

APPUNTI DI MISURE ELETTRONICHE



Professore: **Pasquale Arpaia**
Anno Accademico: 2017/2018

Testo non ufficiale, elaborato a partire dagli appunti presi durante il corso ed integrati con altre fonti e diapositive del docente. Costituisce un supporto allo studio e non vuole sostituire libri o materiale fornito dal docente.

Indice

Programma del Corso di Misure Elettroniche 2017/2018

Metrologia	1
Tecniche statistiche di elaborazione dei risultati di misura	1
Strumentazione di misura	1
Misure di componenti	2
Esercitazioni	2

Richiami di Fondamenti della Misurazione

Fattori di influenza nella misurazione	4
La misurazione come esperimento aleatorio	5
Valutazione dell'incertezza di categoria A e B	5
Incetenza globale	7
L'incetenza estesa.....	7
Le cifre significative.....	8
Valutazione dell'incetenza nelle misure indirette	8
L'approccio deterministico e la tolleranza.....	9
Incetenza di una misura mediata	10
Terminologia e Definizioni.....	11

Caratteristiche metrologiche della strumentazione di misura

Caratteristiche statiche degli strumenti di misura	14
Diagramma di taratura.....	20
Specifiche legate all'interazione con l'ambiente	22

La taratura degli strumenti di misura

La riferibilit�	26
Compatibilit� delle misure.....	26
Taratura di uno strumento di misura	27
Esecuzione della taratura.....	28
Guida alla stesura di una procedura	31
Note sulla procedura	32

Elaborazione statistica dei risultati di misura

Distribuzione Campionarie.....	40
--------------------------------	----

Test statistici

Decisioni su Basi Statistiche	43
Il test del χ^2 sull'adattamento di un campione ad una popolazione	50

Analisi di regressione lineare semplice	51
Ricapitolando (appunti professore).....	55
Caratterizzazione dei convertitori A/D	
Caratterizzazione statica dei convertitori A/D	57
Caratterizzazione dinamica dei convertitori A/D	60
Elaborazione delle soglie	65
Differenze tra SINAD, ENOB, SNR, THD, THD+N, e SFDR	77
Strumentazione di misura	
Concetti generali	81
I convertitori Analogico/Digitali	
Panoramica del mercato degli ADC	87
Il convertitore A/D di tipo FLASH	89
Convertitori a rampa numerica e ad inseguimento	96
Convertitore ad approssimazioni successive.....	99
Convertitore ad integrazione (tensione-frequenza).....	100
Convertitore Sigma Delta.....	103
Convertitore a doppia rampa (tensione-tempo)	110
Progetto del voltmetro a doppia rampa	115
I Convertitori D/A e i Generatori di Segnali	
Introduzione sui convertitori D/A	118
Principali architetture dei convertitori D/A	122
Comportamento dinamico dei convertitori D/A	128
Strumenti nel dominio del tempo	
Architettura di un oscilloscopio numerico.....	130
Sezione verticale	132
Sezione orizzontale.....	134
Sezione di sincronizzazione (TRIGGER)	135
Strumenti nel dominio dell'ampiezza	
Multimetri digitali.....	138
Architettura del multimetro.....	138
Segnali di modo comune e di modo normale.....	142
Impedenzimetri numerici.....	144
Misura di resistenze	
Inserimento degli strumenti ed effetti di carico	151
Classificazione delle resistenze in relazione al valore ohmico	153
Misura di resistenze di basso valore.....	158

Valutazione dell'incertezza della resistenza Rx	163
Misura di resistenza di valore medio	164
Misura di resistenza di elevato valore	169
Misure di capacità	
Misura di capacità con il metodo volt-amperometrico	175
Il metodo della caduta di potenziale.....	176
Modello reale del condensatore	177
Tecnica dei tre voltmetri	180
Ponti in Alternata.....	181
Tecnica del generatore ausiliario	183
Problema dell'isolamento	184
Ponte di De Sauty	185
Misure di induttanza	
Perdite nel ferro per correnti parassite	190
Perdite nel ferro per isteresi magnetica	190
Separazione delle perdite	192
Metodo volt-amperometrico	193
Induttore avvolto su nucleo ferromagnetico	194
Misura della cifra di perdita di un provino ferromagnetico	194
Circuito di misura e criteri di proporzionamento	195
Metodo wattmetrico	197
Visualizzazione del ciclo di isteresi tramite oscilloscopio.....	200

Programma del Corso di Misure Elettroniche 2017/2018

Metrologia

1.1. Metrologia generale

Richiami di incertezza; Procedura di taratura; relazione di prova; norme tecniche; caratteristiche metrologiche statiche della strumentazione: diagramma e curva di taratura, risoluzione, sensibilità, linearità, ripetibilità, riproducibilità, stabilità, isteresi, riferibilità; organizzazione della metrologia nazionale e internazionale: catene metrologiche, Dipartimento di Taratura e laboratori di taratura accreditati (LAT) di Accredia.

1.2 Metrologia della strumentazione numerica

Caratterizzazione metrologica statica e dinamica della strumentazione numerica a norma IEEE 1057 e dei convertitori analogico-digitali a norma IEEE1241: segnali campioni a rampa e sinusoidali, scelta della frequenza di campionamento, LSB, elaborazione delle soglie, errori di guadagno ed offset, non-linearità differenziale (DNL) e integrale (INL), DNL e codici mancanti, INL e errore di non-monotonicità, definizione e misura del numero di bit effettivi (ENOB), algoritmo di sine-fitting a 3 parametri; rapporto segnale-rumore (SNR) e definizioni di SINAD, SNR (SNHR), SFDR, THD. **Esercitazioni:** Determinazione dell'incertezza di una misura; Procedura di taratura di un voltmetro analogico a norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025. Caratterizzazione ADC a norma IEEE 1057 di STM32F3 Discovery: algoritmo di sine fitting a 3 parametri, ENOB, test dell'istogramma, valutazione dell'errore di offset, di guadagno, INL e DNL.

Tecniche statistiche di elaborazione dei risultati di misura

Richiami di statistica: parametri di tendenza centrale e di dispersione, modelli statistici (normale, chi-quadro, Fischer), medie e varianza campionaria, distribuzioni campionarie, test statistici, rischi alfa e beta, istogramma, test del chi-quadro; analisi di regressione: modello lineare, metodo dei minimi quadrati, scomposizione della devianza, gradi di libertà, one-way ANOVA, rapporto di varianza, test di Fischer per la significatività della regressione.

Esercitazioni: Esempio di elaborazione dei risultati della taratura con foglio elettronico: verifica di gaussianità e di linearità.

Strumentazione di misura

3.1 Concetti generali

Inserimento della strumentazione elettronica nei circuiti di misura: massa e terra, segnali bilanciati e sbilanciati, CMRR, NMRR. Architettura di uno strumento numerico, errore di quantizzazione. Convertitori A/N: classificazione, a doppia rampa, tensione-frequenza, sigma-delta, SAR, flash parallelo, serie-parallelo, e pipeline.

3.2 Strumenti nel dominio del tempo

Oscilloscopio numerico: architettura, sezione verticale: condizionamento (volt/div), accoppiamento (couple), posizione (pos); sezione orizzontale: scala (sec/div), posizione (pos); sezione di sincronizzazione (trigger): livello (Trigger Level), sorgente (Trigger Source), accoppiamento (Trigger Coupling), pendenza (trigger Slope), analisi del circuito di trigger; tecniche di campionamento in tempo reale e in tempo equivalente, analisi delle specifiche.

3.3 Strumenti nel dominio delle ampiezze

Multimetro numerico: architettura, misurazione di tensioni continue ed alternate, di resistenze e correnti, analisi delle specifiche (esempio Tektronix CDM 250). Impedenziometro numerico: schema Genrad, analisi delle sorgenti di incertezza.

Misure di componenti

4.1 Misure di resistenza

Generalità, misura di resistenze di basso valore con metodo della caduta di potenziale; misura di resistenza di valore medio con ponte di Wheatstone, valutazione dell'incertezza; misura di resistenza di elevato valore. Problema delle resistenze di contatto e delle conduttanze di dispersione nella misura di resistenza dei componenti, configurazione dei resistori a 3, 4 e 5 morsetti.

4.2 Misure di capacità

Generalità, misura di capacità con il metodo volt- amperometrico, con metodo della caduta di potenziale, metodo di ponte, modello del condensatore reale, misura del fattore di perdita con metodo dei tre voltmetri. Problema delle ammettenze parassite: condensatori a 3 morsetti. Tecniche di schermatura e messa a terra.

4.3 Misure di induttanza

Generalità, modello dell'induttore reale, perdite nel rame, perdite nel ferro per correnti parassite e per isteresi magnetica, separazione delle perdite, misura della cifra di perdita di un provino ferromagnetico, criteri di progetto, metodo wattmetrico.

Esercitazioni: Ponte di Wheatstone, Misura $\tan\delta$ con metodo dei 3 voltmetri, Misura della cifra di perdita di un provino ferromagnetico con metodo wattmetrico.

Esercitazioni

- Procedura di taratura di un voltmetro analgico a norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025. Elaborazione dei risultati della taratura con foglio elettronico: verifica di gaussianità e di linearità.
- Algoritmo di sine fitting a 3 parametri.
- Caratterizzazione ADC a norma IEEE 1057 di STM32F3 Discovery: ENOB, test dell'istogramma, valutazione dell'errore di offset, di guadagno, INL e DNL.
- Ponte di Wheatstone per misura di resistenza.
- Misura della cifra di perdita di un provino ferromagnetico con metodo wattmetrico.

Richiami di Fondamenti della Misurazione

Misurare significa caratterizzare una grandezza fisica o un suo parametro, in termini quantitativi. A tale scopo è necessario eseguire un procedimento sperimentale, la misurazione, avente l'obiettivo di perseguire la suddetta caratterizzazione quantitativa. L'oggetto della **misurazione** (ossia la grandezza fisica o il suo parametro da caratterizzare quantitativamente) è detto **misurando**. Il risultato della misurazione, infine, è denominato misura. Per poter associare la misura al misurando è necessario utilizzare un'ulteriore grandezza, omogenea con il misurando, che viene assunta come grandezza di riferimento: **l'unità di misura**. In tal modo, la misura può essere espressa come il rapporto tra il valore del misurando e l'unità di misura. Un'unità di misura, per essere tale, deve essere universalmente riconosciuta o, meno rigorosamente, riconosciuta almeno nell'ambito in cui si vuole che abbia senso la misura.

La misurazione, eseguita in base all'applicazione grezza della definizione appena data, ossia tramite la valutazione del rapporto tra il misurando e l'unità di misura non è sempre possibile in quanto l'operazione di rapporto (come pure quelle di somma, differenza, prodotto per una costante) possono non aver senso alcuno per certe grandezze fisiche. Per consentire comunque la caratterizzazione quantitativa di tutte le grandezze fisiche (e quindi per misurarle), queste sono classificate in tre categorie:

1. **Grandezze direttamente misurabili:** sono grandezze per le quali si possono definire e realizzare fisicamente le operazioni di somma e rapporto. Per queste grandezze, la misurazione si può eseguire applicando direttamente la definizione di misura. Infatti, per tali grandezze la misura si ottiene eseguendo il rapporto tra il valore del misurando e l'unità di misura corrispondente. La lunghezza, ad esempio è una grandezza misurabile. Infatti è possibile sommare la lunghezza di due segmenti e definirne il rapporto. Quindi la misura della lunghezza di un segmento si ottiene direttamente eseguendo il rapporto della lunghezza con l'unità di misura corrispondente (il metro).
2. **Grandezze classificabili:** sono grandezze per le quali non hanno senso le operazioni di somma e rapporto ma per le quali si possono definire solo le operazioni di confronto (uguaglianza e disuguaglianza). Anche a queste grandezze può essere associato convenzionalmente un numero al quale, per estensione si attribuisce il nome di misura. L'associazione di un valore numerico a tali grandezze avviene costruendo scale convenzionali. In pratica, utilizzando le operazioni di confronto, è possibile creare un insieme ordinato contenente un certo numero di queste grandezze fisiche indicate con i simboli G_1, G_2, \dots, G_n . Una volta realizzata la scala di valori ordinati secondo le relazioni di uguaglianza e disuguaglianza, si può associare a ciascuna grandezza, in modo convenzionale, un numero progressivo P_1, P_2, \dots, P_n . La grandezza da misurare viene confrontata (usando sempre le relazioni di uguaglianza e disuguaglianza) con i valori della scala, in modo da determinare il valore P_i cui è più prossima che si assume come misura della grandezza. Un classico esempio è costituito dalla durezza dei minerali. La scala Mohs definisce una scala di 10 minerali ordinati per durezza crescente. Per quantificare la durezza di un minerale, si confronta la durezza del suddetto minerale con le durezze dei minerali della scala. L'operazione di classificazione, in tal caso, consiste nel

Scala Mohs per la classificazione della durezza dei minerali		
Talco	1	Scalfito dall'unghia
Gesso	2	
Calcite	3	Scalfito da una moneta di rame
Fluorite	4	Scalfito da una lama di coltello o da un pezzo di vetro
Apatite	5	
Feldspato	6	Scalfisce una lama di coltello o un pezzo di vetro
Quarzo	7	
Topazio	8	
Corindone	9	
Diamante	10	Scalfisce qualunque materiale

verificare sperimentalmente se il minerale riesce a scalfirne un altro (e quindi è più duro) o se ne rimane scalfito (e quindi è meno duro).

3. **Grandezze misurabili solo per via indiretta:** sono grandezze fisiche che si estrinsecano solo quando sono sottoposte a particolari stimoli. La misurazione di tali grandezze può essere ottenuta solo in maniera indiretta, ovvero, tramite la misurazione di altre grandezze relazionate a quella d'interesse tramite una determinata legge fisica. La resistenza elettrica è una grandezza misurabile solo per via indiretta. Infatti, la grandezza resistenza elettrica si manifesta solo se il resistore è attraversato da una corrente o se è sottoposto ad una differenza di potenziale. La misurazione di una resistenza può essere eseguita, allora, facendo ricorso alla legge di Ohm, misurando separatamente sia la corrente I che attraversa il resistore che la tensione V applicata ai suoi capi. Poi, dalla legge di Ohm si ottiene, per via indiretta, la misura della resistenza R .

Fattori di influenza nella misurazione

In teoria il rapporto ottenuto dal confronto tra misurando e unità di misura potrebbe essere espresso con un numero infinito di cifre. Per come è stato definita, però, una misurazione è un procedimento sperimentale, ovvero un processo nel quale intervengono diversi fattori variabili che fanno sì che ripetendo la misurazione più volte si ottengano risultati diversi. Questi fattori invalidano la misura ottenuta, ovvero al risultato di misura ottenuto è indispensabile associare un certo grado di indeterminazione che stabilisce il grado di precisione con cui è possibile conoscere il misurando. Tale grado di indeterminazione è definito **incertezza di misura**.

Le cause di incertezza sono svariate e coinvolgono tutte le parti che intervengono nel processo della misurazione. Ad esempio, una causa di incertezza è costituita dallo strumento di misura adoperato che può essere più o meno preciso o dall'operatore che esegue la misura. Un altro fattore che determina l'incertezza della misurazione è legata al modello del misurando adottato. Si tratta di incertezza intrinseca del misurando, riscontrabile ad esempio quando si vuol misurare una lunghezza di una superficie che si ipotizza perfettamente liscia ed invece, nella realtà, ha una certa rugosità: la lunghezza misurata sarà affetta da errore. In pratica, modelli più semplici semplificheranno il procedimento di misura, ma comporteranno una maggiore incertezza.

A tale scopo viene definita l'**incertezza desiderata**, come la massima incertezza che si è disposti a tollerare sul valore del misurando. L'incertezza estesa determina il limite superiore al grado di indeterminazione del valore del misurando e quindi, in pratica, stabilisce il metodo di misura da adottare e, di conseguenza, i costi della misurazione. Tale concetto, comunque, sarà ripreso in maniera più esaustiva dopo aver esposto i metodi per stimare l'incertezza associata ad una misurazione.

I fattori che influenzano la misurazione si distinguono in **effetti sistematici** ed **effetti aleatori**. I primi, al ripetere delle misurazioni, intervengono sempre con lo stesso segno. Ne è un esempio una misurazione di lunghezza eseguita con un metro "reale", di lunghezza, ad esempio, minore del metro campione; misurando più volte la stessa lunghezza, si otterrà una misura errata di una determinata quantità sempre per difetto. Proprio perché si presentano sempre con lo stesso segno, gli effetti sistematici, se valutati, possono essere compensati, correggendo opportunamente il risultato della misurazione. Gli effetti aleatori, invece, agiscono come un contributo casuale di errore, di segno qualunque, in dipendenza da tanti fattori non prevedibili. Pertanto essi non possono essere stimati a priori, ma, al massimo, si può stimare un intervallo all'interno del quale ricade il misurando a causa dell'intervento di tali effetti.

La misurazione come esperimento aleatorio

Per le cause di incertezza esposte nel precedente paragrafo, il risultato di un processo di misurazione può essere visto come una variabile aleatoria. Ad esempio, se si effettuano misurazioni ripetute su di una stessa grandezza, si verifica sperimentalmente che le misurazioni non producono sempre gli stessi risultati. Le misure ottenute, diverse tra loro a causa di fattori di influenza variabili e non prevedibili, sono però comprese all'interno di una fascia di valori come mostra la Figura 1.

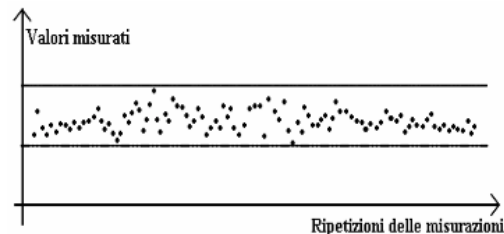


Figura 1

Maggiore è il numero di misurazioni eseguite, maggiore è il grado di fiducia che si può porre nell'ipotesi che il valore del misurando (ossia la misura) sia contenuto all'interno di questa fascia di valori. Per stimare il valore di un misurando è necessario, quindi, ripetere un certo numero di volte la procedura di misurazione e occorre eseguire un'analisi statistica sull'insieme dei risultati ottenuti.

Valutazione dell'incertezza di categoria A e B

Il metodo per stimare l'incertezza associata ad una misurazione è sancito dalla **normativa UNI CEI ENV 13005** "Guida all'espressione dell'incertezza di misura". In tale norma viene stabilito che l'incertezza deve essere valutata componendo due termini che si ottengono dai due seguenti approcci:

- **Valutazione dell'incertezza di categoria A** : è il termine che si ottiene attraverso l'analisi statistica dei risultati provenienti da misurazioni ripetute. Il risultato di misura sarà costituito dalla media sperimentale delle N misure. Per tale motivo, l'incertezza proveniente da queste misure è legata al fatto che, poiché N è finito, è possibile ottenere solo una stima della media statistica (che rappresenta il valore atteso del misurando) e che tale stima migliora all'aumentare di N. Dunque come termine di incertezza si utilizza il rapporto u_A tra lo scarto quadratico medio e la radice quadrata del numero di prove effettuate:

$$\frac{s}{\sqrt{N}} \quad (1)$$

Il termine u_A è detto incertezza tipo di categoria A. Un approccio di questo tipo è definibile, per quanto detto, un approccio a posteriori in quanto la valutazione di tali parametri è possibile solo dopo il rilevamento dei risultati delle misurazioni ripetute nelle stesse condizioni sperimentali.

- **Valutazione dell'incertezza di categoria B**: è il termine ottenuto tramite informazioni disponibili sulla misura senza effettuare prove ripetute. Esempi di tali informazioni sono: dati acquisiti in misurazioni precedenti, esperienza dell'operatore, informazioni sulla strumentazione utilizzata. Questo è, quindi, un approccio a priori.

Esempio: Interpretazione delle specifiche strumentali descritte nel manuale di uno strumento di misura

In tale sezione viene preso in esame un esempio di valutazione di tipo B dell'incertezza attraverso l'esame delle specifiche dello strumento fornite dal costruttore. Si supponga, ad esempio, di aver eseguito delle misurazioni ripetute di una tensione continua ottenendo, come media sperimentale, il valore di 8.5V.

Ogni strumento dispone di un manuale d'uso in cui sono presenti le caratteristiche peculiari dello strumento stesso tra le quali le cosiddette tabelle di **Accuracy Specifications** ovvero delle tabelle riportanti l'incertezza associata allo strumento. La Figura 2 ne mostra un esempio. In essa si notano i seguenti campi:

- **Function** : in questo caso, lo strumento è un multimetro, per cui questo parametro definisce per la misura di quale grandezza è impiegato il multimetro; in questo caso, la riga da considerare sarà DC Voltage.
- **Range**: definisce il fondo scala dello strumento. Il multimetro in questione adatta automaticamente il fondo scala scegliendo il range più basso che consenta di eseguire la misura senza saturare; in questo caso, dove il valore medio della tensione misurata è di 8.5 V, si sceglierà la riga corrispondente al range di 10 V.

Le successive tre colonne indicano il tempo trascorso dall'ultima calibrazione dello strumento (24 ore, 90 giorni o 1 anno; si consideri, ad esempio, la colonna 1 anno. Si ottengono, così, due coefficienti che, in questo caso, sono 0.0035 e 0.0005.

Accuracy Specifications \pm (% of reading + % of range) [1]						
Function	Range [3]	Test Current or Burden Voltage	24 Hour [2] 23°C \pm 1°C	90 Day 23°C \pm 5°C	1 Year 23°C \pm 5°C	Temperature Coefficient /°C 0°C – 18°C 28°C – 55°C
DC Voltage	100.0000 mV		0.0030 + 0.0030	0.0040 + 0.0035	0.0050 + 0.0035	0.0005 + 0.0005
	1.000000 V		0.0020 + 0.0006	0.0030 + 0.0007	0.0040 + 0.0007	0.0005 + 0.0001
	10.00000 V		0.0015 + 0.0004	0.0020 + 0.0005	0.0035 + 0.0005	0.0005 + 0.0001
	100.0000 V		0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0006	0.0045 + 0.0006	0.0005 + 0.0001
1000.000 V		0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0010	0.0045 + 0.0010	0.0005 + 0.0001	
Resistance [4]	100.0000 Ω	1 mA	0.0030 + 0.0030	0.008 + 0.004	0.010 + 0.004	0.0006 + 0.0005
	1.000000 k Ω	1 mA	0.0020 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0006 + 0.0001
	10.00000 k Ω	100 μ A	0.0020 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0006 + 0.0001
	100.0000 k Ω	10 μ A	0.0020 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0006 + 0.0001
	1.000000 M Ω	5 μ A	0.002 + 0.001	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0010 + 0.0002
	10.00000 M Ω	500 nA	0.015 + 0.001	0.020 + 0.001	0.040 + 0.001	0.0030 + 0.0004
100.0000 M Ω	500 nA // 10 M Ω	0.300 + 0.010	0.800 + 0.010	0.800 + 0.010	0.1500 + 0.0002	
DC Current	10.00000 mA	< 0.1 V	0.005 + 0.010	0.030 + 0.020	0.050 + 0.020	0.002 + 0.0020
	100.0000 mA	< 0.6 V	0.01 + 0.004	0.030 + 0.005	0.050 + 0.005	0.002 + 0.0005
	1.000000 A	< 1 V	0.05 + 0.006	0.080 + 0.010	0.100 + 0.010	0.005 + 0.0010
	3.000000 A	< 2 V	0.10 + 0.020	0.120 + 0.020	0.120 + 0.020	0.005 + 0.0020

Figura 2

Si verifica, inoltre, se la temperatura ambiente a cui si esegue la misurazione sia interna o esterna alla fascia 23°C \pm 5°C. Qualora non lo sia, si valutano i rispettivi coefficienti di correzione. In particolare, i coefficienti trovati precedentemente dovranno essere maggiorati di 0.0005 e 0.0001 rispettivamente per ogni grado centigrado esterno alla fascia 23°C \pm 5°C.

Come specificato nella parte superiore della tabella, i due coefficienti trovati definiscono due aliquote percentuali:

- Percentuale della lettura (% of reading);
- Percentuale del fondo scala (% of range).

Per questo strumento, allora, l'incertezza si ottiene sommando due contributi. La somma di questi due contributi costituisce la fascia di incertezza dello strumento fornita dal costruttore.