

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO



Plano de Ensino

DISCIPLINA: Modelagem eletromagnética por meio do método dos elementos finitos

CÓDIGO:
PPGEL138

Docente Responsável: Marco Túlio Alves Evo.

Carga Horária: 60 horas-aula

Créditos: 04

Área de Concentração / Módulo: Sistemas Elétricos

Ano: 2026

Semestre: Primeiro

Ementa:

Revisão dos fundamentos de eletromagnetismo. Equações de Maxwell. Introdução ao Método dos Elementos Finitos. Formulação do problema e condições de fronteira. Método de Galerkin. Aplicação a problemas 1D e 2D. Aplicação do método dos elementos finitos em problemas da eletrostática, magnetostática e quase estática. Análise de correntes induzidas. Cálculo de resistência, indutância e capacitância. Utilização de software na análise de transformadores monofásicos e máquinas de indução trifásicas.

INTERDISCIPLINARIDADES

Inter-relações desejáveis

Os conteúdos abordados na disciplina *Modelagem eletromagnética por meio do método dos elementos finitos* têm relações com as seguintes disciplinas e linhas de pesquisa:

- **Disciplinas** $\Rightarrow$ Tópicos Especiais em Sistemas Elétricos: Métodos Semi-Analíticos em Eletromagnetismo Aplicado; Métodos Numéricos; Teoria Eletromagnética.

- **Linhas de Pesquisa** $\Rightarrow$ Eletromagnetismo Aplicado – EA (Área de concentração: Sistemas Elétricos)

Objetivos - Espera-se que ao final da disciplina o discente seja capaz de:

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO



Plano de Ensino

- Demonstrar o funcionamento do método dos elementos finitos para problemas de uma e duas dimensões.
- Aplicar o método dos elementos finitos para a solução de problemas eletromagnéticos.
- Aplicar o método dos elementos finitos para modelagem e análise do funcionamento de dispositivos elétricos por meio do uso de software para simulação.

Métodos Didáticos Utilizados

Marque com um X no quadro:

- | | |
|---|---|
| ☒ Aula expositiva em quadro | ☒ Seminário |
| ☒ Aula com uso de <i>datashow</i> | ☒ Pesquisa |
| ☒ Aula com uso de multimídia | ☒ Trabalho individual |
| ☐ Aula prática | ☒ Trabalho em grupo |
| ☐ Discussão de texto | ☐ Visita técnica |
| ☐ Filme | ☐ Outros: _____ |

Unidades de ensino		Carga-horária Horas-aula
1	Noções matemáticas preliminares • Campos escalares e vetoriais • Operação entre vetores • Operadores diferenciais • Definição do Gradiente • Definição do Divergente • Fluxo de uma grandeza	4

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO



Plano de Ensino

	• Teorema da Divergência • Definição do Rotacional • A circulação de um vetor • Teorema de Stokes • Operadores de segunda ordem	
2	Revisão dos fundamentos de eletromagnetismo • Equações de Maxwell • Grandezas fundamentais do Eletromagnetismo • A carga elétrica e a densidade de carga • A intensidade de campo elétrico • A intensidade de campo magnético • A densidade de fluxo magnético e a permeabilidade magnética • A densidade de fluxo elétrico e a permissividade elétrica • A densidade de corrente elétrica • A condutividade elétrica • Equações de Maxwell na forma pontual • Equações de Maxwell na forma integral • Lei de Ampère • Corrente de condução e corrente capacitiva • Lei Gauss para o campo magnético • Lei de Faraday • Lei Gauss para o campo elétrico • Interpretação física das Equações de Maxwell • Equação de onda • Equações constitutivas e equação de continuidade • Homogeneidade linearidade e isotropia dos materiais • Condições de fronteira • Vetor de Poynting • Força de Lorentz • Funções potenciais auxiliares	8
3	Introdução ao método dos elementos finitos • Introdução ao método de elementos finitos – Visão geral • Formulação do problema e condições de fronteira • Discretização do domínio • Método de Galerkin • Função de interpolação	8

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO



Plano de Ensino

	• Construção do sistema matricial e formulação do sistema • Imposição das condições de contorno • Solução do sistema • Aplicações a problemas 1D e 2D • Considerações sobre problemas 3D • Propriedades da matriz de rigidez • Aspectos computacionais	
4	Particularizações – A eletrostática • As condições e as equações da eletrostática • A intensidade de campo elétrico • O potencial escalar elétrico • Equação de Poisson e de Laplace • Condições de interface para o potencial escalar elétrico • Interface com um material condutor • A Eletrostática e o Método de Elementos Finitos • Aplicações do software FEMM em problemas eletrostáticos • Energia armazenada no campo elétrico • Pós processamento e interpretação física dos resultados • Determinação da capacitância • Campos não conservativos • Interface entre materiais dielétricos • A rigidez Dielétrica	8
5	Particularizações – A magnetostática • As condições e as equações da magnetostática • O potencial vetor magnético • O potencial escalar magnético • Condições de interface • A Magnetostática e o Método de Elementos Finitos • Aplicações em problemas bidimensionais com simetria planar • Aplicações do software FEMM em problemas da magnetostática • Os materiais magnéticos • Pós processamento e interpretação física dos resultados • Energia armazenada no campo magnético • A lei de Biot-Savart e o campo gerado por um solenoide	8

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO



Plano de Ensino

	• Circuitos magnéticos e indutância mútua • Interação entre grandezas eletromagnéticas e mecânicas	
6	Particularizações – A quase estática • As condições e as equações da quase estática • Corrente aplicada e corrente induzida • O potencial escalar elétrico e o potencial vetor magnético • Efeito pelicular em condutores • Condições de contorno e o significado físico • Solução de problemas quase estáticos • A Quase estática e o Método de Elementos Finitos • Aplicações do software FEMM em problemas de quase estática • Pós processamento e interpretação física dos resultados • Perdas no cobre e no ferro; • Cálculo da impedância equivalente	8
7	Aplicações – Transformador monofásico • O transformador monofásico e o método dos elementos finitos • Equações solucionadas e condições de contorno • Circuito Elétrico Equivalente do Transformador • Determinação das indutâncias a vazio • Efeito dos materiais magnéticos não lineares • Estimativa das Perdas no Ferro • Determinação das indutâncias de dispersão • Aplicações do software FEMM aos transformadores monofásicos • Simulações com correntes induzidas	8
8	Aplicações – Motor de indução trifásico • O motor de indução trifásico e o método dos elementos finitos • Equações solucionadas e condições de contorno • Circuito Elétrico Equivalente do motor • Simulação do ensaio a vazio • Simulação do ensaio com rotor bloqueado • Construção do circuito equivalente • Simulação do funcionamento do motor com carga • Imposição do movimento do rotor	8

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO



Plano de Ensino

	Total	60

Métodos de Avaliação

A avaliação do conhecimento será realizada por meio de atividades teórico-práticas, distribuídas em: i) Trabalhos computacionais – Peso 5; ii) Provas – Peso 4; e iii) Seminário – Peso 1.

Para aprovação, NF $\geq$ 6,0 e frequência nas aulas presenciais maior ou igual a 75%.

Bibliografia Básica

- 1 – BASTOS, J. P. A. e SADOWSKI, N. Electromagnetic modeling by finite element methods. New York : Marcel Dekker, 2003.
- 2 - BIANCHI, N., Electrical Machine Analysis Using Finite Elements, 1 ed., London, CRC Press, 2005.
- 3 - SALON, S. J., Finite Element Analysis of Electrical Machines, 1 ed., Boston, Kluwer Academic Publishers, 1995.

Bibliografia Complementar

- 1 - SILVESTER, P.P, FERRARI, R.L., Finite Elements for electrical engineers, 3 ed., Cambridge University Press, 1996
- 2 – POLYCARPOU, A. C., Introduction to the Finite Element Method in Electromagnetics. Morgan & Claypool, 2006
- 3 – BARGALLO, R. (2006), Notas de aula: Finite Element For Electrical Engineering, Departamento de Engenharia Elétrica, Universitat Politècnica de Catalunya (disponíveis na homepage : <http://www.aedie.org/eeej/webrevista/articulos/librosONLINE/EFRBP2006FULL.pdf>)
- 4 - Dissertações, Teses e Publicações Científicas.