



# TP7 – Transdutores – I

A92839 - Beatriz Sousa Demétrio | A92846 - Carlos Miguel Passos Ferreira

Alunos do Mestrado Integrado em Engenharia Física

*Complementos de Eletrónica e Sistemas Digitais*

## Pontos Teóricos

### I.

Neste primeiro ponto teórico, é-nos pedido para calcular o valor da resistência do LED, ou seja, de  $R_{LED}$ , de forma a que a corrente no LED seja aproximadamente igual a  $I_{LED} \approx 20 \text{ mA}$ .

Ora, para isto recorreremos ao primeiro trabalho prático realizado este semestre em que verificamos que a queda de tensão no LED é de aproximadamente 1,8V.

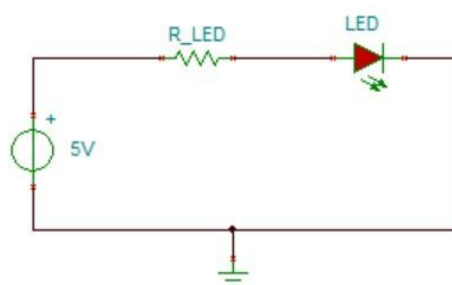


Figura 1 Montagem da  $R_{LED}$  em série com o LED

Por isso, aplicando a lei das malhas vamos ter que:

$$\begin{aligned} -5 + V_{R_{LED}} + V_{LED} &= 0 \Leftrightarrow V_{R_{LED}} = 5 - V_{LED} \Leftrightarrow V_{R_{LED}} = 5 - 1,8 \\ &\Leftrightarrow V_{R_{LED}} = 3,2V \end{aligned}$$

Sabendo a queda de tensão na resistência  $R_{LED}$  e a corrente que a percorre (pois como estamos num circuito em série, a corrente que passa num LED é a mesma que passa na resistência), utilizando a lei de Ohm temos que:

$$R_{LED} = \frac{V_{R_{LED}}}{I_{LED}} = \frac{3,2}{20 \times 10^{-3}} = 160\Omega$$

### II.

No segundo ponto teórico é-nos questionado se somos capazes de visualizar a luz emitida por um LED de infravermelhos (LED IR), sendo a resposta não, visto que a radiação que este emite não faz parte da gama da visível ao olho humano, a qual apresenta uma frequência superior à de infravermelhos.

A imagem que se segue descreve as várias radiações existentes e as posições de cada uma relativamente às restantes.

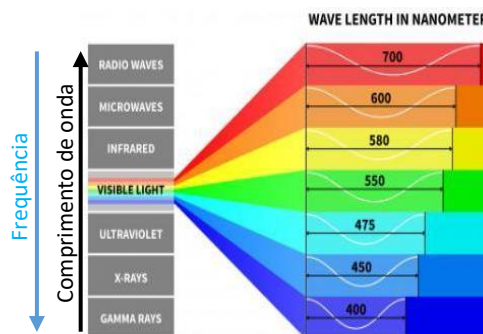
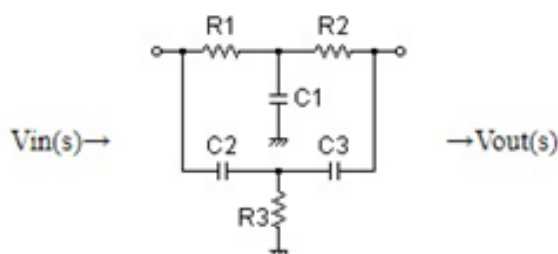


Figura 2 Espectro eletromagnético

### III.

Neste terceiro e último ponto teórico, é pedido para traçar uma resposta em frequência do filtro do bloco 4. O filtro do bloco 4 é um filtro rejeita banda e é um filtro que nos permite eliminar uma frequência central.



R1=91e3 $\Omega$	C1=47e-9 F
R2=91e3 $\Omega$	C2=47e-9 F
R3=2.2e3 $\Omega$	C3=47e-9 F

p:pico, n:nano, u:micro, k:kilo, M:mega

Figura 3 Valores das resistências e condensadores usados

Figura 4 Esquema apresentado do Filtro do Bloco 4

Utilizando o site indicado no protocolo da tp anterior ([Twin-T Notch Filter Design Tool \(okawadenshi.jp\)](http://www.okawadenshi.jp/)), obtivemos o seguinte resultado:

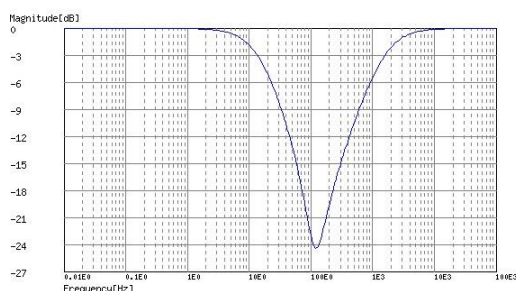


Figura 6 Resposta em frequência obtida

#### Frequência de rejeição do centro

$$f_0 = 52,62545687147[\text{Hz}]$$

$$f_0 = 169,22917580187[\text{Hz}]$$

Figura 5 Filtro do Bloco 4 rejeita uma banda de frequências entre aproximadamente os 52,6Hz e os 169,2Hz

## Pontos Práticos

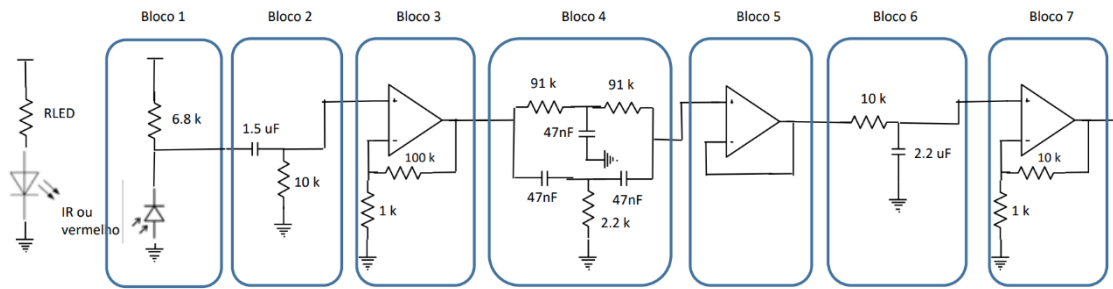


Figura 7 Circuito a ser montado nesta parte prática

### 1.

Nesta primeira pergunta, foi pedido para montar o circuito da figura 7 até à entrada do Bloco 2, utilizando  $\pm 5\text{ V}$  para alimentar os circuitos, e de forma a que o LED ficasse a apontar para o fotodetector.

NOTA: Usou-se uma resistência de valor de  $150\ \Omega$  como  $R_{LED}$  em vez de  $160\ \Omega$ , pois era a mais próxima da calculada e disponível no kit fornecido.

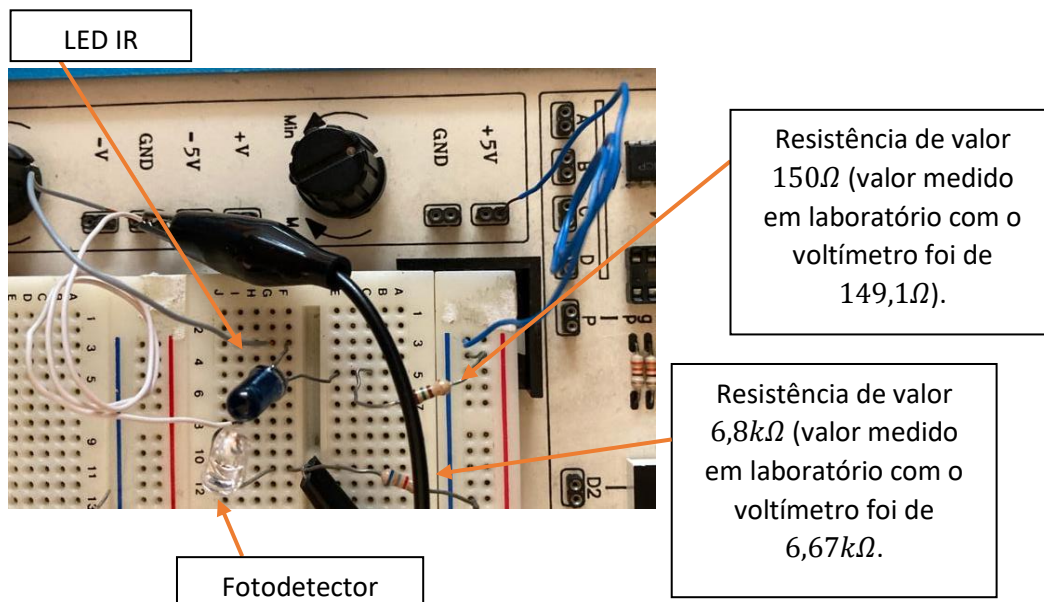
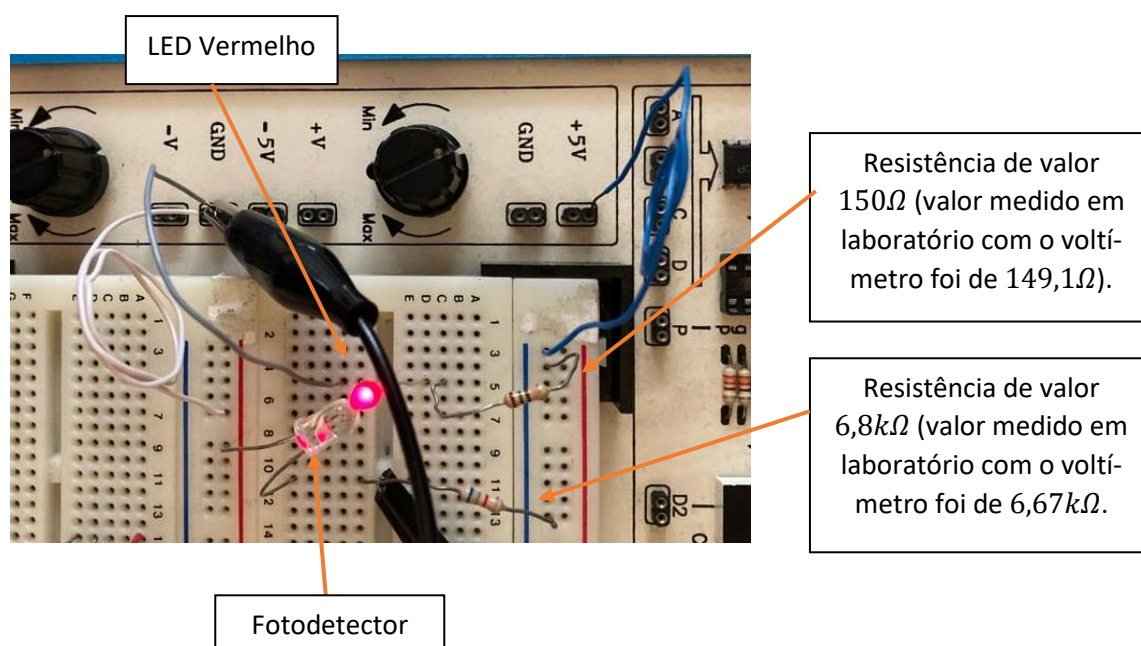


Figura 8 Montagem do circuito pedida utilizando um LED IR



2.

Figura 9 Montagem do circuito utilizando um LED Vermelho

Nesta segunda questão foi pedido para medir e anotar o sinal à saída do bloco 1 (ou entrada do bloco 2) para a montagem do circuito da figura 8 (com o LED IR) e para a montagem da figura 9 (com o LED Vermelho).

Antes de realizar a experiência, previmos que o resultado seria, tanto para o LED IR, tanto para LED Vermelho, uma tensão constante e inferior à tensão de entrada ( $= 5V$ ) presumindo que a emissão da luz dos LEDs era constante, e também que esta tensão era diferente para as duas montagens pois sabemos que a sensibilidade do fotodetector varia com a variação do comprimento de onda da luz que incide no mesmo.

Mais precisamente, analisando o circuito da figura ao lado, que corresponde ao Bloco 1, e recorrendo à lei das malhas concluímos que a tensão de saída, dada pelo voltímetro (apesar de que no laboratório recorremos a um osciloscópio), obtém-se pela expressão  $V_{saída} = 5V - 6,8k\Omega \times I$ , sendo  $I$  a corrente produzida pelo fotodiodo.

Mas durante a realização da experiência, tivemos que ter em atenção a existência de outras fontes de luz, além do LED, também estas detetadas igualmente pelo fotodiodo, as quais poderiam afetar o resultado obtido.

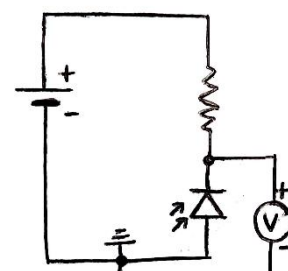


Figura 10 Circuito equivalente ao Bloco 1



Os resultados obtidos foram os seguintes:

- Para o LED IR:



Figura 11 Sinal à saída do Bloco 1 com LED IR

Analisando a onda de saída, concluímos que, para este caso, a tensão de saída é aproximadamente igual a 1,6V.

- Para o LED Vermelho:



Figura 12 Sinal à saída do Bloco 1 com LED Vermelho

Analisando a onda de saída, concluímos que, para este caso, a tensão de saída é aproximadamente igual a 4,0V.

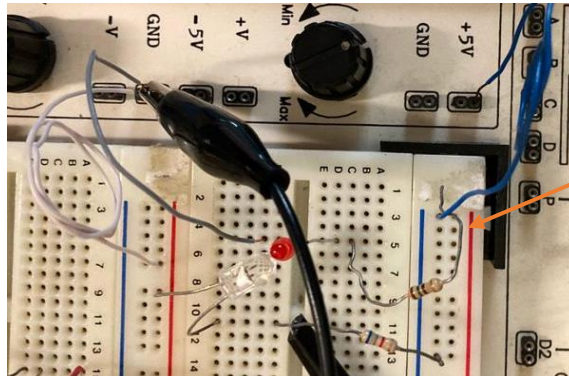
Comparando as duas situações apresentadas em cima e com a conclusão retirada antes da realização da experiência, como a tensão de saída no LED IR é inferior à tensão de saída no LED Vermelho, pode-se concluir que o fotodetector é mais sensível à luz infravermelha do que à luz vermelha.





### 3.

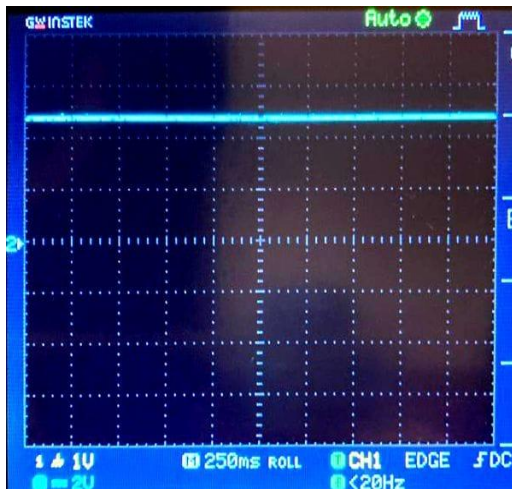
Neste terceiro ponto prático, retirou-se o LED Vermelho do circuito e mediu-se de novo a diferença de potencial na saída.



Retirou-se um dos terminais da resistência  $R_{LED}$  que estava ligado à fonte de tensão 5V, de forma a retirar o LED do circuito

Figura 13 Montagem do circuito até à saída do Bloco 1 com o LED retirado

Ao retirar o LED do circuito, a única luz detetada pelo fotodíodo provém de fontes envolventes, com menor potência em relação à emitida pelo LED que se encontrava bastante próximo do fotodetector. Com isto, a corrente produzida pelo fotodíodo será inferior às da questão anterior, provocando um aumento da tensão de saída (recorrendo à lei das malhas novamente para obter essa conclusão).



De facto, experimentalmente obteve-se uma tensão DC aproximadamente igual a 4,8V, sendo este valor bastante próximo do fornecido pela fonte de tensão uma vez que a fonte de luz mais próxima que emitira maior irradiância, a lâmpada do teto acima da bancada, se encontrava desligada.

Figura 14 Sinal à saída do Bloco 1 sem LED

#### 4.

Neste instante, tapou-se o fotodetetor, cessando a sua recepção de energia luminosa, e verificou-se e registou-se o que aconteceu em consequência.

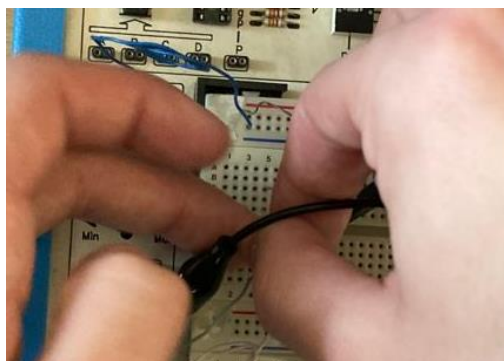


Figura 16 Circuito da figura 7 até à entrada do Bloco 2 com o fotodiodo tapado

Preveu-se que, ao deixar de haver corrente no fotodetetor, este funcionaria como um circuito aberto, como representado na figura ao lado, levando a que a tensão de saída do Bloco 1 fosse de 5 V.

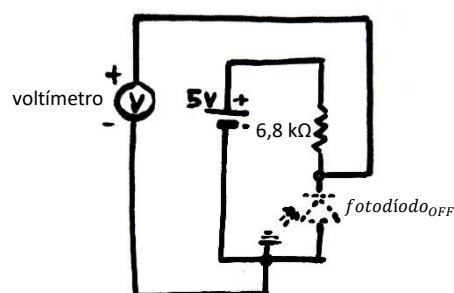


Figura 15 Esquema do circuito da figura 15



Figura 17 Sinal de saída obtido para quando o fotodetetor está tapado

Experimentalmente, verificamos exatamente o que foi previsto: obtivemos um sinal de saída com um valor constante de aproximadamente 5V, como podemos ver na imagem ao lado.

#### 5.

Nesta questão, é-nos pedido para registar a componente AC da saída do bloco 1.

Com a componente AC, ou seja, desprezando todas as componentes contínuas provenientes do circuito, visualizou-se um sinal com cerca de 100 Hz de frequência, representado na imagem da figura 18.



Uma vez que ambos os LED's teriam sido retirados do circuito, a intensidade luminosa detectada no fotodetector provinha das lâmpadas presentes no teto do laboratório.

Apesar de não nos ser perceptível, as lâmpadas não emitem luz constantemente, ligando e desligando a uma frequência de 100 Hz. Este valor de frequência provém da tensão de alimentação das lâmpadas, que por sua vez advém da corrente elétrica da instalação. Como a tensão de entrada é representada por uma onda sinusoidal com 50 Hz (valores estes padronizados), é nos instantes em que esta atinge os 0 V que as lâmpadas irão apagar momentaneamente, sendo por esse motivo que a frequência destas ronda os 100 Hz.

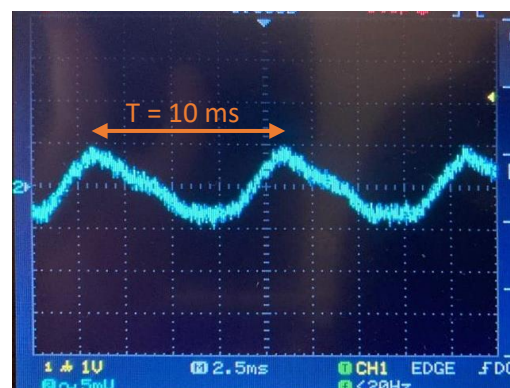


Figura 18 Sinal de saída AC do bloco 1 para o fotodiodo destapado e nenhum LED ligado

## 6.

Nesta sexta questão, é pedido para voltar a colocar o LED IR no circuito de forma a que fosse possível colocar um dedo a refletir o sinal do LED para o fotodetector (LEDs e fotodetector colocados lado-a-lado).

## 7.

Relativamente à questão 7, com o osciloscópio em AC, foi nos pedido para registar e analisar o sinal produzido na saída do Bloco 1, enquanto tapamos e destapamos o fotodetector (e, por sua vez, o LED IR da mesma forma).

Aquilo que se pretende com esta atividade é estudar e visualizar o princípio da oximetria, o qual defende que, no instante em que o dedo tapa o conjunto "fotodetector + LED IR", parte da luz emitida pelo LED será absorvida e refletida consoante a oxigenação da Hemoglobina, resultando, assim, na observação da frequência cardíaca.

Como no Bloco 1 o sinal ainda não teria sofrido qualquer filtragem ou ampliação, seria de esperar que fosse visualizado uma série de ruído no sinal, proveniente por exemplo de fontes luminosas envolventes, sendo responsabilidade dos restantes blocos permitir uma melhor e mais nítida visualização da onda pretendida de onde retiraremos a frequência cardíaca.

Em ambiente laboratorial, foi visualizado o sinal ao lado, onde é evidente a existência de ruído indesejado.



Figura 19 Onda obtida tapando e destapando o fotodiodo

Importa referir que entre as questões 7 e 13, onde foram visualizados os propósitos da utilização dos vários blocos, visualizamos as ondas tapando e destapando o conjunto "fotodetector+LED IR", o que nos permitiu uma análise mais clara da onda e dos efeitos nela presentes após a passagem de cada bloco.





Do exercício 8 ao exercício 14, utilizou-se, em laboratório, a seguinte montagem da figura 7, analisando-se as características de cada bloco :

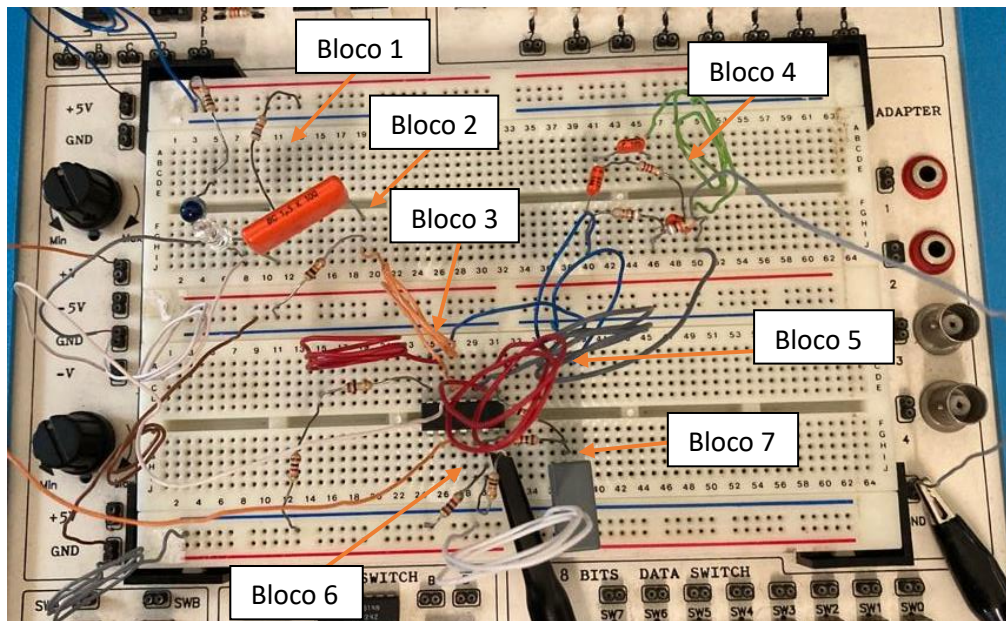


Figura 20 Montagem utilizada nos exercícios 8 ao 14

## 8.

Nesta oitava pergunta, pede-se para implementar o bloco 2 e registrar o sinal à saída do mesmo.

Os componentes utilizados neste bloco foram:

- Resistência:  $R = 10k\Omega$  (o valor medido pelo voltímetro foi de  $R = 9,86k\Omega$ )
- Condensador:  $C = 1,5\mu F$

Este bloco 2 é designado por filtro passa-alto de primeira ordem. Sabemos que a altas frequências, ou seja, com  $f \rightarrow \infty$ , a impedância do condensador tende para zero, fazendo com que este se comporte como um fio e assim  $V_{in} = V_{out}$ . Já para as baixas frequências, isto é, quando  $f \rightarrow 0$ , a impedância do condensador tende para infinito, provocando assim com que o condensador se comporte como um circuito aberto. Daqui retiramos que este bloco irá filtrar baixas frequências, ou seja, abaixo da frequência de corte todas as frequências irão ser eliminadas. Esta frequência de corte é dada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \approx 10,61 \text{ Hz}$$



Por isso, podemos dizer que este bloco irá servir para filtrar as frequências abaixo de  $10,61\text{ Hz}$ , isto é, previmos que a onda resultante continuará a ter ruído mas menos ruído que anteriormente, pois parte dele é filtrada. Basicamente, aplicamos este filtro passa-alto para eliminar parte da componente DC introduzida pelo digital-lab usado, que não é importante ou útil para a realização deste trabalho.

Analisando agora o sinal à saída do bloco 8, notamos que houve uma certa filtração, diminuindo uma certa gama de ruídos, previstos teoricamente como sendo maioritariamente sinais DC. Apesar disso, notamos que existe ainda bastante ruído a ser tido em conta e retirado do sinal desejado.



Figura 21 Onda obtida na saída do bloco 2

É de se notar que, para esta questão, não foi colocado no canal 1 a onda de entrada do bloco 1 para posterior comparação em relação à onda de saída, o que dificultou um pouco a visualização do efeito do filtro aplicado. Porém, esta falha foi corrigida nas próximas questões, não tendo sido possível realizar novamente esta questão por escassez do tempo.

## 9.

Nesta nona pergunta, pede-se para implementar o bloco 3 e registar o sinal à saída do mesmo.

Os componentes utilizados neste bloco foram:

- Resistência:  $R_2 = 100k\Omega$  (o valor medido pelo voltímetro foi de  $R_2 = 99,4k\Omega$ )
- Resistência:  $R_1 = 1k\Omega$  (o valor medido pelo voltímetro foi de  $R_1 = 0,985k\Omega$ )

Este bloco 3 trata-se de um amplificador não inversor. Ora, isto implica que o sinal de saída deste bloco seja amplificado com o ganho dado por:

$$G = 1 + \frac{R_2}{R_1} \approx 101,9$$

fazendo com que a tensão de saída do bloco 3 seja aproximadamente igual 101,9 a vezes a tensão de entrada do mesmo.

Nota: este ganho calculado é para o valor das resistências medidas em laboratório.



Experimentalmente, visualizou-se, de facto, uma amplificação do sinal de entrada (representado pela onda a amarelo), obtendo-se uma onda não desfasada em relação à anterior (representada a azul), características estas próprias de um amplificador não inversor. Apesar disso, não conseguimos obter um ganho como o esperado teoricamente, sendo que para um dos picos, obtivemos uma amplitude de entrada aproximadamente igual a 0,6V e uma amplitude de saída de aproximadamente 9 V, resultando assim num ganho de 15. Esta discordância entre valores obtidos e esperados poderá provir do método de tapar e destapar o fotodiodo, além das condições do laboratório não serem ideais.



Figura 22 Onda obtida na saída do bloco 3

## 10.

Nesta décima questão, foi pedido para se implementar o bloco 4 e registar o sinal obtido à saída do mesmo.

Os componentes utilizados neste bloco foram:

- Resistência:  $R = 91k\Omega$  (o valor medido pelo voltímetro foi de  $R = 90,9k\Omega$ );  $R = 2,2k\Omega$  (o valor medido pelo voltímetro foi de  $R = 2,15k\Omega$ )
- Condensador:  $C = 4,7nF$

Como vimos no *ponto teórico III*, este bloco é designado por filtro passa-banda e que este rejeita as frequências entre aproximadamente 52,6Hz e 169,2Hz. Daqui podemos esperar que o sinal de saída deste bloco contenha menos ruído em comparação com o de entrada e



Figura 23 Onda obtida na saída do bloco 4

que este bloco filtre no sinal as frequências de 100Hz, que provêm das luzes que estão no teto.

Analisando os sinais obtidos experimentalmente, observamos por exemplo que os picos mais acentuados (que correspondem a frequências mais elevadas) da onda de entrada (representada a amarelo) foram anulados pelo filtro passa-banda, levando a uma diminuição considerável do ruído, incluindo o gerado graças à luz emitida pelas lâmpadas do teto (ao qual vimos anteriormente que correspondia a uma frequência de 100 Hz, dentro da zona de frequências rejeitadas por este filtro).



## 11.

Nesta questão, é-nos pedido para implementar o bloco 5 e registar o sinal de saída do mesmo.

Este bloco 5 é designado por buffer ou amplificador seguidor de tensão. Ora, sendo um buffer sabemos que o ganho será igual a 1, ou seja, a onda de saída será exatamente igual à onda de entrada. Este amplificador é utilizado pois apesar do ganho em tensão ser unitário, ele vai fornecer corrente à saída (pois o mesmo possui uma impedância de saída nula), produzindo no bloco seguinte um ganho de potência. Ou seja, garante um perfeito acoplamento de impedâncias e ganho de potência estável.



Figura 24 Onda obtida na saída do bloco 5

Comprova-se experimentalmente que, estando a utilizar um Buffer, as ondas de saída e entrada coincidem, sendo por esse motivo que apesar de na imagem ao lado conseguirmos visualizar apenas um sinal a amarelo, correspondente ao sinal de entrada), este se sobrepõe ao sinal de saída (a azul).

## 12.

Nesta pergunta, pede-se para implementar o bloco 6 e registar o sinal à saída do mesmo.

Os componentes utilizados neste bloco foram:

- Resistência:  $R = 10k\Omega$  (o valor medido pelo voltímetro foi de  $R = 9,83k\Omega$ )
- Condensador:  $C = 2,2\mu F$

Este bloco 2 é designado por filtro passa-baixo de primeira ordem. Seguindo o raciocínio feito para o bloco 2, iremos retirar que este bloco irá filtrar altas frequências, ou seja, acima da frequência de corte todas as frequências irão ser eliminadas. Esta frequência de corte é dada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \approx 7,23 \text{ Hz}$$

Com isto, é esperado que, depois da aplicação deste bloco, em junção com os anteriores, a maior parte do ruído esteja filtrada.

Observou-se de facto uma atenuação do sinal de entrada, fruto da filtragem provocada por este bloco, praticamente isento de ruído. Novamente, importa referir que as variações observadas provêm do tapar e destapar do fotodiodo, estando praticamente preparado para a visualização do sinal pretendido.

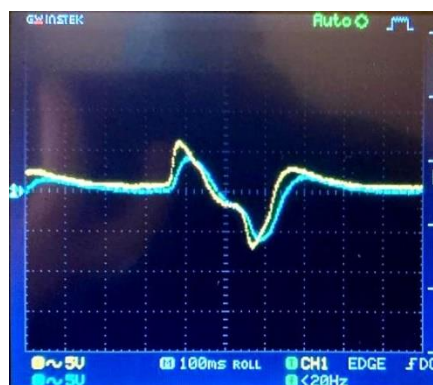


Figura 25 Onda de saída obtida para o Bloco 6





### 13.

Nesta pergunta, pede-se para implementar o bloco 13 e registrar o sinal à saída do mesmo.

Os componentes utilizados neste bloco foram:

- Resistência:  $R_2 = 10k\Omega$  (o valor medido pelo voltímetro foi de  $R_2 = 9,81k\Omega$ )
- Resistência:  $R_1 = 1k\Omega$  (o valor medido pelo voltímetro foi de  $R_1 = 0,982k\Omega$ )

Este bloco 13 trata-se de um amplificador não inversor. Ora, isto implica que o sinal de saída deste bloco seja amplificado com o ganho dado por:

$$G = 1 + \frac{R_2}{R_1} \approx 10,99$$

fazendo com que a tensão de saída do bloco 13 seja aproximadamente igual 10,99 a vezes a tensão de entrada do mesmo.

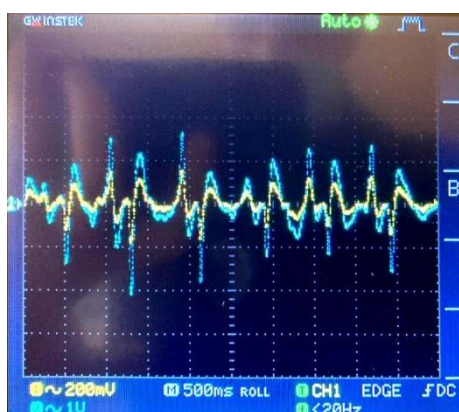


Figura 26 Onda de saída obtida para o bloco 7

Experimentalmente, foram obtidos os sinais representados ao lado, onde se nota novamente uma amplificação sem desfaseamento (já que se trata de um amplificador não inversor) da onda de entrada (representada a amarelo), resultando na onda de saída representada a azul. Analisando um par de picos correspondentes das duas ondas obtemos uma amplitude de cerca de  $160mV$  na onda de entrada e uma amplitude de cerca de  $1,6V$  na onda de saída, resultando assim num ganho de 10, idêntico ao previsto teoricamente.

### 14.

Nesta décima quarta questão, é pedido a frequência cardíaca de um dos estudantes que está a realizar a atividade. Em média, a frequência cardíaca ideal para um adulto é entre 70 a 80 batimentos por minuto, ou seja, entre  $1,17Hz$  e  $1,33Hz$ .

Desta forma, observando a figura ao lado verificamos que temos um batimento cardíaco de aproximadamente  $1,43Hz$ , ou seja, 86 batimentos por minuto. O resultado é um pouco acima do esperado mas isso pode ser explicado pelo nervosismo do aluno que estava a realizar a experiência.



Figura 27 Frequência Cardíaca obtida a partir da montagem com o LED IR





## 15.

Nesta penúltima questão prática do protocolo, é pedido para trocar o LED IR pelo LED Vermelho.

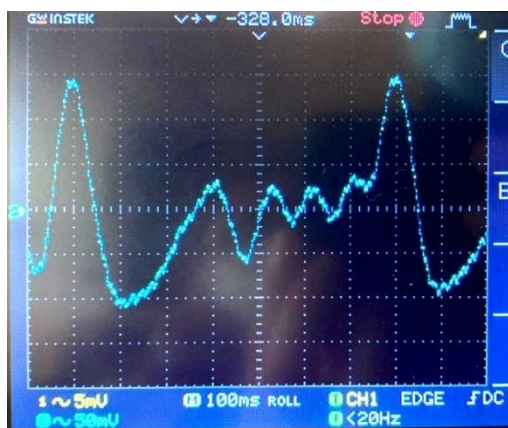


Figura 28 Frequência Cardíaca obtida a partir da montagem com o LED Vermelho

A partir da imagem ao lado verificamos de igual forma que a frequência cardíaca do aluno era de aproximadamente 1,43Hz, ou seja, 86 batimentos por minuto. Mas comparando o sinal obtido neste exercício 15 com o obtido no exercício anterior, verificamos que a variação de amplitude na montagem do LED Vermelho era um pouco superior à do LED IR. Ora, isto é explicado pelo facto de que a hemoglobina oxigenada no sangue absorve a luz que vem do LED IR, mas deixa passar a luz que vem do LED Vermelho, fazendo assim com que aumente a corrente no circuito.

## 16.

Na última questão, é-nos questionado qual o efeito da troca do amplificador não inversor presente no bloco 3 por um amplificador inversor relativamente à onda de saída.

Teoricamente, sabemos que existem duas diferenças consideráveis entre estas duas montagens, sendo estas o ganho e o desfasamento entre as ondas de entrada e saída. Em relação à primeira diferença, o ganho para um amplificador inversor, relacionado com as resistências utilizadas, obtém-se por  $\frac{-R_2}{R_1}$ , sendo  $R_2$  a resistência presente na realimentação e  $R_1$  a resistência cujos terminais se encontram no sinal de entrada e na entrada inversora do amplificador. Se dimensionarmos estas duas resistências de forma a obter o mesmo ganho (utilizando, por exemplo,  $R_2 = 100k\Omega$  e  $R_1 = 1k\Omega$ ), iremos observar a segunda diferença entre estes amplificadores, o desfasamento. Utilizando um AmpOp em configuração de montagem inversora, iremos observar um desfasamento de  $180^\circ$  da onda de saída em relação à onda de entrada. Se apenas substituirmos o amplificador no bloco 3, aquilo que iríamos observar na onda final seria uma inversão do sinal em relação ao sinal obtido com a montagem anterior, isto porque nenhum dos blocos seguintes provocou novamente a inversão do sinal.

Infelizmente, por escassez do tempo, não conseguimos testar a nossa teoria experimentalmente.