

***MANUAL***  
***DO***  
***ALUNO***

**FOTOELETRICIDADE**

Alunos: Aquino L. Espíndola  
Aristides M. C. Martins  
Mário R. Castro Fettuccia

Florianópolis, agosto de 1999

## Índice

Texto I – Funciona com a luz. O que é isso?.....	2
Experimentos.....	7
Experimento I – Células de controle de luminosidade.....	7
Experimento II – Contador de interrupções.....	10
Experimento III – Como funciona uma célula fotovoltaica.....	13
Simulações.....	15
Texto II – A natureza da luz.....	23
Texto III – Teoria corpuscular da luz.....	26
Texto IV – O átomo de Bohr.....	35
Leitura Complementar I – Efeito Fotoelétrico.....	37
Leitura Complementar II – Semicondutores.....	39
Texto V – Condutores e isolantes.....	41
Texto VI – A corrente elétrica.....	43
Texto VII – Fotoeletricidade.....	51
Leitura Complementar III – Dispositivos Fotoelétricos.....	54
Leitura Complementar IV – Comunicação e Controle com Luz Infravermelha.....	57
Leitura Complementar V – A fotocopiadora.....	59

## Texto I

### Funciona com a luz. O que é isto ?

#### Onde Vivemos

Nosso ambiente atual é muito mais um ambiente produzido pelo homem com sua tecnologia, do que um ambiente natural semelhante aquele no qual homem primitivo vivia. O impacto da tecnologia que vem sendo incorporada ao nosso ambiente, em geral passa despercebido a não ser por alguns momentos em que somos forçados a modificar nossa forma usual de executar as tarefas diárias em decorrência de alguma alteração, provocada pela entrada de novos produtos desta tecnologia.

Se retornarmos um século, ao tempo do início do automóvel e telecomunicações, teríamos um ambiente muito diferente do atual em que o papel da iluminação natural era muito mais importante do que é hoje e onde muitos dos objetos que vemos hoje em nossos ambientes de trabalho e doméstico, seriam na sua maioria ainda desconhecidos.

#### Objetos do Nosso Dia A Dia

Entre estes objetos tecnológicos do nosso cotidiano existem alguns que se tornaram, mais recentemente (últimos 15 anos), comuns para nós. Todos nós conhecemos um controle remoto de televisor, vídeo cassete, sistema de som. Conhecemos bem o sistema de iluminação pública, sabemos reconhecer se um sistema é automático ou não e em muitas de nossas casas existe uma ou outra lâmpada que funciona automaticamente, acendendo quando anoitece e apagando quando amanhece. Já procurou saber como funciona?

Quando vamos ao supermercado ou shopping é comum que os objetos comprados sejam marcados com uma etiqueta com barras. Quando vamos pagar, o caixa passa o objeto por uma leitora de códigos de barra e o preço é logo transferido para a máquina registradora. Você tem alguma idéia de como funciona esta leitora de códigos?

Quando entramos em um elevador mais moderno que esta iniciando o fechamento das portas, existe um sistema de segurança que manda abrir novamente a porta. Como ele funciona?

Hoje temos uma facilidade muito grande em tirar cópias de documentos, papéis comerciais, desenhos, etc. Geralmente vamos a algum lugar perto de casa onde existe um serviço que chamamos xerox, onde uma máquina tira rapidamente as cópias que precisamos. Com ela consegue-se copiar estes documentos rapidamente.

Mais recentemente, está sendo vendida uma caneta tradutora que possui um pequeno terminal capaz de ler a palavra em um livro e traduzir esta palavra para outra língua. A tradução geralmente aparece em um visor na própria caneta. Você imagina como a caneta é capaz de “ler” a palavra escolhida?

Outro exemplo comum, mas do qual normalmente não nos damos conta, é o sistema de leitura de discos laser<sup>1</sup> ou toca discos CD. Como é que a informação disponível no disco pode ser lida pelo toca discos e transformada em som?

Os cartões de controle de ponto, em organizações com um grande número de empregados, permite que seja controlada a hora de entrada e de saída, sem que nada seja impresso no cartão. Como é que o “relógio de ponto” reconhece as informações do cartão?

### Princípio de Funcionamento

Todos estes equipamentos mencionados têm dentro deles unidades capazes de reconhecer uma informação que está fora deles e se apropriar desta informação. Na maioria das vezes, fazendo parte destes equipamentos citados,

---

<sup>1</sup> A palavra laser é a sigla em inglês de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que significa amplificação de luz por emissão de radiação estimulada.

existem um ou mais componentes capazes de reconhecer e absorver a informação que esta fora do equipamento. Geralmente estes equipamentos são baseados em sistemas sensíveis a luz (visível ou infravermelha) ou utilizam este tipo de radiação eletromagnética para se comunicar, como no caso dos controles remotos ou sistemas de controle de porta dos elevadores. Existem outros princípios de funcionamento que podem ser aplicados a estes equipamentos de ação a distância. Entretanto, em nosso módulo de ensino, vamos nos ater aqueles que funcionam com a luz.

### *Efeito Fotoelétrico*

Estamos chegando ao nosso assunto, o efeito fotoelétrico, resultado da ação da luz sobre a matéria com um efeito associado a eletricidade. Vamos verificar que tipo de luz e matéria interagem deste modo. Antes de ir mais longe no assunto, vamos coletar as informações que o grupo tem sobre este assunto. Para tanto solicitamos que vocês respondam as questões da página seguinte. Em nosso próximo encontro vamos discutir um pouco mais sobre o que vocês já sabem sobre este assunto.

## Questionário 1

Com base no texto que você acabou de ler, responda as perguntas abaixo, para que seja discutidas na próxima aula.

1. Como você acha que a luz solar influencia no acionamento das lâmpadas de iluminação pública?

---

---

---

2. No caso da leitora de código de barras, como o laser faz a leitura do código da etiqueta?

---

---

---

---

3. Como uma porta de elevador “sabe” que tem alguém entrando, não se fechando naquele momento?

---

---

---

4. Por que toda vez que uma máquina na xerox faz uma cópia, vemos uma luz passar sob o papel?

---

---

---

---

5. Nos equipamentos que vimos até agora, a luz utilizada é do mesmo tipo?

---

---

---

## EXPERIMENTOS

Seu professor irá exibir alguns experimentos que você poderá acompanhar, observando a descrições dos mesmo logo abaixo.

**Experimento I:** Células de controle de luminosidade.

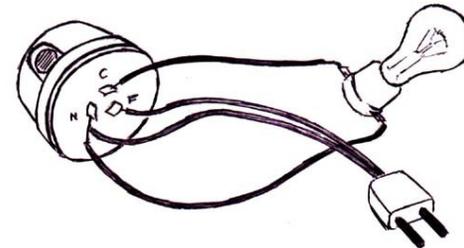
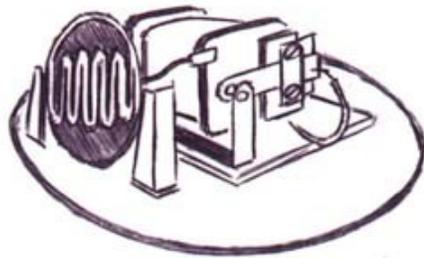
<i>Componentes</i>	<i>Quantidade</i>
• Rele fotoelétrico modelo RM10 NF	01
• Lâmpada incandescente 25 W	01
• Soquete para lâmpada de rosca	01
• Plug para alimentação	01

- Outros: fios, solda, fita adesiva ou cola, furadeira ou similar.

**Como funciona:** Ao incidir luz na janela do rele fotoelétrico, a resistência do LDR<sup>2</sup> diminui, deixando passar corrente, a qual acionará o rele. O rele, por sua vez, desliga os contatos, apagando a lâmpada.

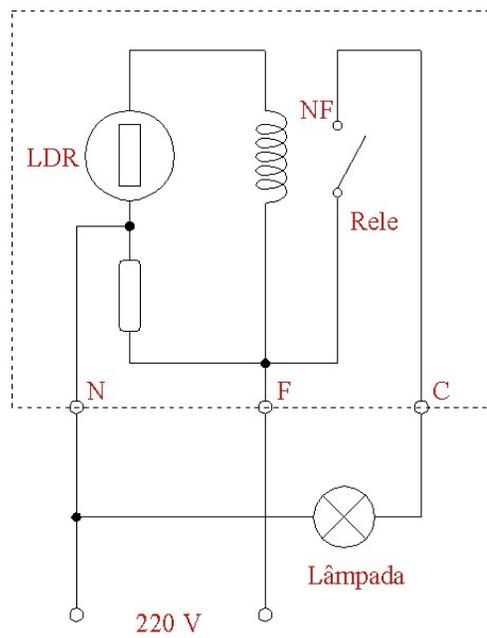
**Montagem:** Solde ou prenda uma fita com fio fase, na parte debaixo do rele, onde marcado F. Em seguida, prenda o fio neutro na marcação N, mantendo contato com um dos fios que saem do soquete da lâmpada. Finalmente, conecte um último fio em C. Veja a montagem na figura 1.

### Esquemas



---

<sup>2</sup> LDR do inglês *Light Dependent Resistor* – Resistor dependente da luz.



## Experimento II: Contador de interrupções

**Introdução:** Nesta experiência usaremos um conjunto ótico composto de um diodo emissor de luz (LED) e um fotodiodo. A idéia do experimento é contar em uma calculadora o número de vezes que um objeto passa entre o feixe de luz.

<i>Componentes</i>	<i>Quantidade</i>
• Conjunto ótico (sensor) de impressora (sensor ótico de fim de curso). Pode ser obtido em sucata de informática ou casas especializadas.	01
• Pilhas pequenas tipo AA.	02
• Suporte de pilhas.	
• Placa universal (perfurada).	01
• Resistor de 66Ω.	01
• Calculadora comum a pilha.	01
• Plug pino banana macho pequeno.	01
• Jack banana fêmea	01

- Outros: fios, solda, fita adesiva ou cola, furadeira ou similar.

**Como funciona:** Ao alimentarmos o LED, este emite um feixe de luz que sensibiliza o fotodiodo. Ao receber o feixe de luz, o fotodiodo altera sua resistência, levando a uma valor próximo de zero. Desta forma, esta resistência funciona como uma chave liga-desliga dependente da luz.

**Montagem:** Os terminais do fotodiodo serão soldados, se possível, ou colados em paralelo com chave referente ao sinal de igual da calculadora. Assim sendo, o fotodiodo funcionará da mesma forma que tecla igual. Toda vez que um objeto interferir no feixe ótico a tecla de igual será sensibilizada.

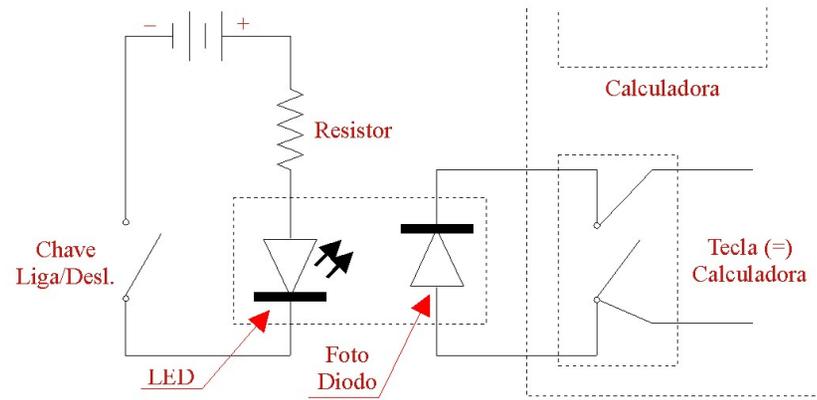
**Procedimento de Contagem:**

Para fazer a calculadora contar de 1 em 1, siga esta seqüência:

- a) digite o número 1 na calculadora;
- b) pressione a tecla +;
- c) digite novamente o número 1.

Agora, toda vez que o feixe for desobstruído, a calculadora somará o valor do número digitado no item c. Em outras palavras, como no item a inserimos o número 1 e no item c também 1, a conta será efetuada, sempre somando mais um.

## Esquemas



### **Experimento III:** Como funciona uma célula fotovoltaica (Solar)

**Introdução:** A célula solar é um fotodiodo com grande área de exposição à radiação luminosa, cuja operação se dá em condições de fornecer energia a uma carga na junção. Assim, o fotodiodo converte energia luminosa em energia elétrica.

O modelo fotovoltaico (célula solar) funciona com uma junção de material silício N e com outra junção de material silício P (dopados). A camada superficial é fina e transparente de forma que a luz possa chegar até a junção das duas regiões onde os fótons são absorvidos liberando cargas de suas ligações atômicas. Estas cargas migram para os terminais do bloco correspondente, elevando o potencial entre as duas placas. Com circuito em aberto é possível atingir tensões de 0,6 – 1,0 volts.

Atualmente, as melhores células solares comerciais são feitas de silício cristalino, com estrutura mostrada na figura abaixo.

A junção é formada por uma fina camada tipo n. Sendo fina, a região n deixa passar radiação luminosa incidente num amplo espectro de frequência. Para aumentar a área de exposição e ao mesmo tempo manter baixa a resistência de contato, o eletrodo superior é feito na forma de um pente, com dente finos, como mostrado na figura.

As melhores células solares de silício tem eficiência de conversão que se aproxima de 15%. A radiação solar no meio de um dia claro, ao nível do mar, tem intensidade na faixa de 70-80 mW/cm<sup>2</sup>. Isto produz, numa célula com área de 40 cm<sup>2</sup>, uma tensão de 0,6V e uma corrente de ±0,9 A. Normalmente as células solares são associadas em série ou em paralelo para produzir tensão e correntes adequados.

<i>Componentes</i>	<i>Quantidade</i>
• Placa universal	01
• Chave H-H	01
• Microamperímetro 100 $\mu$ A	01
• Célula solar 3,2 V	01
• Trimpot 10 k $\Omega$	01
• Resistor 1,2 k $\Omega$	01
• Resistor 10 k $\Omega$	01

- Outros: fios, solda.

**Como funciona:** O microamperímetro funciona como medidor de corrente e ora como voltímetro. Sendo assim, podemos notar a sua sensibilidade para variação de corrente em relação a luz.

## SIMULAÇÕES

### Simulação 1

Agora você deve acessar o endereço na Internet <http://webphysics.ph.msstate.edu/ccp/27-5>.

Aguarde o carregamento do aplicativo. Enquanto isto ocorre, observe a figura abaixo. Leia a descrição e os comandos referentes a esta simulação.

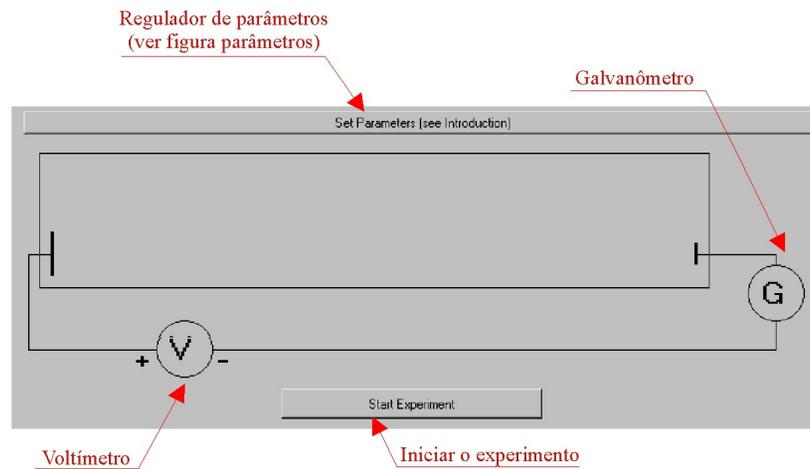
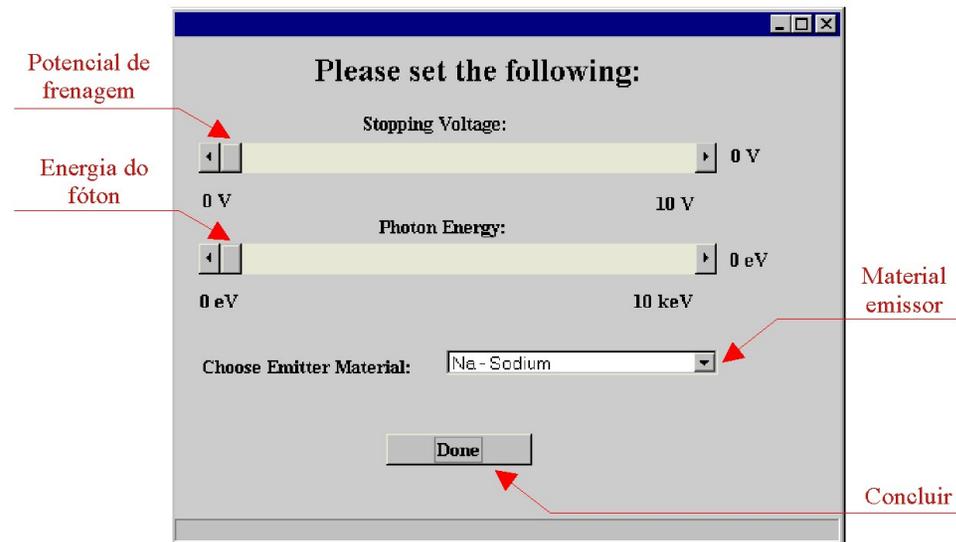


Fig. 1 – Visualização do aplicativo.

## Comandos

- **Regulador de parâmetros:** Este é o principal comando desta simulação. Ao acionar este botão você abrirá uma nova janela, conforme mostrado na figura abaixo.

Fig. 2 – Regulador de parâmetros.



- **Potencial de frenagem:** Este é o valor de tensão aplicado entre as duas placas, cujo objetivo é tentar frear os elétrons emitidos.
- **Energia do fóton:** Neste comando você poderá regular a energia dos fótons que incidirão sobre o metal. Observe o que acontece quando você aumenta a energia desses fótons.
- **Material emissor:** Da mesma forma que na simulação anterior, aqui é possível escolher o tipo de metal que irá emitir os fotoelétrons.
- **Concluir:** Depois de ter feito todos os ajustes necessários, aperte neste botão para retornar a tela anterior, onde se a simulação.
- **Iniciar experimento:** Acione este botão para que o experimento seja iniciado. Todas as configurações que você usou no reguladores de parâmetros serão aplicadas aqui.

**Procedimento:** Novamente você deverá alterar os parâmetros de controle da simulação várias vezes. Toda vez que você perceber que algo diferente aconteceu, anote nas linhas abaixo o que aconteceu e quais parâmetros você utilizou.

**Anotações**

<b>Parâmetros</b>	<b>Observações</b>
Metal -	
Energia do fóton -	
Potencial de frenagem -	
Energia dos fotoelétrons -	
Metal -	
Energia do fóton -	
Potencial de frenagem -	
Energia dos fotoelétrons -	
Metal -	
Energia do fóton -	
Potencial de frenagem -	
Energia dos fotoelétrons -	
Metal -	
Energia do fóton -	
Potencial de frenagem -	
Energia dos fotoelétrons -	

## Simulação 2

Inicialmente você deve acessar o seguinte endereço na Internet: <http://wigner.byu.edu/Photoelectric/Photoelectric.html>.

Aguarde o carregamento total da página e em seguida, compare a imagem do seu monitor com a figura 1.

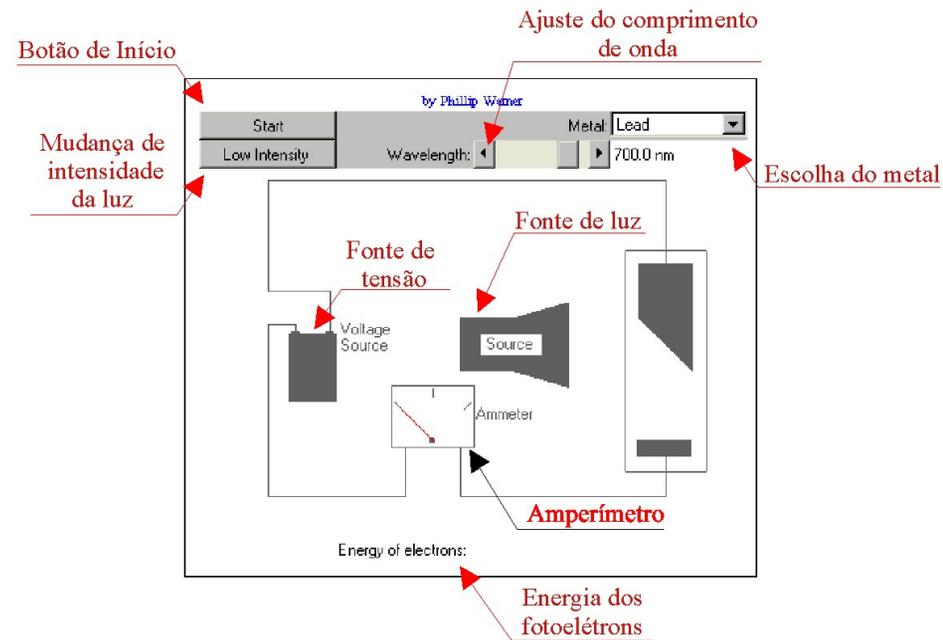


Fig. 1 – Visualização do aplicativo.

Os comandos deste aplicativo estão traduzidos na figura 1, de maneira que você se orientar através desta figura.

### Comandos

- **Ajuste do comprimento de onda:** O primeiro ajuste que você deve fazer diz respeito ao comprimento de onda da luz que incidirá sobre o metal. Observe que o comprimento de onda é expresso em nm (nanometro), ou seja,  $1\text{m} = 1 \times 10^9\text{m}$ . É importante notar que o comprimento de onda está relacionado com a energia emitida sobre a superfície metálica.
- **Escolha do metal:** Nesta caixa, você selecionar o metal que será atingido pela luz. A tradução do nome de cada metal está na tabela abaixo:

Nome	Tradução
<i>Aluminium</i>	Alumínio
<i>Berilo</i>	Berílio
<i>Cesium</i>	Césio
<i>Cooper</i>	Cobre
<i>Iron</i>	Ferro
<i>Lead</i>	Chumbo
<i>Litium</i>	

Nome	Tradução
<i>Molibdenium</i>	Molibdênio
<i>Platinum</i>	Platina
<i>Potassium</i>	Potássio
<i>Silver</i>	Prata
<i>Tungstenium</i>	Tungstênio
<i>Zinc</i>	Zinco

- **Mudança de intensidade da luz:** Neste comando você poderá alterar a intensidade da luz, tornando-a alta ou baixa.
- **Botão início:** Após ter feito todos os ajustes na etapa anterior, acione este botão para iniciar a simulação.

**Procedimento:** Você deverá alterar os parâmetros de controle da simulação várias vezes. Toda vez que você perceber que algo diferente aconteceu, anote nas linhas abaixo o que aconteceu e quais parâmetros você utilizou.

**Anotações**

<b>Parâmetros</b>	<b>Observações</b>
Metal -	
Comprimento de onda -	
Intensidade da luz -	
Energia dos fotoelétrons -	
Metal -	
Comprimento de onda -	
Intensidade da luz -	
Energia dos fotoelétrons -	
Metal -	
Comprimento de onda -	
Intensidade da luz -	
Energia dos fotoelétrons -	
Metal -	
Comprimento de onda -	
Intensidade da luz -	
Energia dos fotoelétrons -	

## Texto II

### A Natureza da Luz

Ao procurarmos entender o funcionamento da máquina fotográfica, podemos identificar vários processos associados à luz, entre os quais se destacam a forma como ela é produzida, onde é refletida, refratada e absorvida. Embora tenham sido discutidos separadamente, em qualquer das situações analisadas eles ocorrem concomitantemente, sendo que às vezes um deles é preponderante aos outros. Nas lentes, por exemplo, ocorre absorção, que faz com que a quantidade de luz que sai da lente seja menor do que a que chega. O processo de reflexão também está presente nas lentes, e acaba produzindo imagens na sua superfície como se fosse um espelho. Porém, nos instrumentos ópticos que utilizam lentes o processo mais importante é a refração da luz, porque os efeitos obtidos através do desvio da luz quando passa de um meio para outro.

Particularmente no processo de absorção da luz, com a discussão da célula fotoelétrica e do filme fotográfico, foi possível identificar uma processos luminosos, elétricos e químicos.

Na lâmpada incandescente, na vela, etc., em todos os exemplos de produção de luz que investigamos, a interação entre luz e matéria foi ressaltada. O que pretendemos agora é apresentar um modelo de matéria e de luz que permite interpretar microscopicamente os vários processos discutidos anteriormente. Isso possibilita também a compreensão de muitas das aplicações tecnológicas que utilizam a luz em seu funcionamento.

É preciso, porém, ter cuidado para não confundir a matéria com sua interpretação. Quando propomos um modelo de átomo, estamos formulando uma hipótese sobre como seria algo que sequer podemos ver. Dessa maneira, a interpretação ou o modelo depende não só dos dados experimentais de que dispomos, mas também da imaginação espacial e matemática, bem como da intuição sobre a natureza, porque os modelos são representações das coisas e não

as coisas.

Freqüentemente acontece de não existir nenhum modelo que permita interpretar satisfatoriamente todas as propriedades conhecidas de um sistema físico. Muitas vezes há dois ou mais modelos - diferentes interpretações e representações da natureza - que disputam entre si a primazia de ser o retrato mais fiel da realidade física. A escolha e a evolução dos modelos dependem ainda de uma complicada disputa entre correntes de opiniões existentes no meio científico.

No caso dos fenômenos ópticos, a interpretação baseada na Física Quântica fornece uma visão de matéria e de luz que permite explicar os processos que identificamos nas situações práticas. Isso não significa que a natureza seja como o modelo diz que ela é, ou que não possam surgir outros modelos e interpretações.

Até o momento, a luz foi tratada como "algo" necessário para que possamos ver e interagir com o mundo através da visão. Isso, entretanto, pouco nos revela a respeito de sua natureza.

Para fotografar, a luz é fundamental para impressionar o filme e sabemos que sua falta produz fotos sem definição e seu excesso produz fotos queimadas. Por isso, quando a luz do Sol é excessiva para determinado filme, usamos filtros que diminuem sua intensidade. Quando a luz é insuficiente, usamos flash para poder aumentar sua intensidade.

A luz também é fundamental para ler, já que sua falta acarreta um esforço visual e seu excesso ofusca a vista, causando um certo desconforto.

Para efetuarem a fotossíntese, as plantas utilizam tanto a luz proveniente do Sol como a fornecida por lâmpadas especiais.

Em qualquer situação, a luz que utilizamos é sempre proveniente de transformações de outras formas de energia em energia luminosa, como as que ocorrem no Sol, nas lâmpadas incandescentes ou mesmo nas velas.

Além disso, nos filme fotográficos, cada ponto da imagem formada no filme corresponde a uma pequena reação fotoquímica ali provocada pela luz incidente. Nos pontos (pequenos grãos) onde não incide a luz, não ocorre reação.

Também o desbotamento dos papéis impressos, como jornais e revistas, e de tecidos, como cortinas e roupas, quando expostos à luz do Sol, só ocorre nas regiões expostas à luz.

Tanto a impressão do filme fotográfico como o desbotamento de superfícies são efeitos que revelam uma ação muito localizada da luz. Esse efeito localizado, para ser explicado, necessita levar em conta que nas interações com a matéria a luz se comporta como partícula. Nesse sentido, considera-se que energia luminosa atinge a matéria na forma de pequenos pacotes. Tais pacotes de energia são denominados fótons.

Essa interpretação permite compreender o princípio de funcionamento dos produtores e absorvedores de luz. Entretanto, ela não é suficiente para explicar a imagem borrada e ampliada produzida pela luz ao passar por um orifício muito pequeno (difração). Da mesma forma não explica como a luz, em determinadas situações, pode ser refletida por uma superfície transparente, enquanto em outras pode ser absorvida ao passar por tipo especial de filtro (polarização).

Para explicar esses processos, o pacote de energia luminosa (fóton) apresentará uma característica diferente, uma vez que ao interagir com a matéria ele se comporta como onda, já que tanto a difração como a polarização são características de processos ondulatórios.

Desta forma, a luz é interpretada como um pacote de energia que, nas interações com a matéria, apresenta dois aspectos: em certas interações se comporta como partícula, em outras se comporta como onda. Esses dois aspectos da natureza da luz fazem parte do Modelo Quântico de luz e recebem o nome de dualidade partícula-onda.

Uma vez que os processos luminosos só são percebidos quando ocorrem interações entre a luz e a matéria, faz-se necessário apresentar também um modelo microscópico de matéria.

*Texto adaptado. GREF, V. 3, página 198.*

### Texto III

#### Teoria Corpuscular da Luz

Na Física Quântica, a matéria é interpretada como sendo construída por moléculas, e os estados físicos (sólido, líquido e gasoso) são estabelecidos de acordo com a agregação maior ou menor entre as moléculas.

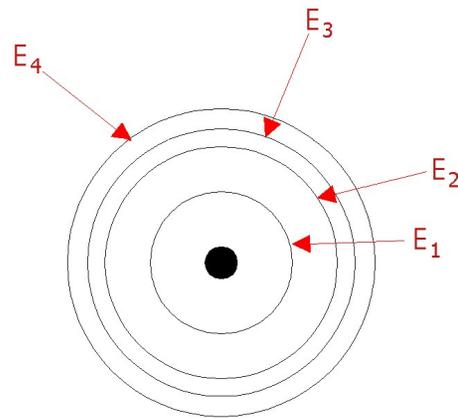
A constituição dessas moléculas se dá pelo agrupamento de partículas menores (iguais ou diferentes), denominadas átomos, que por sua vez são constituídas de partículas ainda menores. A maior parte da massa do átomo está concentrada numa região denominada núcleo, cujo raio é da ordem de  $10^{-14}$  m. O restante dessa massa se encontra a certa distância ao redor desse núcleo, numa espécie de nuvem denominada eletrosfera, cujo raio é da ordem de  $10^{-10}$  m.

No núcleo encontram-se prótons e nêutrons, ao lado de partículas ainda menores e na eletrosfera encontram-se os elétrons. Para termos uma idéia mais clara das dimensões relativas, se um átomo de hidrogênio pudesse ser ampliado de tal forma que seu núcleo tivesse a dimensão de uma azeitona ( $1,0 \text{ cm}^3$ ), o raio da nuvem seria comparável às dimensões de um quarteirão (100 m).

Mesmo para átomos que tenham poucos elétrons, como o de hidrogênio, que possui apenas um, associa-se à eletrosfera a idéia de nuvem, em função do intenso movimento dos elétrons a grandes velocidades, ao redor do núcleo.

A produção, reflexão, transmissão e absorção da luz são processos que envolvem apenas interações com os elétrons, na eletrosfera dos átomos.

De acordo com esse modelo de matéria existem na eletrosfera, região onde a probabilidade de se encontrar elétrons é maior. Tais regiões, denominadas camadas, às quais são associadas quantidades de energia bem definidas - níveis de energia -, comportam diferentes números de elétrons.

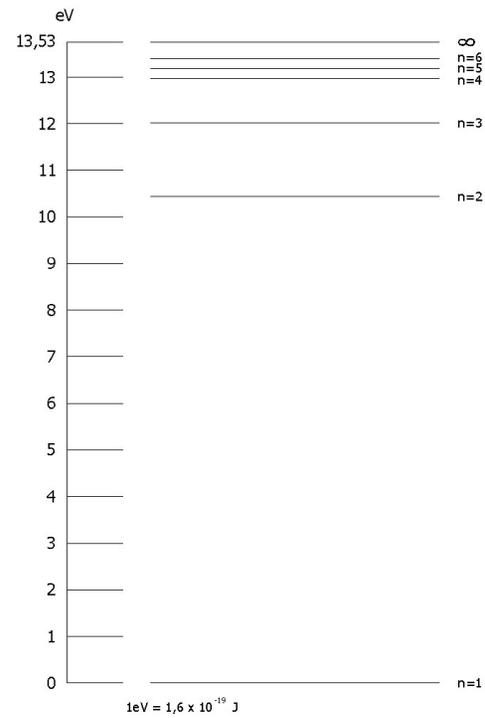


Representação simplificada das camadas eletrônicas, em corte, para um átomo isolado, onde  $E_1 < E_2 < E_3 < E_4$  correspondem à energia dos diferentes níveis.

Se num átomo isolado os elétrons estiverem distribuídos entre os possíveis níveis de energia mais baixos, tal átomo se encontra no seu estado estável, denominado estado fundamental. Quando pelo menos um de seus elétrons absorve energia, ele muda para um nível mais energético, mais externo em relação ao núcleo, e o átomo é considerado excitado.

A excitação de um átomo, entretanto, não persiste por tempo indefinido. Os elétrons retornam ao nível de origem ao emitirem as quantidades de absorvidas anteriormente. Por não ocorrerem para quaisquer valores de energia, mas apenas para valores definidos, correspondentes às diferenças de energia associadas aos níveis, tais mudanças são denominadas *saltos quânticos* (saltos de um valor definido).

Nos sólidos e líquidos, entretanto, existem ainda interações intermoleculares que levam à formação das estruturas próprias dos diferentes materiais. Tais interações, por envolverem um número muito grande de átomos, provocam um aumento de possíveis níveis permitidos.



Representação dos níveis de energia para o átomo de hidrogênio.

A interação luz-matéria, ou seja, a incidência de luz sobre um outro material, pode ser interpretada como um processo de transferência de energia onde cada cor corresponde a uma certa quantidade de energia. Assim, segundo

este modelo, as diferentes cores de luz distinguem-se pelos diferentes “pacotes” de energia (fótons).

No caso dos materiais, uma forma de diferenciá-los é através dos “saltos quânticos” efetuados pelos elétrons dos seus átomos. O tipo de interação entre luz e matéria depende, então, da energia do fóton incidente e da energia envolvida nos “saltos quânticos” permitidos para os elétrons dos átomos daquele material.

Quando o fóton incide com a energia menor que o salto quântico permitido para os elétrons, eles não mudam de nível.

Se a energia do fóton incidente coincidir com a diferença de energia entre os níveis que correspondem a “saltos quânticos” permitidos, o fóton incidente é absorvido e posteriormente reemitido com o retorno do elétron ao nível. Esse retorno, contudo, pode se efetuar de duas formas distintas: reemissão do fóton incidente ou emissão de dois fótons de diferentes energias. No primeiro caso temos o retorno imediato ao nível de origem, ocorrendo a reemissão do fóton incidente. Já a emissão de dois fótons de energias diferentes, correspondendo cada um a “saltos quânticos” distintos, ocorre pela passagem por um nível intermediário.

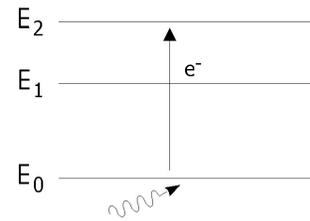


Fig. 1 - O fóton de energia  $E_2-E_0$  é absorvido e o elétron salta do nível  $E_0$  para o nível  $E_2$ .

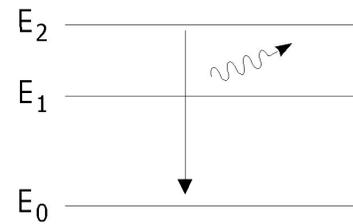


Fig. 2 - O elétron retorna ao nível  $E_0$ , emitindo um fóton de energia  $E_2-E_0$ .

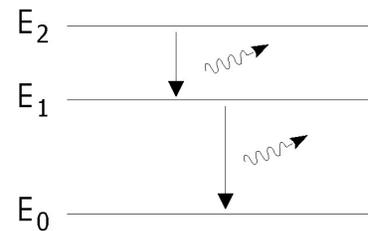


Fig. 3 - O elétron retorna ao nível  $E_0$ , passando por  $E_1$ , emitindo dois fótons de energias respectivamente iguais  $E_2-E_1$  e  $E_1-E_0$ .

Em qualquer das situações, entretanto, a energia do fóton incidente é igual à energia do fóton ou dos fótons emitidos, uma vez que esse modelo pressupõe o princípio de conservação da energia.

Dependendo da sua energia, o fóton emitido pode ser classificado de visível, quando é capaz de impressionar as células fotossensíveis do olho, de radiação de baixa energia (menor que o visível) e de radiação de alta energia (maior que o visível).

Texto adaptado. GREF, V. 2, página 199

## Questionário<sup>3</sup>

Após ter feito a leitura dos textos II e III, responda o questionário abaixo para discussão em aula.

1. Imagine-se em uma praia num dia ensolarado, utilizando um guarda-sol para se proteger dos raios solares. Se por acaso começasse a chover, você poderia utilizar o guarda sol como guarda-chuva? Por quê?

---

---

---

---

---

2. O que é necessário para que enxerguemos um objeto?

---

---

---

---

---

---

<sup>3</sup> Questionário extraído do módulo de ensino de OFUGI, Daniel et alli, **A Natureza da Luz**. Elaborado para a disciplina de Instrumentação para o Ensino de Física II – UFSC.

3. Existe alguma relação entre a forma de um objeto e sua sombra?

---

---

---

---

---

4. O morcego é um animal praticamente cego e que se guia através de sons de frequência muito alta (ultra-som) que ele emite, incidindo nos objetos e refletindo de volta para ele. Seria possível fazer alguma relação entre a nossa forma de enxergar e a do morcego?

---

---

---

---

---

5. Suponha que você passará toda a manhã e tarde na praia, mas não quer tomar sol. Você e o guarda-sol poderiam permanecer sempre na mesma posição? Como essa situação poderia ser contornada?

---

---

---

---

---

---

6. Por que enxergamos distorcido quando observamos um objeto que se situa atrás de vidro ondulado?

---

---

---

---

---

## Texto IV

### O Átomo de Bohr

O modelo atômico de Rutherford considera o átomo como sendo constituído de um núcleo – onde estariam confinados os prótons -, em torno do qual estariam orbitando os elétrons. No entanto, esse modelo, que previa o movimentos dos elétrons em torno do núcleo, se incompatibiliza com a teoria eletromagnética clássica. Essa teoria previa, para uma situação desse tipo, um perda contínua de energia para tais elétrons, levando-os a espiralar em direção ao núcleo.

Em 1913, o físico dinamarquês Niels Bohr, incorporou concepções quânticas ao modelo de Rutherford, admitindo que cada átomo possuiria uma série de valores de energia perfeitamente determinados, que corresponderiam ao níveis energéticos atribuídos ao átomo. Tais níveis corresponderiam, por sua vez, a órbitas bem definidas, nas quais os elétrons não irradiariam energia. Pressupôs ainda que também a quantidade de momento angular dos elétrons em suas órbitas deveria assumir valores bem definidos. Essas idéias se mostraram coerentes com o átomo de hidrogênio, permitindo interpretar inclusive as séries espectroscópicas obtidas por Balmer e outros, que tinham permanecido sem explicação com as teorias até então vigentes.

Através destes pressupostos e das equações da Física Clássica, Bohr calculou o valor da menor órbita possível ( $R_1 = 0,53 \times 10^{-10} \text{m}$ ) e da energia a ela associada ( $E_1 = 13,6 \text{eV}$ )<sup>4</sup>. Tal raio e tal energia correspondem ao estado fundamental do átomo de hidrogênio. Para outras órbitas, os raios e as energias são determinados respectivamente pelas relações:  $R_n = n^2 R_1$  e  $E_n = -13,6/n^2 \text{eV}$ , que trazem incorporada a idéia de quantização de órbitas, onde  $n=1, 2, 3...$  representa os diversos níveis de energia, e o sinal menos indica que o elétron não possui energia suficiente para escapar do átomo;

<sup>4</sup> Um elétron-Volt (1eV) corresponde à energia necessária para que um elétron atravessasse, no vácuo, uma região que apresente uma tensão de 1 Volt.

à medida que  $n$  cresce, o valor de  $E_n$  aproxima-se de zero, ou seja, o elétron fica cada vez menos preso ao átomo, no limite, quando  $n \rightarrow \infty$ ,  $E_\infty = 0$ .

*Texto adaptado. GREF, V. 3, página 337*

## Leitura Complementar I

### EFEITO FOTOELÉTRICO

O efeito fotoelétrico é a liberação de elétrons de certos metais e semicondutores pela ação da luz ou outra radiação. Os três diferentes efeitos fotoelétricos são fotoemissivos, fotocondutivo e fotovoltaico.

No efeito fotoemissivo, a energia radiante atingindo a superfície do metal, como o césio, cede energia suficiente para os elétrons de tal forma que eles são emitidos da superfície para o espaço. Numa célula fotoelétrica operando por este princípio, os elétrons emitidos são coletados por um eletrodo positivo. Sob a influência de uma tensão aplicada eles criam uma corrente que é linearmente proporcional a intensidade da luz incidente.

No efeito fotocondutivo a luz modifica a condutividade elétrica do material. Nos semicondutores, a maior parte dos elétrons são fixados nas camadas de valência dos átomos, mas alguns poucos elétrons com energias mais altas tem suas ligações quebradas e se tornam livres para

serem portadores de carga na condução. A quantidade de energia necessária para quebrar as ligações é chamada de *gap* de energia (ou função trabalho). Se a luz carrega suficiente energia, então a absorção da luz irá liberar um elétron e este irá tomar parte no processo de condução no semiconductor. O incremento na condutividade elétrica é proporcional a intensidade da luz recebida e causa um incremento na corrente de um circuito externo. Células fotocondutivas são comumente usadas para ligar e desligar a iluminação de rua e em alguns casos para controlar luzes internas de automóveis.

No efeito fotovoltaico a energia é aplicada a região de junção de um diodo semiconductor. Os fótons incidentes quebram as ligações dos elétrons na região de junção criando cargas livres como pares elétrons-lacunas. Estas cargas livres migram para os dois lados da junção, aumentando a densidade de carga lá e aumentando a voltagem da junção. Os materiais que são disponíveis são sensíveis desde a luz visível

até a região do infravermelho. A célula fotovoltaica é única porque converte a luz diretamente em eletricidade. Nenhuma corrente ou tensão externa é necessária como ocorre em relação aos outros dois efeitos. Este tipo de célula, chamada **célula solar** é usada para converter energia solar.

A explicação do efeito fotoelétrico foi dada por Albert Einstein em 1905 e acelerou a transição da Física Clássica para a Moderna. A teoria do eletromagnetismo da luz prevê a relação entre intensidade da luz incidente e energia do elétron emitido. A intensidade da onda de luz depende do quadrado

de sua amplitude e é independente da frequência. Medições cuidadosas mostraram que o incremento da intensidade da luz causa a liberação de mais fotoelétrons sem nenhum incremento da sua energia. E mais, foi mostrado que a energia era dependente do comprimento de onda (ou frequência); menores comprimentos de onda provocam a emissão de elétrons de maior energia.

## Leitura Complementar II

### SEMICONDUCTORES

Um semicondutor é uma substância que tem resistência elétrica situada entre aquela dos isoladores elétricos e condutores. A principal aplicação dos semicondutores hoje é a fabricação de componentes eletrônicos de estado sólido frequentemente miniaturizados e de circuitos integrados.

#### Níveis de Energia e Camadas de Valência.

A resistência dos semicondutores, isoladores e condutores é determinada em parte pelo número de elétrons que ocupam o nível de energia mais externo o átomo, o qual é chamado de camada de valência dos átomos constituintes destas substâncias. Sob certas condições, tais como a aplicação de uma fonte de energia externa, os elétrons podem ser desalojados da banda de valência e levados a sair do

átomo. Tal movimento de elétrons é chamado de corrente elétrica.

O número máximo de elétrons que podem ocupar a banda de valência é oito, e um átomo com oito elétrons na banda de valência é, sob condições normais um excelente isolante. Por causa da banda de valência preenchida, ele pode ser considerado em um estado de equilíbrio, no qual dificilmente vai receber ou doar um elétron para um átomo vizinho com a banda de valência não preenchida. Os gases chamados de Gases Inertes (hélio, neônio, kriptônio, xenônio e radônio) têm oito elétrons de valência e são isolantes elétricos. Elementos com seis ou sete elétrons também são bons isolantes.

Átomos tendo um, dois ou três elétrons em suas bandas de valência, geralmente contribuem prontamente dando ou recebendo elétrons dos átomos vizinhos. Elementos compostos de tais átomos são bons condutores elétricos.

Metais como o ouro, prata e cobre, tendo um único elétron em sua banda de valência, são excelentes condutores.

Elementos tendo 4 elétrons na banda de valência dos seus átomos e compostos envolvendo elementos com 3 elétrons na banda de valência e um segundo elemento com cinco elétrons na banda de valência, podem ser semicondutores. A unidade de resistência elétrica é o ohm. O

silício, um semicondutor comum, tem resistência de 50.000 ohms/cm<sup>3</sup>; a prata por outro lado é um excelente condutor, tendo resistência de apenas 0,00005 ohms/ cm<sup>3</sup>. A mica, um bom isolante, tem a resistência de 1 trilhão ou 10<sup>12</sup> ohms/cm<sup>3</sup>!!

## Texto V

### Condutores e Isolantes

Um isolante é uma substância que é um mau condutor de calor ou de eletricidade. Um material que é um mau condutor de calor é, geralmente, também um pobre condutor de eletricidade (tendo em vista que ambos os fenômenos são dependentes de transporte de energia por elétrons). Um condutor tem muitos elétrons livres (geralmente 1 por átomo), os quais são livres para se mover através do material, enquanto em um isolante, praticamente todos os elétrons estão ligados aos átomos.

Embora a distinção entre condutores e isoladores não seja algo absoluto, ela é dramática. Ela pode ser expressa em termos da resistividade, a qual é medida como a resistência em ohms que um pedaço de material oferece a passagem de corrente elétrica. Por exemplo, as resistividades dos metais, bons condutores esta entre  $10^{-8}$  a  $10^{-5}$  ohm-m e dos isolantes, entre  $10^7$  a  $10^{17}$  ohm-m

Situados entre condutores e isolantes estão os semicondutores, os quais tem resistividade, da ordem de 1 ohm-cm. Eles incluem substâncias tais como o germânio e o silício. Impurezas podem alterar bastante as propriedades de tais materiais. Por exemplo, a adição de boro ao silício puro na razão de 1:100.000 aumenta a condutividade na temperatura ambiente cerca de mil vezes.

A origem das propriedades condutoras muito diferentes pode ser explicada pela teoria de bandas dos sólidos. Em um sólido existem certas bandas contínuas de estados de energia que os elétrons podem ocupar, separadas por bandas proibidas ou espaços de separação (*gaps*) entre elas. A condução vai ter lugar se os elétrons preenchem parcialmente uma banda de energia, a banda de condução. Eles estão livres então para viajar através dos sólido.

Num isolante, a camada externa (última) de valência, está completamente ocupada por elétrons, de forma que esta camada está separada por uma larga faixa de energia da banda de condução mais alta. Os elétrons na banda de valência, que já está preenchida, não podem responder a um campo externo, desde que para isto seria necessário que eles ocupassem outros estados que já estão ocupados (dois elétrons não podem ocupar simultaneamente um mesmo estado pelo Princípio de Exclusão de Pauli). Os elétrons também não podem pular através do largo intervalo (*gap*) até a próxima banda de energia vazia, exceto se o material estiver em alta temperatura, quando então os elétrons podem ser termicamente excitados até níveis mais altos, ou se imperfeições ou impurezas estão presentes.

## Texto VI

### A Corrente Elétrica

O comportamento condutor dos materiais semicondutores exige um estudo aprofundado da teoria quântica e da física do estado sólido, dos quais no presente estudo apenas iremos citar alguns aspectos fundamentais, que permitam, mesmo que aproximadamente, o entendimento do comportamento de certos materiais classificados como semicondutores.

Retornemos por um instante a estrutura de um cristal, e aos seus planos de distribuição dos átomos tomando como exemplo uma rede cristalina cúbica. Estes átomos assim dispostos possuem seus elétrons posicionados em relação ao seu respectivo núcleo, de acordo com o nível de energia de cada elétron; este nível pode ser variado pela ação de energias externas, quando então podemos ter a variação das características do cristal (e conseqüentemente do material do que faz parte) quando a elevação de energia do elétron o desloca de sua órbita torno do núcleo.

Portanto, a análise dos níveis de energia, que no seu conjunto, formam as camadas de energia ou **bandas de energia**, é a base para se determinar o comportamento de tal material ou elemento.

Estas camadas são classificadas em três grupos:

- a *camada inferior*, cujo nível de energia mais elevado é o do elétron de valência;
- a *camada superior*, chamada também de camada condutora, e onde se situam os elétrons de deslocamento;
- e, eventualmente a *camada proibida*, livre de elétrons.

A Fig. 1 representa graficamente, em função do nível de energia  $E$ , estas 3 camadas. Em cada um dos níveis de energia da camada inferior, encontramos 2 elétrons, concentrados mais nos níveis de energia mais próximos do núcleo ou seja, em níveis de energia de valor mais baixo. Resulta daí uma distribuição de elétrons como os da Fig. 2 típica

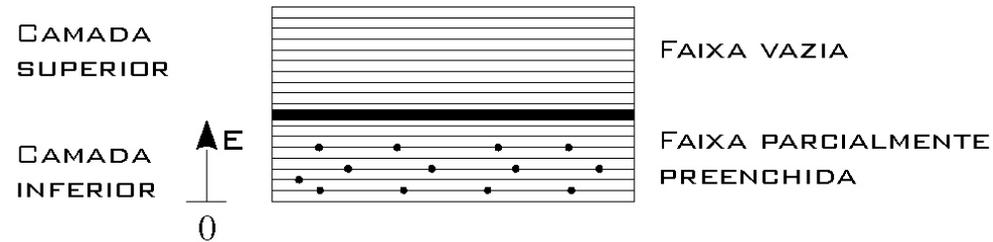


Fig. 1 – Sólido com elétrons/camada, com a camada inferior parcialmente preenchida.

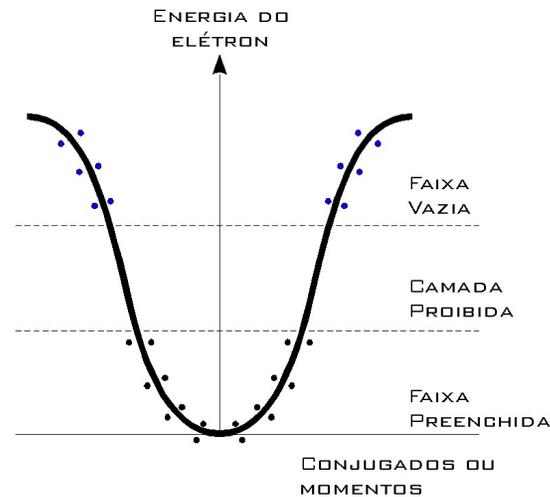


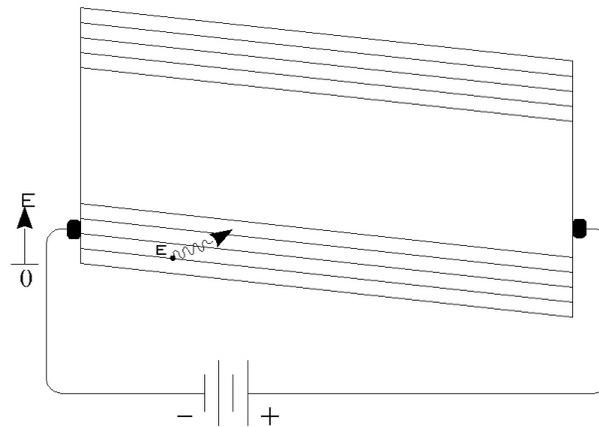
Fig. 2 – Distribuição de cargas em função do nível de energia.

de materiais condutores. Perante uma dada temperatura constante, e na ausência de outras energias externas, esta população de elétrons tem um deslocamento equilibrado, mantendo-se assim a característica do elemento; e, mesmo em movimento interno, não dão origem a uma corrente elétrica. Os momentos ou conjugados destes elétrons movimento interno, podem ser representados como na Fig. 1, onde se quer demonstrar o equilíbrio de deslocamentos, dando assim uma parábola simétrica. Já um nanosegundo mais tarde, a distribuição será diferente do que a da Fig. 1; porém se não houve energia externa de qualquer natureza atuando, então a simetria será mantida.

Vamos analisar agora, o mecanismo desta condutividade. Se a este conjunto de elétrons aplicarmos uma energia

externa, elétrica por exemplo, a diferença de potencial assim existente romperá o equilíbrio de posições e movimentos antes abordados. Aqueles elétrons que se deslocavam na direção do campo externo serão acelerados, os demais, retardados. Conseqüentemente, o gráfico dos níveis energia se deformará, “inclinando-se” como mostra a Fig. 3. Dentro deste campo, um dado elétron “E” da figura, recebendo energia externa passará sucessivamente a níveis de energia mais elevados, podendo atingir o nível mais elevado da camada inferior, que é a camada valência, e, se mais energia receber, passará a ocupar uma posição externa à camada inferior. Em contrapartida, os elétrons que estão se deslocando no sentido inverso ao analisado, com a desaceleração; que estão sofrendo, irão reduzir o seu nível de energia e assim ocuparão sucessivamente, níveis mais baixos, mais próximos do núcleo.

Fig. 3 – Aplicação de uma diferença de potencial cria uma aceleração de elétrons de valência (E).



O efeito desta modificação é o de desbalancear o conjunto de elétrons dos dois lados da parábola representativa dos níveis de energia função do movimento, tal como representa a Fig. 4. E deste desbalanceamento, com uma clara

resultante em um dos sentidos, levará a um acúmulo de elétrons em um dos lados, e, em conseqüência, o aparecimento da corrente elétrica ou a chamada condução metálica.

Continuando o raciocínio neste sentido, uma vez que a diferença potencial continua aplicada, podemos concluir que o desbalanceamento se amplia continuamente, dando origem a um número cada vez maior de elétrons em movimento, o que deveria resultar, perante uma diferença de potencial constante, numa contínua elevação da corrente. Tal fato não ocorre devido aos efeitos da dispersão inelástica, segundo a qual, quanto maior o número de elétrons que se move a níveis de energia cada vez mais elevados do lado direito da parábola da Fig. 4, tanto maior é o número de elétrons que reduzem seus movimentos lado esquerdo, dando origem à um acréscimo proporcional de colisões entre elétrons e átomos, do que resulta uma perda de energia, que conhecemos por perda joule e que se apresenta na forma de calor. Recupera-se assim, uma estabilidade no deslocamento dos elétrons, e com isto uma constância da corrente circulante.

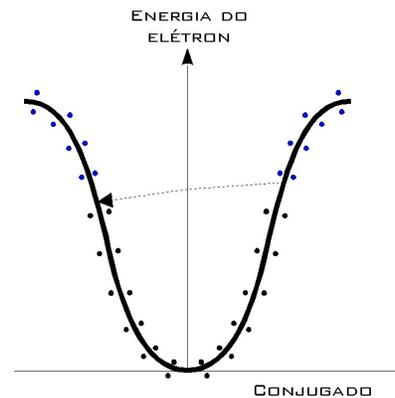


Fig. 4 – Pela ação do campo elétrico, ocorre uma circulação de cargas, que dão uma distribuição como a representada.

Alterando-se as condições de intensidade da energia elétrica aplicada, repete-se o mesmo processo, até de estabelecer uma nova condição de equilíbrio, obedecendo à relação linear expressa pela Lei de Ohm.

Em termos práticos, o deslocamento apresentado pela parábola nunca excede a fração de 1% do total dos elétrons envolvidos, mesmo no caso de elevadas correntes em bons condutores, do que se conclue que a corrente total representa apenas uma pequena parte dos elétrons da valência existentes.

Passando-se, nesta análise estrutural, aos materiais chamados isolantes, encontraremos a distribuição dos níveis de energia como representados na Fig. 5, em que, em cada nível estão situados 4 elétrons, o que já nos informa que materiais de valência 4, quando associados entre si, tem comportamento isolante. Tal fato é também confirmado pelo fato de que, em tais estruturas, os elementos de valência IV associam 2 a 2, dando como resultado, camadas de valência com 8 elétrons, que tem um comportamento altamente estável perante agentes externos. Resulta daí seu “comportamento isolante”, onde todos níveis de energia estão repletos de elétrons, e assim não há deslocamentos, e onde a camada proibida é bastante mais longa do que nos condutores, refletindo assim a maior dificuldade dos elétrons se deslocarem, ou, em outras palavras, de poder circular uma corrente elétrica.

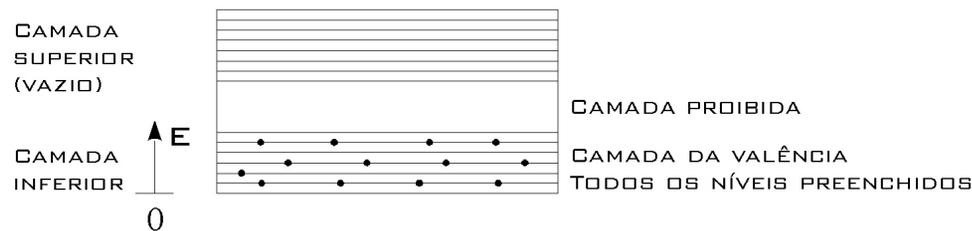


Fig. 5 – Distribuição típica de materiais isolantes.

Concluímos daí que, baseado neste modelo, definem-se:

- **Condutores**, como substâncias onde a camada mais baixa de energia está apenas parcialmente preenchida pelos elétrons de valência, facilitando seu deslocamentos;
- **Isolantes**, como aquelas substâncias onde a camada mais baixa de energia está completamente preenchida com elétrons de valência, impossibilitando, naquele nível, o deslocamento de elétrons.

E os materiais semicondutores?

Se lembrarmos novamente do modelo das camadas de energia, e se aplicarmos ao elemento considerado uma energia capaz de transferir alguns elétrons da camada inferior à de condução, através camada ou banda proibida, estes elétrons encontrarão também um número ilimitado de níveis de energia para os quais estes elétrons podem ser acelerados ou desacelerados pela ação da energia externa aplicada, de modo que poderá resultar uma corrente elétrica mensurável. Desta forma, uma substância inicialmente isolante, poderá apresentar uma fraca condutividade, sendo este valor diretamente variável com o número de elétrons transferidos.

Esta situação vem representada na Fig. 6.

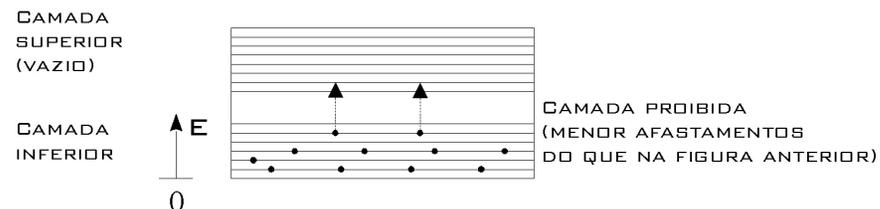


Fig. 6 – Distribuição típica de materiais semicondutores.

Quando uma tal transferência de elétrons ocorre, rompe-se uma ligação de valência e aparece na camada inferior a falta de um elétron. Esta falta é designada como uma “lacuna”, a qual, por sua vez, pode influir no próprio comportamento condutor dos elétrons da camada inferior, ao ser ocupada por um elétron de nível menor, e transferindo assim a “lacuna” para um nível mais baixo. E assim sucessivamente. Vemos portanto, que esta lacuna se desloca no sentido inverso do elétron em movimento. Em suma, podemos imaginar a lacuna com uma partícula idêntica ao elétron, com igual tamanho, carga e massa, porém com polaridade oposta, ou seja, positiva, e que tem deslocamento também oposto aos elétrons.

Energias capazes de levar à movimentação analisada dos elétrons são diversas, e dependem da matéria prima. Ou seja, o material considerado tem que ser “sensível” à forma de energia que está atuando.

De modo amplo, a energia calorífica (ou simplesmente o calor), influi sensivelmente sobre todos os materiais, dependendo da sua estabilidade térmica, que vem a ser a sua capacidade de suportar certos níveis de temperatura sem se alterar. Este calor pode ainda ser o resultado somatória de uma fonte externa e de perdas internas resultantes da própria movimentação ou vibração dos elétrons. Em um material em que se apresenta um tal processo, a condutividade se eleva com elevação de temperatura, tendo portanto um comportamento inverso ao dos metais.

*Texto adaptado do livro de SCHIMDT, Walfredo. **Materiais Elétricos**. Volume 1.*

## Texto VII

### FOTOELETRICIDADE

#### *Previsão Clássica*

Já era um fato conhecido antes do final do século XIX que quando incidimos luz ultravioleta, por exemplo, sobre uma superfície metálica, alguns elétrons podem ser ejetados dessa superfície. Esse fenômeno, conhecido como **efeito fotoelétrico**, pode ser facilmente compreendido de um modo qualitativo, pois sabe-se que a radiação eletromagnética incidente implica a existência de campo elétrico e magnético. Estes campos, principalmente o campo elétrico, podem exercer forças nos elétrons dentro do metal, causando assim sua emissão.

Porém, haviam certos aspectos desse fenômeno que não se adaptavam à visão clássica tradicional (teoria ondulatória da luz) do que deveria acontecer. Vejamos:

1. Para uma frequência fixa de luz incidente, observou-se que não importa quão intensa seja a radiação incidente, a energia cinética dos elétrons é sempre a mesma. Mas, o número de elétrons emitidos varia com a intensidade.

**Previsão Clássica:** A luz de alta intensidade é portadora de muita energia, por ser uma onda eletromagnética de intenso campo elétrico, espera-se que produza grandes forças nos elétrons metálicos, aumentando, portanto, a energia cinética dos fotoelétrons.

2. Se a radiação incidente tem uma frequência muito baixa, nenhum fotoelétron é emitido, independente da intensidade da luz incidente. Para frequências acima deste valor mínimo, a energia cinética dos elétrons dos elétrons emitidos é proporcional à frequência da luz.

**Previsão Clássica:** Esperava-se que os elétrons fossem emitidos em qualquer frequência, se a intensidade da luz fosse alta o suficiente.

### ***Teoria Corpuscular***

Em 1905, Einstein propôs a teoria do efeito fotoelétrico que concordava com os resultados experimentais até então obtidos e posteriormente com medidas mais precisas feitas por Millikan e outros pesquisadores. Einstein afirmou que a radiação eletromagnética de frequência  $f$ , continha pacotes de energia  $E = h.f$ , onde  $h$  é a constante de Planck. Ele viu a energia total da radiação incidente como a soma das energias destes pacotes quantizados, ou fótons. Os elétrons dentro de um metal estão ligados, ou confinados, dentro do material, e é preciso certa energia mínima  $U_0$  conhecida como função trabalho para causar a ejeção fotoelétrica. Einstein afirmou que quando um elétron é ejetado, ele absorve toda a energia de um único fóton. Como a energia é conservada no processo, a energia  $E$  deve ser igual a soma da função trabalho  $U_0$  com a energia máxima do elétron emitido  $U_k$ .

$$E = h.f = U_k + U_0$$

A explicação proposta implica que cada processo de ejeção ocorre por causa de algum evento microscópico no

qual um elétron absorve um fóton e depois deixa a superfície.

Para entendermos como os aspectos observados acima são explicados por este modelo, analisemos a equação acima. Se a frequência da radiação incidente for muito pequena, em particular, menor que  $U_0/h$ , então os fótons têm uma energia menor que função trabalho, ou seja, ele pode absorver o fóton, aumentando sua energia dentro da substância, mas no processo, este elétron não adquire energia suficiente para deixar o metal. Isso explica o por quê de existir uma frequência limiar, abaixo da qual não haverá qualquer ejeção de elétrons. Acima deste limite, a ejeção de elétrons ocorre, independente da intensidade da radiação incidente. Em outras palavras, a energia transportada por cada fóton  $E = h.f$ . Assim a energia cinética máxima dos elétrons ejetados é sempre  $U_k = h.f - U_0$ . Acima da frequência limite, essa energia máxima aumenta linearmente com a frequência. Também é claro, quanto mais fótons na radiação incidente, maior número de elétrons podem ser emitidos.

Observe que quanto maior a intensidade da luz incidente, mais fótons atingem a superfície do metal, fazendo com que um número maior de elétrons possam ser emitidos.

É importante frisar que a energia cinética  $U_k$  é a energia cinética máxima. Os elétrons podem deixar a superfície com energia menor que esse valor máximo já que podem perder parte de sua energia em processos de colisão enquanto escapam do metal. A razão para a rapidez da ejeção pode ser entendida pois o elétron absorve um fóton de modo rápido e deixa a superfície. A explicação dada por Einstein da emissão fotoelétrica não requer intervalo de tempo durante o qual a energia é acumulada no metal. Em 1916 R. A Millikan numa série de medidas comparativas e cuidadosas confirmou a teoria de Einstein.

## Leitura Complementar III

### DISPOSITIVOS FOTOELÉTRICOS

#### Célula Fotoelétrica

A célula fotoelétrica é um dispositivo que é ativado pela energia eletromagnética na forma de ondas de luz. Existem três tipos de célula fotoelétrica, as quais correspondem a três diferentes formas de **efeito fotoelétrico** que empregam: a célula fotocondutiva, a célula fotoemissiva e a célula fotovoltaica, também conhecida como célula solar. As duas primeiras são dispositivos passivos que dependem de uma corrente ou tensão externa. Já a célula fotovoltaica é ativa, convertendo energia luminosa diretamente em energia elétrica.

#### Célula Fotocondutiva

A célula fotocondutiva é o dispositivo fotoelétrico mais antigo, tendo sido desenvolvido pela primeira vez no século XIX. Também é conhecida como fotoresistor. Células fotocondutivas são utilizadas para ligar e desligar lâmpadas de rua automaticamente. Elas servem como dispositivos contadores em linhas de produção e também podem ser empregues em vários sistemas de alarme. Também são familiares em supermercados, onde são usadas como sensores para leitoras de código de barra. Para fotografia, são utilizadas como medidores de intensidade luminosa.

Uma célula fotocondutiva moderna usa a energia da luz para liberar elétrons de sua camada de valência num material semiconductor. O número de cargas livres num semiconductor é relativamente limitada a temperatura ambiente, então a adição de elétrons liberados pela luz aumenta sua

condutividade (reduz sua resistência). A resistência pode variar de várias centenas de milhares de ohms no escuro a poucos ohms sob a luz solar. Para aumentar a resistência no escuro e reduzir a corrente, o caminho de condução é intercalado de forma a produzir este efeito.

Algumas substâncias são fotocondutivas, por exemplo: sulfeto de chumbo (PbS), selenito de chumbo (PbSe), telurídio de chumbo (PbTe) são sensíveis a radiação infravermelha, já o sulfeto de cádmio (CdS) tem sensibilidade a luz visível. Variações na corrente de saída de um miliampere (1mA) por lúmen são possíveis.

### Célula Fotoemissiva

A célula fotoemissiva, ou fototubo, apareceu pela primeira vez em 1920. Tais células são conhecidas como “olhos elétricos” que acionam a abertura automática de portas quando uma pessoa intercepta um raio de luz. Elas também ser usadas de maneiras similares às células fotocondutivas em outros sistemas automáticos. Na forma de tubos

fotomultiplicadores são usadas na astronomia para medir radiação eletromagnética de objetos celestes.

Uma célula fotoemissiva é construída com um ânodo de fio e um cátodo semicilíndrico com uma superfície emissiva, selada num bulbo de vácuo ou preenchida com uma gás. Camadas monoatômicas de césio, potássio ou rubídio são usadas como superfícies catódicas. Fótons que atingem o cátodo transferem sua energia para os elétrons da superfície. Alguns elétrons podem sobrepor a força de ligação e serem emitidos. Estes elétrons emitidos são atraídos para ânodo positivo, produzindo uma fotocorrente da ordem de microampères. Em muitas aplicações, fotodiodos semicondutores substituíram os fototubos.

### Célula Fotovoltaica

As primeiras células fotovoltaicas apareceram logo após as células fotoemissivas. Elas agora são usadas numa enorme variedade de sistemas eletrônicos, sendo por exemplo, sistemas de luz moduladas usados na comunicação

com fibra ótica. Quando o Sol é a fonte de luz, estas células são conhecidas como células solares.

Células fotovoltaicas são diodos de uma ampla área montados sobre camadas de silício, formando um sanduíche. A camada superficial é muito fina e transparente, permitindo a passagem da luz para que ela chega até as junções da região do sanduíche de silício. Nesta região os fótons são absorvidos, liberando cargas de suas ligações atômicas. Estas cargas migram para os terminais, aumentando o potencial.

Em um circuito aberto a tensão chega a 0,6-1,0 volts e num curto circuito a corrente pode ser de poucos mA.

Células podem ser conectadas em série para aumentar a voltagem e a corrente de saída pode aumentar através de conexões paralelas.

A eficiência típica de células solares são de 10 a 15 por cento. Eficiência de 30% pode ser atingida, entretanto, pesquisadores esperam poder atingir eficiência da ordem de 40% ou mais.

## Leitura Complementar IV

### COMUNICAÇÃO E CONTROLE COM LUZ INFRAVERMELHA

Os controles utilizados para acionamento remoto de aparelhos eletrodomésticos (TV, vídeo, som, ar condicionado), operam, em geral, utilizando a faixa de luz infravermelha (abaixo da frequência de luz visível) para transferência de ordens entre o controle remoto e o aparelho que está controlado.

O controle deve ser usado no mesmo ambiente em que está o aparelho controlado e deve ser direcionado para o aparelho para poder funcionar. Podemos comparar a um fecho de luz de lanterna, jogando esta luz sobre a placa receptora do aparelho que está sendo controlado.

Como é que o aparelho entende as ordens do controle remoto?

Dentro do controle as diversas ordens são associadas a determinado tipo de emissão de luz infravermelha (pulsos de luz controlada) que é dirigido a uma placa receptora sensível

no aparelho controlado. Nesta placa há um dispositivo fotoelétrico, geralmente um componente eletrônico fotoresistivo que transforma o tipo de ordem recebida em ação que o aparelho obedece. Por exemplo: a ordem de aumentar/diminuir volume, brilho ou cor nos televisores é entendida porque o sensor no televisor lê e entende esta informação, transformando o sinal luminoso num sinal elétrico, adequado para fazer funcionar o aparelho como queremos.

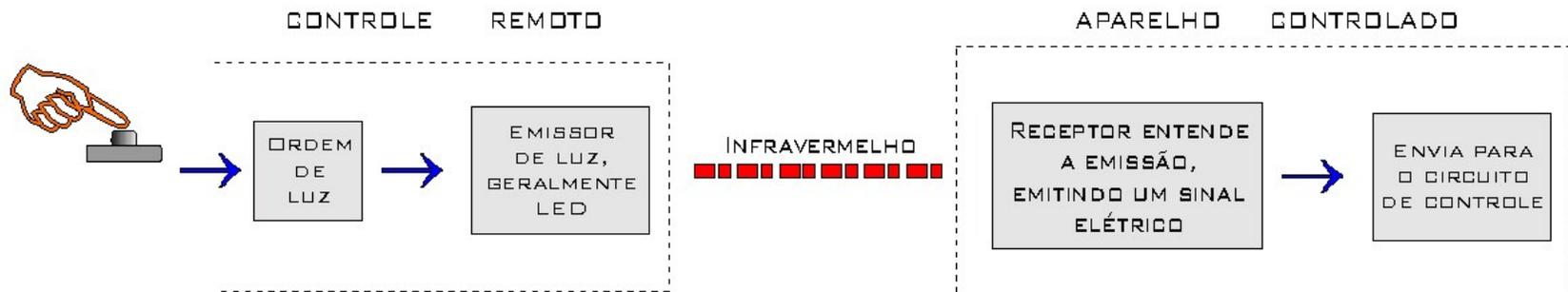
O sistema de controle remoto apenas envia os sinais ao receptor, situado no aparelho a ser controlado.

A função de controle e suas limitações (volume máximo, brilho máximo, etc.) são valores ajustados que estão residentes no aparelho principal, o qual altera os valores memorizados quando recebe a ordem de controle.

Este receptor poderia funcionar com luz visível, mas a radiação infravermelha funciona melhor e os sensores de

leitura, neste caso, funcionam apenas com radiação infravermelha e não afetados pela luz visível.

Esquema do transporte de informação por infravermelho em um controle remoto.



## Leitura Complementar V

### A FOTOCOPIADORA

Em 1930, o americano Chester Carlson não tinha nada além de um diploma de bacharel em ciências com especialização em Física, 1.400 dólares em dívidas e duas respostas negativas as 82 cartas que havia mandado em busca de emprego.

Aos catorze, conseguiu um emprego de auxiliar de tipógrafo. No ginásio, passou ainda a acumular a função de ajudante num laboratório de Química, que exercia aos sábados e domingos. Mas afinal, o recém formado conseguiu um emprego no departamento de patentes de uma firma de eletrônica de Nova York. Foi ali que começou perceber a necessidade de um aparelho que pudesse tirar cópias de texto

Em 1935, Chester pôs na cabeça que iria inventar uma máquina que funcionasse ao mero toque de um botão. Foram três anos de trabalho no laboratório a noite e nos finais de semana.

Enfim, em 1937, conseguiu patentear um processo, ao qual deu o nome de eletrofotografia que poderia reproduzir documentos com certa qualidade. Mas a máquina era ainda apenas um punhado papéis cheios de anotações. Faltava o principal: construir o aparelho.

O americano não pensou duas vezes: alugou um quarto no subúrbio Astoria e investiu todas as economias na compra de uma bancada, placas de metal, resinas, enxofre, produtos químicos e um bico de Bunsen, espécie de fogareiro de laboratório. Conseguiu ainda contratar um físico, o alemão Otto Kornei, para ajudá-lo nas experiências. Não passou muito tempo até que os dois conseguissem naquele quarto pequeno a primeira cópia eletrográfica. "10-22-38 (22 de outubro de 1938) Astoria" foram as palavras impressas definitivamente no papel, mediante o processo que Chester tinha proposto um ano antes. O cientista esfregou com um pano de algodão uma placa de zinco. revestida de enxofre, de

modo que ela ficasse carregada de eletricidade estática - a mesma que faz com que um pente, depois de usado, atraia pedacinhos de papel. Na lâmina de vidro de vidro de um microscópio, escreveu com tinta nanquim a data e o local da experiência.

A lâmina foi encostada à placa em ambas submetidas por alguns segundos à luz de um refletor. Aconteceu o que o físico esperava: os raios de luz dissiparam a carga da chapa, exceto das partes tapadas pelos dizeres. A placa foi então pulverizada com um pó químico de cor preta chamado licopódio, que foi atraído apenas pela parte da placa que

permaneceu energizada. Chester comprimiu então a placa contra um folha de papel parafinado. Nesta, apareceram os dizeres tingidos pelo pó, que foram depois fixados pela ação do calor. Impressionado, um professor de letras clássicas de Ohio sugeriu que o nome do processo fosse trocado por **xerografia**, do grego **xeros** = seco e **grafia** = escrita.