

# **Laboratório de Física Estatística e Física Nuclear**

**Petrucio Barrozo**



**São Cristóvão/SE  
2012**

# Laboratório de Física Estatística e Física Nuclear

**Elaboração de Conteúdo**  
Petrucio Barrozo

---

**Projeto Gráfico**  
Neverton Correia da Silva  
Nycolas Menezes Melo

**Capa**  
Hermeson Alves de Menezes

---

Copyright © 2012, Universidade Federal de Sergipe / CESAD.  
Nenhuma parte deste material poderá ser reproduzida, transmitida e gravada por qualquer meio eletrônico, mecânico, por fotocópia e outros, sem a prévia autorização por escrito da UFS.

FICHA CATALOGRÁFICA PRODUZIDA PELA BIBLIOTECA CENTRAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

Barrozo, Petrucio  
B278l Laboratório de Física Estatística e Física Nuclear /  
Petrucio Barrozo. -- São Cristóvão: Universidade Federal de  
Sergipe, CESAD, 2012.

1. Física estatística. 2. Energia. 3. Física - Manuais de  
laboratório. 4. Semicondutores. I Título.

CDU 53.01:311:536.1

**Presidente da República**

Dilma Vana Rousseff

**Chefe de Gabinete**

Ednalva Freire Caetano

**Ministro da Educação**

Fernando Haddad

**Coordenador Geral da UAB/UFS****Diretor do CESAD**

Antônio Ponciano Bezerra

**Diretor de Educação a Distância**

João Carlos Teatini Souza Clímaco

**coordenador-adjunto da UAB/UFS****Vice-diretor do CESAD**

Fábio Alves dos Santos

**Reitor**

Josué Modesto dos Passos Subrinho

**Vice-Reitor**

Angelo Roberto Antonioli

**Diretoria Pedagógica**

Clotildes Farias de Sousa (Diretora)

**Núcleo de Serviços Gráficos e Audiovisuais**

Giselda Barros

**Diretoria Administrativa e Financeira**

Edélzio Alves Costa Júnior (Diretor)

Sylvia Helena de Almeida Soares

Valter Siqueira Alves

**Núcleo de Tecnologia da Informação**

João Eduardo Batista de Deus Anselmo

Marcel da Conceição Souza

Raimundo Araujo de Almeida Júnior

**Coordenação de Cursos**

Djalma Andrade (Coordenadora)

**Assessoria de Comunicação**

Edvar Freire Caetano

Guilherme Borba Gouy

**Núcleo de Formação Continuada**

Rosemeire Marcedo Costa (Coordenadora)

**Núcleo de Avaliação**

Hérica dos Santos Matos (Coordenadora)

Carlos Alberto Vasconcelos

**Coordenadores de Curso**

Denis Menezes (Letras Português)

Eduardo Farias (Administração)

Haroldo Dorea (Química)

Hassan Sherafat (Matemática)

Hélio Mario Araújo (Geografia)

Lourival Santana (História)

Marcelo Macedo (Física)

Silmara Pantaleão (Ciências Biológicas)

**Coordenadores de Tutoria**

Edvan dos Santos Sousa (Física)

Geraldo Ferreira Souza Júnior (Matemática)

Ayslan Jorge Santos de Araujo (Administração)

Priscila Viana Cardozo (História)

Rafael de Jesus Santana (Química)

Gleise Campos Pinto Santana (Geografia)

Trícia C. P. de Sant'ana (Ciências Biológicas)

Laura Camila Braz de Almeida (Letras Português)

Lívia Carvalho Santos (Presencial)

**NÚCLEO DE MATERIAL DIDÁTICO**

Hermeson Menezes (Coordenador)

Marcio Roberto de Oliveira Mendonça

Neverton Correia da Silva

Nycolas Menezes Melo

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

Cidade Universitária Prof. "José Aloísio de Campos"

Av. Marechal Rondon, s/n - Jardim Rosa Elze

CEP 49100-000 - São Cristóvão - SE

Fone(79) 2105 - 6600 - Fax(79) 2105- 6474



# SUMÁRIO

---

<b>Aula 1: Revisão</b>	<b>7</b>
1.1 Introdução . . . . .	8
1.2 Revisão:Física Estatística . . . . .	9
1.3 Revisão: Física da Matéria Condensada . . . . .	22
<b>RESUMO</b> . . . . .	28
<b>PRÓXIMA AULA</b> . . . . .	29
<b>AUTO-AVALIAÇÃO</b> . . . . .	29
<b>LEITURA COMPLEMENTAR</b> . . . . .	30
<b>Aula 2: Mesa de Galton</b>	<b>31</b>
2.1 Introdução . . . . .	32
2.2 Caminhante aleatório . . . . .	32
2.3 Mesa de Galton . . . . .	36
2.4 Algumas grandezas importantes . . . . .	41
2.5 Procedimento Experimental . . . . .	42
<b>RESUMO</b> . . . . .	45
<b>PRÓXIMA AULA</b> . . . . .	46
<b>AUTO-AVALIAÇÃO</b> . . . . .	48
<b>LEITURA COMPLEMENTAR</b> . . . . .	49
<b>Aula 3: Distribuição de Energia</b>	<b>51</b>
3.1 Introdução . . . . .	52
3.2 Revisão . . . . .	53
3.3 Procedimento Experimental . . . . .	58
<b>RESUMO</b> . . . . .	61
<b>PRÓXIMA AULA</b> . . . . .	62

<b>AUTO-AVALIAÇÃO</b> . . . . .	62
<b>LEITURA COMPLEMENTAR</b> . . . . .	63
<b>Aula 4: Efeito termoiônico</b>	<b>65</b>
4.1 Introdução . . . . .	66
4.2 Revisão . . . . .	66
4.3 Procedimentos experimental . . . . .	72
<b>RESUMO</b> . . . . .	78
<b>PRÓXIMA AULA</b> . . . . .	78
<b>AUTO-AVALIAÇÃO</b> . . . . .	79
<b>LEITURA COMPLEMENTAR</b> . . . . .	79
<b>Aula 5: Dispositivos semicondutores</b>	<b>81</b>
5.1 Introdução . . . . .	82
5.2 Revisão . . . . .	82
5.3 Procedimento Experimental . . . . .	86
<b>RESUMO</b> . . . . .	88
<b>AUTO-AVALIAÇÃO</b> . . . . .	89
<b>LEITURA COMPLEMENTAR</b> . . . . .	89

---

## Revisão

### **META:**

Revisar alguns conceitos da Física Estatística e da Física da Matéria Condensada.

### **OBJETIVOS:**

Ao fim da aula os alunos deverão saber:

- Analisar dados experimentais do ponto de vista estatístico;
- Calcular grandezas estatísticas como: valor médio, variância, desvio padrão e desvio relativo;
- Construir gráficos e histogramas bem como fazer a linearização de funções;
- Classificar os materiais segundo as propriedades de condução elétrica com base na teoria de bandas;
- Entender a física e as aplicações envolvidas nas junções metal-metal e na junção semicondutora *pn*.

### **PRÉ-REQUISITOS**

- Tenham cursado ou estejam cursando as disciplinas Introdução à Física Estatística e Introdução à Física da Matéria Condensada.

## 1.1 Introdução

Caros alunos, estamos dando início ao curso de Laboratório de Física Estatística e da Matéria Condensada. Neste curso faremos experimentos a fim de ilustrar e confirmar alguns dos conceitos vistos nas aulas teóricas dos cursos de física. Esperamos Com isto obter uma formação mais sólida nos conteúdos de física moderna e contemporânea sendo capaz de ao término deste curso identificar, entender e descrever fenômenos físicos presentes nos diversos sistemas e dispositivos tecnológicos disponíveis em nosso dia-dia, buscando inclusive a interdisciplinariedade da física com outras áreas correlatas como a biologia e a química.

Nesta primeira aula será dividida em duas etapas:

**Etapa 1:** Na primeira etapa descreveremos alguns conceitos básicos da estatística usados para análise de resultados experimentais. Aprenderemos a calcular a média, o desvio padrão de uma função dentre outras grandezas estatísticas. Daremos ênfase também a construção e interpretação de gráficos.

**Etapa 2:** Na segunda etapa deste capítulo será feita uma revisão sobre os principais conceitos de Física da Matéria Condensada que serão abordados nos experimentos realizados durante o curso.

Agora vamos ligar nossos motores e nos preparar para os experimentos que virão. Desejo a todos um bom curso.



## 1.2 Revisão:Física Estatística

Faremos abaixo uma breve revisão sobre os principais conceitos de estatística usados ao longo deste curso.

### Probabilidade

Partindo do pressuposto de que todos os eventos de um dado sistema são igualmente prováveis (equiprováveis), a probabilidade para que um evento  $A$  ocorra pode ser dada por:

$$P(A) = \frac{1}{\Omega} , \quad (1.1)$$

onde  $\Omega$  é o número de eventos possíveis no espaço amostral. A probabilidade é sempre um número positivo e menor que 1.0. Do ponto de vista da física estatística podemos dizer que o espaço amostral corresponde ao conjunto de microestados acessíveis ao sistema.

**Exemplo:Cara-Coroa** Num jogo de cara e coroa qual a probabilidade de dar cara?

O primeiro passo é definir nosso espaço amostral neste caso  $\Omega = \{\text{cara, coroa}\}$ . O número de eventos neste espaço amostral é 2 sendo assim a probabilidade de dar cara ao lançar a moeda é

$$P(\text{Cara}) = \frac{1}{2} = 0.5 , \quad (1.2)$$

neste caso temos uma probabilidade de 50% de o evento Cara ocorrer.

A probabilidade de que ocorra Coroa no evento é  $P(\text{Coroa}) = 1 - P(\text{Cara})$ . Ao lançar a moeda temos 50% de chance de obter cara e 50% de chances de obter coroa.

## ATIVIDADES



1. Considere um jogo de Cara e Coroa, supondo que as jogadas sejam independentes responda.
  - (a) Qual seria a probabilidade de obtermos cara por duas jogadas consecutivas?
  - (c) Qual seria a probabilidade de obtermos a seqüência cara, coroa, cara?
2. Agora considerando o lançamento de um dado responda.
  - (a) Qual o espaço amostral?
  - (b) Qual a probabilidade de obtermos o número 5 ?
  - (c) Qual a probabilidade de não obter o número 5?
  - (d) Qual a probabilidade de obtermos a seqüência:  
 $\{5, \text{número par}\}$
3. Considerando agora o lançamento de dois dados.
  - (a) Qual a probabilidade de se obter dois números ímpar numa jogada?
  - (b) Qual a probabilidade de se obter um número par e outro ímpar numa jogada?

A análise de dados experimentais exige que tenhamos conhecimentos básicos de estatística, por isso vamos agora definir algumas grandezas estatísticas.

### Valor médio

O valor médio para  $N$  repetições de uma variável discreta  $x$  com probabilidade  $P(x)$  pode ser escrita como,

$$\bar{x} = \frac{x_1P(x_1) + x_2P(x_2) + \dots + x_NP(x_N)}{P(x_1) + P(x_2) + \dots + P(x_N)}, \quad (1.3)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_iP(x_i)}{\sum_{i=1}^N P(x_i)}. \quad (1.4)$$

Podemos estender este conceito para uma função contínua  $f(x)$  com distribuição  $P(x)$  e escrever a média como,

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)P(x)dx. \quad (1.5)$$

### Desvio Padrão

O desvio padrão  $\sigma$  pode ser definido como sendo a raiz quadrada da variância ( $\sigma^2$ ) que também é chamada de dispersão. Este valor nos dar uma medida de quão longe os valores da variável  $x$  se encontram do valor esperado  $\bar{x}$ , a variância  $\sigma^2$  para uma variável discreta pode ser escritas como,

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 P(x_i), \quad (1.6)$$

e o desvio padrão  $\sigma$  é definido como,

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 P(x_i)}, \quad (1.7)$$

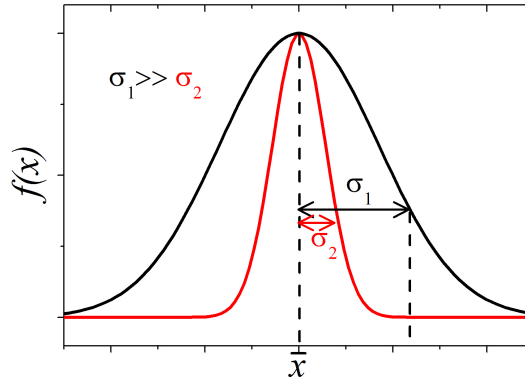


Figura 1.1: Distribuições estatísticas gaussianas com média zero e diferentes valores de  $\sigma$ .

Na prática o desvio padrão para um conjunto de dados experimentais é dado por,

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (1.8)$$

Para uma distribuição contínua a variância pode ser escrita como,

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 f(x) dx. \quad (1.9)$$

### OBSERVAÇÃO:

A variância também é definida como sendo o segundo momento de  $x$  sobre a média. Em geral, o momento de ordem  $n$  centrado na média é definido como,

$$m_n = \overline{(x_i - \bar{x})^n}. \quad (1.10)$$

Outra grandeza importante é o desvio relativo, definido como sendo a razão entre o desvio padrão e o valor médio,

$$\Delta\varepsilon = \frac{\sigma}{\bar{x}}, \quad (1.11)$$

através desta grandeza podemos ter uma idéia da largura da distribuição de probabilidade, isto é, ela nos indica se a distribuição é fina e centrada no valor médio ou muito espalhada em torno da média.

## **Distribuições estatísticas na física**

Há vários tipos de distribuições estatísticas, dentre estas podemos citar:

- Distribuição Binomial;
- Distribuição Normal ou Gaussiana;
- Distribuição do Poisson;
- Distribuição de Weibull;
- Distribuição de Maxwell-Boltzmann;
- Distribuição de Fermi-Dirac;
- Distribuição de Bose-Einstein.

Nesta seção detalharemos as distribuições estatísticas mais usadas para explicar fenômenos físicos, dentre estas destacamos as:

- Distribuição Gaussiana;
- Distribuição de Maxwell-Boltzmann;
- Distribuição de Fermi-Dirac;
- Distribuição de Bose-Einstein.

As demais distribuições poderão ser revisadas mais na frente quando for necessário.

## Distribuição Gaussiana

A distribuição Gaussiana é amplamente utilizada para descrever o comportamento de variáveis aleatórias. Em geral, a soma de  $N$  variáveis  $x_i$  com distribuições quaisquer e com variâncias finitas tendem a uma distribuição gaussiana quanto  $N \rightarrow \infty$ . A distribuição gaussiana é dada pela equação,

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i-\bar{x}}{\sigma}\right)^2}, \quad (1.12)$$

onde  $\bar{x}$  é o valor médio e  $\sigma$  é o desvio padrão. Um perfil típico para a distribuição gaussiana pode ser visto na Figura 1.1.

## Distribuição de Maxwell-Boltzmann

A distribuição de Maxwell-Boltzmann é dada pela equação,

$$f(v) = 4 \pi \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-mv^2/2kT}, \quad (1.13)$$

Esta distribuição é usada para explicar fenômenos relacionados com a física clássica como por exemplo, a distribuição de velocidades das partículas de um gás confinado, em diferentes temperaturas como mostrado na Figura 1.2. Neste caso as partículas são consideradas distinguíveis e pode haver mais de uma partícula no mesmo nível de energia.

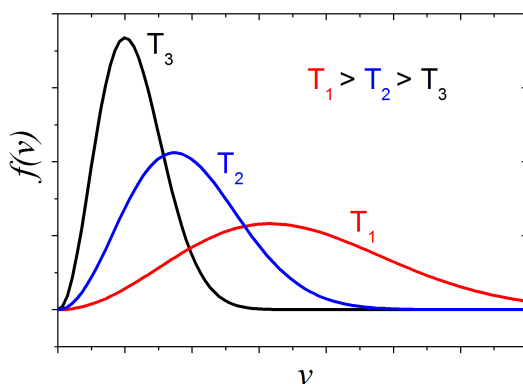


Figura 1.2: Perfil da curva de distribuição de velocidades de Maxwell-Boltzmann para diferentes temperaturas.

Para a distribuição de Maxwell-Boltzmann a velocidade média  $\bar{v}$  é dada por,

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8 kT}{\pi m}}. \quad (1.14)$$

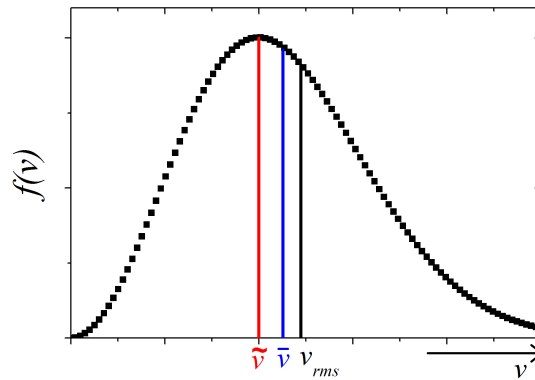


Figura 1.3: Comparação das disposições das velocidades: Velocidade mais provável ( $\tilde{v}$ ), Velocidade média ( $\bar{v}$ ) e a raiz quadrada do valor médio da velocidade ( $v_{rms}$ ) numa distribuição de Maxwell-Boltzmann.

O valor mais provável da velocidade  $\tilde{v}$  em uma temperatura  $T$  é dada por,

$$\tilde{v} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}. \quad (1.15)$$

A raiz quadrada do valor médio do quadrado da velocidade, chamado de  $v_{rms}$  é dada por,

$$\overline{v_{rms}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}. \quad (1.16)$$

Na Figura 1.3 podemos ver uma comparação entre as velocidades  $\bar{v}$ ,  $\tilde{v}$  e  $v_{rms}$  dentro de uma distribuição de Maxwell-Boltzmann.



## Distribuição de Fermi-Dirac

A distribuição de Fermi-Dirac é aplicada a sistemas quânticos onde a indistinguibilidade das partículas precisa ser levada em conta. As partículas que obedecem a distribuição de Fermi-Dirac são férmions, possuem spin semi-inteiro ( $1/2$ ,  $3/2$ , etc) e também obedecem ao princípio da exclusão de Pauli. A distribuição de Fermi-Dirac é dada por:

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{e^{\beta(\varepsilon - \varepsilon_F)} + 1}, \quad (1.17)$$

onde  $\beta = 1/kT$ ,  $k$  é a constante de Boltzmann,  $T$  é a temperatura,  $\varepsilon_F$  é a energia de Fermi. Em  $T = 0 \text{ K}$  todas as partículas estão distribuídas entre os níveis com energia menor que a energia de Fermi ( $\varepsilon < \varepsilon_F$ ), nesta situação a equação 1.17 nos dá  $f(\varepsilon < \varepsilon_F) = 1.0$ .

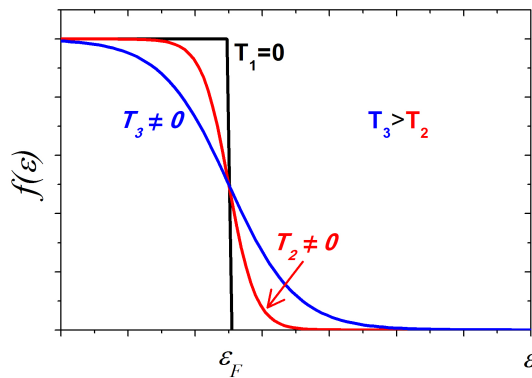


Figura 1.4: Perfil de distribuição de Fermi-Dirac para diferentes temperaturas do sistema.

Na Figura 1.4, mostramos o perfil da distribuição de probabilidade de Fermi-Dirac para diferentes temperaturas. A medida que

a temperatura aumenta ( $T > 0$ ) uma fração das partículas, que antes ocupavam níveis com energia abaixo da energia de Fermi, apresenta uma probabilidade finita e diferente de zero de ocupar estados com maior energia.

A distribuição de Fermi-Dirac pode ajudar a entender o efeito termoiônico e o mecanismo de condução de eletricidade em materiais semicondutores.

## Distribuição de Bose-Einstein

A distribuição de Bose-Einstein é aplicada em sistemas quânticos onde a indistinguibilidade das partículas precisam ser levada em conta. As partículas aqui são Bósons e apresentam spin inteiro (0,1, 2, etc) e não obedecem ao princípio da exclusão de Pauli. A distribuição de Bose-Einstein é dada por:

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{e^{\beta(\varepsilon - \varepsilon_F)} - 1} . \quad (1.18)$$

Neste tipo de distribuição todas as partículas podem ocupar o mesmo nível de energia. Este tipo de distribuição pode descrever os portadores de carga em materiais supercondutores, os superfluidos e os condensados de Bose-Einstein.

Vale apenas ressaltar que em altas temperaturas as distribuições de Fermi-Dirac e de Bose-Einstein se reduzem à distribuição de Maxwell-Boltzmann.

## ATIVIDADES



- Voce já ouviu falar em materiais supercondutores? responda as perguntas:
  1. Quais as principais propriedades dos materiais supercondutores?
  2. Onde estes materiais podem ser usados?

## Histograma

A análise estatística dos resultados obtidos experimentalmente, requer muitas vezes a construção de gráficos. Na análise estatística um gráfico muito utilizado é o histograma.

O histograma é uma representação gráfica, composta por retângulos justapostos onde a base corresponde ao intervalo de classe e a altura à respectiva frequência. Quanto maior for a quantidade de resultados menor pode ser o tamanho da classe, tendendo esta a zero quando a quantidade de dados for infinito. Neste limite, a distribuição de frequência passa para uma distribuição de densidade de probabilidades (distribuição contínua).

A construção de histogramas tem caráter preliminar na análise de dados estatísticos e é uma importante ferramenta para determinar a distribuição estatística que descreve os dados experimentais.

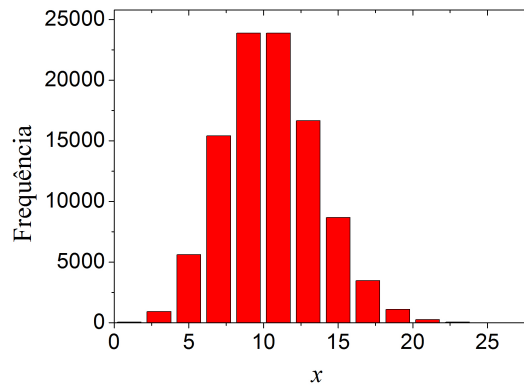


Figura 1.5: Visualização de histograma típico obtido nas análises de dados experimentais.

Alguns critérios devem ser levado em conta na construção de um histograma,

- **A escolha da classe ( $\Delta x$ )**, as classes devem abranger todas as observações, O extremo superior de uma classe é o extremo inferior da classe subsequente (podemos adotar, intervalo fechado à esquerda e aberto à direita);
- Cada valor observado deve enquadrar-se em apenas uma classe;
- O intervalo da classe  $\Delta x$  deve ser o menor possível.

É importante notar que ao diminuirmos o  $\Delta x$  diminuímos também a frequência (valores dentro de uma classe). Devemos ficar atentos para evitar classes com frequência menor que 10.

A leitura atenta de um histograma deve permitir responder questões do tipo:

1. Qual é a forma da distribuição?
2. Existe um ponto central bem definido?
3. Quão grande é a dispersão?
4. Quantos picos existem na distribuição?
5. A distribuição é simétrica?

### **Lei dos grandes números**

A lei dos grandes números assegura a existência de um valor médio verdadeiro como limite do valor médio de  $N$  resultados, quando  $N \rightarrow \infty$ .

A única condição para que isto seja válido é que os  $N$  resultados correspondam a uma mesma distribuição de erros. Isto pode ser verificado quando fazemos medições repetidas  $N$  vezes, exatamente nas mesmas condições.

### **Teorema do limite central**

O teorema do limite central nos diz que uma amostra com  $N$  variáveis aleatórias e independentes  $x_1, x_2, \dots, x_N$  que obedecem ao mesmo tipo de distribuição com média  $\bar{x}$  e variância  $\sigma^2$ , ambos finitos, converge para uma distribuição normal com média  $\bar{x}$  e variância  $\sigma^2/n$  a medida que  $N \rightarrow \infty$ .

Em outras palavras, o teorema do limite central diz que qualquer que seja a forma de uma distribuição, desde que tenha média e variância finita, as médias destas distribuições resultam numa distribuição normal. Para simular este comportamento para diferentes formas de distribuição acessem o site:

[http://www.chem.uoa.gr/applets/AppletCentralLimit/Applet\\_CentralLimit2.html](http://www.chem.uoa.gr/applets/AppletCentralLimit/Applet_CentralLimit2.html).

### 1.3 Revisão: Física da Matéria Condensada

A física da matéria condensada é uma grande área da física que trata das propriedades:

- elétricas;
- mecânicas;
- térmicas;
- magnéticas;
- óticas,

presentes na matéria sólida.

É importante lembrar que no estado sólido, as moléculas ou átomos não podem mais ser tratados como entidades isoladas. A proximidade destes dentro dos sólidos possibilita a interação entre eles e altera as suas propriedades. Faremos aqui uma breve revisão das principais propriedades utilizadas na descrição de fenômenos encontrados na matéria condensada e abordado ao longo dos experimentos.

**Bandas de energia**

Dentre as propriedades que surgem nos sólido devido a interação entre os átomos destacamos a formação das bandas de energia. Os sólidos podem apresentar muitas bandas de energia que são preenchidas conforme o princípio de exclusão de Pauli.

As bandas de energia podem ser totalmente preenchidas, parcialmente preenchidas ou vazias. A forma como a banda de valência e de condução são preenchidas permite classificar os sólidos em pelo menos três grandes grupos,

**Condutores (metais)** → Apresentam boa condutividade elétrica.

Nestes materiais as bandas de valência e de condução praticamente se sobrepõe tendo portando elétrons livres para se movimentar na banda de condução.

**Isolantes (dielétricos)** → Devido ao grande gap de energia, a banda de condução nestes materiais está vazia. Estes materiais não apresentam elétrons livre para se movimentar.

**Semicondutores** → A banda de condução esta pouco preenchida.

Este materiais apresentam em geral um pequeno gap de energia da ordem de  $k_B T$  separando as bandas de valência e de condução (1.12 eV para o silício e 0.7 eV para o germânio).

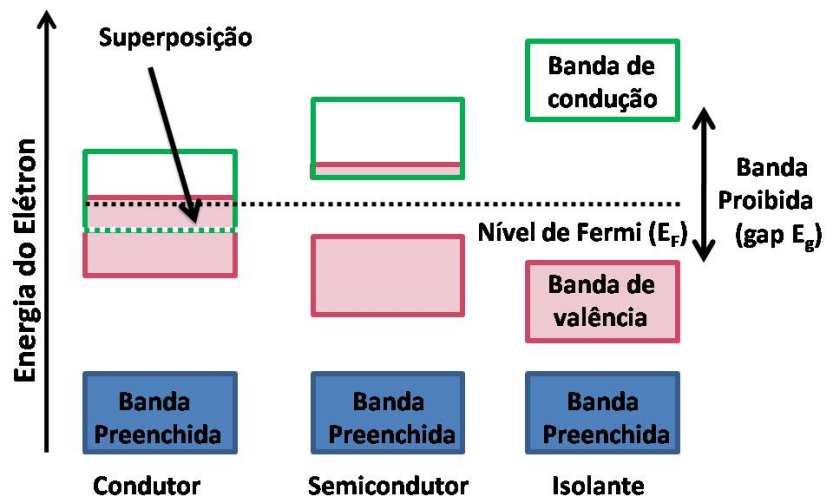


Figura 1.6: Banda de energia preenchida para diferentes classes de materiais.

**Banda de valência** → É a banda com maior nível de energia ocupada segundo o princípio da exclusão de Pauli.

**Banda de condução** → É a banda imediatamente acima da banda de valência. Onde reside os elétrons responsáveis pela condução no material.

Os bons condutores apresentam a banda de condução aproximadamente meio preenchida. Neste caso é muito mais fácil fazer com que um elétron alcance à um nível mais alto de energia, de modo que estes elétrons possam adquirir energia devido à presença de um campo elétrico e participar da condução elétrica. Em um material isolante, a banda de valência está cheia e o gap entre a banda de valência e a de condução é grande ( $E_g \gg k_B T$ ), e a



energia adquirida do trabalho realizado pelo campo elétrico não é suficiente para elevar os elétrons para a banda de condução.

## ATIVIDADES



1. Descreva o comportamento esperado para a variação da resistência com a temperatura em materiais condutores e em semicondutores, faça um gráfico qualitativo para descrever este comportamento na matéria.
2. Descreva quais os principais mecanismo responsável pela resistividade em materiais condutores e semicondutores.
3. Quais os portadores de carga em metais e semicondutores? Descreva a origem e o comportamento de cada tipo de portador.
4. O que são semicondutores intrínsecos e semicondutores extrínsecos?
5. O que são semicondutores do tipo-n e do tipo-p? No que eles diferenciam?

## Junção metal-metal

Quando dois metais diferentes estão em contato, surge uma diferença de potencial em suas extremidades devido a existência de diferentes energias de Fermi inerente a cada um dos metais.

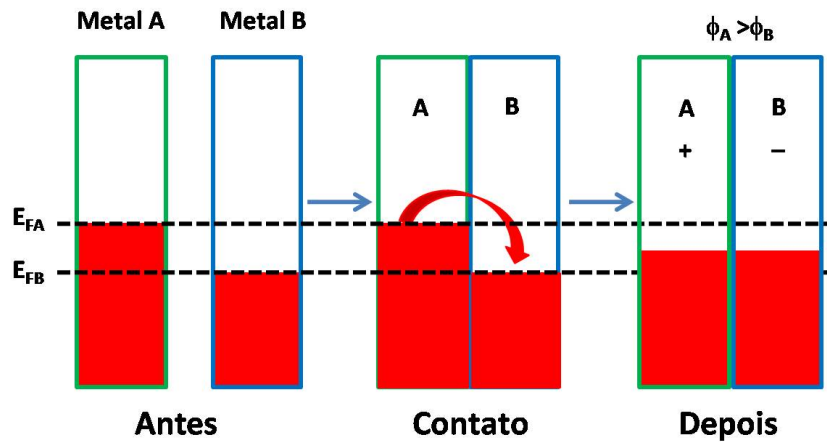


Figura 1.7: Comportamento das banda de energia de dois metais A e B quando em contato, no lado esquerdo vemos as bandas de energia antes do contato e no lado direito da figura vemos o comportamento da banda de energia após o contato.

Após o contato o metal com maior energia de Fermi "cede" alguns elétrons para o metal com menor energia de Fermi afim de equilibrar as energias.

## Junção p-n

Quando um semicondutor do tipo-p e do tipo-n são colocados em contato, os elétrons em excesso na região tipo-n e as lacunas da região tipo-p começam a se difundir (ver figura 1.8), e criam um campo elétrico  $E_p$  que atua como uma barreira ao movimento das cargas.

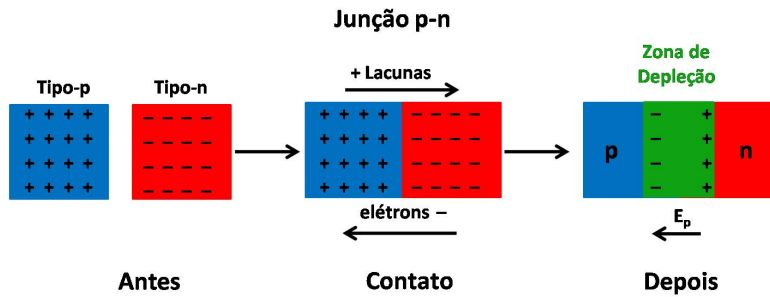


Figura 1.8: Comportamento dos portadores de carga nos materiais semicondutores tipo-n e tipo-p quando colocadas em contato.

Quando aplicarmos um campo elétrico externo no mesmo sentido do campo elétrico estabelecido pela junção-*pn* teremos uma corrente elétrica muito pequena. No entanto, se aplicarmos um campo elétrico no sentido oposto ao estabelecido pela junção, favoreceremos o deslocamento de elétrons no semiconductor tipo-n e das lacunas no semiconductor tipo-p, gerando correntes que são proporcionais ao campo.



## RESUMO

Na aula de hoje, vimos uma breve revisão de alguns dos principais conceitos da física estatística e a física da matéria condensada relacionados com os experimentos que iremos abordar nas próximas aulas. Começamos definindo a probabilidade para eventos equiprováveis, em seguida definimos a média e o desvio padrão para variáveis discretas e contínuas. Dando continuidade falamos sobre algumas distribuições estatísticas de fundamental importância para descrever fenômenos físicos (clássicos e quânticos). Aprendemos a construir histogramas e enunciamos a lei dos grandes números e o teorema do limite central.

Na segunda parte da aula revisamos alguns conceitos da física da matéria condensada, falamos sobre o surgimento das bandas de energia como resultado das interações dos átomos na matéria sólida, mostramos que o comportamento elétrico dos materiais está associado ao preenchimento das bandas de energia. Por fim falamos sobre as junções metal-metal e dos semicondutores do tipo-n e do tipo-p.

Temos agora embasamento suficiente para realizar os experimentos. Vamos agora nos preparar para realizar os experimentos. Não se esqueça de fazer todas as atividades aqui proposta é fundamental para a fixação do conteúdo. Caso não consiga se lembrar de toda teoria aqui apresentada, consulte as referências aqui citadas ou o material dos cursos teóricos para assegurar o seu bom desempenho nos experimentos. Bons estudos.

## PRÓXIMA AULA



Em nossa próxima aula iniciaremos as atividades experimentais. Nosso primeiro experimento será um modelo para estudar as propriedades do sistema conhecido com caminhante aleatório. Neste experimento usaremos os conceitos de probabilidade, média, desvio padrão, histograma, teorema do limite central, dentre outros. Aproveite para revisar o assunto e até a próxima aula.

## AUTO-AVALIAÇÃO



Para verificar o seu aprendizado nesta aula responda as seguintes questões.

- Eu sei definir a probabilidade de um sistema?
- Eu sei definir o espaço amostral para um sistema?
  - Eu sei determinar a probabilidade de se obter um A's de copa num jogo de baralho.
- Eu sei calcular a média e o desvio padrão de distribuições estatística?
- Eu sei construir um histograma?
- Eu sei o significado do teorema do limite central?

- Eu sei descrever como as bandas de energias são ocupadas nos diferentes tipos de condutores?
- Eu sei o comportamento de uma junção p-n?

Caso tenha dificuldade em responder estas perguntas, faça uma releitura do texto, consulte textos dos cursos teóricos e procure tirar suas dúvidas com seu professor.



## LEITURA COMPLEMENTAR

- [1 ] VUOLO, J. H.; **Fundamentos da teoria de erros**. 2 ed. São Paulo-SP: Edgar Blücher, 1996.
- [2 ] REIF, F., **Fundamentals of Statistical and Thermal Physics**, USA:Waveland Press, Inc., 2009.
- [3 ] SALINAS, Sílvio R. A.; **Introdução à Física Estatística**. 2 ed. São Paulo-SP: Edusp, 2008.
- [4 ] CAVALCANTE, Mariza Almeida; TAVOLARO, Cristiane R. C.; **Física Moderna Experimental**. 2 ed. Barueri-SP: Manole, 2007.
- [5 ] TIPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph A; **Física Moderna**. 3 ed. Rio de Janeiro-RJ: LTC, 2001.
- [6 ] KITTEL, Charles; **Física do Estado Sólido**. 8 ed. Rio de Janeiro-RJ: LTC, 2006.
- [7 ] Notas de aula, curso de laboratório de física estatística e da matéria condensada, DFI-UFS.