



# UNIVERSITÀ DI PISA

---

## MISURE ELETTRONICHE E STRUMENTAZIONE

**GIANLUCA FIORI**

Anno accademico 2023/24  
CdS INGEGNERIA ELETTRONICA  
Codice 102II  
CFU 9

Moduli	Settore/i	Tipo	Ore	Docente/i
MISURE E STRUMENTAZIONE ELETTRONICA	ING-INF/01	LEZIONI	90	GIANLUCA FIORI ANDREA RIA SALVATORE SURDO

### Obiettivi di apprendimento

#### *Conoscenze*

Gli obiettivi del corso sono quelli di fornire allo studente le nozioni di base relativamente al processo di misurazione, alla misura delle principali grandezze elettriche ed elettroniche e alle principali architetture circuitali e strumenti di misura di tipo elettronico.

#### *Modalità di verifica delle conoscenze*

La verifica delle conoscenze avverrà mediante esame orale.

#### *Capacità*

Lo studente sarà in grado di effettuare le misurazioni delle principali grandezze elettriche ed elettroniche utilizzando i principali strumenti di misura e sui principi di funzionamento di questi ultimi.

#### *Modalità di verifica delle capacità*

La verifica delle capacità avverrà nel corso della prova di esame e attraverso la valutazione della relazione scritto riguardante le esperienze di laboratorio effettuate.

#### *Comportamenti*

Lo studente svilupperà e acquisirà una elevata sensibilità per la misura delle principali grandezze elettriche e all'utilizzo dei principali strumenti di misura.

#### *Modalità di verifica dei comportamenti*

La verifica dei comportamenti avverrà nel corso della prova di esame orale e attraverso la valutazione di una prova pratica in laboratorio.

#### *Prerequisiti (conoscenze iniziali)*

I prerequisiti che lo studente dovrebbe possedere per seguire il corso in modo proficuo riguardano la conoscenza dell'elettronica di base e della teoria dei segnali.

#### *Indicazioni metodologiche*

Il corso viene tenuto in italiano con lezioni frontali alla lavagna, volte a spiegare gli argomenti di libri e dispense messe a disposizione degli studenti con lo strumento Microsoft Teams. Le esercitazioni sperimentali vengono effettuate in laboratorio formando dei gruppi e le esperienze da effettuare vengono spiegate preliminarmente alla lavagna. Gli studenti possono usufruire del ricevimento e della email del docente per chiarimenti tematici e organizzativi.

#### *Programma (contenuti dell'insegnamento)*

1. INTRO: Introduzione al corso. MISURA: Concetto di processo di misura (con schema a blocchi). Classifica degli strumenti (di misura, di stimolo e composti). Strumenti di misura passivi/attivi/a bilanciamento. Concetto di errore assoluto, relativo e percentuale. Definizione di accuratezza, risoluzione, sensibilità, precisione. Errore sistematico/casuale. Concetto di campione di riferimento e di unità di misura; Sistema Internazionale (S.I.). Standard prototipo e standard intrinseci; standard primari, secondari

## UNIVERSITÀ DI PISA

- e di lavoro. Esempio dello standard primario di tensione basato sull'effetto Josephson.
2. ADC: Schema a blocchi e funzionamento. Struttura di una porta di campionamento. Architettura di conversione A/D. Caratteristica ingresso-uscita di un convertitore A/D. Concetto di errore di quantizzazione. Parametri statici di un convertitore A/D: end point line, offset error, gain error, INL, DNL. Dettagli su risoluzione e velocità di conversione di architetture ADC (Flash, Flash-pipeline, SAR, Integrativo, ?-?). Schema e funzionamento di: convertitore Flash, convertitore Flash-pipeline. Convertitore A/D SAR, integrativo a doppia rampa (schema circuitale e funzionamento). Effetto degli offset sul comparatore e sull'integratore interni allo schema. Parametri dinamici di un convertitore A/D: SNR, SINAD, ENOB, banda analogica. Dipendenza di SNR e SINAD dalla frequenza d'ingresso. DAC: Introduzione ai convertitori D/A, con relativa caratteristica ingresso-uscita.
  3. DAC: Parametri statici di un convertitore D/A: offset error, gain error, INL, DNL. Schema e funzionamento di due architetture: DAC a resistenze pesate e DAC ladder.
  4. OSCILLOSCOPIO: Oscilloscopio digitale: introduzione e principio di funzionamento, condizionamento del segnale in ingresso, campionamento, conversione in digitale e memorizzazione dei campioni. Sensibilità verticale e base dei tempi. Il sistema di *trigger*. Uso dell'oscilloscopio: comandi principali: sensibilità verticale e base dei tempi, uso del *trigger*. Interpolazione dei dati. Campionamento in tempo reale e campionamento in tempo equivalente (casuale e sequenziale). Attenuatori compensati; la sonda come attenuatore compensato. Misure con l'oscilloscopio. Specifiche e criteri di valutazione di un oscilloscopio. Caratteristiche degli oscilloscopi Agilent 54600B e U1602A/1604A.
  5. DMM: Struttura generale di un DMM con schema a blocchi. Schema del blocco di condizionamento di un DMM. Schemi circuitali di attenuatori DC (con selettore a valle e a monte del partitore resistivo); considerazioni sull'offset di corrente e tensione delle due architetture; possibili soluzioni per generare attenuazioni diverse, in particolare usando un amplificatore a guadagno variabile. Schema di un attenuatore compensato a doppio stadio; metodi per ricavare un parametro costante da un segnale periodico in uscita dall'attenuatore (valore di picco, valor medio, valore efficace). Schema di un diodo di precisione; metodo di estrazione del valore efficace. Misura di corrente con un DMM. Concetto di rumore; definizione del rapporto segnale-rumore (SNR) e dei vari tipi di rumore (termico, shot e flicker) con relativa densità spettrale di potenza e potenza di rumore. Uso di un amplificatore transresistivo per misure di corrente. Misure di resistenza con un DMM: metodo a tensione impressa e a corrente impressa (due schemi diversi per ogni metodo, con rispettive condizioni sul valore delle resistenze in esame).
  6. ELETTROMETRO: Caratteristiche di un elettrometro; schema di un elettrometro per misure di tensione (con considerazioni sui generatori di offset), e due schemi alternativi per le misure di corrente. Uso di un elettrometro come coulombmetro: schema circuitale e considerazioni sui generatori di offset; limitazioni sui tempi di misura. Schema di un cavo coassiale; conseguenze della presenza di R e C di perdita. Schema di un cavo triassiale (con spiegazione del funzionamento del terminale di guardia).
  7. PICOAMPEROMETRO E MICROOHMETRO: Funzione di un pico-amperometro; tecniche per misurare una resistenza con un micro-ohmetro (misura a due e a quattro contatti). NANOVOLTMETRO: Modello di amplificatore ideale con generatori di rumore; definizione di NF (noise figure) e dipendenza di NF dalla resistenza di sorgente.
  8. NANOVOLTEMETRO: Formula di Friis per NF; temperatura di rumore. Nanovoltmetro (introduzione del filtro passabasso in ingresso; relazione tra la resistenza interna della sorgente ed il tempo di misura). Relazione fra NF, SNR<sub>in</sub> e SNR<sub>out</sub>. Minimizzazione di NF attraverso l'uso di un amplificatore a chopper.
  9. SMU: Funzioni e caratteristiche di uno SMU; esempi di utilizzo dello strumento e spiegazione delle due modalità: generatore di tensione - misuratore di corrente/generatore di corrente - misuratore di tensione. (Giuseppe Barillaro)
  10. ANALIZZATORE DI SPETTRO: definizione di analizzatore di spettro e tipologie di analizzatore di spettro. Struttura di un analizzatore di spettro a scansione. Parametri di merito di un analizzatore di spettro a scansione (RBW - resolution band width). Parametri di merito di un analizzatore di spettro a scansione (RBW, risoluzione frequenziale, sensibilità, selettività). Struttura di un analizzatore a banco di filtri. Struttura e analisi di un analizzatore dinamico di segnali (DSA). Definizione di THD (total harmonic distortion); due schemi alternativi per la misura di distorsioni. FREQUENZIMETRO e FASOMETRO: Misure di frequenza tramite contatori (periodometro e frequenzimetro); ulteriore schema per la misura dello sfasamento tra due segnali isofrequenziali.
  11. SINTESI DI FREQ: Sintesi di frequenza diretta e indiretta. Sintesi analogica diretta e sintesi digitale diretta; generatore di gruppi spettrali (schema). Funzionamento del phase jumper/tuning word. Sintesi di frequenza diretta e indiretta. Sintesi analogica diretta e sintesi digitale diretta; generatore di gruppi spettrali (schema). Funzionamento del phase jumper/tuning word.
  12. LABORATORIO: Utilizzo dei principali strumenti di misura per la caratterizzazione dei dispositivi e circuiti.

### Bibliografia e materiale didattico

B. Neri, G. Basso, "Appunti di Strumentazione Elettronica", Arnus University Books, Pisa, 2011.  
Appunti delle lezioni disponibili su Microsoft Teams.

### Modalità d'esame

Prova orale e pratica in laboratorio relativa alla realizzazione di un semplice circuito analizzato durante il corso.

Ultimo aggiornamento 20/09/2023 12:50