

Ana Sofia Monteiro Armelim

## “Experiências com LEDs”



Departamento de Física  
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto  
Março / 1999

Ana Sofia Monteiro Armelim

## “Experiências com LEDs”



*Tese submetida à Faculdade de Ciências da Universidade do Porto  
para obtenção do grau de Mestre em Física para o Ensino*

Departamento de Física  
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto  
Março / 1999

# ÍNDICE

	pág.
AGRADECIMENTOS	3
1 OBJECTIVO	4
2 INTRODUÇÃO	6
2.1 Díodos	6
2.2 LEDs	9
3 VOLTÍMETRO	11
3.1 A construção do aparelho	12
3.2 Funcionamento	14
3.3 Aplicações	19
4 DETECTOR DE ZERO	22
4.1 A construção do aparelho	23
4.2 Funcionamento	25
4.3 Aplicações	27
5 ESTROBOSCÓPIO	31
5.1 A construção do aparelho	32
5.2 Funcionamento	34
5.3 Aplicações	37
6 ELECTRÓMETRO	49
6.1 A construção do aparelho	50
6.2 Funcionamento	52
6.3 Aplicações	58
BIBLIOGRAFIA	61
APÊNDICE A – Funcionamento de alguns dos componentes utilizados	62
A.1 Funcionamento de um 741	63
A.2 Funcionamento de um 555	69
A.3 Funcionamento de um MOSFET	74
APÊNDICE B - Máscaras dos circuitos impressos	78

## AGRADECIMENTOS

Na elaboração deste trabalho beneficieei da ajuda de algumas pessoas a quem gostaria, aqui, de agradecer:

- o Professor Doutor Manuel de Barros, meu orientador de dissertação, pelo apoio e motivação;

- o Senhor Ernesto, do Laboratório de Electrónica, pela disponibilidade e atenção que sempre manifestou e por toda a ajuda em termos práticos, fundamental para a construção dos quatro aparelhos;

- o meu marido, José António Reis, pelos seus conhecimentos de informática e de fotografia, que tão úteis foram.

# 1 OBJECTIVO

Este trabalho teve como objectivo a construção de dispositivos que utilizam LEDs e posterior idealização de situações nas quais os mesmos possam vir a ser utilizados. Obviamente que, como professora que sou, procurei situações nas quais eles pudessem ser utilizados na leccionação de assuntos tratados nos programas de Física do Ensino Básico e Secundário.

Deste trabalho constam quatro dispositivos:

- um VOLTÍMETRO,
- um DETECTOR DE ZERO,
- um ESTROBOSCÓPIO
- e um ELECTRÓMETRO,

apresentados segundo esta ordem.

Para cada um deles é apresentado o aspecto final exterior, a listagem do material utilizado, o esquema do circuito eléctrico, uma descrição dos princípios de funcionamento e algumas propostas de utilização. São também apresentadas algumas fotografias dos aparelhos em funcionamento, evidenciando as potencialidades dos mesmos.

Estes dispositivos começaram todos por ser primeiro testados em placas, tendo posteriormente sido montados em circuitos impressos. São as máscaras desses circuitos que se apresentam no Apêndice B.

No Apêndice A é descrito com mais detalhe o funcionamento de alguns dos componentes electrónicos utilizados na construção dos quatro aparelhos.

A originalidade deste trabalho não está nos aparelhos em si ( todos eles já existem e, nalguns casos, com graus de rigor bem mais elevados ), mas sim na forma como foram construídos: utilizando LEDs. Como resultado, obtemos aparelhos que, para além de serem mais atraentes para os alunos, são bastante mais económicos e, também, mais resistentes.

O LED, dado o seu baixo custo e dimensões reduzidas, a par do seu comportamento como díodo, é um componente que oferece imensas potencialidades, podendo, para além dos quatro dispositivos apresentados neste trabalho, idealizar-se outros.

Este é, portanto, um trabalho aberto. Aberto porque nos mostra apenas que é possível fazer, não o quanto é que é possível fazer. Com um pouco de imaginação, talvez possamos tornar as aulas dos nossos alunos um pouco mais luminosas.

## 2 INTRODUÇÃO

### 2.1 Díodos

Os díodos são constituídos por duas regiões semicondutoras, por exemplo de silício, encostadas uma à outra, mas diferentes. A diferença entre elas reside no facto de conterem “impurezas” diferentes. Essas impurezas são pequenas quantidades de substâncias que facilitam a passagem de corrente eléctrica através do silício.

Um cristal de silício pode ser dopado com átomos de um elemento que tenha mais um electrão de valência que o silício. Exemplo disso é a adição de arsénio ou fósforo, que têm cinco electrões em vez dos quatro electrões de valência do silício. De notar que o elemento dopante é, também, escolhido em função das suas dimensões, devendo ter dimensões semelhantes às do semicondutor, por forma a ocupar facilmente lugar na sua rede cristalina.

Resta, assim, um electrão que não está comprometido nas ligações covalentes entre os diferentes átomos e que se pode comportar como electrão livre, facilitando a condução de corrente eléctrica.

Uma placa de silício dopada com arsénio ou fósforo constitui um semicondutor negativo, ou semicondutor tipo N.

Outro modo de dopar o silício é incorporando-lhe boro. Como os átomos de boro só têm três electrões de valência, isto é, um electrão a menos que os átomos de silício na camada de valência, ao estabelecerem-se as ligações entre os átomos de silício e os de boro criam-se “lacunas” ou lugares vagos para a entrada dos electrões circundantes.

Neste caso a condutividade aumenta à custa do preenchimento dessas lacunas. Também elas vão mudando de posição e permitindo, assim, a passagem da corrente eléctrica.

Um cristal de silício impurificado com boro ou outro elemento de estrutura semelhante constitui um semicondutor positivo, ou semicondutor tipo P.

Um diodo não é mais do que um cristal de silício que tem uma região semicondutora N junto a uma região semicondutora P, nos terminais das quais existem eléctrodos ( Figura 2.1 ).

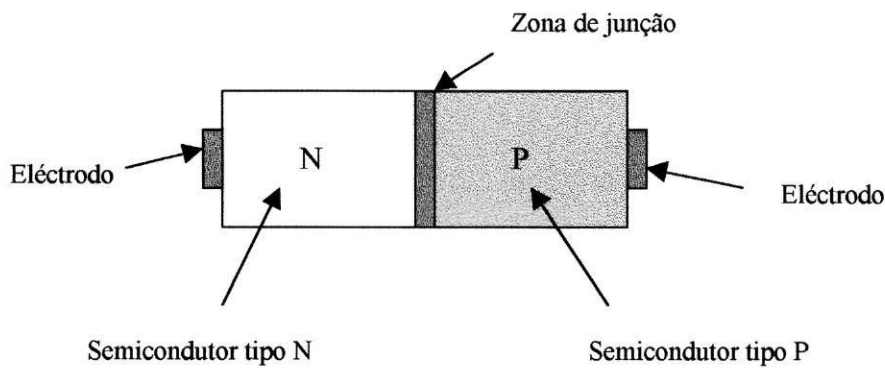


Figura 2.1  
Esquema de um diodo.

Quando se cria uma diferença de potencial entre os eléctrodos de modo a que o eléctrodo junto ao semicondutor N seja o negativo e o eléctrodo junto ao semicondutor P seja o positivo, os electrões movem-se para a região P e daí para o eléctrodo positivo, enquanto as lacunas se deslocam para a esquerda, possibilitando também a passagem da corrente. O diodo torna-se condutor e diz-se que o diodo está polarizado directamente.

Quando se inverte o sinal da carga dos eléctrodos, passam electrões para a zona P preenchendo as lacunas e criando iões negativos. Enquanto isso, no lado oposto passam electrões para o eléctrodo positivo, o que provoca a formação de iões positivos. Este processo origina repulsões entre os eléctrodos e as regiões vizinhas do diodo impedindo a circulação de electrões. O diodo está polarizado inversamente e deixa de ser condutor.

As figuras que se seguem explicam melhor a diferença entre polarização directa e polarização inversa.

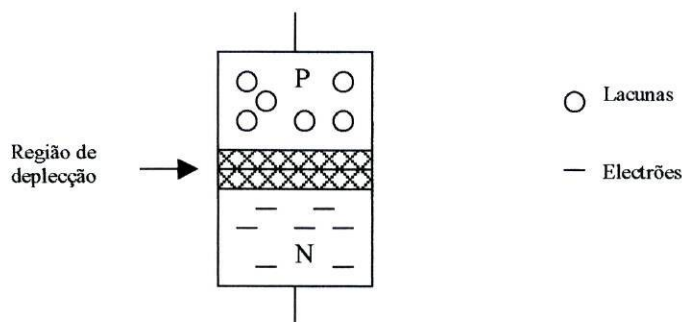


Figura 2.2  
Sem polarização.

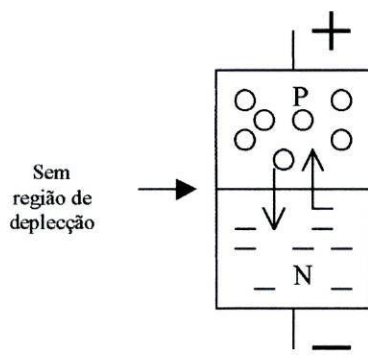


Figura 2.3  
Polarização directa.

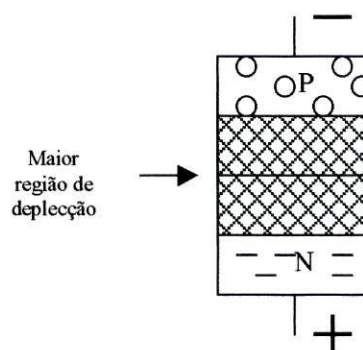


Figura 2.4  
Polarização inversa.

Quando a junção PN é formada, existe uma região em torno da *interface* a que se dá o nome de região de depleção, de acordo com o representado na Figura 2.2. Não há portadores de carga nesta região de depleção, de modo que ela age como um isolador.

Quando uma tensão positiva é aplicada ao material P e uma tensão negativa ao material N, os portadores de carga no cristal movem-se através da junção. Isto é mostrado na Figura 2.3. O tamanho da região de depleção diminui e diz-se que a junção está directamente polarizada. Se a polarização directa for aumentada até que a região de depleção desapareça, os portadores de carga mover-se-ão através da junção produzindo uma corrente.

Quando uma tensão negativa é aplicada ao material P e uma tensão positiva ao material N, os portadores de carga deslocam-se para longe da junção. As lacunas são atraídas para o terminal negativo e os electrões para o terminal positivo, aumentando o tamanho da região de depleção, como se verifica na Figura 2.4. Diz-se, então, que a junção está polarizada inversamente.

Com uma polarização inversa, não flui corrente através da junção PN. No entanto, se a polarização inversa for suficientemente alta, a barreira reduz-se e flui corrente através da junção. O ponto no qual isto ocorre é chamado tensão de *Zener*. A maioria das junções de germânio é destruída se forem polarizadas inversamente até ao ponto Zener. As junções de silício não são normalmente destruídas por uma tensão Zener, desde que a corrente inversa não seja excessiva.

O símbolo que representa o díodo nos esquemas dos circuitos electrónicos é o representado na Figura 2.5.



Figura 2.5  
Símbolo de um díodo.

O triângulo representa o semicondutor P e o traço o semicondutor N. Simultaneamente, o triângulo ( ou seta ) representa o sentido de passagem da corrente. É importante ter em atenção este pormenor, quando desenhemos esquemas de circuitos eléctricos em que intervenham díodos.

## 2.2 LEDs

Alguns díodos, quando são atravessados pela corrente eléctrica, emitem luz. São os LEDs ( *Light Emitting Diodes* ) e o símbolo que se utiliza para os representar em esquemas de circuitos eléctricos é apresentado na Figura 2.6.

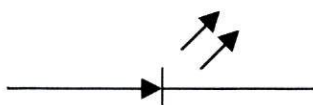


Figura 2.6  
Símbolo de um LED.

A emissão de luz acontece porque os electrões, ao saltarem para as lacunas do semicondutor P, ocupam um nível de energia mais baixo, emitindo, sob a forma de luz, a energia correspondente a essa transição. É de notar que em todos os díodos ocorrem estas transições energéticas, no entanto, apenas nos LEDs as frequências das radiações emitidas correspondem a frequências na zona do visível.

Como qualquer outro díodo, os LEDs só deixam passar a corrente num sentido e por isso devem ser ligados tendo em conta as indicações de qual o terminal a ligar ao

pólo positivo. Em muitos casos, os terminais dos LEDs são de comprimento desigual, devendo o terminal mais comprido ser ligado ao pólo positivo.

É de notar que os LEDs bicolores que existem no mercado, não possibilitam a passagem da corrente nos dois sentidos. O que acontece é que estes componentes são formados por dois LEDs: um deles possibilita a passagem da corrente num sentido, emitindo determinada luz ( por exemplo, vermelha ) e o outro possibilita a passagem da corrente no sentido oposto, emitindo uma luz diferente ( por exemplo, verde ).

Um LED é um componente electrónico que trabalha com pequenas diferenças de potencial e com correntes de fraca intensidade, tal como qualquer díodo. Regra geral, funciona com diferenças de potencial entre os seus terminais da ordem de 2 V e pode ser danificado se usado em circuitos com grande intensidade de corrente ( geralmente superior a 50 mA ). Por isso deve ser ligado em série com uma resistência, para limitar, assim, a intensidade da corrente no circuito.

O facto de os LEDs funcionarem com pequenas intensidades de corrente torna-os muito vantajosos para serem utilizados em circuitos electrónicos com correntes demasiado fracas para acenderem uma lâmpada de filamento.

### 3 VOLTÍMETRO

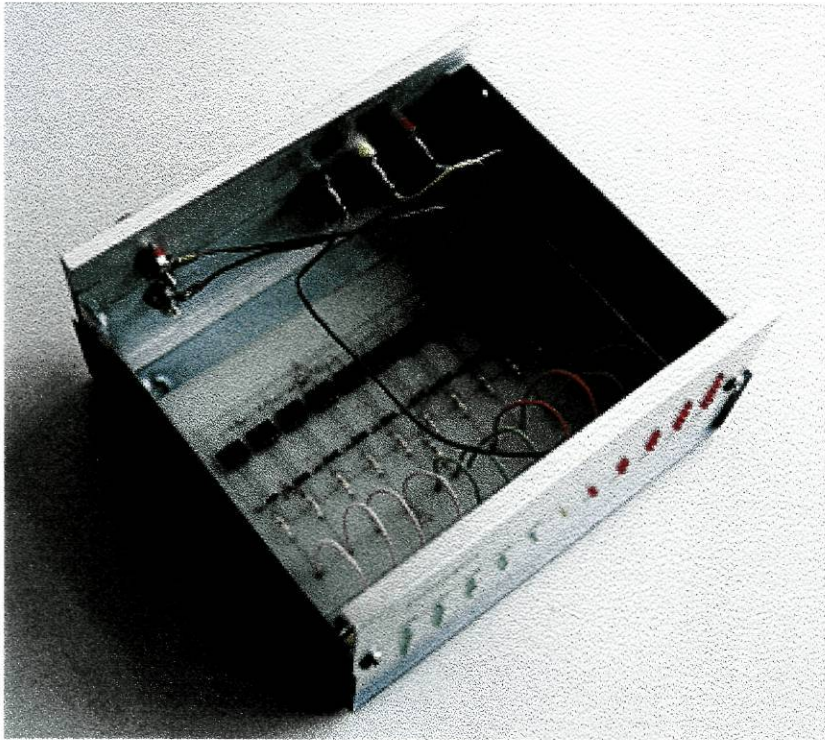


Figura 3.1 - Voltímetro

### 3.1 A construção do aparelho

- **Aspecto exterior**

Frente

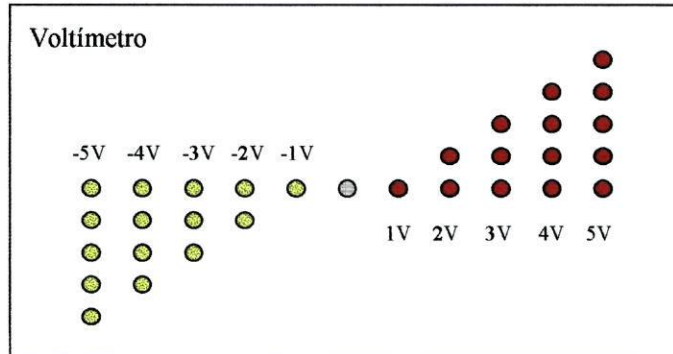


Figura 3.2

Trás

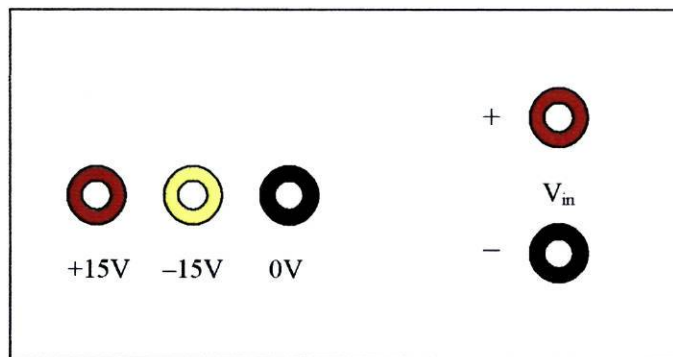


Figura 3.3

- **Listagem do material utilizado**

Identificação do material	Quantidade
Integrados 741	11
LEDs amarelos	1
LEDs vermelhos	15
LEDs verdes	15
Resistências 1 k $\Omega$ , tolerância 5%	11
Resistências 1 k $\Omega$ , tolerância 2%	8
Resistência 2 k $\Omega$ , tolerância 2%	1
Resistências 10 k $\Omega$ , tolerância 1%	2

Tabela 3.1

• Esquema do circuito

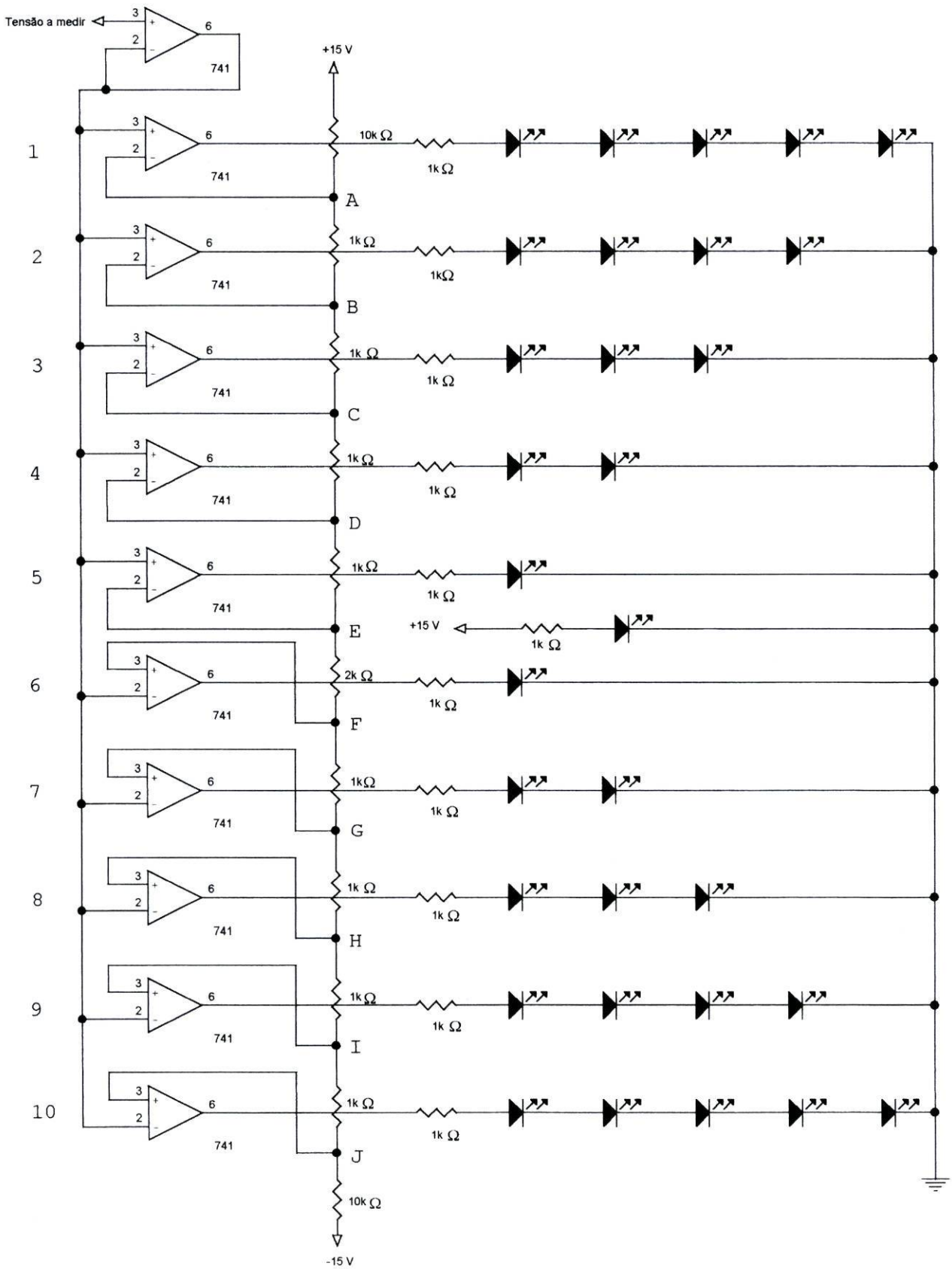


Figura 3.4

### 3.2 Funcionamento

Se olharmos para o esquema do circuito montado, Figura 3.3, começamos por verificar que ele é formado por um “buffer”, onde é introduzida, na entrada não inversora, a tensão a medir, ligado depois a dez integrados 741 a funcionarem como comparadores ( ver Apêndice A sobre *Funcionamento de um 741* ).

Seguindo o esquema, vemos que o sinal de saída do “buffer” é introduzido na entrada não inversora dos cinco primeiros comparadores ( 1 a 5 ) e na entrada inversora nos cinco últimos ( 6 a 10 ), por forma a que as tensões à saída de todos eles sejam positivas. As tensões de comparação são as existentes nos pontos de A a J de um divisor de tensão e facilmente verificamos que estas variam, por saltos de 1 V, entre 5 V e -5 V.

Consideremos, então e como síntese, a Tabela 3.2.

Comparador	Tensão de comparação
1	5 V
2	4 V
3	3 V
4	2 V
5	1 V
6	-1 V
7	-2 V
8	-3 V
9	-4 V
10	-5 V

Tabela 3.2

É de referir que não consegui que os valores das tensões de comparação fossem exactamente os mencionados na tabela anterior, o que se fica a dever ao facto de as resistências não terem exactamente os valores mencionados no esquema. Apesar de terem sido usadas resistências com tolerâncias de 1% e 2%, as pequenas flutuações no valor preciso dessas resistências implicam pequenas variações nos valores das tensões de comparação. Para termos valores mais próximos dos da tabela e eventualmente iguais, teríamos de usar resistências com uma tolerância ainda mais baixa.

Os valores efectivos das tensões de comparação são, no aparelho construído, os apresentados na Tabela 3.3.

Comparador	Tensão de comparação teórica	Tensão de comparação efectiva
1	5 V	5,01 V
2	4 V	4,00 V
3	3 V	2,99 V
4	2 V	1,98 V
5	1 V	0,98 V
6	-1 V	-1,05 V
7	-2 V	-2,07 V
8	-3 V	-3,09 V
9	-4 V	-4,10 V
10	-5 V	-5,11 V

Tabela 3.3

À saída de cada um dos comparadores estão ligados um ou mais LEDs, dependendo do comparador, LEDs esses que se acenderão se a tensão de saída for suficiente para isso.

Consideremos, por exemplo, o comparador 3. Enquanto a tensão a medir for inferior a 3 V ( a sua tensão de comparação ) a tensão à saída do comparador é nula e os LEDs não acendem. Se a tensão a medir subir acima dos 3 V, o comparador satura e os LEDs passam a acender. Os restantes comparadores têm comportamento análogo.

As resistências de 1 k $\Omega$  colocadas em série com os LEDs destinam-se apenas a protegê-los.

Ao projectar o dispositivo, decidi colocar, ligado à saída de cada comparador, um número de LEDs igual ao do módulo da tensão de comparação respectiva, como mostra a Tabela 3.4.

Comparador	Tensão de comparação	Número de LEDs
1	5 V	5
2	4 V	4
3	3 V	3
4	2 V	2
5	1 V	1
6	-1 V	1
7	-2 V	2
8	-3 V	3
9	-4 V	4
10	-5 V	5

Tabela 3.4

Para distinguir as tensões positivas das negativas, os LEDs associados às tensões positivas são vermelhos e foram montados “para cima” e os restantes são verdes e foram montados “para baixo”.

Vejam, então, o aspecto do voltímetro, para diferentes valores da tensão de entrada:

- tensão de entrada de 3 V

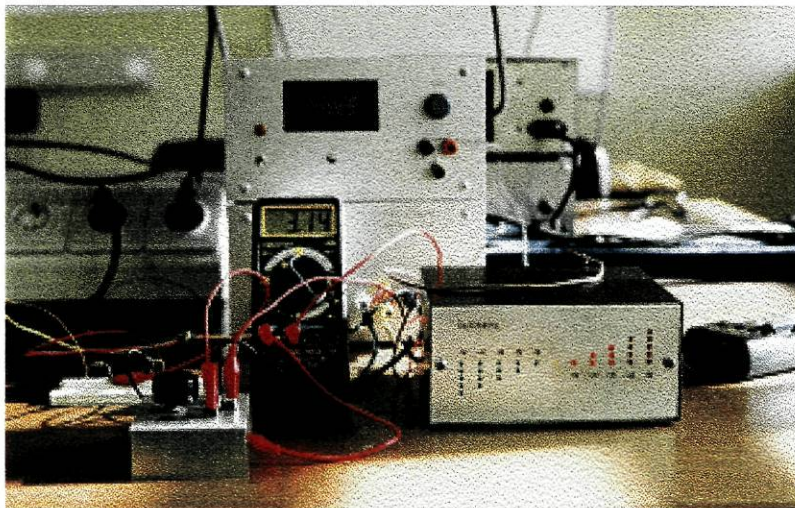


Figura 3.5

- tensão de entrada de 5 V

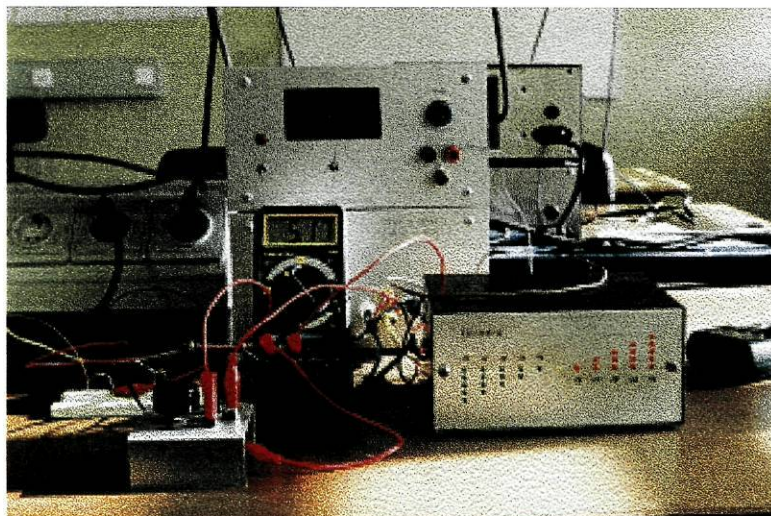


Figura 3.6

- tensão de entrada de -3 V

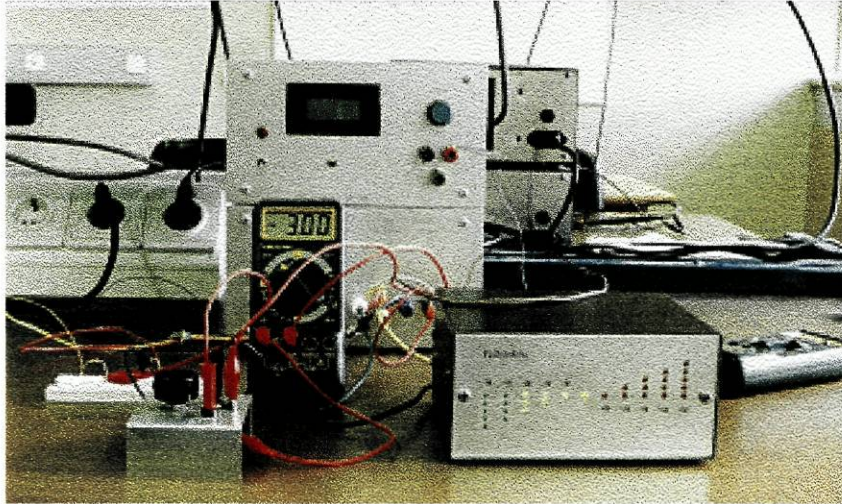


Figura 3.7

- tensão de entrada de -5 V

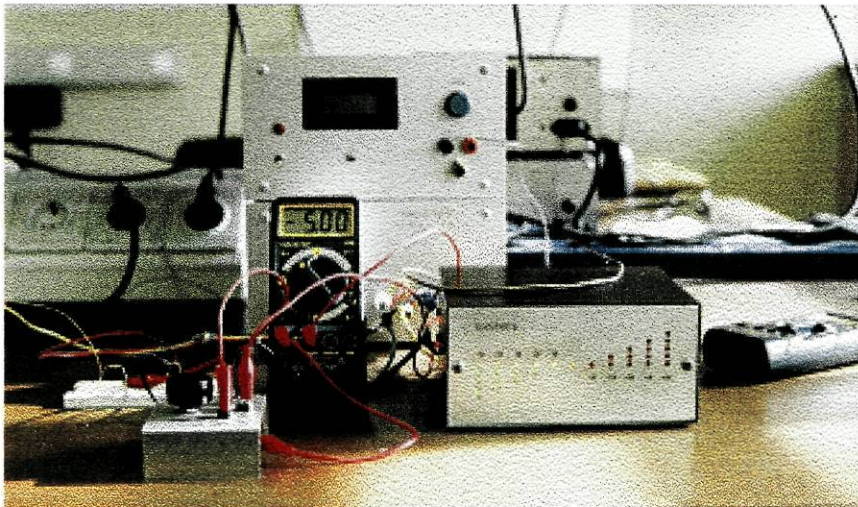


Figura 3.8

Repare-se, ainda, na existência de um LED amarelo que separa as duas secções de LEDs. Este destina-se apenas a indicar que o aparelho está a funcionar e está permanentemente ligado durante esse funcionamento. Obviamente que será, também, o único LED aceso quando a tensão de entrada for de 0 V ( ver Figura 3.9 ).

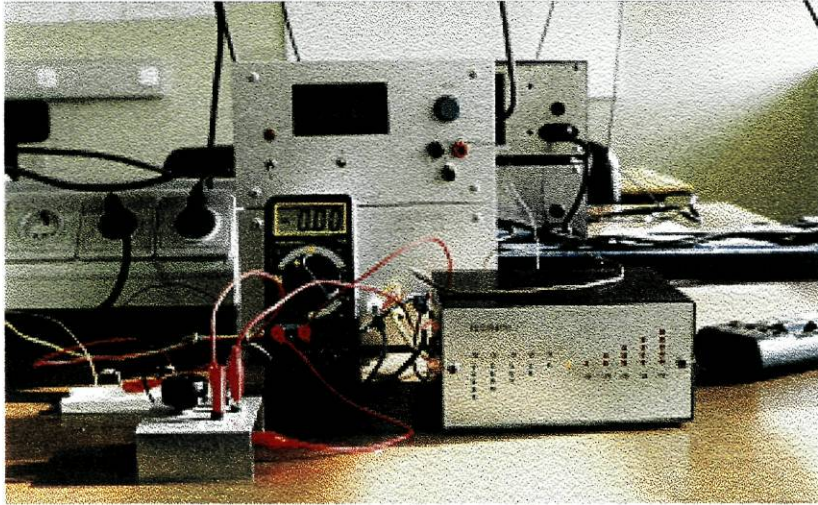


Figura 3.9 – Tensão de entrada nula.

### 3.3 Aplicações

Este dispositivo poderá ser utilizado no 8º Ano do Ensino Básico, no âmbito da Unidade de *Produção, Distribuição e Utilização da Electricidade*. Uma vez que se trata de um aparelho pouco rigoroso, deverá apenas ser utilizado em experiências simples, nas quais se dê mais importância à análise qualitativa e não tenham como objectivo primordial a medição de diferenças de potencial.

Assim, são sugeridas de seguida algumas aplicações que poderão ter lugar em ambiente de aula.

- Verificar a relação entre a intensidade da corrente e a diferença de potencial nos terminais de uma resistência constante

Consideremos o circuito representado na Figura 3.10, onde uma pilha de 4,5 V alimenta uma lâmpada em série com uma resistência variável. O nosso voltímetro mede a diferença de potencial entre os terminais da lâmpada.

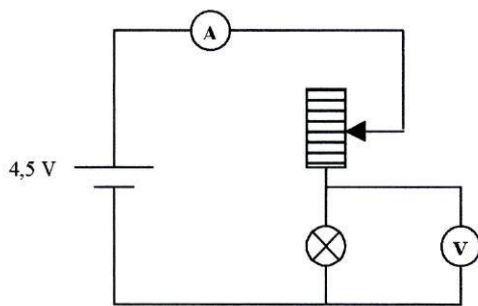


Figura 3.10

Se, actuando no cursor, aumentarmos a resistência introduzida, a intensidade da corrente que percorre o circuito diminui, diminuindo também a luminosidade da lâmpada. Simultaneamente, os alunos poderão verificar que o número de luzes acesas no voltímetro vai diminuindo, mostrando que, à medida que a intensidade da corrente que percorre a lâmpada diminui, diminui também a diferença de potencial nos seus terminais.

Inversamente, se diminuirmos a resistência variável, a intensidade da corrente que percorre a lâmpada aumenta, aumentando também a diferença de potencial nos seus terminais e o número de LEDs acesos no voltímetro.

- Utilizar o voltímetro como detector de zero

Este voltímetro tem também a possibilidade de funcionar como detector de zero, uma vez que possibilita a leitura de tensões positivas ou negativas. Assim, se estiver ligado de determinada maneira acendem os LEDs de um dos lados e se se inverterm as ligações passam a acender os LEDs do lado oposto.

Por outro lado e no caso de estar ligado a uma fonte de tensão bipolar, não será necessário inverter as ligações quando se passa de uma tensão positiva para uma negativa ou vice-versa. Isto é especialmente importante, uma vez que, na maior parte dos casos, os alunos danificam os voltímetros analógicos devido a uma ligação incorrecta dos mesmos.

- Estudar circuitos série e circuitos paralelo

Consideremos os dois circuitos representados na Figura 3.11, que representam uma associação de três lâmpadas iguais, em série e em paralelo.

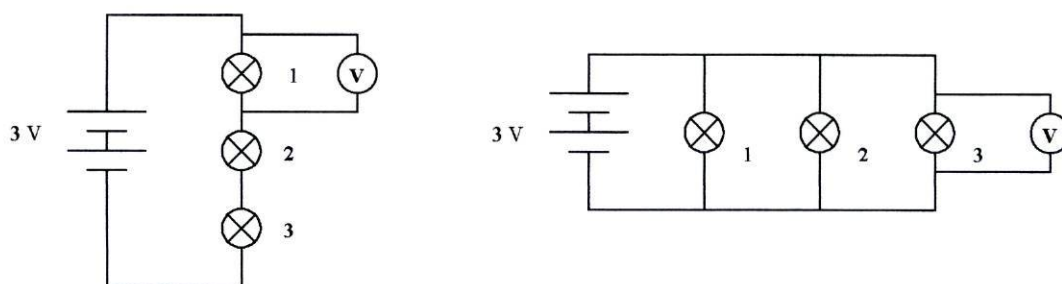


Figura 3.11

Se os alunos medirem, em cada uma das situações, a diferença de potencial nos terminais de cada uma das lâmpadas 1, 2 e 3 e a diferença de potencial nos terminais

da associação, poderão tirar conclusões quanto à relação entre essas grandezas numa associação série e numa associação paralelo.

Numa associação em série chegarão à conclusão de que a diferença de potencial nos terminais da associação é igual à soma das diferenças de potencial nos terminais de cada uma, enquanto que na associação em paralelo a diferença de potencial nos terminais da associação é igual à diferença de potencial nos terminais de cada uma.

Claro está que, em vez de lâmpadas, poder-se-á utilizar outros resistores, embora ao nível do 8º Ano os alunos se sintam mais à vontade com as lâmpadas.

## 4 DETECTOR DE ZERO

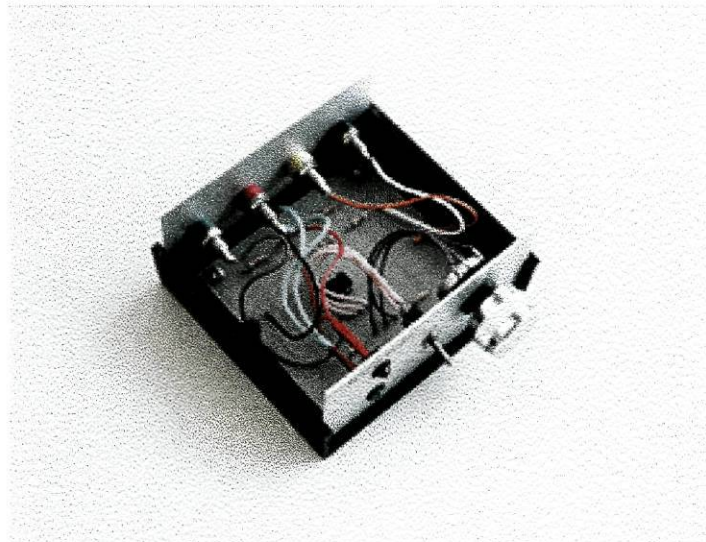


Figura 4.1 – Detector de zero

## 4.1 A construção do aparelho

- Aspecto exterior

### Frente

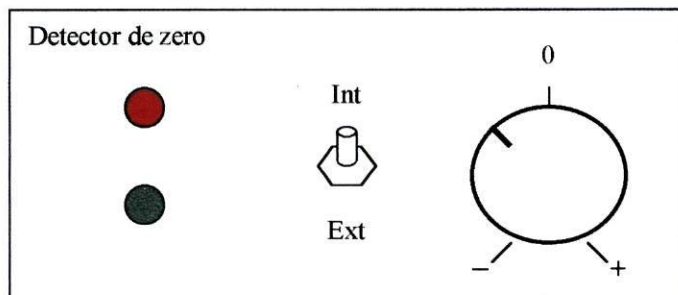


Figura 4.2

### Trás

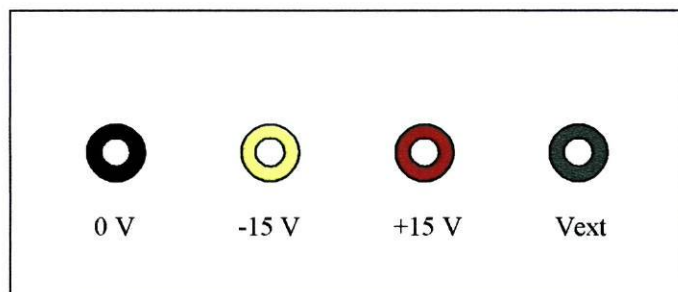


Figura 4.3

- Listagem do material utilizado

Identificação do material	Quantidade
Integrado 741	1
Potenciômetro de 10 k $\Omega$	1
Resistências de 10 k $\Omega$ , tolerância 5%	2
Resistências de 22 k $\Omega$ , tolerância 5%	2
Resistência de 33 k $\Omega$ , tolerância 5%	1
Resistências de 100 $\Omega$ , tolerância 5%	1
LED vermelho	1
LED verde	1

Tabela 4.1

• Esquema do circuito

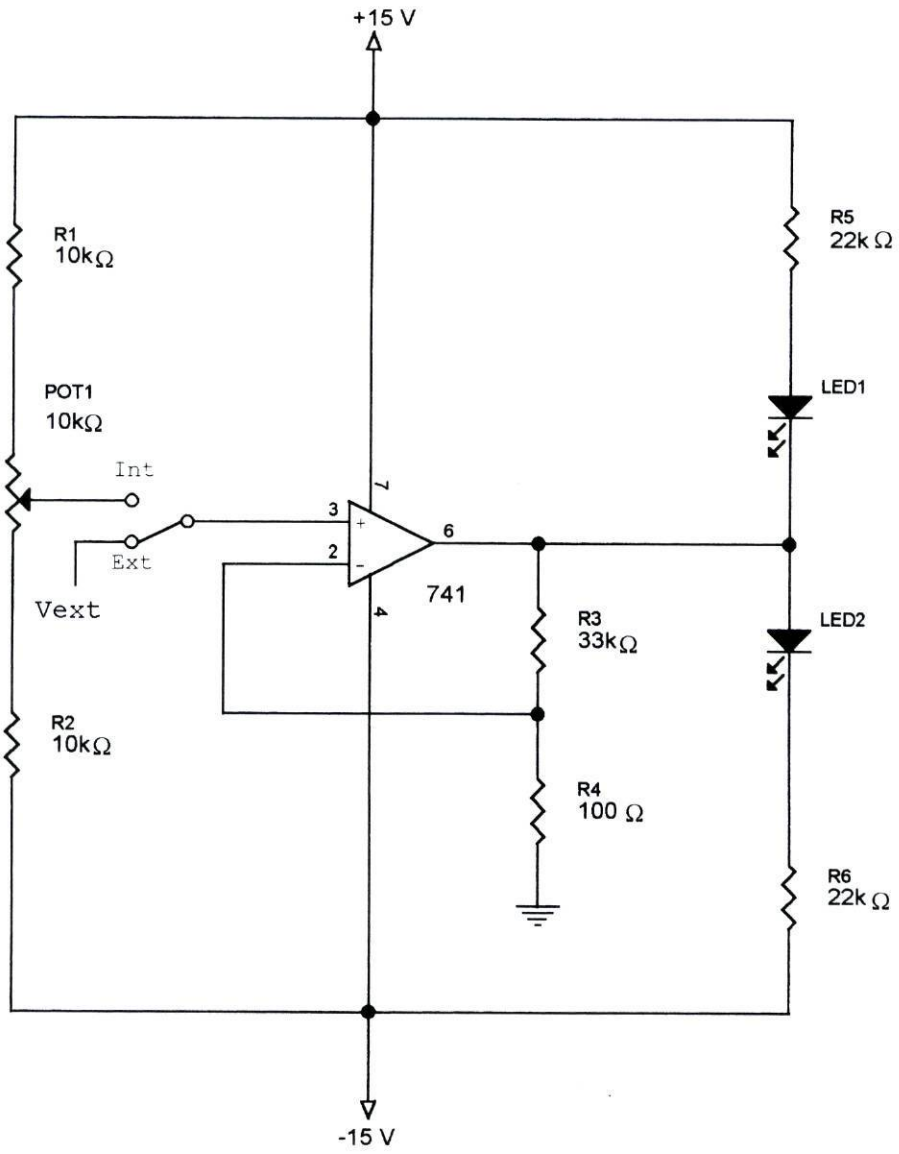


Figura 4.4

## 4.2 Funcionamento

O componente fundamental deste aparelho é um amplificador operacional 741, em montagem não inversora, a funcionar como detector de zero ( ver Apêndice A sobre *Funcionamento de um 741* ).

Se a tensão na entrada não inversora do 741, pino 3, for zero, a tensão à saída é também zero e ambos os LEDs acendem. Se a tensão na entrada for positiva, o amplificador satura em + 15 V e apenas o LED 2 ( verde ) acende. No caso contrário, se a tensão na entrada for negativa, o amplificador satura em - 15 V e apenas o LED 1 ( vermelho ) acende.

Este aparelho pode funcionar de duas maneiras: com o comutador na posição **Int** ( Interna ) ou com ele na posição **Ext** ( Externa ).

Na posição **Int**, a tensão de entrada é introduzida internamente, através da utilização de um divisor de tensão formado por duas resistências de 10 k $\Omega$  em série com um potenciômetro também de 10 k $\Omega$ . É a posição do cursor do potenciômetro que nós fazemos variar, quando rodamos o botão que se encontra na frente do aparelho.

Como os terminais dessa associação de duas resistências fixas e um potenciômetro estão sujeitos a uma diferença de potencial de 30 V, entre os terminais do potenciômetro teremos uma diferença de potencial de 10 V, o que significa que a tensão na entrada não inversora do amplificador pode variar entre - 5 V e + 5 V.

Esta posição do comutador destina-se a fazer uma demonstração do funcionamento do aparelho. Assim, com o botão numa posição entre 0 e + ( tensão positiva ), acende o LED verde ( Figura 4.5 ), se o botão estiver numa posição entre 0 e - ( tensão negativa ), acende o LED vermelho ( Figura 4.6 ).

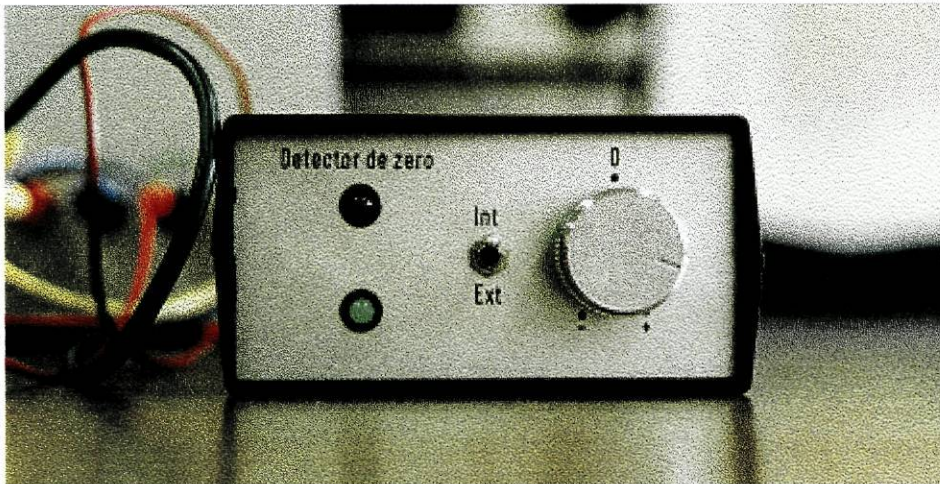


Figura 4.5  
Deteccção de uma tensão interna positiva: o LED verde acende.

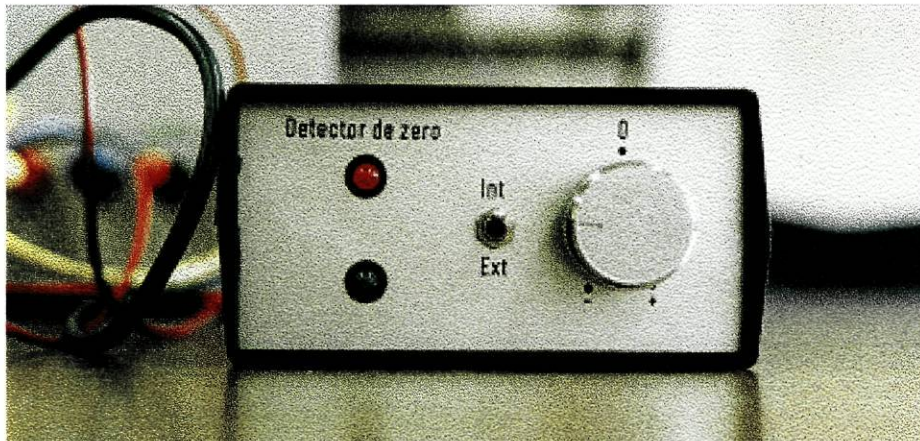


Figura 4.6  
Deteccção de uma tensão interna negativa: o LED vermelho acende.

Se mudarmos o comutador para a posição **Ext**, teremos agora de introduzir, na entrada assinalada  $V_{ext}$ , uma tensão. Para além disso, o funcionamento do detector de zero é exactamente o mesmo. Se a tensão externa for positiva, acende o LED verde, se ela for negativa acende o LED vermelho.

### 4.3 Aplicações

Como já verificámos, este aparelho pode ser utilizado sempre que se pretende identificar o sinal da tensão externa aplicada ou encontrar pontos de tensão nula.

Assim, se a tensão externa for positiva, acende o LED verde ( Figura 4.7 ), se ela for negativa, acende o LED vermelho ( Figura 4.8 ).

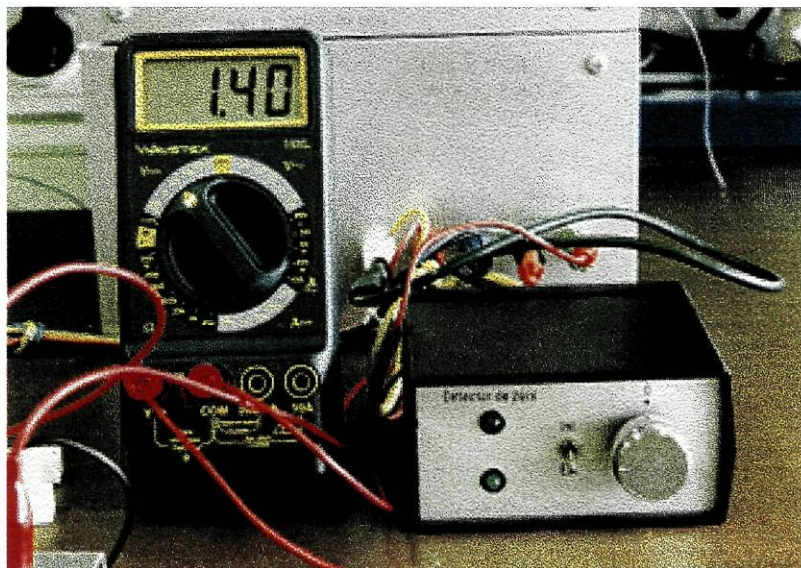


Figura 4.7  
Detecção de uma tensão externa positiva.

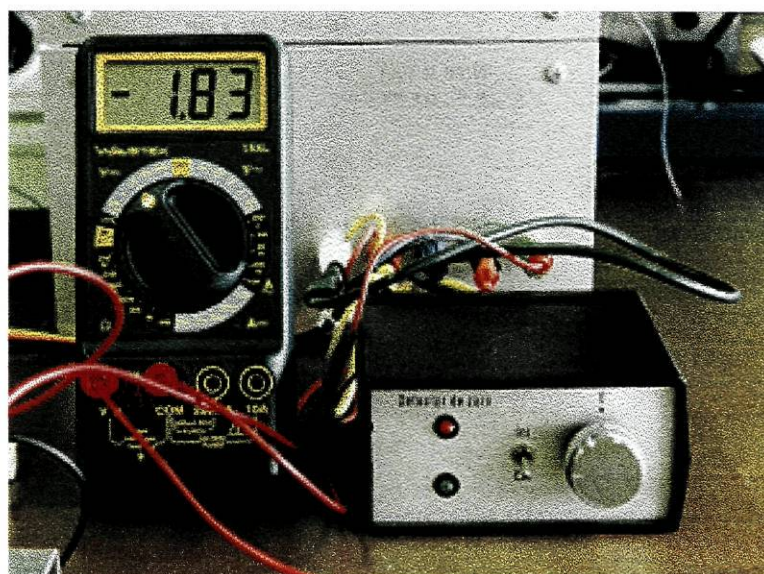


Figura 4.8  
Detecção de uma tensão externa negativa.

Este aparelho poderá, por exemplo, ser utilizado ao nível do 8º Ano, na Unidade de *Produção, Distribuição e Utilização da Electricidade*, para identificar a polaridade de uma bateria ou associação de baterias.

Poderá, também, ser utilizado ao nível do 10º Ano na Unidade de *Corrente Eléctrica* para verificar que as diferenças de potencial nos terminais de duas resistências iguais percorridas por correntes com a mesma intensidade têm o mesmo valor.

Por exemplo, consideremos o esquema de um circuito eléctrico apresentado na Figura 4.9, em que uma associação em série de duas resistências fixas,  $R_1$  e  $R_2$ , aparece ligada a uma fonte de tensão bipolar de, por exemplo, +15 V e -15 V.

Os alunos ao verificarem que a tensão no ponto P é nula, tirarão a conclusão de que a queda tensão que ocorre na resistência  $R_1$  é igual à que ocorre na resistência  $R_2$ .

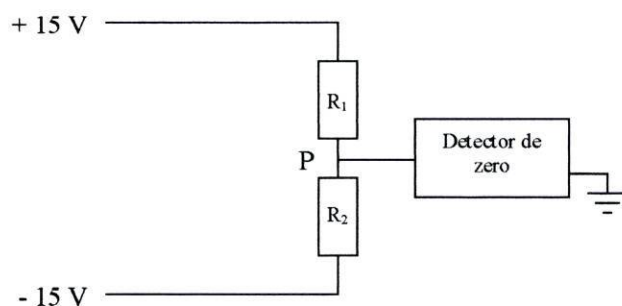


Figura 4.9

Em vez da fonte de tensão bipolar que por vezes não existe nas nossas escolas, poderão ser utilizadas duas pilhas iguais montadas de acordo com o esquema representado na Figura 4.10, em que temos a associação de resistências sujeita a uma diferença de potencial de 2V, sendo V a diferença de potencial nos terminais de cada pilha.

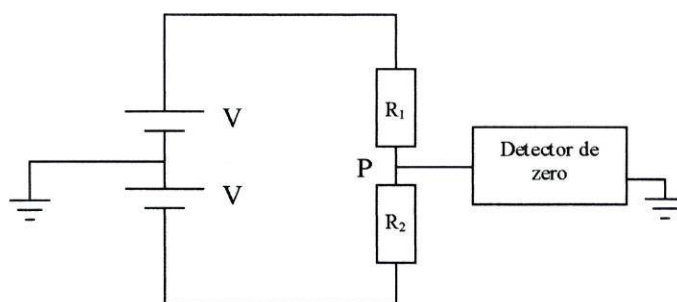


Figura 4.10

O mesmo poderá ser feito utilizando um reóstato e verificando que o ponto de tensão nula é aquele que se situa precisamente a meio, ou seja, quando temos resistências iguais de um lado e do outro do ponto onde se encontra o cursor e ao qual está ligado o detector de zero ( Figura 4.11 ).

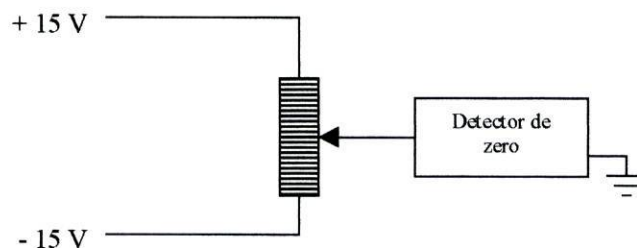


Figura 4.11

Outra aplicação do detector de zero é, por exemplo, a sua utilização na detecção de tensões induzidas em circuitos eléctricos por efeito magnético.

O estudo das correntes induzidas num condutor através da aproximação, ou afastamento, de um íman costuma ser feito com um amperímetro, um galvanómetro normalmente, verificando-se que, quando se aproxima ou afasta o íman, o amperímetro passa a indicar um determinado valor.

Nesta demonstração não se utilizam voltmíetros dado as diferenças de potencial serem, geralmente, muito baixas e não existirem voltmíetros de zero ao centro, à excepção dos multímetros digitais que ainda não abundam pelas nossas escolas.

Assim, poderíamos ligar o nosso detector de zero a um dos terminais da bobina ( com o outro terminal ligado ao zero da alimentação ) ( ver Figura 4.12 ) e detectar, ou não, com ele o estabelecimento de uma tensão nesse terminal.

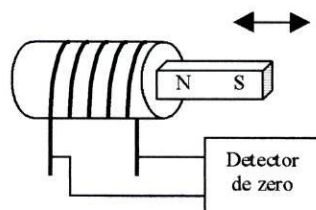


Figura 4.12

Podemos, também, utilizar o aparelho para introduzir a noção de corrente alternada, ligando-o a uma espira que se faz rodar entre os pólos diferentes de dois ímans ( Figura 4.13 ) e vendo os LEDs acenderem alternadamente.

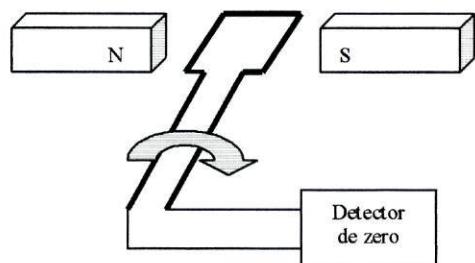


Figura 4.13

## 5 ESTROBOSCÓPIO

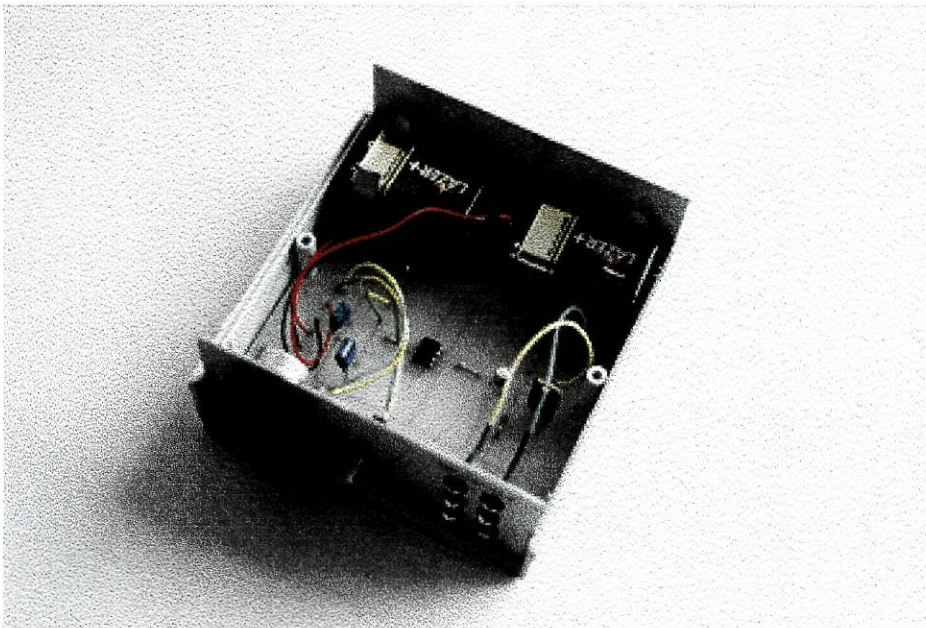


Figura 5.1 – Estroboscópio

## 5.1 A construção do aparelho

- Aspecto exterior

Frente

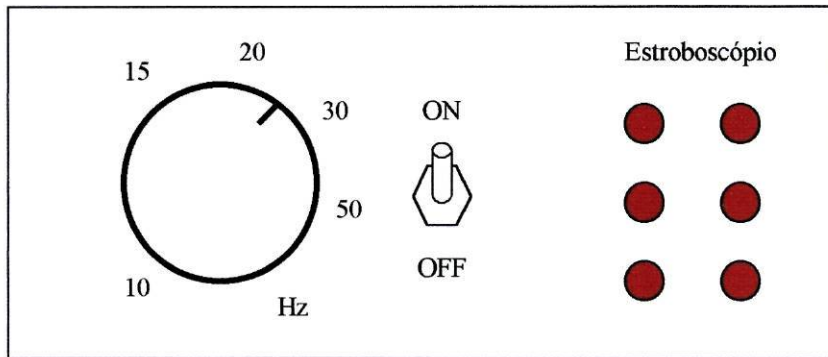


Figura 5.2

- Listagem do material utilizado

Identificação do material	Quantidade
Integrado 555	1
LEDs de alto brilho vermelhos	6
Comutador	1
Potenciômetro 1 M $\Omega$	1
Resistência 3,3 k $\Omega$ , tolerância 5%	1
Resistência 22 k $\Omega$ , tolerância 5%	1
Resistência 10 k $\Omega$ , tolerância 5%	1
Resistência 220 k $\Omega$ , tolerância 5%	1
Resistência 1 M $\Omega$ , tolerância 5%	1
Condensadores 0,1 $\mu$ F	2
MOSFET BUZ72A	1
Transistor 2N222	1

Tabela 5.1

• Esquema do circuito

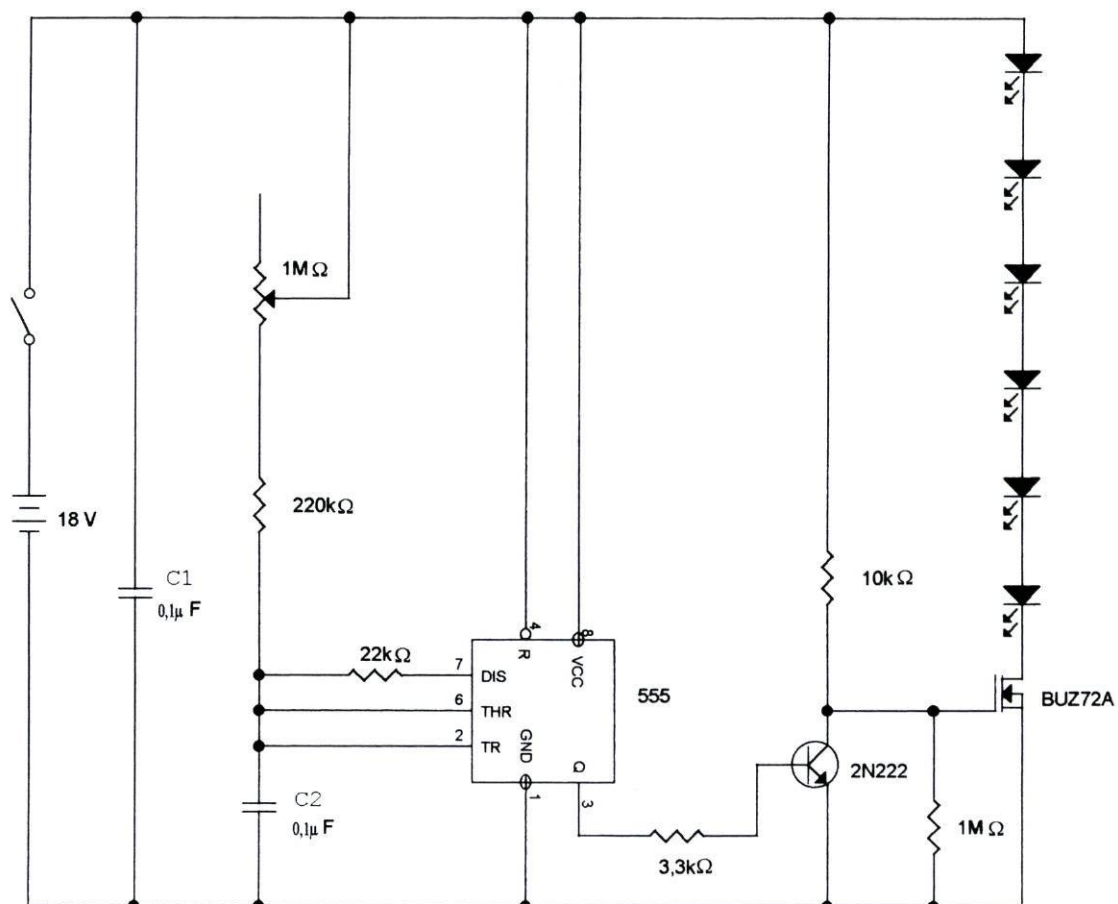


Figura 5.3

## 5.2 Funcionamento

O circuito utiliza, como fonte de energia, duas pilhas de 9 V em série. Ligado em paralelo com estas pilhas encontra-se um condensador, C1, de 0,1  $\mu\text{F}$  que se carrega entre cada piscar dos LEDs, prolongando a vida das baterias.

À fonte de energia estão ligados um integrado 555 que produz impulsos periódicos ( ver Apêndice A sobre *Funcionamento de um 555* ), um transistor 2N222 que inverte a polaridade dos impulsos e um MOSFET que usa estes fracos impulsos para controlar a corrente necessária para acender os seis LEDs de alto brilho ( ver Apêndice A sobre *Funcionamento de um MOSFET* ).

Quando se liga o estroboscópio, há passagem de corrente através do potenciômetro de 1  $\text{M}\Omega$  e da resistência de 220  $\text{k}\Omega$ , carregando o condensador C2, de 0,1  $\mu\text{F}$ .

O período do estroboscópio está relacionado com o tempo de carga do condensador, tempo esse que é estabelecido pelo valor da resistência total de carga e pela capacidade do condensador (  $\tau = R.C$ , se o condensador carregar até aos 18 V da fonte ), podendo, portanto, ser variado por ajuste do potenciômetro.

No caso do aparelho construído, a resistência total poderá variar entre um valor mínimo de 220  $\text{k}\Omega$  e um valor máximo de 1,220  $\text{M}\Omega$ . Isto significaria que a frequência com que os LEDs piscam poderia variar entre cerca de 8 Hz e cerca de 45 Hz, de acordo com os cálculos que a seguir se apresentam.

$$R_{\text{mínimo}} = 220\text{k}\Omega \Rightarrow \tau_{\text{mínimo}} = 220 \times 10^3 \times 0,1 \times 10^{-6} = 0,022\text{s}$$

$$\tau_{\text{mínimo}} = 0,022\text{s} \Rightarrow f_{\text{máximo}} = \frac{1}{\tau_{\text{mínimo}}} = \frac{1}{0,022} \cong 45\text{Hz}$$

$$R_{\text{máximo}} = 1,220\text{M}\Omega \Rightarrow \tau_{\text{máximo}} = 1,220 \times 10^6 \times 0,1 \times 10^{-6} = 0,122\text{s}$$

$$\tau_{\text{máximo}} = 0,122\text{s} \Rightarrow f_{\text{mínimo}} = \frac{1}{\tau_{\text{máximo}}} = \frac{1}{0,122} \cong 8\text{Hz}$$

No entanto e uma vez que o condensador vai apenas carregar até  $2/3$  dos 18 V da fonte ( ver Apêndice A sobre *Funcionamento de um 555* ), tanto o  $t_{\text{mínimo}}$  como o  $t_{\text{máximo}}$  vão ser menores do que os valores apresentados atrás, uma vez que o tempo de carga do condensador vai ser menor do que o dado pelo produto da resistência pela capacidade.

Sendo assim, as frequências mínima e máxima vão ser maiores do que os 8 Hz e 45 Hz calculados anteriormente, mais concretamente, este estroboscópio possibilita uma frequência máxima de pouco mais de 50 Hz e uma frequência mínima de pouco menos de 10 Hz.

Na construção do aparelho, determinei, com um frequencímetro, as posições do potenciômetro para as quais os valores da frequência eram de 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 30 Hz e 50 Hz, sendo portanto estes os valores para os quais é possível regular o estroboscópio ( Figura 5.4 ).

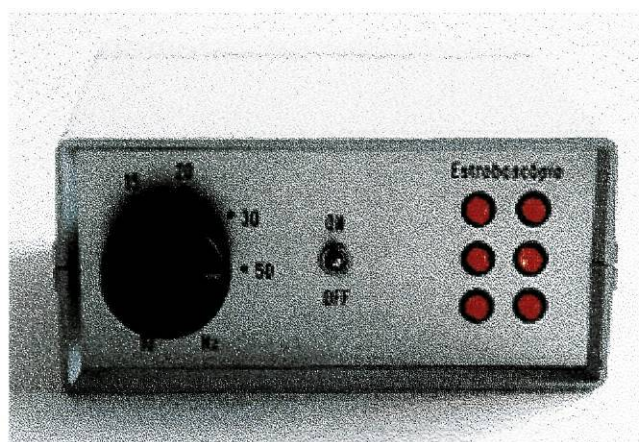


Figura 5.4 – Estroboscópio visto de frente.

Uma vez que o que realmente nos interessa é a frequência com que os LEDs piscam, tornou-se importante verificar se essa frequência coincidia ou não com a frequência dos impulsos eléctricos medida com o frequencímetro. Assim, foi medida a frequência com que os LEDs piscavam, utilizando um fotodíodo, tendo-se verificado que as duas são, realmente, iguais.

Enquanto o condensador carrega, a saída do pino 3 do 555 é positiva, o que faz com que o transistor 2N222 conduza. Uma vez que a resistência entre o emissor e o colector do 2N222 é baixa nesse caso, o colector encontra-se aproximadamente ao

mesmo potencial negativo da associação de pilhas, ou seja, uma entrada positiva na base do 2N222 produz uma saída negativa no seu colector. Como a *gate* do MOSFET está a uma tensão negativa, não há corrente entre a fonte e o dreno e os LEDs não acendem.

Depois de o condensador ter atingido dois terços da tensão fornecida pelas baterias, ele é rapidamente descarregado através da resistência de 22 k $\Omega$ , o que dá origem a uma tensão de aproximadamente 0 V no pino 3 do 555 e ao “disparo” do estroboscópio ( ver Apêndice A sobre *Funcionamento de um 555* ).

Uma vez que, quando à saída do 555 temos uma tensão nula, o transistor 2N222 não conduz, o potencial do seu colector aproxima-se do positivo da associação de pilhas e a *gate* do MOSFET fica sujeita a uma tensão positiva, passando a haver corrente entre a fonte e o dreno, o que provoca o acender dos LEDs.

A função do MOSFET é, portanto, a de, através da tensão aplicada na *gate*, controlar a corrente entre a fonte e o dreno. A resistência de 1 M $\Omega$  destina-se a proteger a *gate*, muito sensível a campos eléctricos.

Na construção deste estroboscópio foram utilizados seis LEDs de alto brilho, os quais foram ligados em série para evitar perdas de energia em resistências de protecção.

### 5.3 Aplicações

Este dispositivo é adequado para o estudo da cinemática no 9º Ano ( Unidade de *Transportes e Segurança* ), no 11º Ano e no 12º Ano ( Unidade de *Forças e Movimento* ), podendo ainda ser utilizado no âmbito da disciplina de Técnicas Laboratoriais de Física.

A utilização do estroboscópio requer ainda a utilização de uma câmara fotográfica com a possibilidade de controlar o tempo de exposição, de preferência montada sobre um tripé.

Para melhor entendermos o funcionamento do estroboscópio, consideremos um caso particular: o lançamento horizontal de um projectil, por exemplo.

Atendamos, então, ao esquema da Figura 5.5. Dispomos de uma esfera de aço que vai ser lançada horizontalmente utilizando, para tal, uma mola. O estroboscópio deve ser colocado por forma a convenientemente iluminar a esfera durante o seu movimento. Paralelamente ao plano no qual a esfera se vai movimentar, deverá ser colocada uma grelha para determinação da sua posição em cada instante.

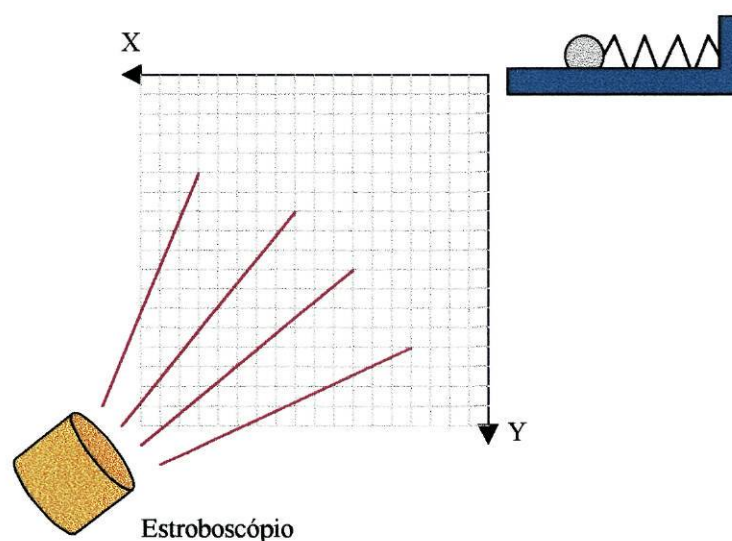


Figura 5.5

A câmara fotográfica deverá ser colocada por forma a captar toda a grelha, convenientemente focada e o tempo de exposição seleccionado de acordo com o tempo que a bola demorará a descrever a sua trajectória: por exemplo, um segundo.

Depois de ligar o estroboscópio e de apagar as luzes da sala ( esta deve estar às escuras ! ), podemos carregar no botão de disparo da máquina e largar a mola simultaneamente.

Ao revelar a fotografia, deverá encontrar-se algo idêntico ao que a Figura 5.6 documenta, dependendo o número de vezes que a esfera surge na fotografia da frequência seleccionada no estroboscópio.

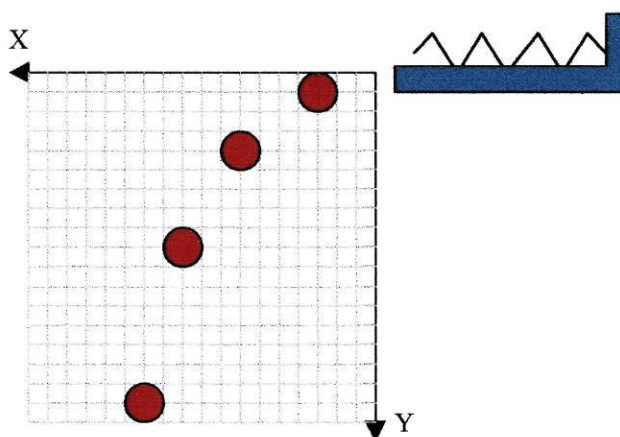


Figura 5.6

Para fazer a análise da fotografia, só temos de seleccionar uma origem para o sistema de eixos coordenados, por forma a determinarmos as coordenadas que definem cada posição da esfera.

Uma vez que conhecemos a frequência com que os LEDs do estroboscópio piscavam, sabemos também o tempo que separa cada posição da esfera, o que nos possibilita, portanto, construir uma tabela das coordenadas em função do tempo e prosseguir, a partir daí, com a análise dos dados.

O que foi dito para este caso particular é agora válido para qualquer outro tipo de movimento. Inclusive e se o estroboscópio for suficientemente pequeno, o dispositivo poderá ser acoplado ao próprio corpo em movimento, nomeadamente no caso do estudo da queda livre.

Para testar o funcionamento do estroboscópio optei por uma experiência muito simples: uma queda livre.

Para isso, construí, em cartolina branca, uma grelha formada por rectas paralelas, verticais e horizontais, espaçadas de cinco centímetros e coleí-a numa parede. O corpo que utilizei foi um disco de alumínio com, aproximadamente, 20 g de massa e 2 cm de diâmetro.

A câmara fotográfica, com uma lente de 35-70 mm, PF 1:3,5-4.5, foi colocada, sobre um tripé, a cerca de um metro da grelha. O tempo de disparo foi controlado manualmente, desde o momento em que o corpo era largado até atingir o solo.

Foram utilizados vários tipos de filme fotográfico, bem como vários tipos de iluminação, só se tendo obtido resultados satisfatórios com um rolo de 3200 ASA a preto e branco (a preto e branco porque é bastante mais barato e serve perfeitamente ).

As Figuras 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 mostram quatro das fotografias obtidas, tendo as das Figuras 5.7 e 5.8 sido tiradas com o estroboscópio a funcionar a 50 Hz e as das Figuras 5.9 e 5.10 com ele a funcionar a 30 Hz. A fotografia da Figura 5.7 foi, ainda, tirada com alguma ( muito pouca ! ) luz exterior, daí o motivo pelo qual se encontra mais clara e com menos posições do corpo identificáveis.

Se olharmos para as Figuras 5.7 e 5.8, dá a sensação de que faltam pontos e faltam realmente. Este estroboscópio peca pelo facto da luz emitida pelos LEDs ser muito direccionada, o que leva a que o corpo só seja iluminado convenientemente no momento em que passa precisamente à frente do grupo de LEDs. Nas Figuras 5.9 e 5.10 tiramos a mesma conclusão ao verificar que, das três posições ocupadas pelo corpo que é possível detectar, só a central aparece bem visível.

Uma forma de conseguir solucionar este problema seria a de montar os LEDs numa superfície curva e não numa superfície plana como é o caso.

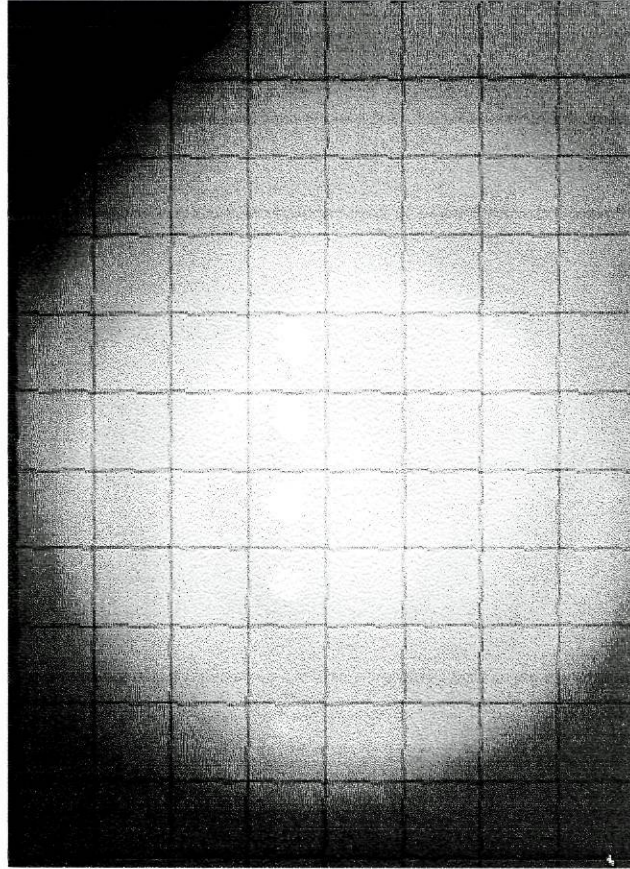


Figura 5.7  
Estroboscópio a 50 Hz.

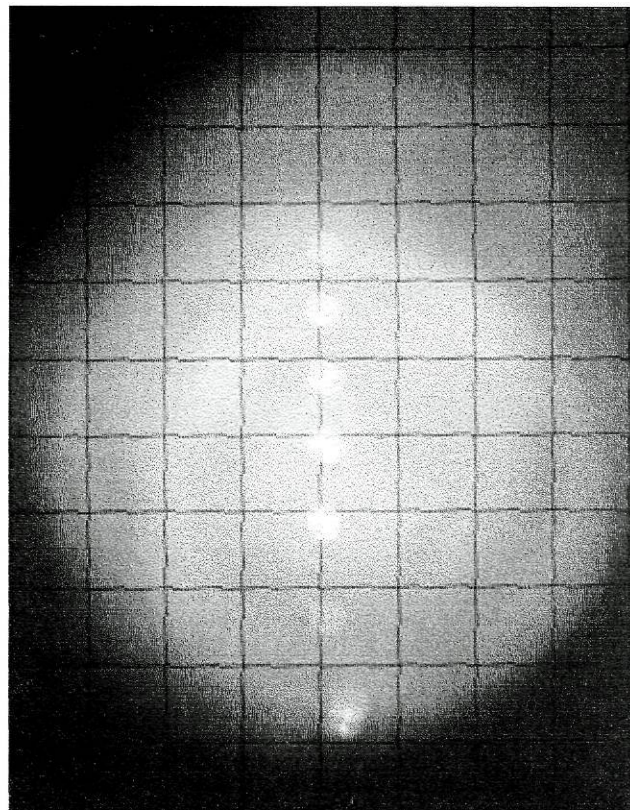


Figura 5.8  
Estroboscópio a 50 Hz.

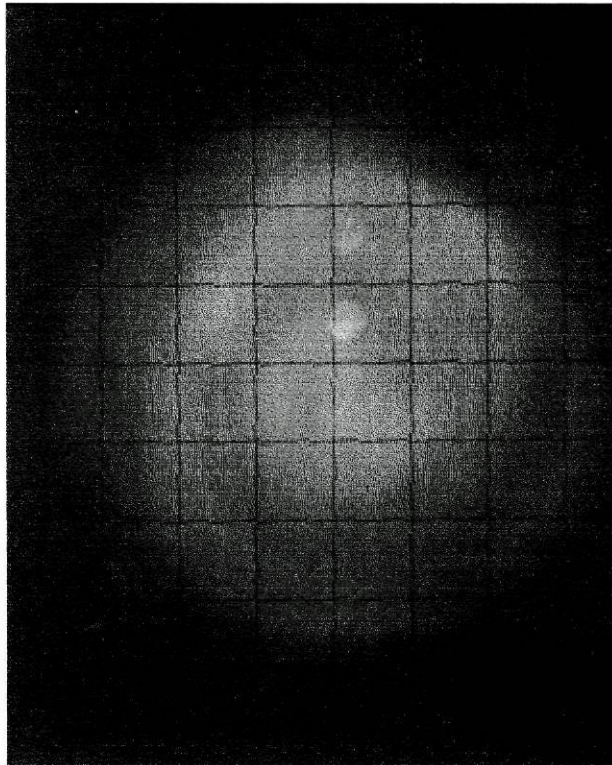


Figura 5.9  
Estroboscópio a 30 Hz.

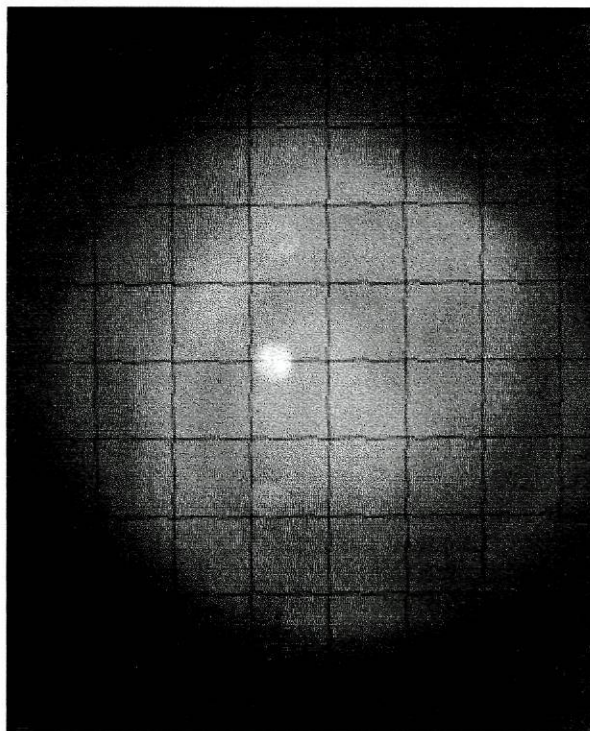


Figura 5.10  
Estroboscópio a 30 Hz.

Nas Figuras 5.7 e 5.8 a última posição ocupada pelo corpo parece não ter muito a ver com as restantes e eu suspeito que essa posição deva ter sido ocupada no ressalto, depois do corpo ter batido no solo. É provável que, ao saltar, ele tenha rodado, ficando numa posição em que melhor reflectia a luz incidente. Aliás, repare-se que essa última imagem nem sequer está alinhada com as restantes.

Com qualquer uma destas imagens podemos, agora, determinar, por exemplo, um valor aproximado da aceleração da gravidade. Para isso, vou realizar alguns cálculos que não pretendem ser muito rigorosos, servindo apenas para verificar que o dispositivo realmente funciona.

Consideremos a Figura 5.11 que esquematiza o que temos na Figura 5.10.

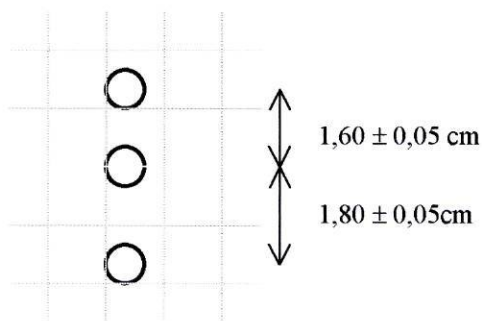


Figura 5.11

Atendendo a que uma divisão na fotografia corresponde a cinco centímetros no papel, os espaços percorridos pelo corpo serão de

$$\Delta y_1 = 1,6 \times 5,0 = 8,0 \text{ cm}$$

$$\Delta y_1 = 0,080 \pm 0,002 \text{ m}$$

$$\Delta y_2 = 1,8 \times 5,0 = 9,0 \text{ cm}$$

$$\Delta y_2 = 0,090 \pm 0,002 \text{ m}$$

Repare-se que o erro considerado na medição dos deslocamentos foi o de metade da menor divisão da escala da régua: 0,05 cm, ou seja, 0,0005 m.

Uma vez que a frequência do estroboscópio era de 30 Hz, o tempo que separa cada uma das posições é o inverso e, portanto, aproximadamente 0,033 s. Sendo assim,

podemos calcular as velocidades médias  $v_{m1}$  e  $v_{m2}$ , nos deslocamentos  $\Delta y_1$  e  $\Delta y_2$ , respectivamente.

$$v_{m1} = \frac{\Delta y_1}{\Delta t} = \frac{0,080}{0,033} \cong 2,4 \text{ m/s}$$

$$v_{m2} = \frac{\Delta y_2}{\Delta t} = \frac{0,090}{0,033} \cong 2,7 \text{ m/s}$$

Cujos erros serão de

$$\delta v_{m1} = v_{m1} \left( \frac{\delta \Delta y_1}{\Delta y_1} + \frac{\delta \tau}{\tau} \right) = 2,4 \left( \frac{0,002}{0,080} + 0,02 \right) = 0,1 \text{ m/s}$$

$$\delta v_{m2} = v_{m2} \left( \frac{\delta \Delta y_2}{\Delta y_2} + \frac{\delta \tau}{\tau} \right) = 2,7 \left( \frac{0,002}{0,090} + 0,02 \right) = 0,1 \text{ m/s}$$

se considerarmos o erro associado à frequência do estroboscópio não superior a 2% ( 1 Hz em 50 Hz ).

Com estes valores das velocidades médias podemos, agora, calcular a aceleração média.

Assim,

$$a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{2,7 - 2,4}{0,033} = 9,1 \text{ m/s}^2$$

com um erro de

$$\delta a_m = a_m \left( \frac{\delta \Delta v}{\Delta v} + \frac{\delta \tau}{\tau} \right) = 9,1 \left( \frac{0,1}{0,3} + 0,02 \right) = 3,2 \text{ m/s}^2$$

Podemos, também, fazer o mesmo utilizando, por exemplo, o terceiro, o quarto e o quinto pontos da Figura 5.8. Para isso, consideremos a Figura 5.12 que os esquematiza.

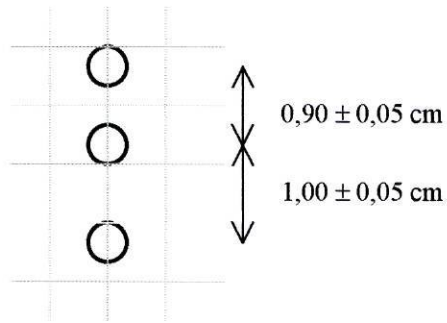


Figura 5.12

Os deslocamentos serão, agora, de

$$\Delta y_1 = 0,9 \times 5,0 = 4,5 \text{ cm}$$

$$\Delta y_1 = 0,045 \pm 0,002 \text{ m}$$

$$\Delta y_2 = 1,0 \times 5,0 = 5,0 \text{ cm}$$

$$\Delta y_2 = 0,050 \pm 0,002 \text{ m}$$

Como a frequência era de 50 Hz, o tempo que separa cada posição será, então, de 0,020 s, e as velocidades médias serão iguais a

$$v_{m1} = \frac{\Delta y_1}{\Delta t} = 2,25 \pm 0,1 \text{ m/s}$$

$$v_{m2} = \frac{\Delta y_2}{\Delta t} = 2,5 \pm 0,1 \text{ m/s}$$

o que dará uma aceleração média de

$$a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t} = 12,5 \pm 5,2 \text{ m/s}^2$$

Ambos os valores são bastante satisfatórios, até porque é muito fácil cometer erros e ser pouco preciso quando se fazem medições de comprimentos tão pequenos como

estes e em que cada centésima de centímetro a mais ou a menos pode dar origem a uma grande diferença no resultado final.

Para além disso, os erros de que vêm afectados os valores das acelerações médias são justificáveis face ao elevado número de cálculos que se tiveram de realizar, cálculos esses que levam, obviamente, a uma multiplicação do erro.

Posteriormente voltei a realizar a experiência, introduzindo-lhe algumas alterações. Assim, utilizei uma máquina diferente com uma lente de 50 mm, PF 1:2, capaz de receber mais luz, e uma grelha preta com riscas brancas. O objectivo era o de verificar se, nestas condições, o corpo seria mais visível. Os objectos largados foram o disco de alumínio já utilizado e uma esfera, também de alumínio, com cerca de um centímetro de diâmetro.

As Figuras 5.13 e 5.14 representam duas das fotografias obtidas: a 5.13 relativa à queda do disco e a 5.14 relativa à queda da esfera. Para ambas, o estroboscópio encontrava-se a funcionar a 50 Hz e, portanto, o tempo que separa cada posição ocupada pelo corpo é de 0,020 s.

Também neste caso, uma divisão na fotografia corresponde a 5 cm no papel.

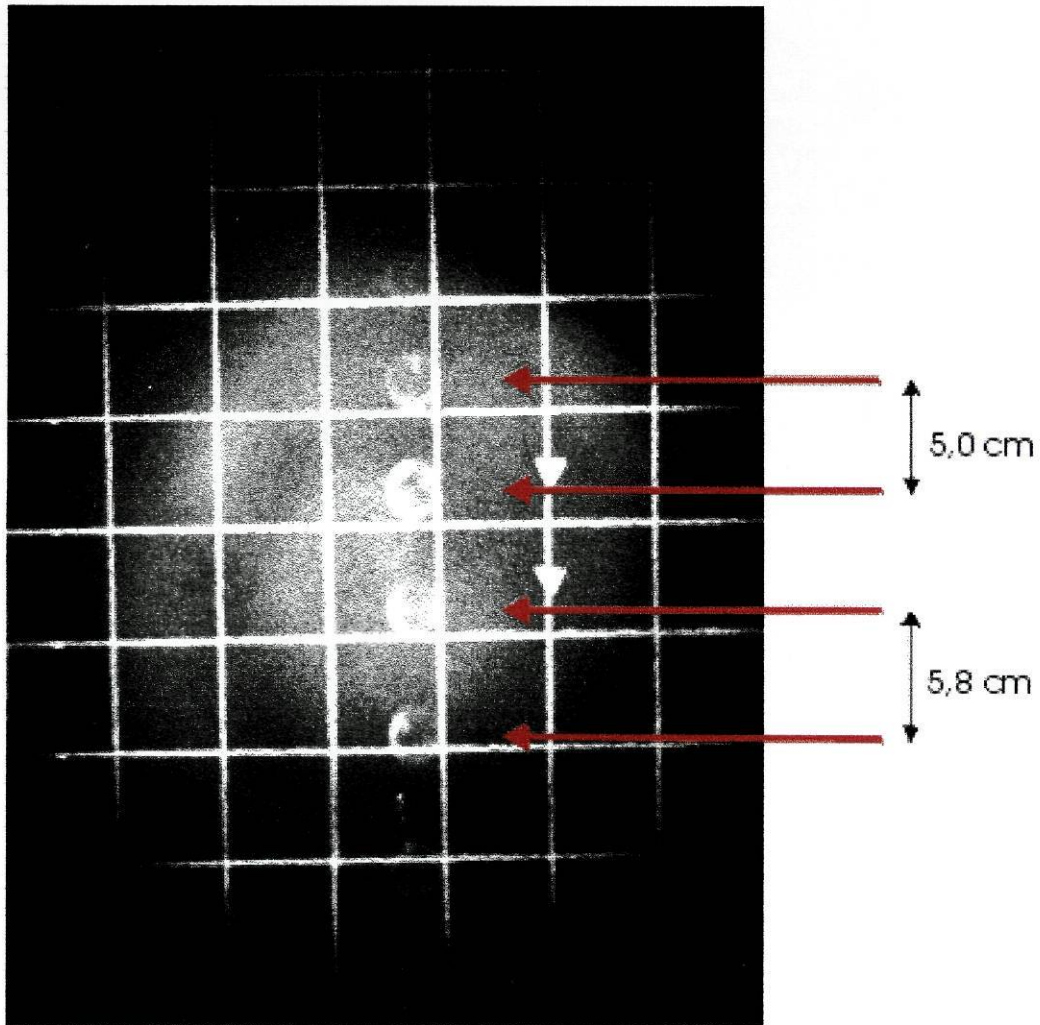


Figura 5.13  
Estroboscópio a 50 Hz.

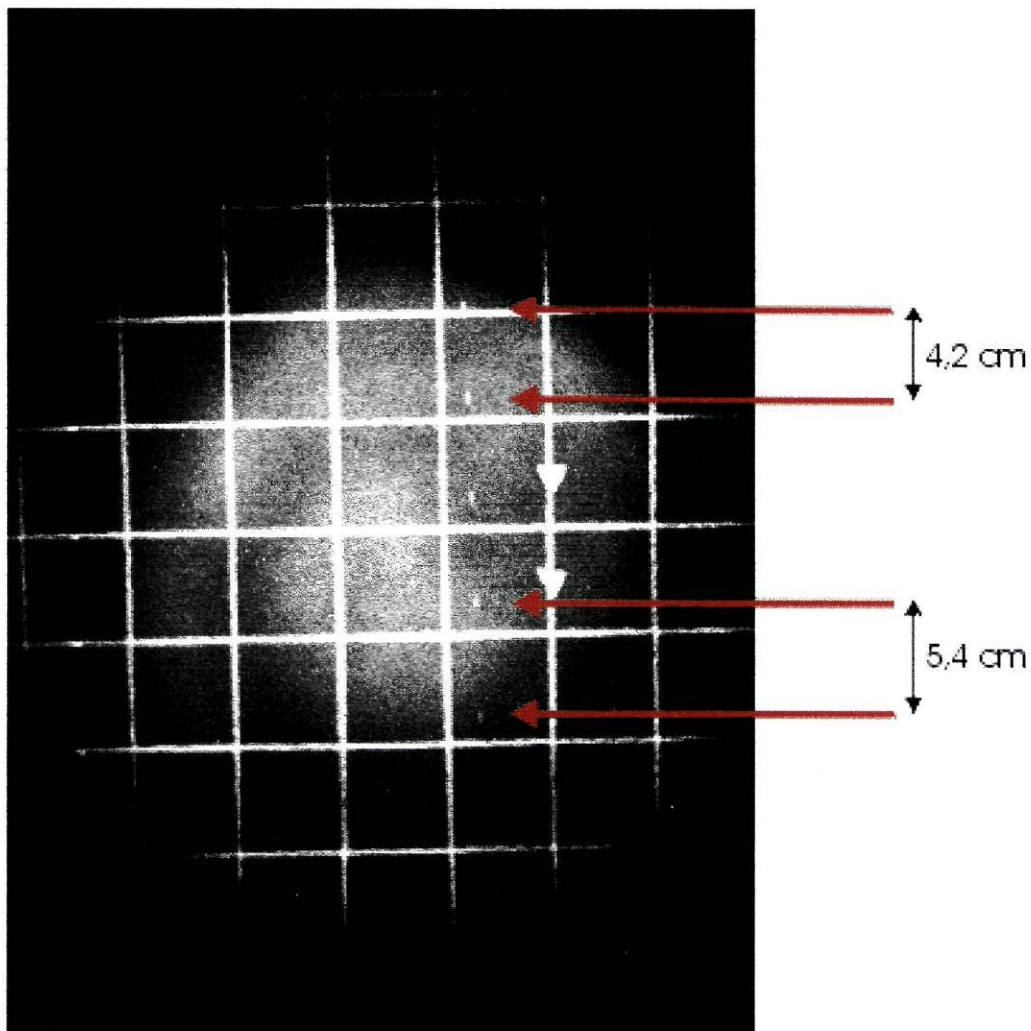


Figura 5.14  
Estroboscópio a 50 Hz.

Com os dados relativos a estas duas situações, podemos, novamente, determinar a aceleração da gravidade.

DISCO ( Fotografia 5.13 )

$$\Delta y_1 = 0,050 \pm 0,002m$$

$$\Delta y_2 = 0,058 \pm 0,002m$$

$$v_{m1} = \frac{\Delta y_1}{\Delta t} = 2,5 \pm 0,1m/s$$

$$v_{m2} = \frac{\Delta y_2}{\Delta t} = 2,9 \pm 0,1m/s$$

$$a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t} = 10,0 \pm 2,7 m/s^2$$

ESFERA ( Fotografia 5.14 )

$$\Delta y_1 = 0,042 \pm 0,002 m$$

$$\Delta y_2 = 0,054 \pm 0,002 m$$

$$v_{m1} = \frac{\Delta y_1}{\Delta t} = 2,1 \pm 0,1 m/s$$

$$v_{m2} = \frac{\Delta y_2}{\Delta t} = 2,7 \pm 0,1 m/s$$

$$a_m = \frac{\Delta v}{\Delta t} = 10,0 \pm 1,9 m/s^2$$

Como podemos verificar, os resultados são plenamente satisfatórios, ficando comprovada a eficácia do dispositivo construído.

## 6 ELECTRÓMETRO

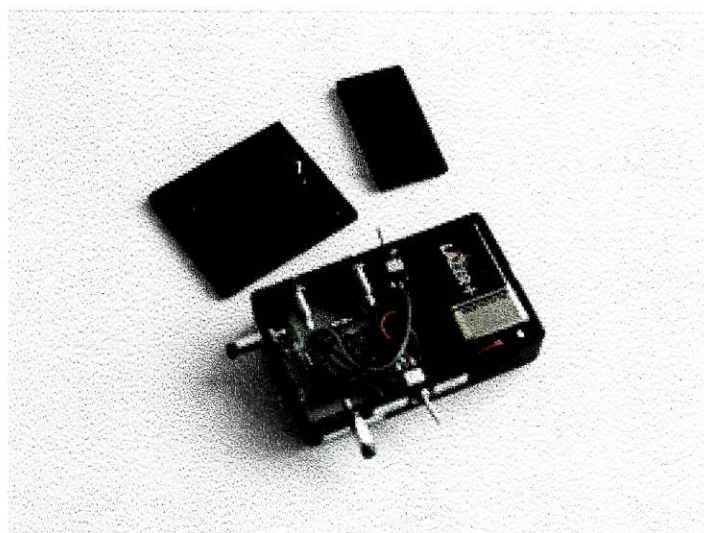


Figura 6.1 - Electrómetro

## 6.1 A construção do aparelho

### • Aspecto exterior

#### Frente

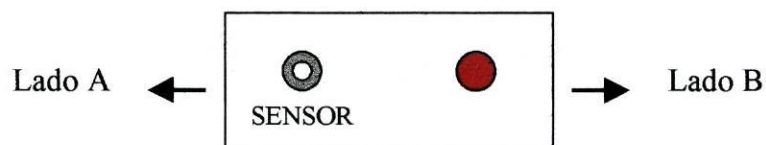


Figura 6.2

#### Lado A

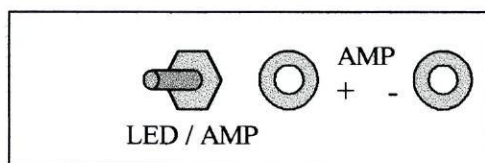


Figura 6.3

#### Lado B

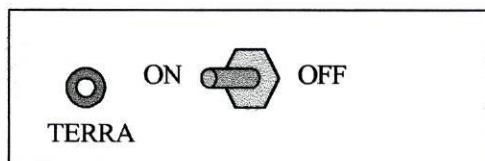


Figura 6.4

### • Listagem do material utilizado

Identificação do material	Quantidade
VMOS Power FET VN10KM	1
Resistência 10 M $\Omega$ , tolerância 10 %	1
Resistência 330 $\Omega$ , tolerância 5 %	1
Resistência 33 $\Omega$ , tolerância 5 %	1
LED de alto brilho vermelho	1
Comutadores	2

Tabela 6.1

• Esquema do circuito

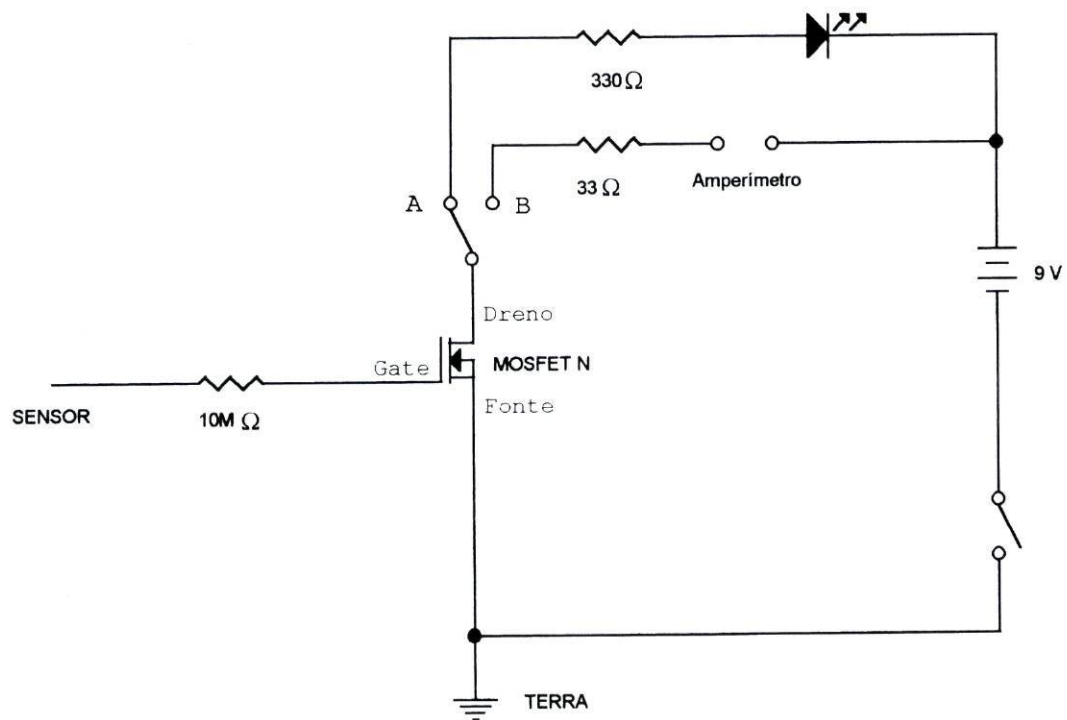


Figura 6.5

## 6.2 Funcionamento

O electrómetro, cuja construção se descreve, pretende substituir os antiquados electroscópios de folhas metálicas e, ao contrário destes, apresenta uma elevada robustez e uma utilização mais vasta. Para além destas vantagens, acrescente-se o facto de ser mais económico, bastante mais sensível e de responder de forma diferente a objectos carregados positivamente ou negativamente.

Este aparelho pode ser utilizado de duas formas, consoante a posição do comutador indicado no esquema seja A ou B: na posição A, é o brilhar do LED que nos vai detectar a presença de objectos electricamente carregados, na posição B, essa detecção é feita ligando um amperímetro aos terminais a ele destinados.

Para além, então, de ser possível, com este aparelho, detectar corpos carregados positiva ou negativamente, poderemos também ter uma ideia da “quantidade” de carga nesse corpo através da intensidade da corrente medida no amperímetro. É este o motivo pelo qual o aparelho tem o nome de electrómetro e não electroscópio.

A peça fundamental deste electrómetro é um transistor, um VMOS Power FET ( *Vertical Metal Oxide Semiconductor Power Field-Effect Transistor* ) VN10KM. Uma explicação sucinta do funcionamento de um MOSFET é apresentada no Apêndice A.

A função da resistência de  $10\text{ M}\Omega$  ligada à *gate* é a de limitar a intensidade das correntes de carga e descarga, com vista a não danificar o MOSFET e, de forma semelhante, a resistência de  $330\ \Omega$  destina-se a limitar a corrente que atravessa o LED. Quanto à resistência de  $33\ \Omega$  ligada em série com os terminais para ligação do amperímetro, esta deve-se ao facto de que, para o MOSFET utilizado, só para correntes superiores a  $120\text{ mA}$  é que a relação entre a tensão na *gate* e a corrente no dreno é aproximadamente linear.

Assim, com o comutador na posição A, o brilho do LED reflete a maior ou menor intensidade da corrente através do circuito dreno-fonte, enquanto que, se ele estiver na posição B, podemos medir essa corrente directamente, com um amperímetro.

O MOSFET utilizado possui, como parte integrante, um diodo de Zener. Um diodo de Zener é uma junção p-n que é dopada por forma a permitir a passagem de corrente no sentido inverso, depois de uma determinada tensão ter sido atingida. O diodo está ligado entre a *gate* e a fonte e, quando a tal tensão limite é atingida ( cerca de 15 V, mas varia de caso para caso ), há deslocamento de carga entre a *gate* e a fonte, limitando assim a tensão na *gate* e protegendo a camada de óxido.

Quando se aproxima um objecto carregado positivamente do sensor ( ver Figuras 6.6 e 6.7 ), passa a haver condução entre a fonte e o dreno e o LED acende ( o amperímetro passa a indicar um determinado valor ). Se a tensão não ultrapassar a tensão limite do diodo de Zener, não há corrente entre a *gate* e a fonte. Neste caso, quando o objecto é removido, o MOSFET deixa de conduzir e o LED apaga-se ( o amperímetro volta a indicar o valor zero ).



Figura 6.6  
Barra de vidro carregada positivamente.

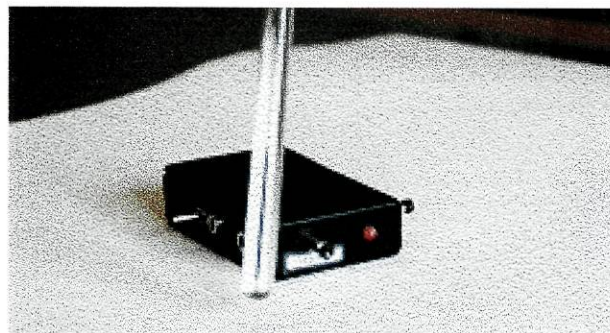


Figura 6.7  
Aproximação de uma barra de vidro carregada positivamente: o LED acende.

Se se aproximar uma carga positiva suficientemente elevada que provoque uma tensão na *gate* superior à tensão limite do diodo de Zener, o diodo irá conduzir, possibilitando a passagem de cargas da *gate* para a fonte. Neste caso e quando se

retira o objecto, o LED continua aceso ( o amperímetro não volta a zero ), uma vez que, como o balanço de cargas na *gate* foi alterado, permanece uma tensão capaz de “ligar” o MOSFET.

Quando se aproxima do sensor um objecto carregado negativamente, são repelidos electrões para a *gate*. Neste caso, quando a *gate* é negativa, o LED não acende ( o amperímetro não “lê” nenhum valor ), uma vez que é necessária uma carga positiva na *gate* para que o MOSFET conduza.

A carga negativa na *gate* faz com que o Zener conduza em sentido contrário. Assim, quando a carga negativa é removida da vizinhança do sensor ( ver Figuras 6.8 e 6.9 ), a *gate* torna-se positiva e assim permanece, uma vez que lhe foram removidos electrões. Nesta situação o LED acende-se ( o amperímetro passa a indicar um determinado valor ), e apagar-se-á ( o amperímetro voltará a zero ) se se aproximar novamente a carga negativa do sensor.



Figura 6.8  
Barra de plástico carregada negativamente.



Figura 6.9  
Afastamento de uma barra de plástico carregada negativamente: o LED acende.

## CUIDADOS A TER

Quando se liga o electrómetro, o LED normalmente acende e permanece aceso. Este efeito deve-se à acumulação de cargas no sensor ligado à *gate*, durante o período em que o electrómetro se encontrava desligado. Neste caso é necessário remover essa carga tocando, simultaneamente, no SENSOR e na TERRA. Este procedimento deve ser repetido sempre que o LED permaneça aceso e não responda à presença de objectos carregados.

A intensidade com que o LED brilha é proporcional à carga do objecto aproximado, da mesma forma que a intensidade da corrente medida no amperímetro como mostram as Figuras 6.10, 6.11 e 6.12, para a barra de vidro carregada positivamente e as Figuras 6.13 e 6.14 para a barra de plástico carregada negativamente. À medida que se vai aproximando um objecto carregado positivamente, a intensidade com que o LED brilha vai aumentando, até um ponto em que o LED passa a brilhar independentemente da posição do objecto, na altura em que a *gate* atinge a tensão limite do díodo de Zener do MOSFET. Neste caso é necessário repetir o procedimento atrás descrito, ligando, com os dedos, o SENSOR à TERRA.

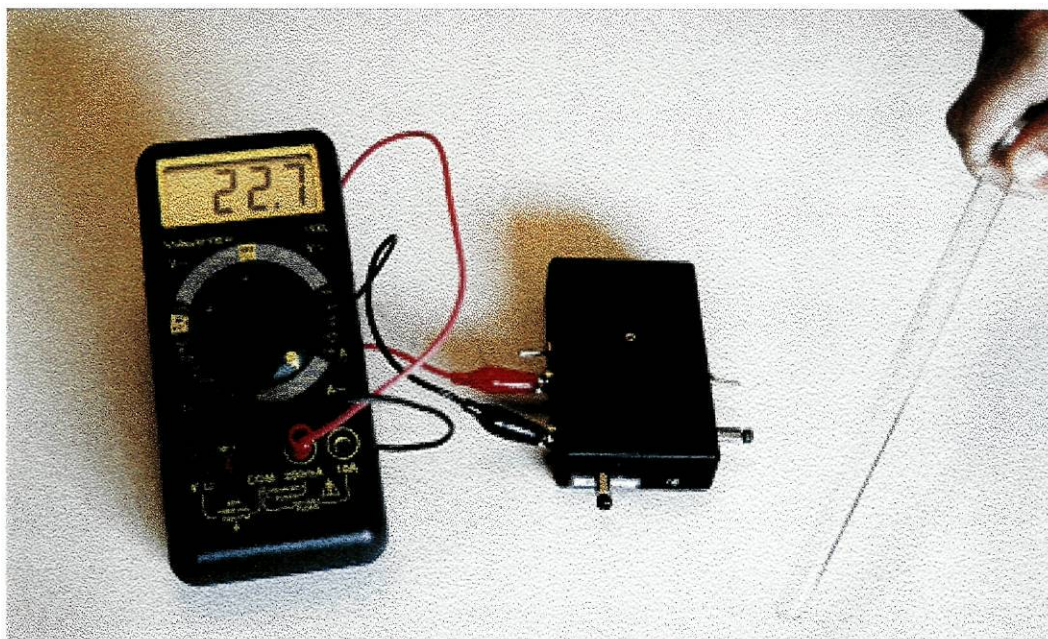


Figura 6.10  
Aproximação de uma barra de vidro carregada positivamente.

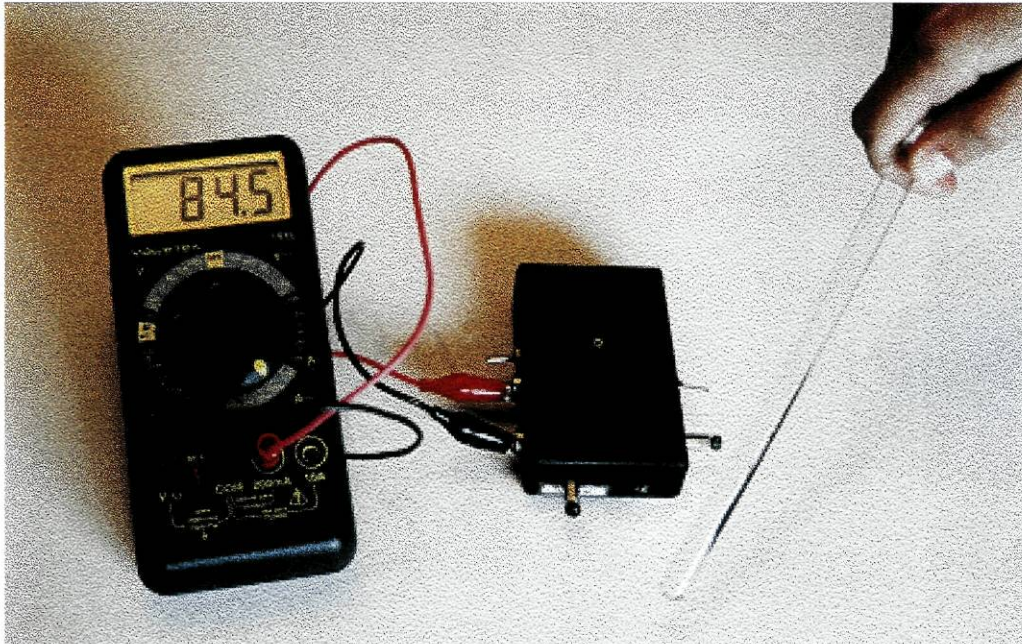


Figura 6.11  
Aproximação de uma barra de vidro carregada positivamente: o valor indicado pelo amperímetro aumenta.

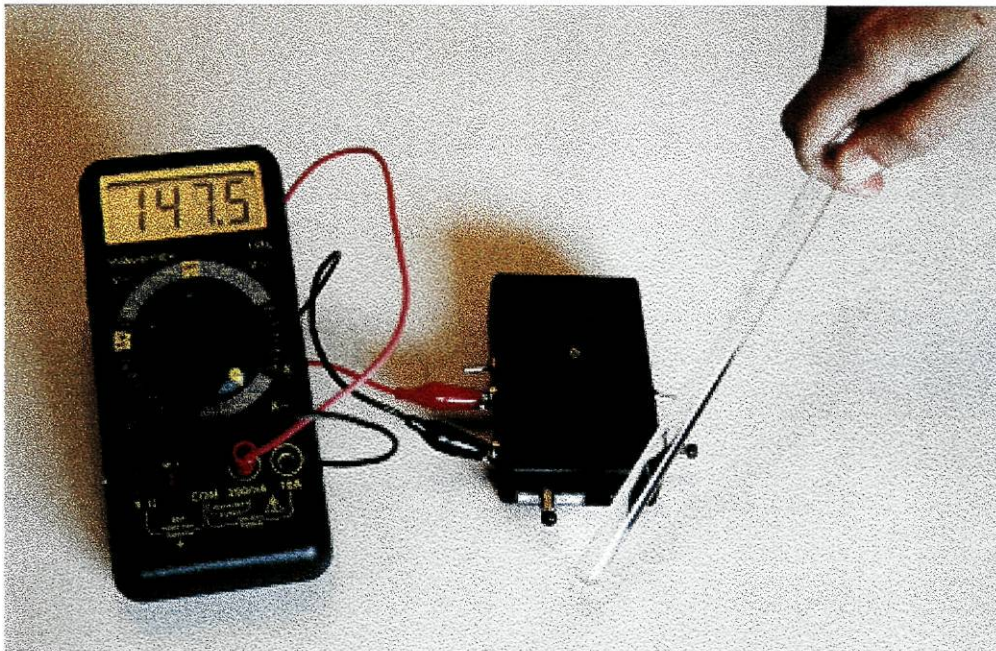


Figura 6.12  
Aproximação de uma barra de vidro carregada positivamente: o valor indicado pelo amperímetro aumenta ainda mais.

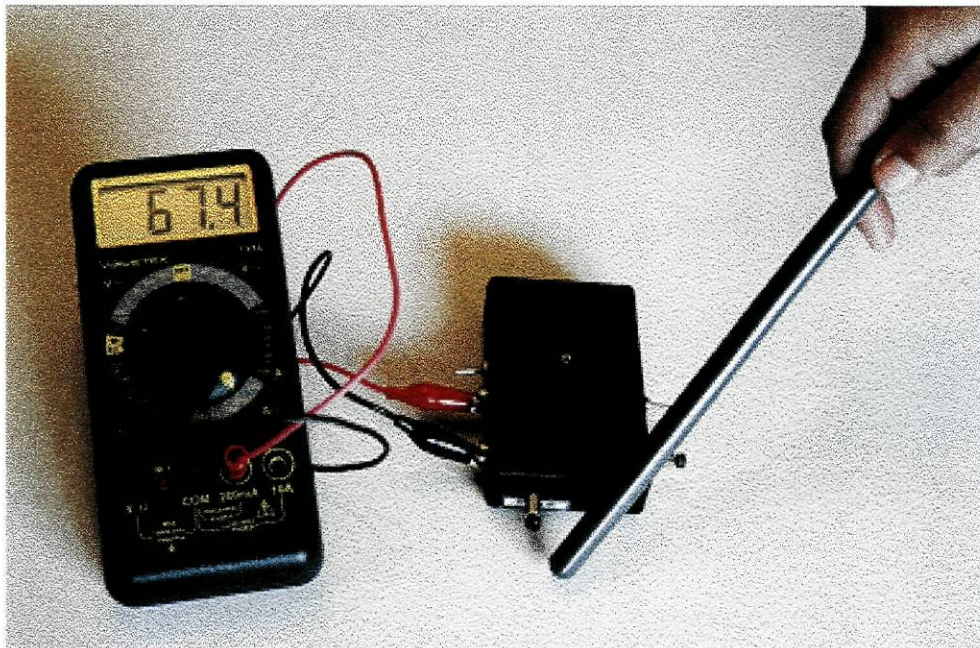


Figura 6.13  
Afastamento de uma barra de plástico carregada negativamente.

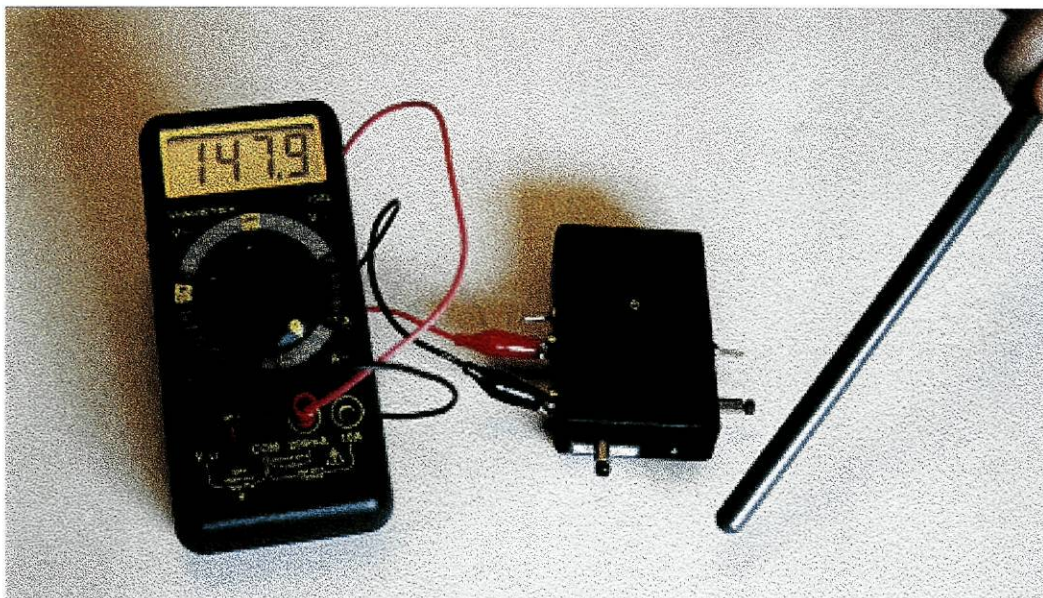


Figura 6.14  
Afastamento de uma barra de plástico carregada negativamente: o valor indicado pelo amperímetro aumenta.

### 6.3 Aplicações

Em dias secos, um corpo carregado positivamente colocado a meio metro de distância do sensor é suficiente para fazer com que o LED acenda. Dada a elevada sensibilidade do electrómetro, ele funcionará mesmo em dias húmidos, no entanto teremos de aproximar mais o corpo do sensor.

Como já foi dito, o LED também acende quando **se afasta** do sensor um corpo carregado negativamente. Esta diferença possibilita a verificação de que existem dois tipos de carga. Por exemplo, se uma barra de plástico for friccionada com um pano de lã, o electrómetro não só detectará a carga da barra como a carga oposta no pano de lã.

Outra demonstração curiosa poderá ser feita com um rolo de fita cola. Se se retirar uma pequena porção de fita cola de um rolo e a aproximarmos do sensor o LED acenderá, mostrando que esta se encontra eletrizada positivamente. Por outro lado, se aproximarmos o rolo de onde foi retirada a fita, o electrómetro indicará a presença de um corpo carregado negativamente.

Se eletrizarmos uma barra de plástico e a colocarmos num suporte suficientemente próximo do sensor, por forma a que o LED acenda, poderemos verificar variações no campo eléctrico. Para tal, basta que acenemos com a mão, próximo da barra ou do sensor, e verifiquemos que o brilho do LED varia. Alguns tipos de alarme anti-roubo utilizam este efeito.

Outra demonstração interessante consiste em verificar que é possível colocar cargas opostas em partes diferentes da mesma barra isoladora. Se friccionarmos uma extremidade de uma barra com um pano de lã e a outra com plástico, segurando a barra no meio, podemos depois testar cada uma das extremidades com o electrómetro e tirar conclusões.

Este electrómetro poderá, ainda, ser utilizado para detectar o campo eléctrico que rodeia uma televisão ou monitor de computador, como se mostra nas figuras 6.15, 6.16 e 6.17.



Figura 6.15  
Electrómetro colocado ao lado do televisor.



Figura 6.16  
Electrómetro colocado por cima do televisor.



Figura 6.17

Electrómetro colocado à frente do televisor: o valor indicado pelo amperímetro aumenta consideravelmente.

## BIBLIOGRAFIA

- **Kaufman, M., Wilson, J. A.**, *Eletrônica Básica*, McGraw-Hill, Brasil, 1984
- **Millman, J., Grabel, A.**, *Microelectronics*, McGraw-Hill, 2ª edição, 1987
- **Sedra, A., Smith, K.**, *Microelectronic Circuits*, CBS College Publishing, 2ª edição, 1987
- **Barros, M. A. R. P. de**, *Electronica*, FCUP, 1988
- **Gilder, Jules H.**, *110 IC Timer Projects for the Home Constructor*, Newnes Technical Books, 1979

## APÊNDICE A

( Funcionamento de alguns dos componentes utilizados )

## A.1 Funcionamento de um 741

- Princípios básicos

O 741 é um amplificador operacional: *amplificador* porque um determinado sinal de entrada surge amplificado à saída e *operacional* porque faz operações (multiplicações, por exemplo).

Os amplificadores operacionais são, normalmente, representados da forma que a Figura A.1 documenta,

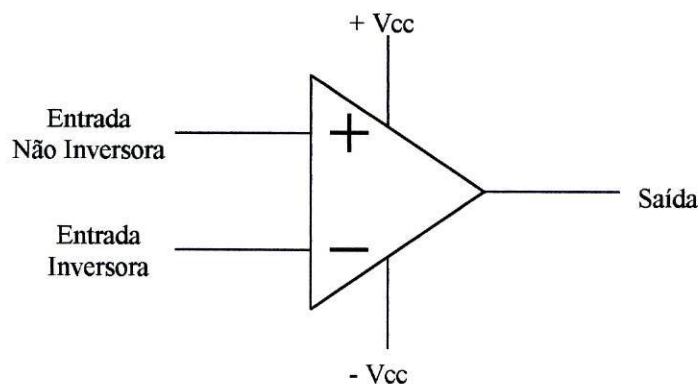


Figura A.1  
Esquema de um 741.

em que +Vcc e -Vcc representam as alimentações positiva e negativa, respectivamente.

O integrado 741 tem, na versão *minidip* ( a que foi utilizada ), oito pinos, de acordo com o esquema da Figura A.2.

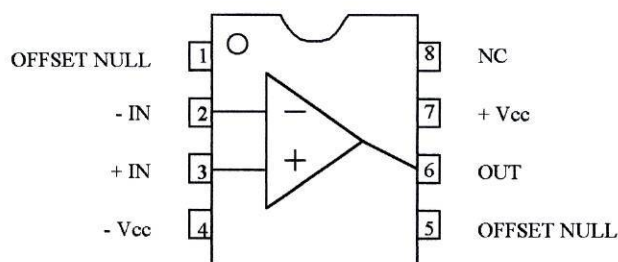


Figura A.2  
Pinagem de um 741.

No entanto, os cinco referidos na Figura A.1 são os necessários e suficientes para que o amplificador funcione. Foram, também, estes os únicos cinco pinos utilizados na construção dos dois aparelhos onde foram usados integrados 741: o voltímetro e o detector de zero.

A diferença entre a entrada não inversora e a inversora está em que um sinal aplicado à entrada inversora aparece invertido à saída, enquanto que, se o mesmo sinal for aplicado à entrada não inversora, aparece não invertido à saída.

A necessidade de existirem duas fontes de alimentação, uma positiva e outra negativa ( +Vcc e -Vcc ), reside no facto de podermos ter à saída excursões para um lado e para o outro do zero, simultaneamente. Apesar de, normalmente, estas tensões de alimentação serem de igual valor absoluto, como no nosso caso ( com valores de +15 V e -15 V ), não é obrigatório que assim seja.

Num amplificador operacional em malha aberta, ou seja, sem realimentação (*feedback*) ( Figuras A.3 e A.4 ), o ganho em tensão,  $G = \frac{V_{out}}{V_{in}}$ , é muito elevado, com um mínimo de 5000 e um valor típico de 200 000, para o 741.

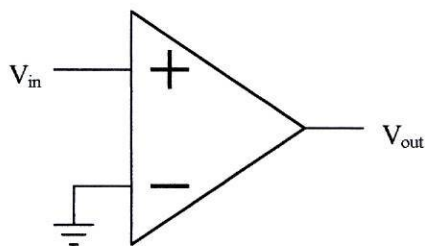


Figura A.3  
Amplificador operacional não  
inversor em malha aberta.

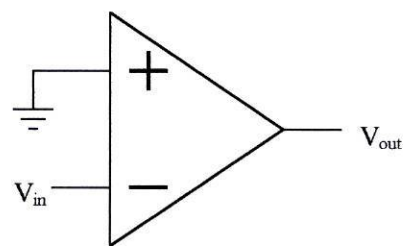


Figura A.4  
Amplificador operacional  
inversor em malha aberta.

No entanto, um ganho em tensão muito elevado não significa que se possa ter uma tensão muito elevada à saída.

Uma vez que a amplificação se faz à custa das fontes de alimentação, +Vcc e -Vcc, nunca poderemos ter à saída uma tensão superior a +Vcc ou inferior a -Vcc.

Assim, quando a tensão à saída atinge um desses valores, aí permanece, não aumentando mais. Diz-se que o amplificador se encontra **saturado**.

Um ganho elevado significará, então, que o amplificador saturará rapidamente.

É importante, também, notar que um amplificador operacional amplifica a diferença de potencial entre a entrada inversora e a entrada não inversora. Este facto implica que, se estivessemos perante uma situação como a retratada na Figura A.5, em que a tensão aplicada na entrada inversora é a mesma da aplicada na entrada não inversora, a tensão à saída seria sempre nula, qualquer que fosse o valor de  $V_{in}$ .

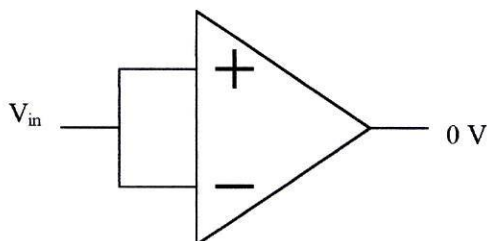


Figura A.5  
Amplificação em modo comum.

- O 741 como comparador

Se tivermos um 741 a funcionar de acordo com o esquema da Figura A.3, facilmente verificamos que, se a tensão de entrada for diferente de zero e como o ganho em tensão é muito elevado, a tensão de saída satura. Se a tensão de entrada mudar de sinal, a tensão de saída também muda, assinalando, assim, a passagem por zero. Estamos perante um **detector de zero**.

Se a tensão aplicada ao terminal inversor não for nula ( Figura A.6 ) o comportamento do circuito é idêntico ao do detector de zero, sendo porém assinalada a passagem da tensão de entrada pelo valor introduzido no terminal inversor ( tensão de comparação ). Estamos, neste caso, perante um **comparador**.

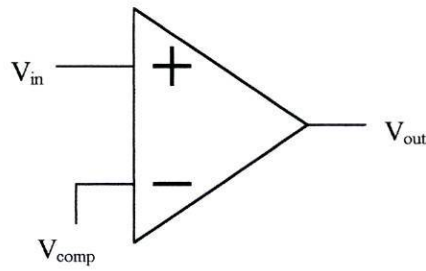


Figura A.6  
Comparador.

- O 741 com *feedback* negativo

Em qualquer amplificador operacional é possível pegar numa fracção do sinal de saída e aplicá-lo novamente à entrada. É esta a essência do *feedback*.

Conforme o sinal de *feedback* vai reforçar o sinal aplicado ou contrariá-lo temos, respectivamente, *feedback* positivo e *feedback* negativo.

Na construção do detector de zero foi utilizado um amplificador não inversor com *feedback* negativo, situação que pode ser esquematizada da forma que a Figura A.7 documenta.

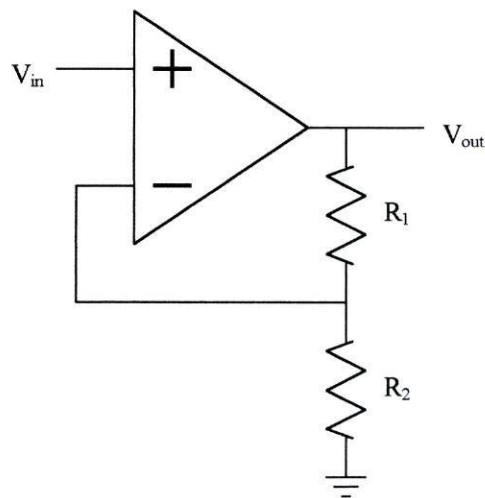


Figura A.7  
Amplificador operacional não inversor com *feedback* negativo.

Na Figura A.7 verificamos que a fracção do sinal de saída aplicada à entrada inversora é da mesma “polaridade” de  $V_{in}$  e, por se tratar da entrada inversora, o efeito será inverso ao de  $V_{in}$ . Trata-se, portanto, de um caso de *feedback* negativo.

A utilização do *feedback* negativo apresenta algumas vantagens, nomeadamente aumentar ainda mais a impedância de entrada, diminuir a já baixa impedância de saída e tornar o ganho mais estável relativamente a variações dos parâmetros dos seus componentes, por exemplo, com a temperatura ou por envelhecimento.

O único inconveniente, que nem sempre o é, é que o ganho com *feedback* é menor do que sem *feedback*.

Este ganho depende das características da malha de *feedback*, mais concretamente, dos valores das resistências  $R_1$  e  $R_2$  representadas na Figura A.7. Assim, o ganho com *feedback*,  $G_f$ , é dado por:

$$G_f = \frac{R_1}{R_2} + 1$$

No caso do detector de zero construído e uma vez que as resistências,  $R_1$  e  $R_2$ , utilizadas tinham os valores de  $33k\Omega$  e  $100\Omega$ , respectivamente, o ganho em tensão é de 330 vezes, o que se veio a revelar suficiente para que o dispositivo funcionasse sem problemas.

- O 741 como “buffer”

Se a resistência  $R_1$  for nula e/ou  $R_2 = \infty$ , o ganho em tensão toma o valor 1 e estamos perante um **seguidor** ou “**buffer**” ( Figura A.8 ), uma vez que serve para isolar a entrada da saída.

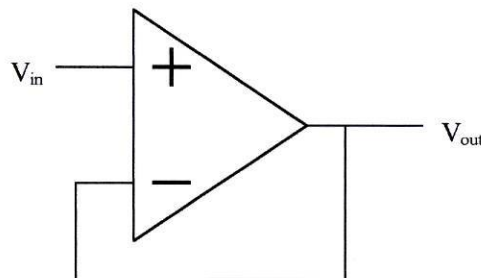


Figura A.8  
Seguidor ou “buffer”.

Não é, obviamente, por terem um ganho em tensão de um que os “buffers” são muito utilizados, mas sim por apresentarem uma elevada resistência de entrada e uma baixa resistência de saída.

Foi utilizado um “buffer” na entrada do voltímetro.

## A.2 Funcionamento de um 555

O 555 é um integrado capaz de produzir impulsos de frequência muito precisa, frequência essa que é controlada por uma resistência e um condensador externos. Costuma, por esse motivo, ser designado por temporizador ( *timer* ).

O 555 possui, na versão *minidip* ( a que foi utilizada ), oito pinos, de acordo com o esquema da Figura A.9.

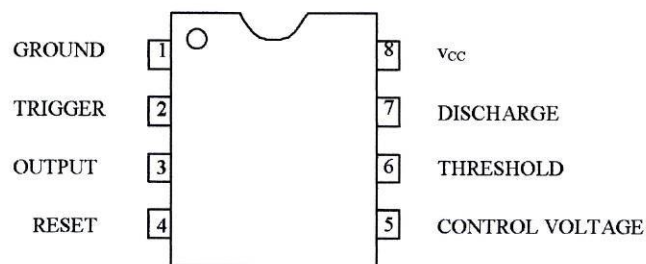


Figura A.9  
Pinagem de um 555.

**GROUND ( Pino 1 ):** Liga-se ao terminal negativo da alimentação. ( No nosso caso ao eléctrodo negativo da associação de pilhas. )

**TRIGGER ( Pino 2 ):** Quando a tensão neste ponto desce abaixo de  $1/3$  de  $V_{cc}$ , o comparador ao qual ele está ligado provoca a mudança de estado do flip-flop, fazendo com que o nível de saída ( OUTPUT ) passe de *baixo* para *alto*.

**OUTPUT ( Pino 3 ):** A tensão de saída disponível neste pino é aproximadamente igual a  $V_{cc}$  menos 1,7 V.

**RESET ( Pino 4 ):** É usado para fazer o *reset* do flip-flop que controla o nível de saída. Este pino é activado quando se lhe aplica uma tensão entre 0 e 0,4 V e força a saída a ir para *baixo*. Para evitar que isso aconteça e quando este pino não está em funcionamento, ele deve ser ligado, juntamente com o pino 8, ao terminal positivo da alimentação ( como no nosso caso ).

CONTROL VOLTAGE ( Pino 5 ): Aplicando uma tensão a este pino, é possível fazer variar a frequência do impulso de saída. No nosso caso, este pino não foi utilizado, uma vez que a frequência vai ser controlada por uma resistência e um condensador externos.

THRESHOLD ( Pino 6 ): Faz o reset do flip-flop e, portanto, força a saída a ir para baixo, se a tensão nele aplicada subir acima de dois terços do valor da tensão aplicada no pino 8.

DISCHARGE ( Pino 7 ): Está ligado ao colector de um transistor NPN que faz parte do integrado. O emissor desse transistor está ligado à terra, portanto, quando o transistor conduz, o pino 7 fica ligado à terra.

Assim, o condensador que está ligado entre o pino 7 e o negativo da associação de pilhas, no Estroboscópio, será descarregado quando esse transistor conduz.

Vcc ( Pino 8 ): Este é o pino destinado à alimentação do integrado e está ligado ao positivo da associação de pilhas.

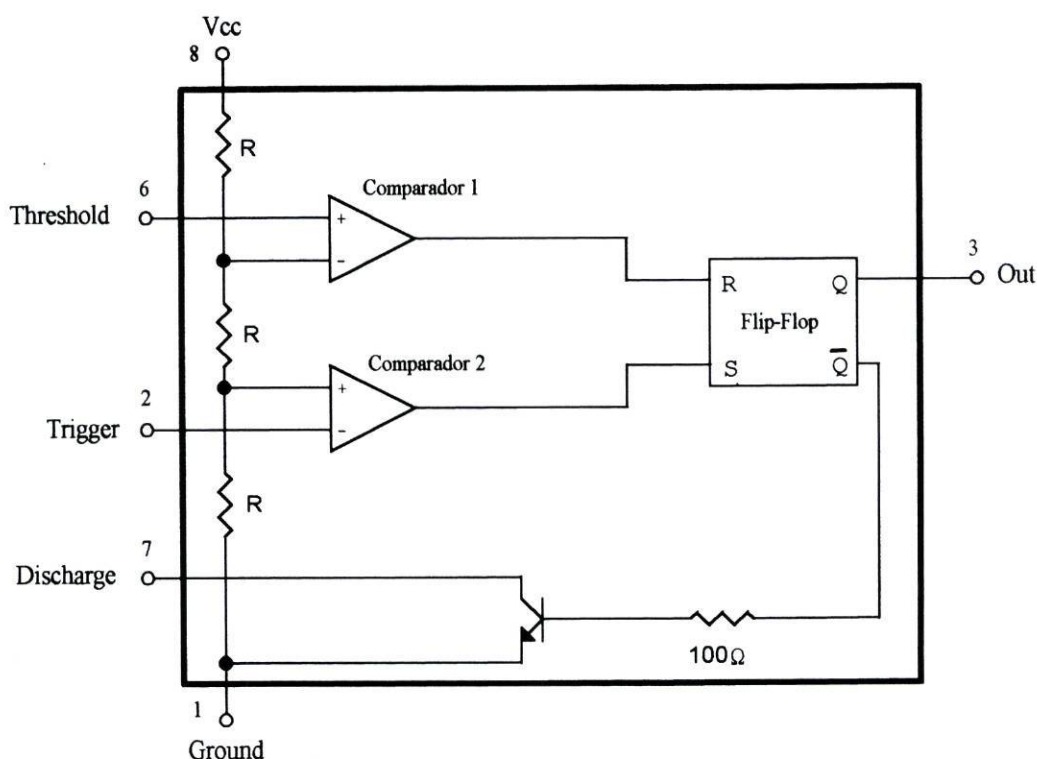


Figura A.10  
Esquema do circuito interno de um 555.

O circuito de um 555 consiste em dois comparadores, um flip-flop e um transistor a funcionar como interruptor, como se esquematiza na figura A.10.

Os comparadores são, como já vimos, amplificadores operacionais que comparam tensões de entrada com tensões de referência. No caso do 555, as tensões de referência são geradas por um divisor de tensão interno que consiste em três resistências iguais,  $R$ . As referências fornecidas por este divisor de tensão são  $2/3$  da tensão de alimentação ( $V_{cc}$ ), para o comparador 1, e  $1/3$  de  $V_{cc}$ , para o comparador 2.

O flip-flop em causa é um circuito biestável ( com dois estados estáveis distintos, designados por *set* e *reset* ) com duas saídas complementares  $Q$  e  $\overline{Q}$ . No estado *set*, a saída em  $Q$  é “alta” ( aproximadamente igual a  $V_{cc}$  ) e a de  $\overline{Q}$  é “baixa” ( aproximadamente igual a  $0\text{ V}$  ). No estado *reset*, a saída em  $Q$  é “baixa” e a saída em  $\overline{Q}$  é “alta”.

O flip-flop é colocado no estado *set* através da aplicação de uma tensão elevada ( $V_{cc}$ ) na sua entrada *set*, representada por  $S$ , na Figura A.10. Para fazer o *reset* do flip-flop, será necessário aplicar uma tensão elevada na entrada *reset*, representada pela letra  $R$ .

É de notar que as entradas *reset* e *set* do flip-flop estão ligadas às saídas dos comparadores 1 e 2, respectivamente.

O circuito que foi montado, utilizando o 555, na construção do Estroboscópio designa-se por *multivibrador astável* e consiste num circuito oscilante, sem estados estáveis. Na Figura A.11 é apresentado um esquema do 555 a funcionar como multivibrador astável.

Vamos admitir que o condensador  $C$  está, inicialmente, descarregado e que o flip-flop está no estado *set*. Neste caso,  $V_{out}$  é alta ( aproximadamente  $V_{cc}$  ) e a saída em  $\overline{Q}$  é baixa ( aproximadamente  $0\text{ V}$  ), o que faz com que o transistor interno do 555 não conduza.

O condensador  $C$  começa, então, a carregar, sendo a resistência de carga a associação série de  $R1$  e  $R2$ , e a tensão nos terminais do condensador,  $V_c$ , aumenta exponencialmente para  $V_{cc}$ .

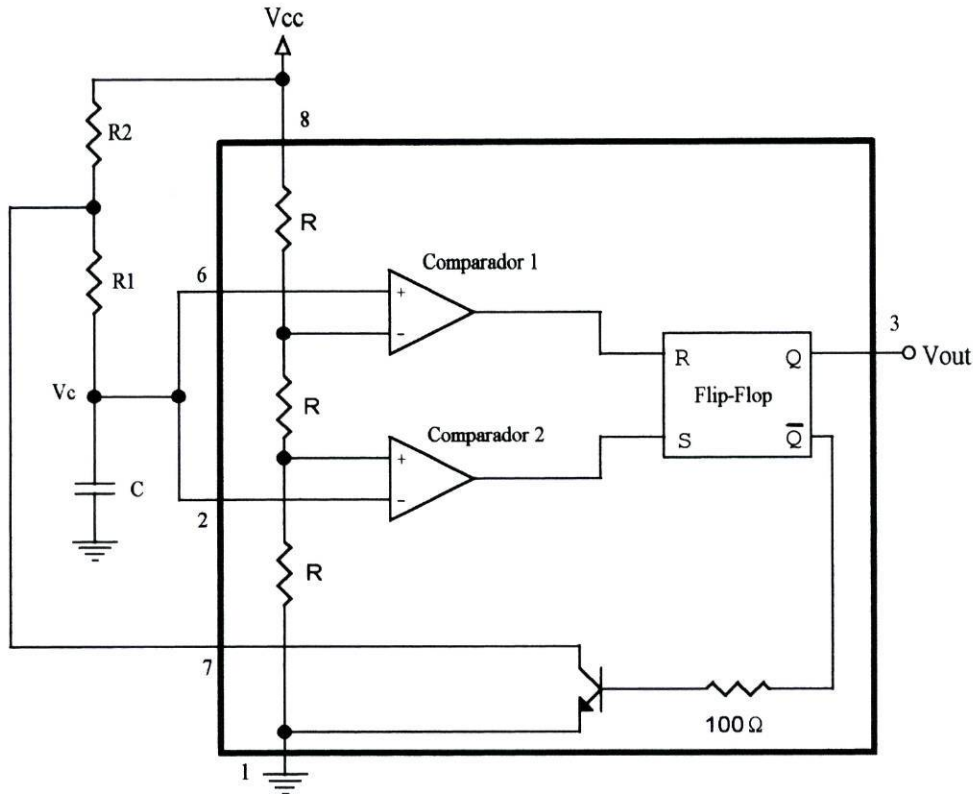


Figura A.11  
Esquema de um 555 a funcionar como multivibrador astável.

Quando  $V_c$  atinge a tensão de comparação do comparador 2 ( $1/3$  de  $V_{cc}$ ), a saída desse comparador passa a  $-V_{cc}$ . Isto não tem, no entanto, qualquer efeito sobre o circuito e o flip-flop continua *set*.

Quando  $V_c$  atinge a tensão de comparação do comparador 1 ( $2/3$  de  $V_{cc}$ ), este satura em  $+V_{cc}$  e provoca o *reset* do flip-flop. Nessa altura, a saída  $Q$  passa a ser “baixa” ( $V_{out}$  aproximadamente igual a  $0\text{ V}$ ) e a saída  $\bar{Q}$  passa a ser “alta”, fazendo com que o transistor interno do 555 conduza. Uma vez que o transistor passa a estar “ligado”, surge uma tensão de aproximadamente  $0\text{ V}$  no nodo comum às resistências  $R1$  e  $R2$ , fazendo com que o condensador  $C$  se descarregue através da resistência  $R1$  e do colector do transistor.

Ao diminuir exponencialmente para  $0\text{ V}$ , a tensão  $V_c$  nos terminais do condensador  $C$  atinge, a dada altura,  $1/3$  de  $V_{cc}$ , provocando a saturação em  $+V_{cc}$  do comparador 2. Quando isso acontece, o flip-flop retoma o estado *set*,  $Q$  volta a ser “alta” e  $\bar{Q}$  volta a ser “baixa”, “desligando” o transistor. Nestas condições o condensador volta a carregar e o ciclo repete-se.

A largura dos impulsos produzidos está relacionada com o tempo que o condensador demora a carregar e é determinada pelos componentes externos do multivibrador astável: a resistência de carga do condensador,  $R1 + R2$ , e a capacidade do condensador.

Se o condensador carregasse até  $V_{cc}$ , o tempo de carga seria de

$$\tau = C(R1 + R2)$$

mas, como ele carrega apenas até dois terços de  $V_{cc}$ , vai ser menor do que o dado por essa expressão.

No caso do estroboscópio construído, a resistência de carga é a soma da resistência fixa de  $220 \text{ k}\Omega$  com a resistência introduzida pelo potenciômetro de  $1 \text{ M}\Omega$ .

É de notar, ainda, que, ao contrário do esquematizado na Figura A.11, em que uma das resistências de carga,  $R1$ , é simultaneamente a resistência de descarga, no estroboscópio foi utilizada uma resistência de descarga apenas a funcionar como tal. Para além disso, ela é consideravelmente menor ( $22 \text{ k}\Omega$ ) do que a resistência de carga, o que significa que a descarga se vai efectuar mais rapidamente do que a carga.

### A.3 Funcionamento de um MOSFET

- Transistores bipolares

Existem dois tipos de transistores: os *bipolares* e os *de efeito de campo*. Os do tipo bipolar usam lacunas e electrões como portadores de carga, enquanto que os de efeito de campo, ou FET ( *Field- Effect Transistor* ), usam electrões ou lacunas para operarem, mas nunca ambos.

O transistor bipolar é um dispositivo de três elementos formado a partir de duas junções que partilham uma mesma camada semicondutora. Os dois tipos de transistores bipolares estão representados esquematicamente nas Figuras A.12 e A.13. No transistor PNP da Figura A.12, a região tipo N comum separa duas camadas tipo P. Analogamente, uma região tipo P está colocada entre duas camadas tipo N, no transistor NPN da Figura A.13. Os três elementos de um transistor bipolar são designados por *emissor*, **E**, *base*, **B**, e *colector*, **C**, conforme indicado nas Figuras A.12 e A.13.

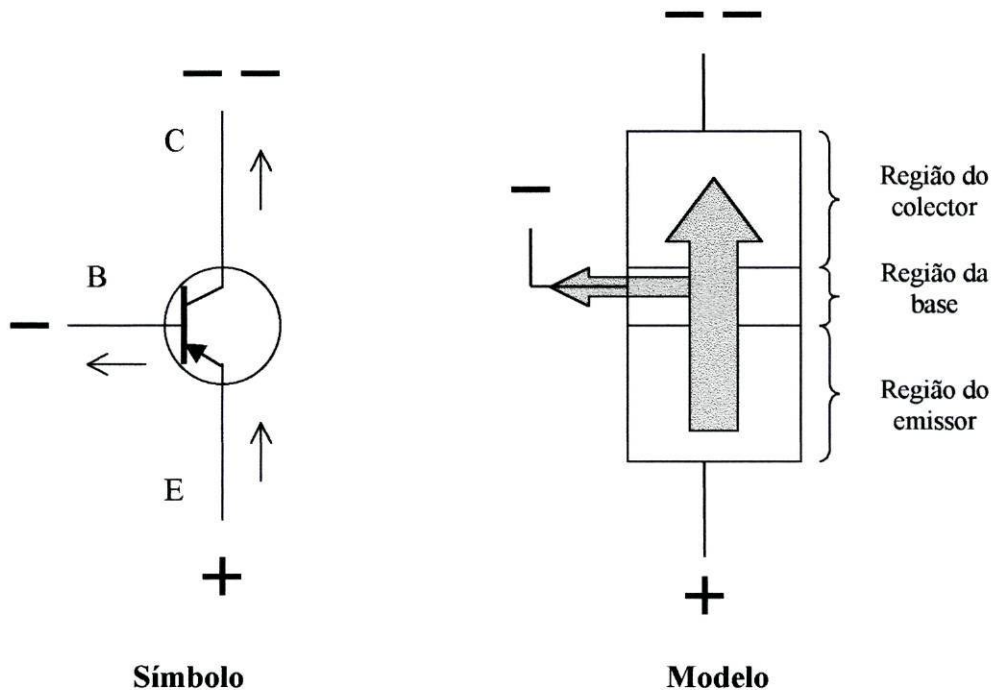


Figura A.12  
Correntes convencionais ( lacunas ) num transistor PNP

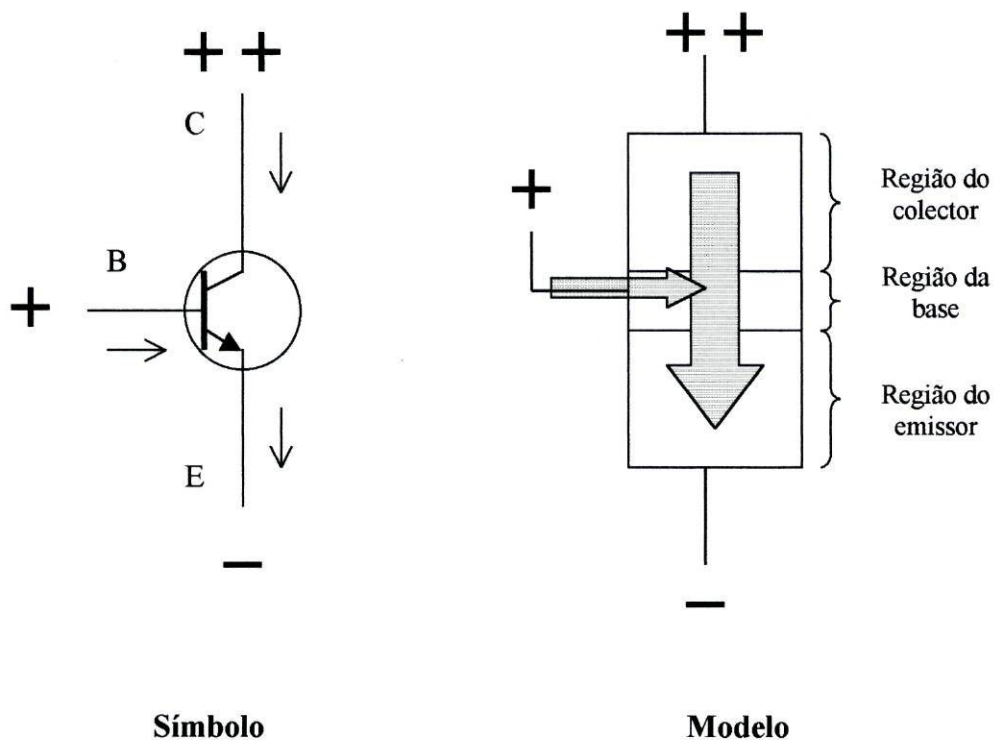


Figura A.13  
Correntes convencionais ( lacunas ) num transistor NPN

Os portadores de carga maioritários no semiconductor tipo P são as lacunas. No transistor PNP as lacunas são atraídas através da junção emissor-base. Um pequeno número destas lacunas vai para a fonte negativa da base, mas a maior parte está sobre a influência da fonte mais negativa do colector. As setas nos modelos ( Figuras A.12 e A.13 ) mostram como o fluxo de corrente é dividido.

Os portadores de carga maioritários nos transistores NPN são electrões. As setas no modelo do transistor NPN representam, então, o sentido contrário ao do fluxo de electrões nesse dispositivo ( sentido convencional da corrente ).

De notar ainda que, nos símbolos, as setas apontam no sentido contrário ao do deslocamento dos electrões e, portanto, no sentido de uma região N.

Pelo que foi dito verificamos que um transistor funciona como amplificador, uma vez que uma pequena variação na corrente da base produz uma grande variação na corrente do colector.

- Transistores de efeito de campo

Existem dois tipos básicos de transistores de efeito de campo: o JFET ( *Junction Field-Effect Transistor* ) e o MOSFET ( *Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor* ).

O nome *efeito de campo* deriva do facto de que a corrente que flui entre dois dos terminais do dispositivo é controlada por um campo eléctrico que, por seu turno, é estabelecido por uma tensão aplicada no terceiro terminal.

É importante, então, notar que a diferença básica entre um FET e um transistor bipolar é que um FET controla a corrente de trabalho pela *tensão* correspondente no terminal de controlo, enquanto que os transistores bipolares controlam a corrente de operação pela *corrente* correspondente no terminal de controlo.

O FET é também designado transistor unipolar, uma vez que a corrente é conduzida por portadores de carga ( electrões ou lacunas ) que se deslocam ao longo de um só tipo de semiconductor ( tipo N em FETs de canal N ou tipo P em FETs de canal P ), ao contrário dos transistores bipolares, onde os portadores de carga atravessam material semiconductor tipo N e tipo P em série.

Num FET existem também três regiões distintas: duas regiões P ( ou N ), chamadas *fonte* e *dreno*, que executam as mesmas funções do emissor e do colector no transistor PNP ( ou NPN ) e uma *gate* que realiza a função da base.

Sem tensão na gate não existe corrente. Com uma tensão negativa aplicada na gate, uma descarga de corrente produz um campo que expande as áreas da fonte e do dreno e permite que as lacunas formem um canal tipo P, por onde a corrente de trabalho pode fluir. Quanto mais negativa for a gate, mais amplo é o canal e maior é a corrente que o FET pode manipular.

Dentro do grupo dos MOSFET há ainda uma subdivisão em MOSFET *tipo deplecção* e MOSFET *tipo enriquecimento*, sendo aquele que foi por mim utilizado deste último tipo. Em termos muito simples, a diferença entre os dois reside no facto de o MOSFET tipo deplecção possuir um canal a unir a fonte e o dreno feito do mesmo tipo de material semiconductor que estes, enquanto que nos MOSFET tipo enriquecimento esse canal não existe.

O que foi dito sobre o MOSFET tipo depleção torna o seu modo de funcionamento muito idêntico ao do JFET, onde também existe um canal entre a fonte e o dreno. No entanto, enquanto que o JFET é controlado pela junção PN gate-canal, no MOSFET e uma vez que a camada de óxido actua como isolador a corrente na gate é negligenciável. Os transistores MOS apresentam, em qualquer situação, resistências de entrada muito elevadas.

- MOSFET tipo enriquecimento

A Figura A.14 mostra um esquema simplificado de um MOSFET tipo enriquecimento canal N, sendo os canal P idênticos.

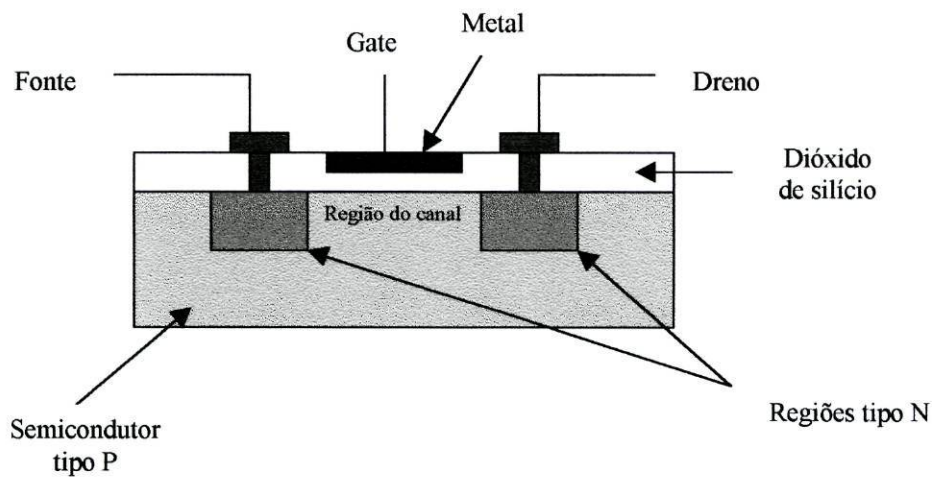


Figura A.14  
MOSFET tipo enriquecimento canal N

Num MOSFET deste tipo e se queremos ter corrente entre o dreno e a fonte, teremos de, em primeiro lugar, criar um canal tipo N entre ambos. Isto pode ser feito através da aplicação de uma tensão positiva na gate, o que vai provocar um deslocamento de electrões do semicondutor tipo P na direcção da gate e uma acumulação desses electrões sob a camada de óxido e entre a fonte e o dreno, criando assim o canal.

**APÊNDICE B**  
( Máscaras dos circuitos impressos )

• Voltímetro ( circuito 1 )

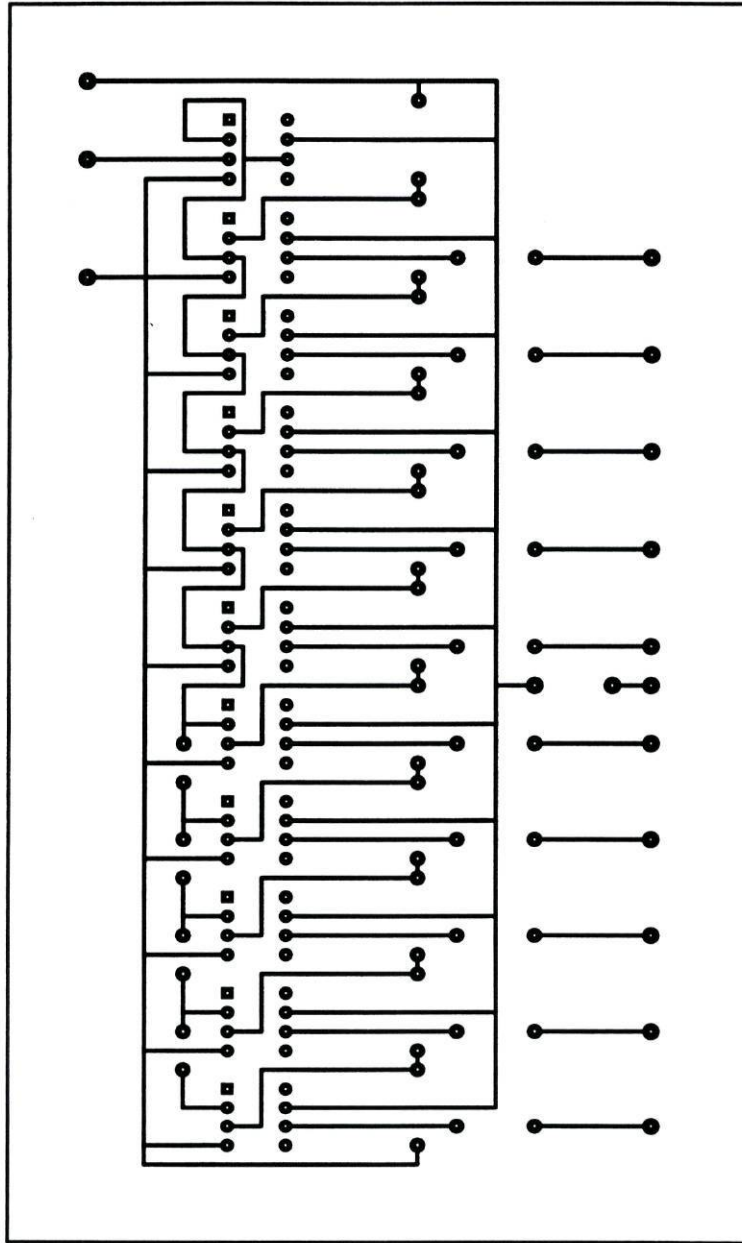


Figura B.1

• Voltímetro ( circuito 2 )

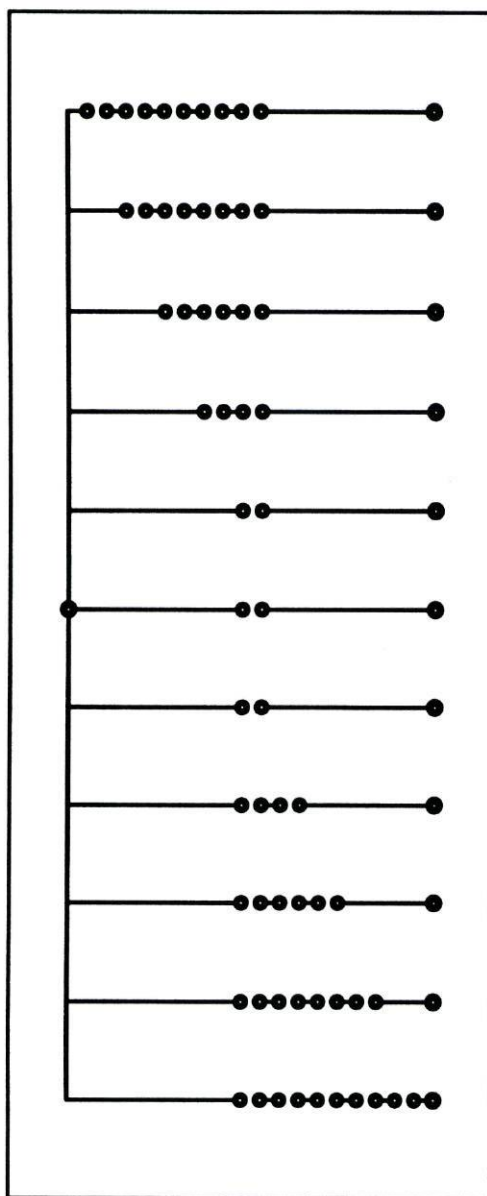


Figura B.2



• Estroboscópio

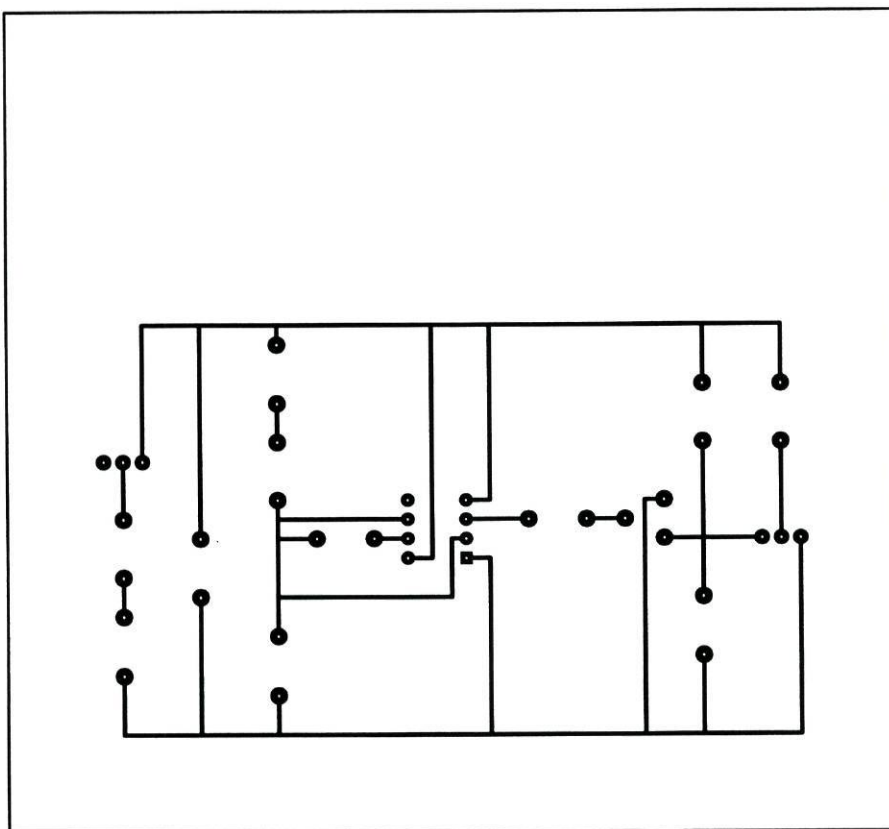


Figura B.4

