



Insegnamento	Materiali Elettromagnetici Artificiali
Livello e corso di studio	Laurea Magistrale in Ingegneria Elettronica (LM-29)
Settore scientifico disciplinare (SSD)	ING-INF/02
Anno di corso	1
Numero totale di crediti	6
Propedeuticità	Campi elettromagnetici. Propagazione guidata e circuiti a microonde.
Docente	Prof.ssa Michela Longhi <a href="https://ricerca.unicusano.it/author/michela-longhi/">https://ricerca.unicusano.it/author/michela-longhi/</a> email: michela.longhi@unicusano.it Orario di ricevimento: mandare una mail per concordare giorno e ora del ricevimento
Presentazione	Il corso è concepito per fornire le <b>metodologie e le competenze necessarie alla caratterizzazione dei materiali e delle superfici elettromagnetiche artificiali</b> . In particolare, il corso fornisce informazioni di carattere teorico e pratico sulle principali caratteristiche di questi materiali innovativi. Questo corso ci colloca nell'ambito delle discipline dei <b>campi elettromagnetici</b> e amplia e approfondisce le conoscenze acquisite negli insegnamenti di Campi Elettromagnetici e di Propagazione guidata e circuiti a microonde, introducendo nuove tematiche teoriche e applicative sui materiali elettromagnetici artificiali.
Obiettivi formativi	<b>L'insegnamento di Materiali elettromagnetici artificiali si propone di:</b> 1. Illustrare le relazioni tra campo elettromagnetico e materiali sia naturali che artificiali 2. Descrivere i materiali elettromagnetici artificiali 3. Descrivere le principali caratteristiche e applicazioni di questi materiali 4. Illustrare come progettare un materiale elettromagnetico artificiale
Prerequisiti	<b>Conoscenza dei fondamenti dell'analisi matematica e delle funzioni vettoriali a più variabili.</b> <b>Conoscenza delle proprietà fondamentali del campo elettrostatico, magnetostatico ed elettromagnetico.</b>  A riguardo, si consiglia di rivedere tali nozioni, propedeutiche per l'apprendimento e l'approfondimento della teoria della propagazione; a tal fine, si possono utilizzare i testi già consultati per la preparazione agli esami di base dell'area matematica (Analisi I e Analisi II) e fisica (Fisica generale II e Campi Elettromagnetici) sostenuti in precedenza.



Risultati di apprendimento attesi	<p><u>Conoscenza e capacità di comprensione (knowledge and understanding)</u> Al termine dell'insegnamento, lo studente conoscerà la terminologia, le proprietà e le caratteristiche di elettromagnetismo avanzato applicato ai sistemi elettromagnetici artificiali. Conoscerà, inoltre, i meccanismi di interazione tra campo elettromagnetico e materiali naturali/artificiali e le grandezze fisiche usate per descriverla.</p> <p><u>Conoscenze e capacità di comprensione applicate (applying knowledge and understanding)</u> Al fine di affrontare tematiche legate ad aspetti di elettromagnetismo applicato a superfici e materiali artificiali, anche in contesti di notevole complessità, attraverso l'applicazione delle conoscenze, lo studente dovrà saper interpretare correttamente problemi di analisi e progetto di questi materiali. Al termine dell'insegnamento, lo studente avrà sviluppato capacità di analisi e caratterizzazione necessarie per saper scegliere ed applicare tecniche e strumenti di progetto per sintetizzare materiali e superfici elettromagnetiche artificiali e saprà riconoscere le loro principali applicazioni in diversi ambiti scientifici e tecnologici.</p> <p><u>Autonomia di giudizio (making judgements)</u> Al termine dell'insegnamento, lo studente avrà acquisito la capacità di scegliere e progettare un opportuno materiale o superficie elettromagnetica artificiale per una specifica applicazione che soddisfi determinate specifiche progettuali. Inoltre, lo studente avrà sviluppato una capacità critica di interpretare i risultati ottenuti durante lo svolgimento di un esercizio numerico e di una simulazione sia in termini di coerenza fisica dei risultati ottenuti sia in termini di fattibilità ingegneristica della soluzione individuata.</p> <p><u>Abilità comunicative (communication skills)</u> Al termine dell'insegnamento, lo studente avrà sviluppato un linguaggio scientifico corretto e comprensibile che gli consentirà di esprimere in modo chiaro e privo di ambiguità le conoscenze tecniche acquisite nell'ambito della teoria dei materiali elettromagnetici artificiali e delle antenne.</p> <p><u>Capacità di apprendere (learning skills)</u> Al termine dell'insegnamento, lo studente avrà sviluppato la capacità di applicare le conoscenze acquisite per la risoluzione di problemi non familiari che abbiano come oggetto la progettazione di materiali o superfici elettromagnetiche artificiali.</p>
Organizzazione dell'insegnamento	<p>Il corso è sviluppato attraverso le <b>lezioni preregistrate audio-video</b> che compongono, insieme a slide, dispense ed esercitazioni svolte, i materiali di studio disponibili in piattaforma.</p> <p>Sono poi proposti dei <b>test di autovalutazione</b>, di tipo asincrono, che corredano le lezioni preregistrate e consentono agli studenti di accertare sia la comprensione, sia il grado di</p>



conoscenza acquisita dei contenuti di ognuna delle lezioni. Sono altresì disponibili **lezioni in web-conference programmate a calendario** che si realizzano nei periodi didattici e **video-ricevimenti** con il docente per chiarire eventuali dubbi.

La didattica interattiva è svolta nel forum della “classe virtuale” e comprende **2 Eivity** che applicano le conoscenze acquisite nelle lezioni di teoria.

Il Corso di *Materiali Elettromagnetici Artificiali* prevede **6 crediti formativi (CFU)**. Il carico totale di studio per questo modulo di insegnamento è compreso tra 150 e 160 ore così suddivise:

1. **circa 130 ore** per la visualizzazione e lo studio del materiale videoregistrato
2. **circa 20 ore** di didattica interattiva per l’elaborazione e la consegna delle Eivity
3. **circa 5 ore** di didattica interattiva per l’esecuzione dei test di autovalutazione.

Si consiglia di distribuire lo studio della materia uniformemente in un periodo di 6-8 settimane dedicando tra le 20 alle 25 ore di studio a settimana.

## Contenuti del corso

### **Modulo 1 – Richiami di Campi Elettromagnetici (Settimana 1 – Impegno di 20 ore)**

Equazioni di Maxwell e condizioni al contorno. Notazione complessa e polarizzazione. Teoremi fondamentali. Potenziali vettoriali. Funzione di Green nello spazio libero. Dipolo Hertz. Radiazione. Onde elettromagnetiche uniformi/non uniformi. Velocità di fase e di gruppo. Relazioni costitutive e classificazione dei materiali (bi-anisotropi, anisotropi, bi-isotropi, isotropi): materiali lineari/non lineari, omogenei/non omogenei, stazionari/non stazionari, locali/non locali, dispersivi/non disperdenti. Parametri costitutivi nel dominio della frequenza e del numero d'onda. Causalità e relazioni di Kramers-Kronig.

### **Modulo 2 – Interazione tra campo elettromagnetico e materiali naturali (Settimane 2 – Impegno di 25 ore)**

Interazione tra campo elettromagnetico e materiali. Polarizzazione elettronica. Polarizzazione del materiale. Meccanismi elettronici, atomico/ionici, di orientamento, di polarizzazione dell'interfaccia. Modello di Lorentz: derivazione e discussione. Modello Drude: derivazione e discussione. Risposta magnetica dei materiali naturali. Classificazione dei materiali magnetici. Risposta elettrodinamica di una ferrite magnetizzata.

### **Modulo 3 – Interazione tra campo elettromagnetico e materiali artificiali (Settimana 3 – Impegno di 25 ore)**

Materiali elettromagnetici artificiali. Prospettiva storica. Concetto di polarizzabilità. Polarizzabilità elettrica e magnetica. Polarizzabilità della particella metallica omega. Effetto



magnetoelettrico. Campo locale e campo di interazione. Dalla risposta microscopica a quella macroscopica. Tecniche di omogeneizzazione. Formula di Maxwell-Garnet. Formula di Clausius-Mossotti. Formula di Bruggeman. Densità di energia per materiali disperdenti. Causalità e conservazione dell'energia. Dispersione anomala. Introduzione ai metamateriali. Panoramica storica. Metamateriali e loro definizioni. Indice di rifrazione negativo. Materiali elettrici artificiali con permittività negativa. Materiali elettrici artificiali nel visibile. Metamateriali Epsilon-near-zero. Magnetismo naturale e artificiale. Percorso verso materiale indice negativo in ottica. Magnetismo ottico.

#### **Modulo 4 – Introduzione ai Metamateriali e alle Metasuperfici (Settimana 4 – Impegno di 25 ore)**

Risonatore di Engheta. Lenti di Pendry. Linee di trasmissione metamateriali. Componenti miniaturizzati. Antenne miniaturizzate. Metamateriali 2D: metasuperfici. Progettazione di particelle metamateriali. Progettazione di linee di trasmissione di metamateriali e progettazione di componenti miniaturizzati (cellule unitarie, sfasatori, ecc.).

#### **Modulo 5 – Invisibilità elettromagnetica, imaging e sensing (Settimana 5 – Impegno di 25 ore)**

Invisibilità elettromagnetica. Riduzione dell'osservabilità radar. Principi di base dell'invisibilità EM. Radar e scattering cross-section. Figura di merito per i cloaks EM. Principi di base della trasformazione EM. Tecniche di invisibilità EM. Principi di base per la cancellazione dello scattering. Cancellazione della dispersione attraverso metamateriali volumetrici e metasuperfici (mantle cloaking). Teoria di Mie per oggetti nascosti sferici e cilindrici.

#### **Modulo 6 – Software di simulazione CST (Settimana 6 – Impegno di 10 ore)**

Introduzione alla simulazione elettromagnetica di materiali e superfici elettromagnetiche artificiali. Processo generico di simulazione elettromagnetica. Principali software di simulazione elettromagnetica. Utilizzo del software CST.

**Etivity 1** – Installazione di CST STUDIO SUITE Student Edition ed utilizzo della sua interfaccia (5 ore di carico di studio - settimana 6).

**Etivity 2** – Progetto ed analisi di una semplice struttura all'interno del software CST Microwave Studio (15 ore di carico di studio - settimana 6).

Materiali di studio

**Materiali didattici a cura del docente.**



	<p>Il materiale didattico presente in piattaforma è suddiviso in 6 moduli. Essi ricoprono interamente il programma e ciascuno di essi contiene dispense, esercitazioni, slide, videolezioni in cui il docente commenta le slide. Tale materiale contiene tutti gli strumenti necessari per affrontare lo studio della materia.</p> <p><b>Testi consigliati:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Sergei Tretyakov, Analytical modeling in applied electromagnetics,</li><li>• Constantin Simovski, Sergei Tretyakov, An introduction to metamaterials and nanophotonics</li><li>• Andrey V. Osipov, Sergei Tretyakov, Modern electromagnetic scattering theory with applications</li></ul>
Modalità di verifica dell'apprendimento	<p>L'esame consiste di norma nello svolgimento di una <b>prova scritta</b> tendente ad accertare le capacità di analisi e rielaborazione dei concetti acquisiti e di una serie di attività (E-tivity) svolte durante il corso nelle classi virtuali. La valutazione delle <b>Etivity da 0 a 5 punti</b>, è effettuata, in itinere, durante la durata del corso. L'esame di profitto è valutato per i restanti da 0 a 26.</p> <p>L'eventuale attribuzione della <b>lode</b> sarà conseguibile ottenendo un punteggio di 31/30, raggiungibile acquisendo il massimo del punteggio all'esame di profitto e il massimo della valutazione dalle Etivity.</p> <p>La prova scritta prevede <b>4 domande di teoria da svolgere in 90 minuti</b>. Ognuno dei quesiti ha un punteggio massimo di 6.5 punti.</p> <p>Gli esercizi presenti nelle prove d'esame riguarderanno tutti i moduli da 1 a 6.</p> <p>Lo studente che deve sostenere l'esame sull'intero programma da 6 CFU potrà scegliere, indicando in sede d'esame la sua scelta, di svolgere l'esame attraverso DUE ESAMI PARZIALI (si veda fac-simile compito caricato in piattaforma).</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• L'esame parziale 1 (3 CFU) riguarderà i seguenti moduli: Modulo 1, Modulo 2, Modulo 3. L'esame parziale 1 sarà valutato fino ad un massimo di 13 punti.</li><li>• L'esame parziale 2 (3 CFU) riguarderà i seguenti moduli: Modulo 4, Modulo 5, Modulo 6. L'esame parziale 2 sarà valutato fino ad un massimo di 13 punti.</li></ul>
Criteri per l'assegnazione dell'elaborato finale	<p>L'assegnazione <b>dell'elaborato finale</b> avverrà sulla base di un colloquio con il docente in cui lo studente manifesterà i propri specifici <b>interessi</b> in relazione a qualche argomento che intende approfondire; non esistono preclusioni alla richiesta di assegnazione della tesi e non è prevista una media particolare per poterla richiedere.</p>