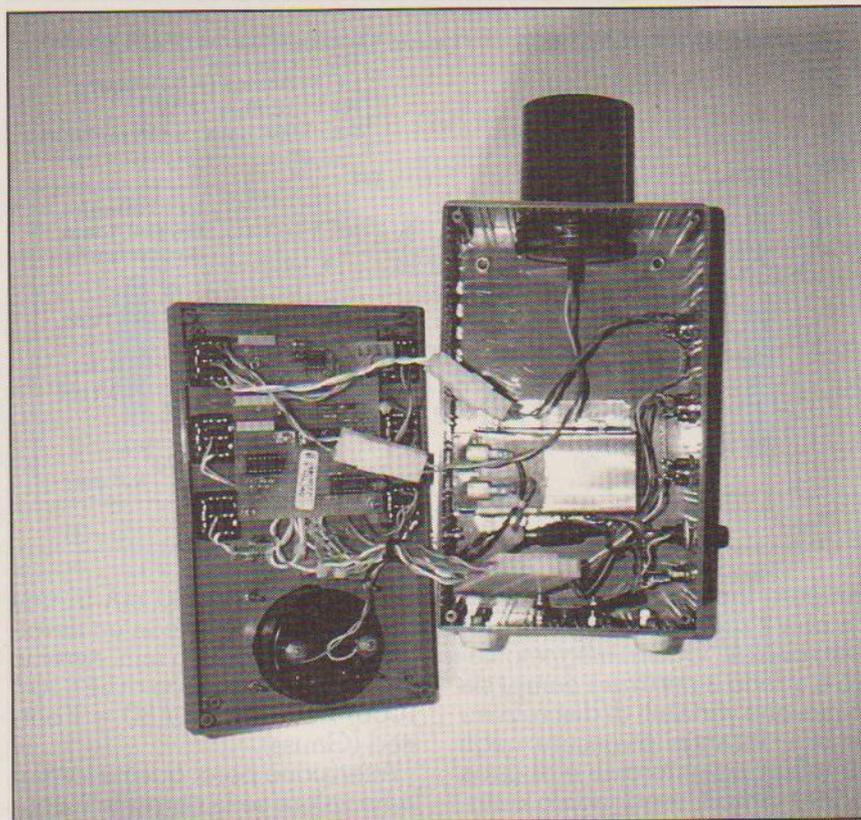
mentare, da due avvolgimenti posti su di un nucleo magnetico (per es. ferrite). Facendo scorrere una corrente alternata su uno degli avvolgimenti si crea un campo magnetico variabile. Sull'altro avvolgimento avremo quindi, come in un normale trasformatore, una corrente indotta che in condizioni normali conterrà oltre alla fondamentale le armoniche dispari; in presenza di campo magnetico si creeranno effetti di distorsione di seconda armonica, sempre più evidenti al crescere del campo. In sintesi, misurando sul secondario del trasformatore in ferrite, dopo filtraggio e rivelazione, l'ampiezza della seconda armonica del segnale immesso sul primario, avremo l'indicazione quantitativa del campo magnetico perturbante.

Nei magnetometri fluxgate professionali vengono normalmente impiegati tre sensori. Essi sono posti in direzioni diverse e vengono indicati con una lettera dell'alfabeto a seconda dell'orientamento. Avremo quindi un sensore **H** (Horizontal) orientato a Nord, un sensore **D** (Declination) orientato ad Est ed un sensore **Z** (Vertical) orientato verso il basso. Le caratteristiche tipiche dei sensori fluxgate professionali sono le seguenti:

**risoluzione: 0,1 nT**  
**range dinamico: da  $\pm 500$  nT a  $\pm 4000$  nT**  
**coefficiente di temperatura: 1 nT / 1 °C**  
**temperature di lavoro: da 0° C a 40° C**

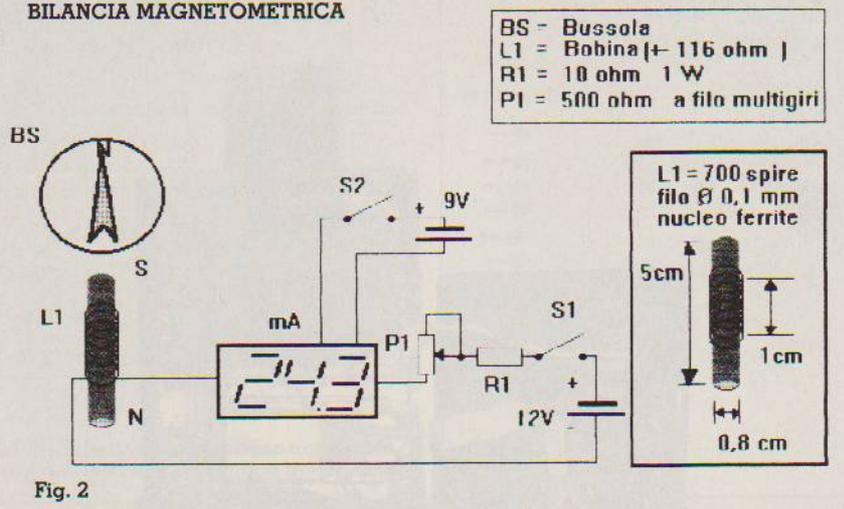
Bisogna notare che le misure effettuabili con un sensore fluxgate sono misure relative, ovvero indicazioni di variazione del campo riferite in più ed in meno ad un valore «di quiete» del sistema, assunto come riferimento ed a cui viene attribuito il valore zero. Inoltre questo sensore unisce all'ottima sensibilità una caratteristica negativa: l'alta sensibilità alle variazioni di temperatura.

Tralasciando i **magnetometri professionali a protoni**, chiudiamo questa sommaria, e volu-



Magnetometro ad induzione ELIRCA 3. Particolare: interno

## BILANCIA MAGNETOMETRICA



tamente incompleta, panoramica con il **magnetometro ad effetto di Hall**. Questo magnetometro è adatto a misurare campi sia statici che variabili di discreta intensità. Il range di misura negli strumenti commerciali è di circa 1/999 Gauss, rendendolo quindi adatto ad applicazioni industriali e di laboratorio elettronico/elettrotecnico (misura della potenza di elettrocalamite, di magneti degli altoparlanti etc..)

### Magnetometri Home-Made

Passando alla descrizione dei magnetometri realizzati dallo scrivente, occorre precisare che gli stessi sono stati realizzati senza l'obbiettivo primario della precisione strumentale assoluta, tale è la difficoltà di reperire, per una perfetta calibrazione, solenoidi o magneti standard di riferimento.

Solo il magnetometro fluxgate si può tarare utilizzando un solenoide autocostruito e seguendo la seguente formula per determinare il campo magnetico prodotto:

$$\text{oersted (gauss)} = ( ( N * 1000 ) / L ) * A / 80$$

dove **N** è il numero delle spire del solenoide, **L** la lunghezza dell'avvolgimento in mm ed **A** la corrente in A che scorre nel solenoide.

Esempio: facendo scorrere

una corrente di 100 mA in una bobina di 10 spire con un avvolgimento lungo 12,5 mm. avremo un campo magnetico di  $( ( 10 * 1000 ) / 12.5 ) * 1 / 80 = 1$  oersted (Gauss).

Attenzione però: questa formula ha valore se la corrente è continua, il sensore da tarare è posto al centro del solenoide ed il diametro interno del solenoide è minore di circa 5-10 volte la lunghezza del solenoide stesso.

### Magnetometro a Bilancia Magnetometrica per la misura del campo magnetico terrestre - ELIRCA6

Per realizzare questo magnetometro senza utilizzare meccanica di precisione, pur mantenendo un ottimo potere risolutivo, si è fatto uso di una comune bussola. In particolare si è utilizzata una bussola economica di costruzione asiatica e si è adottata la configurazione di fig. 2.

Il principio è decisamente semplice se non addirittura banale: si tratta di generare un campo magnetico artificiale in opposizione a quello naturale terrestre; riferendosi ad una indicazione costante dell'ago magnetico (una «tacca» sul quadrante della bussola), si misurerà la corrente necessaria a tale deviazione. Ecco come avverrà la misura: dopo aver disposto il magnetometro «in quiete» (ovvero

togliendo alimentazione alla bobina L1 e con il piano dello strumento perfettamente «a bolla»), orientata la bilancia magnetometrica di modo che l'indicazione 0/360 gradi sulla scala della bussola combaci con l'ago orientato esattamente a Nord, si chiude l'interruttore S1 alimentando così la bobina L1 collocata stabilmente dietro la bussola (al polo Sud della stessa). Con il potenziometro P1 si regoli la corrente in modo che l'ago venga deviato di una frazione costante della scala (nel mio caso ho sfruttato una tacca preesistente sul vetro della bussola a 45° dalla tacca del Nord). Si leggerà quindi il valore della corrente sul milliamperometro che dovrà essere rigorosamente digitale ed alimentato a parte con una comune pila (è sufficiente anche un economico multimetro digitale) L'indicazione così ottenuta non darà direttamente un valore in milligauss ma servirà per indagini comparative del campo magnetico sul territorio ed in particolare per compiere prospezioni geofisiche, studiando le piccole variazioni, da punto a punto, del campo magnetico terrestre.

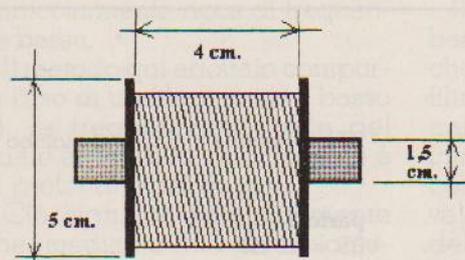
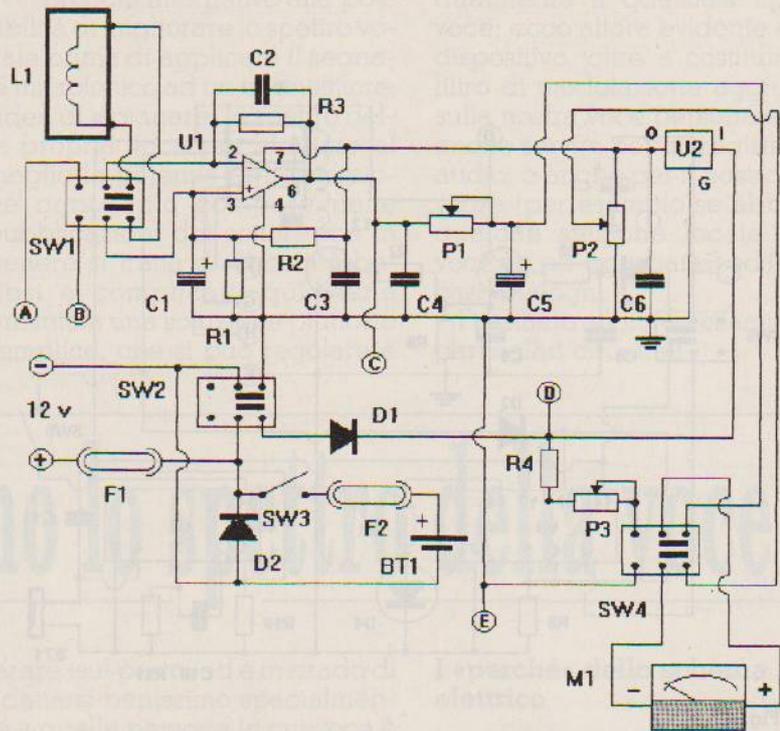
È da notare che la bobina andrà orientata con il polo sud verso il Sud della bussola in modo che possa attrarre il polo Nord dell'ago magnetico. Questo per ricordare che in realtà il polo Nord terrestre è il polo Sud del «magnete Terra»: esso infatti attira il polo Nord dell'ago magnetico della bussola !!!

### Magnetometro ad induzione - ELIRCA3

Il secondo magnetometro presentato è un magnetometro per campi variabili a «bobina cercatrice». Il sensore è quindi rappresentato dalla bobina L1 realizzata avvolgendo ben 3000 spire su di una bacchetta di ferrite; ad avvolgimento terminato la bobina andrà rivestita da comune pellicola in alluminio per alimenti. L'indicazione dello strumento M1 è «espansa» attorno ad un valore centrale, e per un range

molto ristretto, che per campi da circa 3 kHz a 90 kHz (con la massima sensibilità da 25 kHz a 60 kHz) è di circa  $7 \mu\text{T}$ . Per una maggiore sensibilità, ma soprattutto linearità di misura, sarà sufficiente collegare alle uscite «I» o «J» un millivoltmetro, in c.a., nella portata 10 mV f.s. Ovviamente non saranno misurabili i campi statici delle calamite, a meno che non li si muova rapidamente davanti al sensore. Per lo stesso motivo non è utilizzabile il procedimento di taratura con solenoide in corrente continua sopra indicato. Con questo magnetometro si rileva perfettamente il campo indotto sotto gli elettrodi ad altissima tensione, come pure possono essere facilmente rilevati i flussi dispersi dei comuni trasformatori di alimentazione, mentre risulta sensibilissimo al campo generato dall'oscillatore di riga dei televisori. Oltre al circuito di misura vero e proprio, riportato in fig.3, si è predisposta una circuiteria per la segnalazione acustica della presenza di campo magnetico (U4) ed una memoria con visualizzazione ottica (U3) per l'avvenuta rilevazione di campo indotto. (fig.4)

### MAGNETOMETRO ad INDUZIONE (parte 1)



**BOBINA L1**  
 3000 spire filo smaltato  
 0,31  
 300 metri tot.  
 72 Ohm tot.

Fig. 3

MAGNETOMETRO ad INDUZIONE (parte 2)

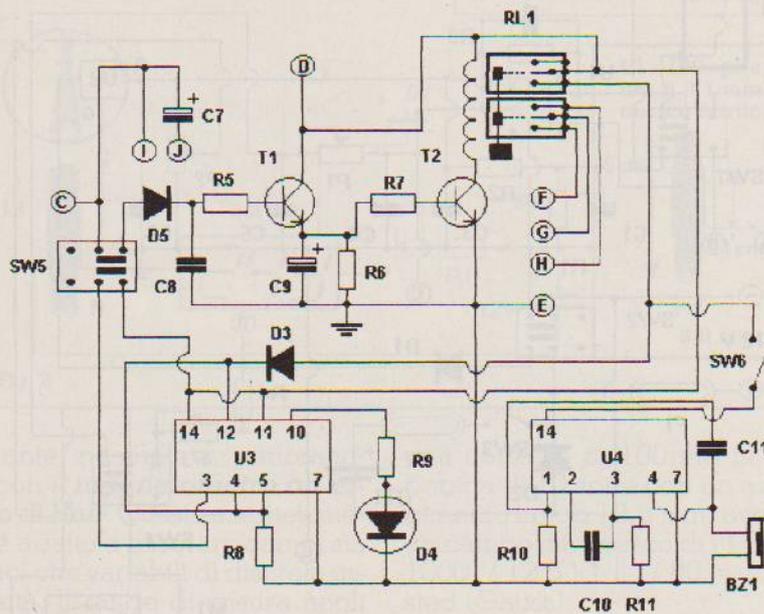


Fig. 4

Componenti magnetometro ad induzione Elirca 3

parte 1

R1 = 10 kΩ  
R2 = 10 kΩ  
R3 = 220 kΩ  
R4 = 4,7 kΩ

P1 = 10 K multigiri  
P2 = 2 K multigiri  
P3 = 10 K multigiri

C1 = 10 μF el.  
C2 = 220 pF  
C3 = 100 nF  
C4 = 1 μF  
C5 = 47 μF el.  
C6 = 100 nF

S1 doppio deviatore  
S2 doppio deviatore  
S3 interruttore  
S4 doppio deviatore

U1 = TL081  
U2 = μA.7809  
D1 = 1N4007  
D2 = 1N5408

M1 = milliamp. 1,5 mA f.s.  
L1 = 3000 spire diam.0,31 su supporto 1,5 cm.(300 metri tot.)

F1 = fusibile 1 A  
F2 = fusibile 1 A

BT1 = Batteria ermetica al piombo 12 V 1,3 Ah

parte 2

R5 = 22 kΩ  
R6 = 2,2 kΩ  
R7 = 2,2 kΩ  
R8 = 2,2 kΩ  
R9 = 100 Ω  
R10 = 10 kΩ  
R11 = 10 kΩ

C7 = 10 μF el.  
C8 = 100 μF el.  
C9 = 47 μF el.  
C10 = 100 nF  
C11 = 100 nF

S5 doppio deviatore  
S6 interruttore

T1 = 2N2222  
T2 = 2N2222  
U3 = 4066  
U4 = 4069  
D3 = T4148  
D4 = LED lampegg.  
D5 = T4148

RL1 = Rele' 12Vdoppio dev.  
BZ1 = Buzzer piezoelettrico

MAGNETOMETRO ad INDUZIONE ELIRCA 3

funzione comandi e I/O

SW1 = ON	sonda esterna
SW1 = OFF	sonda interna
SW2 = ON	POWER ON
SW2 = OFF	spento
SW3 = ON	Batteria in linea
SW3 = OFF	Batteria fuori linea
SW4 = ON	Test tensione batteria
SW4 = OFF	Normale uso dello strumento
SW5 = ON	Attivi allarmi e memoria visiva
SW5 = OFF	Non attivi " "
SW6 = ON	Attivo allarme acustico (se S5 =ON )
SW6 = OFF	Non attivo

IO1 Input bobina esterna  
2-4 in bobina esterna (A B)  
3 gnd (E)

IO2 Output relè servizi  
2-3 contatto normalmente chiuso (H)  
4-3 contatto normalmente aperto (F)  
3 comune (G)

IO3 Output millivoltmetro c.a.  
1-3 out diretto (I)  
5-3 out disaccoppiato (J)  
3 gnd (E)

(Continua)