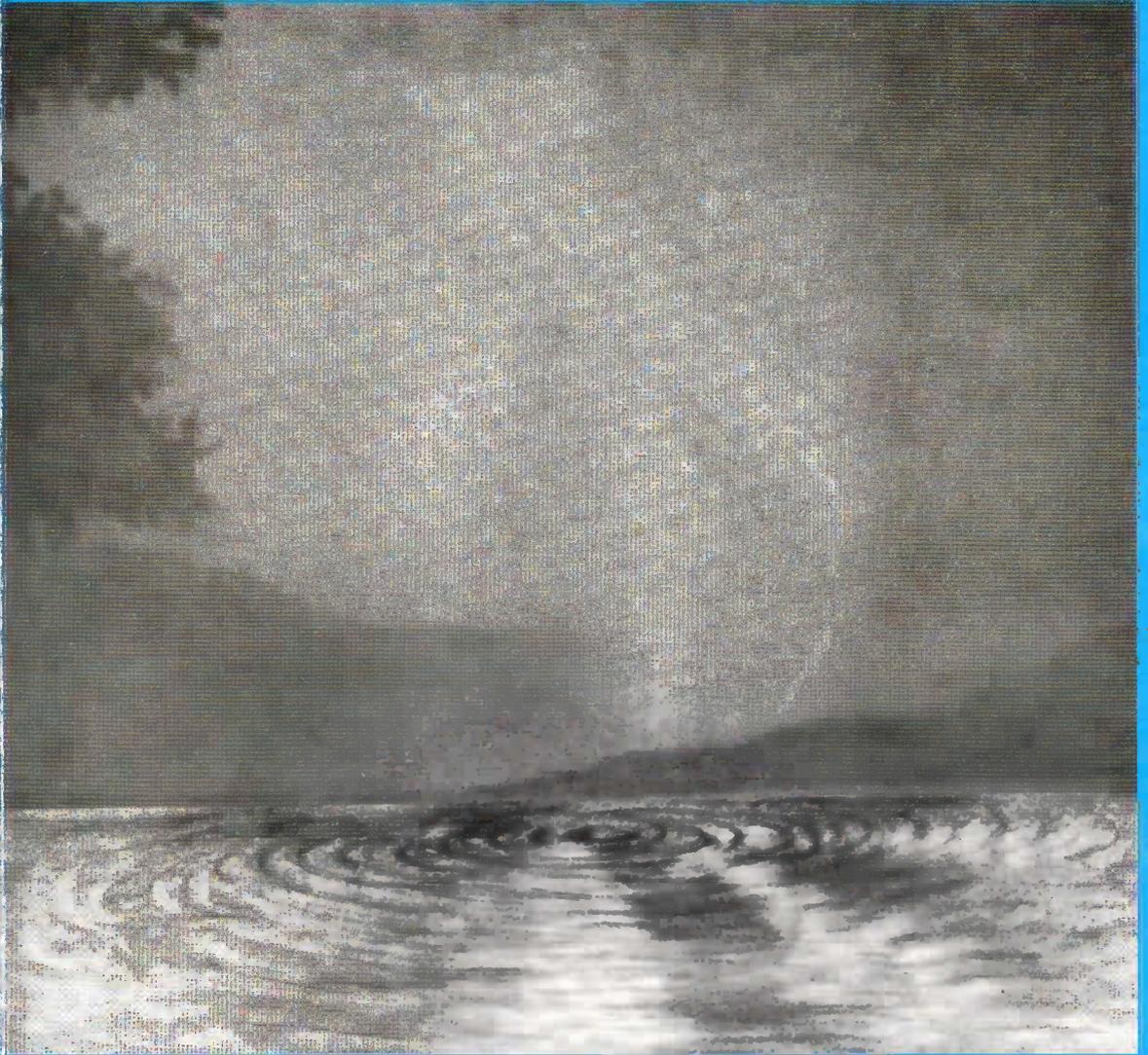


GÜNTER BURRE

# *Física*



10<sup>a</sup> Classe

# ***Física***

10ª Classe

## FICHA TÉCNICA

**Título:** Física 10ª Classe (1ª Edição)

**Autor:** Günter Burre

**Edição:** Editora Escolar

© 1996 Editora Escolar e Autor

**Composição:** Samuel Jonas Siteo

**Revisão:** Günter Burre e Fabião Nhablque

**Arranjo gráfico e arte final:** Roberto Macanja

**Capa:** Roberto Macanja e Benjamim Mondlane

**Ilustração:** Roberto Macanja e Benjamim Mondlane

**Fotografia:** Francisco Munia

# ÍNDICE

## CAPÍTULO I – Condutibilidade eléctrica

O modelo de transporte das cargas eléctricas nos metais – conceito de condutibilidade eléctrica	5
A influência da temperatura na condutibilidade eléctrica dos condutores metálicos	7
A condutibilidade eléctrica nos líquidos	9
A condutibilidade eléctrica em gases	10
Aplicação prática da condutibilidade eléctrica em líquidos e gases	13
A condutibilidade eléctrica no vazio – o diodo	17
Semicondutores e a condutibilidade eléctrica em semicondutores	19
A influência da temperatura na condutibilidade eléctrica em semicondutores	22

## CAPÍTULO II – Óptica geométrica

A natureza da luz e as fontes de luz – corpos luminosos e iluminados	27
A propagação rectilínea da luz – sombra e penúmbra – o raio de luz	27
A velocidade da luz	30
A intensidade do fluxo – a grandeza fluxo luminoso e sua unidade – a grandeza intensidade do fluxo luminoso $I$ e a sua unidade Cd (candela)	31
A dependência entre a luminosidade e a área iluminada – A relação entre a luminosidade e o recíproco da densidade ao quadrado	33
Comparação de duas fontes de luz – Fotómetro de Bunsen	34
A reflexão da luz nos espelhos planos e a lei da reflexão	36
As imagens produzidas pelos espelhos planos e as suas características	38
Espelho esférico côncavo – distância focal – foco	39
Trajecto do raio luminoso reflectido por espelho esférico côncavo – raio paralelo – raio focal	40
Equação fundamental para espelhos côncavos	42
Imagens produzidas pelos espelhos esféricos côncavos e suas características	42
Relação entre as grandezas da imagem e as do objecto	45
Conceito do meio óptico; refacção dum raio de luz num dioptro plano	46
Lei da refacção	47
Reversibilidade do percurso do raio de luz	49
Reflexão total e o ângulo limite	50
Percurso da luz através duma lâmina óptica; desvio do raio da luz	51
Lentes ópticas – foco – distância focal – diferentes tipos de lentes ópticas	52
Percurso do raio luminoso através duma lente biconvexa, raio central, raio paralelo e raio focal	53
Imagem dum objecto produzido por uma lente convergente – equação fundamental das lentes delgadas	55
A equação fundamental para as lentes delgadas	57
Instrumentos ópticos – lupa, olho humano, máquina fotográfica	60

## CAPÍTULO III – Oscilações mecânicas

Oscilações mecânicas	65
----------------------	----

O oscilador mecânico	66
As características duma oscilação mecânica	68
Oscilações harmónicas e oscilações amortecidas	73
A oscilação forçada	75
A ressonância	76

#### **CAPÍTULO IV – Ondas mecânicas**

Ondas mecânicas	81
O transporte de energia entre osciladores acoplados	82
O conceito de onda como fenómeno físico e sua comparação com uma oscilação	83
As características duma onda	84
A fórmula fundamental da propagação das ondas	86
Frente e raio da onda	88
A propagação das ondas e a sua sobreposição	89
A reflexão das ondas mecânicas	90
A refacção das ondas mecânicas	92
A difracção das ondas mecânicas	93
A interferência das ondas mecânicas	94
Onda transversal e onda longitudinal	97
Propriedades da propagação duma onda mecânica	100

#### **CAPÍTULO V – Corrente alternada**

Corrente alternada	105
Corrente alternada – oscilação eléctrica	110
A produção duma corrente alternada	110
As características da corrente alternada	111
A produção da corrente alternada – O gerador	113
Valores máximos e efectivos da tensão e da intensidade da corrente alternada	113
A potência da corrente contínua e da corrente alternada	114
Potência da corrente alternada	116
Resistência no circuito da corrente alternada	117
A auto – indução	118
A resistência indutiva – a indudância	118
A resistência capacitiva	119
A representação gráfica	121
A resistência total no circuito da corrente alternada	121
A lei de Ohm no circuito da corrente alternada	122
O trabalho e a potência no circuito da corrente alternada	123
O transformador	125
Construção e funcionamento dum transformador	126
Transmissão da tensão e da corrente	127
O transformador ideal – Os dois tipos de transformador	130
O rendimento do transformador	132
Aplicação prática do transformador	133
A importância de Hidroeléctrica de Cahora Bassa	134

# CAPÍTULO I

## condutibilidade eléctrica

## CONDUTIBILIDADE ELÉCTRICA

Pelo estudo da estrutura da matéria realizado na 9ª classe, sabemos que as substâncias (sólidos, líquidos e gases) são compostas por átomos electricamente neutros, elementos mais pequenos da matéria.

Hoje sabemos que os átomos são compostos por partículas mais pequeninas: os electrões, protões e neutrões.

Os protões e os neutrões localizam-se no núcleo do átomo e os electrões movem-se em volta deste núcleo a uma determinada distância que depende da energia do campo eléctrico do núcleo. Os protões e electrões estão electricamente carregados. Os protões têm uma carga positiva e os electrões uma carga negativa. Normalmente no átomo o número dos protões é igual ao número dos electrões, quer dizer, o número das cargas positivas é igual ao número das cargas negativas e assim o átomo é electricamente neutro. Pela introdução da energia externa é possível que o valor da energia de alguns electrões mais afastados do núcleo aumente e eles abandonem o átomo. Estes electrões chamam-se *electrões livres* e são os portadores de cargas negativas.

Quando um electrão sai do átomo, o equilíbrio electrostático é destruído e fica um átomo com uma carga positiva que se chama *ião*. Também é possível que um átomo capte um electrão livre. Neste caso temos um *ião negativo*.

Os electrões são os portadores das cargas eléctricas negativas.

Os iões são os portadores das cargas eléctricas positivas ou negativas.

### O modelo de transporte das cargas eléctricas nos metais

#### O conceito de condutibilidade eléctrica

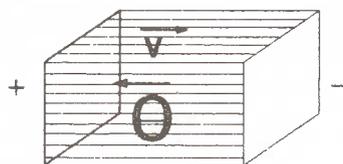
Com base nos nossos conhecimentos sobre o campo eléctrico e a corrente eléctrica, podemos construir um modelo que possibilita a explicação do movimento das cargas eléctricas em quase todas as substâncias, em condutores metálicos, em líquidos, gases e também no vácuo.

*Lembre-se:*

Existem duas condições básicas para o fluxo das cargas eléctricas.

1. Portadores das cargas eléctricas que são livremente móveis (electrões e iões).
2. Um campo eléctrico que actua sobre os portadores das cargas eléctricas.

Os portadores das cargas eléctricas movem-se pela influência do campo eléctrico, o que pode ser explicado com a lei de Coulomb. Criemos, por exemplo, um campo eléctrico a partir de um condensador com duas placas paralelas.



Coloquemos um electrão (negativamente carregado) livremente móvel neste campo eléctrico. O electrão vai mover-se até à placa positiva do condensador. Neste processo o electrão tira energia do campo eléctrico. Esta energia do campo eléctrico será transformada em energia cinética.

Sobre o modelo geral do transporte das cargas eléctricas podemos fazer mais uma afirmação:

No caso do fluxo das cargas eléctricas, a energia do campo eléctrico será transferida aos portadores das cargas eléctricas.

Os portadores das cargas eléctricas sofrem uma aceleração.

Na 9ª classe definimos a corrente eléctrica como fluxo orientado dos electrões livres. Por causa da existência de outros portadores das cargas eléctricas — iões negativos e positivos — devemos dizer:

No caso do transporte das cargas eléctricas existe um fluxo de cargas — uma corrente eléctrica — como movimento orientado das cargas negativas e positivas.

$$I = I^- + I^+$$

Como se explica a condução das cargas eléctricas nos metais?

Pelo estudo da ligação química nos metais sabemos que os metais têm uma estrutura cristalina. Esta estrutura cristalina tem a sua causa na existência das forças electrostáticas atractivas entre os electrões livres e os núcleos de iões positivos vizinhos, quer dizer, no cristal metálico, os iões distribuem-se de uma forma regular, em posições fixas prolongando-se até à sua superfície.

Portanto, um metal possui electrões livres que são os portadores das cargas eléctricas e movem-se sem qualquer ordem.

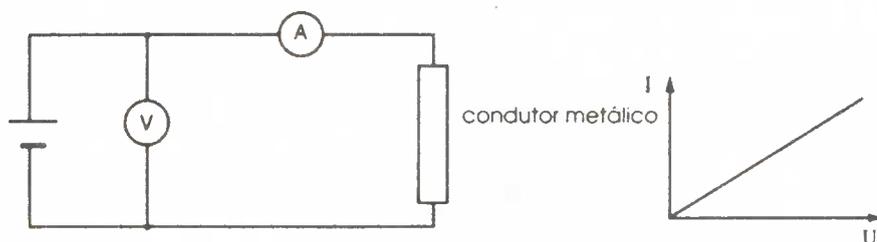
Colocando um metal no campo eléctrico, os electrões adquirirão uma aceleração e transportarão as cargas eléctricas que possuem.

O seu movimento é um movimento orientado no sentido das forças que actuam sobre as cargas eléctricas.

Os electrões movem-se no sentido da carga positiva. Neste movimento os electrões "chocam" com os iões do cristal que ocupam uma posição relativamente fixa e perdem uma parte da sua energia. O metal aquece.

*Resumo:*

Nos metais existem electrões livres que transportam sob a influência dum campo eléctrico as cargas eléctricas. Este transporte de cargas eléctricas pode ser detectado usando apenas um amperímetro no circuito eléctrico.



Liguemos um condutor metálico num circuito eléctrico. Poderemos ver que o ponteiro do amperímetro indica um determinado valor.

Quer dizer: os electrões no condutor metálico movem-se num sentido ordenado e transportam as cargas eléctricas.

Assim, dizemos que os condutores metálicos têm uma *condutibilidade eléctrica*.

Utilizemos para a nossa experiência três condutores diferentes: alumínio, cobre e ferro e constataremos que o amperímetro indica valores diferentes. O valor maior para o cobre e o menor para o ferro.

Isto significa que a condutibilidade eléctrica dos metais é diferente. Este facto pode explicar-se atendendo às diferentes estruturas dos cristais e dos metais.

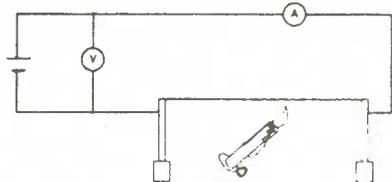
*Resumo:*

Nos metais existem electrões livres que transportam as cargas eléctricas pela influência dum campo eléctrico. Esta propriedade dos metais tem o nome de *condutibilidade eléctrica*.

### **A influência da temperatura na condutibilidade eléctrica dos condutores metálicos**

Realizemos a experiência seguinte:

Coloquemos um condutor metálico com um comprimento de 50 cm, num circuito de modo que possamos fazer a leitura do voltímetro e do amperímetro.



Aumentemos gradualmente a tensão aplicada e verificaremos que aumenta também a corrente eléctrica que percorre o condutor.

Quer dizer: *a corrente eléctrica é directamente proporcional à tensão aplicada*, como diz a lei de Ohm.

Agora, se aplicarmos, por exemplo, uma tensão de 6 V, observaremos que o amperímetro vai indicar um determinado valor.

Com um bico de Bunsen aqueçamos muito fortemente entre 10 a 15 cm do condutor metálico. O ponteiro do amperímetro move-se em direcção ao ponto zero, o que significa que a intensidade da corrente eléctrica diminui.

Pelo aquecimento do condutor metálico a sua condutibilidade eléctrica varia, diminuindo.

Como explicar este facto?

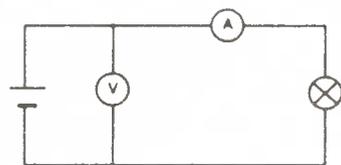
Os iões que formam o cristal têm posições fixas relativas. Eles movem-se em volta destas posições, e têm energia cinética. Aquecendo o condutor, introduzimos energia calorífica que aumentará a velocidade daquele movimento dos iões, tornando-o mais frequente em torno das respectivas posições fixas.

*Resultado:*

Os electrões que se movem de um extremo do condutor para outro "chocam" mais vezes com as partículas que formam o cristal, perdendo os electrões uma parte da sua energia cinética. A resistência aumenta. A resistência eléctrica dos metais aumenta com a elevação da temperatura.

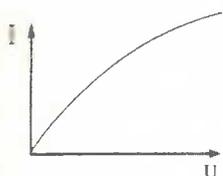
Como consequência disso a lei de Ohm só é válida enquanto a temperatura do metal se mantém constante.

Faça a experiência seguinte: Coloque uma lâmpada incandescente no circuito eléctrico.



Aumenta gradualmente a tensão até ao valor permitido pela lâmpada. Durante este processo faça a leitura no voltímetro e no amperímetro e registe os valores numa tabela.

Construa depois um gráfico com base nesses valores. (Deverá obter um gráfico como o que apresentamos.)



A curva não é uma recta porque, como o fio incandescente da lâmpada se aquece muito fortemente, a sua resistência aumenta; a lei de Ohm nessas condições perde a sua validade.

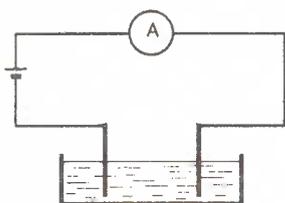
Resumo:

A condutibilidade eléctrica dum condutor metálico depende da sua temperatura.

A temperatura aumenta — a condutibilidade eléctrica diminui — a resistência eléctrica aumenta.

## A condutibilidade eléctrica nos líquidos

Realizemos uma experiência muito simples.



Construamos um circuito eléctrico de maneira que o circuito seja fechado por um voltâmetro cheio de água destilada.

O ponteiro do amperímetro não se move o que significa que nenhuma corrente eléctrica percorre a água. A condutibilidade eléctrica da água destilada não existe, é praticamente nula.

Agora deitemos alguns cristais do sal de cozinha na água destilada.

O ponteiro do amperímetro move-se e indica um determinado valor da corrente eléctrica.

Aumentemos a quantidade de sal na água: o valor da corrente eléctrica aumentará.

Este fenómeno pode-se explicar com o nosso modelo de transporte das cargas eléctricas.

Por causa da tensão aplicada, existe um campo eléctrico entre os eléctrodos que se encontram dentro da água.

Faltarão os portadores das cargas eléctricas?

Não, pois logo no momento em que deitamos o sal na água, podemos ver que o ponteiro do amperímetro indica que uma corrente eléctrica percorre o circuito e, por isso, também a água como parte deste mesmo circuito.

Como aparecem os portadores de cargas eléctricas?

Sabemos que o sal tem a fórmula química NaCl.

No processo de formação das moléculas do sal, o átomo do sódio perde um electrão do último nível de energia (última camada), transforma-se assim em ião positivo e o átomo de cloro capta o electrão cedido pelo átomo de sódio e transforma-se em ião negativo.

Entre estes iões ( $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$ ) existe uma força electrostática atractiva. A ligação química no sal,  $\text{NaCl}$ , é uma ligação iónica.

Quando o sal está dissolvido em água, as moléculas dissociam-se em duas partes carregadas electricamente (em iões) onde adquirem grande liberdade de movimento, representando, por isso, os portadores das cargas eléctricas. A sua existência é uma necessidade básica para o transporte das cargas eléctricas.

Sob influência do campo eléctrico actuam forças atractivas e repulsivas sobre estes iões.

Os iões negativos, os aniões, movem-se para o eléctrodo positivo — o ânodo. Os iões positivos, os catiões, movem-se para o eléctrodo negativo — o cátodo — e encontram-se lá.

Contrastando, o transporte das cargas eléctricas em metais, em que há somente um movimento de electrões, cargas negativas, nos líquidos, existem dois movimentos, dos iões negativos e dos iões positivos.

### Resumo:

O transporte das cargas eléctricas ou fluxo de cargas eléctricas em líquidos é possível em substâncias químicas em solução aquosa desde que as moléculas se encontrem dissociadas.

Nos líquidos deslocam-se cargas positivas e negativas. Estes líquidos têm uma condutibilidade eléctrica.

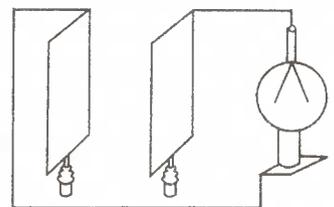
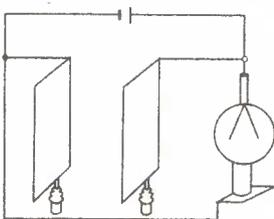
A intensidade da corrente eléctrica nesses líquidos depende da quantidade dos portadores de cargas eléctricas presentes na solução.

## A condutibilidade eléctrica em gases

A condutibilidade eléctrica nos metais é devida à existência de electrões livres. Nos líquidos há dissociação das substâncias químicas em solução aquosa, quer dizer, a existência de iões que transportam as cargas eléctricas.

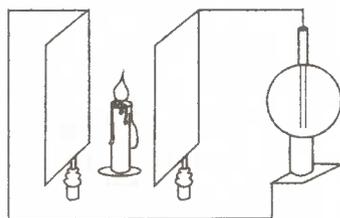
Haverá também uma condutibilidade eléctrica em gases?

Façamos a experiência seguinte:



Ligamos um electroscópio com as duas placas paralelas dum condensador e carreguemos estas com cargas eléctricas diferentes. Veremos que depois da interrupção da ligação das placas com a fonte de tensão, o electroscópio indica a presença de cargas durante muito tempo.

Decorrido algum tempo os indicadores do electroscópio aproximam-se-ão, o que significa que as placas se descarregaram. Repitamos a mesma experiência. Depois da interrupção da ligação das placas à fonte de tensão, coloquemos entre as placas uma vela ardente ou uma lamparina a álcool que aquece o ar.



Em pouco tempo podemos ver que o electroscópio indica zero, o que significa que as placas se descarregaram em muito menos tempo.

O que é que se passou?

Entre as placas electricamente carregadas com cargas diferentes, realizou-se uma troca de cargas, quer dizer, entre as placas realizou-se um transporte de cargas eléctricas.

Utilizemos mais uma vez o nosso modelo de transporte das cargas eléctricas.

O campo eléctrico foi estabelecido entre as duas placas carregadas do condensador. Faltavam os portadores de cargas eléctricas para transportarem as cargas entre as placas.

Investigações exactas mostraram que os iões, nascidos da ionização das moléculas do ar, transportam essas cargas eléctricas.

A introdução duma energia externa — energia externa pode ser calorífica ou radiante — fará com que certos electrões dos átomos ou das moléculas electricamente neutros deixem a sua ligação, indo ligar-se a outros átomos ou outras moléculas electricamente neutros.

Assim resultarão iões que transportam as cargas eléctricas sob a influência do campo eléctrico.

Os iões negativos e positivos movem-se para as placas positiva e negativa, respectivamente. Estes iões formam o fluxo das cargas eléctricas, a corrente eléctrica.

*Resumo:*

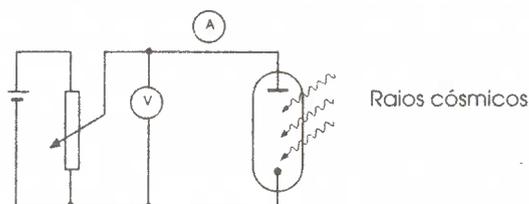
A introdução duma energia externa provoca uma ionização do gás e, por isso, a condutibilidade eléctrica desse gás.

Com instrumentos de medição muito sensíveis pode-se verificar que uma pequena condutibilidade eléctrica do ar sempre existe. Isto tem a sua causa na existência dos raios cósmicos, da radioactividade natural da Terra e outros processos que provocam uma ionização permanente duma parte das moléculas do ar. Por isso, o condensador descarregou-se na nossa primeira experiência depois de algum tempo.

Por influência dos factores atrás mencionados existem sempre portadores de cargas eléctricas no gás que possibilitam um transporte de cargas eléctricas.

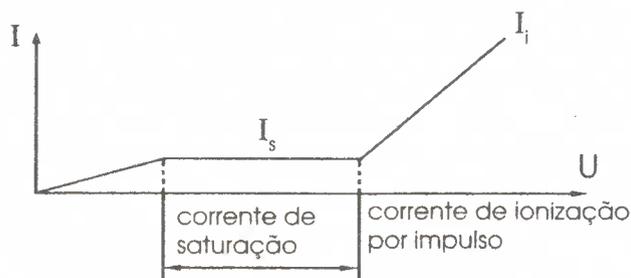
Pelas circunstâncias determinadas, a condutibilidade eléctrica num gás pode aumentar muito fortemente como a experiência seguinte pretende mostrar.

Um tubo de descarga está cheio dum gás com uma pressão muito pequena. Montemos este tubo num circuito eléctrico com um reóstato que vai permitir aumentar sucessivamente a tensão aplicada.



Aumentemos agora gradualmente a tensão e observaremos que a intensidade da corrente eléctrica que existe no tubo de descarga aumenta em primeiro lugar até um determinado valor.

Apesar do contínuo aumento da tensão, a intensidade da corrente eléctrica não aumenta mais. Mas a partir dum determinado valor da tensão a intensidade da corrente eléctrica volta a aumentar. Ver o gráfico.



Como explicar este fenómeno?

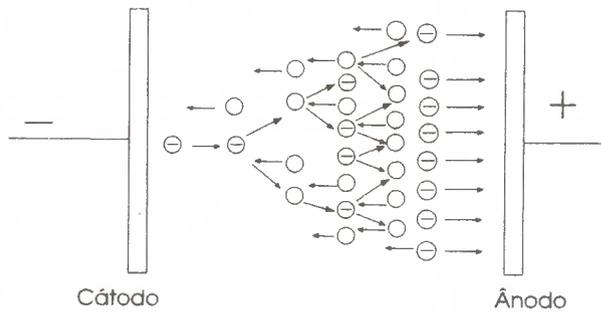
Entre os eléctrodos existe um campo eléctrico cujas forças actuam sobre os portadores das cargas eléctricas e estas recebem uma aceleração. Os portadores das cargas eléctricas produzidos pela energia externa recebem uma aceleração que é proporcional à tensão aplicada. Por isso, cada vez em maior número, atingem o eléctrodo.

A partir dum determinado valor da tensão aplicada todos os portadores de cargas eléctricas existentes atingem o eléctrodo. Aumentando a tensão, o fluxo dos portadores de cargas eléctricas não pode aumentar mais porque não há mais portadores de cargas eléctricas para acelerar.

Ao fluxo dos portadores de cargas eléctricas chama-se *corrente de saturação* ( $I_s$ ).

Aumentando cada vez mais a tensão, a energia cinética dos portadores de cargas eléctricas aumenta de tal maneira que as partículas ganham impulso suficiente para extrair electrões dos átomos e das moléculas neutras durante a colisão com eles. A este fenómeno chama-se *ionização por impulso ou por choque*.

Os electrões extraídos têm também a capacidade de extrair de novo mais electrões. Por isso, o fluxo das cargas eléctricas aumentará de novo com o aumento da tensão aplicada.



Este processo de ionização por impulso repete-se muitas vezes ao longo do espaço que separa os eléctrodos.

#### Resumo:

A introdução duma energia externa provoca a ionização do gás e, por isso, a condutibilidade eléctrica em gases.

Os portadores das cargas eléctricas em gases são os iões positivos e negativos e os electrões.

Pela ionização por impulso a quantidade dos portadores de cargas eléctricas em gases aumenta.

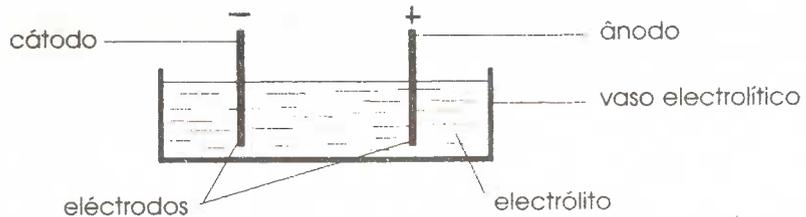
### Aplicação prática da condutibilidade eléctrica em líquidos e gases

Sobre a importância e a aplicação prática da condutibilidade eléctrica em metais não há nenhuma dúvida. Sem condutibilidade eléctrica em metais não seria possível a utilização da energia eléctrica para facilitar o trabalho e a nossa vida.

Em casa usamos lâmpadas incandescentes para a iluminação. Essas lâmpadas estão ligadas à fonte de tensão por condutores metálicos.

Cada motor eléctrico é constituído por condutores metálicos nas bobinas e os motores próprios estão ligados à fonte de tensão por cabos eléctricos. Mas qual é a aplicação prática da condutibilidade eléctrica em líquidos e em gases?

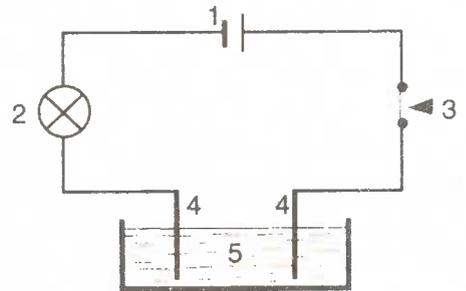
Recordemo-nos que contrariamente à condutibilidade eléctrica em metais que é dada pela existência dos electrões livres, a condutibilidade eléctrica em líquidos é determinada pelo grau de dissociação duma substância química em solução aquosa. Este líquido tem o nome de *electrólito*.



Façamos a experiência seguinte:

**Legenda:**

1. fonte de tensão - 12V
2. lâmpada
3. interruptor
4. eléctrodos de carbono
5. solução aquosa de NaCl



Quando o circuito está fechado, logo a seguir podemos ver que a lâmpada está a brilhar; também podemos observar que junto dos eléctrodos se desenvolvem bolhas de gás que sobem. O desenvolvimento destas bolhas de gás é mais forte em volta do cátodo (-) do que do ânodo (+).

Quais são os processos que se realizam nesta electrólise?

O cloreto de sódio em solução aquosa dissocia-se em iões positivos de sódio ( $\text{Na}^+$ ) e em iões negativos de cloro ( $\text{Cl}^-$ ). Os iões negativos movem-se sob a influência do campo eléctrico para o ânodo onde se descarregam, libertando-se.

Os iões positivos de sódio ( $\text{Na}^+$ ) e os iões positivos ( $\text{H}^+$ ), resultantes da dissociação da água, movem-se sob a influência do campo eléctrico, dirigindo-se para o cátodo. Chegadas lá, só o ião ( $\text{H}^+$ ) se descarrega e se liberta. O ião positivo ( $\text{Na}^+$ ) não se descarrega e permanece na solução. Analogamente o ião negativo ( $\text{OH}^-$ ), também resultante da dissociação, permanece na solução.

A partir de um certo momento ( $\text{Na}^+$ ) e ( $\text{OH}^-$ ) ligam-se para originar  $\text{NaOH}$  (Hidróxido de Sódio) em solução aquosa.

As bolhas de gás que sobem no cátodo são bolhas de hidrogénio. As bolhas de gás que sobem no ânodo são de cloro como podemos comprovar pelo seu cheiro característico.

Através da mudança do electrólito e do material que constitui os eléctrodos também é possível uma separação das moléculas de água em hidrogénio e oxigénio.

Então, a partir da corrente eléctrica, podemos produzir gases que têm uma certa importância na técnica. Mas não é só na produção de gases na técnica que a electrólise tem importância.

Com base na electrólise dos sais de metais, por um lado, podem-se produzir ou limpar metais com alto grau de pureza; por outro lado, existe também a possibilidade de cobrir com uma camada de metal objectos da vida diária ou de beleza.

Para a produção dos metais de alta pureza utiliza-se um ânodo não solúvel e como electrólito uma solução dos sais de metal. Desta maneira pode-se produzir o cobre em grandes quantidades. Numa solução de sulfato de cobre  $\text{CuSO}_4$  registamos uma dissociação em iões positivos de metal  $\text{Cu}^{2+}$  e em iões negativos do ião sulfato  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Uma tensão, aplicada entre os eléctrodos, provoca o movimento dos iões de metal ( $\text{Cu}^{2+}$ ) para o cátodo onde eles se descarregam e se depositam.

Desta maneira pode-se produzir o cobre com uma pureza de 99,99%. A quantidade do metal produzido desta maneira depende do tempo e da intensidade da corrente eléctrica, como a tabela mostra.

Metal		Intensidade da corrente em A	Intervalo de tempo em s	Massa da substância produzida em mg
níquel	Ni	1	1	0,3039
cobre	Cu	1	1	0,329
prata	Ag	1	1	1,118
alumínio	Al	1	1	0,0935
zinco	Zn	1	1	0,339

Para a pureza electrolítica (purificação ou refinação) do metal utiliza-se o ânodo do metal que entra em solução.

As impurezas não também em solução, ou quando eles são mais preciosas como o metal ficam insolúveis e caem para o fundo do vaso electrolítico.

### Resumo:

A condutibilidade eléctrica em líquidos aplica-se na electrólise para:

- produção industrial de gases
- produção de metais
- refinação ou purificação de metais

Um outro ramo de aplicação da condutibilidade eléctrica em líquidos é a galvanostegia, revestimento dum objecto por uma camada de outro metal.

O princípio desta técnica é relativamente fácil. Com o cátodo utiliza-se um objecto metálico que se pretende cobrir, por exemplo, um tubo de ferro. Este tubo de ferro pode-se cobrir com uma camada de cobre ou de níquel ou de crómio. Algumas vezes é necessário que o objecto receba duas camadas de diferentes metais porque nem sempre os átomos do metal que usamos para cobrir o objecto e os átomos deste se ligam directamente. Por isso, é usual cobrir-se primeiro o objecto com uma camada dum certo metal e finalmente todo esse conjunto com o metal determinado. Por exemplo, existe a sequência ferro-cobre-crómio.

Por este método da *galvanostegia* pode-se garantir que as superfícies dos objectos sejam mais resistentes e mais bonitas. Mais uma outra possibilidade é a *galvanoplastia* que é aplicada para fazer cópias duma estatueta, por exemplo, ou uma matriz para imprimir. Para tal faz-se um molde em gesso. Este é pintado com pó de grafite para garantir a sua condutibilidade. Utiliza-se este molde como cátodo e assim o metal vai depositar-se sobre a superfície do molde e formar a figura desejada e muito dura.

### Resumo:

A condutibilidade eléctrica em líquidos aplica-se na *galvanostegia* para revestimento de objectos metálicos por uma camada de outro metal e na *galvanoplastia* para fazer uma reprodução metálica dum objecto não metálico.

A condutibilidade eléctrica em gases aplica-se nas lâmpadas fluorescentes. Estas lâmpadas fluorescentes contêm um gás que não só garante o transporte das cargas eléctricas pela sua ionização, mas também emite luz de brilho característico.

Mais usadas hoje são as lâmpadas fluorescentes que têm no interior do tubo uma substância com características fluorescentes que se manifestam enquanto os iões e electrões se movem ao encontro dos eléctrodos.

Outra aplicação muito importante é a soldadura eléctrica. Neste

processo tem-se dois eléctrodos e um deles é o projecto a soldar. Entre os eléctrodos existe o ar ionizado que assim se torna condutor e facilita o contacto eléctrico entre os dois eléctrodos. Este contacto é acompanhado pelo desenvolvimento de temperaturas muito altas numa pequena zona onde os eléctrodos se fundem. Garante-se assim a transmissão da substância dum eléctrodo (ânodo) para outro (cátodo), acompanhando o transporte das cargas eléctricas.

Resumo:

A condutibilidade eléctrica nos gases aplica-se:

- nas lâmpadas fluorescentes e
- na soldadura eléctrica dos metais.

### A condutibilidade eléctrica no vazio - o diodo

A condutibilidade eléctrica em metais, líquidos e gases está ligada sempre a dois factores:

- existência do campo eléctrico
- existência dos portadores de cargas eléctricas, quer dizer: com o nosso modelo geral de transporte das cargas eléctricas.

Normalmente uma condutibilidade eléctrica no vácuo não deveria ser possível, porque no vácuo não existem portadores de cargas eléctricas (electrões e iões). O vácuo praticamente é vazio.

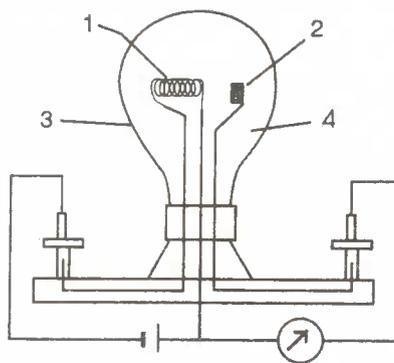
A pequena quantidade de moléculas de gás que existem no vácuo (um vácuo absoluto não existe e não pode ser produzido) não tem nenhuma importância para a condutibilidade eléctrica.

Como se poderá conseguir, apesar disso, uma condutibilidade eléctrica?

O inventor THOMAS ALVA EDISON (1847 - 1931) construiu uma lâmpada como mostra o esquema seguinte:

**Legenda**

- 1 - Filamento
- 2 - Eléctrodo positivo (placa)
- 3 - Invólucro de vidro
- 4 - Vácuo



Liga-se esta lâmpada da maneira indicada num circuito; o galvanómetro indica a existência dum fluxo de cargas eléctricas; quer dizer, uma condutibilidade eléctrica no vácuo.

Pelo efeito térmico da corrente eléctrica o filamento da lâmpada aquece muito fortemente. Isto significa que o filamento — um fio metálico — tem uma temperatura muito alta.

As partículas que formam o cristal do metal em que é feito o filamento oscilam em volta da sua posição relativamente fixa. A energia interna do metal aumenta.

Os electrões livres participam neste movimento oscilatório e recebem impulsos em direcções diferentes.

Alguns electrões que ficam na superfície do metal recebem uma energia cinética muito alta e, por isso, eles podem abandonar o metal. Isto significa que pela introdução da energia calorífica, o metal emite electrões, os portadores das cargas eléctricas. A este processo chama-se *emissão de electrões*.

Estes electrões movem-se sob a influência do campo eléctrico estabelecido entre o filamento e o eléctrodo positivo (placa) em direcção a este. Temos assim um fluxo orientado de cargas eléctricas, uma corrente eléctrica.

### Resumo:

A influência da energia calorífica provoca a emissão de electrões na superfície dos metais. Esta emissão de electrões chama-se *emissão ardente ou termoelectrónica*.

Os electrões assim emitidos no vácuo garantem a condutibilidade eléctrica.

A emissão dos electrões também pode ser provocada duma outra maneira.

Uma placa de alumínio ou de zinco está carregada negativamente e ligada a um electroscópio. Fazendo incidir sobre a placa a luz ultravioleta ou raios X, a placa perde a sua carga. Se a placa estivesse positivamente carregada, a carga conservar-se-ia apesar da irradiação: isso revela que só os electrões podem abandonar a placa.



A incidência da luz ou raios X sobre a placa é uma outra forma da introdução da energia.

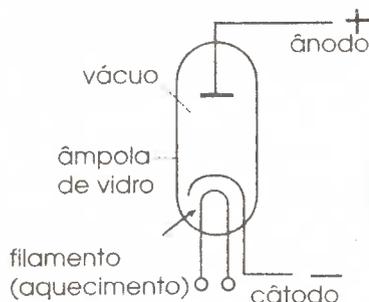
A esta emissão de electrões provocada pela luz ou raios X chama-se *fotoemissão*.

A quantidade dos electrões que saem da superfície da placa está dependente da intensidade de luz.

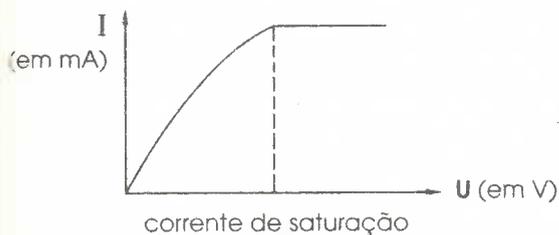
Uma aplicação prática da condutibilidade eléctrica no vácuo é o diodo.

Um diodo é constituído por uma ampola de vidro sem qualquer gás e dois eléctrodos. Por baixo dum dos eléctrodos (cátodo) está montado um filamento que aquece indirectamente o eléctrodo para garantir que os electrões possam sair à superfície.

Uma tensão colocada entre os dois eléctrodos produz um campo eléctrico e os electrões emitidos pelo cátodo movem-se em direcção ao ânodo. Quer dizer, entre o cátodo e o ânodo estabelece-se uma corrente eléctrica. A sua intensidade dependerá do valor da tensão aplicada.



Liga-se o cátodo e o ânodo com o pólo positivo e negativo respectivamente e verifica-se que da fonte de tensão não há nenhuma corrente eléctrica que percorre o diodo. Porquê?



## Semicondutores e a condutibilidade eléctrica em semicondutores

Como sabemos a condutibilidade eléctrica duma substância depende dos portadores livres de cargas eléctricas.

Estes portadores existem nas substâncias como metais e líquidos pela dissociação duma substância química. Os portadores podem ser produzidos também por introdução duma energia — ionização de gás ou aquecimento dum eléctrodo — emissão ardente ou termoelectrónica.

Dependendo da substância, os portadores de cargas eléctricas nos metais são os electrões livres, no vácuo os electrões emitidos; nos líquidos os iões positivos e negativos; e, nos gases, os iões positivos, iões negativos e electrões livres.

Todos os portadores das cargas eléctricas se movem sob influência dum campo eléctrico, transportando desse modo a carga eléctrica.

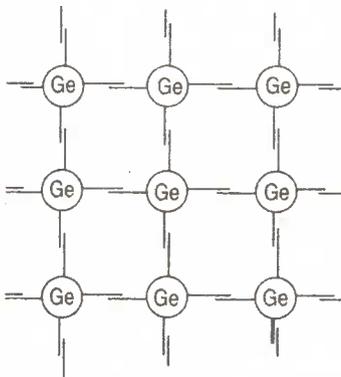
### *Uma corrente eléctrica percorre a substância*

Os cientistas descobriram uma condutibilidade eléctrica em substâncias que normalmente deveriam ser isoladores por causa da sua estrutura.

Essas substâncias que não são metais têm fisicamente uma estrutura cristalina; e quimicamente uma ligação atómica. As substâncias mais conhecidas e utilizadas na prática são *germânio e silício*.

Como é a sua estrutura?

O germânio tem uma valência de quatro electrões que participam na construção da estrutura cristalina.



Isto significa que os quatro electrões da última camada dum átomo de germânio se ligam a outros quatro electrões de outros átomos de germânio e formam essa última camada com oito electrões (veja a figura em cima).

Por causa disso no cristal do germânio não há nenhum electrão livre que possa transportar uma carga eléctrica como exige o nosso modelo de transporte das cargas eléctricas.

Mas se introduzirmos energia, por exemplo, calorífica por aquecimento, alguns electrões receberão energia cinética suficiente que lhes possibilitará sair da ligação atómica.

Aquece-se mais o cristal do germânio, e mais electrões serão libertados da sua ligação e estarão disponíveis para o transporte das cargas eléctricas.

Ligando-se uma tensão eléctrica ao cristal, os electrões movem-se sob a influência do campo eléctrico.

Todas as substâncias que têm este comportamento chamam-se *semicondutores*.

### *Resumo:*

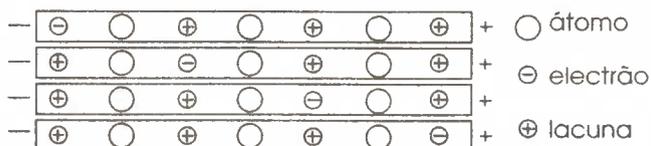
Os cristais com uma ligação atómica chamam-se semicondutores. Quando a temperatura é baixa, os electrões encontram-se totalmente integrados nos respectivos átomos e a condutibilidade eléctrica não existe.

Com a introdução duma energia externa (energia calorífica) alguns

Os electrões saem da ligação e tornam-se disponíveis como portadores de cargas eléctricas.

Os semicondutores possuem uma condutibilidade eléctrica chamada *condutibilidade própria ou condutibilidade intrínseca*.

Cada electrão libertado deixa na sua posição original uma lacuna que pode ser ocupada por um electrão que esteja próximo. Sob influência do campo eléctrico os electrões movem-se para o pólo positivo e deixam as lacunas que aparentemente se movem para o pólo negativo. O movimento das lacunas é um movimento aparente porque elas não podem sair da sua posição.



A essas lacunas chama-se também *defeitos de electrões*.

Sob influência do campo eléctrico, as zonas abandonadas pelos electrões (lacunas) no semicondutor mostram um comportamento próprio dos portadores de cargas eléctricas positivas.

Em caso de condutibilidade própria dum semicondutor os electrões e as lacunas transportam as cargas eléctricas.

A condutibilidade eléctrica dos semicondutores pode ser produzida duma outra maneira.

Normalmente os semicondutores são substâncias quimicamente puras. Se introduzirmos impurezas especialmente escolhidas, podemos ter semicondutores que têm uma condutibilidade por electrões ou uma condutibilidade por lacunas. A este processo de introdução de impurezas chama-se *dotação*.

Num pedaço de germânio fundido introduzamos uma pequena quantidade de átomos de arsénio. Estes átomos de arsénio têm cinco electrões de valência e, por isso, um electrão não se poderá ligar com um electrão de átomo de germânio. Como consequência disso o electrão torna-se livre e disponível para o transporte das cargas eléctricas. Por causa da sua carga negativa, diz-se que o semicondutor tem uma *condutibilidade electrónica ou que ele é um semicondutor do tipo n*.

Por outro lado, se introduzirmos no germânio uma pequena quantidade de átomos com uma valência de três electrões — os átomos de índio, por exemplo — esses átomos tirarão um electrão dos átomos

de germânio e transformar-se-ão em iões negativos. No germânio falta um electrão; quer dizer; no átomo do germânio cria-se uma lacuna.

Por este método pode-se fazer um semiconductor que tem uma *condutibilidade por lacunas* ou um *semiconductor do tipo p*.

A esta condutibilidade de semicondutores, provocada pela introdução das impurezas, chama-se *condutibilidade extrínseca* em semicondutores.

*Resumo:*

Com a introdução das impurezas num semiconductor pode-se obter:

Semicondutores do tipo n (condutibilidade electrónica)

Semicondutores do tipo p (condutibilidade por lacunas)

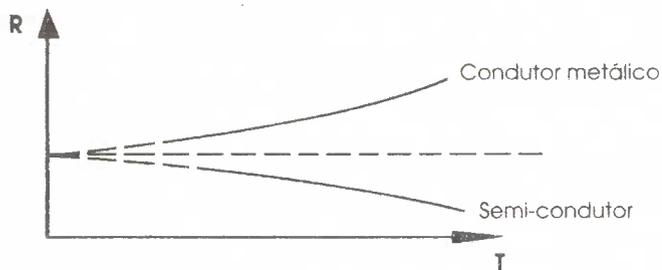
### **A influência da temperatura na condutibilidade eléctrica em semicondutores**

Como sabemos, a condutibilidade eléctrica, em metais, baixa quando a temperatura do metal aumenta. Isto significa que a resistência eléctrica no metal aumenta.

No subcapítulo anterior explicámos que nos semicondutores todos os electrões dos, átomos, que constituem o cristal, estão ligados entre si e, por isso, não existem portadores de cargas eléctricas que se possam mover. Introduzindo energia externa (energia calorífica), alguns electrões abandonam a sua ligação e podem mover-se sob influência dum campo eléctrico.

Aquecendo-se mais o semiconductor, aumentará também a quantidade de electrões livres que poderão transportar as cargas eléctricas. Isso significa que a condutibilidade eléctrica dos semicondutores aumenta com a elevação da temperatura. A resistência eléctrica do semiconductor baixa.

Se construíssemos gráficos R-T (que mostrassem a dependência da resistência eléctrica com a temperatura) dum metal e dum semiconductor, obter-se-ia a imagem seguinte:



## Resumo:

A condutibilidade eléctrica duma substância está ligada à existência de portadores das cargas eléctricas livres.

Os portadores de cargas eléctricas são os electrões e os iões.

Quando a energia do campo eléctrico se transmite aos portadores das cargas eléctricas, estes ganham uma aceleração.

O movimento dirigido — o fluxo — dos portadores de cargas eléctricas é a corrente eléctrica. Este é a soma dos movimentos dos portadores das cargas eléctricas, negativa e positiva.

A intensidade da corrente eléctrica é dada pela soma das intensidades das correntes,  $I^+$  e  $I^-$ .

$$I = I^+ + I^-$$

### *Vista geral sobre o processo de transporte das cargas eléctricas*

Meio	Portadores das cargas eléctricas	Sua existência
Metais	Electrões	Existem sempre
Semi-condutores	Electrões; lacunas de electrões	Existem a partir da introdução duma energia externa
Líquidos	Iões positivos; Iões negativos	Existem a partir da dissociação das moléculas duma substância química em solução aquosa
Gases	Electrões; Iões positivos; Iões negativos	Existem a partir da introdução duma energia externa
Vácuo	Electrões	Existem a partir da introdução duma energia externa

Todos os portadores das cargas eléctricas movem-se só pela influência dum campo eléctrico.

# CAPÍTULO II

## óptica geométrica

# ÓPTICA GEOMÉTRICA

## A natureza da luz e as fontes de luz - corpos luminosos e iluminados

O Sol emite luz. O filamento dum a lâmpada incandescente também emite luz.

O que é a luz?

Os cientistas discutiram durante muitos anos sobre a natureza da luz e hoje sabemos que a luz é uma forma de energia de que nos apercebemos a olho nu.

A luz propaga-se como uma onda em pequenas porções de energia, em quantidade. Mais tarde havemos de constatar que a luz tem uma natureza mais complicada — uma natureza dupla.

A luz é uma forma de energia que se propaga pela radiação.

Como já mencionámos, o Sol emite luz, o filamento dum a lâmpada incandescente ou um fósforo ardente também a emitem.

Aos corpos que emitem luz chama-se *fontes de luz ou corpos luminosos*, e aos outros que reflectem luz (e esses são a maioria), *corpos iluminados*.

Normalmente os corpos luminosos têm uma temperatura muito alta (o Sol tem aproximadamente 6000 K na sua superfície), mas há também corpos luminosos que emitem luz e têm uma temperatura relativamente baixa, as lâmpadas fluorescentes, por exemplo.

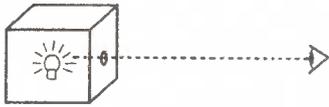
Aos corpos que emitem luz chama-se *corpos luminosos ou fontes de luz*. Os corpos iluminados são os que reflectem a luz que as fontes de luz emitem.

Alguns exemplos para os corpos luminosos: O sol; as estrelas; o filamento dum a lâmpada incandescente; o fogo; a descarga em válvulas cheias de gás; as lâmpadas fluorescentes.

Os corpos iluminados são aqueles que podemos ver e não são luminosos. Podemos ver também os corpos que não reflectem luz, mas que reduzem a intensidade da luz quando ela passa por eles.

## A propagação rectilínea da luz - sombra e penúmbra - o raio de luz

Pela vida diária sabemos que uma lâmpada instalada numa sala é visível por todos os lados. A lâmpada ilumina as paredes, o chão e o tecto. A luz propaga-se por todos os lados.

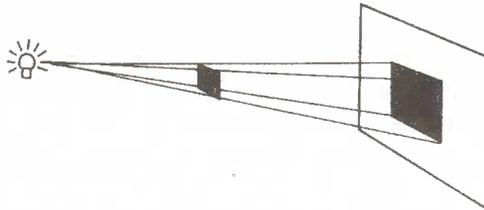


Façamos a experiência seguinte: Coloquemos em cima duma lâmpada incandescente uma caixa de cartolina com um único furo. A luz da lâmpada só podemos vê-la enquanto o nosso olho se encontrar na mesma recta que une o furo e o filamento da lâmpada na horizontal.

Isto significa que a luz emitida por uma fonte de luz se propaga de maneira rectilínea.

A propagação da luz é rectilínea.

Esta propagação rectilínea da luz podemos observá-la também quando intercalarmos um corpo não transparente entre a fonte de luz e um alvo. No alvo obteremos a imagem do corpo não transparente, isto é, um corpo representado como uma marca escura no alvo.



A luz não pode penetrar o corpo não transparente e, por isso, não há luz atrás do corpo, o espaço está escuro.

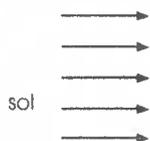
A este espaço chama-se *espaço de sombra* ou simplesmente *sombra*. Na vida diária vemos uma diversidade de sombras. A sombra duma árvore ou duma casa, por exemplo, são os lugares mais preferidos durante o tempo de calor.

Todas as sombras mais conhecidas ocorrem na natureza. Todos conhecemos as fases da Lua — quarto minguante, lua nova, quarto crescente. Estas fases da Lua são uma consequência da propagação rectilínea da luz. O Sol ilumina a lua e atrás desta surge a sombra. Por causa do movimento da Lua na sua órbita em volta da Terra, podemos observar um movimento da fronteira da sombra.



Mas não só atrás da Lua existe sombra. Durante a noite ficamos no espaço da sombra da Terra.

Este espaço da sombra pode atingir também a Lua. Neste caso podemos observar que uma parte, a Lua total ou ainda um círculo no disco da Lua estão escuros, o que significa que estas zonas da Lua não podem ser iluminadas pela luz do Sol.



A este fenómeno chama-se *eclipse da Lua*.



eclipse total da Lua

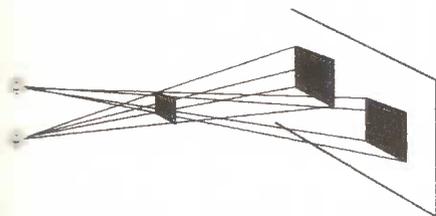


eclipse parcial da Lua



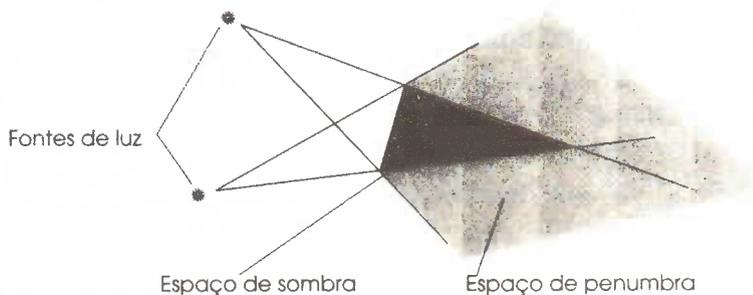
eclipse circular da Lua

Quando colocamos um objecto não transparente no percurso da luz de duas fontes diferentes, podemos observar um fenómeno curioso.



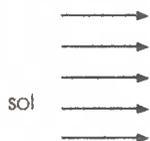
Na parede aparecem duas imagens do mesmo objecto, mas mais claras do que no caso em que usamos uma única fonte de luz. Este fenómeno é resultado da sobreposição da luz.

A luz duma fonte ilumina o espaço da sombra que a outra fonte não pode iluminar. A este caso chamamos *penumbra*.



Por causa da propagação rectilínea da luz atrás dum corpo não transparente existe um espaço de sombra.  
Se existem duas ou mais fontes de luz atrás dum corpo não transparente existe um espaço de sombra e de penumbra ao mesmo tempo.

Este espaço da sombra pode atingir também a Lua. Neste caso podemos observar que uma parte, a Lua total ou ainda um círculo no disco da Lua estão escuros, o que significa que estas zonas da Lua não podem ser iluminadas pela luz do Sol.



A este fenómeno chama-se *eclipse da Lua*.



eclipse total da Lua

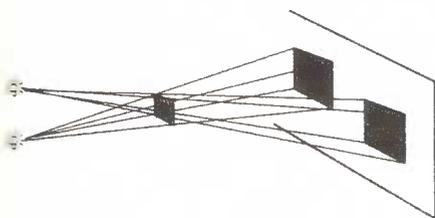


eclipse parcial da Lua



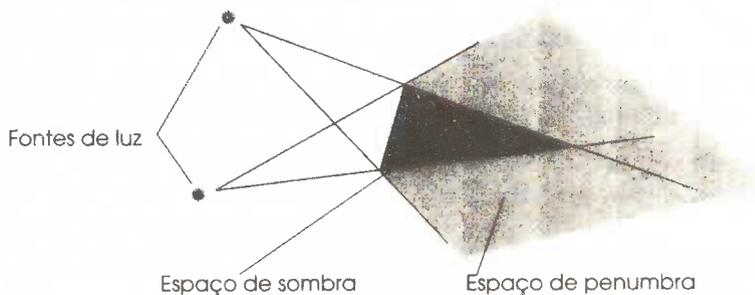
eclipse circular da Lua

Quando colocamos um objecto não transparente no percurso da luz de duas fontes diferentes, podemos observar um fenómeno curioso.



Na parede aparecem duas imagens do mesmo objecto, mas mais claras do que no caso em que usamos uma única fonte de luz. Este fenómeno é resultado da sobreposição da luz.

A luz duma fonte ilumina o espaço da sombra que a outra fonte não pode iluminar. A este caso chamamos *penumbra*.



Por causa da propagação rectilínea da luz atrás dum corpo não transparente existe um espaço de sombra.  
Se existem duas ou mais fontes de luz atrás dum corpo não transparente existe um espaço de sombra e de penumbra ao mesmo tempo.

A propagação da luz é rectilínea para todos os lados.

Deixemos passar a luz por uma fenda ou um furo. Veremos que sempre passa por aí um feixe de luz. Dependendo da dimensão da fenda ou do furo, o feixe de luz pode ser mais amplo ou mais estreito. Se o feixe for muito fino, observa-se muito bem o percurso da luz. Neste caso falamos de *raio de luz*. Sendo este, uma abstracção, não é possível seleccioná-lo como único raio de luz. Sempre temos um feixe de luz, mesmo que por motivos práticos o designemos de raio de luz ou raio luminoso.

Um raio luminoso é um feixe de luz muito fino que apresentamos graficamente por uma semi-recta.

## A velocidade da luz

Liguemos uma lâmpada incandescente, no mesmo instante veremos a luz que ela emite independentemente da distância em que a lâmpada estiver em relação a nós.

Durante tantos séculos dominou a opinião segundo a qual a luz não precisa de tempo para a sua propagação. Só no século XVII ganhou terreno o conhecimento de que a luz deve precisar de um certo tempo para a sua propagação.

O físico francês FIZEAU foi o primeiro a determinar o valor da velocidade de propagação da luz.

Com o melhoramento dos instrumentos de medição, a velocidade de propagação da luz foi determinada com cada vez maior exactidão.

Hoje sabemos que o valor da velocidade da luz no vácuo é de  $299\,792\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Esta velocidade é a mais alta que existe na natureza e é designada com o símbolo  $c$ .

A velocidade da luz no vácuo é a velocidade mais alta que existe na natureza.

$$c_0 = 299\,792\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$

Para os cálculos na vida diária, usa-se o valor aproximado  $c = 300\,000\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Normalmente é um pouco difícil receber uma ideia sobre esta velocidade porque todas as distâncias na Terra são curtas para a luz.

Por isso, façamos uma pequena excursão para o universo.

A estrela mais próxima para nós é o Sol.

A distância entre o Sol e a Terra é aproximadamente de  $s = 150\,000\,000\text{ km}$ .

Qual é o tempo que a luz emitida pelo Sol precisa para atingir a Terra?

$$v = \frac{s}{t}$$

$$t = \frac{s}{v}$$

$$t = \frac{150\,000\,000\text{ km}}{300\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}}$$

$$t = 500\text{ s}$$

Mas 500 s correspondem exactamente a 8 minutos e 20 segundos. Para a Terra podemos dizer que a luz emitida por uma fonte de luz seria visível imediatamente quase em todos os pontos do globo, mas a luz propaga-se de forma rectilínea.

Se observarmos o céu durante a noite, podemos ver milhares de estrelas. A luz das estrelas precisa mais de três anos para percorrer a distância entre elas e a Terra.

A estrela mais próxima depois do Sol é o Sirius.

Sabendo que a distância entre o Sirius e a Terra é de  $3,075 \cdot 10^{13}$  km:

— Calcula o tempo de que a luz precisa para percorrer esta distância.

— Transforma o tempo calculado em unidade da vida diária.

(1 ano tem 365 dias; 1 dia tem 24 horas e 1 hora tem 3600 segundos).

### **A intensidade do fluxo - a grandeza fluxo luminoso e sua unidade - a grandeza intensidade do fluxo luminoso I e a sua unidade Cd (candela)**

Uma fonte luminosa emite energia. Liguemos uma lâmpada incandescente num circuito eléctrico durante 10 minutos, tempo em que a lâmpada emite luz. Toquemos a lâmpada com a mão, sentiremos que ela está quente. Por isso, a lâmpada, como qualquer fonte luminosa, não só emite energia luminosa que podemos ver com os nossos olhos como também a energia calorífica.

Por outro lado, variando a tensão aplicada no circuito podemos ver que a claridade da lâmpada varia também. Isto significa que a lâmpada emite uma vez menos e outra vez mais a luz.

Para dizer qual é a fonte luminosa mais clara, precisamos de um método de medição.

À quantidade de energia luminosa que atravessa uma dada superfície durante uma unidade de tempo chama-se *fluxo luminoso*.

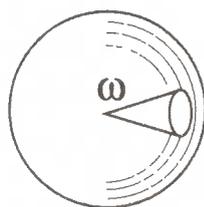
A propagação da luz é uma propagação rectilínea em todas as direcções, por isso, uma fonte luminosa emite mais energia luminosa na unidade de tempo do que o fluxo luminoso.

À totalidade da energia luminosa emitida durante um segundo por uma fonte luminosa chama-se *fluxo luminoso total*.

O símbolo do fluxo luminoso é  $\Phi$  e a sua unidade é o lúmen (lm).

Como já vimos, as lâmpadas e as fontes luminosas podem ter uma claridade diferente. Por isso, existe a necessidade de avaliar a qualidade duma fonte luminosa.

Coloquemos uma fonte luminosa pontual no centro duma esfera com o raio de 1 m. Veremos que o interior da esfera está iluminado de igual modo em todos os pontos. Cortemos uma parte da superfície de um grau do ângulo sólido, então obteremos um cone cujo vértice é a fonte luminosa.



1 grau do ester - radiano  
(ângulo sólido)

A superfície (S) deste cone está em dependência com o quadrado do raio da esfera. Por isso, podemos dizer que um grau do ester-radiano é dado pela relação

$$\omega = \frac{S}{R^2}$$

A superfície duma esfera calcula-se pela fórmula

$$S_E = 4\pi R^2$$

Isto quer dizer que o ângulo sólido total que abrange o espaço é

$$\omega_T = 4\pi$$

Quando a nossa fonte luminosa ilumina o cone com um ângulo sólido de um ester-radiano, com o fluxo luminoso de um lm, então ela própria ganha uma intensidade de 1 candela (cd).

O símbolo da grandeza intensidade de fluxo luminoso é  $I$ .

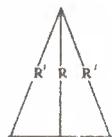
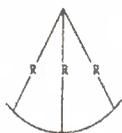
A unidade no SI para a intensidade de fluxo luminoso é a candela (cd).

$$I = \frac{\Phi}{4\pi}$$

## A dependência entre a luminosidade e a área iluminada

## A relação entre a luminosidade e o recíproco da densidade ao

quadrado —  $I_1 : I_2 = r_2^2 : r_1^2$



Uma fonte luminosa nunca ilumina uniformemente a superfície dum objecto, excepto quando a fonte luminosa está situada no centro duma esfera. Em todos os outros casos a distância entre a fonte luminosa e os pontos diferentes da superfície dum objecto são diferentes.

Este facto podemos observá-lo quando uma lâmpada pendurada no tecto ilumina uma mesa ou soalho. O centro da mesa fica melhor iluminado do que as suas bordas.

Como podemos avaliar ou comparar o grau de iluminação duma área?

Quando uma fonte luminosa tem uma intensidade de fluxo luminoso de 1 cd e ilumina o interior duma esfera com um raio de 1 m, em cada ester-radiano teremos um fluxo luminoso de 1 lm (lumen). Este fluxo luminoso ilumina uma área de  $1 \text{ m}^2$ . Neste caso dizemos que a iluminação desta área é de 1 lux. A iluminação própria designámo-la pela letra E.

$$E = \frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ m}^2}$$

Agora coloquemos a fonte luminosa no centro duma esfera com o raio de 2 m.

Quais são as consequências para a iluminação?

Como sabemos, a superfície duma esfera calcula-se pela fórmula:

$$S_E = 4\pi R^2$$

Um ester-radiano corresponde exactamente ao valor de  $4\pi$ . Isto significa que a área iluminada aumenta quatro vezes. O mesmo fluxo luminoso de 1 lm deve distribuir-se logicamente na área quatro vezes maior, quer dizer, a iluminação reduz-se quatro vezes.

Se quisermos garantir a mesma iluminação, como no primeiro caso, devemos aumentar a intensidade do fluxo luminoso quatro vezes mais.

Para garantir que a iluminação duma superfície em diferentes distâncias em relação à fonte luminosa se mantenha constante, a intensidade do fluxo luminoso deve crescer proporcionalmente ao

quadrado da distância. No caso do fluxo luminoso constante, a iluminação de uma superfície reduz-se ao quadrado em relação à distância crescente.

$$I_1 : I_2 = r_2^2 : r_1^2$$

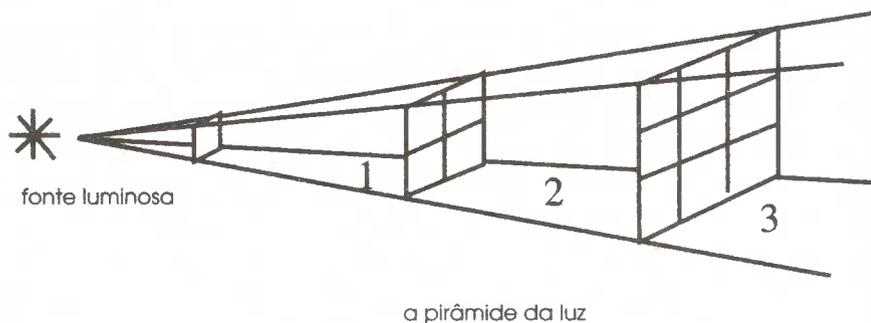
### Resumo:

A iluminação  $E$  de uma superfície é o quociente entre o fluxo luminoso e a área da superfície iluminada.

$$E = \frac{\Phi}{S}$$

A unidade da iluminação é o lux;  $1 \text{ lux} = \frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ m}^2}$

A iluminação de uma superfície reduz-se com o aumento da distância



### Comparação de duas fontes de luz - Fotômetro de Bunsen

Os fluxos luminosos podem ser diferentes na sua intensidade. Isso depende das fontes luminosas que emitem estes fluxos luminosos.

Como podemos comparar as fontes luminosas?

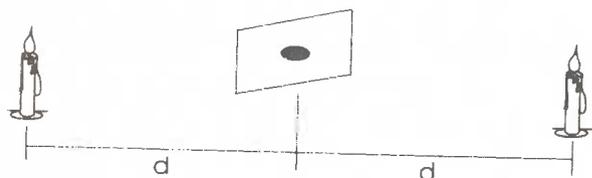
Façamos a experiência seguinte:

Tomemos uma folha de papel branca e sobre a qual pinguemos uma gota de óleo ou de estearina.

Como se pode constatar, a marca é quase transparente.

Coloquemos uma fonte luminosa atrás da folha e veremos que a marca é claramente visível. Coloquemos uma outra fonte luminosa da mesma intensidade em frente da folha, verificaremos que a marca vai desaparecer logo que as distâncias entre as duas fontes em relação à folha de papel forem iguais.

constante,  
à distância



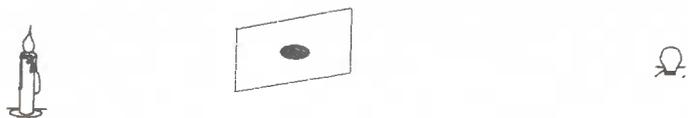
Este fenómeno podemos explicá-lo da seguinte maneira:

luminoso e

A iluminação em ambos os lados da folha de papel é igual e, por isso, toda a superfície fica iluminada da mesma maneira e a marca desaparece.

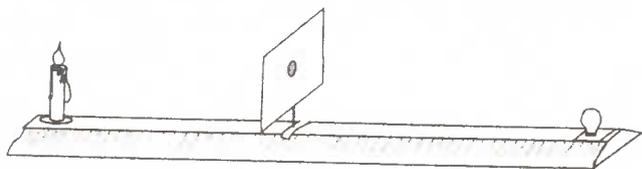
Substituamos uma das fontes luminosas, por exemplo, por uma lâmpada incandescente, a marca aparece de novo.

distância



A mudança da distância tem o mesmo efeito. Se a intensidade do fluxo luminoso emitida pela lâmpada incandescente é maior, então a distância entre a folha de papel e a lâmpada será também maior relativamente à distância da vela — papel. Esta experiência foi feita pela primeira vez pelo físico alemão ROBERT BUNSEN (1811 - 1899) e ao aparelho que ele utilizou chama-se *fotómetro de Bunsen* ou também *fotómetro da mancha de gordura*.

As fontes luminosas e a folha de papel devem ser colocadas num banco óptico que permita uma determinação exacta das distâncias.



A base para o funcionamento do fotómetro é a relação

$$I_1 : I_2 = r_2^2 : r_1^2$$

e. Isso

Os fotómetros modernos funcionam na base do efeito fotoquímico e utilizam válvulas de foto ou válvulas de selénio.

Resumo:

Φ é o símbolo para o fluxo luminoso e a sua unidade é o lm (lumen).

I é o símbolo para a intensidade do fluxo luminoso e a sua unidade no SI é a cd (candela).

E é a iluminação duma superfície dum corpo que se determina pelo quociente entre o fluxo luminoso e a superfície iluminada. A sua unidade é o lx (lux).

ue o  
a do  
a va  
ão o

## A reflexão da luz nos espelhos planos e a lei da reflexão

A luz emitida por uma fonte luminosa em meio homogêneo propaga-se de maneira rectilínea até atingir a fronteira deste meio com o outro.

Ao referirmo-nos a este tipo de meio, muitas vezes utilizamos o conceito de *meio óptico*.

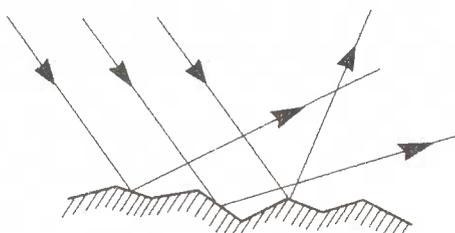
Na fronteira entre dois meios ópticos o raio luminoso pode mudar de sua direcção regressando ao meio de partida. A este fenómeno chama-se *reflexão da luz*.

Na natureza temos muitos exemplos da reflexão da luz.

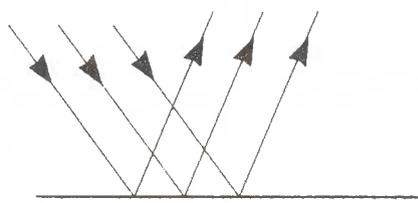
Todos os objectos são iluminados pelos raios de luz que o Sol emite

As superfícies dos objectos reflectem estes raios de luz que atingem os nossos olhos. Por causa da qualidade das superfícies dos objectos, os raios de luz reflectidos têm direcções diferentes. A esta reflexão chama-se *reflexão difusa ou irregular*.

Algumas vezes fechamos os nossos olhos porque os raios de luz são totalmente reflectidos na direcção em que nos encontramos e o objecto reflector fica brilhante. Nestes casos a superfície do objecto é quase totalmente lisa e temos uma *reflexão espelhante ou regular*.



Reflexão difusa ou irregular



Reflexão espelhante ou regular

Os objectos com uma superfície quase totalmente lisa são, por exemplo, a superfície duma chapa metálica polida, o vidro liso ou a superfície da água em repouso.

A estes objectos chamamo-lhes simplesmente *espelhos ou espelhos planos*, se o objecto em si for plano.

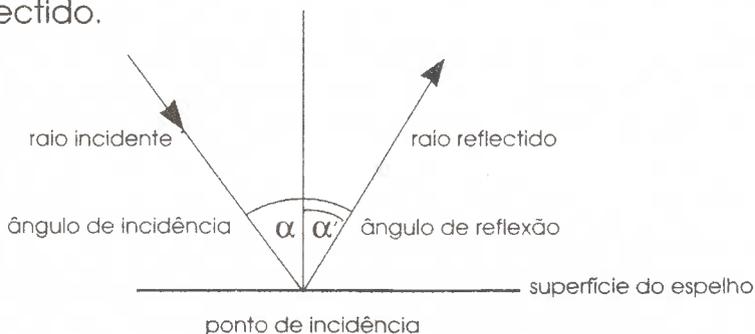
Os espelhos mais conhecidos e usados são os espelhos de vidro que têm num lado uma camada de mercúrio, mas existem também espelhos que são placas metálicas polidas.

Para estudar as características da reflexão da luz, escolhemos a reflexão espelhante.

Um raio de luz encontra obliquamente a superfície dum espelho e é reflectido numa determinada direcção. Mudando a direcção do raio de luz, a direcção do raio reflectido muda também.

Ao raio de luz emitido pela fonte que incide sobre o espelho chama-se *raio incidente* e ao raio reflectido pelo espelho, chama-se *raio reflectido*.

Construamos no ponto de incidência do raio de luz uma perpendicular ao espelho e medçamos os ângulos entre o raio incidente, a perpendicular e o raio reflectido.

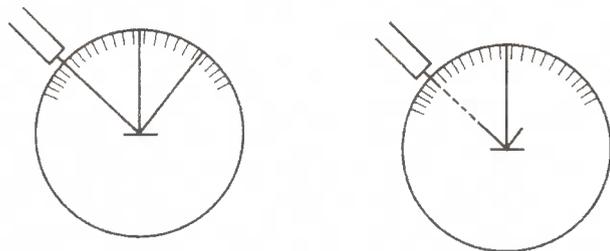


Estes ângulos designam-se *ângulo de incidência* ( $\alpha$ ) e *ângulo de reflexão* ( $\alpha'$ ).

Medindo com um transferidor estes dois ângulos, podemos constatar que as suas amplitudes são iguais.

$$\alpha = \alpha'$$

Se o raio incidente muda de posição, quer dizer, se a posição da fonte de luz muda, a direcção do raio reflectido muda também.



Viremos o disco de projecção de tal modo que possamos ver de novo o percurso do raio incidente, veremos também de novo o raio reflectido. Isto significa que o raio incidente, o raio reflectido e a perpendicular ao espelho (superfície do espelho) no ponto de incidência do raio, encontram-se no mesmo plano.

**Lei da reflexão:**

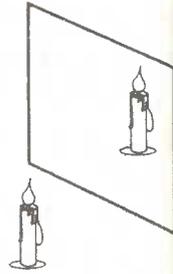
1. O raio incidente, o raio reflectido e a perpendicular ao espelho no ponto de incidência do raio, encontram-se no mesmo plano.
2. O ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência.

$$\alpha = \alpha'$$

Esta lei foi descoberta já há muitos anos.

## As imagens produzidas pelos espelhos planos e as suas características

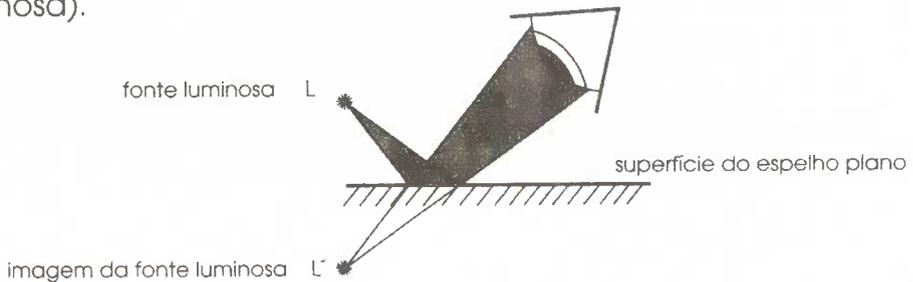
Se olharmos para um espelho, podemos ver a imagem da nossa face. Coloquemos uma vela acesa diante a um espelho plano, veremos neste a imagem da vela.



Como é possível isto?

Um ponto luminoso ou uma fonte luminosa que se encontra em frente dum espelho plano, a luz que emite incide sobre a superfície do espelho e é reflectida.

Esta luz reflectida encontra o nosso olho de tal modo que é como se viesse directamente da fonte luminosa. Os nossos olhos não podem ver a reflexão na superfície, eles só vêem a imagem do objecto (fonte luminosa).



Se o ponto  $L$  é a origem, o ponto  $L'$  é a sua imagem.

A esta imagem chama-se *virtual* porque a imagem  $L'$  é obtida pelos prolongamentos dos raios reflectidos e não por estes.

A energia luminosa não existe no ponto de intersecção dos prolongamentos.

Geometricamente pode-se demonstrar que as distâncias entre o objecto e o espelho e entre a imagem e o espelho são iguais. Isto significa que o objecto é simétrico à imagem em relação ao espelho.

Esta simetria significa também que, como cada ponto do objecto tem a sua imagem simétrica, a imagem tem o mesmo tamanho do objecto.

Façamos a experiência seguinte:



original



imagem

Tiremos duas fotos, uma do original, a outra da sua imagem. Depois de revelar constataremos que existe uma diferença entre estas duas fotos. Os tamanhos serão iguais, mas os lados estarão trocados. A imagem ficará invertida em relação aos lados do original.

## Resumo:

A imagem dum objecto num espelho plano é *virtual, simétrica* em relação ao espelho e do *mesmo tamanho* do objecto.

## Espelho esférico côncavo - distância focal - foco

Além dos espelhos planos há espelhos com uma superfície curvada, utilizados muitas vezes na vida diária, na técnica e na ciência.

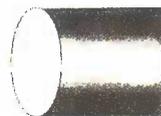
Exemplos de espelhos com superfícies curvadas:



farol de carro



refletor solar



espelho principal de um telescópio

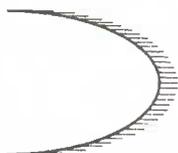
Em função da localização da superfície polida, os espelhos podem chamar-se *côncavos* ou *convexos*.



espelho côncavo



espelho convexo

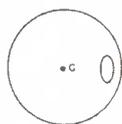


espelho parabólico côncavo

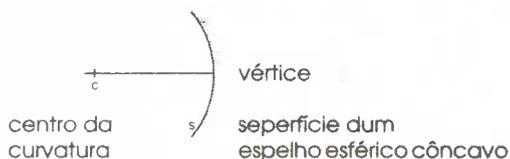
Os espelhos dos faróis de carros têm uma curvatura que corresponde na sua secção principal a uma parábola.

A estes espelhos chama-se *espelhos parabólicos côncavos*.

Os espelhos côncavos cuja superfície corresponde a uma parte do interior duma esfera, denominam-se *espelhos esféricos côncavos*.



centro da esfera; centro da curvatura do espelho côncavo



centro da curvatura

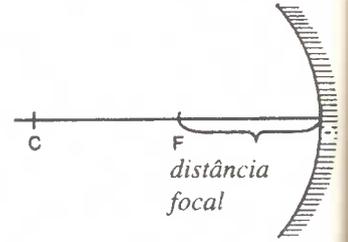
vértice

superfície dum espelho esférico côncavo

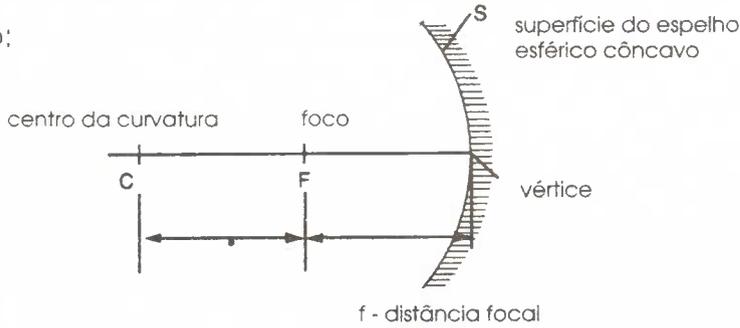
A recta que passa pelo centro da curvatura (C) e do vértice (O) chama-se *eixo óptico*.

Todos os espelhos esféricos côncavos têm uma característica comum, eles reflectem a luz de tal maneira que os raios reflectidos coincidam num ponto.

Este ponto fica no eixo óptico e divide a distância CO em duas partes iguais e chama-se-lhe *foco* e tem a designação F. À distância do foco ao vértice chama-se *distância focal* (*f*).

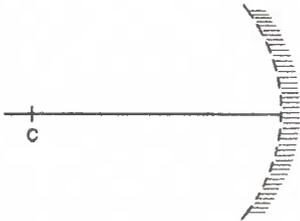


Resumo:



$$\overline{CO} = 2 \cdot \overline{FO}$$

### Trajecto do raio luminoso reflectido por espelho esférico côncavo - raio paralelo - raio focal

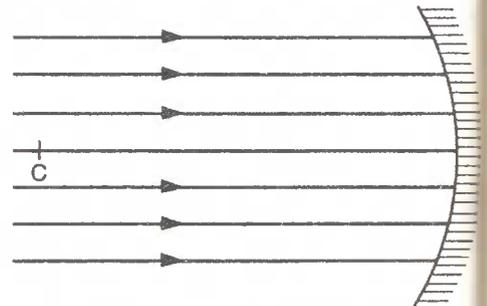


Pode-se imaginar um espelho esférico côncavo como se fosse composto por muitos espelhos planos, de dimensões muito pequenas.

Um raio luminoso que incide sobre o espelho esférico côncavo reflecte-se, e podemos aplicar para cada espelho plano a lei da reflexão para determinar o percurso do raio reflectido.

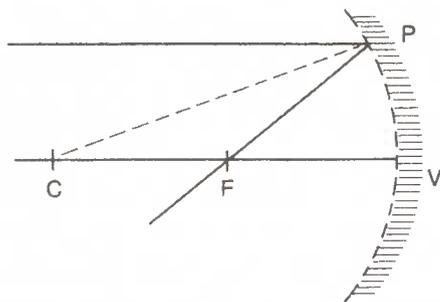
Para um raio luminoso que coincide com o eixo óptico, o raio reflectido tem o mesmo percurso. A esse raio chama-se *raio principal*. O ângulo de incidência e o ângulo de reflexão são nulos.

Todos os raios que são paralelos ao eixo óptico designam-se *raios paralelos*.



Qual é o percurso dum raio paralelo depois da reflexão?

num  
lam



Observe bem.

Um raio paralelo incide sobre o espelho no ponto P. CP é a perpendicular em relação à tangente (espelho plano) em P. Então os ângulos entre o raio paralelo e a perpendicular e entre a perpendicular e o eixo óptico, são iguais (os ângulos alternos internos nas rectas paralelas cortadas por uma secante).

Segundo a lei da reflexão, o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência. Isto significa que o raio reflectido deve cortar o eixo óptico num ponto F de tal modo que o triângulo CFP seja um triângulo isósceles. Este ponto F coincide exactamente com o foco do espelho esférico côncavo o que significa que todos os raios paralelos serão reflectidos de maneira a passarem pelo foco.

Os raios luminosos que passam pelo foco denominam-se *raios focais*. Assim, podemos concluir que todos os raios focais serão reflectidos como raios paralelos e vice-versa.

cavo  
elho

Resumo: \_\_\_\_\_

ecte  
parc



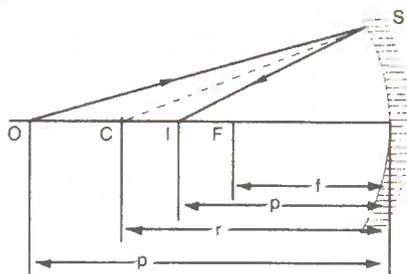
Raio incidente	Raio reflectido
Raio paralelo Raio focal Raio principal	Raio focal Raio paralelo Raio principal
Raios paralelos	
Raios focais	
Raios principais	

## Equação fundamental para espelhos côncavos

Uma fonte luminosa (ponto luminoso) está situada no eixo óptico dum espelho esférico côncavo.

À distância entre esta fonte e o vértice do espelho chama-se *distância do objecto* e designa-se com a letra  $p$ .

À distância entre o ponto de coincidência do raio reflectido com o eixo principal do espelho e o seu vértice chama-se *distância da imagem* e designa-se com a letra  $p'$ .



### Legenda:

$f$  - distância focal  
 $p$  - distância do objecto  
 $p'$  - distância da imagem  
 $r$  - raio de curvatura

Qual é a relação entre a distância do objecto ( $p$ ), a distância da imagem ( $p'$ ) e a distância focal ( $f$ )?

Com base no lema sobre as bissetrizes dos ângulos em triângulos é válida a relação:

$$\overline{OC} : \overline{CI} = \overline{OS} : \overline{SI} \approx p : p' \quad (\text{para os raios ao ponto do vértice do espelho esférico côncavo})$$

$$(p - r) : (r - p') = p : p'$$

$$pp' - rp' = rp - pp'$$

$$2pp' = rp + rp' \quad | : pp'r$$

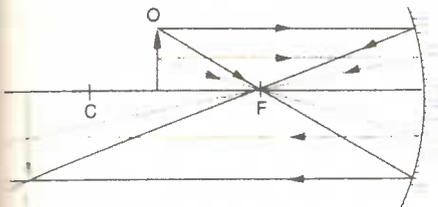
$$\frac{2}{r} = \frac{1}{p'} + \frac{1}{p}$$

Respeitando a relação  $r = 2f$  e substituindo na equação anterior obtemos a *equação fundamental* para espelhos esféricos côncavos:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

## Imagens produzidas pelos espelhos esféricos côncavos e suas características

Coloquemos um objecto luminoso ou iluminado defronte dum espelho esférico côncavo, obteremos uma imagem deste objecto pela reflexão dos raios luminosos na superfície do espelho.



Cada ponto do objecto emite raios luminosos (por exemplo, raios paralelos e raios focais) que serão reflectidos de acordo com a lei de reflexão.

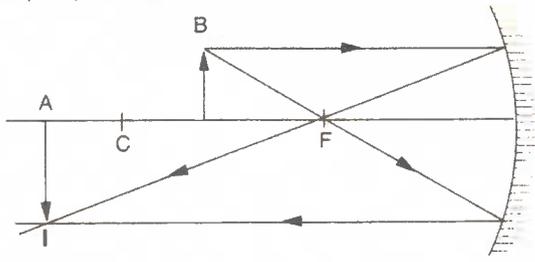
Os raios luminosos de dois pontos diferentes do objecto coincidem depois da reflexão em dois pontos diferentes no mesmo plano, quer dizer, existe um plano ou um lugar em que se concentra a energia luminosa.

Neste lugar ou plano, podemos encontrar a imagem do objecto com ajuda dum alvo ou écran.

Qual é a distância entre este lugar (a imagem) e o espelho, e que tipo de imagem podemos ver?

Para responder a esta pergunta, investigaremos três casos diferentes:  
 1º caso: O objecto está situado entre a distância focal e o centro de curvatura (dupla distância focal).

$2f > p > f$



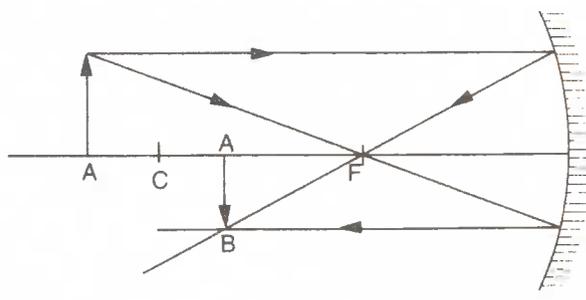
$p' > 2f$

Como se pode ver, a imagem localiza-se a uma distância que é maior do que a dupla distância focal.

A imagem é maior do que o objecto, é invertida e real, quer dizer, a imagem pode ser recolhida no écran.

2º caso: O objecto está situado fora da dupla distância focal.

$p < 2f$

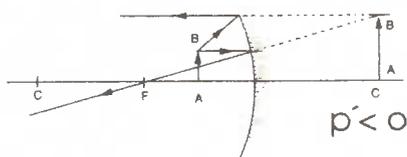


$f < p' < 2f$

A imagem é menor do que o objecto, está situada entre a dupla distância focal, e a distância focal é invertida e real.

3º caso: O objecto está situado entre o foco e o vértice do espelho.

$$p < f$$



Os raios reflectidos não se intersectam, o que significa que a imagem não pode ser recolhida num écran. Os raios reflectidos são divergentes. Um observador veria a imagem na intersecção dos prolongamentos dos raios reflectidos para o lado oposto do espelho. Isto significa que a imagem é *virtual*, como no caso dos espelhos planos, é *maior e direita*.

**Resumo:**

Um espelho esférico côncavo pode produzir uma imagem real ( $p < f$ ) ou uma imagem virtual ( $p > f$ )

As imagens reais são invertidas.	As imagens virtuais são direitas
As imagens reais são maiores do que os objectos se $2f > p > f$ e menores se $p > 2f$ .	As imagens virtuais são sempre maiores do que os objectos.

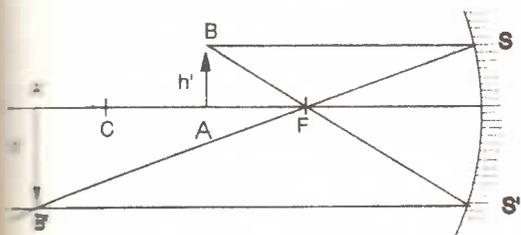
Distância do objecto ao espelho ( $p$ )	Distância da imagem ao espelho ( $p'$ )	Características
$2f > p > f$	$p' > 2f$	maior, invertida, real
$p = 2f$	$2f > p' = f$	igual, invertida, real
$p = f$	$p' = \infty$	igual, invertida, real
$p < f$	$p' < 0$	maior, direita, virtual

Resolva o seguinte problema: Indique a localização da imagem em cada um dos casos que se seguem em que o objecto:

- É colocado sobre o centro de curvatura.
- É colocado sobre o foco.

### Relação entre as grandezas da imagem e as do objecto

Como vimos, o espelho esférico côncavo pode produzir imagens maiores ou menores em relação ao objecto, dependendo da distância deste ao espelho.



Qual é a relação que existe entre as alturas do objecto e da imagem e das distâncias respectivas? Observemos bem o gráfico seguinte:

Os triângulos  $BFS$  e  $S'FB'$  são triângulos semelhantes porque os ângulos  $BFS$  e  $S'FB'$  são iguais (ângulos verticalmente opostos),  $\overline{BS}$  e  $\overline{B'S'}$  são paralelos e os lados  $\overline{SF}$  e  $\overline{FB'}$  tal como  $\overline{BF}$  e  $\overline{FS'}$  pertencem dois a dois à mesma recta.

As alturas do objecto  $\overline{AB}$  e da imagem  $\overline{B'A'}$  correspondem às alturas destes triângulos em relação aos lados paralelos  $\overline{BS}$  e  $\overline{B'S'}$ .

Logicamente que podemos concluir que as razões dos lados paralelos e das alturas destes triângulos são iguais.

$$\overline{BS} : \overline{B'S'} = \overline{AB} : \overline{A'B'}$$

$\overline{BS}$  e  $\overline{B'S'}$  correspondem às distâncias do objecto ( $p$ ) e da imagem ( $p'$ ) respectivamente em relação ao espelho.

Designemos a altura do objecto por  $h$  e a da imagem por  $h'$  e teremos a relação seguinte:

$$p : p' = h : h' \Leftrightarrow \frac{p}{p'} = \frac{h}{h'}$$

Isto significa que entre as distâncias do objecto e da imagem existe uma razão que é a mesma para as alturas.

## Conceito de meio óptico; refração dum raio de luz num dioptro plano

Como sabemos, na Natureza existem corpos transparentes e não transparentes. A luz propaga-se nos corpos transparentes ou penetra-os.

Ao corpo ou à substância em que a luz pode propagar-se chama-se *meio óptico* ou *meio*.

O ar, a água, o vidro, são exemplos de meios ópticos. Dependendo da constituição destas substâncias, podemos distinguir os meios ópticos mais densos e menos densos.

O ar é um meio óptico menos denso em relação à água e esta é um meio menos denso do que o vidro.

Também existem diferenças em relação à densidade óptica das substâncias. A densidade óptica está em dependência da composição do respectivo meio óptico.

Façamos agora uma pequena experiência: Introduzamos parcialmente um lápis ou uma esferográfica num copo de água e observemos o resultado: o lápis ou esferográfica parecem quebrados.

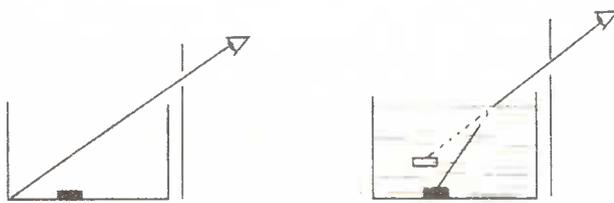
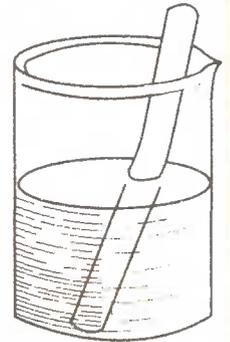
Como explicar este fenómeno?

Tirando o lápis da água, podemos ver que ele não está quebrado, tem a mesma forma que tinha antes de ser mergulhado na água.

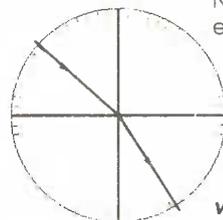
Façamos uma outra experiência:

Coloquemos uma moeda no fundo dum vaso tapado dum lado e disponhamos um cartão no qual se aplicou um orifício de tal modo que, olhando através dele, não se possa ver a moeda.

Deitando água no vaso já se pode ver a moeda.



raio incidente



vidro  
raio reflectido

Depois da 2ª experiência podemos concluir que a propagação da luz quando esta passa dum meio para outro, não se realiza em linha recta.

Quando um raio luminoso incide obliquamente sobre a superfície de separação de dois meios ópticos (ar e vidro), podemos ver o raio luminoso propagar-se no 2º meio, seguindo uma outra direcção, quer dizer, o raio luminoso que passa dum meio óptico para outro sofre uma mudança brusca de direcção na superfície de separação dos dois meios ópticos. *Chama-se refacção à mudança de direcção de propagação que o raio luminoso sofre ao passar de um meio óptico para outro.*

O raio incidente depois da refacção propaga-se como raio refractado.

Ao ângulo entre o raio incidente e a normal chama-se *ângulo de incidência*. Ao ângulo entre a normal e o raio refractado chama-se *ângulo de refacção*.

Comparando os dois ângulos, podemos constatar que o ângulo de refacção é menor do que o ângulo de incidência. Isso significa que o raio incidente é refractado em direcção à normal. Mas se a incidência fosse contrária, ou seja, do vidro para a água, o raio incidente refractar-se-ia, afastando-se da normal.

Naturalmente, no caso em que o raio incidente encontra a superfície de separação de dois meios ópticos, não é toda a luz que passa para o segundo meio óptico. Uma parte da luz é reflectida nesta superfície de acordo com a lei da reflexão. Isto significa que, quando um raio luminoso incide obliquamente sobre a superfície de separação de dois meios ópticos, se formam geralmente dois novos raios, o raio reflectido e o raio refractado.

Porque o raio reflectido é mais fraco do que o raio refractado, podemos desprezá-lo.

**Resumo:**

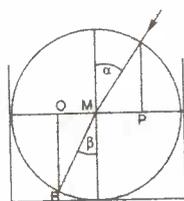
À passagem da luz dum meio óptico para outro acompanhada pela mudança brusca da direcção do raio luminoso *chama-se refacção da luz.*

### **Lei da refacção**



Sabemos que no caso da reflexão, o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão têm o mesmo valor. Isto significa que cada mudança do ângulo de incidência, muda também o ângulo de reflexão. Existirá uma semelhança da dependência também no caso da refacção?

Um raio incidente que incide perpendicularmente sobre a superfície de separação de dois meios, propaga-se no 2º meio sem qualquer mudança de direcção e não tem lugar a refacção.



A medida que o ângulo de incidência recebe valores maiores a zero graus, podemos notar a refacção do raio luminoso.

Coloquemos numa tina pneumática cheia de água, um disco, de tal maneira que o seu diâmetro coincida com a superfície de separação entre a água e o ar, e investiguemos a relação entre o ângulo de incidência e o ângulo de refacção.

Meçamos cuidadosamente as distâncias e variemos algumas vezes o ângulo de incidência e veremos que o ângulo de refacção variará

também. Podemos ver que o quociente  $\frac{\overline{MP}}{\overline{OM}}$  tem sempre o mesmo valor

e isto significa que a razão  $\frac{\overline{MP}}{\overline{OM}} = \text{const.}$

Para os dois meios ópticos, ar e água, temos a razão:

$$\frac{\overline{MP}}{\overline{OM}} = \frac{4}{3}$$

Que é o índice de refacção da água em relação ao ar.

As distâncias estão ligadas ao seno do ângulo de incidência e ao seno do ângulo de refacção respectivamente:

$$\text{sen}\beta = \frac{\overline{OM}}{\overline{BM}}; \text{sen}\alpha = \frac{\overline{MP}}{\overline{AM}}; \text{mas } \overline{BM} = \overline{AM}$$

o raio do disco e podemos daqui obter a seguinte identidade:

$$\frac{\overline{MP}}{\text{sen}\alpha} = \frac{\overline{OM}}{\text{sen}\beta} \Leftrightarrow \frac{\text{sen}\alpha}{\text{sen}\beta} = \frac{\overline{MP}}{\overline{OM}} = \frac{4}{3} = n$$

Se for o ângulo de incidência e o ângulo de refacção, então

$$\frac{\text{sen}\alpha}{\text{sen}\beta} = n$$

superfície  
qualquer

Lei da refacção:

Para dois dados meios ópticos, a razão entre o seno do ângulo de incidência e o seno do ângulo de refacção é uma grandeza constante.

incidência  
o graus  
do raio

O raio incidente, o raio refractado e a normal à superfície de separação entre os dois meios ópticos no ponto de incidência, encontram-se no mesmo plano.

o, de ta  
paração  
ângulo de

### Reversibilidade do percurso do raio de luz

as vezes  
o variará

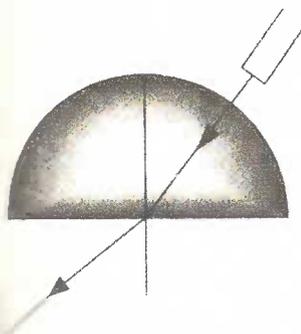
Anteriormente pudemos ver que o raio luminoso que atravessa a superfície de separação de dois meios ópticos é refractado em direcção à normal, se ele passa de meio óptico menos denso para o mais denso.

mo valor

Como exemplo disso temos o caso em que o raio luminoso passa do ar para o vidro ou do ar para a água.

Como é a refacção do raio luminoso quando passa do meio mais denso para o menos denso?

Observe bem:



Um raio luminoso incide perpendicularmente sobre um meio (disco de vidro) e não sofre nenhuma refacção. Mas, quando o raio luminoso atinge a fronteira horizontal e oposta, entre o vidro e ar, ele incide obliquamente sobre a superfície. Ao passar para o ar, o raio luminoso é refractado de tal maneira que o ângulo de refacção seja maior do que o ângulo de incidência.

cia e ac

dade:

isto significa que no caso da passagem do raio luminoso dum meio óptico mais denso para o menos denso, o ângulo de refacção é maior do que o ângulo de incidência, ou seja, o raio luminoso refracta-se, afastando-se da normal à superfície de separação.

ntão

Medições exactas de amplitudes angulares mostram que o raio luminoso tem o mesmo percurso no caso da passagem do ar para o vidro ou do vidro para o ar (quando os raios refractado e incidente tocam de papéis).

Isto significa que o percurso do raio de luz é *reversível*.

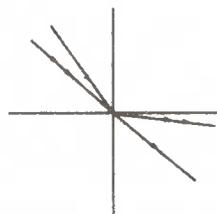
*A este princípio chama-se princípio da reversibilidade da luz.*

## Reflexão total e o ângulo limite

Quando um raio luminoso passa dum meio óptico mais denso para o menos denso, o ângulo de refração, como atrás vimos, é maior do que o ângulo de incidência. Aumentando o ângulo de incidência, aumenta o ângulo de refração também.

Observe bem:

O ângulo de refração, continuando a aumentar o raio refractado, aproxima-se no seu percurso da superfície de separação entre os dois meios ópticos, afastando-se da normal.



Aumentando cada vez mais o ângulo de incidência, o raio refractado irá coincidir com a superfície de separação, quer dizer, o raio de refração terá o valor de  $90^\circ$ .

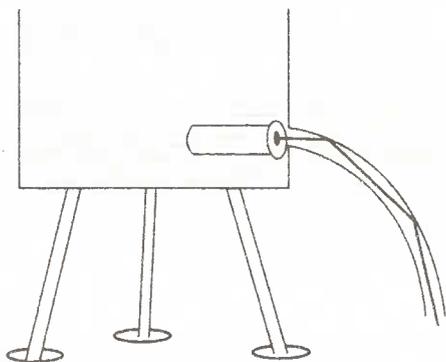
A esse fenómeno chama-se *emergência rasante* e o ângulo de incidência que possibilita essa refração, *ângulo limite*.

Se aumentarmos o ângulo de incidência para além do valor do ângulo limite, observaremos que não há nenhum raio refractado.

Como já mencionámos, quando um raio luminoso incide obliquamente na superfície de separação de dois meios ópticos, formam-se geralmente dois novos raios ópticos, o raio reflectido e o raio refractado. No caso em que o ângulo de incidência tem um valor maior do que o valor do ângulo limite, toda a energia luminosa será reflectida na superfície de separação dos dois meios ópticos.

A esse fenómeno chama-se *reflexão total*.

Colocando uma fonte de luz num tambor em frente dum furo, o raio luminoso propaga-se dentro do jacto de água por causa da reflexão total deste raio e no lugar onde o jacto de água cai, podemos ver uma marca de luz.



Esta reflexão utiliza-se na técnica moderna da telecomunicação em forma de cabos de condutores de luz e na medicina.

A lei da refração diz que se for o ângulo de incidência e o ângulo de refração, então:

$$\frac{\text{sen}\alpha}{\text{sen}\beta} = n$$

Quando  $\beta = 90^\circ$  (emergência rasante), o valor do  $\text{sen } 90^\circ$  é igual a 1 e

o ângulo de incidência correspondente, chamado ângulo limite, tem um valor que é determinado através da seguinte relação:  $\text{sen } \alpha = n$  ( $n < 1$ )

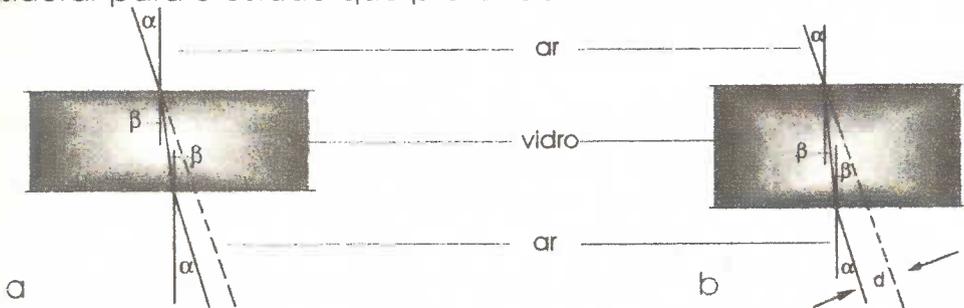
para o ar. Exemplo: Para os meios ópticos água e ar,  $n$  é aproximadamente 0,75. Isto significa que  $n = 0,75$  ou que  $\alpha = \underline{48^{\circ},583}$ .

### Percurso da luz através duma lâmina óptica; desvio do raio da luz

Um raio luminoso incide obliquamente sobre a superfície de separação de dois meios ópticos e tem uma outra direcção em relação à anterior depois de atravessar a superfície.

Qual será a direcção dum raio luminoso que atravessa duas vezes a superfície de separação de dois meios ópticos?

A passagem dum raio de luz através duma placa de vidro também conhecida por *óptica lâmina* de faces paralelas, é um exemplo a considerar para o estudo que pretendemos realizar.



Na passagem do raio luminoso do ar para o vidro, o ângulo de refacção é menor do que o ângulo de incidência (passagem da luz para o meio ópticamente mais denso).

Na passagem do raio refractado do vidro para o ar (saindo da lâmina), o ângulo de refacção é maior do que o ângulo de incidência (passagem da luz do meio mais denso para o menos denso).

No caso da lâmina de faces paralelas o ângulo da segunda refacção quando a luz emerge do vidro, é igual ao ângulo da primeira incidência quando a luz passa do ar para o vidro.

Por causa da reversibilidade do percurso do raio de luz, o ângulo de refacção depois da segunda passagem deve ter o mesmo valor do ângulo de incidência antes da primeira passagem.

Geometricamente estes dois ângulos são ângulos opostos externos nas duas rectas paralelas cortadas por uma secante.

Isto fisicamente significa que o raio de luz depois de atravessar uma lâmina de faces paralelas, tem a mesma direcção perdida na primeira refacção.

Observe atentamente as figuras a) e b).

As duas lâminas têm espessuras diferentes. Como consequência disso o raio luminoso percorre, dentro das lâminas, distâncias diferentes e emerge em pontos também diferentes.

Diz-se nos dois casos que o raio luminoso sofreu um desvio lateral ( $d$ ) do seu caminho original. A espessura da lâmina é o factor determinante do valor desse desvio lateral do raio luminoso.

## Lentes ópticas - foco - distância focal - diferentes tipos de lentes ópticas

Ao corpo transparente limitado por duas superfícies curvas ou uma superfície curva e outra plana, chama-se em Óptica, *lente*.



Todas estas lentes poderão ser construídas a partir do centro de curvatura que fica sempre no eixo principal ou eixo óptico das lentes (ver as figuras acima).

As lentes são classificadas em função das formas das suas superfícies conforme se apresentar em curvadas para fora ou para dentro.

Se as duas superfícies se apresentam curvadas para fora, as lentes são *convexas ou convergentes*.

Se as superfícies estão curvadas para dentro, então elas são *côncavas ou divergentes*.

Principalmente se pode dizer que se a borda da lente é mais fina do que o centro, ela é convexa, e se a borda é mais grossa do que o centro a lente é côncava.

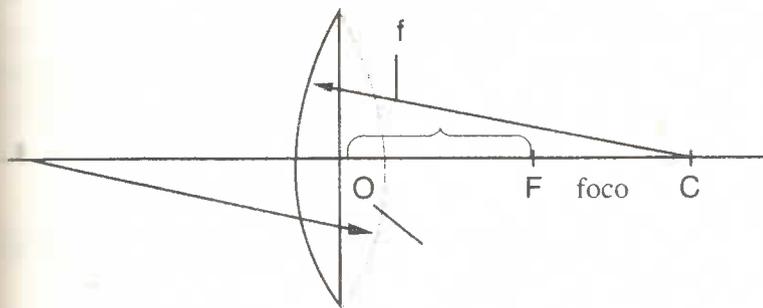
### Os diferentes tipos de lentes



Um feixe de raios luminosos paralelos ao eixo principal que atravessam uma lente convexa, concentram-se depois de a atravessarem num ponto  $F$ , chamado *foco* da lente e que está situado no eixo principal.

A distância entre o foco e o centro óptico *da lente* diz-se *distância focal*.

Resumo: \_\_\_\_\_



Representação esquemática

### Percurso do raio luminoso através duma lente biconvexa, raio central, raio paralelo e raio focal

Na indústria óptica de fabrico de telescópios, microscópios, máquinas fotográficas usa-se a combinação de vários tipos de lentes.

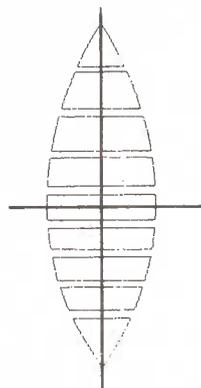
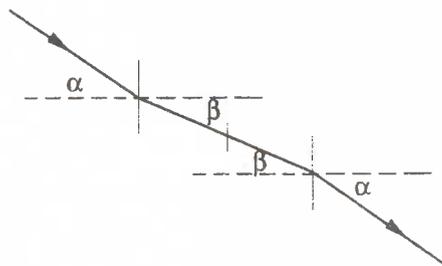
Para estudar as propriedades das lentes, escolhemos a lente biconvexa que é a mais usada.

Os raios luminosos que atravessam uma lente sofrem nesta duas vezes a refração, ao imergirem e quando emergem do outro lado da lente.

Para cada raio luminoso podíamos construir o respectivo percurso com ajuda da lei da refração. Mas para todos os raios isso seria bastante penoso e, por isso, escolhemos alguns raios luminosos (notáveis) que representam todos os outros.

Um raio luminoso que passa pelo ponto O da lente (o seu centro óptico) tem o nome de *raio central*.

Qual é o percurso do raio central? Observe bem.



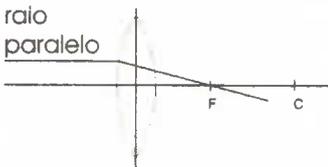
Um raio central (raio luminoso que passa pelo centro óptico da lente)

não vai sofrer nenhuma mudança da sua direcção de propagação. Os pontos de incidência e de emergência são simétricos em relação ao centro óptico da lente. O desvio lateral de um raio luminoso é desprezível para as lentes finas (lentes delgadas).

**Conclusão:**

Um raio central atravessa a lente sem mudar a sua direcção de propagação.

Um raio luminoso paralelo ao eixo óptico tem, como em caso do espelho esférico côncavo, o nome de *raio paralelo*.



Um raio luminoso paralelo sofre duas vezes a refração e abandona a lente com uma direcção que corta o eixo principal no ponto F (foco da lente). Este raio que corta o eixo principal no foco tem o nome de *raio focal*.

Por causa da reversibilidade do percurso dos raios luminosos podemos concluir que um raio luminoso, que é um raio focal antes de atravessar a lente, se refracta como raio paralelo e vice-versa.

Um raio paralelo será um raio focal e um raio focal será um raio paralelo depois de atravessar a lente convergente.

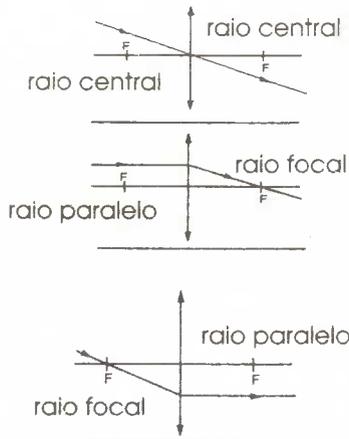
Normalmente não construímos o percurso dos raios luminosos no interior das lentes, usamos representações simples como as que figuram no quadro resumo que segue:

**Resumo:**

**Percurso do raio luminoso**

antes de atravessar a lente

depois de atravessar a lente

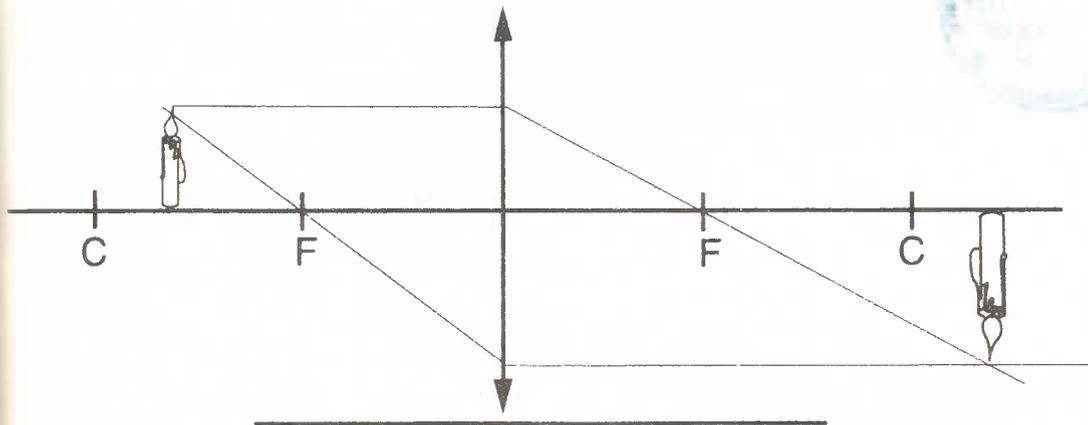


## Imagem dum objecto produzido por uma lente convergente - Equação fundamental das lentes delgadas

Tal como o espelho plano ou esférico côncavo, a lente fornece uma imagem dum objecto que emite directa ou indirectamente a luz. Isto significa que os raios luminosos escolhidos em qualquer objecto, depois da refração na lente, convergem de novo num ponto.

Se à saída da lente os raios luminosos convergem, então eles formam uma imagem que podemos recolher num écran.

Essa imagem é *real*.



A altura da imagem dependerá da distância do objecto à lente. Colocando um objecto sobre o eixo principal a uma distância da lente maior do que a distância focal e menor do que o dobro desta, a imagem aparece a uma distância da lente superior à dupla distância focal ( $2f$ ).

A imagem é *maior* do que o objecto, *invertida* e, como já vimos, *real*.

Todos os objectos colocados a uma distância maior do que a distância focal, mas menor do que o dobro desta, fornecem imagens com estas características.

Se a distância do objecto é maior do que a dupla distância focal, como o percurso do raio de luz é reversível, a imagem do objecto colocado nesta distância deve aparecer a uma distância da lente, que é menor do que a dupla distância focal e maior do que a distância focal.

A imagem é *menor* do que o objecto, *invertida* e *real*.

Quando o objecto é colocado a uma distância da lente que coincide com a dupla distância focal, a imagem tem a mesma altura do objecto, mas invertida e real.

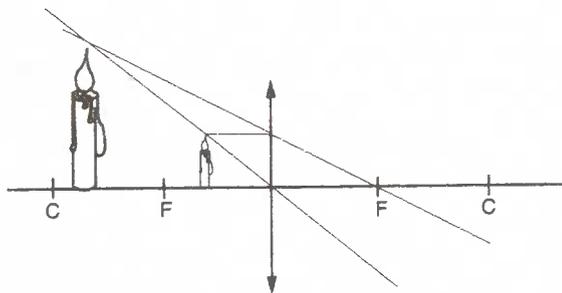
*Resumo:*

Quando a distância do objecto à lente *umenta*, a imagem produzida pela lente aproxima-se da lente, e a altura da imagem *diminui*.

Distância do objecto à lente ( $p$ )	Distância da imagem à lente ( $p'$ )	Características
$2f > p > f$	$p' > 2f$	maior inversa real
$p > 2f$	$2f > p' > f$	menor inversa real
$p = 2f$	$p' = 2f$	igual inversa real

*Observe bem:*

Coloquemos um objecto no eixo principal duma lente, a uma distância menor do que a distância focal.



Os raios luminosos depois da refração são raios *divergentes*.

Isto significa que do lado da divergência os raios não terão a possibilidade de coincidir e consequentemente de formar uma imagem, por isso, do lado direito da lente não se poderá recolher nenhuma imagem.

Um observador que se colocasse a um ponto que se situa no prolongamento dos raios refractados, no sentido da sua convergência, receberia a imagem no ponto de convergência do prolongamento dos raios refractados do mesmo lado que se encontra o objecto.

Isto justifica por que essa imagem não pode ser recolhida num écran.

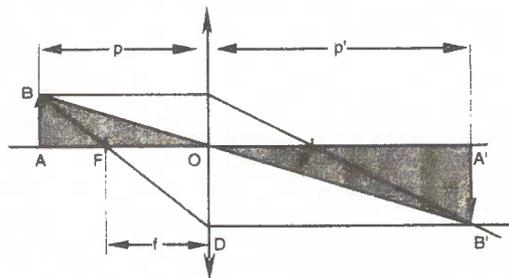
A imagem é *virtual*, maior do que o objecto e *direita*.

Distância do objecto à lente ( $p$ )	Distância da imagem à lente ( $p'$ )	Características
$p < f$	$p' > f$	maior direita virtual

### A equação fundamental para as lentes delgadas

Ao iniciarmos o estudo desta equação, é importante salientar que ela é só válida para as lentes delgadas.

Observe a figura que se segue:



Os dois triângulos AOB e A'OB' são semelhantes e, por isso, é válida a relação:

$$\overline{OA} : \overline{OA'} = \overline{AB} : \overline{A'B'}$$

Por outro lado é também válida a relação:

$$\overline{OF} : \overline{FA'} = \overline{OC} : \overline{A'B'} \text{ donde } \overline{OC} = \overline{AB}$$

$$\overline{AO} : \overline{OA'} = \overline{OF} : \overline{FA'} \text{ ou}$$

então

$$p : p' = f : (p' - f)$$

Por uma transformação simples, obtemos

$$p'f = pp' - pf \text{ ou } p'f + pf = pp'$$

Dividindo todos os membros desta igualdade pelo produto fpp',

obtemos:  $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$  ou  $\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$  que é a *equação fundamental* para

as lentes delgadas.

## Resumo:

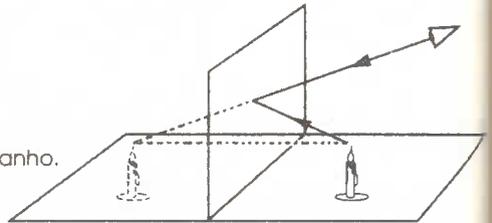
### Lei da reflexão

1. O raio incidente, a normal no ponto de incidência e o raio reflectido estão no mesmo plano.
2. O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.

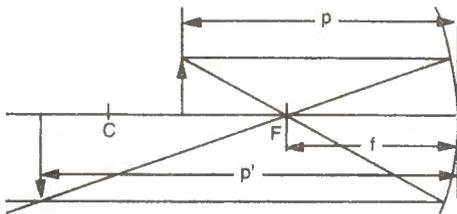
$$\alpha = \alpha'$$

### Reflexão no espelho plano

A imagem é virtual, simétrica ao objecto e do mesmo tamanho.  
A imagem é invertida em relação aos lados do objecto.



### Reflexão no espelho esférico côncavo



f - distância focal  
p - distância do objecto ao espelho  
p' - distância da imagem ao espelho

Distância do objecto ao espelho ( p )	Distância da imagem ao espelho ( p' )	Características da imagem
$2f > p > f$	$p' > 2f$	real inversa maior
$p > 2f$	$2f > p' > f$	real inversa menor
$p = 2f$	$p' = 2f$	real inversa igual
$p < f$	$p' < 0$	virtual direita maior

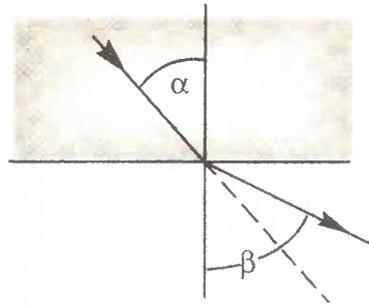
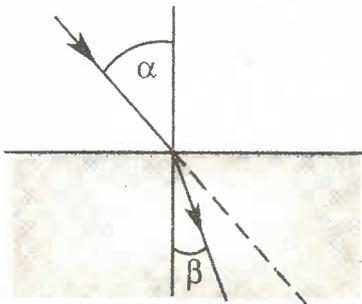
Equação fundamental:

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

### Lei da refração:

1. O raio incidente, raio refractado e a normal à superfície de separação entre os dois meios ópticos no ponto de incidência, encontram-se no mesmo plano.
2. Para dois meios ópticos a razão entre o seno do ângulo de incidência e o seno do ângulo de refração é uma grandeza constante.

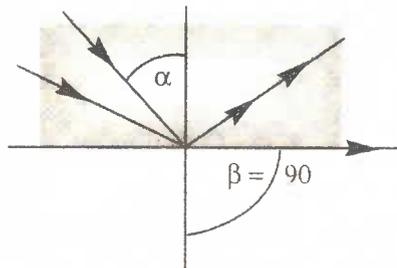
$$\frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \beta} = n$$



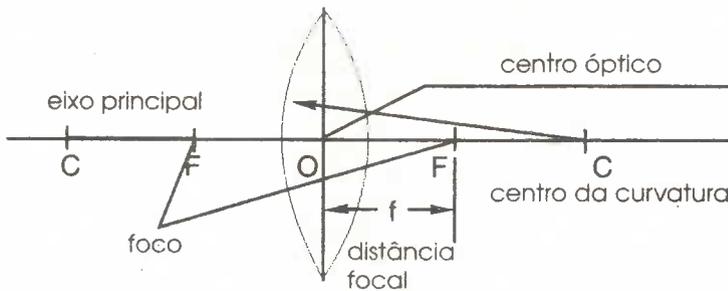
Caso especial:

$$n = \text{sen } \alpha \quad (n > 1)$$

Reflexão total



A lente biconvexa



### Imagens produzidas por uma lente convergente:

Distância do objecto à lente ( p )	Distância da imagem à lente ( p' )	Características da imagem
$2f > p > f$	$p' > f$	real inversa maior
$p > 2f$	$2f > p' > f$	real inversa menor
$p = 2f$	$p' = 2f$	real inversa igual
$p > f$	$p' > f$	virtual direita maior

Equação fundamental:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$$

### Instrumentos ópticos - lupa, olho humano, máquina fotográfica

A Óptica tem grande importância na nossa vida. Sem luz não podemos ver nada. Pelo estudo da Óptica foi possível construir alguns aparelhos que nos ajudam em diferentes situações na nossa vida. Hoje em dia conhecemos muitos aparelhos ópticos.

O microscópio, o telescópio, a lanterna de projecção, a máquina fotográfica, a lupa e os óculos são alguns exemplos.

Os nossos olhos têm muita semelhança na sua constituição com um instrumento óptico.

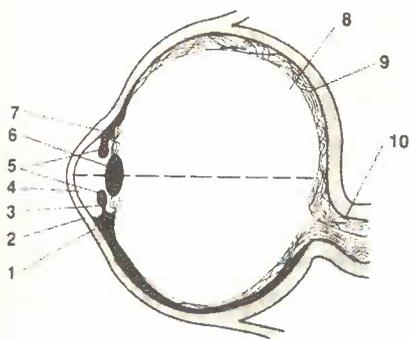
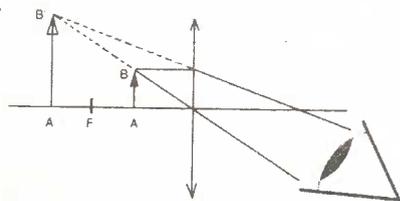
Todos os instrumentos ópticos atrás referidos são construídos na base dos conhecimentos sobre a propagação da luz.

Não será possível explicar a construção de todos os instrumentos ópticos, mas sim alguns.



A lupa é uma lente biconvexa de pequena distância focal. Colocando um objecto, um livro, um postal ou, por exemplo, a escala dum aparelho de medição entre a lente e o plano focal — o plano focal é o plano que passa pelo foco, perpendicularmente ao eixo principal — a lupa dá uma imagem virtual, direita e maior do que o objecto.

Deste modo podemos observar certos pormenores de objectos pequenos. Os relojoeiros, por exemplo, utilizam a lupa na reparação de pequenos relógios.



**Legenda.**

- 1- esclerótica
- 2- córnea
- 3- íris
- 4- líquido aquoso
- 5- a pupila
- 6- cristalino
- 7- músculos
- 8- vítreo
- 9- retina
- 10- nervo visual

**Olho humano:**

O olho humano tem a forma quase esférica. O seu diâmetro mede aproximadamente 2,5 cm.

Na Biologia estudámos já a constituição do olho humano. Por isso, sabemos que o cristalino — corpo transparente de várias camadas, parecido com uma lente — pode mudar a sua forma (sua curvatura, tornando-se mais convexa) quando se observa um objecto de muito perto, por acção de um músculo. A distância entre a cristalina e a retina é constante, mas a distância focal varia.

Os raios luminosos que incidem sobre os nossos olhos refractam-se sobretudo na superfície da córnea. No cristalino dá-se uma pequena refacção complementar.

Em geral, o sistema óptico do olho pode-se comparar com uma lente convexa. Na retina é recolhida uma imagem real e invertida.

Se o objecto se encontra longe, a imagem na retina de um olho normal forma-se sem qualquer esforço dos músculos do cristalino. À medida que o objecto se aproxima, o cristalino comprime-se e a distância focal do olho diminui de tal modo que o plano da imagem de novo coincida com a retina.

A esta propriedade do olho chama-se *acomodação do olho*. Esta propriedade do olho tem um limite que é a distância de 25 cm.

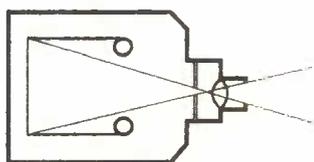
Isto é, para distâncias inferiores a 25 cm não tem lugar a acomodação do olho para o olho normal. Esta distância é também tida como a distância da melhor visão.

Reduzindo esta distância, não podemos notar os detalhes do objecto e nestes casos é melhor usar a lupa.

### *A máquina fotográfica:*

Uma máquina fotográfica é essencialmente constituída por uma caixa - câmara escura - com um orifício munido dum sistema convergente de lentes, chamado *objectiva*.

Junto da objectiva existe o *diafragma* e um *obturador*.



*A objectiva* aumenta a claridade e a nitidez das imagens que se formam na parede oposta a ela.

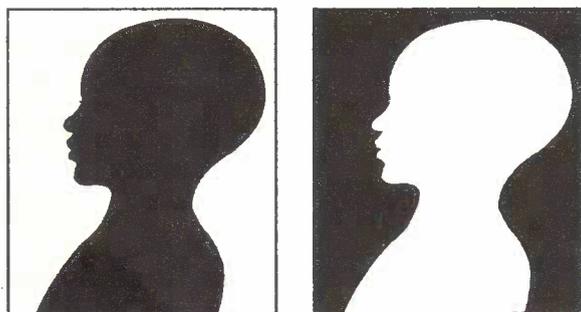
*O diafragma* tem por finalidade controlar a entrada da luz através das variações da abertura que permite realizar.

*O obturador* permite regular a duração da exposição à luz do negativo.

O funcionamento de uma forma geral da máquina fotográfica é o seguinte: a luz emitida por reflexão no objecto ou em vários objectos, entra pela objectiva na câmara escura e forma uma imagem do(s) objecto(s) na parede oposta à que se encontra a objectiva. Esta imagem é menor, inversa e real, quer dizer, a distância entre a objectiva e a parede oposta é maior do que a distância focal da objectiva e menor do que o dobro dessa distância.

Na parede oposta está colocada uma chapa de vidro ou uma película de celulóide — o filme — que tem sobre uma das faces uma camada sensível, uma emulsão que reage quimicamente sob influência de energia óptica. Pela revelação do filme obtém-se uma imagem chamada *negativo* que apresenta com a cor preta as partes claras do objecto e em claro as partes escuras.

A imagem "negativo" permite obter numa folha de papel especial a imagem chamada "positivo" que é a reprodução mais exacta do objecto.



ação  
mo c  
es do  
uma  
temo



negativ  
a é o  
ectos  
do(s)  
. Est  
ectivo  
tiva e  
uma  
s uma  
ência  
agem  
ras de  
pecia  
ta de

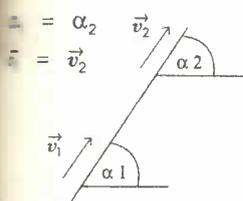
# CAPÍTULO III

## oscilações mecânicas

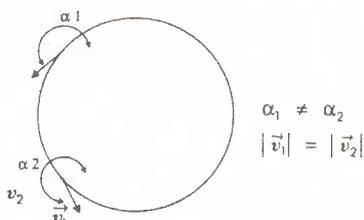
# OSCILAÇÕES MECÂNICAS

Estudámos na 8ª classe os movimentos e os seus diferentes tipos. Quando um corpo se move de modo que a sua trajectória seja uma recta, diz-se que está em *movimento rectilíneo*. Se a trajectória não for uma recta, a direcção do movimento muda, aí temos um *movimento curvilíneo*. Um caso particular do movimento curvilíneo é o *movimento circular*, no qual a trajectória é uma circunferência.

Quando os corpos se movem nas suas trajectórias lineares ou curvilíneas com uma velocidade constante, temos o *movimento uniforme*. No caso de mudança de velocidade (aceleração positiva ou negativa) temos o *movimento variado*.



movimento rectilíneo uniforme



movimento circular uniforme

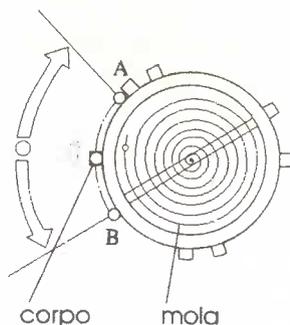
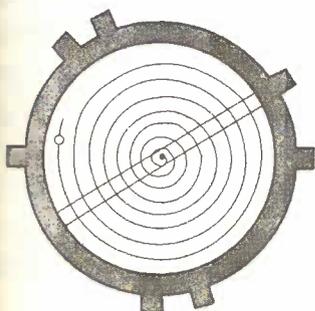
Um corpo que se move de modo rectilíneo e não muda a direcção do seu movimento, não pode voltar ao ponto de partida.

Um outro tipo de movimento temos quando um corpo muda o sentido do movimento num determinado ponto da sua trajectória, quer dizer, depois dum certo tempo, volta para o ponto de partida e mais uma vez muda o sentido do movimento, etc. A este tipo de movimento chama-se *oscilação ou movimento periódico*.

Na prática há muitos exemplos para o movimento periódico.

Nos relógios mecânicos temos um pêndulo (nos relógios de parede) ou o "cabelo de relógio" que fazem movimentos periódicos que podemos ver ou ouvir pelo seu som "tic-tac".

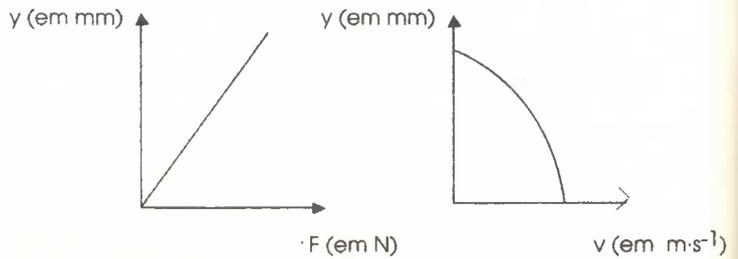
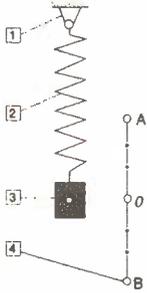
Em substituição do "cabelo de relógio", criemos um *modelo de funcionamento* que permitirá estudar experimentalmente o movimento periódico ou a oscilação.



Escolhamos uma pequena parte de "cabelo de relógio" como modelo do corpo.

Este corpo sofre um aumento de velocidade pela força da mola em primeiro lugar. Depois reduz-se a velocidade de modo que o corpo nos pontos A e B (os pontos da mudança do sentido do movimento) fique em repouso devido à energia potencial da mola.

Fazendo a projecção desse movimento na parede, a trajectória será uma recta vertical. Substituindo a mola enrolada por uma mola comprida, resulta um modelo dum *oscilador simples*.

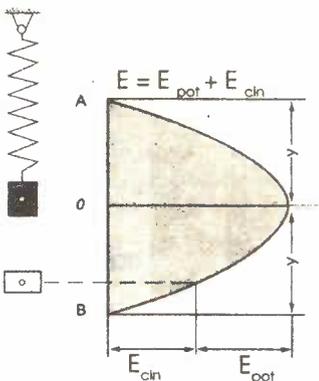


Podemos concluir:

1. O corpo oscila em volta do ponto de equilíbrio.
2. O corpo passa por um ponto qualquer da trajectória depois dum determinado tempo com sentidos contrários do movimento.
3. O movimento designa-se periódico ou oscilação.
4. A coordenada  $y$  do lugar do corpo muda-se periodicamente.
5. A força da mola muda-se periodicamente.
6. A velocidade do corpo muda-se periodicamente.

## O oscilador mecânico

O corpo dum oscilador mecânico fica em repouso, no ponto de equilíbrio estático.



Puxemos o corpo para baixo, ele será desviado.

A força necessária está em dependência do valor de desvio. Ela cresce com o aumento da distância do desvio e a mola deve ser estendida. Neste processo introduz-se trabalho que está armazenado como energia potencial em relação ao ponto de equilíbrio (força elástica da mola). Liberta-se o corpo, a força da mola acelera-o, a energia potencial transforma-se em energia cinética.

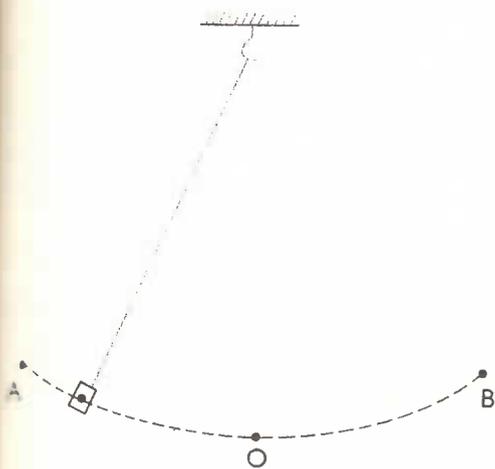
Quando o corpo passa pelo ponto do equilíbrio estático, ele tem só energia cinética e a mola não tem nenhuma energia potencial. Por causa da inércia do corpo, ele passa o ponto de equilíbrio e realiza trabalho ao comprimir a mola, até a energia cinética ser totalmente transformada em energia potencial (ponto A). O corpo fica em repouso, e outro ponto da mudança do sentido do movimento é atingido. A força gravitacional acelera o corpo e o processo começa de novo.

Um oscilador mecânico oscila enquanto recebe energia que provoca o abandono pelo mesmo da posição de equilíbrio estático.

Neste processo realiza-se permanentemente uma transformação da energia (potencial e cinética).

Os osciladores têm dois "depósitos" de energia — a mola e um corpo móvel. As trajetórias podem ser rectilíneas ou curvilíneas (arco dum círculo).

No caso dum pêndulo o "depósito" para a energia potencial é o corpo elevado e para a energia cinética, o corpo em movimento.



Tipo de oscilador	"Depósito" da energia	Forma da energia
Mola	corpo em movimento	energia cinética
	mola estendida	energia potencial
Pêndulo	corpo em movimento	energia cinética
	corpo elevado (força grav.)	energia potencial

A transformação da energia realiza-se em intervalos iguais de tempo, por isso, ela é um processo periódico.

A mudança periódica temporal duma grandeza mecânica caracteriza uma oscilação mecânica.

Generalizando, pode-se dizer:

Cada mudança periódica duma ou mais grandezas físicas caracteriza uma oscilação.

Na acústica utiliza-se a oscilação dos corpos para produzir sons. A tampa dum tambor ou as tábuas duma marimba ambas em oscilação são exemplos.

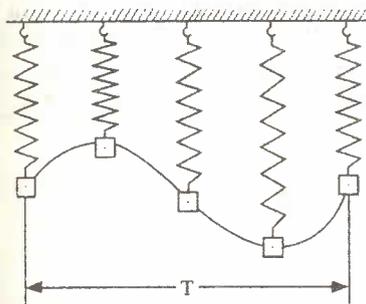
### As características duma oscilação mecânica

Algumas grandezas físicas são usadas para caracterizar uma oscilação mecânica.

Característica básica	Símbolo	Explicação	Relações
Amplitude	$y_{\max}$	Deslocação máxima do oscilador em relação ao ponto de equilíbrio estático	—
Elongação	$y$	Deslocação momentânea do oscilador (corpo) em equilíbrio estático	—
Período	$T$	O tempo necessário para uma oscilação completa	$T = \frac{t}{n}$ $T = \frac{1}{f}$
Frequência	$f$	O número de oscilações completas na unidade de tempo	$f = \frac{n}{t}$ $f = \frac{1}{T}$

$n$  - número das oscilações completas;

$t$  - tempo para realizar  $n$  oscilações completas.



Quando, depois do tempo  $T$ , o corpo (oscilador) passa pelo mesmo ponto com o mesmo sentido do movimento, diz-se que o corpo fez uma oscilação completa. Exemplo: Durante 40 segundos um corpo fez 50 oscilações completas, então tem um período de:

$$T = \frac{t}{n}; T = \frac{40s}{50} = 0,8s$$

A sua frequência é de:

$$f = \frac{n}{t}; f = \frac{50s}{40} = 1,25s^{-1}$$

Em homenagem ao físico alemão Heinrich HERTZ (1857 - 1894) a unidade de frequência no SI é o HERTZ cujo símbolo é **Hz**.

$$\frac{1}{s} = 1s^{-1} = 1\text{Hz}$$

*Múltiplos*

$$1 \text{ kHz} = 10^3 \text{ Hz (Kilohertz)}$$

$$1 \text{ Mhz} = 10^6 \text{ Hz (Megahertz)}$$

$$1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz (Gigahertz)}$$

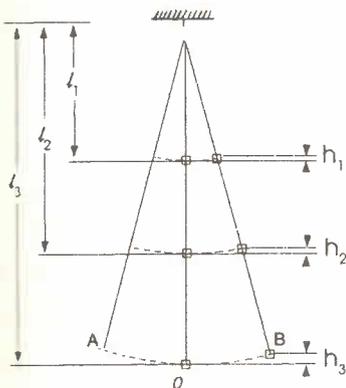
*Nota:*

Como se pode ver na tábua das características básicas duma oscilação mecânica, o período é o valor recíproco da frequência duma oscilação.

*Equação da oscilação harmónica*

Quais são os componentes que determinam o período  $T$  dum pêndulo?

Observemos a figura em baixo, que mostra esquematicamente três pêndulos com diferentes comprimentos dos seus fios.



Desviando os pêndulos pelo mesmo ângulo, o corpo do pêndulo com o fio mais comprido será mais elevado do que os outros.

$$l_1 < l_2 < l_3$$

$$h_1 < h_2 < h_3$$

Sabendo que a força gravitacional é o "depósito" da energia potencial que acelera o corpo em direcção ao ponto de equilíbrio, podemos concluir que os tempos, de que os corpos precisam para percorrer a distância OB estão em dependência do comprimento do fio do pêndulo.

A deslocação do corpo de B para O na sua trajectória OB corresponde ao tempo que o corpo precisaria para percorrer a distância h em queda livre.

Finalmente podemos concluir que o período T está em dependência do fio do pêndulo.

$$T \sim l$$

Por outro lado, sabemos do estudo do movimento acelerado que a distância percorrida se pode calcular pela fórmula

$$s = \frac{1}{2} a \cdot t^2$$

ou no caso em que a trajectória é um arco da circunferência dum círculo

$$OB = \frac{1}{2} a \cdot t^2$$

Quer dizer, o período T do pêndulo deve estar em dependência da aceleração que actua sobre o (pêndulo) corpo.

Uma transformação simples mostra que esta dependência é dada por

$$t = \sqrt{\frac{2OB}{a}}$$

É lógico que a distância percorrida ao longo de uma oscilação completa também deve ter uma influência sobre o valor do período T. Por causa do facto de que o arco da circunferência inclui o comprimento do fio do pêndulo (é o raio da trajectória circular) podemos concluir que

$$t = \sqrt{\frac{4(2\pi \cdot l \cdot \alpha)}{2a}} \text{ onde } \frac{a}{2\pi} \text{ é } 2\pi l$$

determinam a cada instante o comprimento do arco.

Neste momento não é possível dar uma explicação exacta, mas o período T dum pêndulo simples calcula-se pela fórmula:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

para ângulos  $\alpha$  até 5° de desvio.

Qual é a influência da massa do corpo?

Do estudo da queda livre, sabemos que a massa dum corpo não tem nenhuma influência sobre a velocidade do corpo, enquanto o atrito do ar for desprezível.

Em 1673, o físico holandês Christian HUYGENS (1629 - 1695) descobriu esta relação.

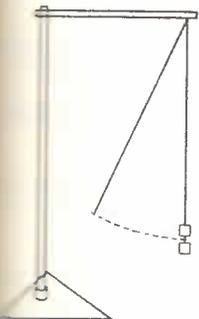
### Experiências

As duas experiências a seguir devem confirmar que as nossas conclusões são correctas.

**E1:** A relação entre a massa e o período  $T$  ( $l$  e  $g$  são constantes)

Material  
 Mó  
 Barra de 50cm  
 Massas de 50g  
 Relógio  
 Transferidor  
 Régua  
 Balança universal

Nº	Massa do corpo de pêndulo em g	Nº das oscilações completas n	Tempo para Nº das oscilações t em s	Período T em s
1	100	20	21,84	1,09
2	150	20	21,84	1,09
3	200	20	21,84	1,09



### Nota:

Enquanto aumentamos a massa do corpo do pêndulo devemos corrigir o comprimento do fio porque o comprimento do pêndulo deve ser medido entre o ponto da fixação no gancho e o centro geométrico da massa. Deve ser garantido também que o ângulo do desvio seja sempre o mesmo.

### Conclusão:

O período duma oscilação é independente da massa do corpo.

**E2:** A relação entre o comprimento do pêndulo e o período ( $m$ ,  $g$  são constantes).

Material  
 Mó  
 Barra de 100cm  
 Régua (30, 60, 90cm)

Nº	Comprimento do pêndulo ( $l$ ) em m	Nº das oscilações completas (n)	Tempo para n oscilações ( $t$ ) em s	Período (T) em s
1	0,3	20	22,18	1,11
2	0,6	20	30,7	1,53
3	0,9	20	38,28	1,91

Relação  $T \sim l$

### Conclusão:

Entre o comprimento do pêndulo e o período há uma proporcionalidade directa.

Revejamos agora a concordância entre a prática e a teoria. Para isso observemos a tábua seguinte:

Nº	Comprimento do pêndulo ( $l$ ) em m	$\sqrt{l}$	Período T em s	$\frac{T}{\sqrt{l}}$
1	0,3	0,55	1,11	2,0
2	0,6	0,77	1,53	1,99
3	0,9	0,95	1,91	2,0

Calculando o valor de  $\frac{2\pi}{\sqrt{g}}$  com  $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ , teremos o valor 2,006 que é aproximadamente 2,0. Isto significa que a teoria e a prática estão de acordo.

#### Nota:

A pequena diferença no nº 2 da experiência 2 pode ser desprezada. Com base na fórmula para o período dum pêndulo

$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$  e a relação entre o período T e a frequência f obtemos a fórmula

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{l}}$$

#### Exemplos:

1. Um pêndulo com 4,11m de comprimento dirige o funcionamento do relógio na torre da catedral em Praga.  
Qual é o período do pêndulo?

Dados

$$l = 4,11\text{m}$$

$$g = 9,81\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$$

Pedido

T em s

Resolução

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$T = 6,28 \cdot \sqrt{\frac{4,11\text{m}}{9,81\text{m}\cdot\text{s}^{-2}}}$$

$$T = 4,065\text{s}$$

2 Um pêndulo com 23m de comprimento está em movimento. Em que intervalos de tempo passa ele pelo ponto do seu equilíbrio?

Dados

$$l = 23\text{m}$$

$$g = 9,81\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Pedido

$$\frac{T}{2} \text{ em s}$$

Resolução

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$\frac{T}{2} = \pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$\frac{T}{2} = 3,14 \cdot \sqrt{\frac{23\text{m}}{9,81\text{m} \cdot \text{s}^{-2}}}$$

$$\frac{T}{2} = 4,81\text{s}$$

Explica porquê só foi calculada a metade do período?

As experiências feitas com um pêndulo de fio pode-se fazer também com um pêndulo de mola enquanto a amplitude da oscilação se situar dentro do limite da validade da lei de HOOCK (limite da elasticidade da mola).

## Oscilações harmónicas e oscilações amortecidas

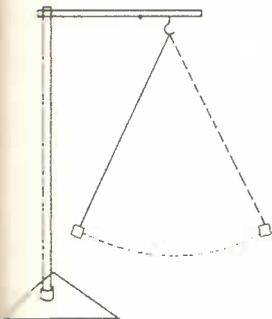
Até agora consideramos que as oscilações dum pêndulo de fio e dum pêndulo de mola e as transformações das duas formas de energia (cinética e potencial) são oscilações num sistema fechado sem ligação com o ambiente. Esta consideração foi necessária para estudar as características básicas da oscilação.

Observemos cuidadosamente as oscilações dum pêndulo durante certo tempo. O que é que podemos ver?

Depois dum determinado tempo a amplitude da oscilação diminui e mais tarde o pêndulo fica em repouso.

Onde está a energia que introduzimos inicialmente?

O fio está estendido no gancho. Enquanto o pêndulo oscila, actuam forças de atrito entre o fio e o gancho. Também há forças de atrito entre o corpo em movimento e o ar. Isto significa que o sistema do oscilador perde energia o que se manifesta na redução da amplitude. No caso do pêndulo de mola perdemos mais energia por causa do trabalho que é necessário para ultrapassar a força de resistência à deformação da mola.



Tudo isto significa que na realidade não existe nenhuma oscilação harmónica.

Às oscilações que perdem energia para fora do sistema da energia mecânica — a energia mecânica transforma-se na energia calorífica — chama-se *oscilações amortecidas*.

### Conclusão:

Oscilações com amplitudes constantes chamam-se oscilações harmónicas.

Oscilações cujas amplitudes diminuem com o tempo chamam-se oscilações amortecidas.

Oscilações amortecidas têm uma grande importância na técnica e também na vida diária. Alguns exemplos que mostram oscilações amortecidas com uma redução muito rápida da amplitude:

#### *Amortecedores de mota:*

amortecedor

A parte principal dos amortecedores duma mota são os êmbolos que se movem dentro dum tubo cheio de óleo. O fundo dos êmbolos é furado de tal modo que o óleo possa passar através desses furos.

O óleo corrente amortece as oscilações muito rapidamente. Pensando bem, qual será a função das molas no sistema dos amortecedores referido?

*Instrumento de medição:* O ponteiro dum instrumento de medição deve ficar em repouso depois do desvio, mais rápido possível, sem tantas oscilações. Isto se pode garantir montando uma placa no outro extremo do ponteiro. Essa placa aumenta a resistência de ar e tem a função do amortecedor.

medição

*O avião:* As asas na cauda dum avião - as asas de leme são constituídas de duas partes. Uma parte móvel que provoca as mudanças de direcção, o leme e uma parte fixa que tem a função de amortecedor e de evitar uma oscilação do avião em torno dos eixos da rotação.

avião



## A oscilação forçada

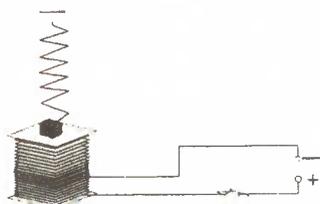
Um pêndulo de mola pode oscilar depois que ele receba um impulso. As oscilações que ele faz, como sabemos, são oscilações amortecidas. A amplitude reduz-se. Mas independentemente da redução da amplitude, o período e com isto a frequência são sempre os mesmos.

Cada oscilador tem uma *frequência própria* ( $f_{ex}$ ,  $\omega_{ex}$ ) que é determinada pela constituição da mola, a força amortecedora e a massa do oscilador.

Um oscilador faz oscilações próprias depois que ele receba um único impulso. A frequência neste caso chama-se *frequência própria*.

A oscilação dum pêndulo de mola pode ser produzida também por outros processos.

Observe bem:



Através do interruptor, o circuito pode ser fechado periodicamente. O electroímã atrai periodicamente o corpo do pêndulo da mola (o corpo é de ferro macio). O resultado é uma oscilação do pêndulo da mola. A causa para a oscilação do pêndulo da mola neste caso é a oscilação dum outro oscilador, o campo magnético da bobina.

À oscilação resultante da introdução da energia por um outro oscilador chama-se *oscilação forçada*. A frequência deste outro oscilador é a frequência da força externa ( $f_{ex}$ ,  $\omega_{ex}$ ).

No caso da oscilação forçada o sistema oscilante recebe energia mecânica dum outro sistema por causa da força externa que influencia o movimento do oscilador.

1. A força externa pode actuar no momento em que o corpo do pêndulo da mola se move para cima. Se a força externa actua no sentido contrário ao do movimento do corpo, a energia mecânica diminui por um determinado valor e a amplitude da oscilação reduz-se.

Continuando a força externa a actuar desta mesma maneira por algum tempo, a oscilação pode ser anulada e o corpo entrar em repouso.

2. Se a força externa actua no momento em que o corpo do pêndulo da mola se move para baixo, a energia mecânica do sistema oscilante aumenta por causa da energia induzida e a amplitude das

oscilações aumenta. Continuando a força externa a actuar da mesma maneira, a oscilação é cada vez reforçada e a amplitude atinge valores que podem causar a destruição do sistema.

## A ressonância

Cada sistema oscilante pode gradualmente diminuir as amplitudes das oscilações devido ao amortecimento e depois dum determinado tempo o oscilador fica em repouso. Enquanto para que um oscilador oscile permanentemente, a energia perdida pelo amortecimento deve ser induzida também permanentemente.

Esta indução da energia deve satisfazer duas condições:

1. A indução da energia deve concordar com a frequência própria do oscilador.
2. A indução da energia deve ser realizada no tempo certo.

Se a frequência da energia induzida não corresponde à frequência própria do oscilador, então as amplitudes serão reduzidas, mas aproximando-se a frequência da força externa à frequência própria a amplitude atinge o máximo.

$$f_{\text{ex}} \approx f_0$$

A esta concordância entre a frequência da força externa e a frequência própria chama-se *ressonância*.

Enquanto a energia introduzida pela força externa for maior do que a energia perdida pelo amortecimento no sistema da oscilação, as amplitudes atingem altos valores, que podem culminar com a destruição do sistema oscilante. A este caso chama-se *catastrofe de ressonância*.

A ressonância, como caso especial da oscilação forçada, tem uma grande importância na técnica e na vida diária.

A ressonância utiliza-se na técnica para medir a frequência. O instrumento de medição da frequência é construído com alguns osciladores - folhas elásticas de aço - e um electroíman. Aquela folha elástica de aço, cuja frequência própria coincide com a frequência da força externa, tem a maior amplitude.

Em muitos casos os engenheiros da construção de máquinas devem evitar a ressonância para que as máquinas não sejam destruídas.

Tem lugar o fenómeno da ressonância na vida diária? Sim. Diariamente vemos mulheres transportando água numa lata sobre a cabeça. Essa água na lata representa um sistema oscilante. Um impulso faz com que a água comece a oscilar na lata, a superfície livre da água entra em movimento oscilatório.

A mulher, andando, o pé representa um outro sistema oscilante.

A frequência dos passos, o levantamento e o abaixamento do corpo introduz uma força ao sistema de oscilação na lata. Quando a frequência dos passos da mulher é a mesma que a frequência da água, a amplitude da água oscilante aumenta e a água sai da lata. Há duas possibilidades que as mulheres aplicam para evitar que a água transborde da lata:

1. Elas mudam a frequência dos seus passos.

2. Introduzem algumas folhas duma planta na superfície da água e assim mudam a frequência própria do sistema de oscilação da água.

As mulheres às vezes utilizam conhecimentos físicos sem os conhecer e isso desde há muitos séculos.

## Resumo:

A mudança periódica temporal duma grandeza mecânica caracteriza uma oscilação mecânica.

Num sistema oscilante realiza-se permanentemente uma transformação da energia cinética em energia potencial e vice-versa.

### Características básicas

Amplitude	$y_{\text{máx}}$	Deslocação máxima do oscilador em relação ao ponto de equilíbrio estático
Elongação	$y$	Deslocação momentânea do oscilador em relação ao ponto de equilíbrio estático
Período	$T = \frac{t}{n}$	O tempo necessário para uma oscilação completa
Frequência	$f = \frac{n}{t}$	O número de oscilações completas na unidade de tempo
Relação entre T e f	$T = \frac{1}{f}$	

Unidade de frequência no SI:

$$1\text{Hz} = \frac{1}{\text{s}} = 1\text{s}^{-1}$$

Múltiplos

(Kilohertz)

$$1\text{kHz} = 10^3\text{ Hz}$$

(Megahertz)

$$1\text{MHz} = 10^6\text{ Hz}$$

(Gigahertz)

$$1\text{GHz} = 10^9\text{ Hz}$$

Equação do período do pêndulo simples

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Tipos de oscilações mecânica

— Oscilação harmónica

— Oscilação amortecida

$$f_0 \approx f_{\text{ex}}$$

— Oscilação forçada

Caso especial:

— Ressonância

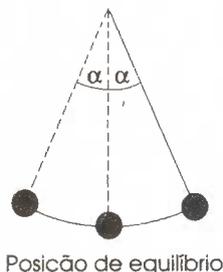
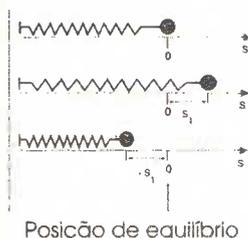
A frequência da força externa é aproximadamente igual à frequência própria.

# CAPÍTULO IV

## ondas mecânicas

## ONDAS MECÂNICAS

No capítulo anterior estudamos as oscilações mecânicas e as suas características. Lembremo-nos que a amplitude ( $y_{\max}$ ) da oscilação (a distância máxima do afastamento do oscilador relativamente à sua posição de equilíbrio estático).



a elongação ( $y$ ) (distância do afastamento do oscilador relativamente à sua posição de equilíbrio estático), o período ( $T$ ), (tempo para uma oscilação completa) e a frequência ( $f$ ) (número das oscilações completas por unidades de tempo), são características das oscilações mecânicas

- Que relação existe entre a amplitude e a elongação?
- Qual destas grandezas que caracterizam uma oscilação muda-se periodicamente?
- Em que unidade indica-se o período?

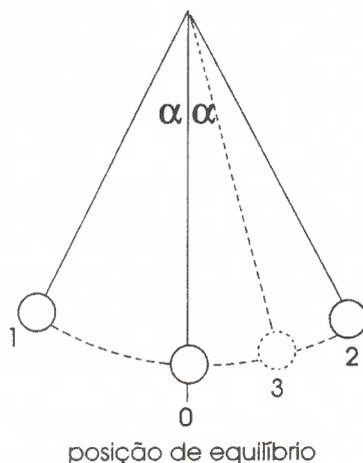
Entre o período e a frequência existe a relação  $T = \frac{1}{f}$  ou seja  $f = \frac{1}{T}$

As suas unidades são, no SI, o segundo (s) e Hertz (Hz), respectivamente.

Um oscilador tem um período de 0,02s. Qual é a sua frequência?

Estudámos também que durante o movimento dum oscilador se realiza a transformação de um tipo de energia mecânica em outro e vice-versa.

- Quais são os dois tipos de energia mecânica que se transformam durante um movimento oscilatório?
- Indique os pontos em que o pêndulo tem só energia potencial..
- Em que ponto o pêndulo tem só energia cinética?
- Que relação existe entre a velocidade do pêndulo e os dois tipos de energia (potencial e cinética)?
- Quais são os pontos em que o sentido do movimento muda?

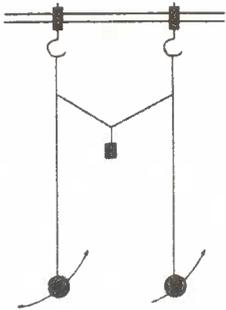
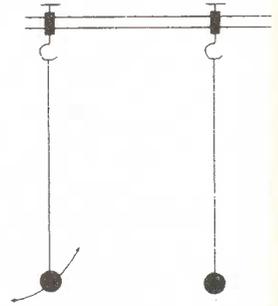


## O transporte de energia entre osciladores acoplados

Dois pêndulos estão pendurados um ao lado do outro. Empuremos um pêndulo de modo que este comece a oscilar e veremos que o outro fica em repouso. O outro pêndulo mostra um comportamento esperado.

Se instalarmos uma ligação elástica (um acoplamento) entre os dois pêndulos e empurrarmos de novo um deles, vamos observar que, depois de pouco tempo, o outro pêndulo começa a oscilar também.

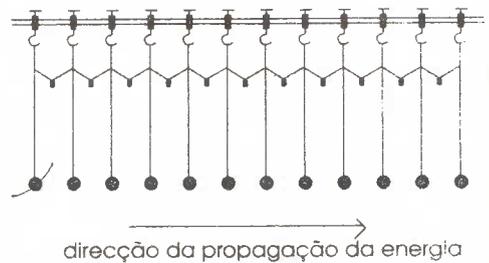
Mais tarde, a oscilação é transferida completamente para o outro pêndulo e o primeiro fica em repouso.



Este processo repete-se no sentido contrário depois de curto espaço de tempo.

A única explicação para este fenómeno é que a energia de um pêndulo pode-se propagar num meio elástico. Os osciladores não se deslocam durante este processo. Eles oscilam somente em volta do seu ponto de equilíbrio.

Montando uma cadeia dos osciladores, acoplados um com o outro e dando ao oscilador, situado num extremo da cadeia, um impulso observaremos que a oscilação se propaga por toda a cadeia dos osciladores. Isto significa que a energia propaga-se dentro do meio elástico.



Os osciladores vão ser desviados sucessivamente do seu ponto de equilíbrio.

A propagação da energia podemos observa-la muitas vezes na natureza. Lançamos uma pedra num lago com uma superfície lisa notaremos que as oscilações das partículas de água se propagam em círculos concêntricos com a direcção à beira do lago. De que modo as partículas de água são acopladas?

## O conceito de onda como fenómeno físico e sua comparação com uma oscilação

Como vimos, os osciladores acoplados movem-se em volta do seu ponto de equilíbrio. Isto é, um processo periódico para um determinado sítio. Durante o tempo da oscilação, o ponto de equilíbrio não muda.

Todos os osciladores movem-se em volta do seu ponto de equilíbrio. Somente o estado da oscilação propaga-se no meio elástico. Este estado depende do sítio do oscilador.

Este processo periódico local e temporal denomina-se *onda*

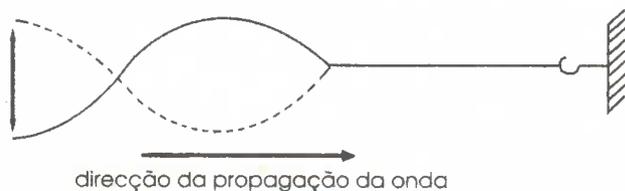
A cadeia de osciladores tem a função dum modelo.

Processos semelhantes, como se pode observar, aparecem em todas substâncias sólidas, fluidas e gasosas. As partículas das substâncias são os osciladores. O acoplamento entre as partículas transmite as oscilações. Durante a transmissão das oscilações aparecem ondas mecânicas visíveis ou que se pode fazer visível.

*Por exemplo:*

Uma rolha ou uma bola dentro da água move-se para cima e para baixo sem deslocar-se da sua posição. Mas o estado da oscilação propaga-se em forma duma onda de água.

### *Produção duma onda de corda*



Um extremo duma corda é bem fixa, enquanto o outro extremo move-se periodicamente para cima e para baixo causando uma onda de corda que se propaga em direcção ao extremo fixo da corda.

No caso da onda de água e também da onda de corda a energia será transportada por acoplamento.

O estado da oscilação propaga-se periodicamente de modo local e as partículas do meio elástico oscilam periodicamente de modo temporal.

Durante uma oscilação a posição duma partícula é descrita por sua elongação  $y$ . E assim podemos dizer:

No caso da onda de água ou de corda, a elongação  $y$  das partículas muda-se periodicamente de modo local e temporal.

Para produzir uma onda, deve-se introduzir energia para uma partícula oscilante que faz parte dum sistema das partículas oscilantes, (osciladores) acopladas entre si.

Uma onda é um fenómeno físico em que a energia é transportada dentro dum meio elástico.

Não há nenhum transporte das partículas (da substância).

Uma onda pode ser descrita pela alteração periódica local e temporalmente duma grandeza física.

Uma oscilação mecânica é caracterizada pela alteração periódica duma grandeza física de modo temporal  $y = f(t)$ .

A energia mecânica permanece no oscilador.

Uma onda mecânica é caracterizada pela alteração periódica duma grandeza física de modo temporal e local.

$$y = f(s;t).$$

A energia mecânica propaga-se a partir do ponto da agitação da onda.

## As características duma onda

### *Comprimento duma onda e a sua expressão de cálculo*

Uma oscilação mecânica é determinada pelas suas características: elongação, amplitude, período e frequência.

Vimos que as partículas acopladas dum meio elástico oscilam em volta do seu ponto de equilíbrio. Por isso, a elongação e a amplitude são duas características duma onda.

Contrariamente à oscilação mecânica em que a energia permanece no oscilador, no caso duma onda a energia propaga-se dentro do meio elástico.

A velocidade com que a energia se propaga é importante para a descrição duma onda.

Na 8ª classe estudámos o movimento rectilíneo uniforme. A velocidade dum móvel foi definido como quociente do espaço percorrido e do tempo gasto.

Quando falamos sobre a velocidade dum móvel ou a velocidade com que se propaga a energia ou um estado físico, sempre temos aquelas duas grandezas — espaço percorrido e tempo gasto — que determinam a velocidade.



No caso da onda observamos, uma vez mais, uma cadeia de osciladores acoplados.

Os osciladores (1) e (2) são consecutivos na mesma fase da oscilação. A distância entre estes dois osciladores é muito importante para descrever uma onda. É uma das suas características e que chama-se comprimento da onda. O seu símbolo é  $\lambda$  (lambda), uma letra grega.

O tempo que passa para que dois osciladores consecutivos estejam na mesma fase da oscilação (estado de oscilação) é igual ao período  $T$  que cada oscilador do meio elástico precisa para fazer uma oscilação completa. Por isso, podemos dizer que o comprimento da onda é igual ao produto da velocidade de propagação da onda pelo período  $T$  dum oscilador do meio elástico.

A expressão analítica é:

$$\lambda = v \cdot T$$

Exemplo:

Uma onda mecânica propaga-se com uma velocidade de  $340\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

O período dos osciladores do meio elástico é de  $0,0023\text{s}$ .

Qual é o comprimento da onda?

Dado

$$v = 340\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$T = 0,0023\text{s}$$

Pedido

$$\lambda$$

Resolução

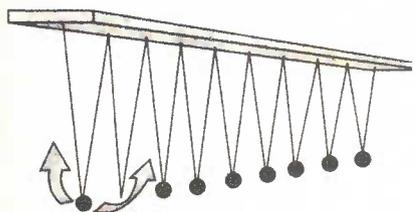
$$\lambda = v \cdot T$$

$$\lambda = 340\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 0,0023\text{s}$$

$$\lambda = 0,782\text{m}$$

A onda tem um comprimento de  $0,782\text{m}$ .

### Representação gráfica duma onda

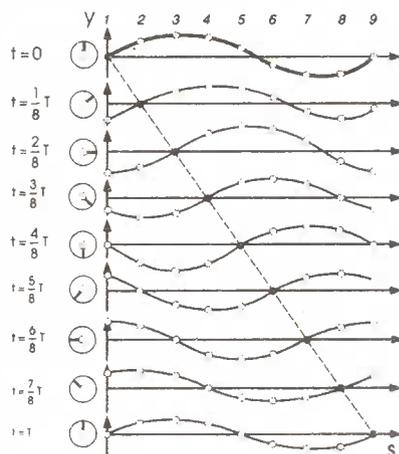


Cada pêndulo começa a oscilar num outro momento, quer dizer, todos os pêndulos atingem o ponto de equilíbrio em tempos diferentes. Façamos a projecção vertical da cadeia de pêndulos em tempos diferentes e receberemos as seguintes imagens.

A imagem mostra uma cadeia dos pêndulos acoplados.

O primeiro pêndulo recebe um impulso e começa a oscilar.

A oscilação (energia) propaga-se dentro da cadeia dos pêndulos.



Se compararmos a elongação de todos os pêndulos das imagens instantâneas, veremos que um determinado estado da oscilação se repete em distâncias iguais.

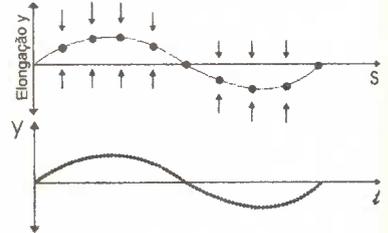
Compare o estado da oscilação dos pêndulos 1, 5 e 9 no tempo  $t = 0$ . Os pêndulos passam pelo ponto de equilíbrio. Mas somente os pêndulos 1 e 9 têm o mesmo estado da oscilação. Explique porquê.

As imagens instantâneas mostram que os osciladores formam uma linha sinusoidal que se transporta com o tempo. Isto mostra, uma vez mais, a propagação dum estado de oscilação.

A elongação  $y$  dos osciladores (no mesmo tempo  $t$ ) depende da sua distância ao centro de produção da onda.

$$y = f(s); t = \text{const.}$$

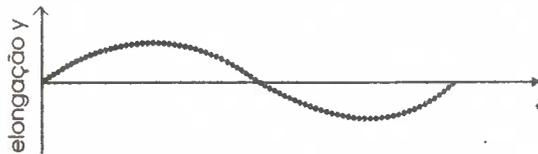
Para a representação gráfica duma onda, usa-se a elongação  $y$  dos osciladores acoplados.



A elongação  $y$  dum oscilador (a sua distância ao centro da produção da oscilação é constante) varia com o tempo.

$$y = f(t); s = \text{const.}$$

Esta dependência conhecêmo-la pelo estudo da oscilação mecânica.



O diagrama  $y-t$  duma onda para  $s = \text{const.}$

A representação gráfica duma onda é possível somente por duas representações gráficas.

1º pelo diagrama  $y - s$  para  $t = \text{const.}$

2º pelo diagrama  $y - t$  para  $s = \text{const.}$

## A fórmula fundamental da propagação das ondas

Como já vimos, uma onda é caracterizada por algumas grandezas que são a elongação ( $y$ ) e a amplitude ( $y_{\text{max}}$ ) dos osciladores acoplados, a velocidade ( $v$ ) com que se propaga o estado da oscilação (os osciladores não se propagam) e o comprimento ( $\lambda$ ) da onda (a distância entre dois osciladores consecutivos que estão na mesma fase de oscilação).

O tempo em que se propaga a energia pela distância de um comprimento de onda é o mesmo — o período ( $T$ ) de um oscilador do meio elástico em que se propaga a onda.

Por isso podemos dizer que a velocidade ( $v$ ) da propagação da onda é o quociente do comprimento da onda e o período; que se exprime analiticamente por

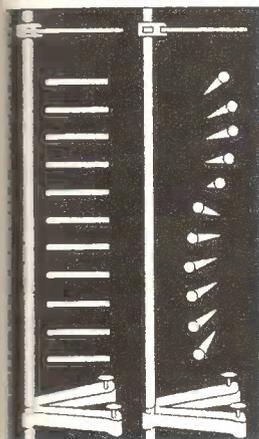
$$v = \frac{\lambda}{T}$$

Utilizando a relação,  $f = \frac{1}{T}$  recebemos a fórmula fundamental da propagação de onda

$$v = \lambda \cdot f$$

A velocidade da propagação de uma onda é o produto do comprimento da onda pela frequência da onda.

A frequência ( $f$ ) da onda é mais uma característica da onda.



A imagem mostra um aparelho de JULIUS para demonstrar a propagação das ondas. Este aparelho tem um comprimento de onda de 25 cm. Um oscilador (pau em vibração) faz 8 oscilações em 5 segundos.

Qual é a velocidade da propagação de onda neste aparelho?

Dados  
 $\lambda = 25 \text{ cm}$   
 $t = 5 \text{ s}$   
 $n = 8$

Pedido  
 $v \text{ (em } \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$

Resolução  
 $v = \lambda \cdot f$   
 $v = \lambda \cdot n : t$   
 $v = 25 \text{ cm} : 1,6 \text{ s}$   
 $v = 40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$

A velocidade da propagação de onda é de  $40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ .

## Características duma onda mecânica

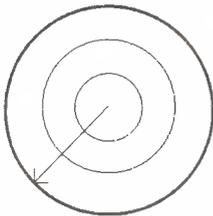
Característica	Símbolo	Explicação
Elongação Amplitude	$y$ $y_{\max}$	Grandeza física que se muda Valor máximo da grandeza física que se muda
Frequência	$f = T^{-1}$	Igual à frequência duma oscilação
Comprimento da onda	$\lambda$	Distâncias entre dois osciladores consecutivos na mesma fase
Velocidade da propagação	$v$	Velocidade com que se propaga o estado da oscilação — a energia

Fórmula fundamental da propagação da onda

$$v = \lambda \cdot f$$

### Frente e raio da onda

Atirando uma pedra sobre um lago ou qualquer outra superfície de água em repouso, podemos observar circunferências concêntricas que, nascendo no ponto de queda da pedra, se deslocam para fora na direcção que coincide com os raios das circunferências.



Cada uma das circunferências representa em si um conjunto de partículas de água que oscilam em fase ou, seja, no mesmo estado da oscilação.

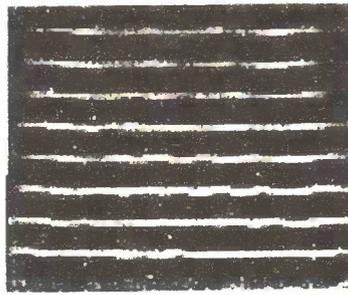
Diz-se que as partículas se encontram em fase ou no mesmo estado da oscilação se elas registam a cada instante, valores iguais da elongação e se deslocam com o mesmo sentido. Todas estas partículas têm a mesma distância ao ponto do nascimento da oscilação.

Diz-se que as partículas encontram-se em fase ou no mesmo estado de oscilação se elas registam a cada instante, valores iguais da elongação e se deslocam com o mesmo sentido. Todas estas partículas têm a mesma distância ao ponto do nascimento da oscilação.

O conjunto das partículas que oscilam na mesma fase formam a frente de onda.



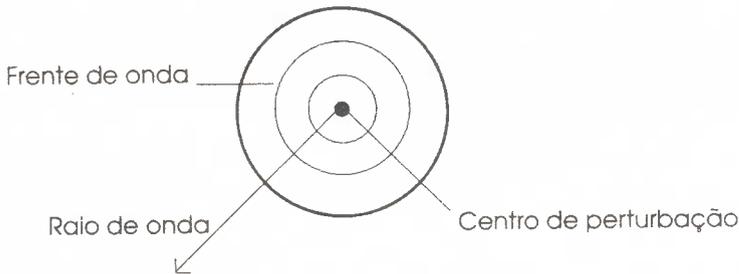
Frente de ondas circulares



Frentes de ondas planas

As partículas perto do centro de perturbação oscilam com uma amplitude maior do que aquelas mais afastadas. A sua energia é maior. A linha normal à superfície de onda ou, seja, à frente da onda, indica a direcção de propagação da energia. Esta linha chama-se *raio de onda*.

A linha que indica a direcção de propagação da onda chama-se *raio de onda*.



### A propagação das ondas e a sua sobreposição

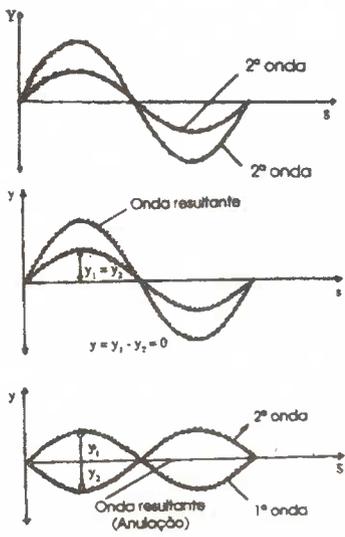
Uma onda mecânica propaga-se num meio elástico através da transmissão da energia mecânica entre as partículas acopladas, quer dizer, a propagação dum onda mecânica é a propagação da energia mecânica.



Pontos de perturbação

O que aconteceria se num meio elástico se propagassem simultaneamente duas ou mais ondas a partir dos pontos diferentes de perturbação?

Perto dos pontos de perturbação podemos observar que as frentes de onda não mostram nenhuma interrupção depois do cruzamento. Isto significa que cada onda se propaga dum maneira como se a outra não existisse. Um pouco mais afastado dos pontos da origem das ondas podemos ver que as frentes de onda mostram interrupções o que significa que há partículas que não estão na mesma fase da oscilação.

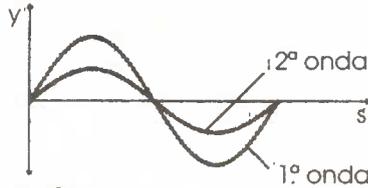


O que é que aconteceu?  
 Uma onda mecânica "transporta" energia. Nos pontos do cruzamento de duas (ou mais) ondas, as partículas que ficam nestes pontos recebem a energia de cada onda, quer dizer, a energia destas partículas é a soma das energias transportadas por cada onda. Com efeito, a sua elongação é a soma geométrica das elongações provocadas por cada onda individualmente.

$$y = y_1 - y_2 = 0$$

A este fenómeno físico chama-se sobreposição das ondas. A sobreposição das ondas pode forçar ou anular as oscilações das partículas como vamos ver um pouco mais tarde.

Faça a construção geométrica da onda resultante das duas ondas apresentadas.



### A reflexão das ondas mecânicas

Até agora estudámos a propagação das ondas mecânicas num meio elástico ilimitado. Mas o que acontecerá se o meio elástico estiver limitado, quer dizer, se a onda encontrar um obstáculo que não pode oscilar? Onde ficará a energia transportada pela onda até este ponto?

Para obtermos resposta, façamos a experiência seguinte:

Esticamos uma das extremidades duma corda comprida num obstáculo rígido. Sacudindo a extremidade livre da corda com um movimento brusco da mão, observaremos a propagação de uma única onda.



Depois a onda atinge o ponto fixo (extremidade esticada) e regressa ao ponto de origem.



Este fenómeno chama-se reflexão e é uma propriedade da propagação das ondas mecânicas.

Lembre-mos que a reflexão é também uma propriedade da propagação da luz.

Na nossa experiência podemos observar que a onda reflectida regressa de maneira contrária.

Se a onda origem (onda incidente) é uma crista da onda, a onda reflectida é um vale da onda, quer dizer, pela reflexão da onda há uma mudança de fase igual  $\pi$ . Esta reflexão é designada por reflexão com mudança de sinal ou reflexão com mudança de fase.

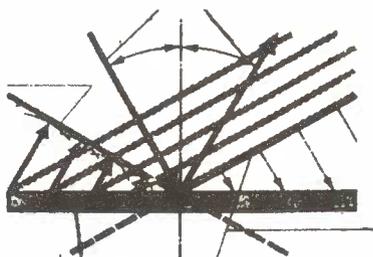
No caso em que a extremidade da corda não está fixada podemos observar um outro tipo de reflexão. A crista da onda que atinge esta extremidade regressa como crista da onda, quer dizer, há uma reflexão da onda sem mudança da fase.

Lembre-mos da reflexão dum raio de luz. Esta reflexão para executar-se depende duma lei que diz que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão se o raio incidente, a perpendicular e o raio reflectido estiverem no mesmo plano.



A imagem ao lado mostra a propagação duma onda plana encontrando um obstáculo plano onde se realiza uma reflexão.

Analisando esta imagem podemos tirar a conclusão de que a lei da reflexão formulada para a propagação dos raios luminosos é válida também no caso da propagação das ondas mecânicas.



Frente da onda incidente

Como podemos ver, para a reflexão das ondas mecânicas vale também que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão:

$$\alpha = \alpha'$$

## A refacção das ondas mecânicas

A imagem ao lado mostra mais uma propriedade da propagação das ondas mecânicas.

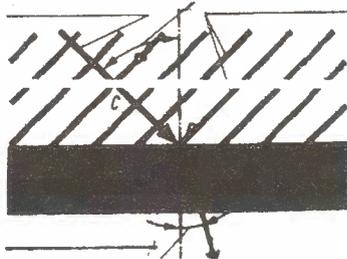


Se uma onda mecânica entra, num outro meio elástico, por exemplo, em água pouco profunda, a sua velocidade de propagação muda-se, o seu valor tornar-se-à mais pequeno do que em água mais profunda.

Se a frente de onda encontra a superfície da separação entre dois diferentes meios elásticos de maneira inclinada, mudará a direcção da sua propagação e a onda mecânica será refractada.

À mudança do sentido da direcção de propagação duma onda mecânica e com isso a sua velocidade no caso de passagem de um meio elástico para um outro (p. ex. de água profunda para água pouco profunda) chama-se *refracção*.

A refacção duma onda mecânica pode ser apresentada esquematicamente de maneira seguinte:



No caso da passagem da onda de água profunda para água pouco profunda, o ângulo de refacção é menor do que o ângulo de inclinação.

$$\alpha > \beta$$

O contrário observa-se quando a onda passa da água pouco profunda para água mais profunda.

$$\alpha < \beta$$

Para a refração de uma onda, a frequência não se muda. Como consequência o comprimento  $\lambda$  da onda é maior se esta se propaga num meio elástico a uma velocidade maior.

## A difracção das ondas mecânicas

Numa tina de onda colocamos um obstáculo plano com uma única abertura (fenda).

Quando produzimos ondas planas que são obrigadas a passar por esta pequena abertura estreita podemos observar que atrás da fenda a onda é curvada, quase a metade de uma onda circular.

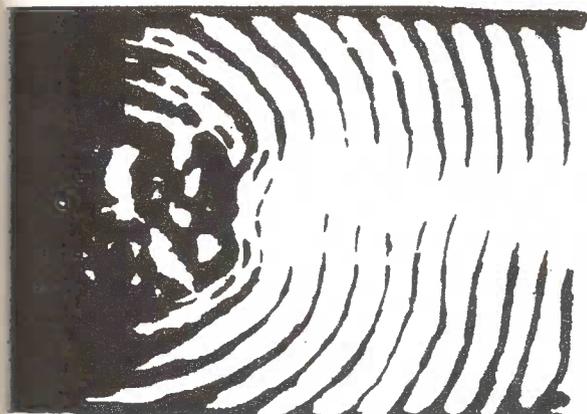


Parece que a fenda seja o ponto de origem em que nasce uma nova onda.

Tramos uma parte do obstáculo podemos observar que uma parte da onda plana propaga-se como onda plana e a outra, atrás do obstáculo, como onda curvada como o esquema mostra.



A mudança do sentido de direcção da propagação de uma onda depois da passagem por uma fenda ou um canto chama-se difracção.



Esta propriedade da propagação de uma onda mecânica pode ser observada também no caso de um pequeno obstáculo colocado no caminho da propagação de uma onda. A frente de onda, interrompida pelo obstáculo fecha-se depois da passagem por este. A deformação da frente de onda mostra a mudança do sentido de direcção da propagação.

Os efeitos de difracção dependem da largura  $l$  do obstáculo ou da abertura da fenda que a onda atravessa e do comprimento  $\lambda$  da onda. Sendo tanto mais apreciável quanto menor for o valor da razão  $l : \lambda$ .

O fenómeno da difracção é uma propriedade importante das ondas.

## A interferência das ondas mecânicas

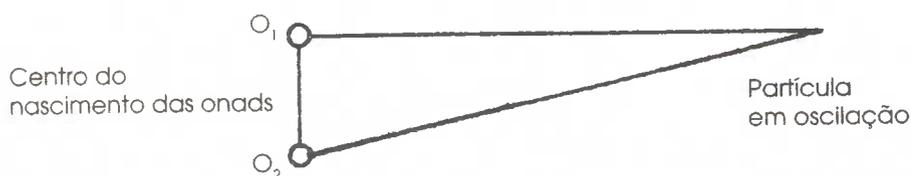
Quando falamos do princípio da sobreposição das ondas mecânicas, foi dito que num meio em que se propagam duas ondas, cada partícula do meio elástico recebe um deslocamento (uma elongação) que resulta da adição geométrica do deslocamento que a partícula receberá por cada onda.

Vamos ver qual será o comportamento das partículas se produzimos duas ondas em pontos diferentes, com a mesma frequência e o mesmo comprimento de onda tal como da mesma fase.



Observando a imagem recebida vêem-se algumas linhas fixas, muito nítidas (zonas claras) com algumas interrupções (zonas escuras). Como podemos explicar este fenómeno?

Para isso fazemos uma apresentação esquematizada.

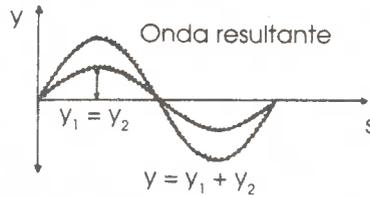


Os três pontos  $O_1$ ;  $O_2$ ;  $P$  formam um triângulo rectangular em que  $O_2P$  é a hipotenusa e, por isso mais comprido do que  $O_1P$ .

Dependendo da diferença entre estas duas distâncias, podemos distinguir dois casos principais.

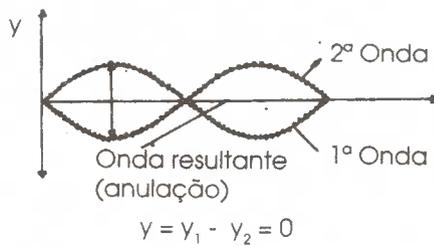
1º A diferença é exactamente um múltiplo inteiro do comprimento das ondas. Neste caso a partícula recebe a soma da energia transportada por cada onda e a sua amplitude é o dobro. Este fenómeno chama-se interferência construtiva.

2º A diferença é exactamente um múltiplo inteiro da metade do comprimento das ondas. Neste caso a partícula recebe também a soma da energia transportada por cada onda. Mas elas são contrárias, quer dizer, a energia duma onda será anulada pela energia da outra. A partícula fica em repouso. A este fenómeno chama-se interferência destrutiva.



### Interferência construtiva

As ondas estão na mesma frequência, na mesma fase e têm o mesmo comprimento da onda.



### Interferência destrutiva

As ondas estão na mesma frequência e têm o mesmo comprimento da onda, mas têm uma diferença na fase que corresponde a  $\lambda : 2$  ou um múltiplo inteiro de  $\lambda : 2$ .

As regiões de interferência construtiva formam as franjas de interferência (na imagem elas são as zonas claras muito nítidas).

A interferência das ondas mecânicas é mais uma propriedade para a propagação das ondas.

O fenómeno da interferência, que estamos a estudar, relaciona-se com as ondas que se propagam dentro dum meio elástico para todos os lados de um plano (superfície da água).

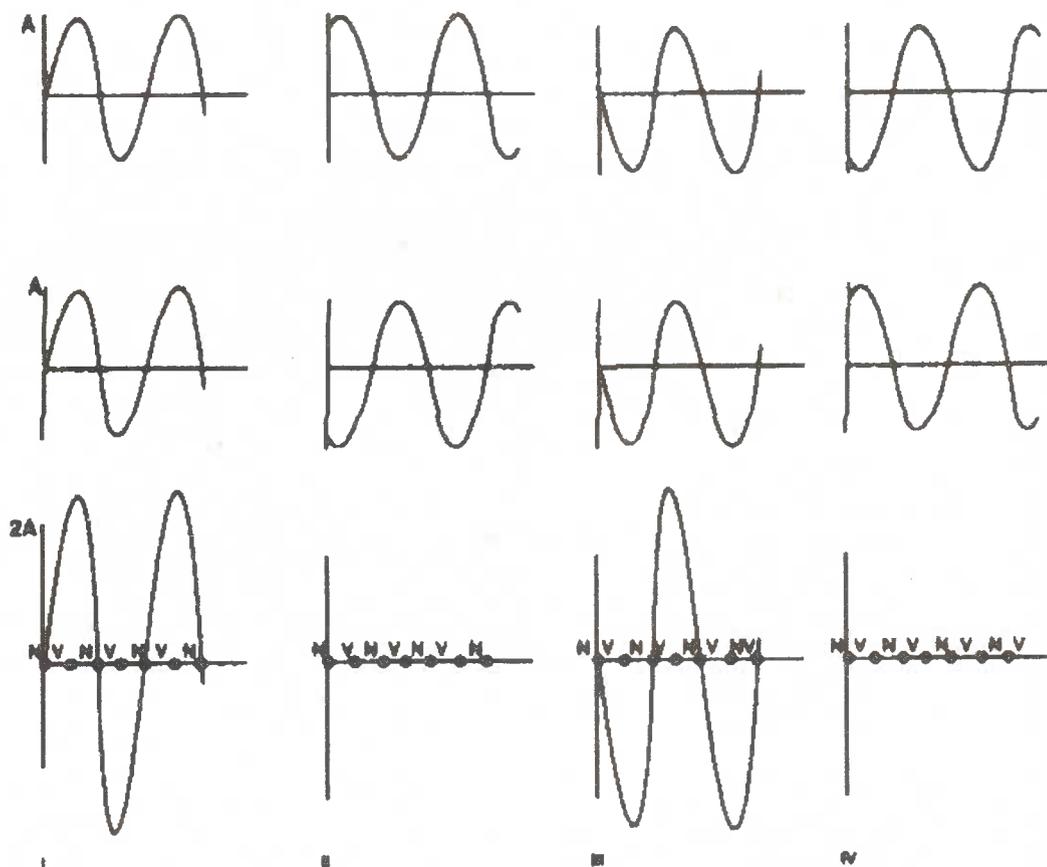
Façamos a experiência seguinte:

Estiquemos, uma vez mais, uma das extremidades duma corda comprida num obstáculo rígido. Sacudindo de maneira periódica a extremidade livre da corda, observamos que alguns pontos da corda ficam em repouso. Estes denominam-se nós e correspondem à interferência destrutiva. A outros pontos apresentam-se animados, em oscilação da amplitude máxima e corresponde à interferência construtiva.

Como se explica este fenómeno?

Uma onda que encontra um obstáculo vai ser reflectida com mudança de fase. Pela variação da frequência do movimento vibratório de origem se pode produzir um trem das ondas incidentes e o respectivo trem das ondas reflectidas, que produzem um estado vibratório estável da corda.

Observemos cuidadosamente a representação gráfica seguinte:



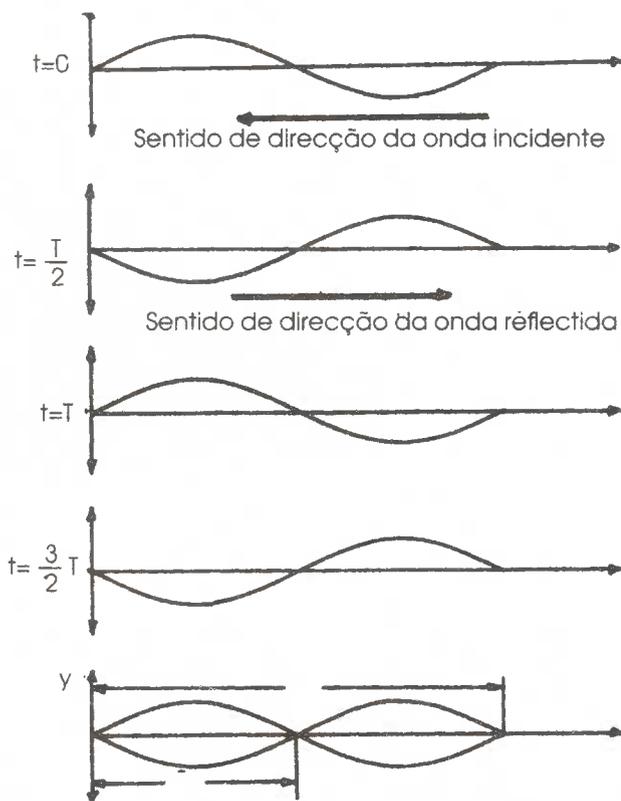
(1) e (2) representam o trem das ondas incidentes e reflectidas respectivamente.

As cristas e os vales das ondas coincidem e as amplitudes das ondas resultantes são o dobro das outras como a representação (3) mostra. Os pontos designados por N são os nós, quer dizer, aqueles que não estão em oscilação.

O que é que se passa com as partículas entre dois nós?

Para encontrar uma resposta, observemos as figuras seguintes, que mostram o procedimento das ondas incidentes e reflectidas em momentos diferentes:

As velocidades de propagação da onda incidente e da onda reflectida são as mesmas. A consequência disso é que no mesmo momento em que a onda reflectida está no ponto fixo (obstáculo), o vale da onda incidente coincide com a onda reflectida, quer dizer, as fases da oscilação das partículas são as mesmas, somente os sentidos de direcção da propagação das duas ondas são contrários. Por isso, temos uma sobreposição das duas ondas (interferência construtiva). Cada crista da onda segue um vale de onda com o efeito que esta zona da corda fica sempre em oscilação, e fica-se com a impressão de que a onda não se propaga mais. Esta zona entre dois nós consecutivos designa-se ventre da onda. Neste caso falamos em Física da onda estacionária. O comprimento da onda estacionária é a metade do comprimento da onda incidente ou seja reflectida.



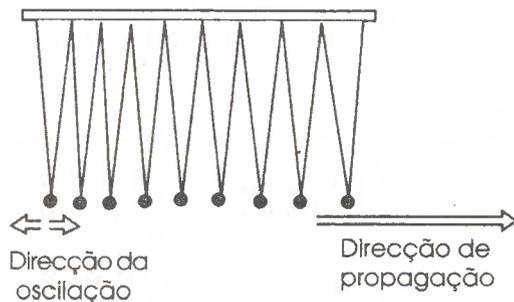
Ondas estacionárias são o resultado da sobreposição de dois trens de ondas progressivas com o mesmo comprimento, mesma amplitude, propagando-se no mesmo meio, numa direcção, mas em sentidos contrários.

### Onda transversal e onda longitudinal

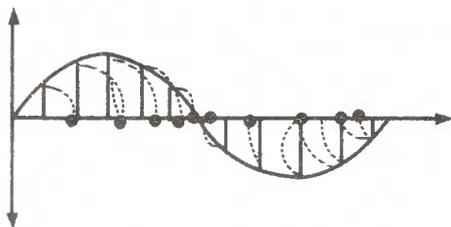
As ondas estudadas até agora tem a mesma característica. As partículas (osciladores acoplados) oscilam em volta do seu ponto de equilíbrio e a energia propaga-se numa direcção. Somente em caso das ondas superficiais (ondas de água, por exemplo) as ondas propagam-se afastando do ponto de origem em todas as direcções na superfície. Apesar disso, é notável, que a oscilação das partículas é transversal à direcção de propagação da onda.

Uma onda em que as partículas oscilam em volta do ponto de equilíbrio de maneira transversal a direcção de propagação da onda denomina-se *onda transversal*.

Façamos uma pequena experiência. Puxemos o primeiro pêndulo da cadeia dos pêndulos de maneira que a direcção da oscilação gire 90°. Depois de pouco tempo a oscilação do primeiro pêndulo é transmitida para todos os outros, a energia propaga-se na mesma direcção e no mesmo sentido, como no caso da onda transversal.



Obsevando a cadeia dos pêndulos, podemos ver que as distâncias entre os pêndulos em oscilação não são iguais. Há sítios em que as distâncias são muito estreitas e outros em que as distâncias são largas.



As zonas da rarefacção são aquelas em que as partículas têm a elongação maior. O centro da zona da compressão corresponde à partícula que fica em repouso.

Uma onda em que as partículas em volta do ponto de equilíbrio oscilam na mesma direcção como a onda se propaga designa-se *onda longitudinal*.

Onda transversal	Onda longitudinal
	
Direcção e sentido da propagação da onda	Direcção e sentido da propagação da onda
	
Direcção da oscilação das partículas do meio	Direcção da oscilação das partículas do meio

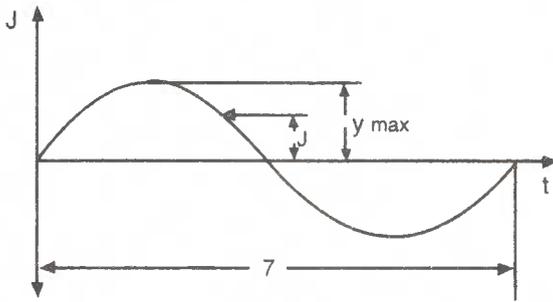
### Resumo

Característica	Símbolo	Explicação
Elongação	$y$	Grandeza física que se muda
Amplitude	$y_{\text{max}}$	Valor máximo da elongação
Frequência	$f = \frac{1}{T}$	Igual à frequência duma oscilação
Comprimento da onda	$\lambda$	Distância entre dois osciladores consecutivos na mesma fase
Velocidade da propagação	$v$	Velocidade com que se propaga o estado da oscilação a energia

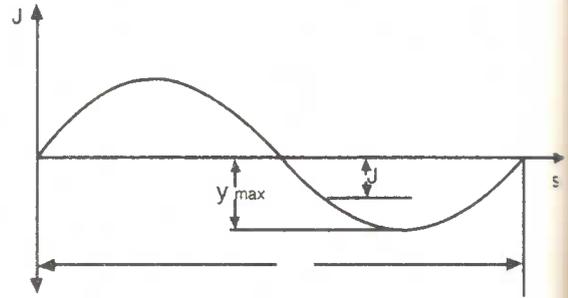
Fórmula fundamental da propagação das ondas

$$v = \lambda \cdot f$$

## Representação gráfica de uma onda



$$y = f(t); s = \text{const}$$

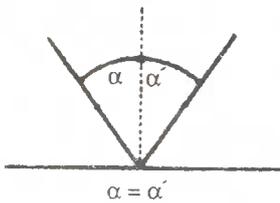


$$y = f(s); t = \text{const}$$

- Frente da onda — Conjunto das partículas dum meio elástico que oscilam na mesma fase.
- Raio da onda — Linha perpendicular à frente da onda que indica a direcção da propagação da onda.
- Crista da onda — Zona em que as partículas oscilam na mesma fase para cima (elongação positiva).
- Vale da onda — Zona em que as partículas oscilam na mesma fase para baixo (elongação negativa).

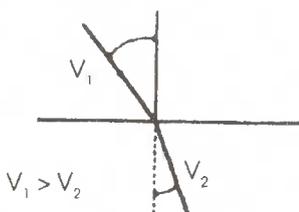
## Propriedades da propagação duma onda mecânica

### Reflexão



Um obstáculo fixo reflecte uma onda incidente de modo que o ângulo de incidência (ângulo entre o raio da onda incidente e a normal) é igual ao ângulo de reflexão (ângulo entre o raio da onda reflectida e a normal) se a onda incidente, a normal e a onda reflectida estão no mesmo plano.

### Refracção



A mudança do sentido da direcção da propagação duma onda no caso da passagem de um meio elástico para um outro.

No caso da refração duma onda a velocidade da sua propagação muda, a frequência fica constante.

---

## Difracção

Ondas que encontram um obstáculo contornam-no.

Cada partícula dum meio elástico atingida por uma onda é o ponto de origem dum onda elementar (onda circular)

---

## Interferência

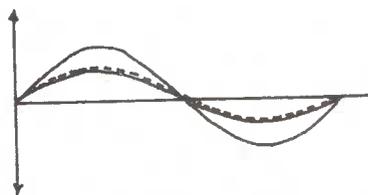
Resultado da sobreposição (propagação independente das ondas mecânicas num meio elástico) das ondas coerentes (ondas com a mesma frequência, a mesma amplitude e o mesmo comprimento).

---

---

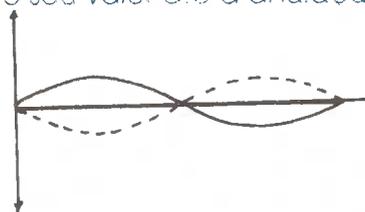
### Interferência construtiva

As partículas oscilam na mesma fase, a amplitude aumenta o seu valor.



### Interferência destrutiva

As partículas oscilam na fase contrária, a amplitude diminui o seu valor até à anulação.



# CAPÍTULO V

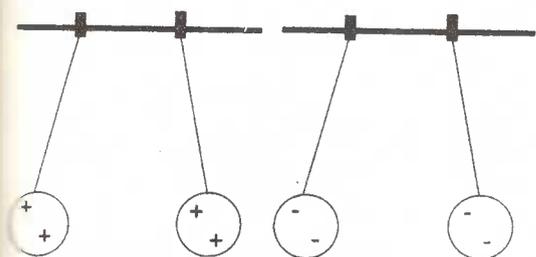
## corrente alternada

## CORRENTE ALTERNADA

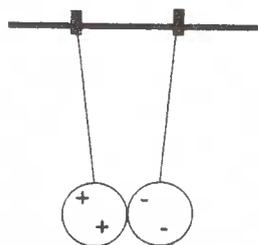
Estudamos na 9ª classe que as cargas eléctricas podem ser separadas por métodos diferentes. Por exemplo pela fricção duma vareta de ebonite com um pano de lá.

A vareta adquire a propriedade de atrair pedacinhos de papel, o que mostra ela fica electrizada. Há cargas eléctricas positivas (défice de electrões) e negativas (excesso de electrões).

Entre as cargas eléctricas actuam forças de atracção e de repulsão.

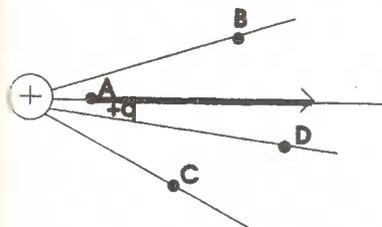


Forças de repulsão



Forças de atracção

Cada carga eléctrica é rodeada por um campo eléctrico e cada ponto deste campo tem um determinado potencial eléctrico.



Colocando no ponto A uma carga  $+q$ , actua sobre ela, através do campo, uma força de repulsão que a transporta até o final do campo. Esse final do campo é, por convenção, o referencial zero.

Este transporte está ligado ao trabalho realizado pela força eléctrica.

O potencial eléctrico do ponto A é determinado pela razão:

$$\frac{W_A}{q} = V_A$$

$V_A$  — é o potencial eléctrico no ponto A

$W_A$  — é o trabalho realizado pela força de interacção eléctrica para transportar a carga desde A até ao infinito do campo

$q$  — é a carga transportada

Cada ponto do campo tem o seu próprio potencial eléctrico (naturalmente ha pontos com o mesmo potencial eléctrico).

Entre dois pontos do campo existe uma diferença de potencial (d.d.p.) que podemos determiná-la por:

$$V_A - V_B = \frac{W_{AB}}{q}$$

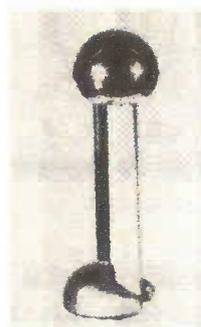
( $W_{AB}$  é o trabalho realizado para transportar a carga  $q$  desde A até B)  
 A d.d.p. entre dois pontos chama-se também *tensão* ou *voltagem*.  
 O significado de todos esses termos é o mesmo.

Grandeza física	Símbolo	Unidade
Tensão (d. d. p.)	U	$1 \frac{J}{C} = 1V$ (Volt)

Fontes de tensão:  
 Pilhas secas, baterias



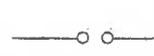
Gerador

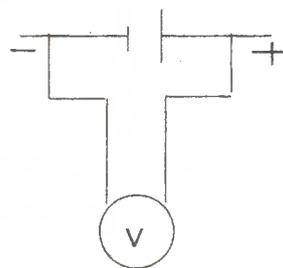


Transformação da energia química  
 através da separação das cargas  
 eléctricas à energia eléctrica

Transformação da energia mecânica  
 através da separação das cargas  
 eléctricas à energia eléctrica

O instrumento de medição da tensão é o *voltímetro*.

Fontes de tensão	Símbolo
Pilhas Baterias	
Gerador	



Medição duma tensão com o voltmetro

A *corrente eléctrica* é o movimento ordenado de cargas eléctricas em um condutor sujeito a uma diferença de potencial (tensão).

Dependendo do tipo de condutor (metálico, líquido, gasoso) os portadores das cargas eléctricas podem ser *electrões* ou *iões*.

No caso dos condutores metálicos a corrente eléctrica é o movimento dos electrões num campo eléctrico.

O movimento dos electrões é do polo negativo ao polo positivo da fonte de tensão.

O movimento dos electrões do polo negativo ao polo positivo é o *sentido real da corrente eléctrica*.

Antigamente, não se sabia exactamente "quem" se movia no condutor (o electrão foi descoberto em 1864). Por isso foi estabelecida a convenção seguinte.

O sentido da corrente eléctrica corresponde ao movimento de cargas positivas no interior de um condutor, movendo-se naturalmente do ponto de maior para o de menor.

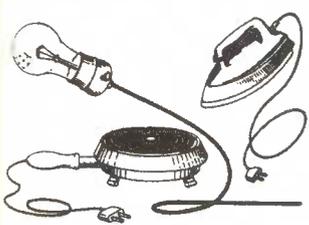
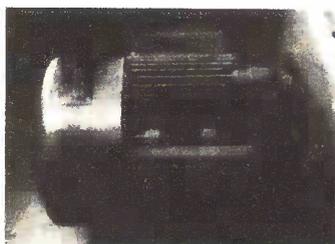
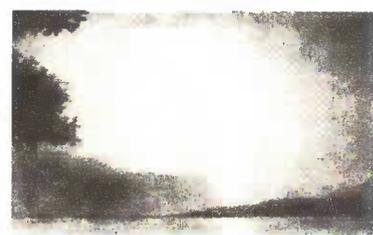
A *intensidade da corrente eléctrica* determina a quantidade das cargas eléctricas que passa por um condutor pelo intervalo de tempo.

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

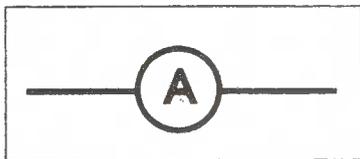
Grandeza física	Símbolo	Unidade
Intensidade da corrente eléctrica	I	$1 \frac{C}{s} = 1A$ (Ampère)

1 A = 1000 mA (milliampere)  
1mA = 10<sup>-3</sup> A

### Algumas intensidades da corrente eléctrica da Técnica e Natureza

Aparelhos electrodomésticos	Indústria e Transporte	Natureza (Relâmpago)
		
0,1A a 10A	10A a mais de 100 000 A	10 000A a 100 000 A

O instrumento de medição da intensidade da corrente eléctrica é o *amperímetro*.



Para medir a intensidade da corrente eléctrica o amperímetro deve ser ligado no circuito de modo que a corrente passe pelo amperímetro.

Uma das propriedades que todos os condutores têm é a sua *resistência* ( $R$ ).

A oposição que os átomos dum condutor oferecem à passagem da corrente eléctrica chama-se *resistência*.

G.S.OHM descobriu que a intensidade da corrente eléctrica que passa por um condutor é directamente proporcional à tensão aplicada.

$$I \sim U$$

A constante de proporcionalidade é o recíproco da resistência. A expressão matemática da lei de Ohm é :

$$\frac{U}{I} = R \text{ ou } U = R \cdot I$$

A resistência dum condutor metálico é directamente proporcional ao seu *comprimento* ( $l$ ) e inversamente proporcional à *área da secção transversal* ( $A$ ) do condutor.

Essa proporcionalidade pode ser transformada numa igualdade, introduzindo-se uma constante ( $\rho$ ) que caracteriza a natureza do material utilizado.

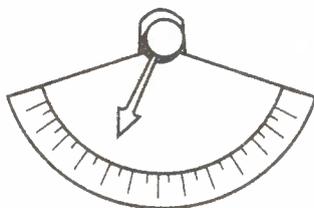
$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

Grandeza física	Símbolo	Unidade
Resistência	$R$	$1 \frac{V}{A} = 1\Omega$ (Ohm)

Transformação da energia no circuito eléctrico

## Indução electromagnética e a lei de Lenz

As correntes eléctricas criam campos magnéticos

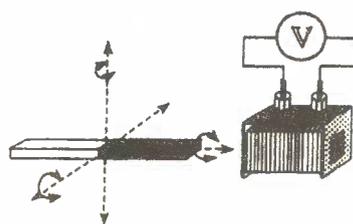
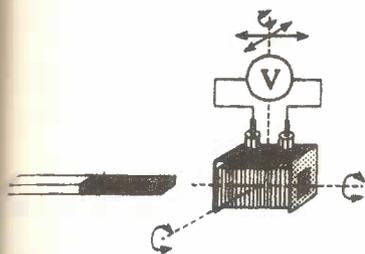


A experiência de Oersted

Cargas eléctricas em movimento criam um campo magnético.

Se a corrente eléctrica pode criar um campo magnético, um campo magnético também pode criar uma corrente eléctrica.

Iman fixo



Bobina fixa

Além do movimento da bobina ou do íman em volta ao seu eixo longitudinal, todos os outros movimentos produzem uma corrente eléctrica chamada *corrente induzida*.

A causa para a corrente induzida não é o movimento relativo entre o íman e a bobina mas sim a variação do fluxo magnético que penetra as espiras da bobina.

O mesmo efeito - a indução duma corrente eléctrica - podemos observar se um condutor ou uma espira se move num campo magnético homogéneo, como vamos ver no parágrafo seguinte.

A direcção da corrente induzida determina-se pela lei de Lenz.

A corrente induzida tem um sentido tal que cria um fluxo magnético variável que se opõe à variação do fluxo indutor.

Também podemos apresentar a lei de Lenz através do efeito observável.

O sentido da corrente induzida é tal que os seus efeitos tendem sempre a se opor aos efeitos que a criam.

## Corrente alternada - oscilação eléctrica

Aplicando a lei de Lenz podemos constatar: o sentido de direcção da corrente induzida muda-se dependendo da variação do fluxo magnético.

Um condutor eléctrico, uma espira por exemplo, está sofrendo um movimento de vaivém, entrando e saindo do campo magnético. O sentido da *corrente induzida* muda constantemente, ele *oscila* em volta dum ponto de equilíbrio.

Lembrando da oscilação mecânica.

Falamos da oscilação quando uma grandeza física varia periodicamente.

No caso da mudança periódica do sentido da corrente induzida podemos dizer que o resultado é uma *oscilação eléctrica*.

A mudança periódica do sentido da corrente induzida é uma *oscilação eléctrica*.

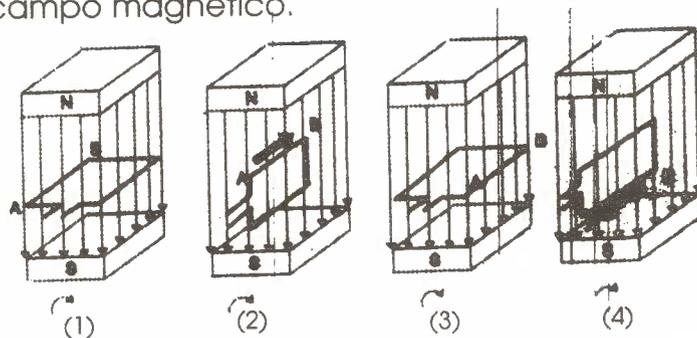
Uma corrente que muda periodicamente, o sentido do seu fluxo chama-se *corrente alternada* ou *corrente alterna*.

### A produção duma corrente alternada

A condição fundamental para a produção duma corrente alternada é o movimento de vaivém que garante a entrada e a saída num campo magnético (variação do fluxo magnético).

Esta variação do fluxo magnético atinge-se também por girar uma espira dentro dum campo magnético.

Observa bem:



(1) Na espira não há nenhuma corrente induzida.

(2) Há um máximo da corrente induzida com o sentido de  $A \rightarrow B$ . Durante o movimento da espira da posição (1) para (2) a corrente cresce de intensidade zero para o máximo.

(3) A mesma situação como na posição (1), quer dizer, a intensidade da corrente induzida diminui de máximo para zero.

(4) Mais um máximo da corrente induzida com o sentido de  $B \rightarrow A$ , quer dizer, a corrente induzida percorre a mesma parte da espira em sentido contrário.

Se a espira gira mais de  $90^\circ$ , ela atinge a posição inicial (1) que significa, que a intensidade da corrente induzida diminui de máximo para zero.

Ao valor que a corrente induzida tem em cada momento da rotação da espira chama-se *valor instantâneo* da corrente alternada.

A causa para a corrente alternada que percorre um circuito é a *tensão alternada*.

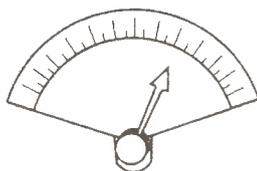
Pela rotação dum espira fechada dentro dum campo magnético surge uma corrente induzida alternada.

O valor da intensidade desta corrente induzida altera entre dois máximos contrários, quer dizer, durante uma rotação completa a corrente induzida percorra e mesma parte da espira em dois sentidos contrários.

### As características da corrente alternada

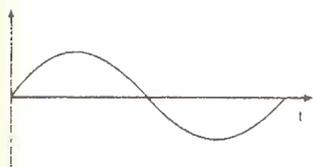
Liguemos esta espira que gira dentro dum campo magnético homogéneo a um voltímetro. Assim podemos mostrar as mudanças da intensidade da corrente induzida e da direcção do seu fluxo. O ponteiro do voltímetro está no centro da escala e indica o valor zero.

Quando a espira começa a girar, o ponteiro move-se para o lado direito e depois para o lado esquerdo.



Cada vez o ponteiro afasta-se a mesma distância do ponto inicial. Isto significa que os valores absolutos máximos da corrente induzida são iguais, mas os sentidos das suas direcções são contrários.

Ligando a espira a um oscilógrafo observa-se a seguinte imagem.



O comprimento desta corresponde ao tempo em que a espira faz uma rotação completa. Quer dizer o eixo horizontal é o eixo do tempo.

No eixo vertical representamos simultaneamente duas grandezas físicas, a tensão eléctrica  $u$  e a intensidade da corrente eléctrica  $i$ .

Estas duas grandezas físicas estão em dependência ao ângulo que a espira tem em relação à posição inicial, e logicamente em dependência ao tempo.

$$u = f_1(t)$$

$$i = f_2(t)$$

A tensão alternada e a intensidade da corrente alternada são funções periódicas do tempo e representam uma oscilação eléctrica.

Os valores instantâneos destas duas grandezas podem-se determinar na base da relação matemática:

$$x = x_{\max} \text{ sen } (\omega \cdot t)$$

$\omega$  significa a frequência angular que podemos determinar pela equação

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

A frequência angular indica o número de vezes que a espira faz rotações completas na unidade do tempo. A grandeza  $f$  é a frequência da corrente alternada: Dependendo duma convenção internacional, a frequência da corrente alternada para os consumidores tem o valor de  $50 \text{ s}^{-1}$  (Hz).

Qual é a frequência angular ( $\omega$ ) que corresponde a frequência da corrente alternada de  $50 \text{ s}^{-1}$ ?

*Dado*

$$f = 50 \text{ s}^{-1}$$

*Pedido*

$$\omega$$

*Resolução*

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

$$\omega = 2\pi \cdot 50 \text{ s}^{-1}$$

$$\omega = 314 \text{ s}^{-1}$$

Para conseguir a frequência de 50Hz da corrente alternada as espiras (o rotor) dum gerador que produz a corrente alternada deve se girar 3000 vezes por minuto.

Com base na frequência da corrente alternada pode se calcular o período da corrente alternada.

Exemplo:

*Dado*

$$f = 50 \text{ s}^{-1}$$

*Pedido*

$$T$$

*Resolução*

$$T = \frac{1}{f}$$

$$T = \frac{1}{50 \text{ s}^{-1}}$$

$$T = 0,02 \text{ s}$$

## A produção da corrente alternada - o gerador

A base para a produção da corrente alternada é a transformação do *trabalho mecânico* em *trabalho eléctrico*.

Esta transformação utilizamo-la no caso da indução electro-magnética.

A maneira mais fácil de produzir uma corrente alternada é girar uma espira ou uma bobina dentro dum campo magnético homogéneo, com uma frequência angular constante.

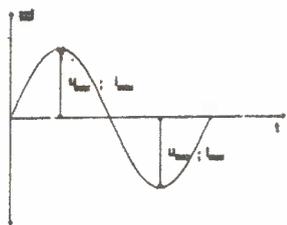
Esta maneira já conhecemos.

Como podemos resolver tecnicamente a produção da corrente alternada?

A máquina em que se produz corrente alternada chama-se *gerador*. As suas partes principais são o *rotor*, em que se produz o campo magnético por ligação com uma corrente contínua, e o *stator*, em que será induzida a corrente alternada pelas rotações do campo magnético do rotor.

### Valores máximos e efectivos da tensão e da intensidade da corrente alternada

Durante uma rotação do campo magnético do rotor a tensão e a intensidade da corrente alternada têm duas vezes valores máximos como se pode ver na representação gráfica destas duas grandezas.



Em todos outros momentos da rotação os valores da tensão e da corrente alternada são mais pequenos.

Qual é o valor da tensão e da intensidade da corrente alternada que é disponível durante todo o tempo da rotação?

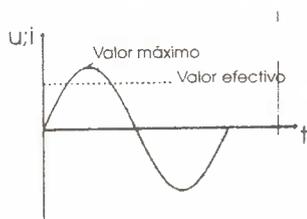
Está certo, os valores são mais pequenos. Um voltímetro, útil para medir a tensão alternada, indica um valor da tensão que corresponde

$$\frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} = U_{\text{ef}}$$

No caso dum amperímetro, o ponteiro indica também somente um valor que corresponde

$$\frac{i_{\max}}{\sqrt{2}} = i_{\text{ef}}$$

Estes valores efectivos obtêm-se pela medição da quantidade do calor produzido pela corrente.



O valor efectivo da corrente alternada corresponde o valor que uma corrente contínua devia ter para realizar a mesma potência.

Exemplo:

Um voltímetro está ligado a um gerador em funcionamento. O ponteiro indica uma tensão de 220V. Qual é o valor máximo da tensão alternada induzida nas bobinas do stator do gerador?

*Dado*

$$U_{\text{ef}} = 220\text{V}$$

*Pedido*

$$U_{\text{max}}$$

*Resolução*

$$U_{\text{ef}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

$$U_{\text{max}} = U_{\text{ef}} \cdot \sqrt{2}$$

$$U_{\text{max}} = 311\text{V}$$

### A potência da corrente contínua e da corrente alternada

A intensidade dum corrente contínua que percorra um circuito depende da tensão aplicada e resistência eléctrica.

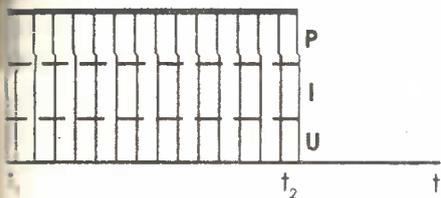
Depende da *lei de Ohm* é válido:

Intensidade da  
corrente contínua

$$I = \frac{U}{R}$$

O trabalho eléctrico realizado neste circuito é igual ao produto da tensão, da intensidade da corrente e do tempo.

Trabalho eléctrico realizado  
pela corrente contínua  $W_{\text{el}} = U \cdot I \cdot t$



O diagrama abaixo, mostra o trabalho eléctrico realizado pela corrente contínua.

No intervalo do tempo  $t_1$  a  $t_2$  a corrente contínua realizou o trabalho que corresponde a área tracejada.

Analogamente à potência mecânica, podemos definir a potência eléctrica como trabalho eléctrico realizado por unidade de tempo.

Análiticamente exprime-se isto, como

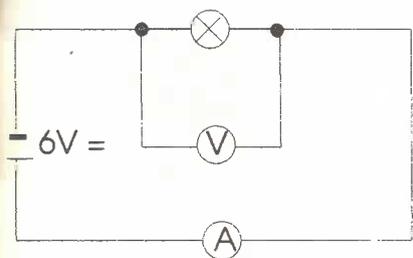
$$P = \frac{W}{t} \text{ ou } P = \frac{U \cdot I \cdot t}{t} = U \cdot I$$

Potência eléctrica  $P = U \cdot I$

Dependendo da resistência (consumidor) utilizada, a energia eléctrica transforma-se, num circuito eléctrico fechado numa das outras formas da energia.

Por exemplo, numa lâmpada, a energia eléctrica transforma-se em calor e luz. Num motor eléctrico principalmente em energia mecânica. Com um voltímetro e um amperímetro podemos determinar experimentalmente a potência eléctrica num circuito da corrente contínua.

Experiência para determinar a potência duma lâmpada.

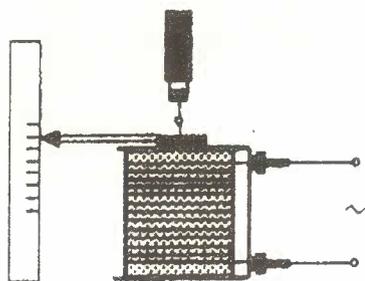


O voltímetro indica 5,9V e o amperímetro uma intensidade da corrente de 2,54A. Neste caso a lâmpada tem uma potência de 15W. Há também a possibilidade de determinar directamente a potência eléctrica.

Neste caso utiliza-se um wattímetro em substituição do voltímetro e amperímetro.

## Potência da corrente alternada

A intensidade da corrente alternada e o valor da tensão alternada, não podem ser medidos com os mesmos instrumentos de medição que são utilizados no caso da corrente contínua, porque a intensidade da corrente e o valor da tensão alteram-se permanentemente. Por isso, os ponteiros dos instrumentos de medição não podem se mover à mesma velocidade. As grandezas alteram-se por causa da sua inércia mecânica, e ficam na posição zero independentemente dos valores máximos da corrente alternada e da tensão alternada. Para se medir a intensidade da corrente alternada e a tensão alternada deve-se usar um mecanismo electromagnético com bobina cilíndrica.



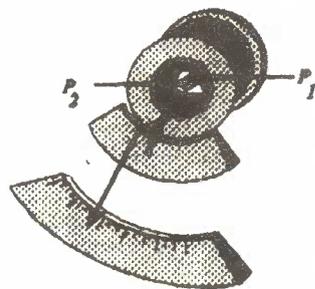
O seu funcionamento principal é o seguinte:

Uma bobina percorrida por uma corrente alternada produz um campo magnético que atrai um corpo de ferro macio. A intensidade do campo magnético está em dependência da intensidade da corrente que percorra a bobina. Esta intensidade corresponde ao valor efectivo da corrente alternada e não ao valor máximo.

Este funcionamento principal foi aplicado para a solução técnica da construção dos instrumentos de medição da tensão e corrente alternada.

A figura ao lado mostra esta solução técnica. Duas peças de ferro macio estão colocadas dentro da bobina percorrida pela corrente alternada. A peça  $P_1$  está fixa e a peça  $P_2$  pode mover-se em torno do eixo que traz o ponteiro. Quando a corrente alternada percorre a bobina, as duas peças do ferro macio sofrem uma magnetização da mesma polaridade e repelem-se, quer dizer, a peça  $P_2$  afasta-se da sua posição inicial e o ponteiro indica na escala o valor efectivo da intensidade da corrente alternada.

Uma mola (não está apresentada na figura esquematizada) tira a peça à sua posição inicial depois da medição.



Como podemos ver, no caso dos instrumentos de medição para a corrente alternada, somente os valores efectivos provocam o deslocamento do ponteiro. Isto significa que a potência da corrente alternada pode ser determinada da mesma maneira como no caso da corrente contínua.

Quer dizer, a potência pode se calcular pela relação:

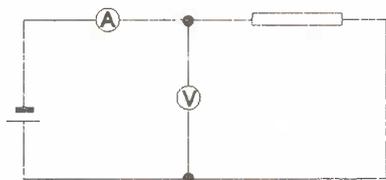
Potência da corrente alternada  $P = U \cdot I$   
 (Resistência ôhmica)

### Resistência no circuito da corrente alternada

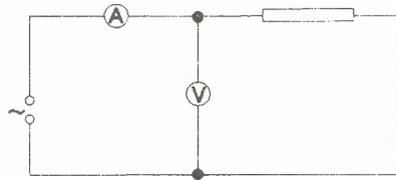
No circuito da corrente contínua determinamos o valor duma resistência pela medição da intensidade da corrente que a percorra e da tensão aplicada.

Ligamos no mesmo circuito uma tensão alternada com o valor efectivo  $u$  ( o mesmo que a tensão contínua tinha) o circuito vai ser percorrido por uma corrente alternada cuja intensidade tem o mesmo valor efectivo como a da corrente contínua.

Neste caso a resistência chama-se *resistência ôhmica*.

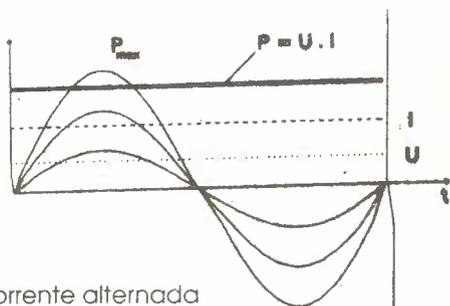


Corrente alternada

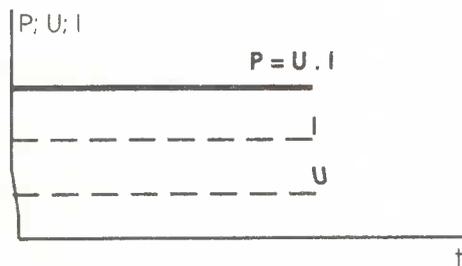


Corrente contínua

Um condutor (por.ex. carbono - grafite ) tem no circuito da corrente alternada e no circuito da corrente contínua somente uma resistência ôhmica.



Corrente alternada



Corrente contínua

A maioria dos aparelhos eléctricos não têm só resistências ôhmicas. Estes aparelhos contêm também condensadores e bobinas.

Em contradição à resistência ôhmica, uma bobina no circuito da corrente alternada mostra um outro comportamento.

## **A auto - indução**

Observe bem!

Uma lâmpada de 60W e uma bobina com 1500 espiras estão numa associação em série e ligados a uma fonte de tensão alternada de 220V e 50Hz. A lâmpada está a brilhar com uma certa claridade. Colocamos a bobina no núcleo fechado de ferro macio, a intensidade da corrente alternada baixará e a lâmpada não brilhará mais.

A causa para esta fenómeno é a seguinte.

No momento em que começa o fluxo da corrente eléctrica alternada, a sua intensidade aumenta a partir do valor zero para o valor máximo. Durante este tempo temos uma variação do fluxo magnético que provoca uma corrente induzida. O sentido desta corrente induzida é tal que seus efeitos tendem sempre a se opor aos efeitos que a criam (lei de Lenz). Isto significa que a corrente induzida tem um sentido contrário ao sentido da corrente alternada que provoca a corrente induzida.

Se a intensidade da corrente alternada diminui, temos mais uma vez uma variação do fluxo magnético, quer dizer, uma corrente induzida com um sentido contrário.

Por causa da variação permanente da intensidade e do sentido da corrente alternada a bobina está numa variação permanente do fluxo magnético que produz a corrente induzida.

Este fenómeno chama-se *auto-indução*.

Explique, porque razão não há uma auto - indução numa bobina ligada com uma fonte da corrente contínua.

## **A resistência indutiva - a indudância**

Aplicando a auto - indução na bobina, para a nossa experiência podemos dar a explicação seguinte:

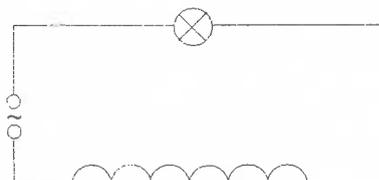
A tensão da auto - indução está dirigida em sentido contrário ao sentido da tensão aplicada. Por isso a intensidade da corrente alternada não pode atingir o mesmo valor como em caso da corrente contínua.

A tensão da auto - indução, que se chama também tensão contrária, influencia a intensidade da corrente alternada. Ela tem o mesmo efeito como uma resistência adicional.

Esta resistência chama-se resistência indutiva.

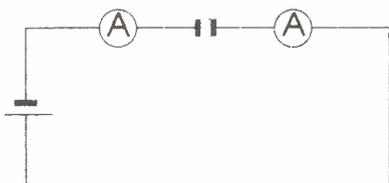
Resistência indutiva  $R_L$

A resistência indutiva é um resultado da auto-indução dum tensão alternada dentro dum bobina. A indução, em geral, é logicamente também a auto-indução.



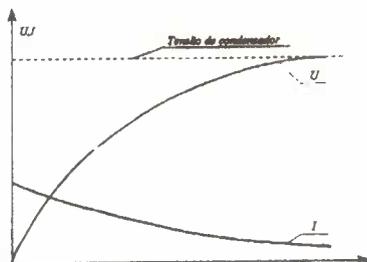
Está em dependência da intensidade da mudança do fluxo magnético que penetra a bobina. Esta intensidade da mudança do fluxo magnético, pode ser influenciada pela construção da própria bobina, pelo número das espiras, a forma da bobina e o seu núcleo. Quer dizer, cada bobina tem as suas características que influenciam a auto-indução. Estas características estão unidas num único conceito - a *indudância*. A indudância dum bobina caracteriza a auto-indução dessa bobina. O símbolo desta grandeza é  $L$ .

### A resistência capacitava



Ligando um condensador num circuito da corrente contínua, podemos observar que somente no momento de fechar o circuito há um fluxo da corrente (corrente de carregar o condensador). Este fluxo da corrente podemos verificar em frente e atrás do condensador.

No início de carregar o condensador, a intensidade da corrente eléctrica tem um valor relativamente alto. Depois de um tempo muito curto, a tensão carregada do condensador aproxima-se ao seu máximo, a diferença entre o potencial eléctrico do condensador e da fonte de tensão é muito pequena, por isso o fluxo da corrente eléctrica diminui; como o diagrama mostra.



Quando a tensão do condensador é igual a tensão da fonte não há mais nenhum fluxo da corrente eléctrica.

No circuito da corrente contínua, o condensador tem uma resistência ilimitada.

Trocando a polaridade da fonte, as placas do condensador descarregam-se e, depois repete-se o carregamento do condensador com uma polaridade contrária.

Trocando a polaridade, em intervalos muito curtos, no circuito teremos um fluxo permanente da corrente eléctrica que carrega e descarrega o condensador.

Esta corrente eléctrica é uma corrente alternada (o sentido da direcção muda-se periodicamente). Em comparação com a corrente que percorra um circuito sem condensador, a corrente alternada que percorra um circuito com condensador mostra um desfasamento temporal.

A mudança da direcção da corrente que carrega o condensador e a variação da sua intensidade provocam o fluxo duma corrente alternada no circuito com condensador.

A intensidade desta corrente alternada está em dependência com a capacidade do condensador. A tensão do condensador atinge o seu valor máximo mais tarde do que a intensidade da corrente.

A intensidade da corrente é maior, enquanto a capacidade do condensador é maior. Entre a intensidade da corrente que percorra um circuito eléctrico com condensador e a capacidade dele existe uma proporcionalidade directa.

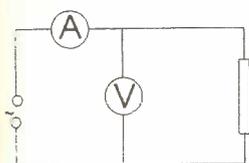
À causa para este efeito chama-se *resistência capacitava*.

Num circuito eléctrico da corrente contínua um condensador tem uma resistência ilimitada.

Num circuito de corrente alternada, a resistência capacitava depende da capacidade do condensador.

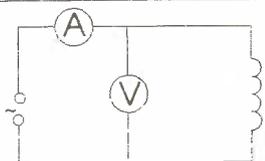
## A representação gráfica

Resistência ôhmica



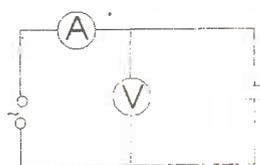
Não há nenhum desfasamento entre a tensão e a intensidade da corrente alternada.

Resistência indutiva

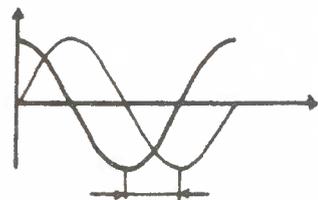
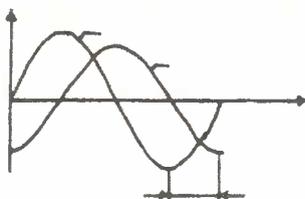
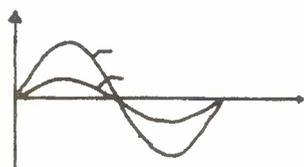


Há um desfasamento de tempo. O valor máximo da tensão está antes do valor máximo da corrente alternada.

Resistência capacitava



Há um desfasamento de tempo. O valor máximo da tensão está depois do valor máximo da corrente alternada.



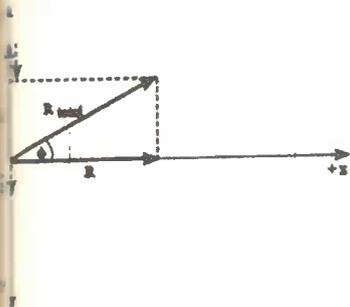
## A resistência total no circuito de corrente alternada

Num circuito estão ligados três resistências em série; Uma resistência ôhmica, indutiva e capacitava.

Como se determina a resistência total neste circuito?

Sabendo que a resistência indutiva é  $R_L = L\omega$  (significa a velocidade angular) e a resistência capacitava é

$$R_c = \frac{1}{C \cdot \omega}$$



Sabemos também que as resistências indutivas e capacitivas têm um efeito contrário (observa bem a representação gráfica anterior).

Estas duas resistências, indutiva e capacitava, provocam um desfasamento e por isso, devem ser tratados como vectores. Representando graficamente esta situação obtém-se o gráfico ao lado.

Por causa de desfasamento de  $+90^\circ$  devemos representar a resistência indutiva no eixo  $y$  positivo. A resistência capacitava, provocando um desfasamento de  $-90^\circ$ , representa-se no eixo  $y$  negativo.

A soma das resistências indutiva e capacitava é logicamente a diferença

$$\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}$$

A resistência total determina-se facilmente pelo teorema de Pitágoras

$$R_{\text{Total}} = \sqrt{R^2 + \left( \omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2}$$

Esta resistência total chama-se em Física *resistência da corrente alternada*.

O ângulo  $\Phi$ , formado pelos vectores  $\vec{R}$  e  $\vec{R}_{\text{Total}}$ , é o ângulo do desfasamento entre o valor máximo da tensão e da corrente alternada. Este ângulo pode ter valores entre  $-90^\circ$  e  $90^\circ$  depende das resistências num circuito.

Menciona:

Resistência	$\Phi$
ôhmica	$0^\circ$
indutiva	$90^\circ$
capacitava	$-90^\circ$

### A lei de Ohm no circuito da corrente alternada

Pelo estudo da corrente contínua conhecemos já a lei de Ohm que tem a sua expressão analítica na relação

$$I = \frac{U}{R}$$

No caso da corrente alternada, devemos considerar que a resistência  $R$  não é somente a resistência ôhmica mas sim a resistência da corrente alternada, como vimos no capítulo anterior.

Isto significa que a expressão analítica da lei de Ohm para a corrente alternada é:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}}$$

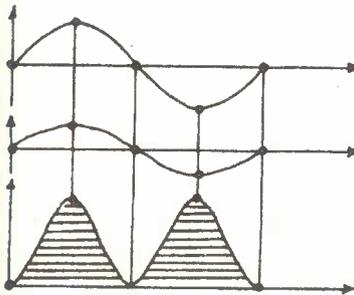
em que  $I$  e  $U$  são os valores efectivos da corrente e da tensão alternada respectivamente.

## O trabalho e a potência no circuito da corrente alternada

Considerando o desfasamento pela resistência indutiva, o valor da intensidade da corrente alternada que trabalha no circuito eléctrico, não é o valor efectivo que podemos medir com um amperímetro.

Para um circuito da corrente contínua a potência foi apresentada graficamente em dependência ao tempo. Uma apresentação gráfica se pode fazer também para um circuito da corrente alternada. Para isto formamos o produto de  $u_t$  e de  $i_t$  para cada tempo.

A resistência seria uma resistência óhmica.

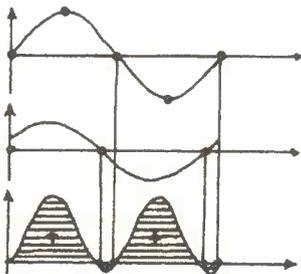


O diagrama ao lado mostra que a potência da corrente alternada oscila entre o valor zero e um valor máximo.

Pensa e explica porque é que os valores da potência são somente positivos, apesar do facto que os valores da tensão e da corrente alternada têm também valores negativos.

Ligando no circuito, além da resistência óhmica, uma resistência capacitava, teremos um desfasamento entre a tensão e a corrente alternada.

Construamos um diagrama da potência da mesma maneira como anteriormente, então, obteremos o gráfico seguinte.



Contrariamente ao caso anterior, os valores da potência têm valores positivos e negativos.

Como interpretamos este fenómeno?

Durante o tempo em que os valores são positivos, a fonte de tensão oferece energia eléctrica ao circuito. Esta energia transforma-se numa outra forma, em geral, em energia calorífica.

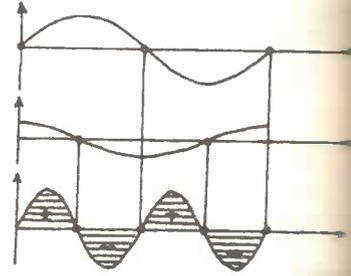
Durante o tempo em que o condensador se descarrega, há um fluxo de energia, da corrente eléctrica detrás à fonte de alimentação.

A potência neste circuito é menor do que num circuito com uma só resistência óhmica.

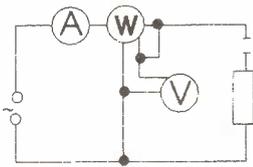
Uma resistência indutiva provoca o mesmo efeito. A causa para isto é a queda do campo magnético da bobina. Ligando num circuito, somente uma resistência capacitava ou indutiva, haverá um desfaseamento entre os valores máximos (ou mínimos respectivamente) de  $90^\circ$  ou de  $T/4$ .

Neste caso temos uma situação que o diagrama ao lado ilustra. Neste caso, as áreas "positivas" e "negativas" são iguais. Isto significa que a energia oferecida pela fonte de tensão é igual a quantidade da energia que a fonte recebe pelo descarregamento do condensador. Isto é, neste circuito não há nenhum trabalho eléctrico.

Para medir a potência num circuito da corrente alternada usa-se um potênciometro.



Façamos uma experiência para mostrar este método.



No circuito da corrente alternada está ligada uma resistência óhmica. Meçamos os valores da tensão e da intensidade da corrente alternada que os instrumentos de medição indicam. Depois formemos o produto destes valores e o resultado comparemo-lo com o valor que o potênciometro indica. Não há nenhuma diferença.

Liguemos ao mesmo circuito mais um condensador (resistência capacitava), e veremos que o potênciometro indica um valor menor do que o produto pelo  $U$  e  $I$ .

O produto formado pela tensão e intensidade da corrente alternada designa-se *potência fictícia*  $P_f = U \cdot I$ . A sua unidade é *voltampere (VA)*.

A potência que o potênciometro (Wattímetro) indica chama-se *potência activa*  $P_A$ . A sua unidade é *Watt (W)*.

Para os circuitos da corrente alternada é válido  $P_A < P_f$ .

A diferença entre a potência fictícia e a potência activa tem a sua causa no desfaseamento entre a tensão e a intensidade da corrente alternada. Pela divisão da potência activa por potência fictícia recebemos o factor de potência

Factor de potência  $\cos \phi = \frac{P_A}{P_F}$

A potência activa determina-se pela fórmula:

Potência activa  $P_A = P_F \cos \phi$   
 $P_A = U_{ef} I_{ef} \cos \phi$

O trabalho eléctrico realizado pela corrente alternada determina se pela fórmula:

Trabalho eléctrico  $W = P_A t = U_{ef} I_{ef} \cos \phi t$   
(Corrente alternada)

O desfaseamento entre os valores máximos da tensão e da intensidade da corrente alternada tem uma grande importância na prática.

Os motores eléctricos, contêm bobinas para produzir campos magnéticos. A energia eléctrica, necessária para a produção dum campo magnético, transforma-se no caso da queda do campo magnético, novamente em energia eléctrica. Esta energia eléctrica, vai ser restituída à rede do abastecimento eléctrico. Pelo desfaseamento temporal entre os valores máximos da tensão e da intensidade da corrente alternada, temos este fenómeno que nos condutores (na rede de abastecimento) vai ser transportada mais energia do que o motor consume. A consequência é que os geradores, na central eléctrica, devem produzir mais energia do que é necessária. Também nos condutores registamos um fluxo da corrente eléctrica muito alto que provoca mais prejuízos energéticos pela transformação da energia eléctrica em calor dentro dos condutores.

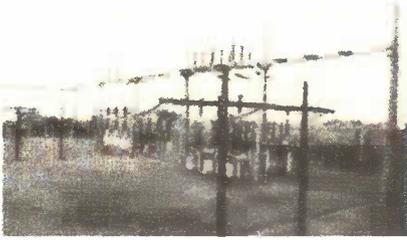
O caso ideal e mais económico, seria quando o desfaseamento é mínimo. Para garantir isto, usam-se condensadores (resistências capacitivas) que provocam um desfaseamento contrário ao desfaseamento provocado pelas resistências indutivas.

Estes condensadores ligam-se em paralelo às bobinas do motor eléctrico.

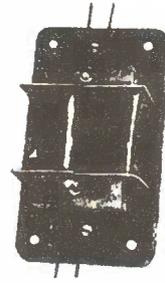
## O transformador

A maioria dos fenómenos eléctricos no circuito da corrente alternada são caracterizados pelas mudanças periódicas das grandezas eléctricas.

No capítulo seguinte vamos ver que um condutor eléctrico está cercado pelos campos electromagnéticos que sofrem também mudanças periódicas.



Transformador duma subestação



Transformador pequeno

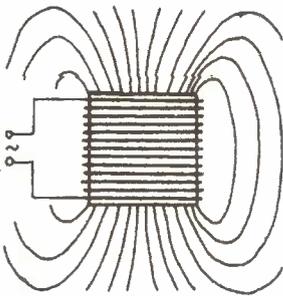
## Construção e funcionamento dum transformador

Além dos geradores que produzem a energia eléctrica, (eles transformam a energia mecânica em energia eléctrica) os transformadores têm a maior importância para o abastecimento das empresas e outros consumidores com a energia eléctrica.

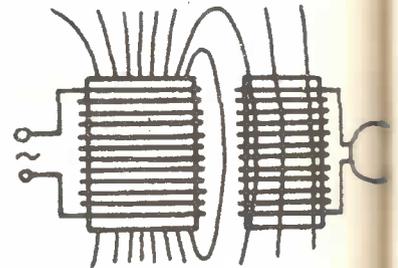
Lembremo-nos da indução electromagnética.

Cargas eléctricas em movimento criam um campo magnético.

Por outro lado, um fluxo magnético variável provoca uma corrente induzida.



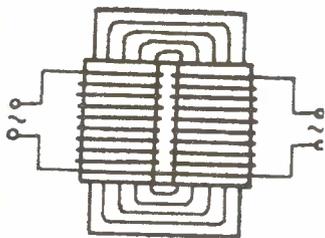
Uma bobina, percorrida por uma corrente alternada cria um campo magnético alternado. Coloca-se uma outra bobina perto da bobina percorrida pela corrente, de maneira que o campo magnético alternado possa "penetrar" esta bobina. Então, o campo magnético alternado induz uma tensão alternada nesta bobina.



As duas bobinas estão acopladas de modo indutivo pelo campo magnético.

A energia eléctrica vai ser transferida pela indução electromagnética, a partir da primeira bobina (bobina primária) à segunda bobina (bobina secundária). O acoplamento indutivo pode ser forçado, se se colocarem as duas bobinas num núcleo comum de ferro. Neste caso, o campo magnético produzido pela bobina percorrida por uma corrente alternada, existe praticamente, apenas no núcleo fechado de ferro.

Uma construção deste tipo, constituída por duas bobinas e um núcleo comum de ferro chama-se *transformador*.



O transporte da energia entre a bobina primária e a bobina secundária, é realizado pelo campo magnético alternado. Não há nenhuma ligação eléctrica entre as bobinas no caso deste tipo do transformador.

O transformador não armazena nenhuma energia. A oscilação electromagnética, na bobina primária, produz uma oscilação electromagnética da mesma frequência na bobina secundária. Quer dizer, o circuito primário da corrente produz no circuito secundário da corrente uma oscilação eléctrica forçada.

### Transmissão da tensão e da corrente

Quando a voltagem da tensão que alimenta a bobina primária aumenta a intensidade da corrente também aumenta. A intensidade da corrente alternada oscila entre valores mais altos ( $i_{max}$ ), quer dizer, neste caso há uma mudança mais forte da intensidade da corrente. A consequência é uma mudança mais forte do campo magnético.

Por causa da indução electromagnética podemos esperar que na bobina secundária se induza uma tensão mais alta.

Entre a tensão secundária  $U_s$  dum transformador e tensão primária  $U_p$  deve existir uma relação funcional;

$$U_s = f(U_p)$$

Em conformidade com a lei da indução electromagnética, deve existir também, uma relação entre a tensão induzida e o número das espiras da bobina em que a tensão vai ser induzida.

Por isso podemos concluir que:

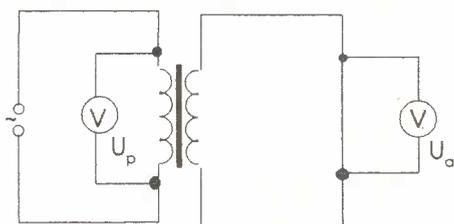
$$U_s = f(n_s)$$

$n_s$  - número das espiras da bobina secundária

Finalmente pode existir também uma relação entre a tensão induzida e o número de espiras da bobina primária ( $n_p$ ).

$$U_s = f(n_p)$$

A tensão secundária pode estar também em dependência do núcleo de ferro (forma e qualidade do núcleo). Para descobrir a relação que existe entre estas grandezas acima mencionadas, fazemos uma experiência.



A figura ao lado mostra como devemos ligar os voltímetros e o transformador

Para esta experiência devemos fazer três séries da medição. Em cada série mudamos uma só grandeza ( $U_p$ ;  $n_p$ ;  $n_s$ ) para ver qual é a sua influência para a tensão induzida  $U_s$ .

*Exp. 1:* Dependência da tensão secundária com a tensão primária

$n_p$	$n_s$	$U_p$ (V)	$U_s$ (V)	$n_p : n_s$	$U_p : U_s$
250	500	2	4	0,5	0,5
250	500	4	8	0,5	0,5
250	500	6	12	0,5	0,5
250	500	8	16	0,5	0,5

$$\text{Conclusão: } \frac{U_p}{U_s} = \frac{n_p}{n_s}$$

*Exp. 2:* Dependência da tensão secundária do número de espiras da bobina secundária

$n_p$	$n_s$	$U_p$ (V)	$U_s$ (V)	$n_p : n_s$	$U_p : U_s$
250	250	2	2	1	1
250	500	2	4	0,5	0,5
250	750	2	6	0,33	0,33
250	1000	2	8	0,25	0,25

$$\text{Conclusão: } \frac{U_p}{U_s} = \frac{n_p}{n_s}$$

*Exp. 3:* Dependência da tensão secundária do número de espiras da bobina primária

$n_p$	$n_s$	$U_p$ (V)	$U_s$ (V)	$n_p : n_s$	$U_p : U_s$
250	250	8	8	1	1
500	250	8	4	2	2
750	250	8	2,6	3	3,07
1000	250	8	2	4	4

$$\text{Conclusão: } \frac{U_p}{U_s} = \frac{n_p}{n_s}$$

Independentemente da grandeza que mudamos, o resultado foi sempre o mesmo.

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{n_p}{n_s}$$

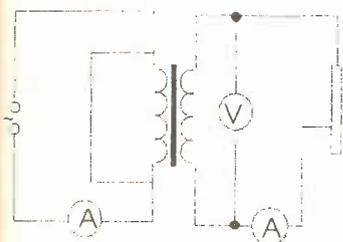
A razão entre a tensão primária e secundária é a mesma assim como entre o número de espiras da bobina primária e secundária.

*Nota:* Para esta experiência usamos um núcleo de ferro "folhado" e fechado. Ele não influencia a tensão secundária.

Durante as medições, o transformador não esteve ligado a nenhuma resistência no circuito secundário, quer dizer, o transformador esteve em vazio ou em ponto morto. Mas, na prática, os transformadores estão em funcionamento. Isto significa que o circuito secundário está percorrido por uma corrente eléctrica.

Qual é a influência da intensidade da corrente eléctrica para a tensão no circuito secundário?

Realizemos a experiência seguinte:



Uma resistência ôhmica variável está ligada no circuito secundário. Diminuindo esta resistência, a tensão secundária também diminui porque o circuito está percorrido por uma corrente mais alta.

Se a intensidade da corrente eléctrica aumenta a tensão diminui.

No mesmo tempo podemos constatar que um aumento da intensidade da corrente eléctrica no circuito secundário provoca também um aumento da intensidade da corrente eléctrica no circuito primário. Esta reacção pode-se explicar na base da lei da conservação da energia.

Com base nesta lei podemos concluir que:

Energia fornecida = Energia consumida  
(circuito primário) (circuito secundário)

Isto significa que:

$$U_p \cdot I_p \cdot t \cdot \cos \varphi_p = U_s \cdot I_s \cdot t \cdot \cos \varphi_s$$

*Nota:* Na prática, o desfasamento no circuito primário e secundário não é igual. Para o nosso caso, aprovamos que no circuito secundário está ligado somente uma resistência ôhmica. Com esta condição não há nenhum desfasamento, o que significa que  $\cos \varphi_p = \cos \varphi_s = 1$ .

Também, o nosso transformador não devia ter nenhum prejuízo energético (Transformador ideal).

Com estas condições podemos facilitar a equação em cima para

$$U_p \cdot I_p = U_s \cdot I_s$$

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

Entre a tensão primária e secundária, há a mesma razão como no recíproco da intensidade da corrente eléctrica no circuito primário e secundário.

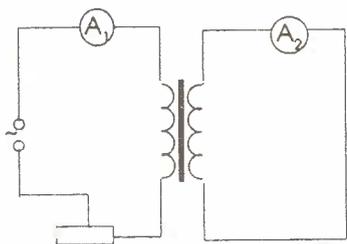
Por causa da relação

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{n_p}{n_s}$$

é válido

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{n_s}{n_p}$$

*Nota:* Esta relação entre o número de espiras das bobinas e a intensidade da corrente eléctrica no circuito primário e secundário, pode ser revista experimentalmente na base do esquema seguinte.



Isto significa que o amperímetro está ligado no circuito secundário de maneira que provoque um curto-circuito.

### O transformador ideal - Os dois tipos de transformadores

Um transformador que cumpre exactamente as relações entre a tensão secundária e primária, a intensidade da corrente eléctrica e o número de espiras das duas bobinas e não tem nenhum prejuízo energético chama-se *transformador ideal*.

Este transformador ideal não existe na prática, ele serve somente como modelo para descobrir melhor as leis que existem.

Há dois tipos de transformadores:

1º Um transformador que aumenta a tensão eléctrica que alimenta a bobina primária. Quer dizer, para este tipo de transformador, a tensão secundária é mais alta do que a tensão primária. O transformador que aumenta a tensão eléctrica chama-se *elevador*.

Quais são as características deste tipo do transformador?

Depende da relação

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{n_p}{n_s}$$

podemos dizer:

A bobina secundária dum elevador tem mais espiras do que a bobina primária.

*Exemplo:*

O número das espiras da bobina primária seria 500. Esta bobina está ligada a uma fonte de tensão que oferece 12V de tensão alternada. Quantas espiras deve ter a bobina secundária, se quisermos receber uma tensão secundária de 220V?

Dado	Pedido	Resolução
$U_s = 220 \text{ V}$	$n_s$	$\frac{U_p}{U_s} = \frac{n_p}{n_s}$
$U_p = 12 \text{ V}$		$n_s = n_p \cdot \frac{U_s}{U_p}$
$n_p = 500$		$n_s = 500 \cdot \frac{220 \text{ V}}{12 \text{ V}}$ $n_s = 9167$

Uma outra característica é a secção transversal dos condutores enrolados à bobina.

A razão entre as intensidades das correntes eléctricas que percorrem a bobina secundária e primária é o recíproco da razão entre a tensão secundária e primária. Isto significa que na bobina primária ligada com

a fonte de tensão de 12V, a intensidade da corrente eléctrica deve ser 18,3 vezes maior do que na bobina secundária.

Por isso:

O condutor da bobina secundária dum elevador é mais fino do que aquele da bobina primária.

2º Um transformador que reduz a tensão eléctrica que alimenta a bobina primária. A tensão secundária é mais baixa do que a tensão primária.

O transformador que reduz a tensão eléctrica chama-se *reductor*.

As suas características são contrárias às características dum elevador.

A bobina secundária dum reductor tem menos espiras do que a bobina primária.

O condutor da bobina secundária dum reductor é mais grosso do que aquele da bobina primária.

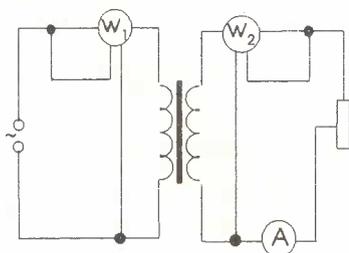
	Bobina	Tensão eléctrica	Número das espiras	Secção transversal do condutor
<b>Elevador</b>	primária secundária	baixa alta	menor maior	grosso fino
<b>Redutor</b>	primária secundária	alta baixa	maior menor	fino grosso

## O rendimento do transformador

Até agora, estudamos as leis dum transformador que foi idealizado - o transformador ideal - que não tem nenhum prejuízo energético.

Façamos a experiência seguinte:

Em conformidade com o esquema, meçamos a potência primária e secundária dum pequeno transformador.



A experiência mostra que a potência primária é maior do que a potência secundária.

$$P_p > P_s$$

A causa é o facto de que, um transformador real perde energia.

Em cada condutor (resistência óhmica) transforma-se energia eléctrica em energia calorífica (o condutor aquece-se) - *prejuízos caloríficos*.

Um outro prejuízo energético - *prejuízos indutivos* tem a sua origem na mudança periódica da polaridade e intensidade do campo magnético e na disseminação do campo magnético e nas correntes de FOUCAULT (correntes parasitas dentro do núcleo de ferro que une as duas bobinas — primária e secundária).

*Nota:* Chamamos correntes de FOUCAULT, aquelas correntes eléctricas que surgem devido à indução electromagnética nos condutores, no caso da variação do fluxo magnético que os corta.

Estas correntes percorrem um trajecto fechado dentro dos condutores formando turbilhões que abrangem o campo magnético em variação.

Pela selecção dos materiais úteis e técnicas especiais na produção do núcleo de ferro (contraplacados com camadas de isolamento) e das bobinas (bobinar oportunamente) os prejuízos podem ser limitados.

Rendimento  
(Factor de efeito)

$$\eta = \frac{P_s}{P_p}$$

No caso dos transformadores grandes o rendimento é maior do que 95%.

## **Aplicação prática do transformador**

### *Transformador de soldar*

As máquinas de soldar trabalham na base dum transformador. Duas peças de ferro, prensam-se muito bem e colocam-se no circuito secundário dum transformador com poucas espiras (reductor). No sítio do contacto existe uma resistência de transição que provoca um aquecimento muito forte no caso do fluxo da corrente, as duas peças fundem.

### *Transformador de medição*

Transformadores de medição, têm a função de separar a ligação de medição (baixa tensão) e a rede de alta tensão. Eles usam-se a partir duma tensão eléctrica maior do que 600V ( $U > 600V$ ) e para correntes eléctricas com uma intensidade maior do que 200A.

### *Transformadores de experimentação*

Com transformadores de experimentação produz-se alta tensão. Com esta alta tensão, examina-se materiais de isolação eléctrica, por exemplo, isoladores de cerâmica.

### *Bobina de ignição*

A bobina de ignição dum carro ou duma mota é um transformador. As baterias oferecem uma tensão de 6 ou 12V. A bobina de ignição transforma esta tensão para 12 000V para garantir que a faísca salte entre os electrodos da vela.

### *A importância económica dos transformadores*

O transporte da energia eléctrica em linhas da alta tensão não seria possível sem transformadores.

As linhas da rede eléctrica são extremamente longas, (centenas de quilómetros) e a redução da voltagem da tensão pode ser alta. Com uma redução da voltagem, há também um prejuízo da potência. O prejuízo da potência depende do quadrado da intensidade da corrente eléctrica e da resistência óhmica dos condutores. Isto significa que a intensidade da corrente eléctrica deve ser muito baixa para um transporte económico da energia. Para uma determinada potência, há esta possibilidade, somente se o transporte da corrente alternada realiza-se com uma tensão muito alta (220kV; 380kV).

A tensão produzida nos geradores, aumenta-se através de transformadores. Para os consumidores, a alta tensão é muito perigosa. Por isso, a alta tensão diminui-se gradualmente para uma voltagem útil (220V) para o consumo doméstico.

## **A importância de Hidroeléctrica de Cahora Bassa**

Hoje em dia, todo mundo precisa da energia eléctrica.

Na indústria para os motores eléctricos, na comunicação para as estações emissoras e para os receptores (televisores; rádios), nas casas para a iluminação e os diversos aparelhos domésticos (fogão eléctrico; geladeira; ferro de engomar etc.). Existe uma ligação estreita entre o desenvolvimento económico dum país e o consumo da energia eléctrica.

Mas, a energia eléctrica deve ser produzida. Para sua produção precisamos outras fontes de energia. Da lei da conservação da energia, conclui-se que existe somente a possibilidade da transformação de uma forma da energia noutra.

Energia mecânica \_\_\_\_\_ Energia eléctrica  
Energia calorífica \_\_\_\_\_ Energia eléctrica  
Energia nuclear \_\_\_\_\_ Energia eléctrica  
Energia solar \_\_\_\_\_ Energia eléctrica

A maior quantidade da energia eléctrica, foi e é produzida na base da transformação da energia calorífica em energia eléctrica. A energia calorífica está ligada com carvão e petróleo, quer dizer, portadores da energia que não existem ilimitados no mundo e vão um dia acabar . Por causa deste facto, todo o mundo está à procura das outras possibilidades de produzir energia eléctrica.

Além das tantas formas da produção da energia eléctrica que existem hoje no mundo (geradores de vento; centrais de maré; centrais nucleares e outras), a forma mais económica e ecológica é a produção da energia eléctrica pela energia mecânica que está armazenada na água dos rios. Um destes exemplos é a *Hidroeléctrica de Cahora Bassa* situada na Província de Tete.

Uma barragem gigante (164 m de altura e 303m de desenvolvimento no coroa mento) estanca o rio Zambeze. Uma albufeira com um comprimento de 270 km e largura máxima de 30 km pode armazenar 52.000 milhões de metros cúbicos de água.

A água queda de uma altura de 103,5 m e aciona cinco turbinas que são directamente acopladas com um alternador trifásico com uma potência de 480 MVA cada.

O consumo de cada turbina é de  $453 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e cada turbina faz 107,11 rotações por minuto a que corresponde a frequência eléctrica de 50 Hz.

A Hidroeléctrica de Cahora Bassa é capaz de produzir 2075 MW com a possibilidade de aumentar esta potência. Neste momento Moçambique pode consumir somente 400 MW. A outra energia vai ser exportada para África de Sul e Zimbabwe. A energia produzida tem uma tensão de 16 kV. Três grandes transformadores procedem à elevação da tensão de 16 kV para 220 kV e enviam essa energia por cabo de alta tensão para a subestação do Songo.

Nesta subestação do Songo se inicia propriamente o transporte da energia até aos centros de consumo. Para África de Sul ( Subestação de Apollo) o transporte realiza-se em duas linhas monopolares. Para diminuir os prejuízos energéticos (a energia deve ser transportada sobre uma distância de 1400 km) na subestação do Songo, faz se a conversão da corrente alternada em corrente contínua. Na subestação de Apollo, faz se a conversão da corrente contínua em corrente alternada.

Para o próprio transporte, a corrente contínua tem uma tensão de 533 kV e uma intensidade nominal de 1800 Amperes.

Os engenheiros resolveram o problema do transporte da energia duma maneira muito económica. Normalmente, para o transporte da energia eléctrica em corrente contínua são necessários dois cabos para fechar o circuito. Nas linhas que ligam as subestações Songo e Apollo, existe somente um "cabo" em cada linha, o outro "cabo" é a Terra.

Além destas grandes linhas que fornecem a energia eléctrica da Hidroeléctrica de Cahora Bassa à África de Sul, existe mais uma linha de 220 kV em corrente alternada que liga Songo e no futuro Chibata no Chimoio.

Actualmente esta linha fornece a energia a subestação de Matambo que pode fornecer até 40 MW. O abastecimento da Cidade de Tete e a Moatize realiza-se através de uma linha de 30 kV.

A Hidroeléctrica de Cahora Bassa é uma das maiores no Mundo e a maior no Continente Africano.

