



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA



## FICHA DE COMPONENTE CURRICULAR

## COURSE OUTLINE

<b>CÓDIGO / COURSE CODE :</b>		<b>COMPONENTE CURRICULAR / COURSE TITLE :</b> Sistemas Fotovoltaicos / Photovoltaic Systems		
<b>UNIDADE ACADÊMICA OFERTANTE / ORGANIZATION :</b> Faculdade de Engenharia Elétrica - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Faculty of Electrical Engineering - Postgraduate Program in Electrical Engineering				<b>SIGLA / ACRONYM :</b> FEELT - PPGEELT
<b>CH TOTAL TEÓRICA / LECTURE HOURS :</b> 45 horas / hours	<b>CH TOTAL PRÁTICA / LABORATORY HOURS :</b> 0 horas / hours	<b>CH TOTAL / TOTAL HOURS :</b> 45 horas / hours	<b>CRÉDITOS / CREDITS :</b> 3	<b>TIPO / TYPE:</b> Optativa / Elective
<b>Curso / Degree :</b> Mestrado e Doutorado / Master and PhD		<b>Requisito / Requirement :</b> Sem requisitos / No Requirements		

## 1. OBJETIVOS / STUDY GOALS

O estudo de Sistemas Fotovoltaicos na Pós-Graduação em Engenharia Elétrica visa atingir diversos objetivos, incluindo: compreensão dos princípios fotovoltaicos, projeto e análise de sistemas fotovoltaicos, otimização de eficiência, integração com a rede elétrica, análise de viabilidade econômica, estudo do impacto ambiental, desenvolvimento de tecnologias avançadas, operação e manutenção, considerações de planejamento e zoneamento, aspectos legais e regulatórios. Estudar Sistemas Fotovoltaicos em Engenharia Elétrica prepara os profissionais para contribuir efetivamente no setor de energia renovável, desempenhando papéis importantes desde o projeto e implementação até a operação e manutenção de sistemas de geração fotovoltaica.

The study of Photovoltaic Systems in the Postgraduate Program in Electrical Engineering aims to achieve various objectives, including: understanding photovoltaic principles, design and analysis of photovoltaic systems, efficiency optimization, integration with the electrical grid, economic feasibility analysis, study of environmental impact, development of advanced technologies, operation and maintenance, planning and zoning considerations, legal and regulatory aspects. Studying Photovoltaic Systems in Electrical Engineering prepares professionals to effectively contribute to the renewable energy sector, playing important roles from project and implementation to the operation and maintenance of photovoltaic generation systems.

## 2. EMENTA / COURSE CONTENTS

Energia Fotovoltaica. Inversores. Armazenamento. Sistemas Fotovoltaicos nos Trópicos. Consumo de Energia para a Instalação de uma Usina Fotovoltaica. Rendimento Energético. Entrada de Energia por Despejo e Reciclagem. Balanço Energético Total. Otimização.

Photovoltaics. Inverters. Storage. PV Systems in the Tropics. Energy Consumption for the Set-up of a PV Power Plant. Energy Yield. Energy Input by Dumping and Recycling. Total Energy Balance. Optimization.

## 3. PROGRAMA / PROGRAM

**1. Energia Fotovoltaica.**

- 1.1 Breve Histórico.
- 1.2 Efeito Fotovoltaico.
- 1.3 Gerador Fotovoltaico.
  - 1.3.1 Propriedades Elétricas.
  - 1.3.2 Propriedades Mecânicas.
- 1.4 Propriedades dos Geradores Fotovoltaicos em Condições de Operação.
- 1.5 Montagem de Módulos Fotovoltaicos.
- 1.6 Desenvolvimento Futuro da Fotovoltaica.
- 1.7 Financiamento de Pesquisa para Fotovoltaica.

1.8 Desenvolvimento de Mercado para Fotovoltaica.

## **2. Inversores.**

2.1 Operação Autônoma.

2.2 Inversores para Injeção na Rede Elétrica.

2.3 Tipos de Inversores.

2.3.1 Inversores com Comutação Externa.

2.3.2 Inversores com Comutação Interna.

2.3.3 Inversores Baseados em *PWM*.

2.4 Conexão à Rede Elétrica.

2.4.1 Níveis de Tensão das Redes Elétricas.

2.4.2 Valores Limite das Redes Elétricas.

2.4.3 Transporte de Eletricidade a Longas Distâncias.

## **3. Armazenamento.**

3.1 Bateria de Ácido Chumbo.

3.1.1 Princípio.

3.1.2 Gaseificação.

3.1.3 Gravidade Específica (GE).

3.1.4 Temperatura de Operação.

3.1.5 Auto-descarga.

3.1.6 Descarga Profunda.

3.1.7 Sulfatação.

3.2 Outros Tipos de Baterias.

3.2.1 Bateria de Níquel-Cádmio.

3.2.2 Baterias de Níquel-Hidreto.

3.2.3 Baterias de Íon de Lítio.

3.3 Células a Combustível.

3.3.1 Princípio.

3.3.2 Tipos de Células a Combustível.

## **4. Sistemas Fotovoltaicos nos Trópicos.**

4.1 Questões Pré-instalação.

4.1.1 Considerações Adicionais para Planejamento.

4.1.2 Financiamento.

4.1.3 Importação.

4.1.4 Barreiras de Idioma.

4.2 Questões Técnicas.

4.2.1 Montagem.

4.2.2 Operação Não-MPP do Gerador Fotovoltaico.

4.2.3 Armazenamento de Energia.

4.2.4 Equipamentos de Condicionamento de Energia.

4.3 Operação e Manutenção.

4.3.1 Poluição e Degradação de Componentes do Sistema.

4.3.2 Monitoramento.

4.3.3 Recomendações Adicionais.

4.4 Considerações Finais para Energia Fotovoltaica nos Trópicos.

## **5. Consumo de Energia para a Instalação de uma Usina Fotovoltaica.**

5.1 Observações Preliminares.

5.1.1 Diferenciação dos Casos Modelados.

5.1.2 Consumo Equivalente de Energia Primária.

## 5.2 Preparação de Matérias-Primas para Produção.

5.2.1 Desenvolvimento de um Depósito.

5.2.2 Extração (Exploração).

5.2.3 Transporte.

5.2.4 Preparação para Produção.

5.2.5 Trabalho de Construção e Edifícios.

## 5.3 Consumo Direto de Energia no Processo de Produção.

## 5.4 Produção de Células Solares.

5.4.1 Produção de Silício Técnico (MG-Si).

5.4.2 Silício de Grau Metalúrgico (MG-Si) para Silício Policristalino de Grau Eletrônico (EG-Si).

5.4.3 Produção de Silício Monocristalino.

5.4.4 Silício de Grau Eletrônico para Silício Policristalino.

5.4.5 Produção de Bolacha de Silício (monocristalino e policristalino).

5.4.6 Bolachas de Silício Monocristalino para Células Solares Monocristalinas.

5.4.7 Bolachas de Silício Policristalino para Células Solares Policristalinas.

5.4.8 Produção de Células Solares de Silício Amorfo.

5.4.9 Produção de Células Solares de Outros Semicondutores.

## 5.5 Produção de Módulos Fotovoltaicos.

5.5.1 Processo de Laminação.

5.5.2 Produção de Módulos Fotovoltaicos "Encapsulados".

5.5.3 Produção de Módulos Fotovoltaicos "Laminados".

5.5.4 Condicionamento Elétrico de Energia.

5.5.5 Estrutura de Suporte.

## 5.6 Instalação e Colocação em Operação.

5.6.1 Transporte.

5.6.2 Instalação.

5.6.3 Colocação em Operação.

## 5.7 Despesas Operacionais.

5.7.1 Limpeza.

5.7.2 Manutenção.

5.7.3 Uso do Solo.

## 5.8 Desmontagem.

5.8.1 Desmontagem.

5.8.2 Transporte.

## **6. Rendimento Energético.**

### 6.1 Modelo para Determinar a Irradiação Alcançando a Célula.

6.1.1 Posição do Sol em Relação à Superfície da Terra.

6.1.2 Caminho da Irradiação Solar Através da Atmosfera da Terra.

6.1.3 Modelo Óptico de Encapsulamento do Módulo.

### 6.2 Modelagem Térmica.

6.2.1 Entrada de Fluxo de Calor.

6.2.2 Transferência de Calor Dentro de um Módulo.

6.2.3 Dissipação de Calor.

6.2.4 Cálculo do Modelo.

6.2.5 Validação da Modelagem Térmica.

### 6.3 Modelagem Elétrica.

6.3.1 Corrente.

6.3.2 Outros Parâmetros Elétricos.

#### 6.4 Injeção na Rede Fotovoltaica.

6.4.1 Modelagem de Inversores.

6.4.2 Fatores Limitantes para o Projeto de Usinas Fotovoltaicas.

#### 6.5 Layouts do Sistema.

#### 6.6 Rendimento Elétrico.

### **7. Entrada de Energia por Despejo e Reciclagem.**

7.1 Separação de Materiais.

7.2 Entrada de Energia e Reciclagem.

### **8. Balanço Energético Total.**

8.1 Despesa Energética Comutada.

8.2 Modelos para Balanços Energéticos.

8.3 Análise de Entrada-Saída.

8.4 Análise da Cadeia de Processo.

8.5 Efeitos Redutores de CO<sub>2</sub> pelo Uso de Fotovoltaica.

8.5.1 Balanço Específico de Emissões.

8.5.2 Efeito da Fotovoltaica na Redução das Emissões de CO<sub>2</sub> na Alemanha.

8.5.3 Variação de Localização.

### **9. Otimização.**

9.1 Melhoria da Irradiação em uma Célula Solar.

9.1.1 Melhoria da Irradiação da Célula Rastreado o Sol.

9.1.2 Melhoria da Irradiação da Célula pela Redução da Reflexão Óptica.

9.2 Redução de Despesas de Montagem.

9.3 Substituição de Componentes de Construção.

9.3.1 Telhas Solares.

9.3.2 Fachadas Solares.

9.4 Aprimoramento Térmico de Módulos Fotovoltaicos.

9.4.1 Temperaturas Reais de Operação das Células em Condições Tropicais.

9.4.2 Trabalho Preliminar para a Redução de Temperaturas em Condições Tropicais.

9.4.3 Desenvolvimento de um Protótipo Termicamente Aprimorado.

9.4.4 Construção, Operação e Medição do *TEPVIS* na África.

9.4.5 Sistema Solar Residencial Integrado (*I-SHS*).

### **1. Photovoltaics.**

1.1 Brief History.

1.2 Photovoltaic Effect.

1.3 Photovoltaic Generator.

1.3.1 Electrical Properties.

1.3.2 Mechanical Properties.

1.4 Properties of PV Generators in Operating Conditions.

1.5 Mounting of PV Modules.

1.6 Future Development of Photovoltaics.

1.7 Research Funding for Photovoltaics.

1.8 Market Development for Photovoltaics.

### **2. Inverters.**

2.1 Autonomous Operation.

2.2 Inverters for Electrical Grid Injection.

2.3 Type of Inverters.

2.3.1 External Commutated Inverters.

2.3.2 Self-Commutated Inverters.

2.3.3 Inverters Based on PWM.

2.4 Electrical Grid Connection.

2.4.1 Voltage Levels of Electrical Grids.

2.4.2 Boundary Values of Electrical Grids.

2.4.3 Long-Distance Transport of Electricity.

### **3. Storage.**

3.1 Lead Sulphide Acid Battery.

3.1.1 Principle.

3.1.2 Gassing.

3.1.3 Specific Gravity (SG).

3.1.4 Operating Temperature.

3.1.5 Self-Discharge.

3.1.6 Deep Discharge.

3.1.7 Sulfation.

3.2 Other Types of Battery.

3.2.1 Nickel Cadmium Battery.

3.2.2 Nickel Hydride Batteries.

3.2.3 Lithium-Ion Batteries.

3.3 Fuel Cells.

3.3.1 Principle.

3.3.2 Types of Fuel Cells.

### **4. PV Systems in the Tropics.**

4.1 Pre-installation issues.

4.1.1 Additional Considerations for Planning.

4.1.2 Financing.

4.1.3 Importation.

4.1.4 Language Barriers.

4.2 Technical Issues.

4.2.1 Mounting.

4.2.2 Non-MPP Operation of PV Generator.

4.2.3 Energy Storage.

4.2.4 Power Conditioning Equipment.

4.3 Operation and Maintenance.

4.3.1 Pollution & Degradation of System Components.

4.3.2 Monitoring.

4.3.3 Further Recommendations.

4.4 Concluding Remarks for PV in the Tropics.

### **5. Energy Consumption for the Set-up of a PV Power Plant.**

5.1 Preliminary Remarks.

5.1.1 Differentiation of the Model Cases.

5.1.2 Equivalent Primary Energy Consumption.

5.2 Preparation of Raw Materials for Production.

5.2.1 Development of a Deposit.

5.2.2 Release (Exploitation).

5.2.3 Transport.

5.2.4 Preparation for Production.

5.2.5 Construction Work and Buildings.

5.3 Direct Energy Consumption at the Production Process.

5.4 Production of Solar Cells.

5.4.1 Production of Technical Silicon (MG-Si).

5.4.2 Metallurgical-Grade Silicon (MG-Si) for Semiconductor-Grade Poly-Silicon (EG-Si).

5.4.3 Production of a Single-Crystalline.

5.4.4 Semiconductor Grade Silicon for Multi-Crystalline Silicon.

5.4.5 Production of Silicon Wafers (single and multi-crystalline).

5.4.6 Single-Crystal Wafers for Single-Crystalline Solar Cells.

5.4.7 Multi-Crystalline Wafers for Multi-Crystalline Solar Cells.

5.4.8 Production of Amorphous Silicon Solar Cells.

5.4.9 Production of Solar Cells Made of Other Semiconductors.

5.5 Production of PV Modules.

5.5.1 Lamination Process.

5.5.2 Production of "Encapsulated" PV Modules.

5.5.3 Production of "Laminated" PV Modules.

5.5.4 Electrical Power Conditioning.

5.5.5 Support Structure.

5.6 Installation and Taking into Operation.

5.6.1 Transport.

5.6.2 Installation.

5.6.3 Setting into Operation.

5.7 Operation Expenses.

5.7.1 Cleaning.

5.7.2 Maintenance.

5.7.3 Use of Land.

5.8 Dismantling.

5.8.1 Dismantling.

5.8.2 Transport.

## **6. Energy Yield.**

6.1 Model to Determine the Cell Reaching Irradiance.

6.1.1 Sun's Position Relative to Earth's Surface.

6.1.2 Way of Sun's Irradiance Through the Earth's Atmosphere.

6.1.3 Optical Model of Module Encapsulation

6.2 Heat Modeling.

6.2.1 Heat Flow Input.

6.2.2 Heat Transfer Inside a Module.

6.2.3 Heat Dissipation.

6.2.4 Model Calculation.

6.2.5 Validation of Thermal Modeling.

6.3 Electrical Modeling.

6.3.1 Current.

6.3.2 Other Electrical Parameters.

6.4 PV Grid Injection.

6.4.1 Modeling of Inverters.

6.4.2 Limiting Factors for the Design of PV Power Plants.

6.5 System Layouts.

6.6 Electrical Yield.

**7. Energy Input by Dumping and Recycling.**

7.1 Separation of Materials.

7.2 Energy Input and Recycling.

**8. Total Energy Balance.**

8.1 Commutated Energy Expense.

8.2 Models for Energy Balances.

8.3 Input-Output Analysis.

8.4 Process Chain Analysis.

8.5 CO<sub>2</sub> Reducing Effects by the Use of PV.

8.5.1 Specific Emission Balance.

8.5.2 Effect of PV on Reduction of CO<sub>2</sub> Emissions in Germany.

8.5.3 Variation of Location.

**9. Optimization.**

9.1 Improvement of Irradiance on a Solar Cell.

9.1.1 Improvement of Cell Irradiance by Tracking the Sun.

9.1.2 Improvement of Cell Irradiance by Reduction of Optical Reflection.

9.2 Reduction of Expenses for Mounting.

9.3 Substitution of Building Components.

9.3.1 Solar Roof Tiles.

9.3.2 Solar Facades.

9.4 Thermal Enhancement of PV Modules.

9.4.1 Real Operating Cell Temperatures Under Tropical Conditions.

9.4.2 Preliminary Work for the Reduction of Temperatures Under Tropical Conditions.

9.4.3 Development of a Thermally Improved Prototype.

9.4.4 Construction, Operation, and Measurement of TEPVIS in Africa.

9.4.5 The Integrated Solar Home System (I-SHS).

**4. BIBLIOGRAFIA BÁSICA / TEXT BOOK**

1. PATEL, M. R; BEIK, O. **Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation.** 3ª Edição. Boca Raton: CRC Press, 2021. 386 p. ISBN 978-0367476939.

2. WENHAM, S. R. *et al.* **Applied Photovoltaics.** 1ª Edição. Londres: Earthscan, 2007.

3. KRAUTER, S. C. W. **Solar Electric Power Generation: Photovoltaic Energy Systems.** 3ª Edição. Berlin: Springer-Verlag, Berlin, 2006. 271 p. ISBN 978-1850755265.

1. PATEL, M. R; BEIK, O. **Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation.** 3ª Edição. Boca Raton: CRC Press, 2021. 386 p. ISBN 978-0367476939.

2. WENHAM, S. R. *et al.* **Applied Photovoltaics.** 1ª Edição. Londres: Earthscan, 2007.

3. KRAUTER, S. C. W. **Solar Electric Power Generation: Photovoltaic Energy Systems.** 3ª Edição. Berlin: Springer-Verlag, Berlin, 2006. 271 p. ISBN 978-1850755265.

**5. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR / ADDITIONAL READING**

1. PRECUP, R. E. *et al.* **Solar Photovoltaic Power Plants: Advanced Control and Optimization Techniques.** 1ª Edição. Singapura: Springer Nature, 2019. 250 p. DOI: 10.1007/978-981-13-6151-7.

2. ALBADI, M., AL-BADI, A (ed.). **Solar Photovoltaic Power Intermittency and Implications on Power Systems.** 1ª Edição. Londres, Cambridge Scholar Publishing, 2021. 293 p. ISBN 978-1-5275-7129-7.

3. GEVORKIAN, P. **Large-Scale Solar Power Systems: Construction and Economics.** 1ª Edição. Nova Iorque: Cambridge University Press, 2012. 395 p.

4. GREEN, M. A. **Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion.** 1ª Edição. Berlin: Springer, 2003. (Springer Series in Photonics).

5. PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** Revisão 1. 2ª Edição. São José dos Campos: INPE, 2017. 80 p. ISBN 978-85-17-00089-8.

1. PRECUP, R. E. et al. **Solar Photovoltaic Power Plants: Advanced Control and Optimization Techniques**. 1ª Edição. Singapura: Springer Nature, 2019. 250 p. DOI: 10.1007/978-981-13-6151-7.
2. ALBADI, M., AL-BADI, A (ed.). **Solar Photovoltaic Power Intermittency and Implications on Power Systems**. 1ª Edição. Londres, Cambridge Scholar Publishing, 2021. 293 p. ISBN 978-1-5275-7129-7.
3. GEVORKIAN, P. **Large-Scale Solar Power Systems: Construction and Economics**. 1ª Edição. Nova Iorque: Cambridge University Press, 2012. 395 p.
4. GREEN, M. A. **Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion**. 1ª Edição. Berlin: Springer, 2003. (Springer Series in Photonics).
5. PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. Revisão 1. 2ª Edição. São José dos Campos: INPE, 2017. 80 p. ISBN 978-85-17-00089-8.

## 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 13:47, 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](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5155155** e o código CRC **60AF57E6**.