

# 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:** Tópicos Especiais: Teoria Eletromagnética Aplicada a Sistemas Elétricos de Potência.

**CÓDIGO:**

**Validade:** 1º semestre de 2026.

**Carga Horária:** 60 horas-aula

**Créditos:** 04

**Área de Concentração:** Sistemas Elétricos

### Ementa:

Fundamentos de eletromagnetismo aplicados a sistemas elétricos. Equações de Maxwell e condições de contorno. Potenciais eletromagnéticos e vetores de Hertz. Campos eletromagnéticos quasiestáticos e harmônicos. Teoremas clássicos do eletromagnetismo. Introdução ao formalismo tensorial aplicado a circuitos e campos eletromagnéticos. Campos e potenciais gerados por condutores enterrados: solução analítica e numérica utilizando método dos momentos e método das imagens em meios estratificados. Acoplamento eletromagnético entre campos incidentes e linhas aéreas e subterrâneas. Equações do telegrafista e modelos de acoplamento (Agrawal). Modelagem de parâmetros de linhas aéreas e cabos subterrâneos. Propagação de ondas em linhas de transmissão e redes ramificadas. Princípios da Reversão Temporal Eletromagnética (EMTR) aplicada à localização de faltas em redes elétricas, nos domínios do tempo e da frequência. Métodos numéricos para solução de problemas de interação eletromagnética em sistemas elétricos.

### INTERDISCIPLINARIDADES

#### Inter-relações desejáveis

É desejável que os conteúdos abordados na disciplina *Teoria Eletromagnética Aplicada a Sistemas Elétricos de Potência* tenham relações diretas, principalmente, com as seguintes disciplinas e linhas de pesquisa:

- **Disciplinas** □ Métodos Numéricos, Análise de Transitórios em Redes Elétricas no Domínio do Tempo, Análise de Redes Elétricas, Teoria Eletromagnética, Aterramentos Elétricos, Eletromagnetismo Computacional.
- **Linhas de Pesquisa** □ Eletromagnetismo Aplicado e Planejamento e Operação de Sistemas Elétricos de Potência (área de concentração: Sistemas Elétricos).

#### Objetivos - Possibilitar ao estudante:

- Compreender e aplicar os fundamentos das equações de Maxwell e condições de contorno a problemas envolvendo sistemas elétricos.
- Utilizar potenciais eletromagnéticos, vetores de Hertz e formulações quasiestáticas na solução de campos produzidos por condutores aéreos e enterrados.
- Empregar álgebra tensorial e formulações tensoriais das equações de Maxwell em problemas de engenharia elétrica.
- Modelar e analisar o acoplamento eletromagnético entre campos externos e linhas

# 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

- aéreas e subterrâneas, considerando estruturas complexas e solos estratificados.
- Implementar soluções numéricas baseadas no método dos momentos e no método das imagens para problemas de acoplamento em meios homogêneos e estratificados.
  - Aplicar os princípios da Reversão Temporal Eletromagnética (EMTR) na localização de faltas, considerando perdas, back-propagation e critérios de focalização do sinal.
  - Desenvolver e validar modelos computacionais para análise eletromagnética avançada de sistemas elétricos.

### Métodos Didáticos Utilizados

Marque com um X no quadro:

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Aula expositiva em quadro             | <input checked="" type="checkbox"/> Seminário           |
| <input type="checkbox"/> Aula com uso de transparência         | <input checked="" type="checkbox"/> Pesquisa            |
| <input checked="" type="checkbox"/> Aula com uso de multimídia | <input checked="" type="checkbox"/> Trabalho individual |
| <input type="checkbox"/> Aula prática                          | <input type="checkbox"/> Trabalho em grupo              |
| <input type="checkbox"/> Discussão de texto                    | <input type="checkbox"/> Visita técnica                 |
| <input type="checkbox"/> Filme                                 | <input type="checkbox"/> Outros: _____                  |

Unidades de ensino		Carga-horária Horas-aula
1	<b>Parte I – Conceitos de Eletromagnetismo</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Equações de Maxwell: formas integral e pontual.</li><li>• Parâmetros e relações constitutivas da matéria.</li><li>• Condições de fronteira.</li><li>• Potenciais escalar e vetor.</li><li>• Vetores de Hertz.</li><li>• Funções de Green.</li><li>• Campos EM harmônicos.</li><li>• Campos quase-estáticos.</li><li>• Teoremas: da dualidade, da unicidade, da reciprocidade, das imagens.</li></ul>	14
2	<b>Parte II – Tensores</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Álgebra tensorial.</li><li>• Introdução à resolução de circuitos tensoriais.</li><li>• Equações de Maxwell na forma tensorial.</li></ul>	10
3	<b>Parte III – Campos EM quase-estáticos produzidos por</b>	12

# 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

	<b>condutores enterrados</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Campo elétrico e potencial escalar elétrico produzido por uma fonte de corrente transversal de baixa frequência em um meio infinito em todas as direções.</li><li>• Acoplamento condutivo entre condutores imersos em um meio infinito em todas as direções.</li><li>• Solução matemática utilizando o método de momentos.</li><li>• Método das imagens aplicado a meios estratificados em N camadas.</li></ul>	
4	<b>Parte IV – Acoplamento entre campos eletromagnéticos e condutores aéreos e enterrados</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Equações do telegrafista.</li><li>• Modelo de Agrawal.</li><li>• Cálculo de parâmetros de linhas aéreas e cabos subterrâneos.</li><li>• Acoplamento entre campos EM e linhas aéreas.</li><li>• Acoplamento entre campos EM e cabos subterrâneos.</li></ul>	12
5	<b>Parte V – Aplicação da Reversão Temporal Eletromagnética (EMTR) à Localização de Faltas em Sistemas de Energia</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Conceitos básicos e invariância temporal das Equações de Maxwell e das Equações dos Telegrafistas.</li><li>• Método de localização de faltas baseado em EMTR: implementações nos domínios da frequência e do tempo.</li><li>• Questão das perdas: modelos para propagação reversa (back-propagation models)</li><li>• Critérios para determinar a focalização do sinal na etapa de propagação reversa.</li><li>• Redes complexas e ramificadas.</li></ul>	12
<b>Total</b>		<b>60</b>

# 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

### Metodologia

O curso será ministrado no formato remoto e composto por atividades assíncronas e síncronas.

As atividades assíncronas incluirão listas de exercícios, trabalhos práticos computacionais, orientações de leitura e vídeos disponibilizados no SIGAA. As listas e os trabalhos deverão ser entregues, sem exceção, em formato PDF e submetidos pelo SIGAA. Os arquivos devem ser apresentáveis, com equações digitadas utilizando editores apropriados.

Os trabalhos práticos computacionais serão desenvolvidos em plataformas de programação, tais como MATLAB, GNU Octave ou equivalente, além do uso do Alternative Transients Program (ATP) e/ou Electromagnetic Transients Program (EMTP). Dada a complexidade e relevância desses trabalhos, recomenda-se iniciar seu desenvolvimento com antecedência.

Os vídeos assíncronos serão disponibilizados preferencialmente pela plataforma YouTube, com os respectivos links publicados no SIGAA.

As atividades síncronas ocorrerão sempre nos horários regulares de aula, utilizando a plataforma Microsoft Teams (MS Teams).

As avaliações serão realizadas de forma assíncrona e contemplarão o conteúdo apresentado nas aulas síncronas e assíncronas, bem como nas listas de exercícios e nos trabalhos. As avaliações serão individuais e deverão ser feitas à mão, digitalizadas e submetidas no SIGAA. A qualidade e legibilidade da digitalização são de responsabilidade do estudante.

### Informações adicionais

A disciplina será ofertada na modalidade de ensino híbrido, em conformidade com a Instrução Normativa PPGEL nº 003/2023, de 28 de abril de 2023, que regulamenta o uso do ensino híbrido no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

#### Divisão da carga horária

A carga horária total da disciplina é de 60 horas-aula, distribuídas da seguinte forma:

#### *Atividades presenciais*

- Carga horária: 4 horas-aula.
- Descrição: encontros presenciais destinados à discussão de dúvidas sobre conteúdo do curso, listas de exercícios e trabalhos, conforme planejamento do docente.

#### *Atividades remotas*

- Carga horária: 56 horas-aula, distribuídas em atividades síncronas e assíncronas, conforme descrito a seguir.

#### Atividades síncronas (40 horas-aula):

Encontros síncronos ministrados pelo docente, consistindo na exposição de conteúdo da disciplina em tempo real, com apoio de recursos audiovisuais (apresentações em PowerPoint, uso de mesa digitalizadora e outros recursos). Parte dos encontros será destinada à discussão de dúvidas relacionadas ao conteúdo, listas de exercícios (LEs) e trabalhos práticos computacionais (TPCs).

# 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

### Atividades assíncronas (16 horas-aula):

Atividades destinadas ao estudo individual dos discentes, incluindo leitura de material didático, estudo dirigido e preparação prévia para os encontros síncronos. O material de apoio e as sugestões de leitura serão disponibilizados pelo docente.

Plataforma utilizada: As atividades síncronas remotas serão desenvolvidas por meio da plataforma Microsoft Teams.

Controle de frequência: A presença será apurada com base na participação dos discentes nos encontros síncronos, sendo exigida frequência mínima de 75%, conforme as normas do PPGE.

Recursos tecnológicos: Durante os encontros síncronos, o uso de áudio (microfone) por parte dos discentes é obrigatório. O uso de câmera é facultativo, porém recomendado.

Critérios de aprovação: O discente será aprovado se atender simultaneamente aos seguintes critérios:

- Frequência mínima de 75%;
- Aproveitamento mínimo de 60% da nota final, obtida por soma simples das atividades avaliativas previstas.

### **Bibliografia Básica**

- 1- J. A. Stratton, Electromagnetic Theory. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1941.
- 2- J. D. Jackson, Classical electrodynamics, 3rd ed., New York: JohnWiley & Sons, Inc., 1998.
- 3- C. R. Paul, K. W. Whites, and S. A. Nasar, Introduction to electromagnetic fields, 3<sup>rd</sup> ed. McGraw-Hill, 1998.
- 4- C. A. Balanis, Advanced Engineering Electromagnetics. New York, NY, USA: Wiley, 1989.
- 5- L. V. Bewley, Tensor Analysis of Electric Circuits and Machines. New York, NY, USA: Ronald Press, 1961.
- 6- E. A. Guillemin, The mathematics of circuit analysis, MIT Press, 1949
- 7- A. P. S. Meliopoulos, Power system grounding and transients: an introduction, Marcel Dekker, Inc., 1988.
- 8- C. Portela, Cálculo de parâmetros e comportamento de malhas de terra, Relatório Técnico, 1983.
- 9- C. R. Paul, Analysis of multiconductor transmission lines, 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- 10- F. M. Tesche, M. V. Ianoz, and T. Karlsson, EMC Analysis Methods and Computational Models. New York: Wiley, 1997.
- 11- F. Rachidi, M. Rubinstein, and M. Paolone, Eds., Electromagnetic Time Reversal: Application to Electromagnetic Compatibility and Power Systems, 1ed ed. John Wiley & Sons, Ltd, 2017

# 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

---

<b>Bibliografia Complementar</b>
1- Artigos Técnicos na área a serem indicados durante o curso. 2- Teses de Doutorado e Dissertações de Mestrado na área a serem indicadas durante o curso.



Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica