



Ministério da Educação  
 UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
 Setor de Tecnologia  
 Departamento de Engenharia Elétrica

**Ficha 2 (variável)**

Disciplina: <b>Semicondutores</b>								Código: <b>TE935</b>	
Natureza: Optativa		Semestral							
Pré-requisito: Não há		Co-requisito: Não há			Modalidade: EaD (100%)				
<b>CH Total: 60</b> <b>CH semanal: 04</b>	Padrão (PD): 60	Laboratório (LB): 0	Campo (CP): 0	Estágio (ES): 0	Orientada (OR): 0	Prática Específica (PE): 0	Estágio de Formação Pedagógica (EFP): 0		
<b>EMENTA (Unidade Didática)</b>									
Física básica de semicondutores. Transporte e equilíbrio em semicondutores. Junção p-n, metal semicondutor, metal-óxido-semicondutor. Diodos e transistores bipolares. Transistores de efeito de campo. CMOS. Foto-detetores. Diodos emissores de luz. Cavidades ressonantes. Laser de semicondutor. Fotônica.									
<b>PROGRAMA (itens de cada unidade didática)</b>									
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <b>Introdução:</b> História da Eletrônica, Classificação dos Materiais por sua Condutividade; Principais Materiais Semicondutores e Perspectivas;</li> <li>2. <b>Fundamentos da Mecânica Quântica:</b> Dualidade Onda-Partícula, Incerteza; Equação de Schroedinger; O Poço de Potencial e o Poço Duplo: Lições Importantes; Princípio de Exclusão de Pauli, Férmions, Bósons, Estatística Quântica; Orbitais Atômicos, Hibridização, Tabela Periódica; Teoria do Estado Sólido: De Átomos e Moléculas ao Sólido, Efeitos de Interações e Simetrias, Estrutura de Bandas, Energia e Nível de Fermi, Densidades de Estados, Definição de Massa Efetiva; O gás de elétrons e os metais;</li> <li>3. <b>Física dos Semicondutores:</b> Bandas de Valência e Condução, Massa Efetiva, Elétrons e o Conceito de Lacunas; Lei de Ação de Massas, Efeitos de Dopagem, Dopagem tipo P e tipo N; Condutividade em Semicondutores Homogêneos, Efeito Hall, Coeficiente de Hall, Magnetorresistência; Transporte e equilíbrio em semicondutores: Processos difusivos, Relação de Einstein, Efeitos Termoelétricos; Junção P-N: análise eletrostática, difusão de portadores e equações de corrente, efeito de retificação; Junção Metal-Semicondutor; Metal-óxido-semicondutor. Dispositivos Semicondutores: diodos e transistores bipolares, transistor de efeito de campo, CMOS. Tunelamento quântico;</li> <li>4. <b>Processos Ópticos e Dispositivos:</b> Diodos Emissores de Luz, Cavidade Ressonante e LASERs Semicondutores, Foto-detetores. Fotônica.</li> <li>5. <b>Aplicações Modernas:</b> Efeito de Dimensionalidade na Densidade de Estados: simples considerações; Da micro para a nanoeletrônica; Spintrônica e Novos Materiais: nanotubos, nanofios, dispositivos orgânicos, grafeno e potenciais aplicações.</li> </ol>									
<b>OBJETIVO GERAL</b>									
Familiarizar o aluno com os materiais semicondutores e os princípios físicos básicos que governam os dispositivos semicondutores, visando as suas aplicações em engenharia. O estudante deverá ser capaz de compreender com base nos fundamentos da mecânica quântica e da física do estado sólido, o comportamento dos semicondutores, formação de heteroestruturas como junções pn e metal-semicondutor, bem como os processos físicos envolvidos,									

com aplicações, em particular para dispositivos.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar ao com base nos fundamentos da mecânica quântica os princípios da física do estado sólido, com especial atenção às aplicações em física dos semicondutores
- Estudar o comportamento dos semicondutores por efeito de dopagem e seus efeitos nas bandas de energia e condutividade do material
- Estudar a formação de heteroestruturas como junções p-n e metal-semicondutor, bem como os processos físicos envolvidos, com aplicações, em particular para dispositivos.
- Apresentar os principais dispositivos semicondutores e suas aplicações, indo desde os transistores e diodos bipolares, passando pelos dispositivos opto-eletrônicos e chegando até o campo da fotônica.
- Apresentar novas perspectivas no campo da eletrônica, com os novos materiais e escalas reduzidas de dimensões.

### PROCEDIMENTOS DIDÁTICOS

A disciplina será desenvolvida por meio de aulas semanais, assíncronas, gravadas e disponibilizadas através do YouTube semanalmente, para os participantes regularmente matriculados na disciplina. O participante terá a opção de assistir a aula a qualquer momento que tenha disponibilidade. Cada aula terá associada uma tarefa a ser respondida pelo participante de forma individual e cujo prazo de envio ao professor responsável será de uma semana. O *Ambiente Virtual de Aprendizagem* (AVA) será a plataforma Microsoft® TEAMS, disponível gratuitamente para todos os estudantes com registro ativo na UFPR, para disponibilização de atividades e eventuais reuniões em tempo real. As aulas gravadas serão disponibilizadas através do YouTube, cujos links serão disponibilizados na página da disciplina ([www.eletrica.ufpr.br/cadartora/TE935.htm](http://www.eletrica.ufpr.br/cadartora/TE935.htm)) ou via e-mail enviado através da plataforma SIGA. Serão cadastrados no grupo "Semicondutores – TE935" da plataforma Microsoft® TEAMS unicamente os alunos com matrícula regularmente realizada na disciplina TE935 através da Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica, para o período letivo 2021/1. O professor responsável pela disciplina atuará como tutor e esclarecerá dúvidas dos estudantes, que devem enviá-las por escrito para o professor através de canal de e-mail institucional da UFPR, a ser divulgado, sendo a resposta do professor-tutor realizada através de resposta ao e-mail.

#### Material didático:

As aulas serão gravadas a partir de apresentações já existentes da disciplina ofertada na forma presencial, de autoria do próprio docente. O material original sofreu adaptações para o Ensino à Distância. O material didático (Slides das Aulas em Formato PDF, Listas de Exercícios) estão disponíveis no site da disciplina ([www.eletrica.ufpr.br/cadartora/TE935.htm](http://www.eletrica.ufpr.br/cadartora/TE935.htm)).

#### Requisitos digitais:

Para participar das atividades da disciplina o estudante deverá ter acesso a computador, *notebook* ou *desktop*, ou ainda a *tablet*, com acesso à Internet em banda larga. Não é necessária aquisição ou instalação de nenhum *software* em especial, uma vez que todos alunos da UFPR tem acesso gratuito ao pacote *Microsoft® Office para Web*. Recomenda-se que a participação na Reunião Virtual Semanal seja feita com o uso de computador, mas pode ser feita – caso necessário – através de *smartphone* onde seja instalado previamente o aplicativo Microsoft® TEAMS, disponível gratuitamente para as plataformas Android e iOS.

Para o cadastramento dos participantes na plataforma Microsoft® TEAMS e obter acesso gratuito ao pacote *Microsoft® Office para Web* é obrigatório ao aluno ter um **e-mail institucional da UFPR**, na forma [seunome@ufpr.br](mailto:seunome@ufpr.br). Os alunos que porventura não tiverem ainda seu e-mail institucional devem obtê-lo gratuitamente acessando ao serviço da AGETIC (Agência de Tecnologia da Informação e Comunicação) da UFPR pelo *link*: <https://intranet.ufpr.br/intranet/public/solicitacaoEmail!inputFormCPF.action>

Estudantes que fazem parte dos programas de assistência estudantil da UFPR e estudantes com comprovação de vulnerabilidade socioeconômica e falta de acesso digital devem buscar auxílio em editais específicos coordenados pela Pró-reitoria de Assuntos Estudantis (PRAE) da UFPR.

#### Controle de frequência das atividades:

Fica estabelecido o controle de frequência somente por meio da realização, de forma assíncrona, de trabalhos e exercícios domiciliares desenvolvidos pelos estudantes.

## FORMAS DE AVALIAÇÃO

- Estão previstas 4 (quatro atividades, cada uma delas recebendo uma nota ( $n_i$ ) de 0 (zero) a 100 (cem), conforme segue:

Atividade 1: Fundamentos de Mecânica Quântica

Atividade 2: Física de Materiais Semicondutores: Estruturas de Bandas, Dopagem, Efeito Hall...

Atividade 3: Dispositivos Semicondutores: Junção PN, Junção Metal-Semicondutor, Transistores

Atividade 4: Dispositivos Opto-Eletrônicos, Fotônica e Aplicações Modernas

- Atividades postadas fora do prazo são penalizadas com a perda de 30% da nota.
- A **Média Parcial** ( $m_{parcial}$ ) será calculada pela média das notas obtidas nas atividades, através de:

$$m_{parcial} = \frac{\sum_{i=1..4} n_i}{4}$$

- A partir do cálculo da **Média Parcial** ( $m_{parcial}$ ), tem-se os participantes **Aprovados por média** no caso de  $m_{parcial} \geq 70$  e a **Média Final** ( $m_{final}$ ) terá o mesmo valor da **Média Parcial** ( $m_{parcial}$ ).
- Os participantes cuja **Média Parcial** ( $m_{parcial}$ ) seja inferior a 70 porém igual ou superior a 40 ( $40 \geq m_{parcial} \geq 70$ ) será dada a oportunidade da redação de um Trabalho Extra, com tema a ser definido, ao qual será atribuída uma nota ( $t_{extra}$ ) entre zero e 100. Neste caso a **Média Final** ( $m_{final}$ ) será obtida através de:

$$m_{final} = \frac{m_{parcial} + t_{extra}}{2}$$

- Participantes cuja **Média Parcial** ( $m_{parcial}$ ) for inferior a 40 serão considerados REPROVADOS, sem direito ao Trabalho Extra.

**A frequência mínima para aprovação deve ser maior ou igual a 75%.**

### BIBLIOGRAFIA BÁSICA (mínimo 03 títulos)

- REZENDE, Sergio Machado. Materiais e dispositivos eletrônicos, 2.ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004, 547p., il. Apêndice e índice. ISBN 85-88325-27-6 (broch..).
- MELLO, Hilton Andrade de; DE BIASI, Ronaldo Sergio. Introdução à Física dos semicondutores. São Paulo; Brasília, DF: E. Blucher: INL, c1975. 124p., il. Inclui bibliografia.
- SZE, S.M. Physics of semiconductor devices. 2. ed. New York: Wiley, c1981. Xii, 868p., il. ISBN 047109837X: (broch.).

### BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR (mínimo 05 títulos)

- KITTEL, Charles. Introdução a física do estado sólido. 5. Ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978. 572p.
- Semiconductor Physics, K. Seeger, 6th. Ed. Springer, Solid State Science Series vol. 40, 1997.
- GRIFFITHS, David J. (David Jeffrey). Mecânica Quântica, 2.Ed. São Paulo: Prentice Hall, 2011. 347p., il. ISBN 9788576059271(broch).
- ASHCROFT, Neil W; MERMIN, N. David. Solid State Physics. Philadelphia: Saunders College, c1976. Xxi, 826p. il. Inclui índice. ISBN 0030839939; (enc).
- GREINER, Richard Anton. Semiconductor devices and applications. New York: McGraw-Hill, c1961. 493p., il. (McGraw-Hill electrical and electronic engineering series).

**Obs.:** Devido à impossibilidade de empréstimo dos volumes físicos disponíveis na Biblioteca de Ciência e Tecnologia da UFPR, motivada pelas restrições de acesso às edificações da Universidade devido a Pandemia mundial da COVID-19, será dada ênfase ao uso dos slides/apostila de autoria do próprio docente. No entanto, referências bibliográficas indicadas tem sido disponibilizadas de forma temporária na forma de arquivos digitais fornecidos pelas respectivas editoras.

**Professores da Disciplina:** César Augusto Dartora

**Assinatura:** \_\_\_\_\_

**Chefe de Departamento ou Unidade equivalente:** Luiz Antônio Belinaso

**Assinatura:** \_\_\_\_\_

*\*OBS: ao assinalar a opção % EAD, indicar a carga horária que será à distância.*

## Cronograma Detalhado de Aulas e Avaliações – Período Letivo 2021/1

<b>Data</b>	<b>Assunto</b>
Semana 1 20/09/21 a 26/09/21 CH: 8h	<b>Introdução:</b> História da Eletrônica, Classificação dos Materiais por sua Condutividade; Principais Materiais Semicondutores e Perspectivas;
Semana 2 27/09/21 a 03/10/21 CH: 7h	<b>Fundamentos da Mecânica Quântica: Parte 1</b> - Dualidade Onda-Partícula, Incerteza; Equação de Schroedinger; O Poço de Potencial e o Poço Duplo: Lições Importantes; Princípio de Exclusão de Pauli, Férmions, Bósons, Estatística Quântica; Orbitais Atômicos, Hibridização, Tabela Periódica; <b>Atividade 1 (entregar até 07/10)</b>
Semana 3 04/10/21 a 10/10/21 CH: 7h	<b>Fundamentos da Mecânica Quântica: Parte 2</b> - Teoria do Estado Sólido: De Átomos e Moléculas ao Sólido, Efeitos de Interações e Simetrias, Estrutura de Bandas, Energia e Nível de Fermi, Densidades de Estados, Definição de Massa Efetiva; O gás de elétrons e os metais; <b>Atividade 2 (entregar até 17/10)</b>
Semana 4 11/10/21 a 17/10/21 CH: 8h	<b>Física de Semicondutores – Parte 1:</b> Bandas de Valência e Condução, Massa Efetiva, Elétrons e o Conceito de Lacunas; Lei de Ação de Massas, Efeitos de Dopagem, Dopagem tipo P e tipo N; Condutividade em Semicondutores Homogêneos, Efeito Hall, Coeficiente de Hall, Magnetorresistência;
Semana 5 18/10/21 a 24/10/21 CH: 8h	<b>Física de Semicondutores – Parte 2:</b> Transporte e equilíbrio em semicondutores: Processos difusivos, Relação de Einstein, Efeitos Termoelétricos; Junção P-N: análise eletrostática, difusão de portadores e equações de corrente, efeito de retificação;
Semana 6 25/10/21 a 31/10/21 CH: 8h	<b>Física dos Semicondutores - Parte 3:</b> Junção Metal-Semicondutor; Metal-óxido-semicondutor. Dispositivos Semicondutores: diodos e transistores bipolares, transistor de efeito de campo, CMOS. Tunelamento quântico; <b>Atividade 3 (entregar até 10/11)</b>
Semana 7 01/11/21 a 07/11/21 CH: 7h	<b>Processos Ópticos e Dispositivos Opto-Eletrônicos:</b> Diodos Emissores de Luz, Cavidade Ressonante e LASERs Semicondutores, Foto-detetores. Fotônica.
Semana 8 08/11/21 a 14/11/21 CH: 7h	<b>Tópicos Modernos:</b> Efeito de Dimensionalidade na Densidade de Estados: simples considerações; Da micro para a nanoeletrônica; Spintrônica e Novos Materiais: nanotubos, nanofios, dispositivos orgânicos, grafeno e potenciais aplicações. <b>Atividade 4 (entregar até 17/11)</b>
Semana 9 15/11/21 a 20/11/21	<b>Fechamento de Notas das Atividades/Período de Estudos.</b>
Semana 10 21/11/21 a 27/11/21	<b>Exame Final: a ser disponibilizado até 06/07/21 com prazo de entrega até 25/11/21.</b>

\*CH: Carga Horária Estimada para cada semana.

\*\*Atividades serão contabilizadas como 1,5h para o cômputo da carga horária total daquela semana, embora possam requerer mais tempo para a realização.

\*\*\* Possíveis alterações de datas de aulas poderão ocorrer, a depender do andamento da disciplina e eventuais alterações em datas de avaliação serão previamente comunicadas aos alunos através da homepage da disciplina.

<http://www.eletrica.ufpr.br/cadartora/TE935.htm>