



# Plano de ensino

<b>Disciplina:</b> Métodos Numéricos em Eletromagnetismo	<b>Código:</b> 363791
<b>Curso:</b> ENE / PPGEE	<b>Semestre:</b> 2021-1
<b>Professor:</b> Sébastien R.M.J. Rondineau	<b>Carga horária:</b> 60h
<b>Pré-requisitos:</b> Aluno de mestrado ou doutorado	<b>Plataforma “Aprender”:</b> <b>Nome:</b> <b>Senha:</b> 09011975
<b>Horário das aulas:</b> Quinta-feira, 08h00min às 11h50min. <b>Local:</b> Sala de aula Microsoft Teams	

## 1. Ementa

Métodos das Diferença Finitas (DF), Métodos variacionais, Método dos Momentos (MoM), Método dos elementos finitos (FEM), Método do multipolo rápido (FMM).

## 2. Conteúdo programático

### 1 Métodos das Diferença Finitas (DF)

- 1.1 Introdução
- 1.2 Esquema das DF
- 1.3 DF para Equações diferenciais parciais (EDP)
  - 1.3.1 EDP parabólica
  - 1.3.2 EDP hiperbólica
  - 1.3.3 EDP elíptica
    - 1.3.3.1 Matriz banda
    - 1.3.3.2 Método iterativo
- 1.4 Precisão e estabilidade das DF
- 1.5 Aplicações
  - 1.5.1 Problemas internos
    - 1.5.1.1 Guias de ondas
    - 1.5.1.2 Linhas de transmissão
  - 1.5.2 Problemas externos – FDTD
    - 1.5.2.1 Célula de Yee
    - 1.5.2.2 Precisão e estabilidade



- 1.5.2.3 Condições de truncamento de malha
- 1.5.2.4 Campos iniciais
- 1.5.2.5 Implementação computacional
- 1.6 Condições de fronteira de absorção para FDTD
- 1.7 DF para sistemas não cartesianos
  - 1.7.1 Coordenadas cilíndricas
  - 1.7.2 Coordenadas esféricas

## **2 Métodos variacionais**

- 2.1 Introdução
- 2.2 Operadores em espaços lineares
- 2.3 Cálculo das variações
- 2.4 Construção de funcionais a partir de EDP
- 2.5 Método de Rayleigh-Ritz
- 2.6 Método dos resíduos ponderados
  - 2.6.1 Método da colocação
  - 2.6.2 Método do subdomínio
  - 2.6.3 Método de Galerkin
  - 2.6.4 Método dos mínimos quadrados
- 2.7 Problemas de autovalores
- 2.8 Aplicações práticas

## **3 Método dos Momentos (MoM)**

- 3.1 Introdução
- 3.2 Equações integrais
  - 3.2.1 Classificação das equações integrais
  - 3.2.2 Conexão entre equações diferenciais e integrais
- 3.3 Equações de Green
  - 3.3.1 Problema externo
  - 3.3.2 Problema interno
- 3.4 Aplicações
  - 3.4.1 Problemas quasistático
  - 3.4.2 Problemas de espalhamento
    - 3.4.2.1 Condutor cilíndrico
    - 3.4.2.2 Arranjos de fios condutores
  - 3.4.3 Problemas de radiação
    - 3.4.3.1 Equação integral de Hallen
    - 3.4.3.2 Equação integral de Pocklington
    - 3.4.3.3 Funções de expansão e ponderação
  - 3.4.4 Problemas de absorção
    - 3.4.4.1 Derivação das equações integrais
    - 3.4.4.2 Discretização



- 3.4.4.3 Avaliação da matriz geral
- 3.4.4.4 Solução da equação matricial

#### **4 Método dos elementos finitos (FEM)**

- 4.1 Introdução
- 4.2 Equação de Laplace
  - 4.2.1 Discretização em elementos finitos
  - 4.2.2 Equações de comportamento dos elementos
  - 4.2.3 Agregação de todos os elementos finitos
  - 4.2.4 Resolução das equações resultantes
- 4.3 Equação de Poisson
  - 4.3.1 Discretização em elementos finitos
  - 4.3.2 Equações de comportamento dos elementos
  - 4.3.3 Agregação de todos os elementos finitos
  - 4.3.4 Resolução das equações resultantes
- 4.4 Solução da equação de onda
- 4.5 Construção automática da malha
  - 4.5.1 Domínios cartesianos
  - 4.5.2 Domínios arbitrários
    - 4.5.2.1 Definição dos blocos
    - 4.5.2.2 Subdivisão de cada bloco
    - 4.5.2.3 Conexão dos blocos individuais
- 4.6 Redução da largura de banda
- 4.7 Elementos de ordem superior
  - 4.7.1 Triângulo de Pascal
  - 4.7.2 Coordenadas locais
  - 4.7.3 Funções de forma
  - 4.7.4 Matrizes fundamentais
- 4.8 Elementos tridimensionais
- 4.9 FEM para problemas externos
  - 4.9.1 Método dos elementos infinitos
  - 4.9.2 Método do elemento fronteira
  - 4.9.3 Condição de fronteira de absorção
- 4.10 Método dos elementos finitos no domínio temporal

#### **5 Método do multipolo rápido (FMM)**

- 5.1 Introdução
  - 5.1.1 Núcleo
  - 5.1.2 Núcleo degenerado
- 5.2 FMM monodimensional
  - 5.2.1 Avaliação rápida de multiquadrica
  - 5.2.2 Melhorias



- 5.3 Transformada de Gauss rápida
- 5.4 FMM bidimensional
  - 5.4.1 Algoritmo N Log N
  - 5.4.2 Algoritmo adaptativo
- 5.5 A FMM
- 5.6 FMM tridimensional
  - 5.6.1 A expansão em multipolos
  - 5.6.2 Algoritmo N Log N
  - 5.6.3 O esquema O(N)
  - 5.6.4 Expansão exponenciais
- 5.7 Método FMM multinível (MLFMM)

### 3. Bibliografia

#### **Bibliografia básica:**

- [1] T. Itoh, "Numerical Techniques for Microwave and Millimeter wave Passive Structures", 1ª edição, Wiley & Sons, USA, 1988.
- [2] P.P. Silvester e R.L. Ferrari, "Finite Elements for Electrical Engineers", 1ª edição, Univ. Press, England, 1983.
- [3] K.S. Kunz e R.J. Luebbers, "Finite Difference Time Domain for Electromagnetics", CRC Press, 1993.

#### **Bibliografia complementar:**

- [4] R. Mittra, "Analytical Techniques for Electromagnetics", Pergamon Press, 1973.
- [5] R.E. Collin, "Field Theory of Guided Waves", 1ª edição, McGraw-Hill, USA, 1961.
- [6] A. Taflove, "Computational Electromagnetics: The Finite-Difference Time-Domain Method", Artech House, 1995.
- [7] R.F. Harrington, "Field Computation by Moment Methods", 1ª edição, Krieger, Austrália, 1968.
- M.N.O. Sadiku, "Numerical Techniques in Electromagnetics", 2nd edition, CRC Press LLC, USA, 2001.

### 4. Avaliações

A avaliação geral do aluno será feita pela avaliação dos conhecimentos teóricos adquiridos, as suas habilidades em aplicá-los em problemas práticos e no seu senso de síntese através de listas de exercícios e de um projeto individual a ser desenvolvido.

#### **Nota teórica:**

A avaliação teórica dos alunos será feita a partir de uma avaliação individuais ( $A1$ , ...,  $A5$ ) de listas de exercícios entregues no fim de cada capítulo, sendo que a nota de teoria  $N_T$  é dada pela seguinte fórmula:

$$N_T = (A1 + \dots + A5) / 5.$$

**Nota projeto:**

O projeto consiste em um trabalho sobre um assunto a ser combinado com o professor no primeiro mês letivo da matéria. Um relatório deverá ser encaminhado ao professor em formato PDF e uma apresentação de 15min será feita em frente ao resto da turma no fim do semestre. A nota de projeto  $N_P$  considerará tanto o conteúdo do relatório quanto a qualidade da apresentação.

**Nota final:**

A nota final  $N_F$  é dada pela seguinte fórmula:  $N_F = (N_T + N_P) / 2$ .

**Regras para aprovação:**

Para obter aprovação, é necessário que todos os seguintes critérios estejam respeitados:

- **critério 1:** a frequência do aluno às aulas seja maior ou igual a 75%;
- **critério 2:**  $N_T \geq 5,0$  e  $N_P \geq 5,0$ .

**Menção:**

1. O não respeito do **critério 1** resultará na menção **SR**.
2. Caso o **critério 1** esteja respeitado,
  - 2.1. o não respeito de um elemento do **critério 2** resultará na menção **MI**;
  - 2.2. o não respeito de dois ou mais elementos do **critério 2** resultará na menção **II**.
3. Caso o **critério 1** e o **critério 2** estejam respeitados,
  - 3.1. o caso  $5,0 \leq N_F < 7,0$  resultará na menção **MM**;
  - 3.1. o caso  $7,0 \leq N_F < 9,0$  resultará na menção **MS**;
  - 3.1. o caso  $9,0 \leq N_F$  resultará na menção **SS**.

**Pontos Importantes:**

- Nenhuma avaliação de substituição será ofertada;
- Alunos pegos colando ou entregando um trabalho copiado ou plagiado serão automaticamente reprovados com a menção **II**.