



Instituto Politécnico do Cávado e do Ave
Escola Superior de Tecnologia

Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Semicondutores

Transístores Bipolares e por Efeito de Campo

Telmo Fernandes 15868

Resumo

Este documento tem como objetivo descrever a resolução da segunda parte prática do tema semicondutores, no âmbito da cadeira Eletrónica I, do curso Licenciatura em Engenharia Eletrotécnica.

De geral forma este projeto recai sobre três vertentes principais, tal como se verificou no primeiro: resolução dos conceitos teóricos, como cálculos matemáticos e análise de circuitos, e a realização de simulações utilizando softwares específicos para a modelagem de circuitos e por fim validação e comparação em contexto real.

As simulações reais permitiram a validação e a análise crítica em laboratório, contexto real, possibilitando a comparação com as simulações virtuais e cálculos teóricos. Este processo foi crucial para que fosse desenvolvido uma visão crítica, discutindo as diferenças entre os resultados obtidos.

Durante a realização, foram exploradas diversas configurações utilizando dispositivos semicondutores, transístores, com foco nas suas características. Este projeto complementou e expandiu o conhecimento teórico adquirido nas aulas, evidenciando a importância da prática na consolidação dos conceitos estudados.

Temas gerais abordados:

Transístores Bipolares (BJT) e por Efeito de Campo (FET):

- Funcionamento e características de transístores PNP e NPN.
- Configurações e cálculos teóricos envolvendo transístores bipolares e de efeito de campo.
- Comparação entre simulações e resultados laboratoriais

Simulações e Análises de Circuitos:

- Uso de softwares como Multisim e LTSpice para simulação de circuitos com transístores.
- Comparação entre os resultados simulados e experimentais.

Montagens e Experimentos Laboratoriais:

- Montagem de circuitos com transístores BC557 e 2N2222.
- Análise de parâmetros como corrente de base, coletor e emissor, além de tensões.

Controlo de Motores de Corrente Contínua (CC):

- Uso de transístores MOSFET para controlo da velocidade de motores CC.
- Modulação por Largura de Pulso (PWM) aplicada ao controlo de velocidade.

Aplicações Práticas dos Transístores:

- Amplificação de sinal e controlo de corrente.
- Montagens envolvendo controlo de LEDs e motores CC.

Índice

<i>Resumo</i>	<i>iii</i>
<i>Índice</i>	<i>v</i>
<i>Índice de Figuras</i>	<i>vii</i>
<i>Índice de Tabelas</i>	<i>ix</i>
1.1 Enquadramento	1
1.2 Apresentação do Trabalho	1
1.2.1 Planeamento de projeto	3
1.2.2 Reuniões de acompanhamento	3
1.3 Tecnologias utilizadas	3
3.1 1 Parte	6
3.1.1	6
3.2 Transístores efeito de Campo	36
3.2.1 Controlo da velocidade de um motor CC	38
3.2.1.1 Realização da montagem	38
3.2.1.2 Utilizando o gerador de sinais gere a seguinte onda quadrada.	39
3.2.1.3 Faça variar o Duty Cycle da onda de entrada e complete a seguinte tabela	40
3.2.1.4 Registe as formas de onda de VGS e VDS para um Duty Cycle de 75%.	45
3.2.1.5 De que forma varia a luminosidade do led e o valor médio da tensão VR1? O que pode concluir quanto ao funcionamento do circuito?	46
3.2.1.6 Utilizando o circuito anterior ligue o motor DC de acordo com a figura seguinte:	
47	
3.2.1.7 De que forma pode controlar a velocidade de um motor de corrente contínua? ...	48
3.2.1.8 Qual a função do diodo D1?	48
3.2.1.9 Faça variar o Duty Cycle de 5% a 95%. O que observa quanto à velocidade do motor?	

Índice de Figuras

<i>Figura 1- Exercício 1</i>	6
<i>Figura 2 - Montagem Simulada do transistor BC557</i>	6
<i>Figura 3- Datasheet Maximum ratings BC557</i>	7
<i>Figura 4- Datasheet BC557</i>	8
<i>Figura 5- Cálculos teóricos efetuados</i>	9
<i>Figura 6- Montagem 2N2222</i>	10
<i>Figura 7- Montagem laboratorial 2N2222</i>	11
<i>Figura 8- Montagem exercício 3</i>	14
<i>Figura 9- Montagem laboratorial exercício 3</i>	14
<i>Figura 10-Montagem exercício 4</i>	17
<i>Figura 11- Montagem laboratorial exercício 4</i>	17
<i>Figura 12- Montagem exercício 5</i>	19
<i>Figura 13- Montagem laboratorial exercício 5</i>	20
<i>Figura 14- Montagem com condensador</i>	21
<i>Figura 15- Ondas de entrada e saída simulação</i>	21
<i>Figura 16- Montagem de entrada e saída laboratorial</i>	22
<i>Figura 17- Formula do ganho</i>	23
<i>Figura 18- ex5.8 Onda para 0.4V</i>	24
<i>Figura 19- ex5.8 Onda para 0.6V</i>	25
<i>Figura 20- ex5.8 Onda para 1.2V</i>	25
<i>Figura 21- ex5.8 Onda para 4V</i>	25
<i>Figura 22- ex5.8 Onda para 4V simulada</i>	26
<i>Figura 23- ex5.8 Onda para 4V</i>	26
<i>Figura 24- ex6.1 Onda para 0.4V</i>	27
<i>Figura 25- ex6.1 Onda para 0.6V</i>	28
<i>Figura 26- ex6.1 Onda para 1.2V</i>	28
<i>Figura 27- ex6.1 Onda para 4V</i>	28

<i>Figura 28- Montagem Exercício 7</i>	29
<i>Figura 29- ex.7 Onda de entrada e saída simulada</i>	30
<i>Figura 30- - ex.7 Onda de entrada e saída</i>	30
<i>Figura 31- ex 7.2 Onda para 0.4V</i>	31
<i>Figura 32- ex 7.2 Onda para 0.6V</i>	32
<i>Figura 33- ex 7.2 Onda para 1.2V</i>	32
<i>Figura 34- ex 7.2 Onda para 4V</i>	32
<i>Figura 35- Montagem exercício 8</i>	33
<i>Figura 36- ex 8.1 Onda para 0.4V</i>	34
<i>Figura 37- ex 8.1 Onda para 0.6V</i>	34
<i>Figura 34- ex 8.1 Onda para 1.2V</i>	34
<i>Figura 34- ex 8.1 Onda para 4V</i>	35
<i>Figura 36 Motor DC</i>	36
<i>Figura 37 Princípio de funcionamento Motor DC</i>	36
<i>Figura 38 Forma Onda Duty Cycle</i>	37
<i>Figura 39 Montagem circuito</i>	38
<i>Figura 40 Equação da onda</i>	39
<i>Figura 41 Montagem simulação circuito</i>	39
<i>Figura 42 Configuração do Gerador de sinais</i>	40
<i>Figura 43 5% Duty-Cycle</i>	41
<i>Figura 44 30% Duty Cycle</i>	41
<i>Figura 45 50% Duty Cycle</i>	42
<i>Figura 46 75% Duty Cycle</i>	42
<i>Figura 47 95% Duty Cycle</i>	43
<i>Figura 48 Duty Cycle 30%</i>	44
<i>Figura 49 Duty Cycle 75%</i>	44
<i>Figura 50 Registo onda Simulação</i>	45
<i>Figura 51 Registo onda Contexto Real</i>	45
<i>Figura 52 Duty Cycle</i>	46
<i>Figura 53 Circuito Motor DC</i>	47
<i>Figura 54 Ligação Motor contexto real</i>	47

Índice de Tabelas

<i>Tabela 1- Simulação para os valores para $R4=5.6k\Omega$</i>	7
<i>Tabela 2- Simulação para os valores para $R4=390k\Omega$</i>	7
<i>Tabela 3- Valores laboratoriais para $R4=5.6k\Omega$</i>	7
<i>Tabela 4- Valores laboratoriais para $R4=390k\Omega$</i>	7
<i>Tabela 5- Tabela simulada exercício 2</i>	11
<i>Tabela 6- Tabela com os valores laboratoriais do exercício 2</i>	12
<i>Tabela 7- Tabela exercício 5.8 simulada</i>	24
<i>Tabela 8- Tabela exercício 5.8 laboratorial</i>	24
<i>Tabela 9- Tabela exercício 6.1 simulada</i>	27
<i>Tabela 10- Tabela exercício 6.1</i>	27
<i>Tabela 11- Tabela exercício 7.2 simulada</i>	31
<i>Tabela 12- Tabela exercício 7.2</i>	31
<i>Tabela 13- Tabela exercício 8.1</i>	33
<i>Tabela 14- Tabela exercício 8.1</i>	33
<i>Tabela 14 Valores Tabelados Simulação</i>	40
<i>Tabela 15 Valores Tabelados em contexto real</i>	43
<i>Tabela 16 – Medições contexto Real</i>	49

1 Introdução

1.1 Enquadramento

Este relatório descreve as atividades realizadas no âmbito do segundo projeto prático da disciplina de Eletrónica I, inserido no curso de Licenciatura em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores.

O projeto prático em questão envolve a análise de circuitos com transístores, permitindo o estudo e aprofundamento de conhecimentos sobre algumas características dos transístores bipolares (BJT) e de efeito de campo (MOSFET), enquanto dispositivos semicondutores. Durante o desenvolvimento do trabalho prático, foram analisadas várias configurações utilizando estes dispositivos, incentivando os alunos da disciplina a realizarem análises críticas.

1.2 Apresentação do Trabalho

Os BJTs são apresentados como componentes cruciais, e os alunos são desafiados a entender a sua polarização, o funcionamento como comutador e o conceito de saturação forte. O projeto também aborda aspectos práticos importantes, como o cálculo da potência dissipada e o ganho de potência, bem como a análise de configurações de amplificadores, como o emissor comum e o seguidor de emissor.

O trabalho preparatório envolve a simulação dos circuitos através do software Multisim e a realização de cálculos prévios para facilitar a execução prática nas aulas. Este projeto proporciona uma experiência prática e teórica que visa aprofundar o conhecimento dos estudantes sobre o comportamento de transístores em diversas aplicações e circuitos eletrónicos.

1.3 Tecnologias utilizadas

As tecnologias utilizadas neste trabalho prático incluíram principalmente softwares de simulação para modelar e analisar os circuitos virtualmente. Esses softwares ajudaram a fornecer uma base de referência e comparação para as atividades práticas realizadas em laboratório.

Na parte prática, foram usados diversos equipamentos, como placas de montagem (breadboards) para interligar os circuitos, multímetros digitais, osciloscópio para observar sinais e formas de onda, gerador de frequências para fornecer sinais de entrada variados. Essas ferramentas foram essenciais para testar e validar os resultados das simulações.

2 Contexto

A eletrónica é uma área extremamente vasta, repleta de uma infinidade de componentes, cada um com as suas características e aplicações específicas. Entre eles, os transístores desempenham um papel fundamental. Os Dispositivos semicondutores que revolucionaram o mundo da tecnologia, sendo essenciais para o desenvolvimento de grandes invenções e avanços tecnológicos. O transístor, em particular, atua como um componente eletrónico capaz de amplificar e controlar a corrente elétrica, sendo amplamente utilizado em diversos circuitos, desde amplificadores de áudio até dispositivos digitais, como microprocessadores.

Este relatório tem como objetivo descrever as atividades realizadas em relação a algumas das principais características desse dispositivo, permitindo um aprofundamento mais detalhado sobre seu funcionamento e aplicações.

3 Descrição técnica do Trabalho Prático

3.1 1

1. Analise o seguinte circuito.

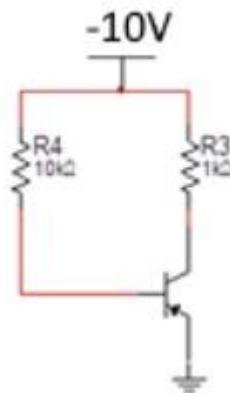


Figura 1- Exercício 1

1.1 Qual é o tipo de transistão?

Transistor PNP, a corrente flui do emissor para o coletor. O emissor está a 0 Volts e o coletoor está a -10 Volts, o coletoor é mais negativo em relação ao emissor. Assim sendo, a corrente flui do ponto de maior potencial (emissor) para o ponto de menor potencial (coletoor).

1.2 Monte o circuito da figura.

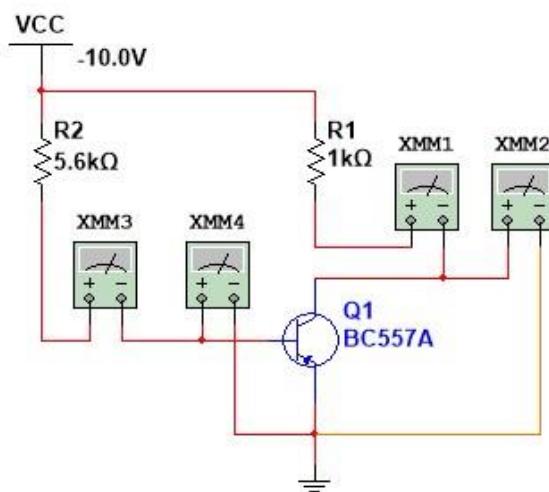


Figura 2 - Montagem Simulada do transistão BC557

Proceda de modo idêntico ao das alíneas anteriores, preencha as tabelas seguintes.

Simulação:

I_B	-1,645 mA
I_C	-9,944 mA
V_{BE}	-790,03 mV
V_{CE}	-55,801 mV

Tabela 1- Simulação para os valores

$$R4=5.6k\Omega$$

I_B	-23,782 uA
I_C	-5,397 mA
V_{BE}	-724,902 mV
V_{CE}	-4,603 V

Tabela 2- Simulação para os valores para

$$R4=390k\Omega$$

Laboratorial:

I_B	-1,63 mA
I_C	-9,999 mA
V_{BE}	- 0,793 V
V_{CE}	-40 mV

Tabela 3- Valores laboratoriais para

$$R4=5.6k\Omega$$

I_B	-20 uA
I_C	-6,63 mA
V_{BE}	-0,689 V
V_{CE}	-3,299 V

Tabela 4- Valores laboratoriais para

$$R4=390k\Omega$$

Para proceder aos cálculos teóricos deve-se primeiro tomar conhecimentos dos dados disponibilizados pelo fabricante no datasheet do componente. Datasheet do transistor BJT PNP (BC557):

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector - Emitter Voltage BC556 BC557 BC558	V_{CEO}	-65 -45 -30	Vdc
Collector - Base Voltage BC556 BC557 BC558	V_{CBO}	-80 -50 -30	Vdc
Emitter - Base Voltage	V_{EBO}	-5.0	Vdc
Collector Current - Continuous - Peak	I_C I_{CM}	-100 -200	mAdc
Base Current - Peak	I_{BM}	-200	mAdc
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ C$ Derate above $25^\circ C$	P_D	625 5.0	mW mW/ $^\circ C$
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ C$ Derate above $25^\circ C$	P_D	1.5 12	W mW/ $^\circ C$
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-55 to +150	$^\circ C$

Figura 3- Datasheet Maximum ratings BC557

ON CHARACTERISTICS

DC Current Gain ($I_C = -10 \mu\text{Adc}$, $V_{CE} = -5.0 \text{ V}$)	A Series Device B Series Devices C Series Devices	h_{FE}	-	90	-	-
($I_C = -2.0 \text{ mAdc}$, $V_{CE} = -5.0 \text{ V}$)	BC557 A Series Device B Series Devices C Series Devices	120 120 180 420	- 170 290 500	800	220	460
($I_C = -100 \text{ mAdc}$, $V_{CE} = -5.0 \text{ V}$)	A Series Device B Series Devices C Series Devices	- - -	120 180 300	-	-	-
Collector-Emitter Saturation Voltage ($I_C = -10 \text{ mAdc}$, $I_B = -0.5 \text{ mAdc}$) ($I_C = -10 \text{ mAdc}$, $I_B = \text{see Note 1}$) ($I_C = -100 \text{ mAdc}$, $I_B = -5.0 \text{ mAdc}$)		$V_{CE(\text{sat})}$	- - -	-0.075 -0.3 -0.25	-0.3 -0.6 -0.65	V
Base-Emitter Saturation Voltage ($I_C = -10 \text{ mAdc}$, $I_B = -0.5 \text{ mAdc}$) ($I_C = -100 \text{ mAdc}$, $I_B = -5.0 \text{ mAdc}$)		$V_{BE(\text{sat})}$	- -	-0.7 -1.0	-	V
Base-Emitter On Voltage ($I_C = -2.0 \text{ mAdc}$, $V_{CE} = -5.0 \text{ Vdc}$) ($I_C = -10 \text{ mAdc}$, $V_{CE} = -5.0 \text{ Vdc}$)		$V_{BE(\text{on})}$	-0.55 -	-0.62 -0.7	-0.7 -0.82	V

Figura 4- Datasheet BC557

Cálculos teóricos efetuados:

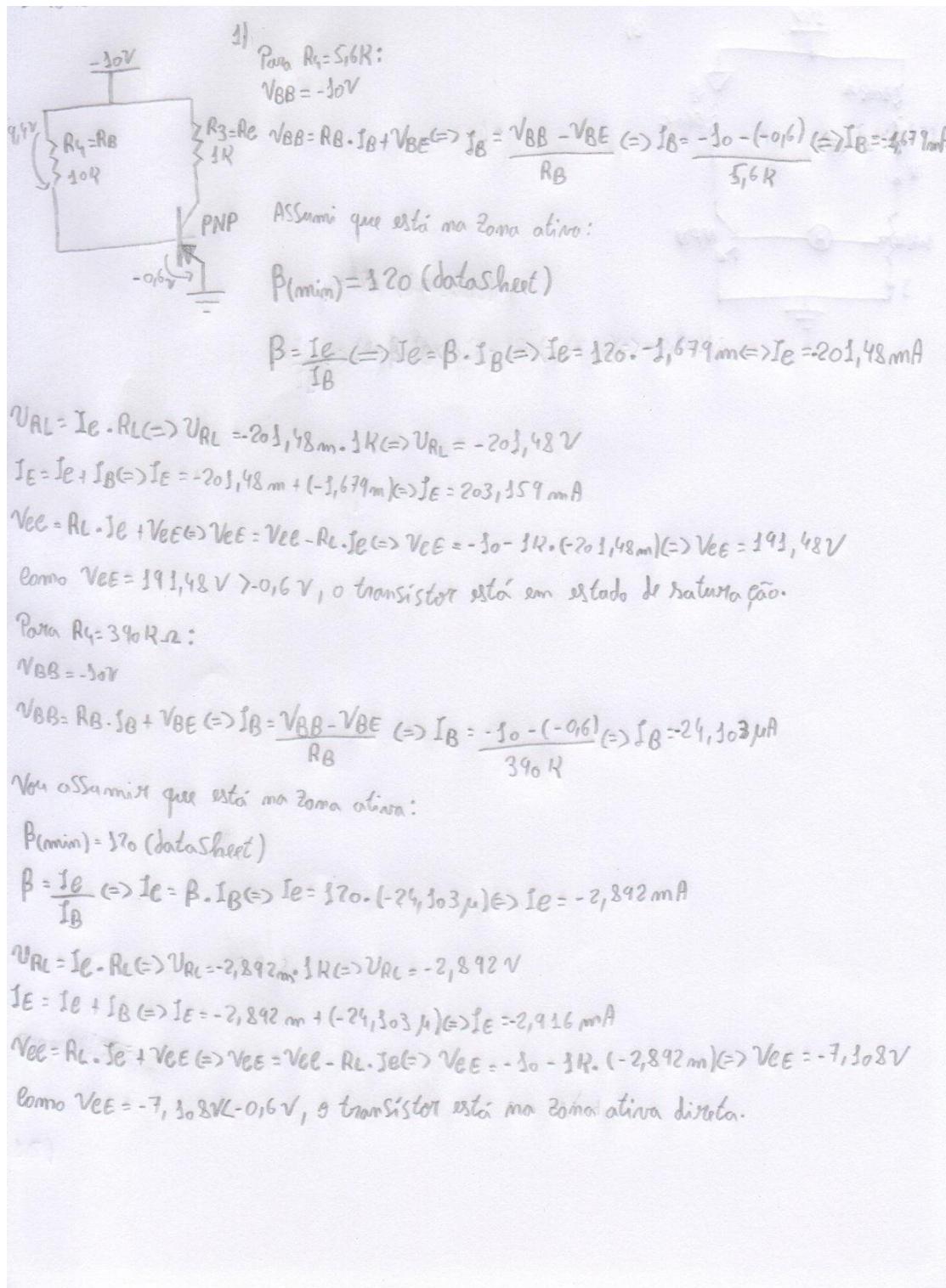


Figura 5- Cálculos teóricos efetuados

(Nota: V_{BE} foi arredondado para 0,6V.)

1.3 Qual o estado de condução do transístor para cada caso?

Para o caso em que $R_4 = 5,6k\Omega$ o transístor opera na zona de saturação, pois $V_{CE} = -55,801\text{ mV} > -0,6\text{ V}$.

Para o caso em que $R_4 = 390k\Omega$ o transístor opera na zona ativa, pois $V_{CE} = -4,603\text{ V} < -0,6\text{ V}$.

1.4 Como procederia para levar o transístor ao corte?

Para levar o transístor ao estado de corte tenho de tornar $V_{BE} > -0,6\text{ V}$, por isso se influenciar qualquer valor da fórmula em que V_{BE} é compreendida consigo levar o transístor ao estado de corte. Uma maneira seria aumentar drasticamente a resistência de base, já outra maneira passaria por ligar a base ao ground.

2. Monte o circuito da figura. Note que pode ajustar a corrente de coletor do transístor (repare no brilho do LED), controlando a corrente de base por intermédio do potenciómetro.

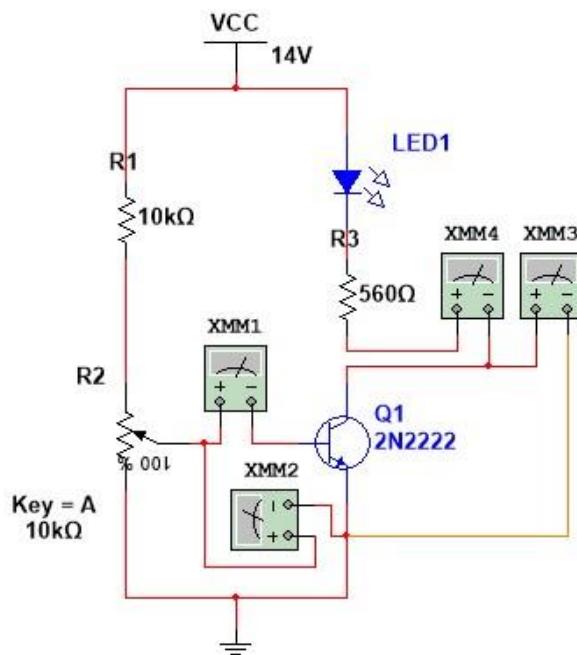


Figura 6- Montagem 2N2222

Montagem laboratorial:

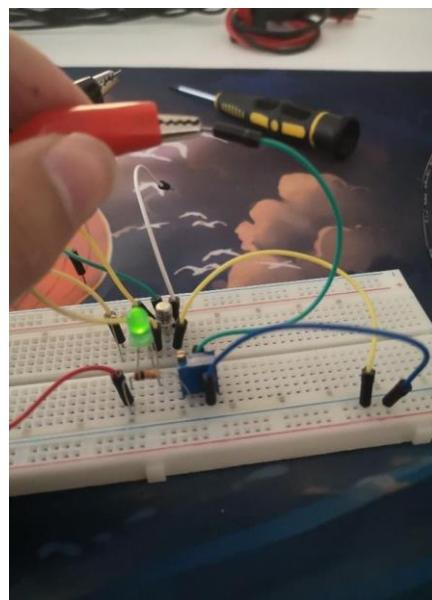


Figura 7- Montagem laboratorial 2N2222

2.1 Após efetuar as medidas e os cálculos necessários, preencha a tabela anterior (deve registrar pelo menos duas medições na zona de liner e na zona de saturação).

Valores simulados:

I_B	UN	V_{BE}	UN	I_C	UN	V_{CE}	UN	G = I_C/I_B
-131,71	pA	700	nV	13,099	nA	12,977 V	V	- 99,4533
86,637	nA	349,958	mV	26,731	nA	7,984 V	V	0,30854
35,598	uA	666,181	mV	7,083	mA	7,984 V	V	198,972
241,513	uA	714,899	mV	20,394	mA	448,006 mV	mV	84,4427
378,699	uA	718,341	mV	20,942	mA	138,917 mV	mV	55,2999
471,149	uA	719,36	mV	20,969	mA	123,93 mV	mV	44,4488
541,136	uA	720,101	mV	20,982	mA	116,521 mV	mV	38,774
598,89	uA	720,703	mV	20,99	mA	111,708 mV	mV	35,0482

Tabela 5- Tabela simulada exercício 2

Valores em laboratório:

I_B	UN	V_{BE}	UN	I_C	UN	V_{CE}	UN	$G = I_C / I_B$	R
aprox.0	A	0,253	V	aprox.0	A	12,3	V	0	10kOhm
aprox.0	A	0,445	V	aprox.0	A	12,27	V	0	9,68kOhm
0,03	mA	0,611	V	0,656	mA	11,67	V	21,867	9,43kOhm
0,11	mA	0,695	V	19,05	mA	1,443	V	173,182	9,05kOhm
0,389	mA	0,732	V	21,3	mA	69,5	mV	54,756	8kOhm
0,526	mA	0,737	V	21,2	mA	56,7	mV	40,304	7kOhm
0,712	mA	0,742	V	21,1	mA	47,4	mV	29,635	5kOhm
1,096	mA	0,752	V	21,5	mA	37,7	mV	19,617	1kOhm

Tabela 6- Tabela com os valores laboratoriais do exercício 2

Nota: Quando o Potenciômetro esta a 10kOhm o multímetro não é capaz de medir na escala dos pA pois estamos a falar de uma escala de resolução muito pequena.

2.2 Qual o valor da corrente de base quando o cursor do potenciômetro está em X?

Quando o potenciômetro está com 10kOhm, $I_B = -131,71$ pA. Não foi possível dar uma resposta com base nos dados laboratoriais tendo em conta que o multímetro não tinha uma escala pequena o suficiente para medir I_B .

2.3 Quando é que o transístor se encontra aproximadamente ao corte?

O transístor encontra-se aproximadamente ao corte quando a resistência do potenciômetro encontra-se nos valores de 0% -90% do valor do máximo do potenciômetro.

2.4 Para que valores da corrente de base é que o transístor funciona na zona ativa?

O transístor encontra-se na zona ativa nos valores de $I_B = 0,03$ mA e de $I_B = 0,11$ mA.

2.5 Quando é que o transístor se encontra saturado?

Em todos os outros casos o transístor está em estado de saturação, pois $V_{CE} < 0,3$ V.

2.6 Diga, justificando, se as seguintes afirmações são verdadeiras ou falsas:

- Quando funciona na zona ativa, o transístor comporta-se como um dispositivo linear, uma vez que o ganho DC em corrente se mantém constante.

A afirmação é verdadeira, pois quando na zona ativa o transístor é comumente usado como amplificador de corrente.

- Na saturação, a corrente no coletor é limitada apenas pela resistência de 560Ω .

Na região de saturação, o transístor está completamente "ligado", e a tensão coletor-emissor (V_{CE}) é muito baixa (próxima de 0V). No entanto, a corrente no coletor (I_C) não é limitada apenas pela resistência de 560Ω (R_{Load}). A corrente também depende da tensão de alimentação (V_{CC}) e da tensão V_{CE} . De acordo com a Lei de Ohm, a corrente no coletor seria dada pela fórmula:

$$V_{CC} = R * I_C + V_{CE}$$

Quando o transístor está na saturação, V_{CE} é muito pequeno, mas não é zero, logo a corrente no coletor é determinada pela resistência R e pela tensão aplicada (V_{CC}), sendo também influenciada pelas características do transístor.

Temos então que:

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_L} = \frac{V_{CC}}{R_L}$$

3. Monte o circuito da figura.

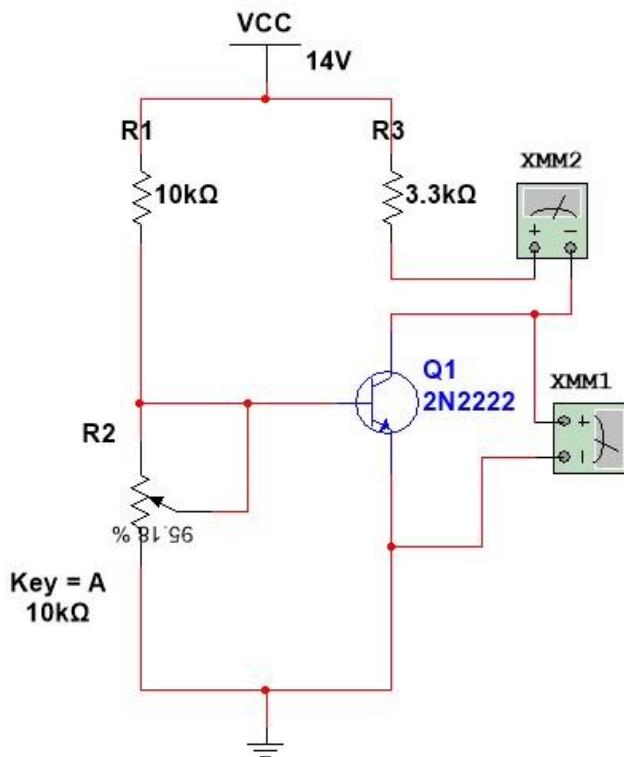


Figura 8- Montagem exercício 3

Montagem laboratorial:

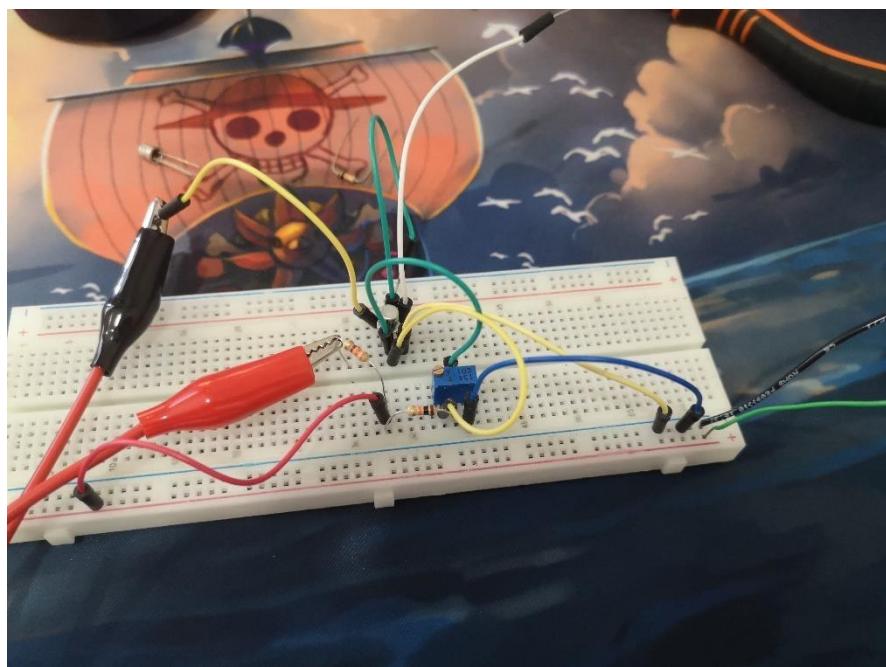


Figura 9- Montagem laboratorial exercício 3

3.1 Ajuste o potenciômetro de modo que VCE≈ 7 V. Espere que os valores de VCE e IC estabilizem e registe-os.

Valores simulados:

$$I_C = 2,1 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 7,07 \text{ V}$$

Valores laboratoriais:

$$I_C = 2,11 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 7 \text{ V}$$

3.2 Substitua o transístor utilizado por outro com a mesma referência e meça de novo VCE e IC.

Na simulação mesmo trocando os transístores os valores não mudam, pois é considerada uma situação ideal em que os transístores partilham das mesmas propriedades.

$$I_C = 2,06 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 6,93 \text{ V}$$

3.3 Que conclui quanto à estabilidade do ponto de funcionamento?

Comparando dois transístores é possível verificar que os valores de Vce e de Ic não são precisamente iguais, isso implica que o ponto de funcionamento não é estável em todos os casos.

3.4 Coloque um dedo sobre a caixa do transístor e mantenha-o assim durante algum tempo, enquanto observa o que se passa com o valor de V_{CE}. Que concluir quanto à estabilidade do ponto de funcionamento?

A estabilidade do transístor pode ser afetada uma vez que, tal como indicado no datasheet, a variação da temperatura interfere com os valores dos parâmetros do transístor (por exemplo, V_{BE} e V_{CE}). Como consequência o ponto de funcionamento do transístor também poderá ser alterado.

Após experimentação laboratorial: Foi possível confirmar as nossas suposições uma vez que quando colocamos o dedo em cima do transístor os valores de V_{CE} variaram e tal como dito anteriormente isso pode implicar alterações ao ponto de funcionamento.

4. Coloque entre o emissor e a massa uma resistência uma resistência de 820 Ω (ver figura seguinte).

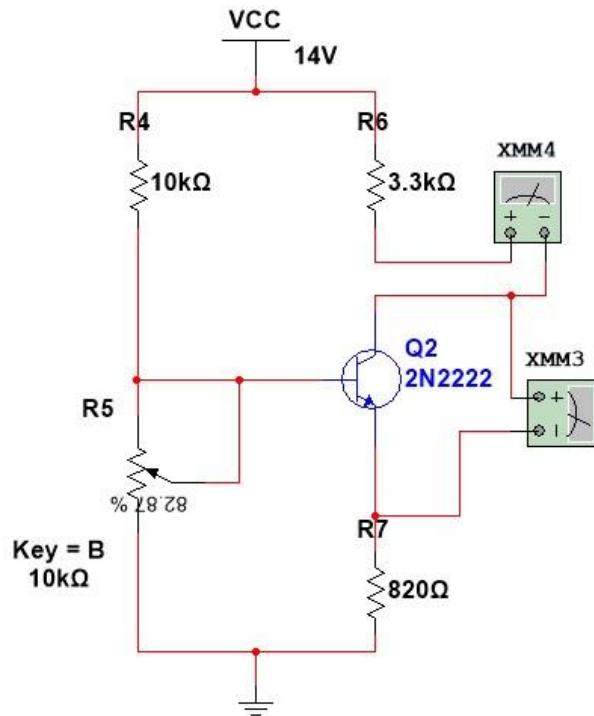


Figura 10-Montagem exercício 4

Montagem laboratorial:

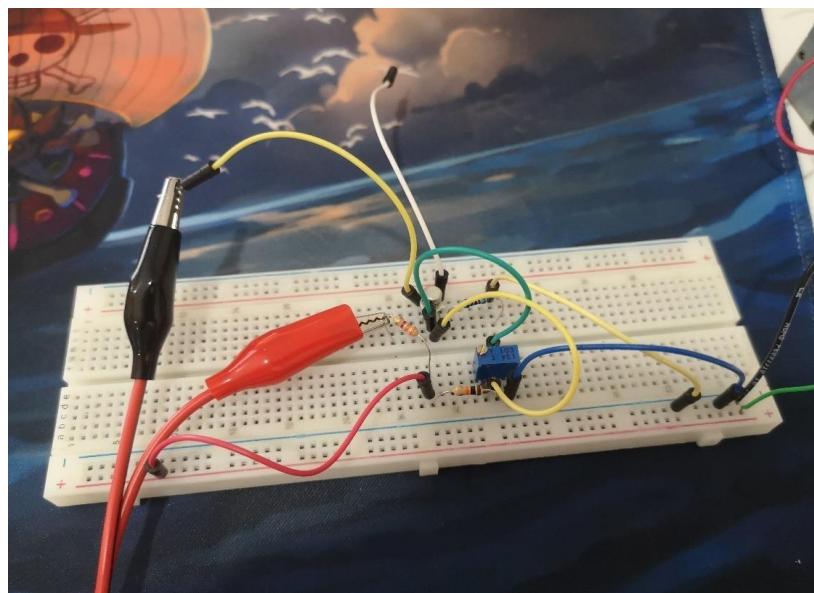


Figura 11- Montagem laboratorial exercício 4

4.1 Utilizando o potenciômetro, faça de novo $V_{CE} \approx 7V$. Espere que os valores de V_{CE} e I_C estabilizem e registe-os.

Valores simulados:

$$I_C = 1,697 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 7 \text{ V}$$

Valores laboratoriais:

$$I_C = 1,685 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 7 \text{ V}$$

4.2 Substitua o transístor pelo que utilizou em primeiro lugar e meça de novo I_C e V_C .

Na simulação mesmo trocando os transístores os valores não mudam, pois é considerada uma situação ideal em que os transístores partilham das mesmas propriedades.

Valores laboratoriais:

$$I_C = 1,682 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 7.03 \text{ V}$$

4.3 Compare os dois circuitos (com e sem resistência de emissor) em termos de estabilidade do ponto de funcionamento.

Após simulação: É mais fácil ajustar o potenciômetro de modo que o valor de V_{CE} seja igual a 7V. Isso indica que a resistência de emissor contribui para a estabilidade do ponto de funcionamento do transistão.

Após experimentação laboratorial: No circuito com resistência de emissor nota-se que o V_{CE} é mais fácil de ajustar em 7V, isso porque quando rodamos o potenciômetro a tensão não sofre uma variação tão grande como no circuito sem resistência de emissor. Também é possível perceber com os valores que retiramos de V_{CE} e de I_C que quando trocamos o transistão por um de referência igual, os valores em ambos os casos em que usamos uma resistência no emissor não sofrem alterações significativas, já no caso em que não usamos a resistência os valores são ligeiramente mais distantes.

5. Ajuste o potenciômetro na montagem da figura seguinte, de forma que $V_{CE} \approx 7V$.

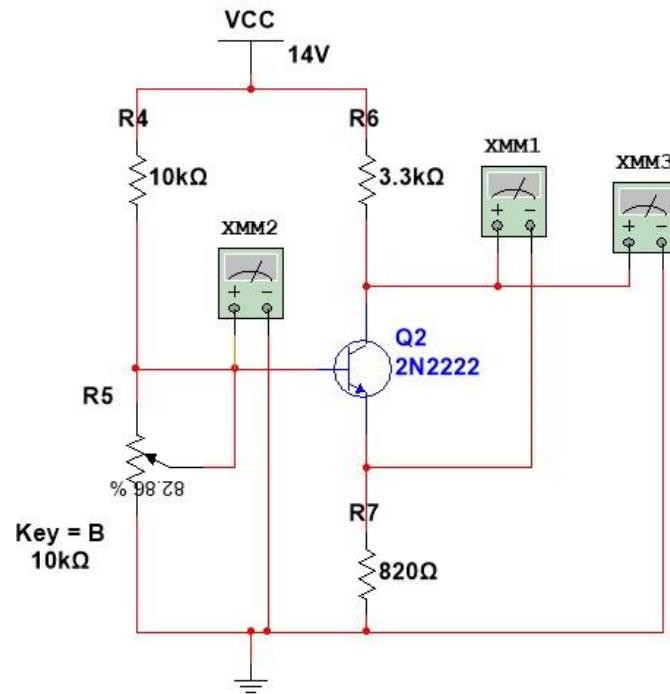


Figura 12- Montagem exercício 5

Montagem laboratorial:

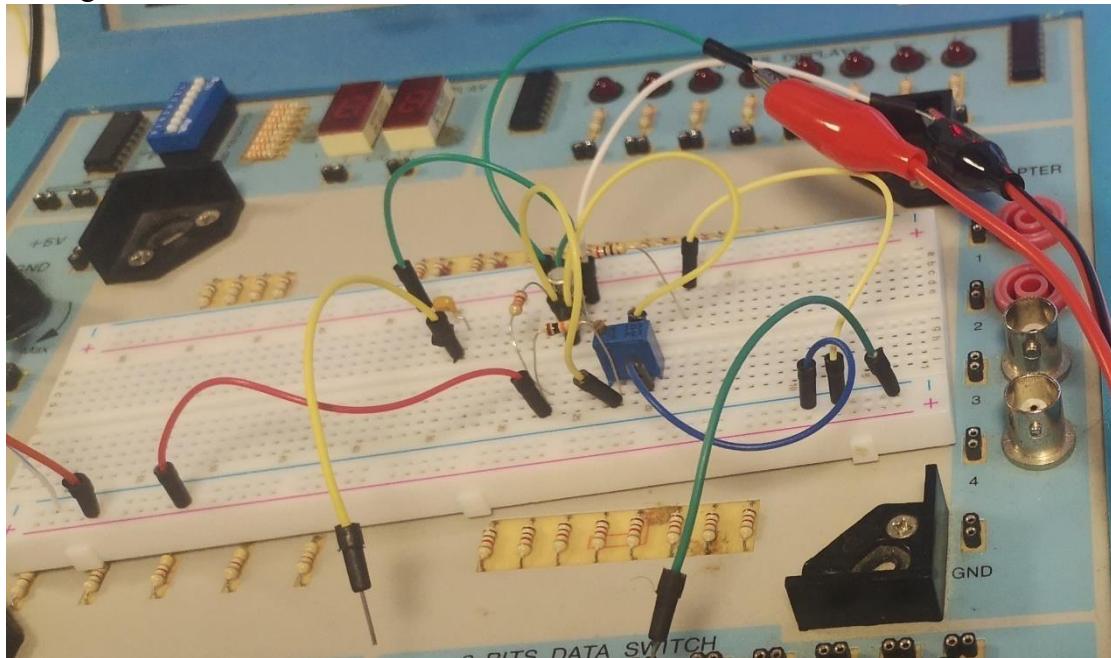


Figura 13- Montagem laboratorial exercício 5

5.1 Registe os valores da tensão no coletor e na base.

Valores simulados:

$$V_{CE} = 6,995\text{v}$$

$$V_B = 2,034\text{V}$$

$$V_C = 8,396\text{V}$$

Valores laboratoriais:

$$V_{CE} = 7\text{V}$$

$$V_B = 2\text{V}$$

$$V_C = 8,38\text{V}$$

5.2 Aplique à base do transístor, através de um condensador de $1\mu\text{F}$, um sinal com 0.7Vpp e 3KHz ($v_i(t)$).

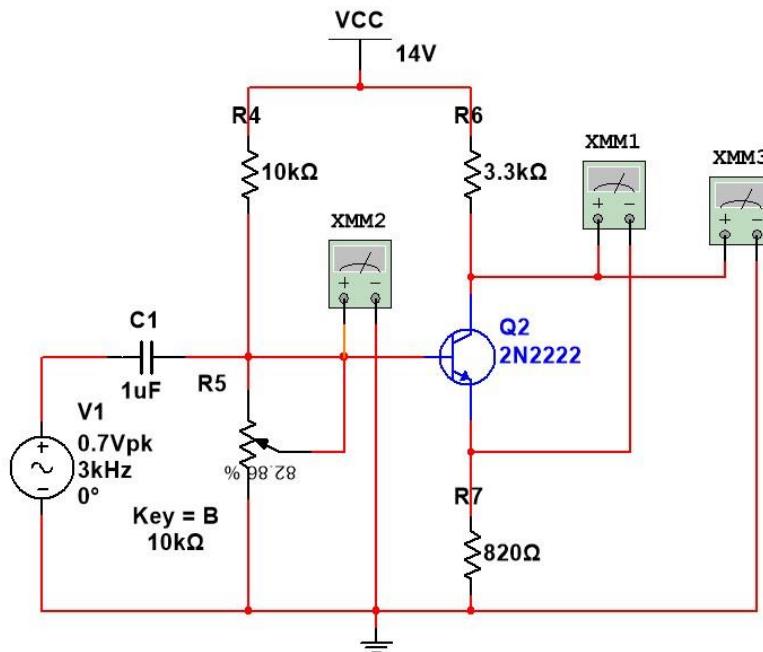


Figura 14- Montagem com condensador

5.3 Registe as formas de onda à entrada e à saída do circuito.

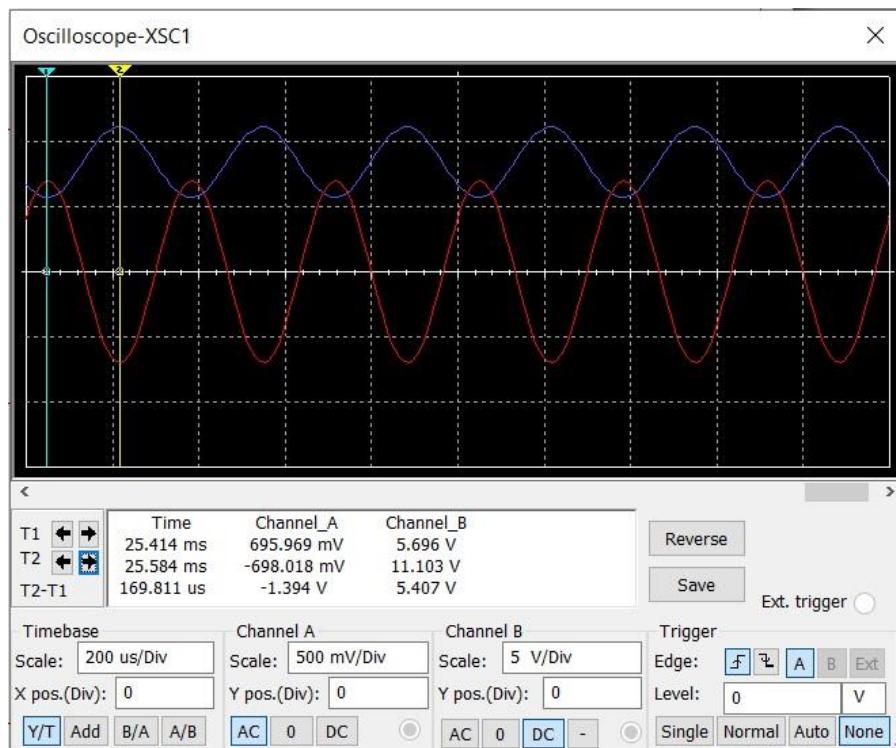


Figura 15- Ondas de entrada e saída simulação

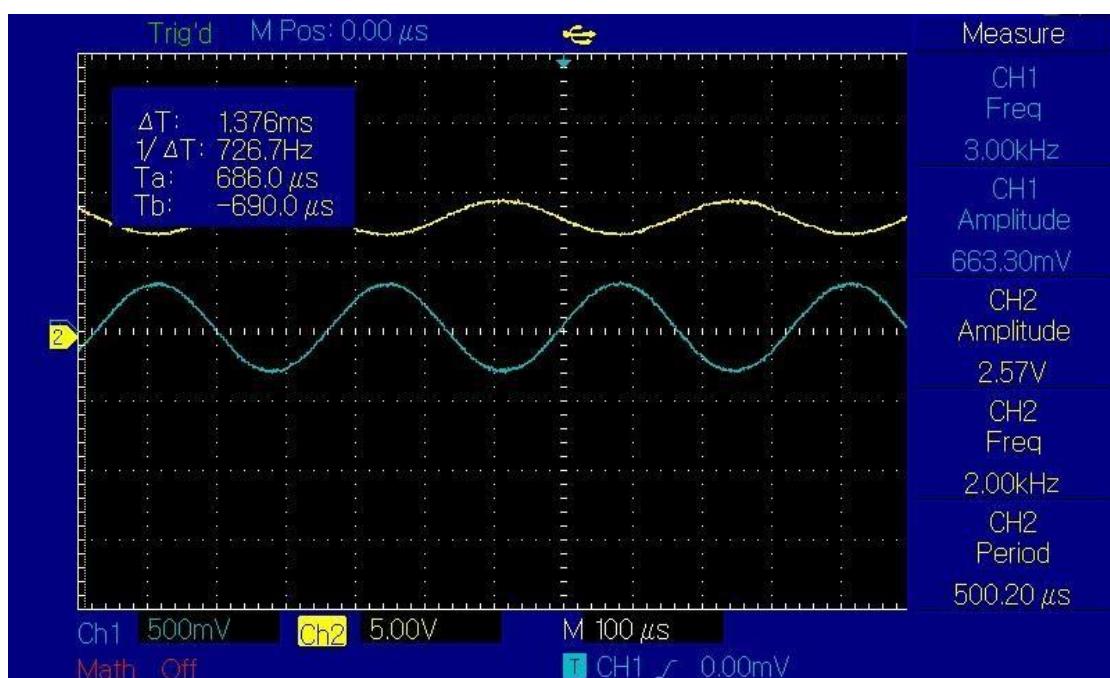


Figura 16- Montagem de entrada e saída laboratorial

5.4 Qual a relação de fase entre a saída e a entrada?

Acontece uma defasagem de 180 graus, esta situação é característica do amplificador Emissor Comum, pois é a única configuração que dá uma inversão de 180° entre os sinais de entrada e saída. Isso acontece, pois, aumentando a tensão de entrada implicará num aumento da corrente de base e num aumento na corrente do coletor que vai aumentar proporcionalmente com o ganho do transístor que terá como consequência a queda de tensão entre o coletor e o emissor.

5.5 Quais os valores médios das tensões no coletor e na base?

Valores simulados:

$$V_{CE} = 6,999V$$

$$V_{BE} = 633,342 \text{ mV}$$

$$V_B = 2,033V$$

$$V_C = 8,399V$$

Valores laboratoriais:

$$V_{CE} = 6,88V$$

$$V_{BE} = 0,61V$$

$$V_B = 1.95 \text{ V}$$

$$V_C = 1.34V$$

5.6 Qual o ganho AV da montagem?

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{\beta R_C}{r_\pi + (1+\beta)R_E} = -\frac{R_C}{R_E}$$

Figura 17- Formula do ganho

Com a fórmula do ganho do transístor é possível deduzir que o ganho será:

$$Av = -\frac{R_c}{R_E} = \frac{3.3k\Omega}{820\Omega} = -4,024V$$

5.7 Os valores medidos estão de acordo com os que esperava?

Sim, os valores estão dentro dos valores simulados, como podemos observar no CH1 osciloscópio temos um valor de entrada de 663.30mV e na saída temos um valor de aproximadamente 4 vezes maior ao da entrada, 2.57V.

5.8 Varie a amplitude do sinal aplicado à entrada. Calcule o ganho em tensão (vo/vi) para os valores de vi indicados na tabela.

Valores simulados:

vi(Vpp)	vo(Vpp)	vo/vi
0,4	1,549	3,873
0,6	2,322	3,87
1,2	4,639	3,866
4	10,804	2,701

Tabela 7- Tabela exercício 5.8 simulada

Valores laboratoriais:

vi(Vpp)	vo(Vpp)	vo/vi
0,4	1,68	4,2
0,6	2,38	3,966667
1,2	4,75	3,958333
4	10,99	2,7475

Tabela 8- Tabela exercício 5.8 laboratorial

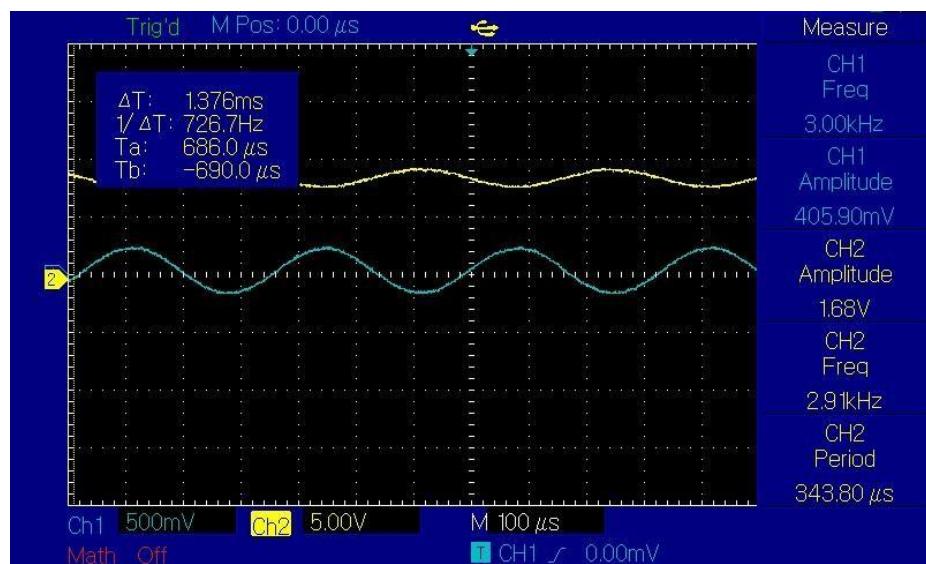


Figura 18- ex5.8 Onda para 0.4V

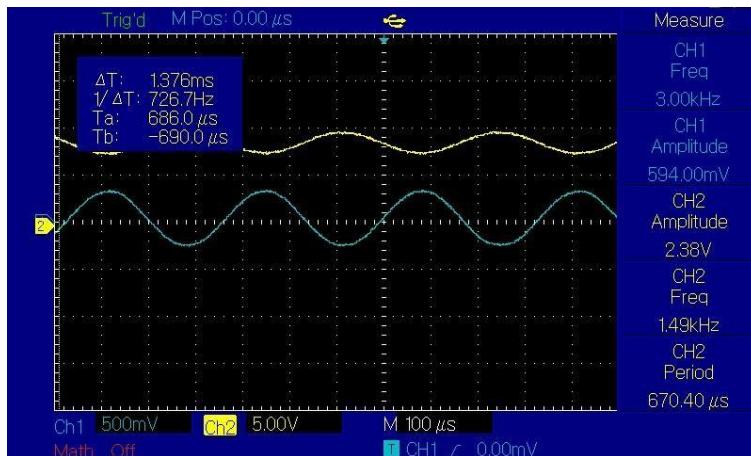


Figura 19- ex5.8 Onda para 0.6V

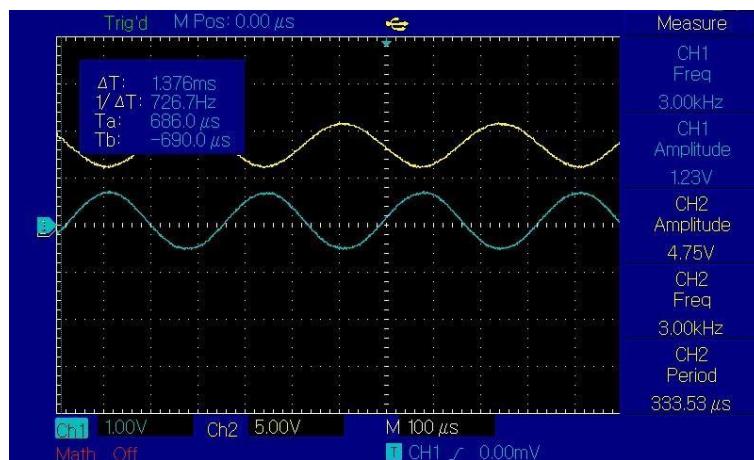


Figura 20- ex5.8 Onda para 1.2V

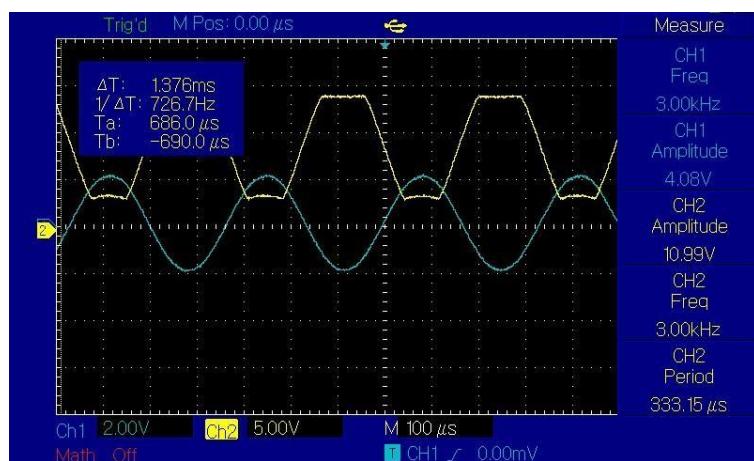


Figura 21- ex5.8 Onda para 4V

5.9 Registe as formas de onda à entrada e à saída quando $v_i=4$ Vpp. Indique, sobre o gráfico, as situações em que o transístor está no corte e na saturação.

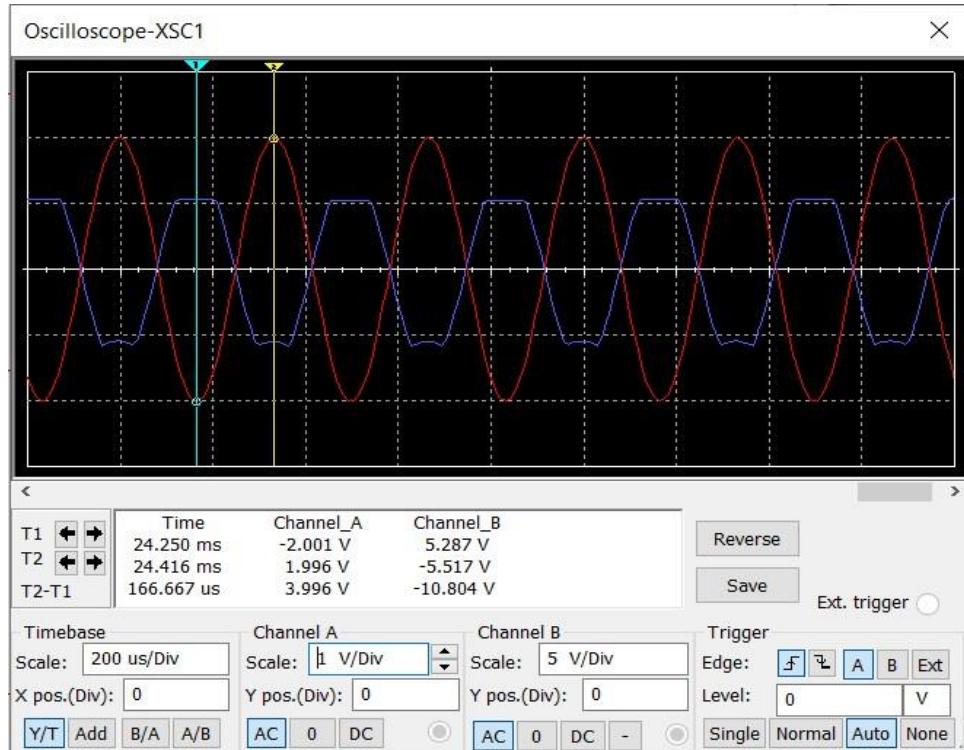


Figura 22- ex5.8 Onda para 4V simulada

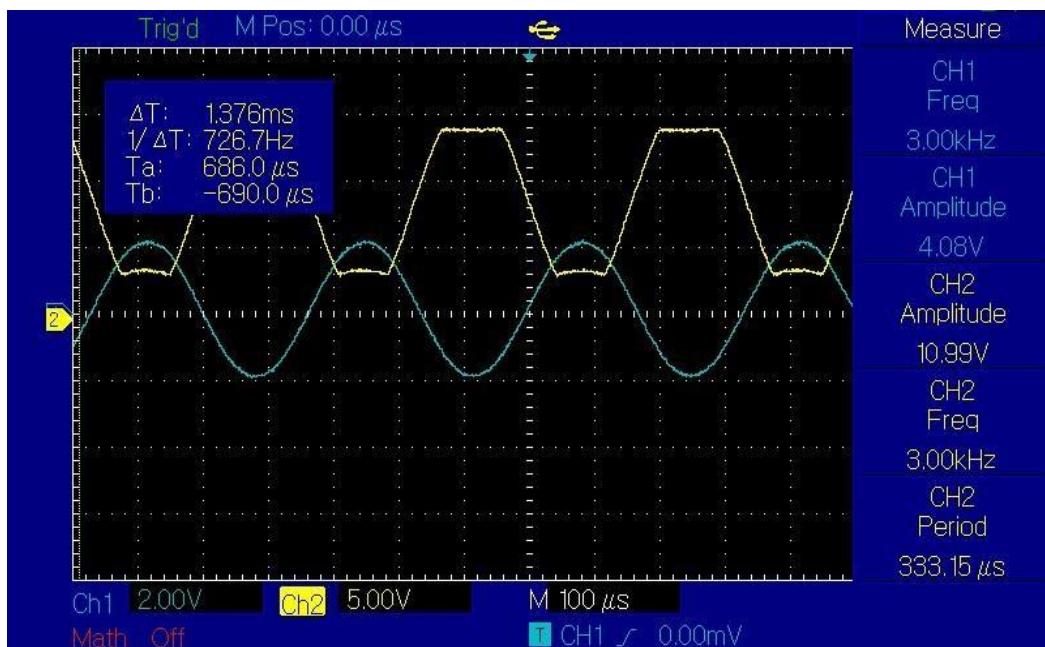


Figura 23- ex5.8 Onda para 4V

Quando no semi ciclo positivo da onda de entrada é possível verificar que através da onda de saída o transístor está em corte, por sua vez quando no semi ciclo negativo da onda de entrada podemos ver a onda de saída com a mesma tensão que VCC, logo o transístor saturou.

6. Substitua RE (resistência no emissor do transístor) por uma resistência de 270Ω e faça de novo $VCE=7V$.

6.1 Proceda do mesmo modo que em 5.8, preencha agora a seguinte tabela.

Valores simulados:

vi(Vpp)	vo(Vpp)	vo/vi
0,4	4,479	11,198
0,6	6,728	11,213
1,2	12,612	10,51
4	12,116	3,029

Tabela 9- Tabela exercício 6.1 simulada

Valores laboratoriais:

vi(Vpp)	vo(Vpp)	vo/vi
0,4	4,76	11,9
0,6	6,93	11,55
1,2	12,57	10,475
4	12,57	3,1425

Tabela 10- Tabela exercício 6.1

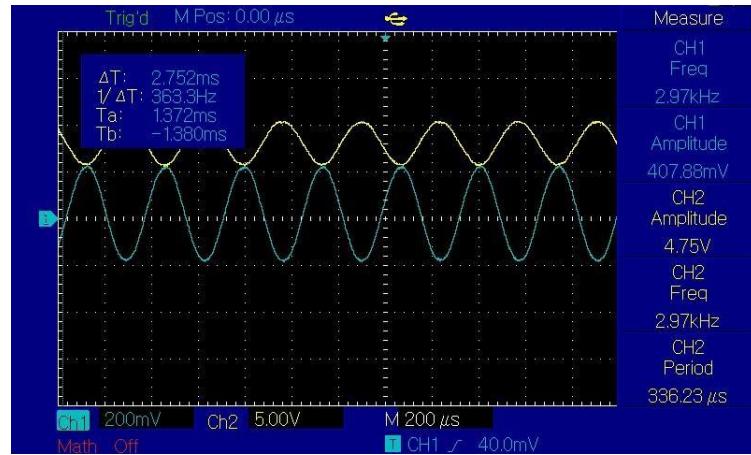


Figura 24- ex6.1 Onda para 0.4V

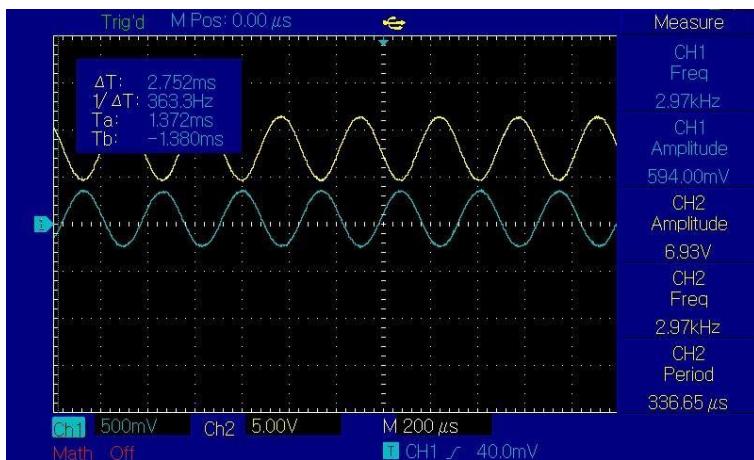


Figura 25- ex6.1 Onda para 0.6V

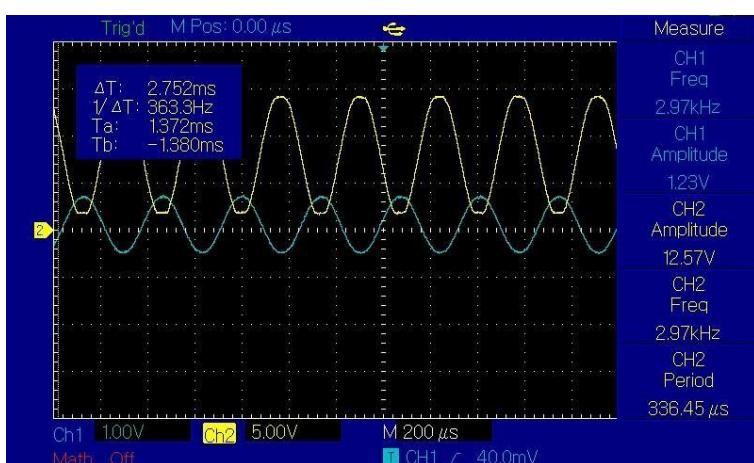


Figura 26- ex6.1 Onda para 1.2V

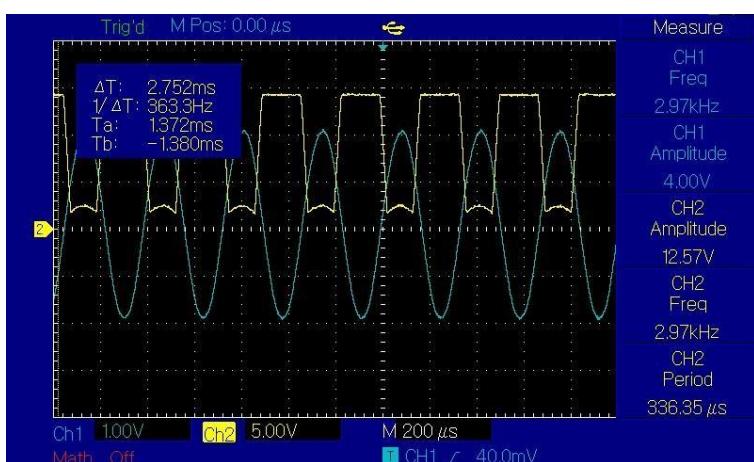


Figura 27- ex6.1 Onda para 4V

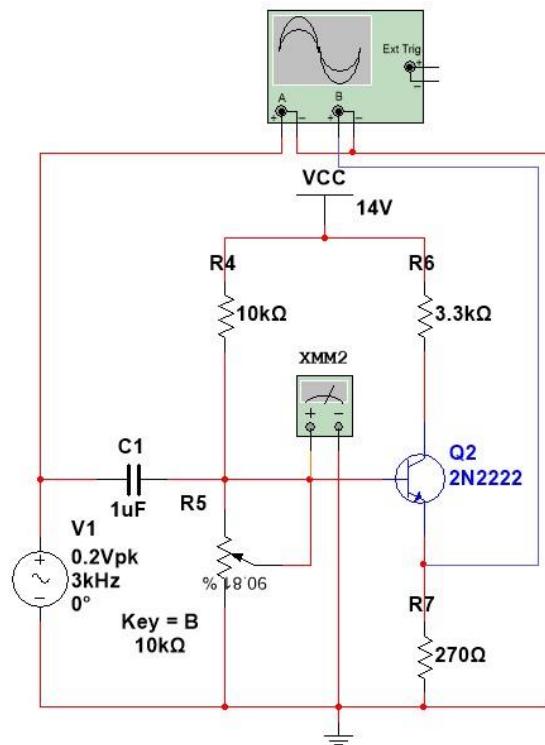
6.2 Que nota de novo, relativamente à montagem anterior? Que pode concluir?

Os ganhos são maiores, também é possível perceber que a queda do ganho quando o transístor está saturado é muito mais acentuada. Isto deve-se ao fato de que a resistência de R_E é menor, pois a queda de tensão em R_E também será menor o que significa que á saída vou ter um V_o maior.

6.3 Na montagem da figura seguinte ajuste a entrada até ter 0.4 Vpp. Coloque em série com a saída um condensador de $0.1\mu F$. Que nota de novo?

Tendo em conta as figuras em baixo apresentadas, é possível perceber que o condensador esta a eliminar o offset do sinal que é produzido pela componente DC do circuito, este é chamado de condensador de acoplamento.

7. Transfira a saída do circuito do coletor para o emissor (figura seguinte).



7.1 Que nota de novo, relativamente à configuração anterior?

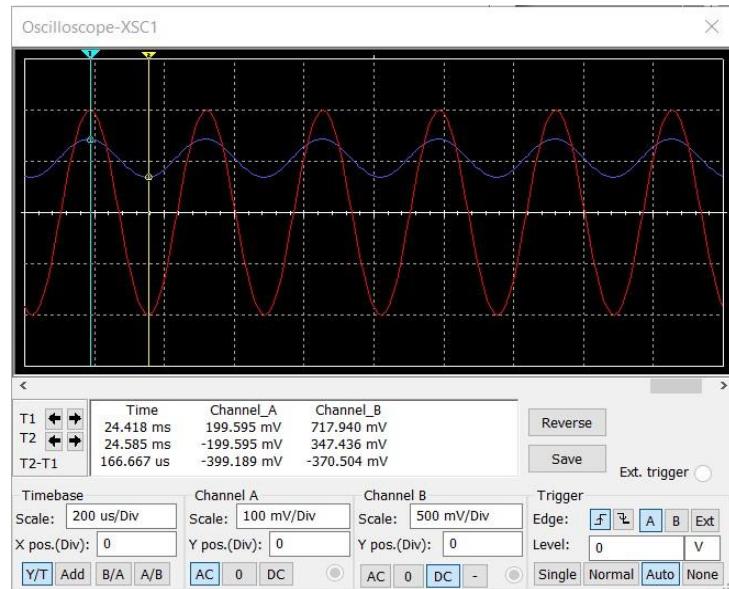


Figura 29- ex.7 Onda de entrada e saída simulada

Montagem laboratorial:

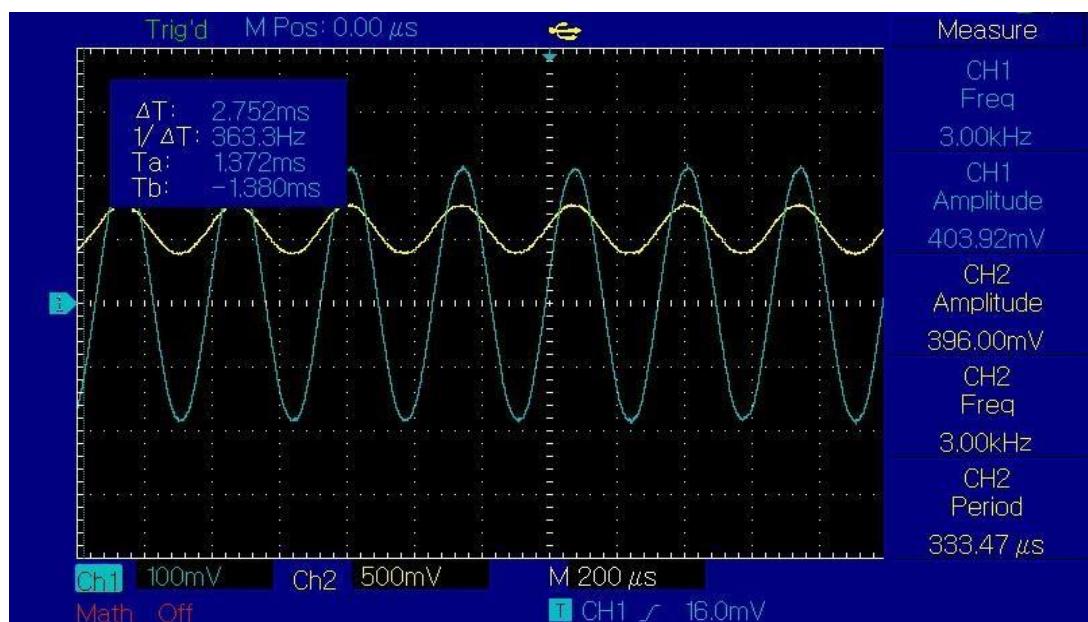


Figura 30- - ex.7 Onda de entrada e saída

Agora pelo analisando a saída e comparando com a entrada vemos que estas estão em fase uma com a outra.

7.2 Variando a amplitude do sinal colocado à entrada, calcule o ganho em tensão da montagem.

Valores simulados:

vi(Vpp)	vo(Vpp)	vo/vi
0,4	0,371	0,928
0,6	0,553	0,922
1,2	1,067	0,889
4	1,865	0,391

Tabela 11- Tabela exercício 7.2 simulada

Valores laboratoriais:

vi(Vpp)	vo(Vpp)	vo/vi
0,4	0,386	0,965
0,6	0,564	0,94
1,2	1,08	0,9
4	1,84	0,46

Tabela 12- Tabela exercício 7.2

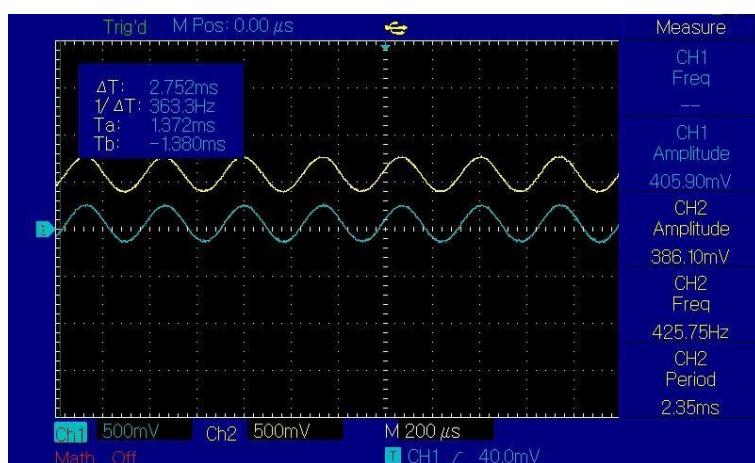


Figura 31- ex 7.2 Onda para 0.4V

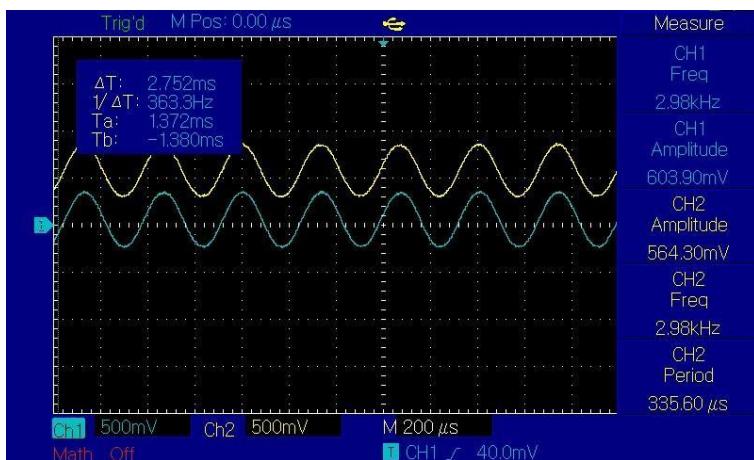


Figura 32- ex 7.2 Onda para 0.6V



Figura 33- ex 7.2 Onda para 1.2V

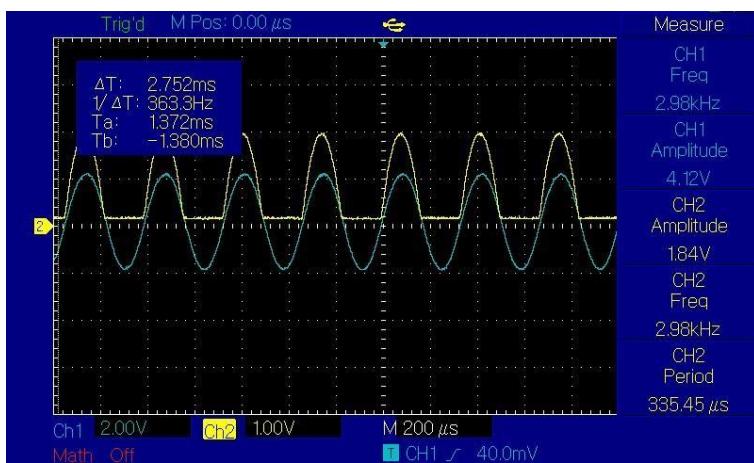


Figura 34- ex 7.2 Onda para 4V

7.3 Que conclui quanto ao ganho em tensão da montagem?

O ganho é praticamente desprezível, esta não é uma boa montagem se o objetivo é amplificar a tensão com o transistador. Também é possível observar que quanto mais aumentamos a V_i consequentemente V_o diminui.

8. Substitua a resistência de RE por uma de 470Ω e repita o procedimento anterior.

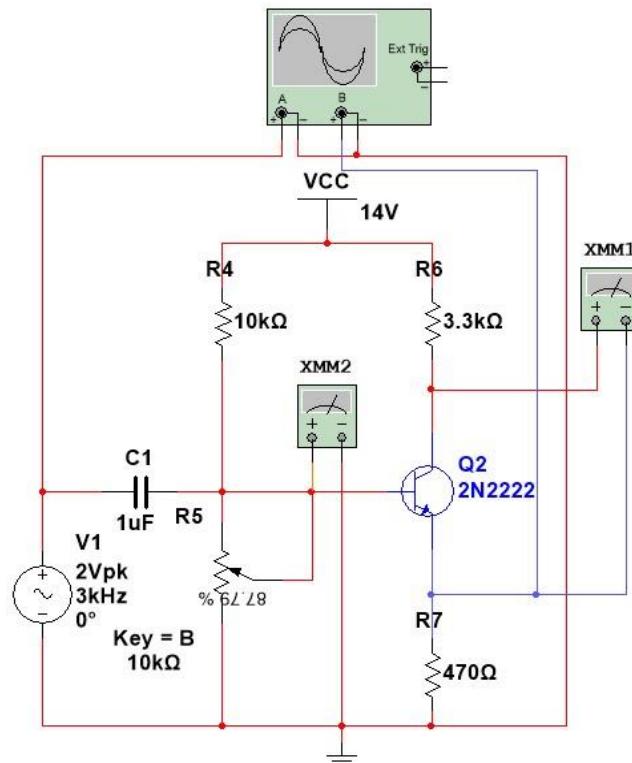


Figura 35- Montagem exercício 8

8.1 Preencha a tabela.

Valores simulados:

vi(Vpp)	vo(Vpp)	vo/vi
0,4	0,382	0,955
0,6	0,572	0,953333
1,2	1,139	0,949167
4	2,46	0,615

Tabela 13- Tabela exercício 8.1

Valores laboratoriais:

vi(Vpp)	vo(Vpp)	vo/vi
0,4	0,386	0,965
0,6	0,594	0,99
1,2	1,17	0,975
4	2,46	0,615

Tabela 14- Tabela exercício 8.1

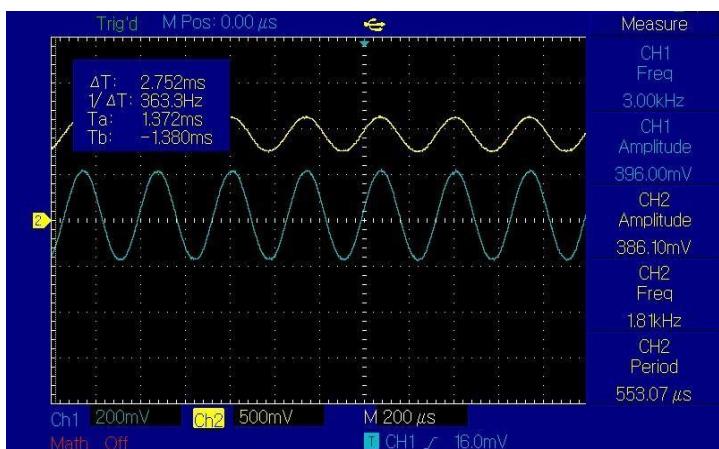


Figura 36- ex 8.1 Onda para 0.4V

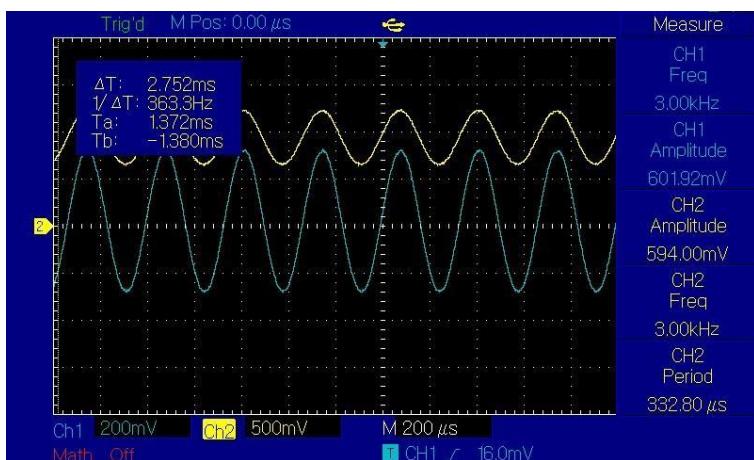


Figura 37- ex 8.1 Onda para 0.6V

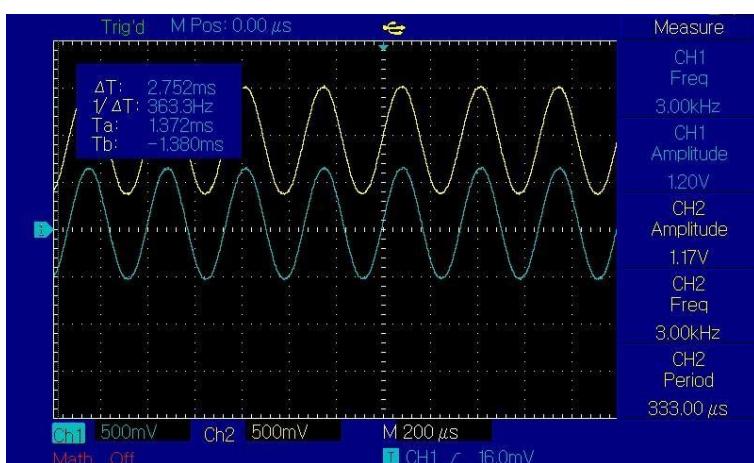


Figura 38- ex 8.1 Onda para 1.2V

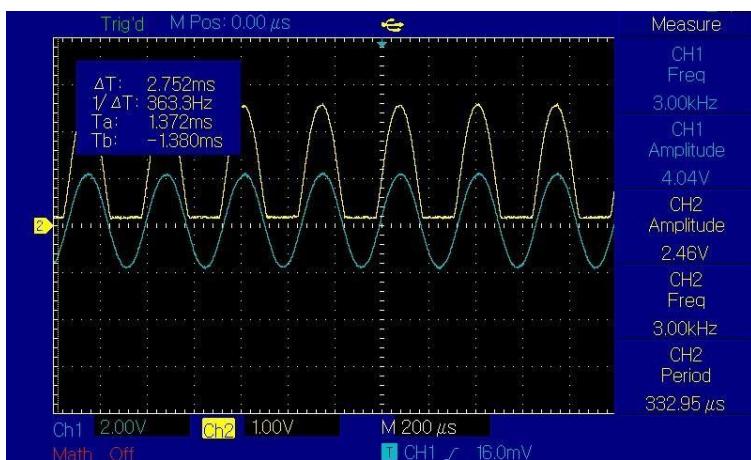


Figura 39- ex 8.1 Onda para 4V

8.2 Que conclui quanto ao modo como é possível variar o ganho em tensão da montagem?

O ganho é praticamente desprezível. Quanto maior for o V_i menor é o V_o . O ganho varia menos acentuadamente nesta montagem, já que R_E é maior que na montagem anterior.

3.2 Transístores efeito de Campo

JFET

O JFET (Junction Field-Effect Transistor) é um tipo de transistador de efeito de campo que controla a corrente através de um canal semicondutor **usando uma tensão** aplicada a um elétrodo chamado **gate**. Este possui três terminais principais: **source**, **drain** e **gate**.

Ao aplicar uma tensão no gate, o campo elétrico gerado modula a largura do canal entre o source e o drain, controlando o fluxo de corrente. Diferente dos transistores bipolares, o JFET é **controlado por tensão**, não por corrente, e apresenta uma alta impedância de entrada, o que o torna eficiente em circuitos de amplificação de sinais de baixa potência. Ele é amplamente utilizado em aplicações analógicas, como amplificadores de RF e de áudio, devido à sua linearidade e baixo ruído.

Motores DC

Motores DC (corrente contínua) são dispositivos eletromecânicos que convertem energia elétrica em energia mecânica através do movimento rotacional. Funcionam baseados no princípio de que, quando uma corrente elétrica passa por um condutor dentro de um campo magnético, gera-se uma força mecânica.

Os motores DC possuem dois componentes principais:

Estator: A parte fixa, que contém o campo magnético, geralmente gerado por ímans permanentes ou enrolamentos de campo.

Rotor: A parte rotativa, que contém enrolamentos de fio por onde a corrente flui. Essa corrente, interagindo com o campo magnético do estator, gera uma força que faz o rotor girar.



Figura 40 Motor DC

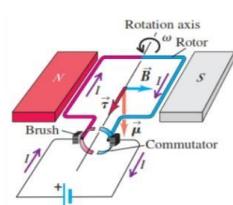


Figura 40 Princípio de funcionamento

Modulação por largura de pulso (PWM)

Para controlar a velocidade de rotação de um motor DC, usa-se um conceito conhecido como PWM (Pulse Width Modulation, Modulação por Largura de Pulso). Este método consiste em ligar e desligar o motor, numa frequência fixa, através de um dispositivo seccionador, normalmente algum tipo de transístor neste caso (MOSFET), fazendo com que o motor faça a rotação numa velocidade proporcional à relação entre o tempo ligado (T_{on}) e período forma de onda (T). Essa relação é chamada de Duty Cycle, assim temos uma tensão média que é equivalente à tensão DC que deveria ser aplicada para fazer o motor girar à mesma velocidade.

A tensão média entre os terminais do motor é reduzida, valor nominal de acordo com o Duty Cycle, a corrente média que circula pelo motor também é reduzida conforme o mesmo parâmetro.

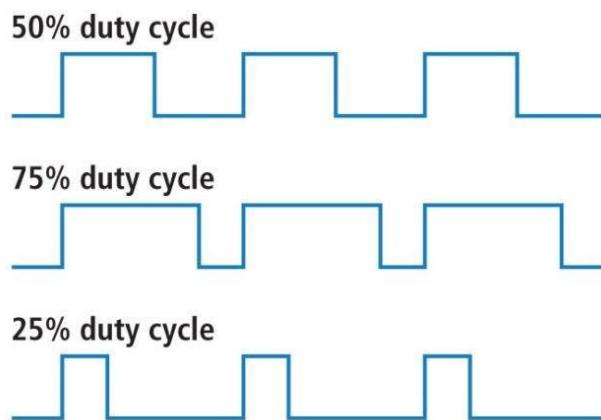


Figura 42 Forma Onda Duty Cycle

A grande vantagem da utilização do PWM é o facto de se poder variar a tensão média aplicada num dispositivo DC utilizando apenas uma saída digital, que é uma solução muito mais barata e simples do que a utilização de uma saída analógica em qualquer controlador. A desvantagem principal é o ruído sonoro provocado pelo facto da frequência de comutação estar perto da frequência audível.

3.2.1 Controlo da velocidade de um motor CC

3.2.1.2 Utilizando o gerador de sinais gera a seguinte onda quadrada.

$$vi(t) = \begin{cases} 6 & 0 \leq t < 10\mu s \\ 0 & 10\mu s \leq t < 20\mu s \end{cases}$$

Figura 44 Equação da onda

Cálculo da Frequência:

Forma da Onda Quadrada: A equação fornecida para $v(t)$ representa uma onda quadrada com um valor de 6 V durante os primeiros 10 μs e 0 V nos próximos 10 μs . Isso caracteriza um ciclo de 20 μs para um ciclo completo de uma onda quadrada, logo temos que:

$$\text{Período } T = \frac{1}{f} = \frac{1}{20 * 10^{-6}} = 50Khz$$

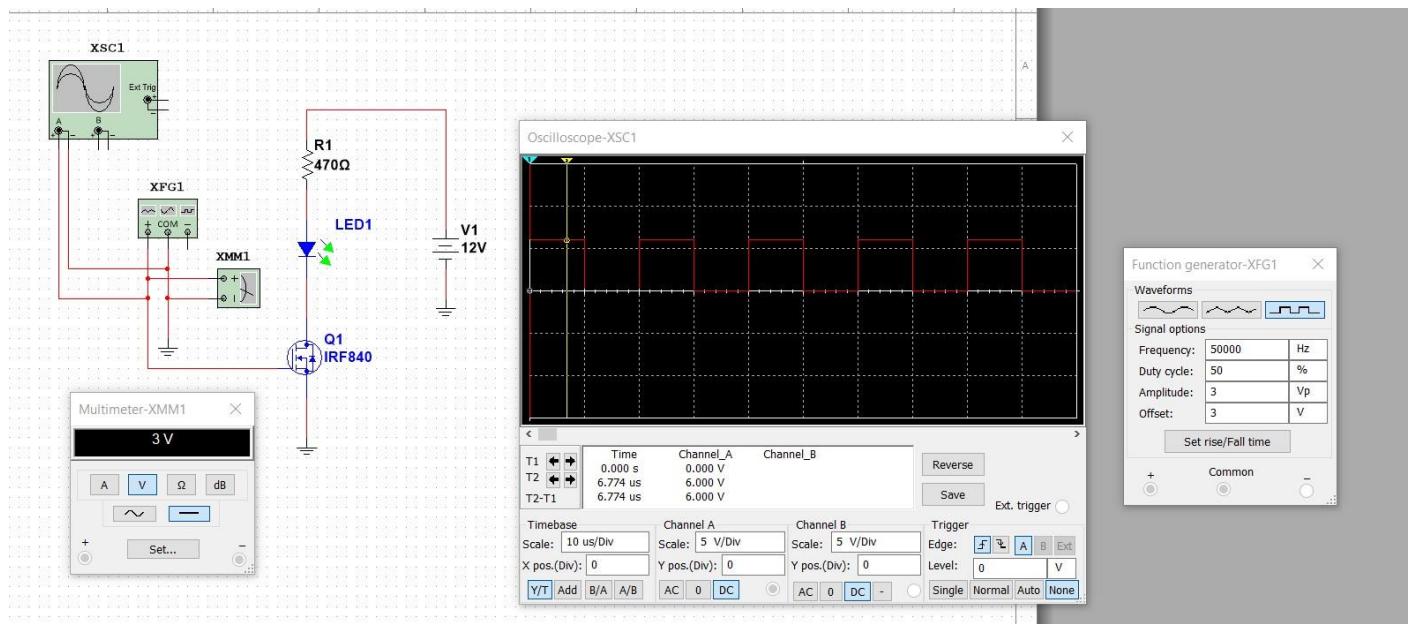


Figura 45 Montagem simulação circuito

- 50% Duty Cycle
- Valor médio = 3V

3.2.1.1 Realização da montagem em laboratório

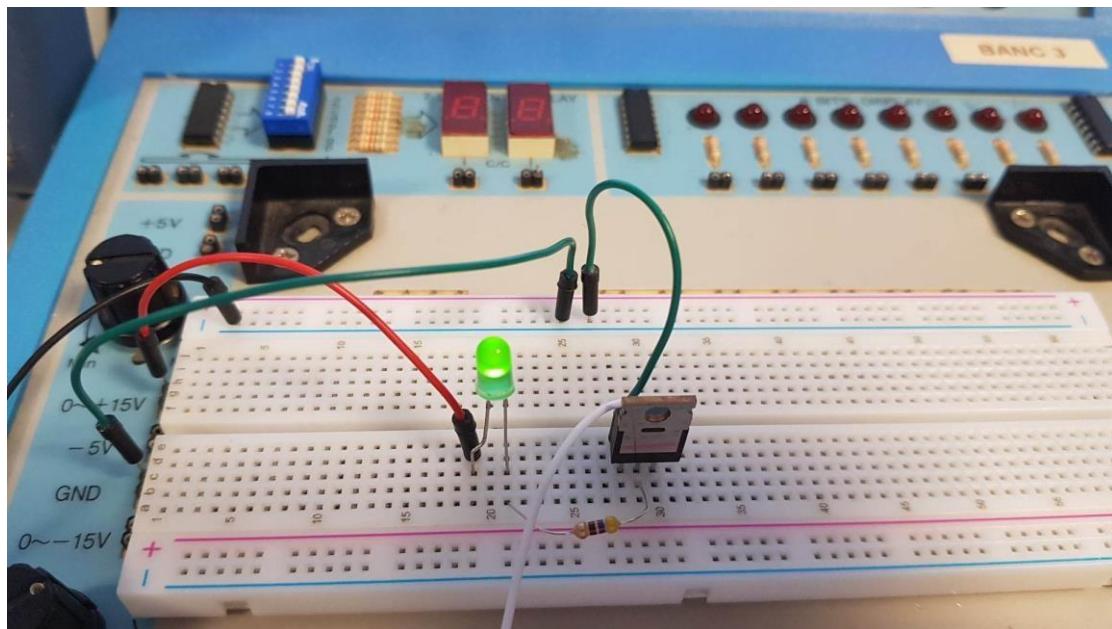


Figura 43 Montagem circuito

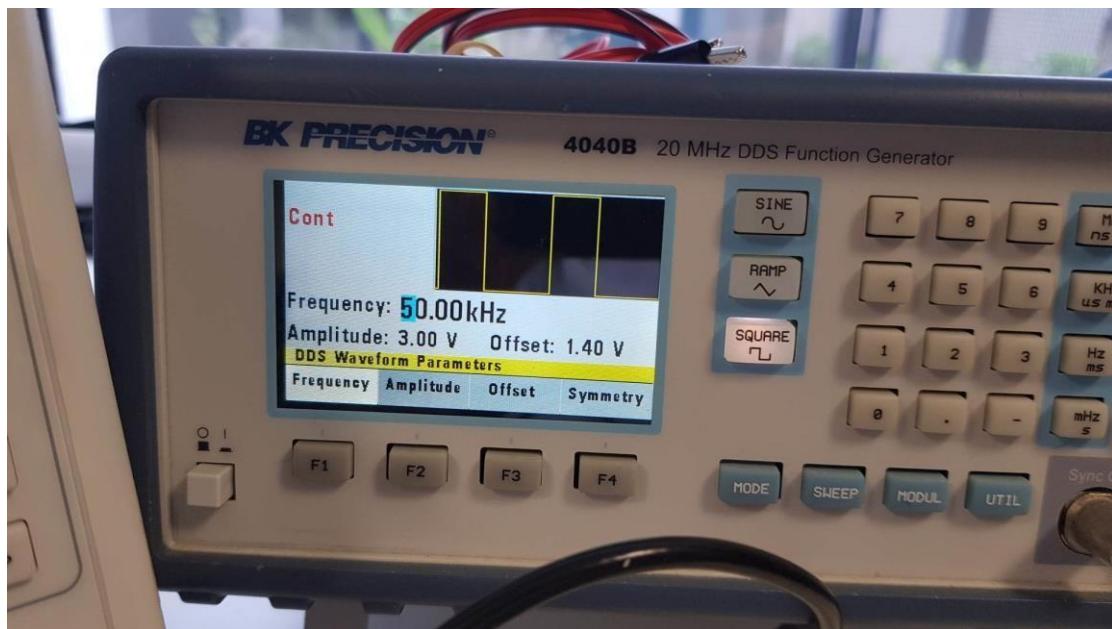


Figura 46 Configuração do Gerador de sinais

3.2.1.3 Faça variar o Duty Cycle da onda de entrada e complete a seguinte tabela

Duty Cycle	$ID_{(XMM3)}$	$VGS_{(XMM2)}$	$VDS_{(XMM4)}$	$VR1_{(XMM5)}$
5%	1.16mA	301.327mV	3.793V	545mV
30%	3.249mA	1.8V	2.673V	1.527V
50%	4.919mA	3V	1.785V	2.312V
75% (*)	7.004mA	4.5V	690.485mV	3.292V
95%	8.384mA	5.7V	-3.124mV	3.94V

Tabela 15 Valores Tabelados Simulação

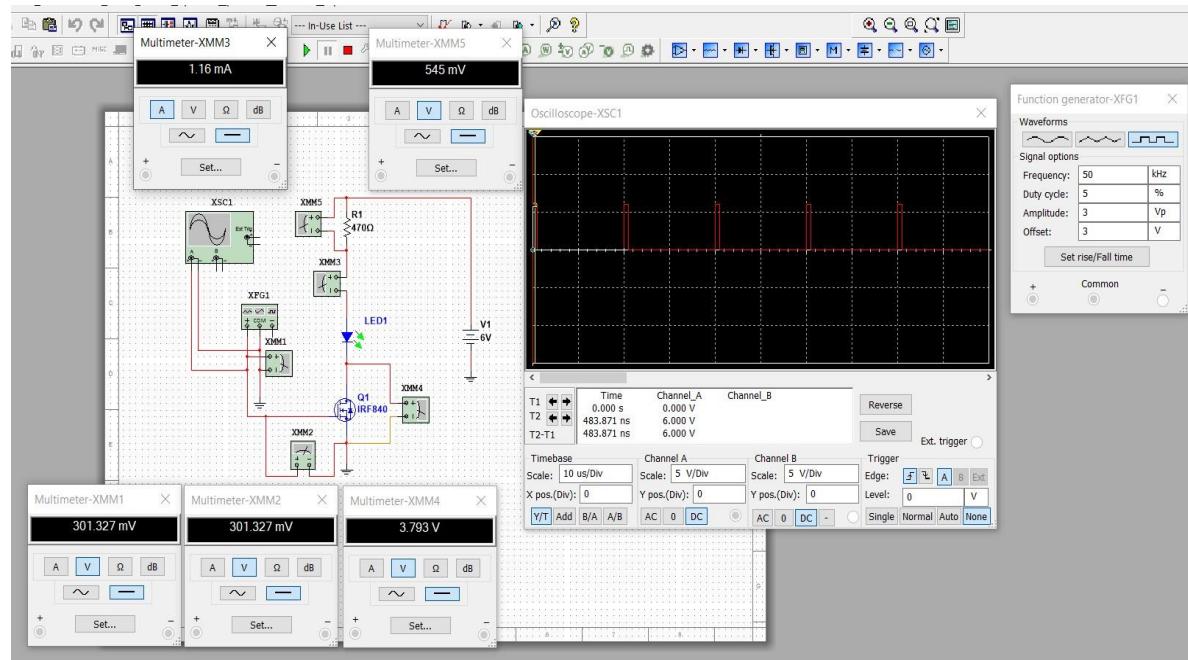


Figura 47 5% Duty-Cycle

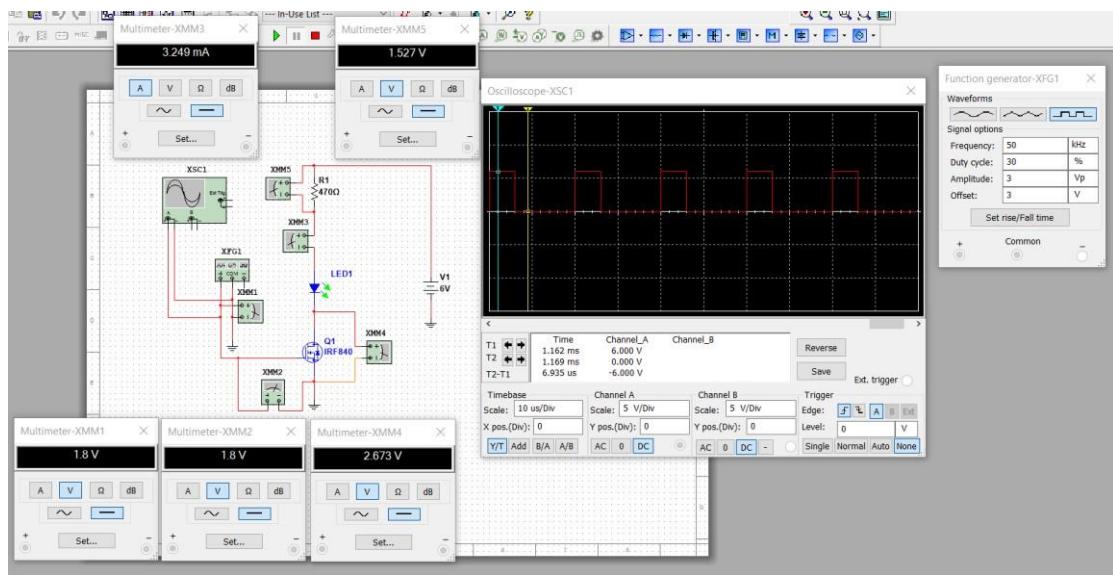


Figura 48 30% Duty Cycle

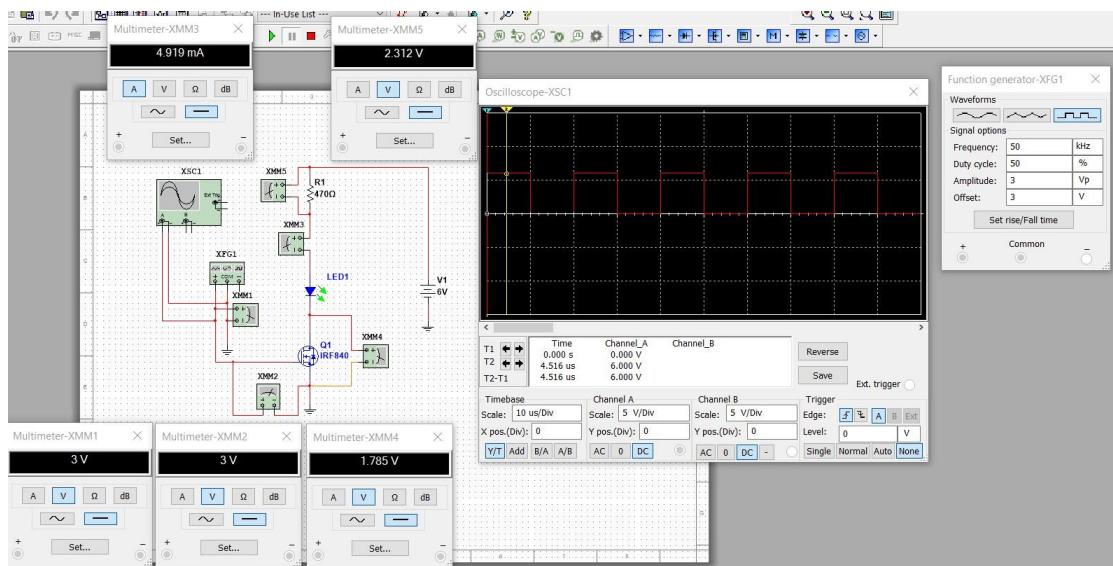


Figura 49 50% Duty Cycle

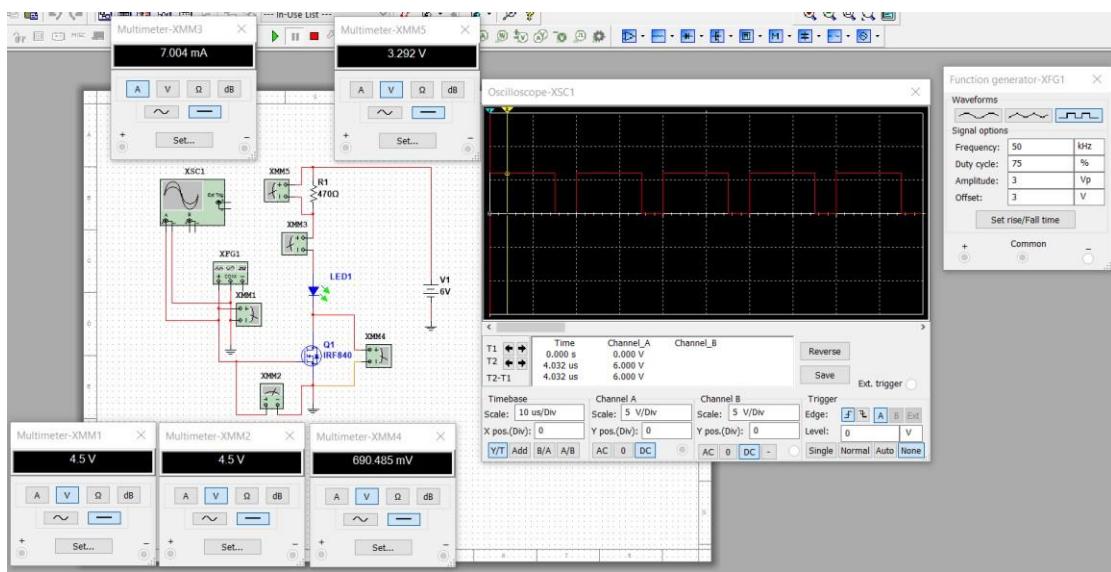


Figura 50 75% Duty Cycle

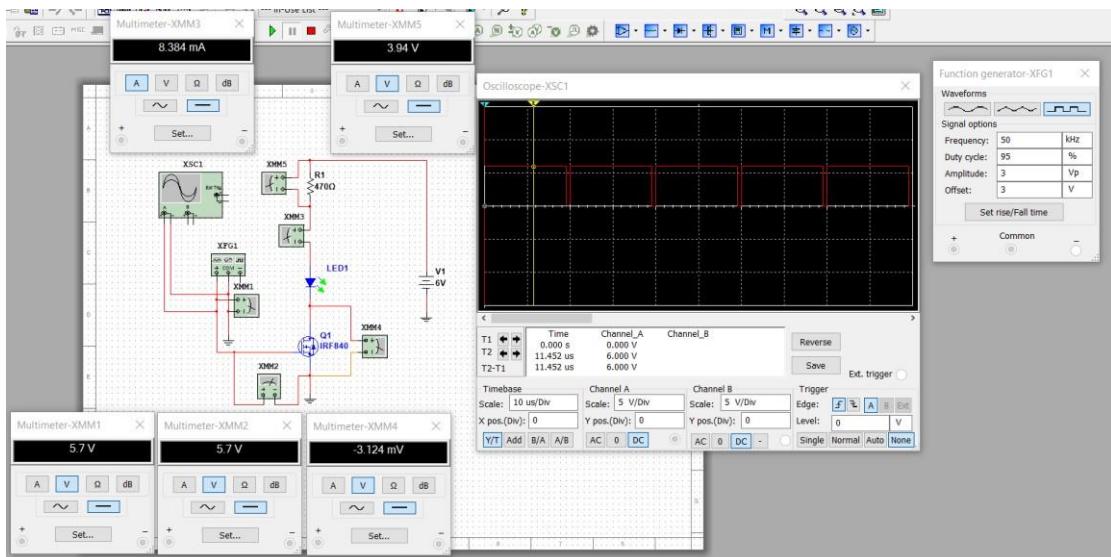


Figura 51 95% Duty Cycle

DUTY CYCLE	$ID_{(XMM3)}$	$VGS_{(XMM2)}$	$VDS_{(XMM4)}$	$VR1_{(XMM5)}$
5%	x	x	x	x
30%	2.64mA	1.647V	2.810V	1.320V
50%	4.35mA	2.8V	1.9V	2.1V
75% (*)	6.41mA	4.320V	0.820V	2.920V
95%	x	x	x	x

Tabela 16 Valores Tabelados em contexto real

Nota: O gerador de Sinais utilizado em laboratório não possuía resolução suficiente para conseguir gerar um Duty Cycle de 5% e 95%

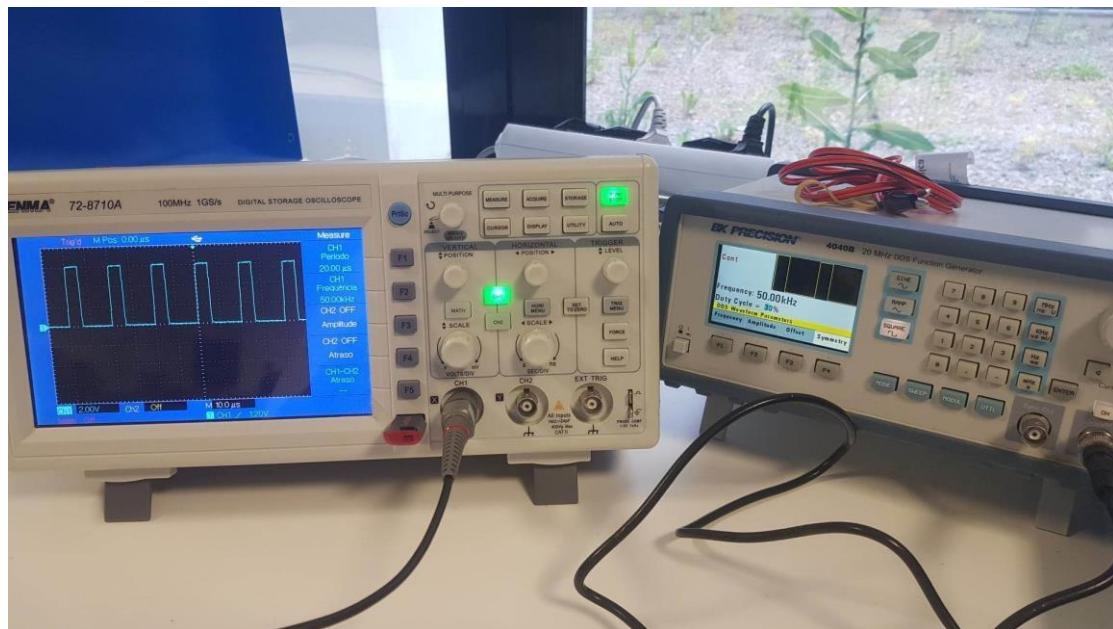


Figura 52 Duty Cycle 30%

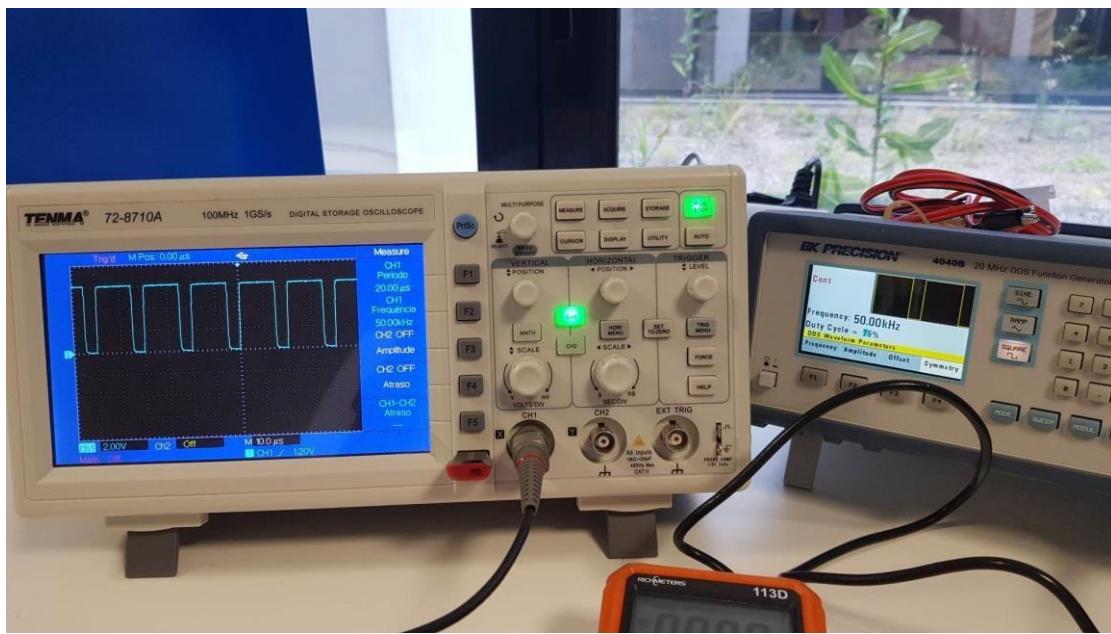


Figura 53 Duty Cycle 75%

3.2.1.4 Registe as formas de onda de VGS e VDS para um Duty Cycle de 75%.

Simulação:

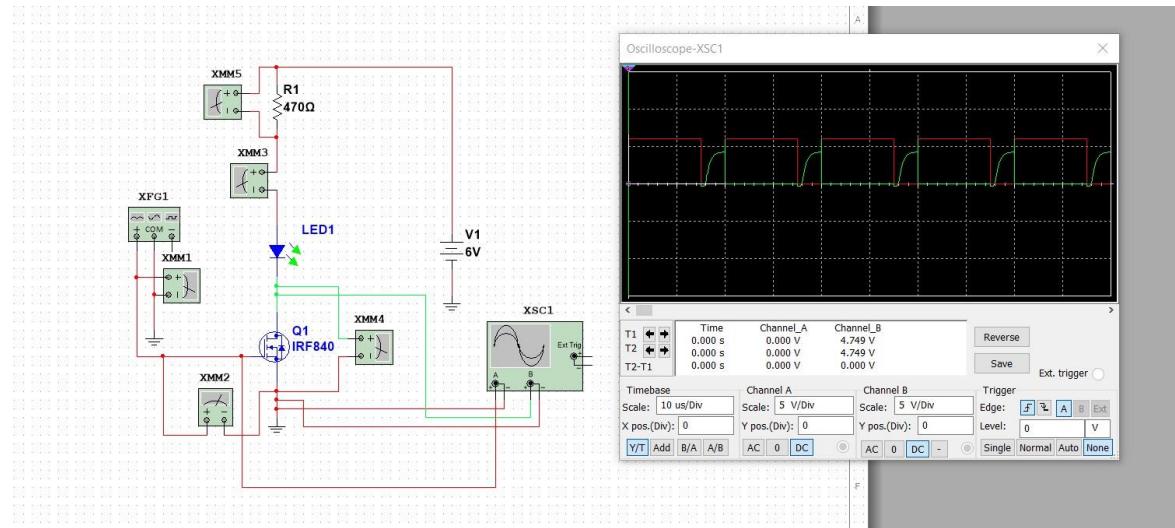


Figura 54 Registo onda Simulação

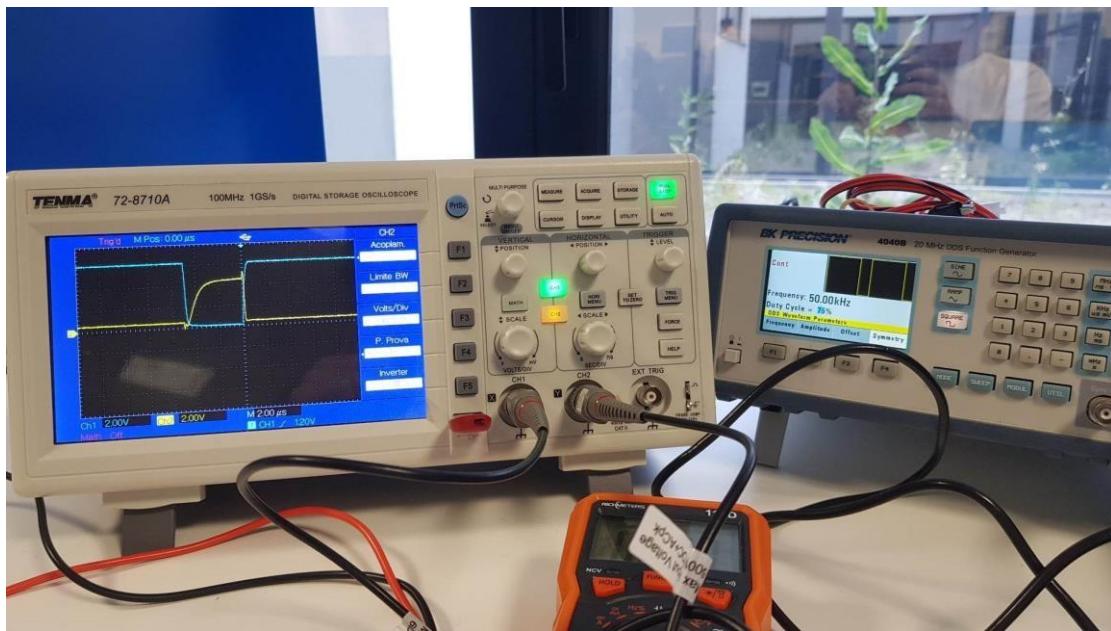


Figura 55 Registo onda Contexto Real

3.2.1.5 De que forma varia a luminosidade do led e o valor médio da tensão VR1? O que pode concluir quanto ao funcionamento do circuito?

À medida que o Duty Cycle aumenta podemos concluir que:

- Se o sinal PWM for aumentado de forma moderada, a corrente através do MOSFET aumentará gradualmente, permitindo que mais corrente flua pelo LED.
- Como resultado, o brilho do LED aumenta e com isso a sensação da frequência aumenta também. Isto ocorre porque o MOSFET funciona como um Drive controlado pelo sinal PWM, permitindo que uma quantidade maior de corrente flua através do LED durante o tempo em que o sinal PWM está em nível alto.

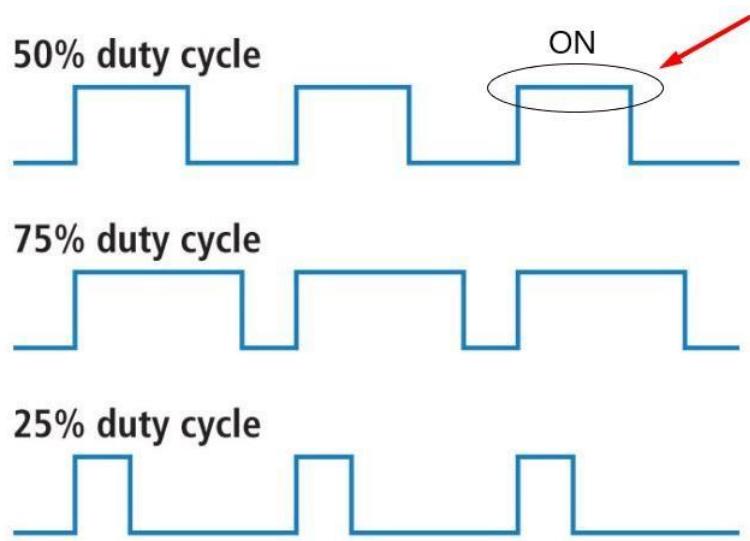


Figura 56 Duty Cycle

3.2.1.6 Utilizando o circuito anterior ligue o motor DC de acordo com a figura seguinte:

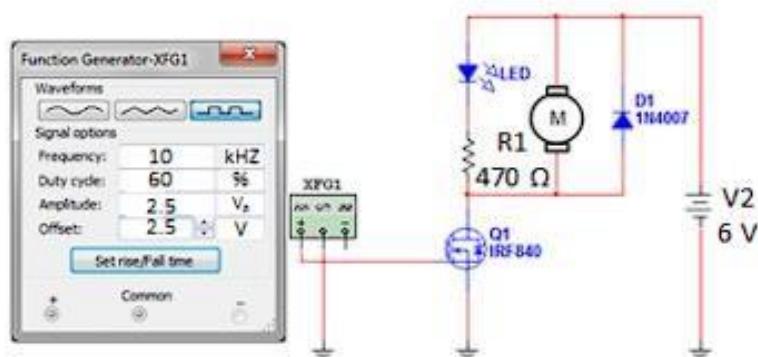


Figura 57 Circuito Motor DC

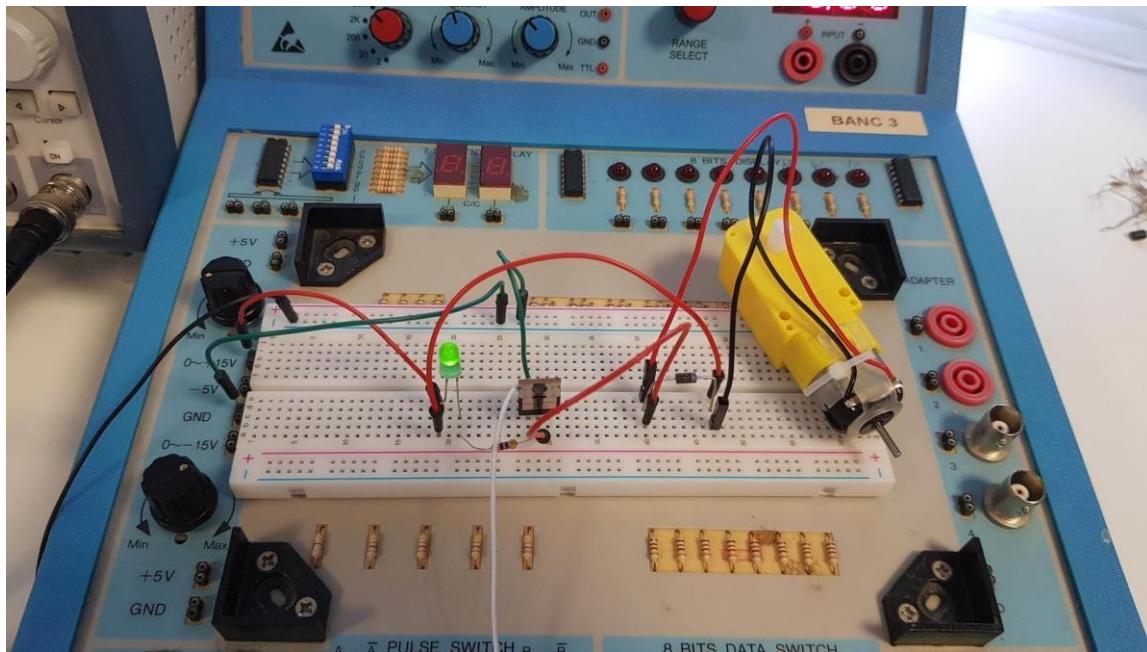


Figura 58 Ligação Motor contexto real

3.2.1.7 De que forma pode controlar a velocidade de um motor de corrente contínua?

Controlo de Tensão: Ao variar a tensão aplicada ao motor, é possível controlar a sua velocidade. Isso pode ser feito usando um potenciômetro ou um circuito de controlo que ajusta a tensão fornecida ao motor como por exemplo mosfets que é o caso aqui utilizado.

Controlo de PWM (Pulse Width Modulation): O PWM é uma técnica comum de controlo de velocidade para motores DC. Este método, a tensão fornecida ao motor é alternada rapidamente entre os estados ON/OFF em altas frequências. Ao variar a largura dos pulsos ligados em relação aos pulsos desligados, a tensão média efetiva fornecida ao motor é alterada, o que afeta sua velocidade.

3.2.1.8 Qual a função do diodo D1?

A função do diodo em paralelo com um motor DC é proteger o circuito de controlo contra danos causados pela **corrente reversa** gerada quando o motor é desligado.

Quando um motor DC é desligado, a energia armazenada no campo magnético do motor cria uma reversão de corrente que pode danificar outros componentes do circuito de controlo(drive), como transístores ou circuitos integrados. O diodo em paralelo fornece um caminho para essa corrente reversa, permitindo que ela circule através do diodo em vez de fluir pelos componentes sensíveis.

3.2.1.9 Faça variar o Duty Cycle de 5% a 95%. O que observa quanto à velocidade do motor?

Com a variação do Duty Cycle podemos concluir que a medida que aumentamos o seu valor progressivamente a velocidade do motor também aumenta, ou seja podemos ainda concluir que o aumento do PWM é diretamente proporcional à velocidade do motor.

3.2.1.10 Preenchimento da tabela

Duty Cycle	I Motor	V Motor	VGS
5%	x	x	x
30%	48.8mA	1V	1.63V
50%	67.5mA	2.33V	2.84V
75% (*)	87mA	2.9V	4.36V
95%	x	x	x

Tabela 17 – Medições contexto Real

Nota: O gerador de Sinais utilizado em laboratório não possuía resolução suficiente para conseguir gerar um Duty Cycle de 5% e 95%

3.2.1.11 Estabeleça uma relação entre a velocidade do motor e o valor médio da tensão aos terminais do mesmo.

Como podemos observar pelos dados recolhidos neste motor de corrente contínua (CC) controlado por transístor de potência (Mosfets), aumentar a tensão VGS resultará numa maior corrente média no motor, o que geralmente aumenta a sua velocidade de rotação. Contudo podemos reparar que a relação entre dois fatores VGS e a velocidade não são lineares.

4 Conclusões

Concluo que esta atividade foi bastante enriquecedora. Foi gratificante ver a teoria aplicada na prática, resultando em conclusões claras e nos resultados esperados. Sinto que atingi os objetivos propostos, aprofundando o meu conhecimento sobre Transístores um elemento de imensa importância no mundo da eletrónica assim como suas aplicações, além de perceber o seu potencial em circuitos reais.

Embora tenha enfrentado algumas dificuldades em certos exercícios e no uso do gerador de sinais, com uma troca de ideias e ajuda, consegui superá-las. Essas dificuldades contribuíram para o meu crescimento técnico, preparando-me para lidar com as adversidades comuns na área da eletrónica.