

**SYLLABUS del corso di
LABORATORIO DI FISICA III**

Dipartimento di Fisica, Università di Trento, a.a. 2021-2022

Titolare: **LEONARDO RICCI**

Nota importante: il presente documento è da considerarsi una bozza; sino al termine del corso, cambiamenti ed aggiornamenti sono possibili senza preavviso.

ARGOMENTI

- 1. Linee di trasmissione.
- 2a. Sistemi lineari e tempo-invarianti (LTI).
- 2b. Trasformata di Laplace.
- 3a. Teoria della retroazione.
- 3b. Teoria della retroazione ed amplificatori operazionali.
- 3c. Oscillatori.
- 4. Teorema del campionamento.
- 5a. Elettronica digitale.
- 5b. Conversione digitale-analogica e analogico-digitale.
- 6. Rumore.

LEZIONI

(13/09/2021) 1. **Introduzione e fondamenti di elettronica.
Linee di trasmissione 1.**

- Introduzione al corso.
- Linee di trasmissione ed equazioni del telegrafista (caso non-dissipativo):
 - costanti utili,
 - * $4\pi\epsilon_0 = \frac{1}{9} \frac{\text{nF}}{\text{m}}, \frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \frac{\text{T m}}{\text{A}},$
 - * $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = c, \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = Z_0 \simeq 120\pi \Omega;$
 - calcolo dell'induttanza e della capacità per unità di lunghezza nel caso di una linea coassiale;
 - equazioni del telegrafista.

(20/09/2021) 2. **Linee di trasmissione 2.**

- Soluzione delle equazioni del telegrafista nel caso non-dissipativo:
 - equazioni del telegrafista nel caso non-dissipativo;
 - equazione d'onda per tensione e corrente nel caso non-dissipativo e sua soluzione;
 - velocità del segnale v ed impedenza caratteristica Z ;
 - cenno al caso dissipativo.
- Coefficiente di riflessione:
 - coefficiente di riflessione nel caso di una linea di trasmissione “terminata” mediante un'impedenza di carico Z_L ,
 - * derivazione,
 - * caso $Z_L = Z$,
 - * caso $Z_L = 0$,
 - * caso $Z_L \rightarrow \infty$;
 - verifica sperimentale del coefficiente di riflessione.

(22/09/2021) 3. **Sistemi lineari e tempo-invarianti (LTI).**

- Segnali e sistemi.
- Introduzione ai sistemi LTI e loro ubiquitarità in Fisica.
- Linearità (principio di sovrapposizione).
- Invarianza per traslazioni temporali di un sistema.
- Integrale di convoluzione per l'output in funzione dell'input in un sistema LTI.
- Funzione di trasferimento, risposta impulsionale, guadagno $G(t)$.

- Sistemi LTI descritti da equazioni differenziali (ma non sempre!).
- Il problema fondamentale della determinazione di $G(t)$: sua risoluzione nel dominio dei tempi mediante la soluzione di equazioni differenziali; possibilità di risoluzione nello dominio delle frequenze mediante la soluzione di equazioni algebriche.
- Esempio notevole: il filtro RC passa-basso.
- Risposta ad un segnale armonico $x(t) = \tilde{x}(\omega)e^{-i\omega t}$;
- La convoluzione nel dominio dei tempi diventa un prodotto nel dominio delle frequenze.
- Sovrapposizione di segnali armonici e trasformata di Fourier (\mathcal{F} -transform).
- Soluzione di $G(t)$ "attraverso" ω -space (e relativo diagramma).

(23/09/2021) 4. **Trasformata di Laplace.**

- Trasformata di Laplace (\mathcal{L} -transform) e sue proprietà:
 - definizione;
 - linearità;
 - teorema della convoluzione;
 - trasformata di un integrale;
 - trasformata della derivata;
 - analiticità,
 - trasformata di una funzione ritardata e traslazione nello spazio delle frequenze;
 - trasformate di Laplace notevoli.
- Impedenze generalizzate.

(27/09/2021) 5. **Inversione della trasformata di Laplace. Sistemi LTI nel dominio delle frequenze.**

- Inversione della trasformata di Laplace:
 - inversione;
 - esempi notevoli.
- Sistemi LTI nel dominio delle frequenze:
 - funzione di trasferimento nel dominio delle frequenze,
 - * funzione razionale nel caso di un sistema descritto da equazioni differenziali,
 - * ritardo,
 - * poli e zeri;
 - impedenze generalizzate;
 - stabilità della funzione di trasferimento;
 - realtà della funzione di trasferimento.

(04/10/2021) 6. **Teoria della retroazione.**

- Introduzione alla teoria del controllo (retroazione o feedback).
- Struttura di un sistema retroazionato basato su stadi LTI (sensore, processore ed attuatore):
 - guadagno ad anello aperto;
 - guadagno ad anello chiuso.
- Problema dovuto all'esistenza di poli e del ritardo.
- Stabilità (introduzione).
- Principio dell'argomento principale di Cauchy per una funzione meromorfa.
- Criterio di Nyquist per la stabilità (parte 1/2):
 - discussione;
 - esempio del polo singolo.

(13/10/2021) 7. **Teoria della retroazione ed applicazione agli amplificatori operazionali reali.**

- Criterio di Nyquist per la stabilità (parte 2/2):
 - riassunto della lezione precedente;
 - esempio del polo singolo e ritardo.
- Amplificatori operazionali ideali e reali.
- Stabilità di una configurazione circuitale contenente un amplificatore operazionale ed un ramo di retroazione positiva e negativa:
 - discussione generale;
 - feedback (esclusivamente) positivo;
 - feedback (esclusivamente) negativo;
 - integratore e derivatore (cenno).
- Approssimazione di eguale tensione sui terminali di entrata di un amplificatore operazionale con feedback negativo.

(18/10/2021) 8. **Oscillatori.**

- Oscillatori: introduzione al problema.
- Oscillatore in quadratura mediante due integratori ed un invertitore.
- Equazione di Van der Pol:
 - instabilità del punto stazionario e all'esistenza di un ciclo limite;
 - cenno alla soluzione mediante teoria delle perturbazioni;
 - generalità della descrizione,
 - * il pendolo ed il meccanismo a scappamento,
 - * la corda di violino,
 - * il cuore.

(27/10/2021) 9. **Teorema del campionamento.**

- Campionamento:
 - processo di campionamento;
 - considerazioni sulla necessità di campionare; il punto di vista della compressione di informazione;
 - definizioni importanti.

- Formula di somma di Poisson:
 - formula di somma di Poisson per funzioni \mathcal{L}^2 ;
 - corollario: formula di somma di Poisson per serie periodiche di funzioni a delta di Dirac.

- Teorema del campionamento:
 - funzione finestra per la banda di Nyquist e sua trasformata di Fourier;
 - formulazione matematica del teorema del campionamento,
 - * nel dominio della frequenza,
 - * nel dominio del tempo, con ricostruzione mediante la funzione *kernel sinc*;
 - la condizione sull'intervallo di campionamento T : $T < f_{BW}^{-1}/2$, con f_{BW} la frequenza massima di interesse del segnale da campionare ($BW \sim bandwidth$);
 - aliasing;
 - esempi notevoli di utilizzo del teorema del campionamento (sinusoide, cosinusoide e punto rotante nel piano);
 - caso della ricostruzione della sinusoide e della cosinusoide per $f_0 = f_s/2$.

- Cenno a “bande” e “canali”.

(08/11/2021) 10. **Elettronica digitale combinatoria.**

- Algebra Booleana:
 - variabili Booleane;
 - operazioni Booleane fondamentali (AND, OR, NOT);
 - tabelle di verità;

 - simboli circuitali (“porte”), combinazioni di porte (NOR, NAND);
 - implementazione hardware di una porta NOT e di una porta NOR;

 - proprietà commutativa, associativa e distributiva;
 - doppia negazione;
 - teorema di De Morgan;

 - differenze con l'aritmetica.

- Aritmetica binaria:
 - il complemento a 2 per la rappresentazione dei numeri negativi;

- somma;
- la porta XOR;
- cenno alle altre operazioni aritmetiche.
- Cenno a multiplexer e demultiplexer:
 - la porta XOR come CNOT (*controlled-NOT*), la porta AND come abilitazione alla trasmissione dati (*enable*), la porta OR come *mixer*;
 - cenno a circuiti multiplexer (*MUX*) e demultiplexer (*DEMUX*).

(15/11/2021) 11. **Elettronica digitale sequenziale.**

- Distinzione tra elettronica combinatoria ed elettronica sequenziale.
- Flip-Flop RS:
 - funzionamento;
 - sistemi bistabili e loro impiego come memorie;
 - impiego del flip-flop RS come elemento di memoria.
- Flip-Flop D-type:
 - funzionamento,
 - * negative edge-triggered FF D-type in configurazione master-slave,
 - * positive edge-triggered FF D-type;
 - impiego come elemento di memoria (registro o latch),
 - impiego come divisore di frequenza / contatore (asincrono);
 - * divisore di frequenza per 2 (contatore, sia crescente che decrescente, da 0 a 1),
 - * generalizzazione ad un insieme di N flip-flop D-type in cascata come divisore di frequenza per 2^N / contatore, sia crescente che decrescente, da 0 a $2^N - 1$.
- Commento sulla difficoltà di dividere la frequenza (contrariamente a moltiplicarla).

(17/11/2021) A1. **Esercitazione e ricevimento studenti (al di fuori del monte ore previsto per il corso; durata: 2 ore).**

- Soluzione di esercizi preventivamente assegnati.

(19/11/2021) A2. **Esercitazione e ricevimento studenti (al di fuori del monte ore previsto per il corso; durata: 2 ore; docenti: M. Castelluzzo e A. Perinelli).**

- Soluzione di esercizi preventivamente assegnati.

(22/11/2021) 12. **Automi a stati finiti.**

- Circuiti sequenziali asincroni e sincroni.
- Registro a scorrimento (*shift-register*):

- struttura;
- convertitore da bus seriale a parallelo e viceversa;
- generatori di sequenze binarie pseudorandom;
- impiego nell'implementazione di automi a stati finiti (*finite-state machines*).
- Automi a stati finiti:
 - aspetti generali;
 - esempio di un divisore di frequenza per 4 sincrono.

(29/11/2021) 13. **Conversione digitale-analogica e analogico-digitale. Rumore 1.**

- Caratteristiche generali della conversione digitale-analogica (DA) e analogico-digitale (AD):
 - risoluzione;
 - precisione e accuratezza;
 - velocità.
- Convertitori digitali-analogici (DAC - *digital-to-analog converters*):
 - soluzione con *scaled-resistors into summing junction* (sommatore);
 - cenni alla soluzione con rete *ladder R-2R*.
- Convertitori analogico-digitali (ADC - *analog-to-digital converters*):
 - necessità di un comparatore;
 - ADC basati su DAC e comparatore.
- Introduzione al problema del rumore.
- Rumore Johnson:
 - derivazione di Nyquist.

(30/11/2021) A3. **Esercitazione e ricevimento studenti (al di fuori del monte ore previsto per il corso; durata: 2 ore; docenti: M. Castelluzzo e A. Perinelli).**

- Soluzione di esercizi preventivamente assegnati.

(03/12/2021) A4. **Esercitazione e ricevimento studenti (al di fuori del monte ore previsto per il corso; durata: 2 ore; docenti: M. Castelluzzo e A. Perinelli).**

- Soluzione di esercizi preventivamente assegnati.

(06/12/2021) 14. **Rumore 2.**

- Riassunto sul rumore Johnson:
 - derivazione di Nyquist;
 - circuito RC.
 - Rumore *shot*:
 - derivazione euristica basata sul processo Poissoniano;
 - derivazione.
- Argomenti complementari:
- cenni ad altri tipi di rumore;
 - rumore generato da una sequenza casuale di impulsi quadrati.

ESERCITAZIONI

(14, 15, 16/09/2021) 1. **Introduzione all'amplificatore operazionale: caratteristiche di ingresso e di uscita.**

- Norme di sicurezza in laboratorio.
- Introduzione agli amplificatori operazionali.
- Circuito inseguitore (*follower* o *buffer*):
 - realizzazione;
 - caratterizzazione,
 - * impedenza di ingresso di un op-amp,
 - * impedenza di uscita di un op-amp,
 - * corrente massima erogata da un op-amp.

(28, 29, 30/09/2021) 2. **Amplificatore operazionale: circuiti notevoli.**

- Amplificatore invertente.
- Amplificatore non-invertente.
- Amplificatore differenziale.
- Argomenti “collaterali”:
 - battimenti;
 - figure di Lissajous.
- (Esercizio facoltativo:) Derivatore.
- (Esercizio facoltativo:) Configurazione a transimpedenza per la misura della caratteristica I-V di un diodo e di un transistor.

(05, 06, 07/10/2021) 3. **Filtri del secondo ordine.**

- Filtro passa-basso del secondo ordine realizzato mediante due RC passivi in cascata.
- Filtro passa-basso del secondo ordine realizzato mediante due RC passivi in cascata e con buffer sull'uscita del primo.
- Filtro passa-basso del secondo ordine realizzato mediante due RC passivi in cascata e con buffer sull'uscita di ciascuno.
- Argomenti “collaterali”:
 - diagrammi di Bode;
 - esempio del filtro RC passa-basso.
- (Esercizio facoltativo:) Filtro passa-basso del secondo ordine di Sallen-Key.

(19, 20, 21/10/2021) 4. **Retroazione e oscillazione.**

- Oscillatore (armonico) in quadratura smorzato realizzato mediante due integratori ed un invertitore.
- Oscillatore in quadratura con controllo dell'ampiezza mediante diodi.

(26, 27, 28/10/2021) 5. **Oscillatori.**

- Oscillatore a ponte di Wien.
 - realizzazione di una sorgente di corrente di Howland;
 - misura della caratteristica I-V di una lampadina ad incandescenza mediante una sorgente di corrente di Howland;
 - realizzazione di un oscillatore a ponte di Wien utilizzando una lampadina ad incandescenza come elemento resistivo non-lineare.
- Oscillatore a rilassamento.

(02, 03, 04/11/2021) 6. **Teorema del campionamento.**

- Realizzazione di un *sample-and-hold sampler*:
 - generatore di clock mediante oscillatore a rilassamento asimmetrico;
 - circuito sample-and-hold mediante integrato LF398;
 - campionamento di segnali sinusoidali, triangolari e a onda quadra.
- Ricostruzione software di segnali campionati:
 - utilizzo del *kernel* triangolare (interpolazione lineare);
 - utilizzo del *kernel* dato dalla funzione *sinc*.
- Ricostruzione hardware di segnali campionati:
 - ricostruzione hardware di segnali campionati mediante *lag high-pass filter* e filtro attivo del secondo ordine.

(16, 17, 18/11/2021) 7. **Basi dell'elettronica digitale combinatoria e sequenziale.**

- Codifica di una variabile Booleana mediante livelli di tensione: logica TTL (e LVTTTL).
- Componenti 74xxyy in logica TTL:
 - descrizione;
 - fan-out, tempo di commutazione.
- Dispositivi logici elementari basati su componenti discreti:
 - realizzazione di una porta NOR mediante un circuito a transistor, con LED per la visualizzazione.
- Realizzazione di una porta XOR mediante 4 porte NAND (7400) e, se ritenuto

necessario, una porta NOT implementata utilizzando un circuito a transistor.

- Flip-flop RS realizzato con porte NAND.
- Divisori di frequenza e contatori asincroni.
- (Esercizio facoltativo:) Misura del tempo di commutazione di una porta:
 - misura nel caso di n porte NOT (7404) in serie, con n compreso tra 1 e 12;
 - realizzazione di un oscillatore nel caso di n dispari ($n > 3$) ed anello chiuso.

(23, 24, 25/11/2021) 8. **Simulazione di esame finale 1.**

- Analisi teorica di un circuito analogico.
- Realizzazione ed analisi sperimentale del circuito di cui al punto precedente.
- Altri esercizi.

(07, 09, 10/12/2021) 9. **Elettronica digitale sequenziale sincrona.**

- Registri a scorrimento.
- Automi a stati finiti:
 - divisore di frequenza per 3 sincrono (semaforo);
 - divisore di frequenza per 5 sincrono;
 - divisore di frequenza per 16 sincrono.

(14, 15, 16/12/2021) 10. **Simulazione di esame finale 2.**

- Analisi teorica di un circuito analogico.
- Realizzazione ed analisi sperimentale del circuito di cui al punto precedente.
- Altri esercizi.