

## TP 2 – Sistema de controlo automático de luminosidade

### Eletrónica 2022/2023

---

#### 1. Enquadramento e objetivos

A energia elétrica possui um papel fulcral na manutenção da qualidade de vida das sociedades modernas. Esta forma de energia é utilizada nas mais diversas atividades seja na indústria, nos serviços, na saúde, na educação, no entretenimento, nos transportes, etc...

Infelizmente uma grande parte da energia elétrica utilizada provém de fontes não renováveis, as quais apresentam custos associados que devem ser mitigados. Desta forma, uma solução para reduzir os referidos custos consiste no desenvolvimento de estratégias que permitam aumentar a eficiência na sua utilização e, desta forma, reduzir o consumo de energia elétrica. De acordo com a informação providenciada pela base de dados *PORDATA* <sup>[1]</sup>, em 2020, aproximadamente 3% de toda a energia elétrica consumida em Portugal resulta exclusivamente da iluminação das vias públicas, o que mostra que esta temática possui um papel relevante no nosso quotidiano.

Neste trabalho os alunos devem desenvolver dois sistemas de controlo automático da luminosidade:

- No primeiro projeto pretende-se que os alunos desenvolvam um sistema de controlo automático que acione um *LED* sempre que a intensidade luminosa no meio for reduzida. O objetivo deste sistema é simular um sistema automático de controlo de luminosidade nas vias públicas, o qual deve ligar as lâmpadas dos postes de iluminação apenas quando a luminosidade do meio for reduzida.
- No segundo projeto os alunos devem desenvolver um sistema de controlo que permita apenas ligar uma lâmpada quando a intensidade luminosa da sala for reduzida.

A implementação dos referidos projetos requer a utilização de um *LDR (Ligth Dependent Resistor)*, de um *LED (Ligth Emitting Diode)* e de um circuito de controlo baseado em dois transístores *BJT (Bipolar Junction Transistor)*.

#### 2. Resistência dependente de Luz – *Ligth Dependent Resistor (LDR)*

Um *LDR (Ligth Dependent Resistor)*, ou uma resistência dependente de luz, é um dispositivo semicondutor cuja resistência varia com a intensidade luminosa.

Para perceber o funcionamento deste dispositivo, importa recordar alguns conceitos já abordados. Um aspeto relevante e que caracteriza os materiais do ponto de vista elétrico é a

---

[1] <https://www.pordata.pt/Portugal/Consumo+de+energia+eléctrica+total+e+por+tipo+de+consumo-1124>

distância entre a banda de valência e a banda de condução. No caso dos condutores ambas as bandas se sobrepõem, motivo pelo qual conduzem facilmente. Já no caso dos semicondutores existe um pequeno *gap* de energia entre a banda de condução e a banda de valência, o que significa que os eletrões pertencentes à banda de valência só alcançam a banda de condução se receberem energia extra.

No caso do *LDR* a referida energia traduz-se na forma de luz, e é suficiente para que alguns eletrões da banda de valência alcancem a banda de condução, tornando o material um melhor condutor. À medida que a intensidade luminosa aumenta maior será o número de eletrões que alcançam a banda de condução, logo menor será a resistência do *LDR* (Fig. 1).

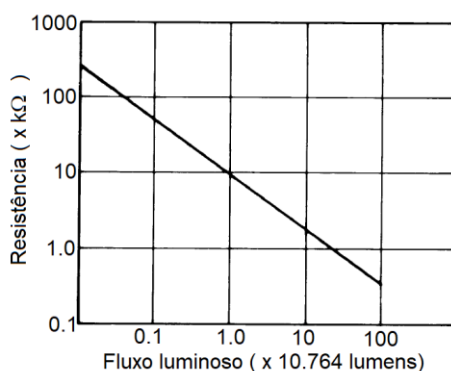


Figura 1 – Característica de um *LDR* (relação resistência versus fluxo luminoso) <sup>[2]</sup>

Um *LDR* é composto por dois terminais, no entanto, ao contrário dos díodos, não possui polaridade. Um dos materiais mais utilizados na conceção de *LDR* é Sulfeto de Cádmio (*CdS*). A Fig. 2 mostra uma fotografia de um *LDR*, onde é possível observar as camadas fotocondutoras de *CdS* protegidas por um invólucro <sup>[2]</sup>.

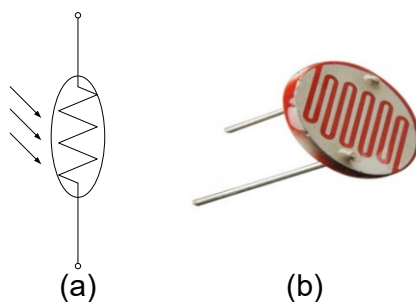


Figura 2 – *LDR* (a) símbolo elétrico e (b) fotografia

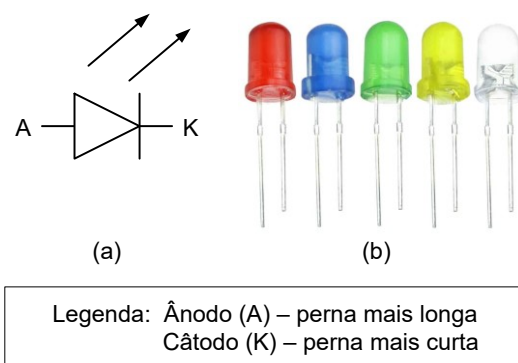
### 3. Díodo Emissor de Luz – *Ligth Emitting Diode (LED)*

Um *LED* (*Ligth Emitting Diode*) é um díodo especial capaz de emitir luz. Quando um *LED* se encontra diretamente polarizado, os eletrões livres pertencentes ao semicondutor do tipo *N* atravessam a junção, eliminando as lacunas existentes no semicondutor do tipo *P*. Ao eliminarem as lacunas, descem da banda de condução para a banda de valência libertando

<sup>[2]</sup> [https://components101.com/sites/default/files/component\\_datasheet/LDR%20Datasheet.pdf](https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/LDR%20Datasheet.pdf)

energia. Num díodo convencional, a libertação de energia é manifestada sob a forma de calor, no caso dos *LEDs*, manifesta-se essencialmente pela emissão de luz<sup>[3],[4]</sup>.

O símbolo usado para representar o *LED* pode ser observado na figura seguinte.



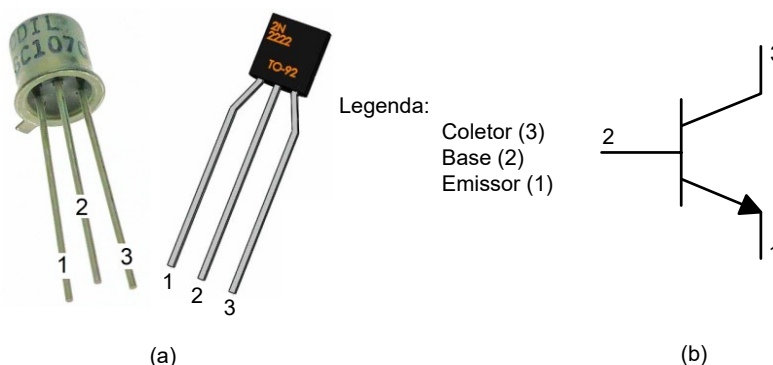
**Figura 3 – LED (a) símbolo elétrico e (b) fotografia**

O díodo emissor de luz apenas emite luz quando diretamente polarizado, sendo que a cor da luz emitida depende do semicondutor utilizado, assim como dos materiais dopantes. A curva característica de um *LED* é semelhante à do díodo convencional, sendo que a sua tensão de arranque é aproximadamente 2 Volts. A corrente no *LED* deve ser mantida entre 10 mA e 50 mA, sendo que o seu brilho aumenta à medida que a corrente aumenta <sup>[3],[4]</sup>.

#### 4. Transístor Bipolar de Junção – *Bipolar Junction Transistor (BJT)*

Os transístores são dispositivos eletrónicos ativos, pois permitem amplificar o sinal de entrada, ao contrário dos restantes elementos estudados. Este dispositivo pode operar como interruptor ou como amplificador controlado eletronicamente, podendo ser encontrado em praticamente todos os aparelhos eletrónicos com que lidamos diariamente <sup>[3],[4]</sup>.

Podem-se destacar duas grandes famílias de transístores: os *BJT* (transístores bipolares de junção), controlados por corrente, e os *FET* (transístores de efeito de campo) controlados por tensão <sup>[3],[4]</sup>. Nesta unidade curricular iremos apenas abordar os *BJTs*. O símbolo usado para representar o *BJT* pode ser observado na figura seguinte.



**Figura 4 – BJT (a) fotografia e (b) símbolo elétrico (BJT do tipo NPN)**

<sup>[3]</sup> Acácio Amaral, "Electrónica Analógica: Princípios, Análise e Projectos", Edições Silabo, 2017, Lisboa

<sup>[4]</sup> Acácio Amaral, "Electrónica Aplicada, Edições Silabo, 2021, Lisboa.

O transistor bipolar de junção é composto por duas junções semicondutoras e três regiões (*NPN* ou *PNP*). Um transistor *NPN* é composto por duas regiões do tipo *N* e outra do tipo *P*, já um transistor do tipo *PNP* é composto por duas camadas do tipo *P* e outra do tipo *N* [3],[4]. O transistor representado na figura anterior é do tipo *NPN* e será este o transistor utilizado neste trabalho.

Os transístores *NPN* permitem controlar a elevada corrente coletor-emissor através de uma pequena corrente de entrada na base, e para o efeito é necessário aplicar uma tensão adequada entre as suas regiões, procedimento este designado por polarização [4].

Os circuitos de polarização podem originar quatro combinações [4], sendo que neste trabalho serão utilizadas essencialmente duas:

- Díodos emissor e coletor diretamente polarizados – transistor funciona como um interruptor fechado.
- Díodos emissor e coletor inversamente polarizados – transistor funciona como um interruptor aberto.

Para operar o transistor como interruptor é comum utilizar-se o seguinte circuito, designado por circuito de polarização fixa.

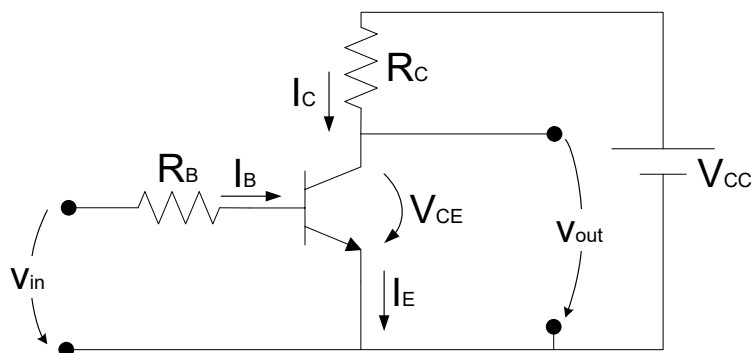


Figura 5 – Circuito de polarização fixa [4]

Se tensão de entrada,  $v_{in}$ , for aproximadamente nula, ambos os díodos (emissor e coletor) encontram-se inversamente polarizados, logo, o transistor é forçado a operar na região de corte, não conduzindo.

Se tensão de entrada,  $v_{in}$ , for bastante superior a zero, então ambos os díodos (emissor e coletor) encontram-se diretamente polarizados, logo, o transistor é forçado a operar na região de saturação, conduzindo.

Para que o transistor opere na região de saturação é necessário garantir a seguinte condição [4].

$$I_C < \beta_{min} \times I_B$$

o valor  $\beta_{min}$  corresponde ao valor mínimo do ganho de corrente na região ativa, sendo, este valor, indicado pelo fabricante.

De acordo com a informação disponibilizada pelo fabricante o valor de  $\beta_{min}$  é aproximadamente igual a 40 ( $I_C = 10 \mu A, V_{CE} = 5 V$ ). No entanto, como as condições de operação do transistor, durante a operação, não são exatamente iguais às indicadas anteriormente iremos considerar para o projeto um valor de  $\beta_{min}$  de 20 [5].

Durante o projeto é importante garantir que as especificações máximas do transistor não são ultrapassadas [5]:

- $V_{CB0} (I_E = 0) < 50 V$ .
- $V_{CE0} (I_B = 0) < 45 V$ .
- $V_{EB0} (I_C = 0) < 6 V$ .
- $I_C < 100 mA$

### 5. Circuito de polarização por divisor de tensão na base

Apesar do circuito apresentado na secção anterior (Fig. 5) ser adequado para que o transistor possa operar como um interruptor, no caso do projeto que se pretende implementar neste trabalho não revela ser a melhor solução, pois requer a utilização de duas fontes de tensão distintas:  $v_{in}$  e  $V_{CC}$ .

Desta forma, será utilizado o circuito de polarização da base por divisor de tensão, pois requer apenas uma única fonte de tensão (Fig. 6).

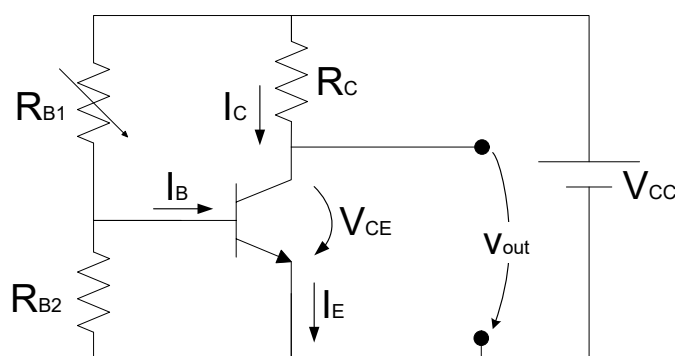


Figura 6 – Circuito de polarização da base por divisor de tensão [3],[4]

No caso do projeto a implementar a variação da corrente na base ( $I_B$ ) será realizada através do ajuste da resistência  $R_{B1}$ :

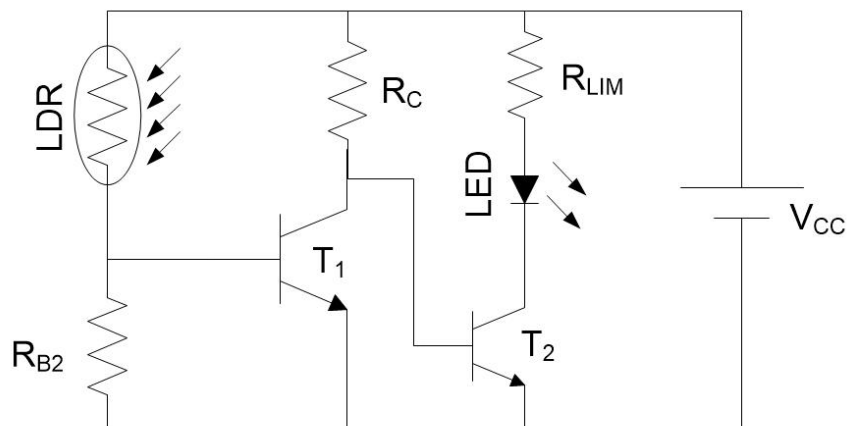
- À medida que o valor da resistência  $R_{B1}$  aumenta menor será a corrente na base. Por outro lado, menor será a tensão aos terminais do diodo emissor. Assim, para que o transistor alcance o corte é fundamental que a tensão no diodo emissor seja inferior à tensão de arranque do diodo emissor.
- À medida que o valor da resistência  $R_{B1}$  diminui maior será a corrente na base. Por outro lado, maior será a tensão aos terminais do diodo emissor. Assim, para que o

[5] <https://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00003228.pdf>.

transistor alcance a saturação é fundamental que o ganho do transistor seja inferior a 20. Esta situação ocorre, pois, o valor da corrente de base é extremamente elevado.

## 6. Projeto – Sistema automático de controlo de iluminação de vias públicas

A figura 7 mostra o circuito final que deverá ser implementado pelos alunos.



Legenda:

$R_{B2}=1\text{ k}\Omega$ ,  $R_C=4.7\text{ k}\Omega$ ,  $R_{LIM}=500\text{ }\Omega$ ,  $V_{CC}=9\text{ V}$

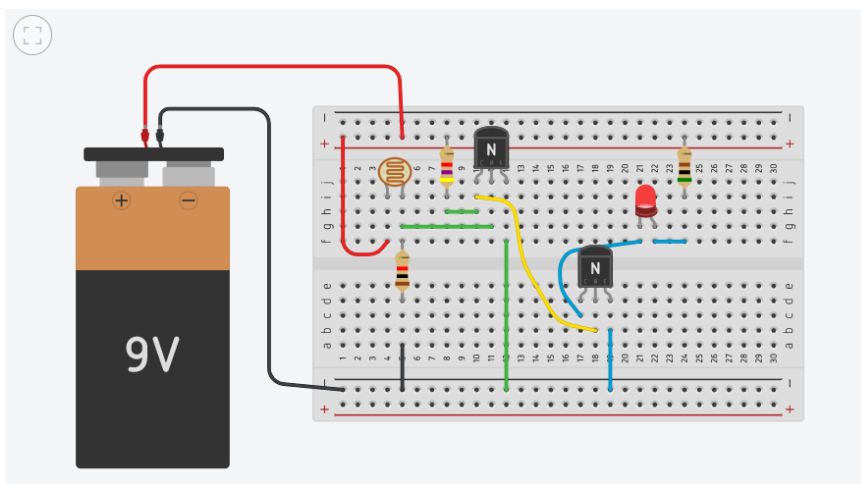


Figura 7 – Sistema automático de controlo de iluminação de vias públicas ([tinkercad](#)) <sup>[4]</sup>

O princípio de funcionamento do circuito anterior é bastante simples:

- O transistor da esquerda ( $T_1$ ) deve conduzir apenas quando a intensidade luminosa for superior a um limite pré-definido. A resistência  $R_{B2}$  tem como função definir o referido limite.
- O transistor da direita ( $T_2$ ) funciona como inversor.

### 6.1 Sistema automático de controlo de iluminação

- a) Efetue a medição da resistência do *LDR*, com a ajuda de um multímetro, nas duas situações limite:
- Resistência Máxima ( $Max\_R\_LDR$ ) – ocorre quando o *LDR* é colocado num ambiente escuro. Simule esta situação com a ajuda de uma tampa de uma caneta (tape o *LDR* com a ajuda de uma tampa de uma caneta<sup>6</sup>).
  - Resistência mínima ( $min\_R\_LDR$ ) – ocorre quando o *LDR* é colocado num ambiente com luminosidade natural.
- b) Considere que a tensão de arranque do *LED* é aproximadamente igual a 2 V, que a corrente máxima suportada pelo *LED* é de 50 mA, e que a tensão coletor-emissor do transístor na saturação é de 0.2 V. Determine o valor mínimo que a resistência  $R_{LIM}$  deve assumir para que a corrente máxima admissível do *LED* não seja ultrapassada.
- c) Considere que a corrente máxima no coletor do *BJT* é de 100 mA, e que a tensão coletor-emissor do transístor na saturação é de 0.2 V. Determine o valor mínimo que a resistência  $R_C$  deve assumir para que a corrente máxima admissível por  $T_1$  não seja ultrapassada.
- d) O transístor  $T_2$  irá ser sujeito à máxima corrente de base durante a saturação. Nesta medida, suponha que a máxima corrente de base admissível pelo *BJT* é 2.5 mA ( $\beta_{min} = 40$ ,  $I_{CMax} = 100$  mA). Determine qual o valor mínimo que  $R_C$  deveria assumir<sup>7</sup>.
- e) Calcule o equivalente de *Thevenin* do circuito de polarização da Base do transístor  $T_1$ .
- f) Simule o circuito original, assim como, o circuito simplificado (considerando o equivalente de *Thevenin* calculado no ponto anterior), em *Pspice*.
- g) Meça o valor da corrente na base e no coletor do transístor para as situações limites.
- h) Simule o circuito para as situações limites.
- a. Considere o valor da resistência do *LDR* medido na alínea a).
  - b. Modelize o *LED* da seguinte forma:
    - i. Durante a condução uma fonte de tensão de 2 V.
    - ii. Durante a não condução uma resistência com valor igual a 1 M $\Omega$ .
- i) Compare os valores simulados com os valores experimentais. Justifique as diferenças.
- j) Descreva o princípio de funcionamento do circuito da Fig. 7.
- k) Que alteração deveria introduzir no circuito da Fig.7 para que o valor limite da intensidade luminosa pudesse ser ajustado pelo utilizador.
- l) Que alterações deveria realizar para implementar o segundo projeto.
- a. Desenvolva um sistema de controlo que permita que o utilizador possa ligar/desligar o *LED* apenas quando a intensidade luminosa da sala for reduzida.
  - b. Indique em que contexto considera esta aplicação relevante, justifique.

---

<sup>6</sup> A tampa da caneta não deve permitir a passagem de luz para garantir que o *LDR* está num ambiente escuro.

<sup>7</sup> Assuma  $V_{BE}=0.7$  V

## 7. Avaliação

A avaliação deste trabalho será baseada no desempenho individual dos alunos nas aulas laboratoriais, complementada com a classificação da folha de resultados laboratoriais.

## 8. Material a Utilizar

- 1 – Um *LDR*.
- 1 – Um *LED*.
- 1 – Resistência  $1\text{ K}\Omega$ ,  $\frac{1}{4}\text{ W}$ , 10%.
- 1 – Resistência  $4.7\text{ K}\Omega$ ,  $\frac{1}{4}\text{ W}$ , 10%.
- 1 – Resistência  $220\ \Omega$ ,  $\frac{1}{2}\text{ W}$ , 10%.
- 2 – Transístores *BC107C*.
- 1 – Placa de montagem laboratorial
- 1 – Fonte de alimentação ou, em alternativa, uma pilha de 9 V.

## 9. Bibliografia

- [1] [Amaral, Acácio \(2021\), Eletrónica Aplicada, Edições Silabo, Lisboa, Portugal.](#)
- [2] [Amaral, Acácio \(2017\), Electrónica Analógica: Princípios, Análise e Projectos, Edições Silabo, Lisboa, Portugal.](#)
- [3] [Amaral, Acácio \(2015\), Análise de Circuitos e Dispositivos Eletrónicos, Publinústria, Porto \(2ª edição\).](#)



## TP 2 – Sistema de controlo automático de luminosidade

Eletrónica 2022/2023

6.1 a)

$Max\_R\_LDR$	$min\_R\_LDR$
_____ $\Omega$	_____ $\Omega$

6.1 b)

Tensão arranque ( $LED$ ) = 2 V,  $Max(I_{LED}) = 50\text{ mA}$  e  $V_{CE(\text{saturação})} = 0.2\text{ V}$   
Cálculos:

$$min(R_{LIM}) = \text{_____ } \Omega$$

6.1 c)

$Max(I_C) = 100\text{ mA}$  e  $V_{CE(\text{saturação})} = 0.2\text{ V}$   
Cálculos:

$$min(R_C) = \text{_____ } \Omega$$

6.1 d)

$\text{Max}(I_B) = 2.5 \text{ mA}$  e  $V_{BE} \approx 0.7 \text{ V}$   
Cálculos:

$$\min(R_C) = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$$

6.1 e)

Equivalente de *Thevenin* do circuito de base de  $T_1$   
(Cálculos e circuitos que permitem calcular  $R_{th}$  e  $V_{th}$ )

$$V_{th} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V e } R_{th} = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$$

Cálculo de  $V_{th}$

Cálculo de  $R_{th}$

**6.1 g)**

Resultados experimentais – transistor $T_1$			
$Max\_R\_LDR$		$min\_R\_LDR$	
$I_{Base} (\mu A)$	$I_{Coletor} (mA)$	$I_{Base} (\mu A)$	$I_{Coletor} (mA)$

Resultados experimentais – transistor $T_2$			
$Max\_R\_LDR$		$min\_R\_LDR$	
$I_{Base} (\mu A)$	$I_{Coletor} (mA)$	$I_{Base} (\mu A)$	$I_{Coletor} (mA)$

**6.1 h)**

Resultados simulação – transistor $T_1$			
$Max\_R\_LDR$		$min\_R\_LDR$	
$I_{Base} (\mu A)$	$I_{Coletor} (mA)$	$I_{Base} (\mu A)$	$I_{Coletor} (mA)$

Resultados simulação – transistor $T_2$			
$Max\_R\_LDR$		$min\_R\_LDR$	
$I_{Base} (\mu A)$	$I_{Coletor} (mA)$	$I_{Base} (\mu A)$	$I_{Coletor} (mA)$

**6.1 i)**

Observações da comparação

**6.1 j)**

Princípio de funcionamento do circuito da Fig. 7

**6.1 k)**

Que alteração deve ser introduzida ao circuito da Fig. 7 para que o utilizador possa ajustar o limite máximo da intensidade luminosa (represente o circuito com a referida alteração)

**6.1 la.)**

Que alteração deveria ser introduzidas no circuito da Fig. 7 para que o utilizador possa ligar/desligar o *LED* quando a intensidade luminosa da sala for reduzida (represente o circuito com a referida alteração)

