**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

# FICHA DE COMPONENTE CURRICULAR

## COURSE OUTLINE

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **CÓDIGO / COURSE CODE :** | | **COMPONENTE CURRICULAR / COURSE TITTLE :** Abordagem Digital Aplicada em Proteção de Sistemas Elétricos de Potência / Digital Approach Applied in Power System Protection | | |
| **UNIDADE ACADÊMICA OFERTANTE / ORGANIZATION :** Faculdade de Engenharia Elétrica - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Faculty of Electrical Engineering - Postgraduate Program in Electrical Engineering | | | | **SIGLA / ACRONYM:** FEELT - PPGEELT |
| **CH TOTAL TEÓRICA / LECTURE HOURS :** 45 horas / hours | **CH TOTAL PRÁTICA / LABORATORY HOURS :** 0 horas / hours | **CH TOTAL / TOTAL HOURS :** 45 horas / hours | **CRÉDITOS / CREDITS :** 3 | **TIPO / TYPE:** Optativa / Elective |
| **Curso / Degree :** Mestrado e Doutorado / Master and PhD | | **Requisito / Requirement :** Conhecimento prévio de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência em nível de Graduação / Prior Knowlegde in Power System Protection (Graduation degree) | | |

## 1. OBJETIVOS / STUDY GOALS

Entender as tecnologias mais modernas de proteção digital empregadas em Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Explorar conceitos e ideias relacionados. Ser capaz de calcular e projetar esquemas para salvaguardar a rede elétrica contra faltas elétricas com distintas intensidades. Saber encontrar e distinguir os diversos programas computacionais existentes para simulação. Conhecer os relés digitais de proteção mais usuais.

Understanding the most modern digital protection technologies employed in power systems. Exploring concepts and ideas related to power system protection. Being able to calculate and design schemes to safeguard the electrical network against electrical faults with varying intensities. Knowing how to find and distinguish the various existing computer programs for simulation. Knowing the most common digital protection relays.

## 2. EMENTA / COURSE CONTENTS

Introdução à proteção digital. Programas computacionais para análise de fluxo de potência, curto-circuito e proteção. Estimação de parâmetros. Unidades de medição fasorial. Técnicas para detecção e classificação de faltas elétricas. Detecção de arco elétrico. Estudo de localizador digital de faltas elétricas. Discussão sobre seletividade lógica e esquemas de proteção. Simulação computacional de *breakpoint set* e proteção adaptativa. Compreensão de arquivos de evento. Comunicação. Demonstração de principais relés digitais comerciais.

Introduction to digital protection. Computational programs for power flow, short-circuit analysis, and protection. Parameter estimation. Phasor measurement units. Techniques for detecting and classifying electrical faults. Electric arc detection. Study of digital fault locators. Discussion on logical selectivity and protection schemes. Computational simulation of breakpoint set and adaptive protection. Understanding event files. Communication. Demonstration of major commercial digital relays.

## 3. PROGRAMA / PROGRAM

**1. Introdução à proteção digital de SEP.**

1.1. Características funcionais.

1.2. Arquitetura do relé digital.

1.3. Conversão analógico-digital.

1.4. Filtros *anti-aliasing.*

**2. Programas computacionais para análise de fluxo de potência, curto-circuito e proteção.**

**3. Estimação de parâmetros.**

3.1. Medidas dos parâmetros tensão e corrente.

3.2. Método de ajuste por mínimos quadrados.

3.3. Transformada de *Fourier*.

3.4 Filtro de Kalman.

3.5 Simulação computacional.

**4. Unidades de medição fasorial.**

4.1. *Global Positioning System* (*GPS*).

4.2. Esquema de funcionamento.

4.3. Aplicação em redes elétricas.

**5. Técnicas para detecção e classificação de faltas elétricas.**

5.1. Aspectos gerais.

5.2. Algoritmo e simulação computacional.

**6. Detecção de Arco Elétrico.**

6.1. Tecnologia.

6.2. Exemplo de aplicação.

**7. Localizador digital de faltas elétricas.**

7.1. Introdução.

7.2. Abordagens teóricas principais.

7.2.1. Método de *Newton-Raphson*.

7.2.2. Fasores fundamentais.

7.2.3. Ondas viajantes.

7.3. Algoritmo e simulação computacional.

**8. Seletividade lógica.**

8.1. Métodos tradicionais e limitações.

8.2. Princípios de funcionamento.

**9. Esquemas de Proteção.**

9.1. Conceitos fundamentais de teleproteção.

9.2. Transferência de disparo por subalcance permissivo (*PUTT*).

9.3. Transferência de disparo transferido direto (*DTT*).

9.4. Transferência de disparo por sobrealcance permissivo (*POTT*).

9.5. Transferência de desbloqueio por comparação direcional (*DCUB*).

9.6. Bloqueio por comparação direcional (*DCB*).

**10. *Breakpoint Set.***

10.1. Dependência funcional.

10.2. Conhecimento heurístico e interativo.

10.3. Por teoria de Grafos.

10.4. Desafios técnicos envolvendo circuitos elétricos com impedância mútua.

10.5. Algoritmo para definição de pares de relés digitais (elemento primário e seus respectivos secundários).

10.6. Simulação computacional usando *software* livre (linguagem *Python*).

**11. Proteção adaptativa.**

11.1. Motivação.

11.2. Aplicação de técnicas de Otimização para coordenação de relés digitais.

11.2.1. Simplex.

11.2.2. Algoritmos Genéticos (AG).

11.2.3. Enxame de Partículas Evolucionário (*EPSO*).

11.3. Algoritmo e Simulação Computacional.

**12. Arquivos de eventos.**

12.1. *ASCII* simples.

12.2. *ASCII* comprimido.

12.3. C*OMTRADE*.

**13. Comunicação.**

13.1. Meios físicos.

13.1.1. Fio piloto.

13.1.2. Ondas portadoras.

13.1.3. Micro-ondas.

13.1.4. Fibras ópticas.

13.2. Protocolos usuais.

13.2.1. *IEC 61850*.

13.2.2. *Modbus® RTU/TCP*.

13.2.3. *DNP3* serial e *LAN/WAN*.

13.2.4. *FTP* (*File Transfer Protocol*).

13.2.5. *SNTP* (*Simple Network Time Protocol*).

13.3. Sistema *SCADA.*

**14. Principais relés digitais existentes no mercado.**

14.1. Fabricantes.

14.2. Características físicas e funcionais.

14.3. *Software* para manipulação.

**1. Introduction to digital power system protection.**

1.1. Functional characteristics.

1.2. Digital relay architecture.

1.3. Analog-to-digital conversion.

1.4. Anti-aliasing filters.

**2. Software for power flow, short-circuit analysis, and protection.**

**3. Parameter estimation.**

3.1. Measurement of voltage and current parameters.

3.2. Least Squares Adjustment Method.

3.3. Fourier Transformer.

3.4 Kalman filter.

3.5 Computational simulation.

**4. Phasor measurement units.**

4.1. Global Positioning System (GPS).

4.2. Operating schemes.

4.3. Applications in electrical networks.

**5. Techniques for fault detection and classification.**

5.1. General aspects.

5.2. Computational algorithm and simulation.

**6. Arc-flash detection.**

6.1. Technology.

6.2. Examples.

**7. Digital fault locator.**

7.1. Introduction.

7.2. Main theoretical approaches.

7.2.1. Newton-Raphson Method.

7.2.2. Fundamental phasors.

7.2.3. Traveling waves.

7.3. Computational algorithm and simulation.

**8. Logical selectivity.**

8.1. Traditional methods and limitations.

8.2. Operating principles.

**9. Esquemas de Proteção.**

9.1. Fundamental concepts of teleprotection.

9.2. Permissive Under-Reach Transfer Trip (*PUTT*).

9.3. Direct Transfer Trip (*DTT*).

9.4. Permissive Over-Reach Transfer Trip (*POTT*).

9.5. Directional Comparison Unblocking (*DCUB*).

9.6. Directional Comparison Blocking (*DCB*).

**10. *Breakpoint Set.***

10.1. Functional dependency.

10.2. Heuristic and interactive knowledge.

10.3. Graph theory approach.

10.4. Technical challenges involving mutual impedance in electrical circuits.

10.5. Algorithm for defining digital relay pairs (primary element and its respective secondaries).

10.6. Computational simulation using free software (Python language).

**11. Adaptative protection.**

11.1. Motivation.

11.2. Application of optimization techniques for digital relay coordination.

- 11.2.1. Simplex.
- 11.2.2. Genetic Algorithm (AG).
- 11.2.3. Evolutionay Particle Swarm Optimization (EPSO).

11.3. Computational algorithm and simulation.

**12. Event data files.**

12.1. ASCII.

12.2. Compressed ASCII.

12.3. COMTRADE.

**13. Communication.**

13.1. Physical means.

- 13.1.1. Pilot wire.
- 13.1.2. Carrier waves.
- 13.1.3. Microwaves.
- 13.1.4. Optical fibers.

13.2. Commom protocols.

- 13.2.1. IEC 61850.
- 13.2.2. Modbus® RTU/TCP.
- 13.2.3. DNP3 serial and LAN/WAN.
- 13.2.4. FTP (File Transfer Protocol).
- 13.2.5. SNTP (Simple Network Time Protocol).

13.3. SCADA System.

**14. Major commercial digital relays.**

14.1. Manufacturers.

14.2. Physical and functional characteristics.

14.3. *Software*.

## 4. BIBLIOGRAFIA BÁSICA / TEXT BOOK

1. ANDERSON, P. M.; HENVILLE, C.; RIFAAT, R.; JONHSON, B.; MELIOPOULOS, S. **Power System Protection**. 2ª Edição. [*S.l.*]: Wiley, 2022. 1800 p. (IEEE Press Series on Power and Energy Systems) ISBN-10 1119513146.

2. MAMEDE Filho, João; MAMEDE, D. **Proteção de sistemas elétricos de Potência**. 2ª Ed. [*S.l.*]: LTC Livros Técnicos e Científicos Ltda, 2020.

3. DAS, J. C. **Power System Protective Relaying**. 1ª Ed. [*S.l.*]: CRC Press, 2018. 726 p.

4. BHIDE, S. R. **Digital Power System Protection**. 1ª Ed. [*S.l.*]: PHI Publisher, 2014.

5. BLACKBURN, J. Lewis; DOMIN, Thomas J. **Protective Relaying**: Principles and Applications. 4ª Ed. [*S.l.*]: CRC Press, 2014. 695 p.

6. BERNARDES, Wellington Maycon Santos. **Análise da proteção de sistemas de energia elétrica utilizando técnicas modernas de otimização heurística**. Orientador: Eduardo Nobuhiro Asada. 2018. 226 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

1. ANDERSON, P. M.; HENVILLE, C.; RIFAAT, R.; JONHSON, B.; MELIOPOULOS, S. **Power System Protection**. 2ª Edição. [*S.l.*]: Wiley, 2022. 1800 p. (IEEE Press Series on Power and Energy Systems) ISBN-10 1119513146.

2. MAMEDE Filho, João; MAMEDE, D. **Proteção de sistemas elétricos de Potência**. 2ª Ed. [*S.l.*]: LTC Livros Técnicos e Científicos Ltda, 2020.

3. DAS, J. C. **Power System Protective Relaying**. 1ª Ed. [*S.l.*]: CRC Press, 2018. 726 p.

4. BHIDE, S. R. **Digital Power System Protection**. 1ª Ed. [*S.l.*]: PHI Publisher, 2014.

5. BLACKBURN, J. Lewis; DOMIN, Thomas J. **Protective Relaying**: Principles and Applications. 4ª Ed. [*S.l.*]: CRC Press, 2014. 695 p.

6. BERNARDES, Wellington Maycon Santos. **Análise da proteção de sistemas de energia elétrica utilizando técnicas modernas de otimização heurística**. Orientador: Eduardo Nobuhiro Asada. 2018. 226 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

## 5. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR / ADDITIONAL READING

1. COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção digital de Sistemas Elétricos de Potência**: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes. 1ª Ed. São Carlos – SP: EDUSP, 2007.

2. HEWITSON, L. G.; BROWN, M.; BALAKRISHNAN, R. **Practical Power System Protection**. 1ª Ed. [*S.l.*]: Newnes, 2004. 228 p.

3. ELRAFIE, H.; IRVING, M. Linear programming for directional overcurrent relay coordination in interconnected power systems with constraint relaxation. **Electric Power Systems Research**, v. 27, n. 3, p. 209 - 216, 1993. ISSN 0378-7796.

4. DOLATABADI, M.; DAMCHI, Y. Graph theory based heuristic approach for minimum breakpoint set determination in large scale power system. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 34, n. 3, p. 963 - 970, 2019.

5. IEEE. **IEEE 2800-2022**: Standard for Interconnection and Interoperability of Inverter-Based Resources (IBRs) Interconnecting with Associated Transmission Electric Power Systems. Piscataway NJ, 2022. DOI: 10.1109/IEEESTD.2022.9762253.

6. CEPEL. Departamento de Sistemas Eletroenergéticos. Disponível em: https://see.cepel.br/Programa. Acesso em: 16 Jan. 2024.

7. SIEMENS. Disponível em: https://www.siemens.com/br/pt.html. Acesso em: 16 Jan. 2024.

8. ETAP. Electrical Engineering Software for Students. Disponível em: https://etap.com/student-edition. Acesso em: 16 Jan. 2024.

9. SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. Disponível em: https://selinc.com/pt/. Acesso em 11 Jan. 2024.

1. COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção digital de Sistemas Elétricos de Potência**: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes. 1ª Ed. São Carlos – SP: EDUSP, 2007.

2. HEWITSON, L. G.; BROWN, M.; BALAKRISHNAN, R. **Practical Power System Protection**. 1ª Ed. [*S.l.*]: Newnes, 2004. 228 p.

3. ELRAFIE, H.; IRVING, M. Linear programming for directional overcurrent relay coordination in interconnected power systems with constraint relaxation. **Electric Power Systems Research**, v. 27, n. 3, p. 209 - 216, 1993. ISSN 0378-7796.

4. DOLATABADI, M.; DAMCHI, Y. Graph theory based heuristic approach for minimum breakpoint set determination in large scale power system. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 34, n. 3, p. 963 - 970, 2019.

5. IEEE. **IEEE 2800-2022**: Standard for Interconnection and Interoperability of Inverter-Based Resources (IBRs) Interconnecting with Associated Transmission Electric Power Systems. Piscataway NJ, 2022. DOI: 10.1109/IEEESTD.2022.9762253.

6. CEPEL. Departamento de Sistemas Eletroenergéticos. Disponível em: https://see.cepel.br/Programa. Acesso em: 16 Jan. 2024.

7. SIEMENS. Disponível em: https://www.siemens.com/br/pt.html. Acesso em: 16 Jan. 2024.

8. ETAP. Electrical Engineering Software for Students. Disponível em: https://etap.com/student-edition. Acesso em: 16 Jan. 2024.

9. SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. Disponível em: https://selinc.com/pt/. Acesso em 11 Jan. 2024.

## 6. APROVAÇÃO / APPROVAL

Ficha de Disciplina homologada na 366ª Reunião Ordinária do Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Curricular Component approved at 366th Regular Board Meeting of the Postgraduate Program in Electrical Engineering.

PROF. DR. LUIZ CARLOS GOMES DE FREITAS
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Head of the Postgraduate Program in Electrical Engineering
Portaria de Pessoal UFU Nº 3675, de 30 de Junho de 2023

PROF. DR. SÉRGIO FERREIRA DE PAULA SILVA
Diretor da Faculdade de Engenharia Elétrica
Director of the Faculty of Electrical Engineering
Portaria de Pessoal UFU Nº 1225, de 31 de Março de 2021

Documento assinado eletronicamente por **Luiz Carlos Gomes de Freitas**, **Coordenador(a)**, em 02/02/2024, às 13:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5153292** e o código CRC **1E746095**.

**Referência:** Processo nº 23117.007375/2024-74 SEI nº 5153292