

MANUAL DO ALUNO

DISCIPLINA ELETRICIDADE E ELETRÓNICA

Módulos 11 e 12

República Democrática de Timor-Leste
Ministério da Educação



FICHA TÉCNICA

TÍTULO

MANUAL DO ALUNO - DISCIPLINA DE ELETRICIDADE E ELETRÓNICA
Módulos 11 e 12

AUTOR

JORGE FLÁVIO

COLABORAÇÃO DAS EQUIPAS TÉCNICAS TIMORENSES DA DISCIPLINA
XXXXXXX

COLABORAÇÃO TÉCNICA NA REVISÃO
XXXXXXXXXX

DESIGN E PAGINAÇÃO

UNDESIGN - JOAO PAULO VILHENA
EVOLUA.PT

IMPRESSÃO E ACABAMENTO
XXXXXX

ISBN

XXX - XXX - X - XXXXX - X

TIRAGEM

XXXXXXXX EXEMPLARES

COORDENAÇÃO GERAL DO PROJETO
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO DE TIMOR-LESTE
2015



Índice

Osciladores.....	11
Apresentação.....	12
Introdução	12
Objetivos de aprendizagem	12
Âmbito de conteúdos	12
1. Introdução aos osciladores	13
1.1. Princípio da oscilação sinusoidal	14
1.2. Classificação dos osciladores	17
1.3. Atividades propostas	19
2. Osciladores sinusoidais.....	20
2.1. Condições de oscilação.....	20
2.2. Osciladores com malha RC	22
2.2.1. Oscilador em Ponte de Wien	22
2.2.2. Oscilador desfasador	25
2.3. Osciladores com malha LC.....	26
2.3.1. Oscilador Armstrong.....	27
2.3.2. Oscilador Colpitts.....	28
2.3.3. Oscilador Hartley	29
2.3.4. Oscilador Clapp.....	30
2.4. Oscilador com cristal de quartzo	31
2.4.1. Constituição e funcionamento.....	32
2.4.2. Oscilador de Pierce a cristal.....	34
2.4.3. Oscilador Colpitts a cristal	35
2.4.4. Oscilador a cristal com amplificador operacional	36
2.4.5. Oscilador a cristal com MOSFET	37
2.5. Atividades propostas	37
Trabalhos Práticos	44
10 – Trabalho Prático n.º 01 – Oscilador Sinusoidal em Ponte de Wien.....	44
11 – Trabalho Prático n.º 02 – Oscilador Colpitts	47
12 – Trabalho Prático n.º 03 – Oscilador a Cristal.....	51



3. Osciladores não sinusoidais	54
3.1.1. Oscilador de relaxação de onda quadrada com amplificador operacional.....	54
3.1.2. Oscilador de relaxação de onda triangular	55
3.1.3. Oscilador de relaxação com lâmpada de néon	56
3.1.4. Oscilador de relaxação com transístor UJT	56
3.1.5. Multivibrador astável com transístores	57
3.1.6. Osciladores em anel com portas lógicas.....	58
Trabalhos Práticos	61
01 – Trabalho Prático n.º 04 – Oscilador de Relaxação.....	61
4. Circuito integrado 555.....	65
4.1. Constituição	65
4.2. Características	67
4.3. Funcionamento como monoestável	68
4.4. Funcionamento como astável.....	69
4.5. Atividades propostas	70
Trabalhos Práticos	73
05 – Trabalho Prático n.º 05 – Multivibrador Monoestável.....	73
5. Comparação entre osciladores	77
6. Bibliografia	78
Fontes de Alimentação	81
Apresentação.....	82
Introdução	82
Objetivos de aprendizagem	82
Âmbito de conteúdos	83
1. Definições.....	84
1.1. Atividades propostas	86
2. Fontes de alimentação lineares.....	87
2.1. Constituição	87
2.2. Regulação de carga	88
2.3. Regulação de rede	89
2.4. Resistência de saída.....	90
2.5. Cálculo de condensadores de filtragem.....	91



2.6. Fontes de tensão reguladas ou estabilizadas.....	91
2.6.1. Regulação com díodo zéner em paralelo.....	92
2.6.2. Regulação com transístor em paralelo	95
2.6.3. Regulação com transístor em série.....	98
2.6.4. Reguladores lineares integrados.....	103
2.6.4.1. Reguladores de saída fixa	104
2.6.4.2. Reguladores de saída variável.....	113
2.6.4.3. Outros reguladores.....	117
2.6.4.4. Cálculo de dissipadores	118
2.7. Atividades propostas	123
Trabalhos Práticos	129
18 – Trabalho Prático n.º 01 – O Díodo Zéner como Estabilizador	129
19 – Trabalho Prático n.º 02 – Regulador de Tensão com Transístor em Paralelo	132
20 – Trabalho Prático n.º 03 – Regulador de Tensão com Transístor em Série	136
21 – Trabalho Prático n.º 04 – Regulador de Tensão Integrado.....	141
3. Fontes de alimentação comutadas	146
3.1. Introdução	146
3.2. Comutação e ciclo de trabalho	147
3.3. Tipos de conversores de corrente contínua.....	148
3.4. Constituição de uma fonte de alimentação comutada	152
3.5. Comparação entre fontes de alimentação lineares e fontes de alimentação comutadas	152
3.6. Atividades propostas	153
4. Bibliografia	154



Índice de Ilustrações

Ilustração 1-1 – Oscilações sinusoidais na natureza	13
Ilustração 1-2 – Oscilação sinusoidal	13
Ilustração 1-3 – Amplificador realimentado básico	14
Ilustração 1-4 – Oscilação com $A \times B > 1$	15
Ilustração 1-5 – Oscilação com $A \times B < 1$	15
Ilustração 1-6 – Evolução do produto $A \times B$	16
Ilustração 1-7 – Oscilador LC básico	17
Ilustração 1-8 – Classificação dos osciladores	18
Ilustração 2-1 – Oscilações da saída	21
Ilustração 2-2 – Relações de fase na saída.....	21
Ilustração 2-3 – Princípio de funcionamento da Ponte de Wien	23
Ilustração 2-4 – Oscilador em Ponte de Wien com díodos	24
Ilustração 2-5 – Oscilador de desvio de fase (avanço de fase) com amplificador operacional.....	25
Ilustração 2-6 – Oscilador de desvio de fase (atraso de fase) com amplificador operacional.....	26
Ilustração 2-7 – Oscilador Armstrong	27
Ilustração 2-8 – Oscilador Colpitts	28
Ilustração 2-9 – Oscilador Hartley	29
Ilustração 2-10 – Oscilador Clapp	30
Ilustração 2-11 – Cristal de quartzo	31
Ilustração 2-12 – Piezoelectricidade.....	32
Ilustração 2-13 – Esquema elétrico equivalente de um cristal de quartzo	33
Ilustração 2-14 – Oscilador Pierce a cristal	34
Ilustração 2-15 – Oscilador Colpitts a cristal.....	35
Ilustração 2-16 – Oscilador a cristal com amplificador operacional	36
Ilustração 2-17 – Oscilador a cristal com MOSFET.....	37
Ilustração 2-18 – Circuito do exercício 2.01.....	37
Ilustração 2-19 – Circuito do exercício 2.02	38
Ilustração 2-20 – Circuito do exercício 2.03	38
Ilustração 2-21 – Circuito do exercício 2.04.....	39
Ilustração 2-22 – Circuito do exercício 2.05	40
Ilustração 2-23 – Circuito do exercício 2.06.....	41



Ilustração 2-24 – Circuito do exercício 2.08.....	42
Ilustração 2-25 – Circuito do exercício 2.09.....	43
Ilustração 3-1 – Oscilador de relaxação de onda quadrada com amplificador operacional ..	54
Ilustração 3-2 – Oscilador de relaxação de onda triangular	55
Ilustração 3-3 – Oscilador de relaxação com lâmpada de néon	56
Ilustração 3-4 – Oscilador de relaxação com transistor unijunção (UJT)	56
Ilustração 3-5 – Característica de um transistor unijunção (UJT)	56
Ilustração 3-6 – Formas de onda no oscilador de relaxação com UJT	57
Ilustração 3-7 – Multivibrador astável com transistores.....	57
Ilustração 3-8 – Formas de onda nos coletores dos transistores.....	58
Ilustração 3-9 – Oscilador com portas lógicas em anel.....	59
Ilustração 3-10 – Oscilador com portas Schmitt-Trigger	59
Ilustração 3-11 – Oscilador com portas Schmitt-Trigger, com entrada de controlo.....	59
Ilustração 3-12 – Oscilador com portas Schmitt-Trigger,	60
com regulação do ciclo de trabalho.....	60
Ilustração 3-13 – Oscilador com número par de portas lógicas.....	60
Ilustração 3-14 – Oscilador com portas NAND	60
Ilustração 3-15 – Oscilador com portas NOR.....	60
Ilustração 4-1 – Circuito integrado 555.....	65
Ilustração 4-2 – Constituição do 555	66
Ilustração 4-3 – Encapsulamento do 555.....	67
Ilustração 4-4 – Esquema de ligações do 555 como monoestável.....	68
Ilustração 4-5 – Formas de onda do 555 em funcionamento como monoestável	68
Ilustração 4-6 – Esquema de ligações do 555 como astável	69
Ilustração 4-7 – Formas de onda do 555 em funcionamento como astável	69
Ilustração 4-8 – Circuito do exercício 4.03.....	71
Ilustração 4-9 – Circuito do exercício 4.04.....	72
Ilustração 5-1 – Tabela comparativa de osciladores	77
Ilustração 1-1 – Fonte de alimentação	85
Ilustração 2-1 – Esquema elétrico básico de uma fonte de alimentação linear	87
Ilustração 2-2 – Formas de onda: a) redução, b) retificação e c) filtragem.....	88
Ilustração 2-3 – Filtragem de uma fonte de alimentação	91
Ilustração 2-4 – Circuito estabilizador de tensão com zéner	92
Ilustração 2-5 – Fonte de alimentação simétrica com díodos zéner.....	94
Ilustração 2-6 – Circuito de proteção com diodo zéner para corrente contínua	94

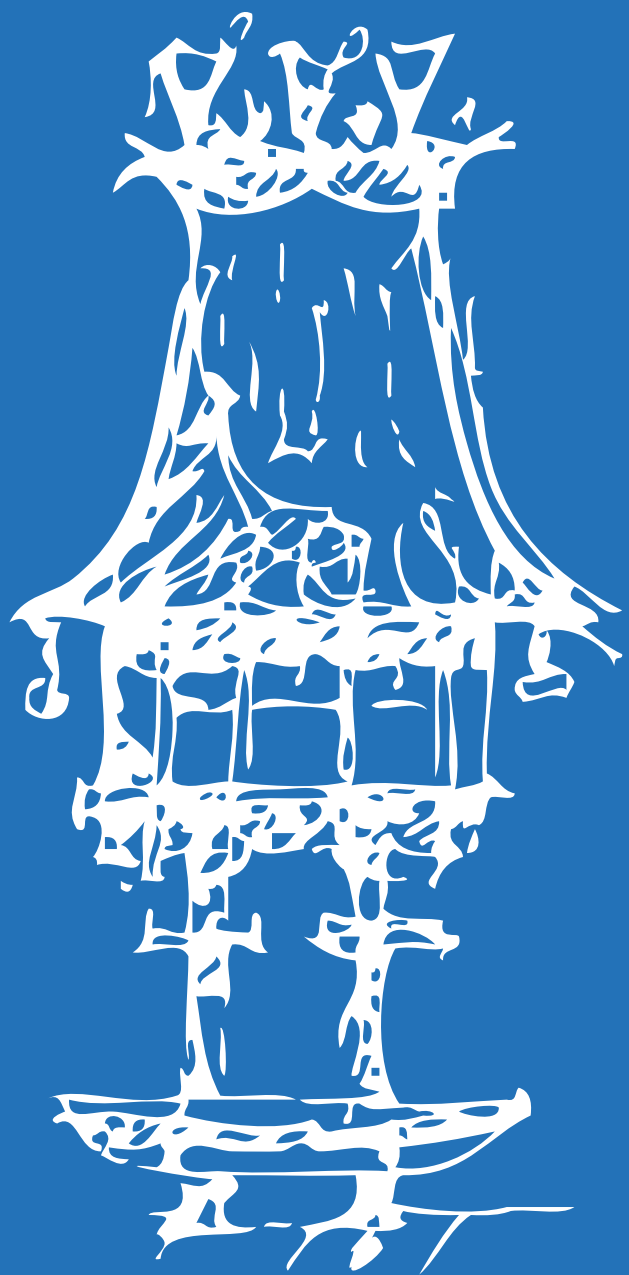


Ilustração 2-7 – Circuito de proteção com diodo zéner para corrente alternada.....	94
Ilustração 2-8 – Regulador de tensão com transistor ligado em paralelo com a carga	95
Ilustração 2-9 – Regulador de tensão com transistor em paralelo e divisor de tensão	96
Ilustração 2-10 – Regulador de tensão com transistor em paralelo e amplificador operacional.....	97
Ilustração 2-11 – Circuito regulador série com zéner seguidor	99
Ilustração 2-12 – Circuito regulador série para tensões mais elevadas.....	100
Ilustração 2-13 – Regulador série com amplificador operacional.....	101
Ilustração 2-14 – Proteção do regulador série com resistência sensora.....	102
Ilustração 2-15 – Proteção “Crowbar”	102
Ilustração 2-16 – Fonte de alimentação com regulador série.....	103
Ilustração 2-17 – Circuitos reguladores integrados	104
Ilustração 2-18 – Regulador 78xx	104
Ilustração 2-19 – Regulador 79xx	105
Ilustração 2-20 – Esquema de ligações externas do regulador 78xx	106
Ilustração 2-21 – Esquema de ligações externas do regulador 79xx	106
Ilustração 2-22 – Condensadores de filtragem do regulador	106
Ilustração 2-23 – Fonte de alimentação simétrica construída com reguladores 78xx e 79xx	107
Ilustração 2-24 – Regulador fixo com tensão aumentada por resistência	108
Ilustração 2-25 – Regulador fixo com saída ajustável por potenciômetro.....	108
Ilustração 2-26 – Regulador fixo com tensão aumentada por zéner	108
Ilustração 2-27 – Regulador fixo com tensão aumentada por díodos	109
Ilustração 2-28 – Fonte de corrente constante, utilizando um regulador fixo.....	109
Ilustração 2-29 – Fonte de corrente ajustável, utilizando um regulador fixo	110
Ilustração 2-30 – Regulador fixo com resistência em paralelo	111
Ilustração 2-31 – Regulador fixo com vários reguladores em paralelo	111
Ilustração 2-32 – Regulador fixo com transistor	112
Ilustração 2-33 – Proteção de um regulador fixo contra sobreintensidades, com transistor	112
Ilustração 2-34 – Regulador de precisão, com amplificador operacional.....	112
Ilustração 2-35 – Fonte de alimentação regulada simétrica, com dois reguladores integrados simétricos	113
Ilustração 2-36 – Regulador integrado de tensão ajustável LM317.....	113
Ilustração 2-37 – Ligação básica de um regulador LM317.....	114



Ilustração 2-38 – Gerador de corrente ajustável com o LM317.....	115
Ilustração 2-39 – Circuito para aumento da corrente de saída com transistor em paralelo	116
Ilustração 2-40 – Regulador de tensão, com seleção digital do valor da tensão de saída	116
Ilustração 2-41 – Fonte de alimentação completa, com LM317.....	117
Ilustração 2-42 – Tabela de características de alguns reguladores.....	117
Ilustração 2-43 – Dissipadores de calor.....	118
Ilustração 2-44 – Transistor de potência instalado em dissipador.....	118
Ilustração 2-45 – Tabela de valores de resistências térmicas de encapsulamentos ..	120
Ilustração 2-46 – Tabela de condutâncias térmicas de alguns materiais.....	120
Ilustração 2-47 – Circuito do exercício 2.06.....	123
Ilustração 2-48 – Circuito do exercício 2.07.....	124
Ilustração 2-49 – Circuito do exercício 2.08.....	125
Ilustração 2-50 – Circuito do exercício 2.09.....	125
Ilustração 2-51 – Circuito do exercício 2.10.....	126
Ilustração 2-52 – Circuito do exercício 2.11.....	127
Ilustração 2-53 – Circuito do exercício 2.17.....	128
Ilustração 3-1 – Constituição de uma SMPS.....	146
Ilustração 3-2 – Ciclo de trabalho (circuito).....	147
Ilustração 3-3 – Ciclo de trabalho (formas de onda).....	148
Ilustração 3-4 – Conversor redutor.....	149
Ilustração 3-5 – Conversor elevador.....	149
Ilustração 3-6 – Conversor redutor-elevador.....	150
Ilustração 3-7 – Conversor “Fly-Back”.....	150
Ilustração 3-8 – Conversor “Push-Pull”.....	151
Ilustração 3-9 – Conversor “Push-Pull” com oscilador de relaxação.....	151
Ilustração 3-10 – Fonte de alimentação comutada.....	152
Ilustração 3-11 – Tabela comparativa de características das fontes lineares e comutadas	153







Osciladores

Módulo 11

Apresentação

Este módulo tem caráter teórico-prático, por isso deverá decorrer em parte em instalações laboratoriais, proporcionando ao aluno a verificação e confirmação dos conceitos teóricos estudados relativos ao funcionamento, tipos, características e aplicações dos osciladores.

Introdução

Este é um módulo com caráter teórico-prático, mas com maior incidência na parte prática dos circuitos operacionais, constituindo-se como um complemento do módulo anterior. É um módulo em que serão abordadas diversas montagens típicas de circuitos lineares e de circuitos não lineares, projetados com amplificadores operacionais, destinados a aplicações diversificadas em circuitos eletrônicos.

Para além de exercícios de aplicação, serão realizados trabalhos práticos complementados com a utilização de programa informático dedicado, em que será feita a simulação do funcionamento desses mesmos circuitos.

Objetivos de aprendizagem

No final do módulo, o aluno deverá ter apreendido no mínimo, o conjunto de objetivos que a seguir se indicam:

- Compreender o funcionamento de circuitos osciladores;
- Identificar, analisar, e projetar circuitos osciladores sinusoidais e não sinusoidais;
- Conhecer o circuito integrado temporizador 555 e as suas aplicações básicas;
- Analisar com recurso a programa informático apropriado, o funcionamento de circuitos osciladores.

Âmbito de conteúdos

O conjunto de conteúdos a seguir indicados, permitirá ao aluno atingir e ultrapassar os objetivos de aprendizagem definidos para este módulo:

- Osciladores sinusoidais;
- Osciladores não sinusoidais;
- Circuito integrado 555.



1. Introdução aos osciladores

Na figura seguinte apresentam-se sinais sinusoidais encontrados na natureza (estes tendem a diminuir a sua amplitude no tempo, devido à perda de energia, e quando cessa a ação da fonte que lhes deu origem).



Ilustração 1-1 – Oscilações sinusoidais na natureza

Um oscilador é um dispositivo eletrónico capaz de fornecer um sinal alternado a partir de uma tensão contínua.

O sinal gerado pelo oscilador pode ter a forma sinusoidal (a forma de onda básica para a geração de outros sinais), quadrada (retangular), triangular, dente de serra, etc.

Na figura seguinte apresenta-se um sinal sinusoidal básico, caracterizado por uma determinada frequência (f), e o correspondente período (T), e por uma dada amplitude (A).

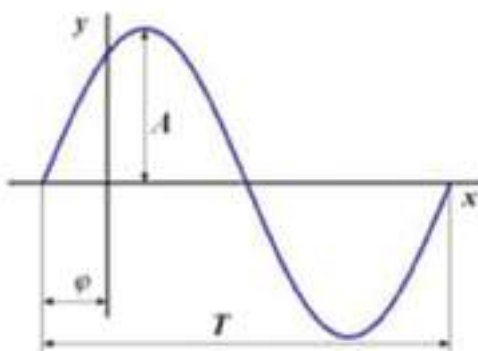


Ilustração 1-2 – Oscilação sinusoidal

Como sabemos, a frequência do sinal relaciona-se com o período através da expressão seguinte.

$$f = \frac{1}{T}$$



1.1. Princípio da oscilação sinusoidal

Vamos começar por entender, a que se deve a oscilação de um circuito.

O critério para definir as condições de oscilação, pode ser estabelecido de várias formas, equivalentes e rigorosas.

Primeiro, um oscilador contém um elemento ativo de duas portas, e deve possuir uma malha de realimentação, por onde parte do sinal de saída, seja reconduzido para a entrada.

Se o sinal de realimentação é maior que 1 e estiver em fase com a entrada, começam a verificar-se oscilações, que crescem em amplitude, até a saturação reduzir o ganho através da malha de realimentação, para a unidade.

Portanto, um primeiro critério, é o de que o circuito oscila quando a malha de realimentação estiver acessível, garantindo no mínimo, um ganho de realimentação igual a 1, e a unidade de deslocamento de fase igual a zero.

O diagrama de blocos apresentado na figura seguinte, mostra um amplificador que possui um ganho A , e uma malha de realimentação com ganho B , dependente da frequência.

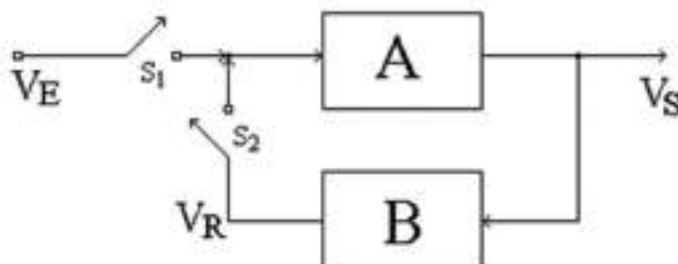


Ilustração 1-3 – Amplificador realimentado básico

A saída V_S fornece a tensão sinusoidal gerada pelo oscilador.

Este pode iniciar sua oscilação a partir dos passos indicados a seguir.

Inicialmente, supomos que os interruptores S_1 e S_2 se encontram abertos e que a saída $V_S = 0$.

Ao fechar o interruptor S_1 , aplica-se uma tensão de excitação (na entrada), pelo que, de imediato se verificam as seguintes expressões.

$$V_S = A \times V_E$$

$$V_R = A \times B \times V_E$$



Fechando o interruptor S_2 e abrindo o interruptor S_1 , verifica-se que V_R é aplicada à entrada do amplificador.

Para que a tensão de saída não varie em relação ao passo anterior, é necessário que se verifique a condição $V_R = V_E$.

Devem então ser observadas as condições de Barkhausen, que de seguida se enunciam.

- a. O ganho em malha fechada deve ser igual a um ($A \times B = 1$);
- b. O desfasamento total da malha deve ser igual a 0° , ou seja, se o amplificador for inversor, a rede de realimentação também deve provocar um desfasamento de 180° .

Caso se não verifique o primeiro critério, ocorrerá uma de duas situações:

- a. $A \times B > 1$.

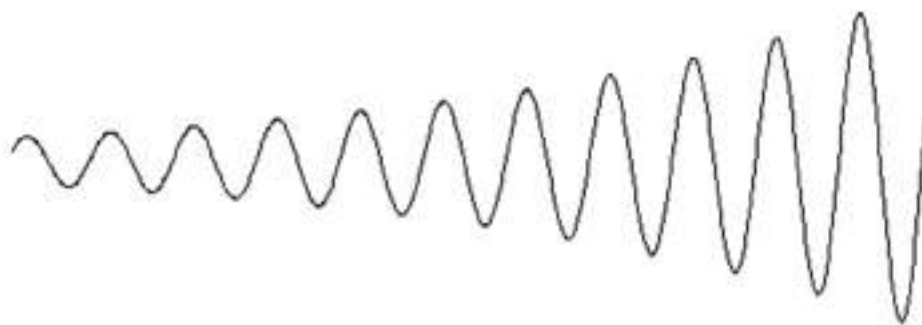


Ilustração 1-4 – Oscilação com $A \times B > 1$

- b. $A \times B < 1$.

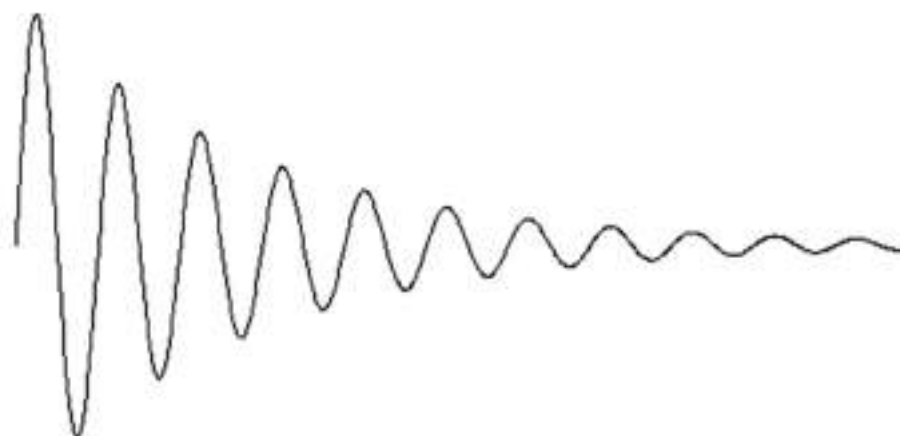


Ilustração 1-5 – Oscilação com $A \times B < 1$



A tensão de entrada por ser apenas utilizada como “ignição” do sistema, é chamada de “tensão de partida”.

Na prática, a utilização de uma tensão de partida é inviável, pois exigiria circuitos ou equipamentos extras para obter as oscilações.

O que realmente acontece é que os osciladores utilizam a tensão de ruído inerente a qualquer circuito eletrônico, como tensão de partida.

A tensão de ruído apresenta uma composição harmônica muito rica, ou seja, é composta pelo somatório de um número infinito de sinusoides, de frequências diferentes e amplitudes muito pequenas.

Como já foi mencionado anteriormente, o ganho da malha de realimentação é dependente da frequência, e então, apenas uma dessas harmônicas cumprirá as condições de Barkhausen, gerando oscilações a esse valor.

Para garantir uma oscilação com níveis de tensão utilizáveis, é necessário fazer com que o produto ($A \times B$) seja um pouco maior que a unidade, no início do processo da oscilação. Assim, existirá a tendência para a subida do valor da tensão, até que ocorra a saturação do amplificador.

Nesse momento o produto ($A \times B$) torna-se igual a 1, e estabiliza o valor da amplitude das oscilações.

Al situação conduz a uma evolução da forma de onda da saída, tal como se verifica na figura seguinte.

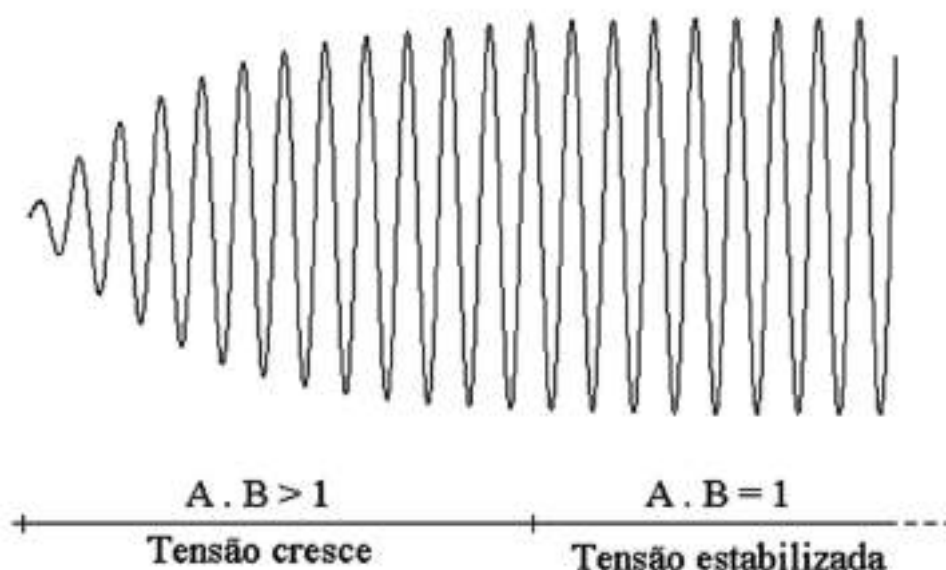


Ilustração 1-6 – Evolução do produto $A \times B$



Resumindo, ocorrerá oscilação quando, para um desfasamento de 180° , a amplitude da resposta em frequência for maior que 1.

Na figura seguinte apresenta-se um circuito oscilador LC básico, em que o seu circuito de oscilação (circuito “tanque”) é constituído por uma bobina (L) e por um condensador (C).

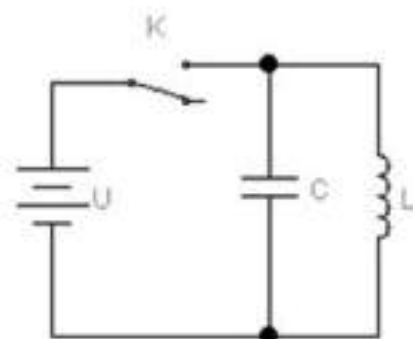


Ilustração 1-7 – Oscilador LC básico

Existem vários aspetos para caracterizar os osciladores, mas desde logo, que a primeira característica mais importante é a sua frequência de oscilação (f_o), e ainda a amplitude do sinal de saída.

Para além destas características, são também importantes a precisão de oscilação, a estabilidade do sinal, as potências consumida e fornecida, e a gama de frequências de funcionamento.

As frequências estendem-se desde 1 Hz até às centenas de MHz.

As amplitudes apresentam normalmente valores relativamente baixos, mesmo inferiores às tensões de alimentação dos circuitos osciladores.

Entre as aplicações mais importantes dos osciladores, podem citar-se a geração do sinal de “clock” de microcontroladores e microprocessadores, o cristal dos relógios, a alimentação em AC de emissores e recetores de rádio, televisão e telecomunicações em geral, e a utilização em equipamentos diversos, como geradores de funções.

1.2. Classificação dos osciladores

Existe uma variedade muito grande, de osciladores, pelo que podem ser classificados de diferentes formas.



Poderemos classifica-los do modo indicado na tabela seguinte.

CLASSIFICAÇÃO DOS OSCILADORES		
Sinusoidais (harmónicos)	Malha RC	Oscilador em ponte de Wien
		Oscilador desfasador
	Malha LC	Oscilador Armstrong
		Oscilador Hartley
		Oscilador Colpitts
		Oscilador Clapp
	Oscilador a cristal	
Não sinusoidais	Oscilador de relaxação, com amplificador operacional, de onda quadrada e de onda triangular	
	Oscilador de relaxação com lâmpada de néon	
	Oscilador de relaxação com UJT	
	Multivibrador astável	
	Osciladores com portas lógicas	
	Oscilador temporizador 555	

Ilustração 1-8 – Classificação dos osciladores

Os osciladores sinusoidais podem ser obtidos através de malhas RC, malhas LC e com recurso a cristais de quartzo.

Os osciladores não sinusoidais são fundamentalmente osciladores de relaxação, ou seja, baseiam-se na carga e descarga de condensadores sobre elementos resistivos, originando ondas quadradas, triangulares, impulsos, etc.

Os osciladores também se podem classificar como osciladores sintonizados (malhas LC) e não sintonizados (os restantes).

Podem ainda ser classificados quanto à gama de valores de frequência gerada.

Assim, podem classificar-se em osciladores de baixa frequência (até várias centenas de KHz), casos dos de malha RC e de relaxação.

Podem classificar-se em osciladores de alta frequência, com frequência variável, casos do Colpitts, Hartley, Clapp e multivibradores.

E podem ainda classificar-se em osciladores de alta frequência, com frequência fixa, caso dos osciladores a cristal.



1.3. Atividades propostas

QUESTÕES DE REVISÃO:

01 – O que se entende por um oscilador?

02 – Quais as duas grandes divisões em que se podem classificar os osciladores?

03 – O que diz a primeira condição de Barkhausen?

04 – O que diz a segunda condição de Barkhausen?

05 – Quais as características mais importantes de um oscilador?



2. Osciladores sinusoidais

Vamos agora abordar um conjunto de circuitos osciladores sinusoidais, construídos a partir de malhas RC, malhas LC e com recurso a cristais de quartzo.

2.1. Condições de oscilação

Retomando o que ficou definido sobre o princípio de oscilação sinusoidal, concluímos que os osciladores funcionam com realimentação positiva.

O ganho do oscilador (A_{osc}) pode ser definido pela expressão indicada a seguir, sendo A o ganho do amplificador base e B o ganho da malha de realimentação (ou fração de realimentação).

$$A_{osc} = \frac{U_o}{U_i} = \frac{A}{1 - |A \times B|}$$

Quando $1 - |A \times B| = 0$, (ou $A \times B = 1$), a expressão toma o valor infinito, o que quer dizer que o amplificador fornece na saída um sinal sinusoidal, sem que exista qualquer sinal na entrada.

Ora esta situação corresponde à primeira condição de Barkhausen, em que $A \times B = 1$, ou $A = 1 / B$.

Se for o produto $A \times B > 1$, a tensão na saída tende a aumentar de amplitude, até à saturação do amplificador respetivo, situação que não interessa para o funcionamento como oscilador.

Por outro lado, se for o produto $A \times B < 1$, a tensão na saída tende a diminuir de amplitude, provocando o amortecimento da onda na saída, até à sua completa anulação, situação que também não interessa para o funcionamento como oscilador.

Tais situações encontram-se representadas na figura seguinte.



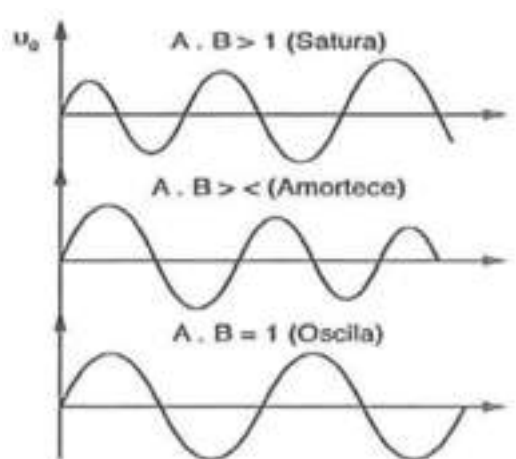


Ilustração 2-1 – Oscilações da saída

A segunda condição de Barkhausen indica-nos que a tensão de realimentação deve estar em fase com a tensão de entrada.

Se dois sinais estiverem desfasados entre si de 180° (oposição de fase), resultam num sinal nulo, ou seja, anulam-se entre si, tal como se pode ver na figura seguinte.

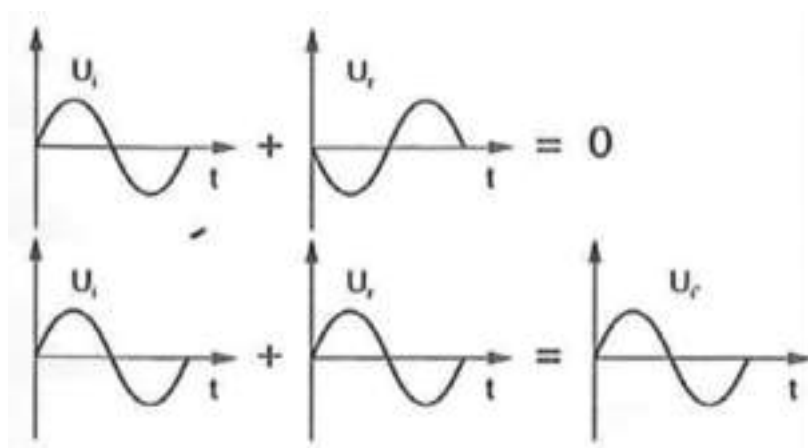


Ilustração 2-2 – Relações de fase na saída

Qualquer desfasamento entre os dois sinais provoca sempre uma alteração do sinal existente.

Somente quando estes estiverem em fase, existirão condições para a manutenção de uma oscilação estabilizada na saída.

Confirma-se então que para haver oscilação, é condição necessária a verificação das duas condições de Barkhausen, em simultâneo.



A generalidade dos osciladores, independentemente de se destinarem a gerar ondas sinusoidais, quadradas, triangulares, ou outras, necessitam basicamente de três etapas, uma de amplificação, uma de oscilação, e uma de realimentação positiva.

O projeto de qualquer oscilador deverá equacionar com muita atenção os três aspetos mencionados a seguir.

Primeiro, a precisão da frequência, a amplitude e a estabilidade da oscilação, requer componentes de elevada qualidade, particularmente que apresentem, estabilidade com a temperatura, tolerância reduzida, e frequências de operação adequadas, entre outras.

Um segundo aspeto muito importante, relaciona-se com o facto de surgirem no circuito capacidades e indutâncias parasitas, com o funcionamento a frequências elevadas, que podem provocar alterações da frequência de oscilação ou da amplitude.

Um terceiro aspeto e decorrente dos anteriores, relaciona-se com o facto do projeto do oscilador ter a necessidade de prever componentes de ajuste (resistências e/ou condensadores variáveis), que permitam fazer a compensação dos desvios mencionados.

2.2. Osciladores com malha RC

Os osciladores com malha RC (resistência-condensador), podem ter várias configurações, mas vamos apenas abordar dois de maior importância, o oscilador em Ponte de Wien e o oscilador desfasador.

2.2.1. Oscilador em Ponte de Wien

O oscilador em Ponte de Wien baseia-se no princípio de funcionamento de um circuito designado por Ponte de Wien, o qual se representa na figura seguinte.

A Ponte de Wien é um circuito de medida em ponte, que permite determinar o valor de um dado componente (resistência, capacidade, etc.), por equilíbrio entre os braços da ponte.

Consegue-se esta situação, quando o circuito entra em ressonância, o que provoca tensão nula no voltímetro.



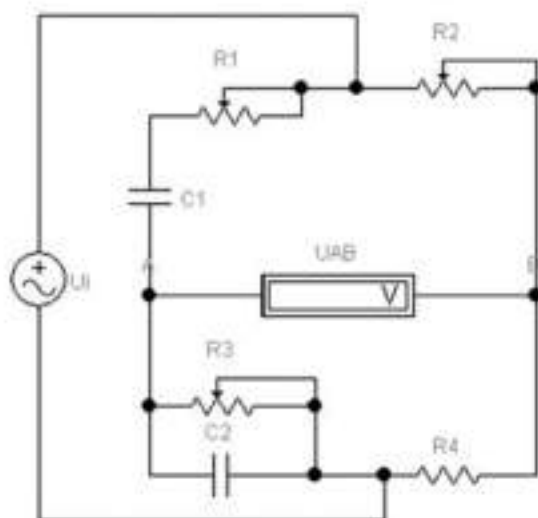


Ilustração 2-3 – Princípio de funcionamento da Ponte de Wien

O equilíbrio da ponte conduz à relação matemática indicada a seguir.

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1}$$

O valor da frequência de ressonância vem dado pela expressão apresentada a seguir.

$$f_o = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{R_1 \times R_2 \times C_1 \times C_2}}$$

Como habitualmente os valores das resistências e dos condensadores são escolhidos aos pares ($R_1=R_2=R$ e $C_1=C_2=C$), a frequência de oscilação assume o valor dado pela expressão indicada a seguir.

$$f_o = \frac{1}{2 \times \pi \times R \times C}$$

Na figura seguinte está representado um oscilador em Ponte de Wien, construído com amplificador operacional.



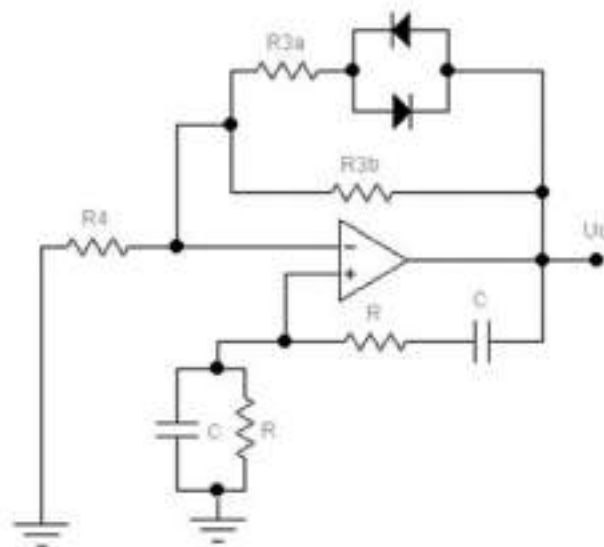


Ilustração 2-4 – Oscilador em Ponte de Wien com díodos

Como indicado atrás, a frequência de oscilação assume o mesmo valor dado pela expressão indicada.

$$f_o = \frac{1}{2 \times \pi \times R \times C}$$

Os díodos utilizados (também podem ser utilizadas lâmpadas de tungsténio, ou transístores de efeito de campo) permitem acelerar o arranque da oscilação e a sua estabilização.

Este processo é conhecido pela designação de controlo automático de ganho (C.A.G.). O ganho do amplificador (desprezando o valor das resistências dos díodos), vem dado pela expressão seguinte.

$$A = \frac{U_o}{U_i} = 1 + \frac{R_3}{R_4}$$

Dependendo dos valores das resistências R_3 e R_4 , pode dizer-se que o ganho assumirá um valor igual ou superior a 3.



2.2.2. Oscilador desfasador

O oscilador desfasador utiliza no circuito de realimentação negativa, malhas RC em cascata, de modo a obter desfasagem nula entre a tensão de entrada e a tensão de realimentação.

Este tipo de osciladores pode ser obtido com recurso a amplificadores operacionais, ou a transístores bipolares ou de efeito de campo.

Nas duas figuras seguintes apresentam-se osciladores de desfasagem (desvio de fase), no primeiro caso, de avanço de fase (passa alto), e no segundo caso de atraso de fase (passa baixo).

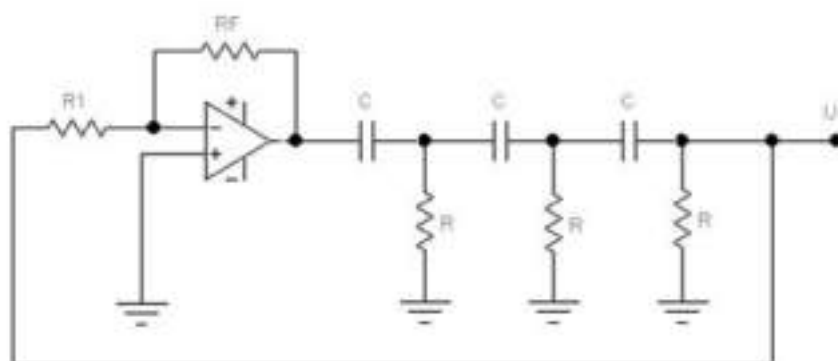


Ilustração 2-5 – Oscilador de desvio de fase (avanço de fase) com amplificador operacional

A frequência de oscilação deste circuito é dada pela expressão que a seguir se apresenta.

$$f_o = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{6} \times R \times C}$$

O ganho deste circuito vem dado pela expressão apresentada de seguida.

$$A = \frac{R_F}{R_1}$$



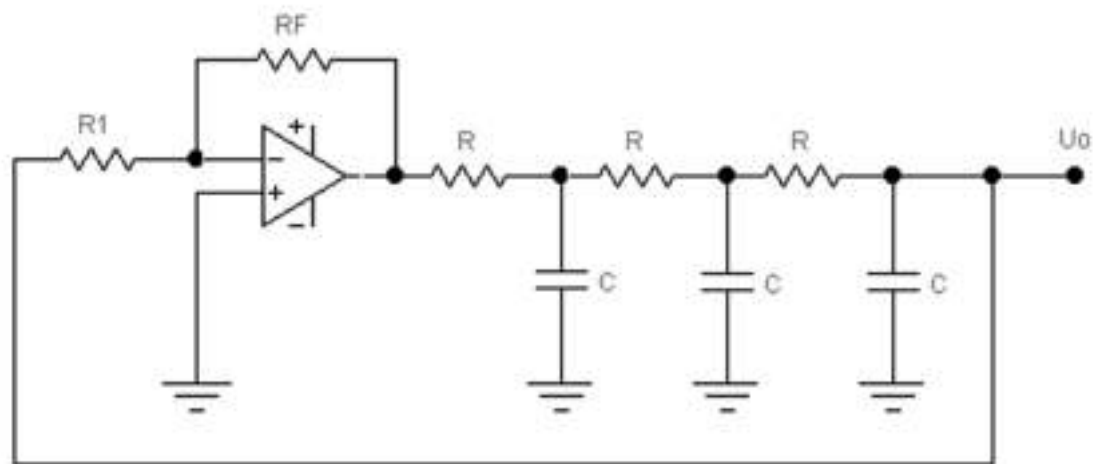


Ilustração 2-6 – Oscilador de desvio de fase (atraso de fase) com amplificador operacional

A frequência de oscilação deste circuito é dada pela expressão que a seguir se apresenta.

$$f_o = \frac{\sqrt{6}}{2 \times \pi \times R \times C}$$

O ganho deste circuito vem dado pela expressão apresentada de seguida.

$$A = \frac{R_F}{R_1}$$

2.3. Osciladores com malha LC

Existem diversos tipos de osciladores com malhas LC, em que os principais componentes responsáveis pela oscilação, são bobinas e condensadores.

As bobinas são componentes caros e difíceis de obter com os valores necessários, pelo que nem sempre é fácil implementar alguns circuitos osciladores.

Os osciladores de malha RC funcionam com baixas frequências, até um máximo de 1 MHz.

Ao contrário, os osciladores com malha LC funcionam até frequências de 15 MHz, apresentando alguma instabilidade a partir destes valores.

Vamos analisar agora alguns destes osciladores, o Armstrong, o Colpitts, o Hartley e o Clapp.



2.3.1. Oscilador Armstrong

Este oscilador é constituído por um amplificador realizado através de um transistor bipolar, que alimenta um circuito tanque LC ressonante, com um transformador e um condensador.

Este tipo de circuito encontra-se representado na figura seguinte.

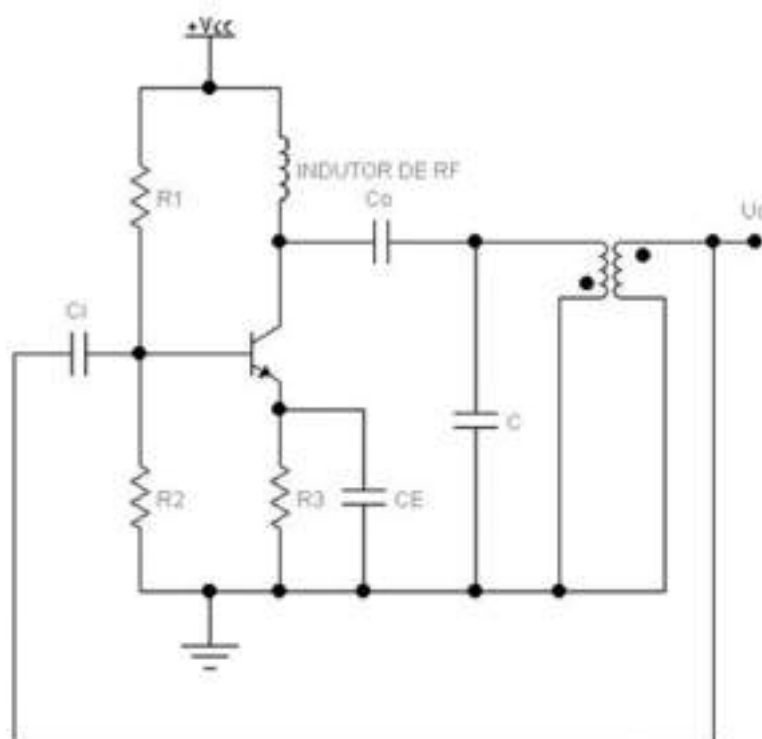


Ilustração 2-7 – Oscilador Armstrong

Sendo M o coeficiente de indução mútua do transformador e L a indutância do primário deste, e considerando desprezável o efeito de carga da base, pode-se escrever a equação seguinte, que descreve o ganho da malha de realimentação.

$$B = \frac{M}{L}$$

Para que o circuito possa oscilar, deverá garantir-se que $A > 1 / B$, podendo escrever-se a equação seguinte que determina a sua frequência de oscilação.

$$f_o = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L \times C}}$$



Este oscilador é pouco utilizado devido à necessidade de utilização do transformador, que para além de caro e volumoso, gera facilmente harmónicos de frequência.

2.3.2. Oscilador Colpitts

O oscilador Colpitts pode ser construído em diferentes versões, com transístor bipolar em emissor comum, com transístor bipolar em base comum, ou com transístor de efeito de campo.

Vamos analisar a versão de transístor bipolar em emissor comum, em que, relativamente ao oscilador Armstrong, foi retirado o condensador, e adicionado um condensador e uma bobina, tal como se pode ver na figura seguinte.

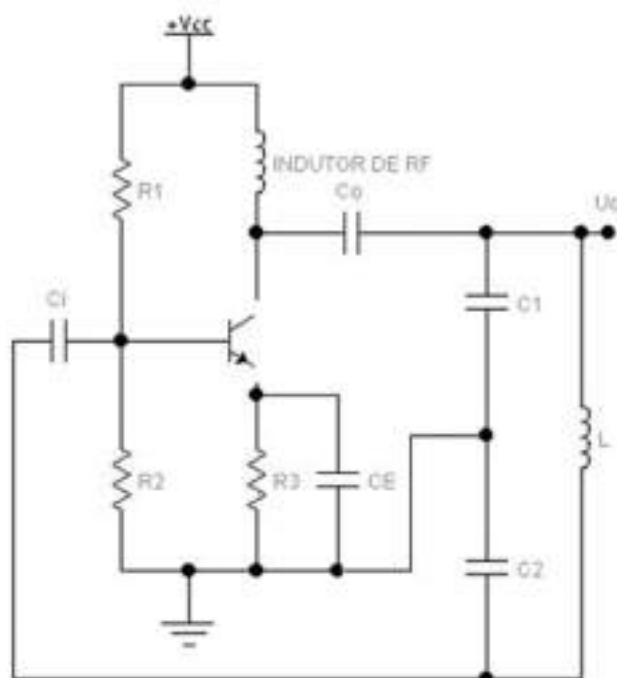


Ilustração 2-8 – Oscilador Colpitts

O circuito de oscilação (circuito tanque) é agora constituído por uma bobina (L) e pelos dois condensadores (C₁ e C₂).

Pode-se agora escrever a equação seguinte, que descreve o ganho da malha de realimentação.

$$B = \frac{C_1}{C_2}$$



Para que o circuito possa oscilar, deverá garantir-se que $A > 1 / B = (C_2 / C_1)$, podendo escrever-se a equação seguinte que determina a sua frequência de oscilação.

$$f_o = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L \times C}}$$

O valor da capacidade C encontra-se através da equação seguinte.

$$C = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}$$

O oscilador Colpitts é um dos osciladores LC mais utilizados.

2.3.3. Oscilador Hartley

No oscilador Hartley, aparece relativamente ao oscilador estudado anteriormente, uma nova bobina, desaparecendo um dos condensadores, conforme se pode confirmar pelo esquema indicado a seguir.

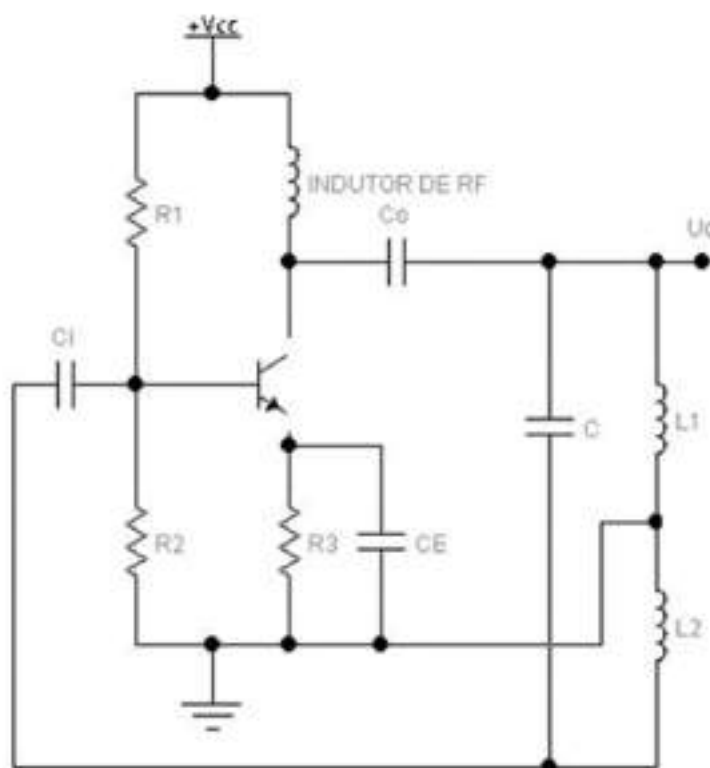


Ilustração 2-9 – Oscilador Hartley



O circuito de oscilação (circuito tanque) é agora constituído por duas bobinas (L_1 e L_2) e pelo condensador (C).

Pode-se agora escrever a equação seguinte, que descreve o ganho da malha de realimentação.

$$B = \frac{L_2}{L_1}$$

Para que o circuito possa oscilar, deverá garantir-se que $A > 1 / B = (L_1 / L_2)$, podendo escrever-se a equação seguinte que determina a sua frequência de oscilação.

$$f_o = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L \times C}}$$

O valor da bobina L encontra-se através da equação seguinte.

$$L = L_1 + L_2$$

2.3.4. Oscilador Clapp

No oscilador Clapp, aparece relativamente ao oscilador estudado anteriormente, novamente um segundo condensador, e um terceiro em série com a bobina, em substituição da segunda bobina, conforme se pode confirmar pelo esquema indicado a seguir.

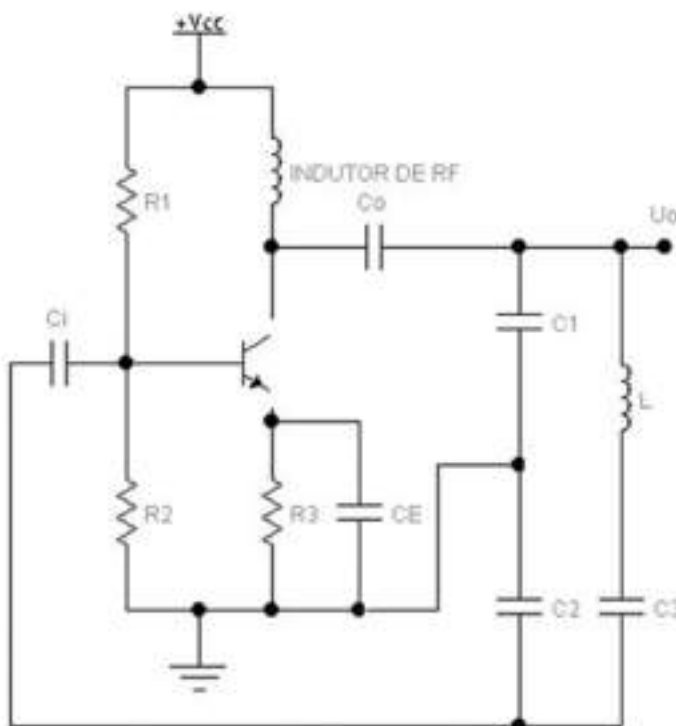


Ilustração 2-10 – Oscilador Clapp



O circuito de oscilação (circuito tanque) é agora constituído por três condensadores (C_1 , C_2 e C_3) e pela bobina (L).

Pode-se agora escrever a equação seguinte, que descreve o ganho da malha de realimentação.

$$B = \frac{C_1}{C_2}$$

Para que o circuito possa oscilar, deverá garantir-se que $A > 1 / B = (C_2 / C_1)$, podendo escrever-se a equação seguinte que determina a sua frequência de oscilação.

$$f_{os} = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L \times C_s}}$$

O valor do condensador C encontra-se através da equação seguinte.

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

2.4. Oscilador com cristal de quartzo

Os osciladores com cristal de quartzo (ver figura seguinte) têm uma característica fundamental, que se traduz por oscilar a uma dada frequência sinusoidal, apresentando elevada precisão e estabilidade.



Ilustração 2-11 – Cristal de quartzo



2.4.1. Constituição e funcionamento

O princípio de funcionamento dos cristais baseia-se no chamado efeito piezoelétrico, ou piezoeletricidade.

Certos cristais, como o sal de Rochelle, a turmalina ou sal de Seignette, e o quartzo, têm a propriedade de gerar uma tensão elétrica, quando comprimidos (ver figura seguinte).

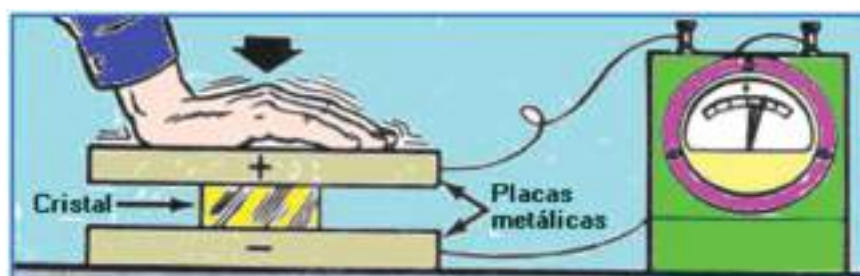


Ilustração 2-12 – Piezoeletricidade

Este é um método de conversão direta de energia mecânica em energia elétrica.

A tensão gerada entre as placas depende do grau de compressão, chamando-se a esse fenômeno, piezoeletricidade.

O efeito piezoelétrico é assim entendido como a interação eletromecânica linear entre a força mecânica e o estado elétrico (forças de Coulomb), em materiais cristalinos (cerâmicos, polímeros).

O cristal de sal de Rochelle, por exemplo, é muitas vezes empregue nos fonocaptadores dos gira-discos.

Ele converte os sulcos do disco em tensão elétrica variável.

A agulha do fonógrafo é mantida firme junto ao cristal, e ao passar pelos sulcos do disco aquela vibra, de ponta a ponta, de acordo com as variações de profundidade dos sulcos. Estas variações são transmitidas ao cristal sob a forma de variações de pressão.

Em consequência disto, o cristal gera uma tensão variável a qual produz som, quando amplificada e dirigida a um altifalante.

O microfone de cristal é outro exemplo da aplicação da tensão gerada por deformação de cristais.

Também muitos acendedores de fogão e isqueiros funcionam com base no fenômeno da piezoeletricidade.

Cada cristal tem uma frequência fundamental e vários harmônicos.



Estes harmônicos são frequências múltiplas ímpares da frequência fundamental, por exemplo, para uma frequência fundamental de 1,5 MHz, consideramos o primeiro harmônico ímpar ($f \approx 3 \times 1,5 = 4,5$ MHz), o segundo harmônico ímpar ($f \approx 5 \times 1,5 = 7,5$ MHz), e assim sucessivamente.

Estes harmônicos são também chamados sobretons, mas normalmente os cristais são utilizados na sua frequência fundamental.

O cristal em funcionamento, tem um circuito elétrico equivalente ao representado na figura seguinte.

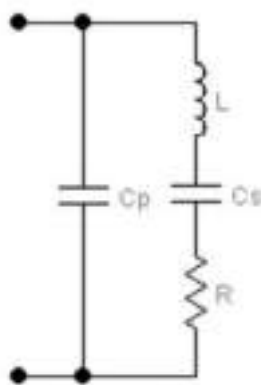


Ilustração 2-13 – Esquema elétrico equivalente de um cristal de quartzo

Trata-se de um circuito RLC série-paralelo, constituído por uma resistência (R), uma bobina (L) e um condensador (C_s), ligados em série, e um outro condensador (C_p), ligado em paralelo com os restantes componentes.

Devido a estes dois ramos do circuito, vão existir duas frequências de ressonância, uma série (f_{os}), e outra paralelo (f_{op}), sendo ambos os valores muito próximos.

A expressão de cálculo da frequência série, vem dada pela expressão seguinte.

$$f_{os} = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L \times C_s}}$$

A expressão de cálculo da frequência paralelo, vem dada pela expressão seguinte.

$$f_{op} = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L \times C_L}}$$

A capacidade equivalente (C_L) deste anel formado pelos dois ramos, vem dada pela expressão seguinte.



$$C_L = \frac{C_p \times C_s}{C_p + C_s}$$

Pode ser considerada como frequência de oscilação do cristal (f_o), a frequência de oscilação paralelo.

O fator de qualidade do cristal (Q) será dado pela expressão seguinte, em que f é a frequência a que o cristal se encontra a funcionar.

$$Q = \frac{2 \times \pi \times f \times L}{R}$$

A largura de banda (LB) do cristal será então dada pela expressão seguinte.

$$LB = \frac{f_o}{Q}$$

2.4.2. Oscilador de Pierce a cristal

Na figura seguinte representa-se um oscilador Pierce a cristal.

O cristal está ligado em série na malha de realimentação do amplificador, entre a base e o coletor do transístor, funcionando por isso, à frequência de ressonância série (f_{os}).

A expressão de cálculo da frequência série, vem dada pela expressão seguinte.

$$f_{os} = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L \times C_s}}$$

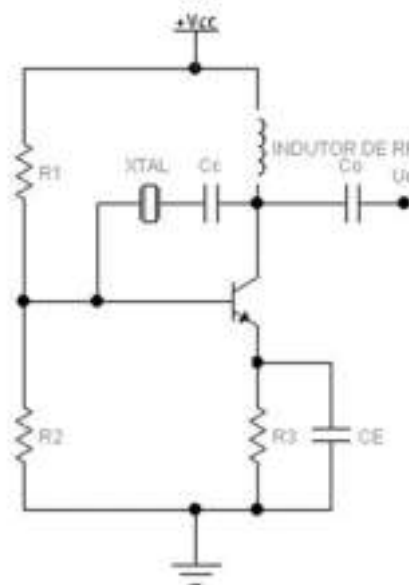


Ilustração 2-14 – Oscilador Pierce a cristal



Em modo de ressonância série podemos ajustar a frequência de ressonância do cristal, ligando em série uma capacidade fixa ou variável (C_c).

A nova frequência de ressonância (f_{osc}) com carga C_c em série com o cristal, vem dada pela expressão seguinte.

$$f_{osc} = f_{os} \times \left[1 + \frac{C_s}{2 \times (C_p + C_c)} \right]$$

2.4.3. Oscilador Colpitts a cristal

O circuito oscilador Colpitts é montado também com cristal, e com amplificador base constituído por transístor bipolar em emissor comum, tal como se apresenta na figura seguinte.

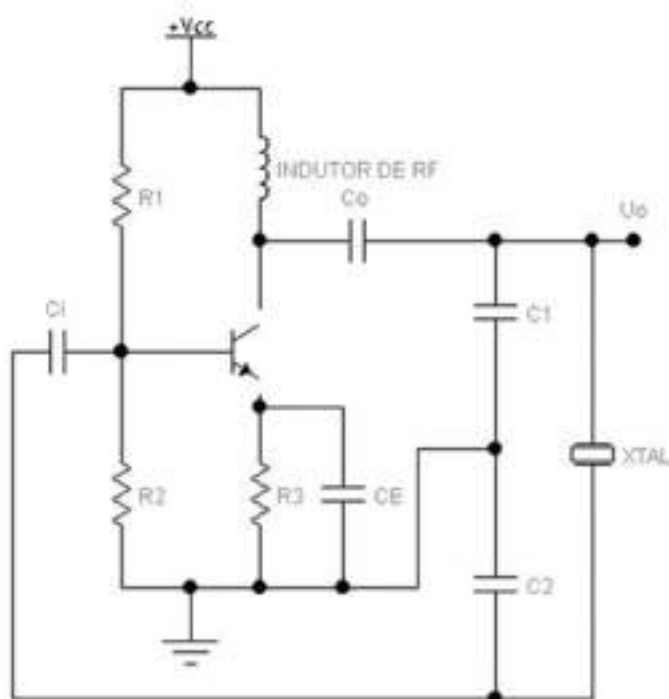


Ilustração 2-15 – Oscilador Colpitts a cristal

Pode-se escrever a equação seguinte, que descreve o ganho da malha de realimentação.

$$B = \frac{C_1}{C_2}$$



O ganho do amplificador vem dado pela expressão seguinte.

$$A = \frac{C_2}{C_1}$$

O valor da capacidade C_c correspondente à carga, encontra-se através da equação seguinte.

$$C_L = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}$$

A frequência em modo de ressonância, em carga C_c , obtém-se tal como no oscilador Pierce a cristal, pela expressão seguinte.

$$f_{osc} = f_{os} \times \left[1 + \frac{C_s}{2 \times (C_p + C_c)} \right]$$

2.4.4. Oscilador a cristal com amplificador operacional

Na figura seguinte apresenta-se um oscilador a cristal com amplificador operacional. A existência dos díodos na saída, converte o sinal em onda retangular, em vez de onda sinusoidal (passa a não ser um circuito linear).

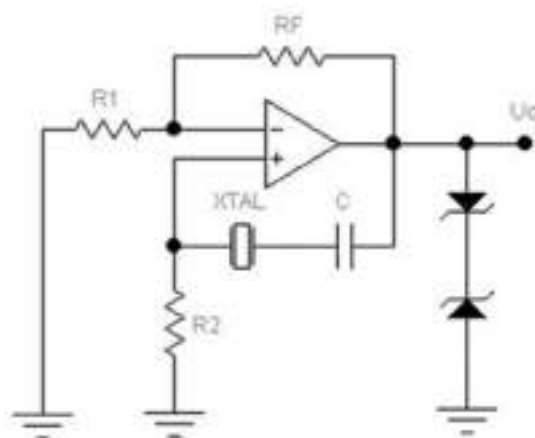


Ilustração 2-16 – Oscilador a cristal com amplificador operacional



2.4.5. Oscilador a cristal com MOSFET

Na figura seguinte apresenta-se um oscilador a cristal com MOSFET.

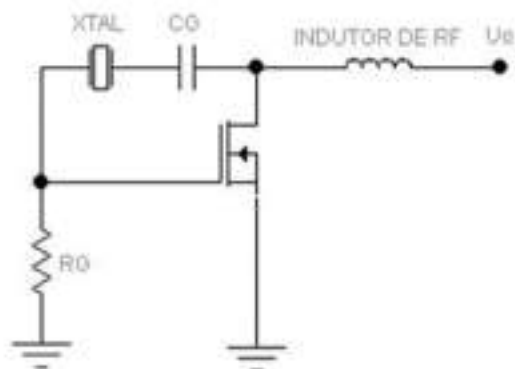


Ilustração 2-17 – Oscilador a cristal com MOSFET

2.5. Atividades propostas

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO:

01 – Na figura seguinte representa-se um circuito oscilador em Ponte de Wien, obtido a partir de um $\mu A741C$, e em que $R = 1,5 \text{ K}\Omega$, $C = 10 \text{ nF}$, $R_{3a} = 150 \text{ K}\Omega$, $R_{3b} = 47 \text{ K}\Omega$ e $R_4 = 18 \text{ K}\Omega$.

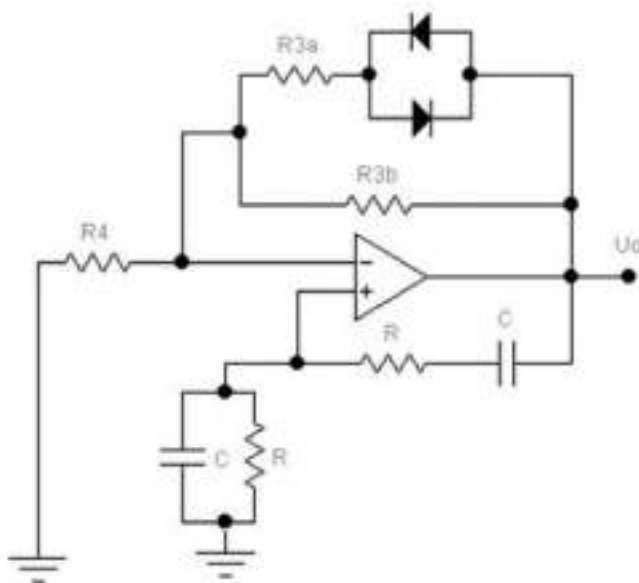


Ilustração 2-18 – Circuito do exercício 2.01

- Calcular os ganhos A e B do oscilador, estabilizado;
- Calcular a frequência de oscilação.



02 – Na figura seguinte representa-se um circuito oscilador desfasador por avanço de fase, e sabendo que $C = 22 \text{ nF}$, $R = 270 \text{ } \Omega$, $R_1 = 10 \text{ K}\Omega$ e $R_f = 33 \text{ K}\Omega$.

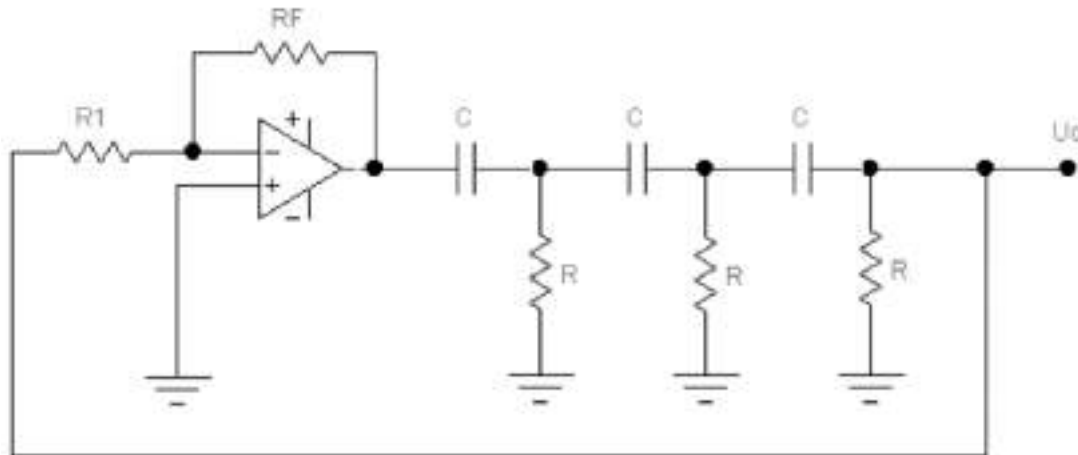


Ilustração 2-19 – Circuito do exercício 2.02

Calcular:

- a. O ganho do oscilador.
- b. A frequência de oscilação.

03 – Considere o circuito oscilador representado na figura seguinte.

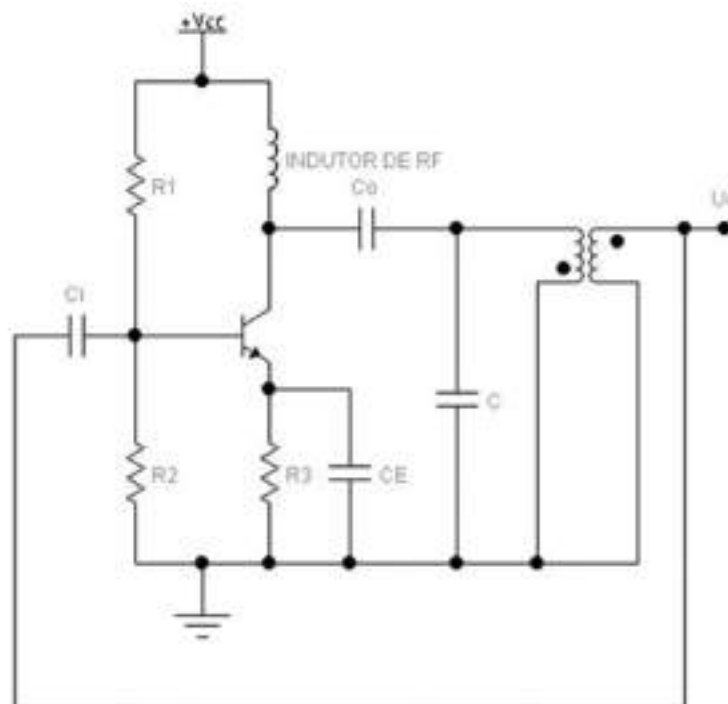


Ilustração 2-20 – Circuito do exercício 2.03



Sabe-se que $U_{cc} = +20\text{ V}$, $C_i = 0,1\ \mu\text{F}$, $C_o = 0,1\ \mu\text{F}$, $C_E = 0,1\ \mu\text{F}$, $C = 10\ \text{nF}$, $R_1 = 10\ \text{k}\Omega$, $R_2 = 5\ \text{k}\Omega$, $R_3 = 1\ \text{k}\Omega$, $M = 0,1\ \mu\text{H}$ e $L = 2\ \mu\text{H}$.

- Qual o oscilador representado na figura?
- Calcular o valor do ganho da malha de realimentação.
- Calcular a frequência de oscilação do circuito.
- Indique a condição para que o circuito oscile.

04 – Considere o circuito oscilador representado na figura seguinte.

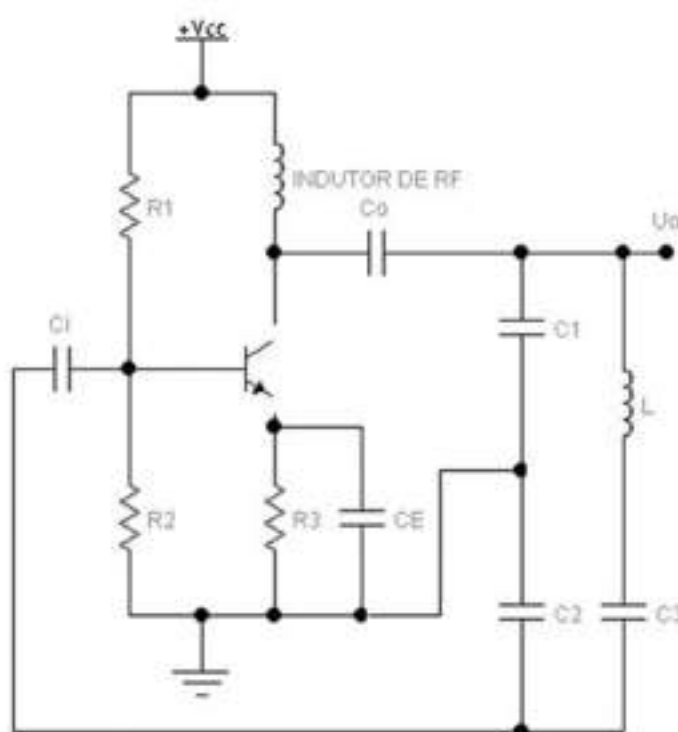


Ilustração 2-21 – Circuito do exercício 2.04

Sabe-se que $U_{cc} = +20\text{ V}$, $C_i = 0,1\ \mu\text{F}$, $C_o = 0,1\ \mu\text{F}$, $C_E = 0,1\ \mu\text{F}$, $C_1 = 0,001\ \mu\text{F}$, $C_2 = 0,01\ \mu\text{F}$, $R_1 = 10\ \text{k}\Omega$, $R_2 = 5\ \text{k}\Omega$, $R_3 = 1\ \text{k}\Omega$, e $L = 5\ \mu\text{H}$.

- Qual o oscilador representado na figura?
- Calcular o valor do ganho da malha de realimentação.
- Calcular a frequência de oscilação do circuito.
- Indique a condição para que o circuito oscile.



05 – Considere o circuito oscilador representado na figura seguinte.

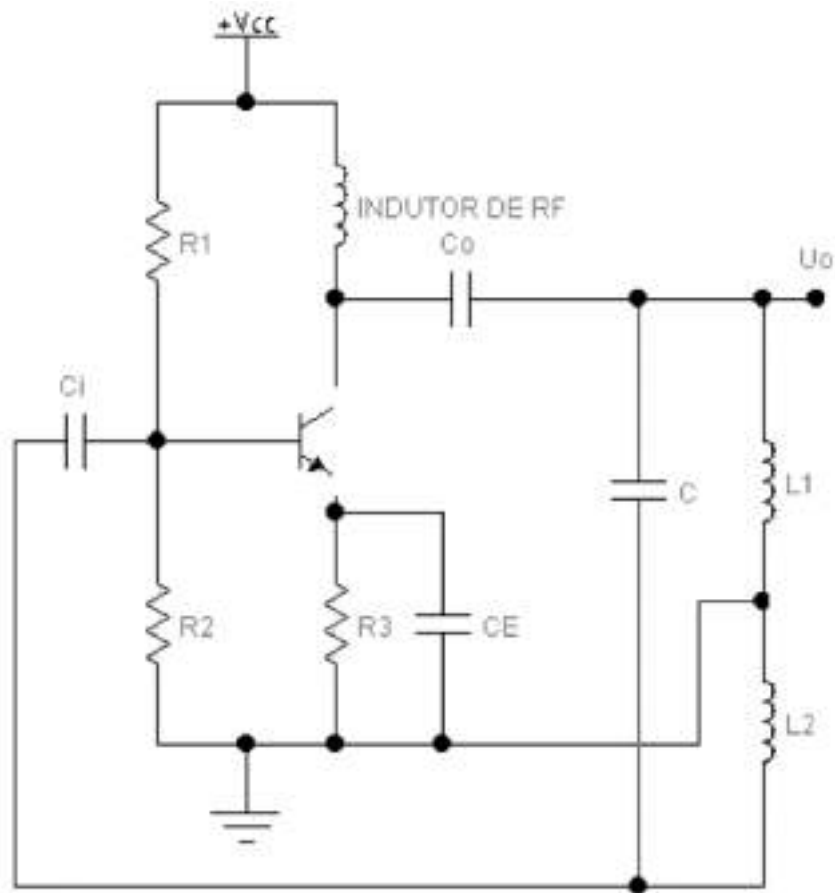


Ilustração 2-22 – Circuito do exercício 2.05

Sabe-se que $U_{CC} = +20 \text{ V}$, $C_i = 0,1 \mu\text{F}$, $C_o = 0,1 \mu\text{F}$, $C_e = 0,1 \mu\text{F}$, $C = 0,001 \mu\text{F}$, $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$, $L_1 = 1 \mu\text{H}$ e $L_2 = 0,2 \mu\text{H}$.

- Qual o oscilador representado na figura?
- Calcular o valor do ganho da malha de realimentação.
- Calcular a frequência de oscilação do circuito.
- Indique a condição para que o circuito oscile.



06 – Considere o circuito oscilador representado na figura seguinte.

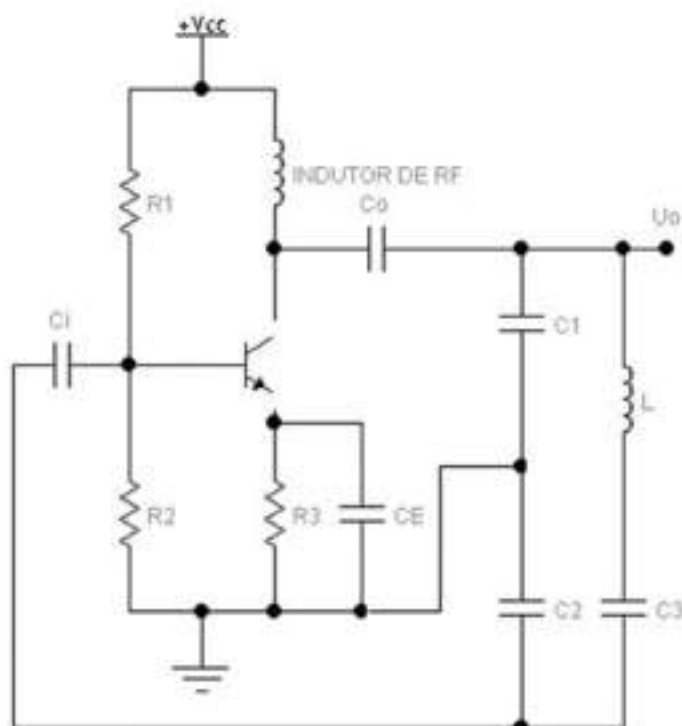


Ilustração 2-23 – Circuito do exercício 2.06

Sabe-se que $U_{cc} = +20 \text{ V}$, $C_i = 0,1 \mu\text{F}$, $C_o = 0,1 \mu\text{F}$, $C_E = 0,1 \mu\text{F}$, $C_1 = 0,001 \mu\text{F}$, $C_2 = 0,01 \mu\text{F}$, $C_3 = 47 \text{ pF}$, $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$, e $L = 5 \mu\text{H}$.

- Qual o oscilador representado na figura?
- Calcular o valor do ganho da malha de realimentação.
- Calcular a frequência de oscilação do circuito.
- Indique a condição para que o circuito oscile.

07 – Um determinado cristal possui as seguintes características: $L = 1 \text{ H}$, $R = 1 \text{ k}\Omega$, $C_s = 0,01 \text{ pF}$ e $C_p = 20 \text{ pF}$.

Calcular:

- A frequência de ressonância série (f_{os});
- A frequência de ressonância paralelo (f_{op});
- O fator de qualidade do circuito em ambas as frequências;
- A largura de banda à frequência de oscilação.



08 – Na figura seguinte representa-se um circuito oscilador Pierce a cristal de quartzo com carga C_c .

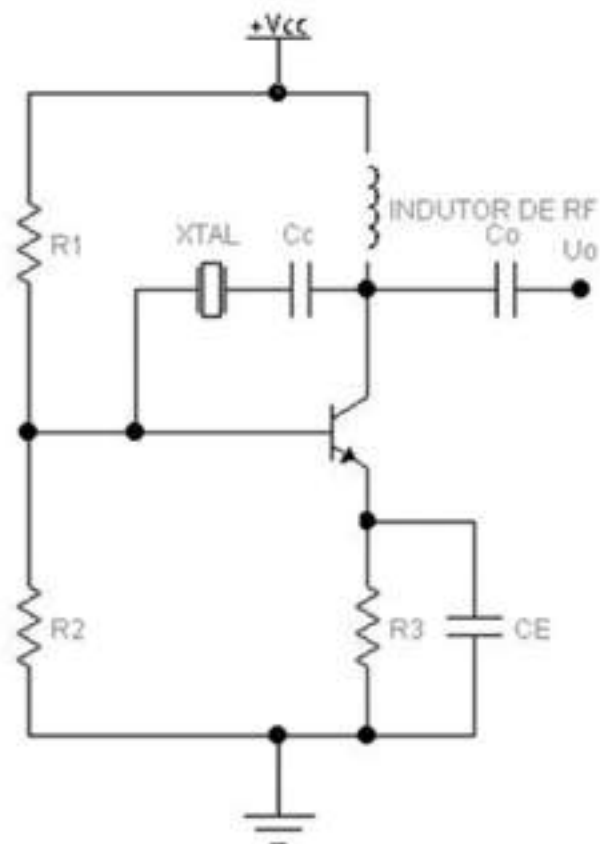


Ilustração 2-24 – Circuito do exercício 2.08

Sabendo que $U_{CC} = +20 \text{ V}$, $C_o = 0,1 \mu\text{F}$, $C_E = 0,1 \mu\text{F}$, $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$, e $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$, e que $C_s = 0,024 \text{ pF}$, $C_p = 9 \text{ pF}$, $L = 27 \text{ H}$, calcular:

- Calcular a frequência de oscilação, para $C_c = 10 \text{ pF}$;
- Calcular a frequência de oscilação, para $C_c = 20 \text{ pF}$.



09 – Na figura seguinte representa-se um circuito oscilador Colpitts a cristal de quartzo.

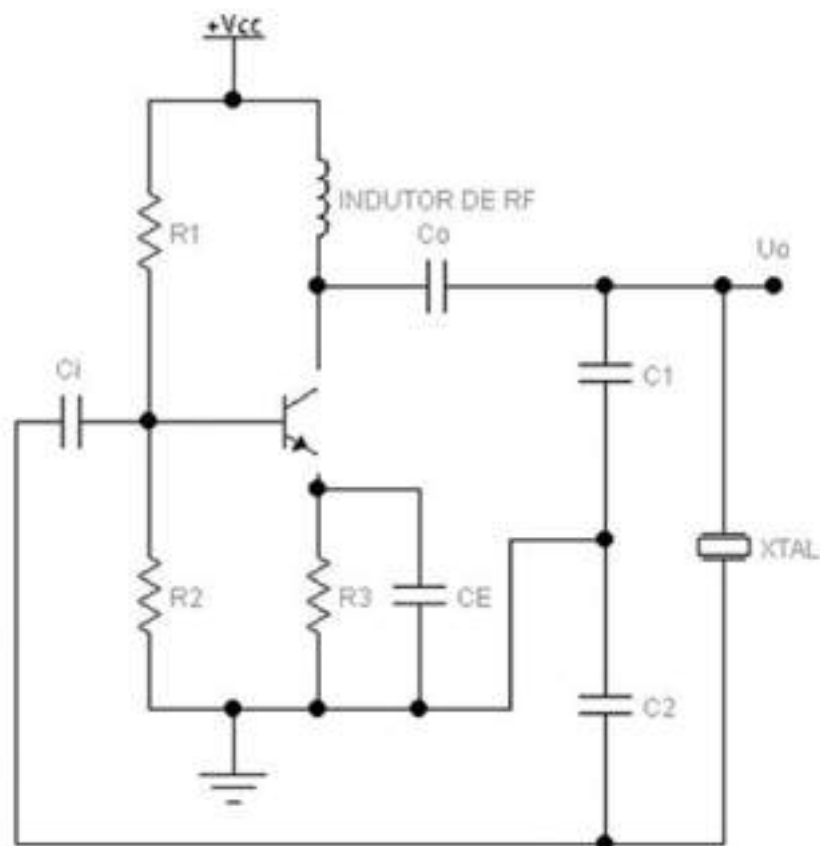


Ilustração 2-25 – Circuito do exercício 2.09

Sabendo que $U_{cc} = +20 \text{ V}$, $C_i = 0,1 \mu\text{F}$, $C_o = 0,1 \mu\text{F}$, $C_E = 0,1 \mu\text{F}$, $C_1 = 20 \text{ pF}$, $C_2 = 60 \text{ pF}$, $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$, e $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$, e que $R = 2,5 \text{ k}\Omega$, $C_s = 0,08 \text{ pF}$, $C_p = 12 \text{ pF}$, e $L = 3,5 \text{ H}$, calcular:

- A frequência de ressonância série (f_{os});
- A frequência de ressonância paralelo (f_{op});
- O ganho do amplificador.
- A frequência de oscilação do circuito (paralelo).



Trabalhos Práticos

10 – Trabalho Prático n.º 01 – Oscilador Sinusoidal em Ponte de Wien

1 – INTRODUÇÃO

Na figura 1 está representado o circuito de um oscilador sinusoidal RC em ponte de Wien.

Este tipo de oscilador usa a ponte de Wien como malha de realimentação de modo que U_F (tensão de realimentação) está em fase com a tensão de saída U_o , dado que a realimentação positiva é aplicada na entrada não inversora.

Para que isso se verifique, será necessário que $C_1=C_2=C$ e $R_1=R_2=R$.

A frequência de oscilação é dada por:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

O fator de atenuação B é de $1/3$. Como $B \times A_{VOL} = 1$ (Condição de Barkhausen), vem que $A_{VOL} = 3$.

Como se pode verificar, este oscilador utiliza dois tipos de realimentação (positiva e negativa).

O ganho do amplificador terá que ser igual a 3, devendo para isso ser $R_3 = 2 \times R_4$.

Para que o oscilador arranque, será necessário que o ganho inicial seja maior que 3.

Enquanto o circuito não oscilar, os dois díodos D_1 e D_2 estão bloqueados.

Com o início da oscilação, D_1 e D_2 entram alternadamente em condução de acordo com a polaridade do sinal, colocando R_3 em paralelo com R_1 , de modo que o ganho do amplificador reduza para 3 ($B=1/3$).

2 – OBJETIVOS

Os objetivos para este trabalho são os seguintes:

- Observar o funcionamento de um circuito oscilador sinusoidal.

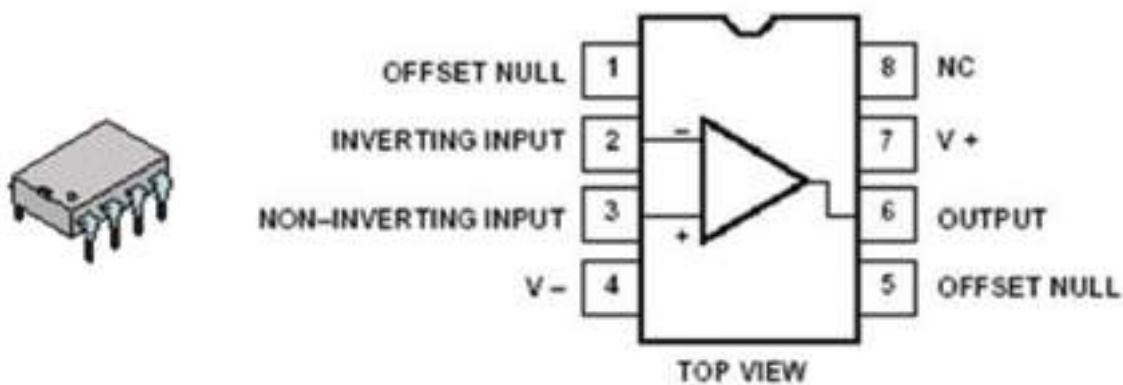


3 – RECURSOS NECESSÁRIOS

- 1 Fonte de alimentação simétrica regulável (0 a 15 V);
- 1 Placa de montagem eletrônica (“Breadboard”);
- 1 Osciloscópio com dois canais (Duas pontas de prova);
- Condutores;
- 1 Multímetro;
- 1 Circuito integrado $\mu A741$;
- 7 Resistências de $\frac{1}{4}$ W ($R_1 = 10 \text{ K}\Omega$, $R_2 = 1 \text{ K}\Omega$, $R_4 = 15 \text{ K}\Omega$, $R_5 = 15 \text{ K}\Omega$, $R_L = 10 \text{ K}\Omega$, $R_6 = 10 \text{ K}\Omega$ e $R_7 = 10 \text{ K}\Omega$);
- 1 Resistência ajustável ($R_3 = 10 \text{ K}\Omega$);
- 2 Díodos 1N4148;
- 2 Condensadores ($C_1 = 10 \text{ nF}$, $C_2 = 10 \text{ nF}$);
- Ferramentas necessárias;
- Computador com acesso à internet;
- Manuais técnicos;

4 – ESQUEMAS DO CIRCUITO

Considerar os esquemas das figuras.



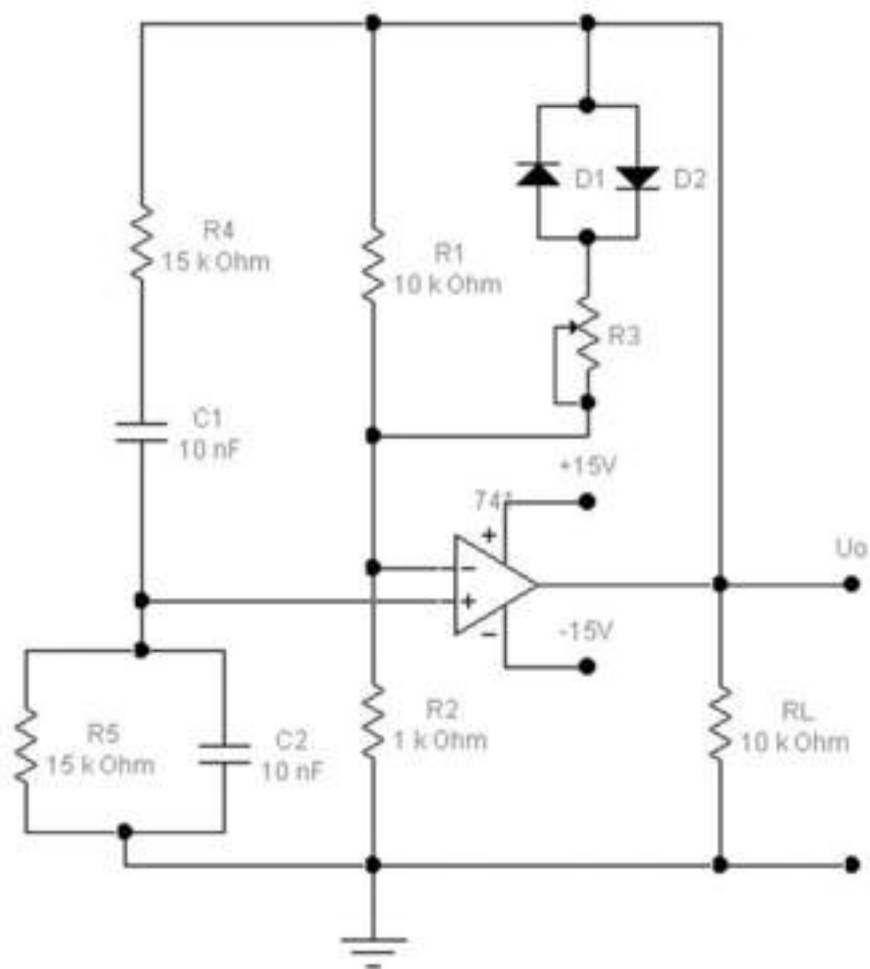


Figura 1

5 – PROCEDIMENTOS DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

- Montar o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 1);
- Ligar um dos canais do osciloscópio na saída;
- Regular R_3 de modo a obter na saída um sinal com amplitude máxima e sem distorção;
- Medir a frequência do sinal de saída;
- Calcular a frequência de oscilação;
- Substituir as resistências R_4 por R_6 e R_5 por R_7 ;
- Medir novamente o valor da frequência do sinal de saída;
- Calcular a frequência de oscilação com as novas resistências;
- Comparar as frequências calculadas com as obtidas experimentalmente.



6 – DURAÇÃO DO TRABALHO

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.

7 – ELABORAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RELATÓRIO

Elaborar um relatório do trabalho, por grupo de trabalho, respeitando os seguintes parâmetros mínimos:

I – ESTRUTURA

- a) Cabeçalho:
- Nome da Escola
 - Nome da Disciplina
 - Número e nome do Módulo
 - Nome dos alunos, números, ano e turma
 - Identificação do trabalho
- b) Conteúdo (Mínimo):
- 1 – Objetivos
 - 2 – Recursos necessários
 - 3 – Procedimentos do trabalho
 - 4 – Dificuldades encontradas
 - 5 – Estratégia de resolução das dificuldades
 - 6 – Esquemas das montagens
 - 7 – Conclusões finais

II – MODO DE APRESENTAÇÃO

Em ficheiro informático, ou alternativamente em folhas A4, redigido à mão.

III – PRAZO DE ENTREGA

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.

11 – Trabalho Prático n.º 02 – Oscilador Colpitts

1 – INTRODUÇÃO

O oscilador Colpitts é um tipo de oscilador que permite a obtenção de ondas sinusoidais, com frequências que variam entre alguns KHz e centenas de MHz.

O andar de amplificação constituído pelo transístor bipolar deve estar polarizado para se obter um ponto de funcionamento (Q) sensivelmente a meio da reta de carga ($V_{CE} \approx V_{CC} / 2$),



o que se consegue através do ajustamento do potenciômetro R_2 . Este permite ajustar a amplitude do sinal, pela regulação da corrente I_E (em corrente contínua).

O condensador C_E impede que o sinal de corrente alternada se atenuie no potenciômetro R_E . O condensador C_3 impede a passagem da corrente contínua para o circuito oscilante. A frequência de oscilação e os ganhos A e B deste circuito oscilador, calculam-se pelas expressões indicadas a seguir:

$$f_o = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L \times C}} \quad C = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2} \quad A = \frac{C_2}{C_1} \quad B = \frac{C_1}{C_2}$$

A resistência de carga R_L é responsável por produzir alguma atenuação no sinal de saída do oscilador, podendo mesmo causar a paragem da oscilação.

Para valores de R_L na ordem de 10 K Ω , o sinal apresenta boas características, oscilando regularmente, mas à medida que se reduz o valor da resistência de carga, o sinal reduz-se, acabando por desaparecer.

Para evitar esta situação, deve ser incorporado um circuito “buffer” entre o oscilador e a carga.

2 – OBJETIVOS

Os objetivos para este trabalho são os seguintes:

- Montar um oscilador Colpitts com malha RC.
- Regular o oscilador para obtenção de uma oscilação sinusoidal.
- Regular a amplitude e a frequência de uma oscilação sinusoidal.
- Calcular frequências de oscilação e ganhos.
- Observar o efeito de carga sobre o oscilador.

3 – RECURSOS NECESSÁRIOS

- 1 Fonte de alimentação simétrica regulável (0 a ± 30 V);
- 1 Placa de montagem eletrônica (“Breadboard”);
- 1 Osciloscópio com dois canais (Duas pontas de prova);
- Condutores;
- 1 Multímetro;
- 1 Transistor BC237;



- 3 Resistências de $\frac{1}{4}$ W ($R_L = 10\text{K}\Omega$, $R_1 = 25\text{K}\Omega$ e $R_C = 2,2\text{K}\Omega$);
- 2 Potenciômetros $P_2 = 25\text{ K}\Omega$, $P_E = 1\text{ K}\Omega$;
- 4 Condensadores, $C_E = 0,01\text{ }\mu\text{F}$, $C_1 = 10\text{ nF}$, $C_2 = 100\text{ nF}$ (variável), $C_3 = 150\text{ nF}$;
- 1 Bobina $L = 1\text{ mH}$ (variável);
- Ferramentas necessárias;
- Computador com acesso à internet;
- Manuais técnicos;

4 – ESQUEMAS DO CIRCUITO

Considerar os esquemas das figuras.

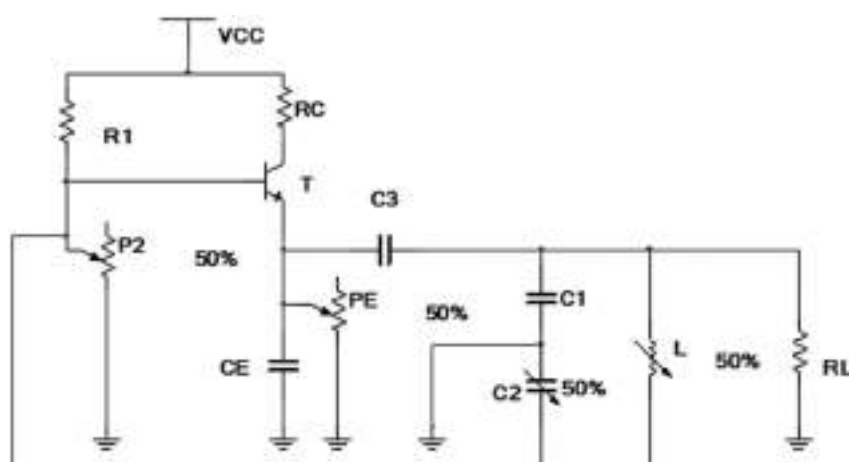


Figura 1

5 – PROCEDIMENTOS DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

- Montar o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 1);
- Calcular a frequência de oscilação f_o e os ganhos teóricos A e B;
- Colocar os potenciômetros com a totalidade da resistência inserida no circuito e retirar a carga (R_L) do circuito;
- Visualizar no osciloscópio U_i (tensão na base do transistor) e U_o (tensão na carga), utilizando simultaneamente os dois canais;
- Variar o potenciômetro P_2 , de forma a obter um ponto de funcionamento (Q), sensivelmente a meio da reta de carga ($V_{CE} = V_{CC} / 2$);
- Ajustar R_E de modo a obter uma onda sinusoidal sem distorção, com a maior amplitude possível;



- g. Ajustar C_2 e L, indicando as conclusões;
- h. Medir o período T e calcular a frequência f_0 correspondente. Comparar este valor com o que foi previamente calculado;
- i. Medir as amplitudes dos sinais de entrada e de saída, e registar os valores;
- j. Calcular os ganhos A e B, a partir das leituras das tensões de entrada e de saída, comparando-os com os valores previamente calculados.
- k. Ligar a carga R_L e verificar se há alteração do sinal de saída, registando o valor obtido;
- l. Indicar as conclusões no relatório, bem como os valores registados.

6 – DURAÇÃO DO TRABALHO

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.

7 – ELABORAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RELATÓRIO

Elaborar um relatório do trabalho, por grupo de trabalho, respeitando os seguintes parâmetros mínimos:

I – ESTRUTURA

- a) Cabeçalho:
 - Nome da Escola
 - Nome da Disciplina
 - Número e nome do Módulo
 - Nome dos alunos, números, ano e turma
 - Identificação do trabalho
- b) Conteúdo (Mínimo):
 - 1 – Objetivos
 - 2 – Recursos necessários
 - 3 – Procedimentos do trabalho
 - 4 – Dificuldades encontradas
 - 5 – Estratégia de resolução das dificuldades
 - 6 – Esquemas das montagens
 - 7 – Conclusões finais

II – MODO DE APRESENTAÇÃO

Em ficheiro informático, ou alternativamente em folhas A4, redigido à mão.



III – PRAZO DE ENTREGA

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.

12 – Trabalho Prático n.º 03 – Oscilador a Cristal

1 – INTRODUÇÃO

Na figura 1 está representado o circuito de um oscilador a cristal.

2 – OBJETIVOS

Os objetivos para este trabalho são os seguintes:

- a) Determinar experimentalmente a frequência de oscilação.

3 – RECURSOS NECESSÁRIOS

- 1 Fonte de alimentação simétrica regulável (0 a 15 V);
- 1 Placa de montagem eletrónica (“Breadboard”);
- 1 Osciloscópio com dois canais (Duas pontas de prova);
- Condutores;
- 1 Multímetro;
- 1 Transistor 2N2222;
- 4 Resistências de $\frac{1}{4}$ W ($R_1 = 56 \text{ K}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ K}\Omega$, $R_E = 560 \Omega$ e $R_4 = 100 \text{ K}\Omega$);
- 5 Condensadores ($C1 = 100 \text{ nF}$, $C2 = 47 \text{ pF}$, $C3 = 10 \text{ nF}$, $C4 = 100 \text{ nF}$, e $C_E = 10 \text{ nF}$);
- 1 Indutância de 1 mH;
- 1 Cristal de quartzo com $f = 3,5 \text{ MHz}$;
- Ferramentas necessárias;
- Computador com acesso à internet;
- Manuais técnicos.

4 – ESQUEMAS DO CIRCUITO

Considerar os esquemas das figuras.



Identificação de Pinos

PINO	Identificação
1	Emissor
2	Base
3	Colector (ligado à embalagem)

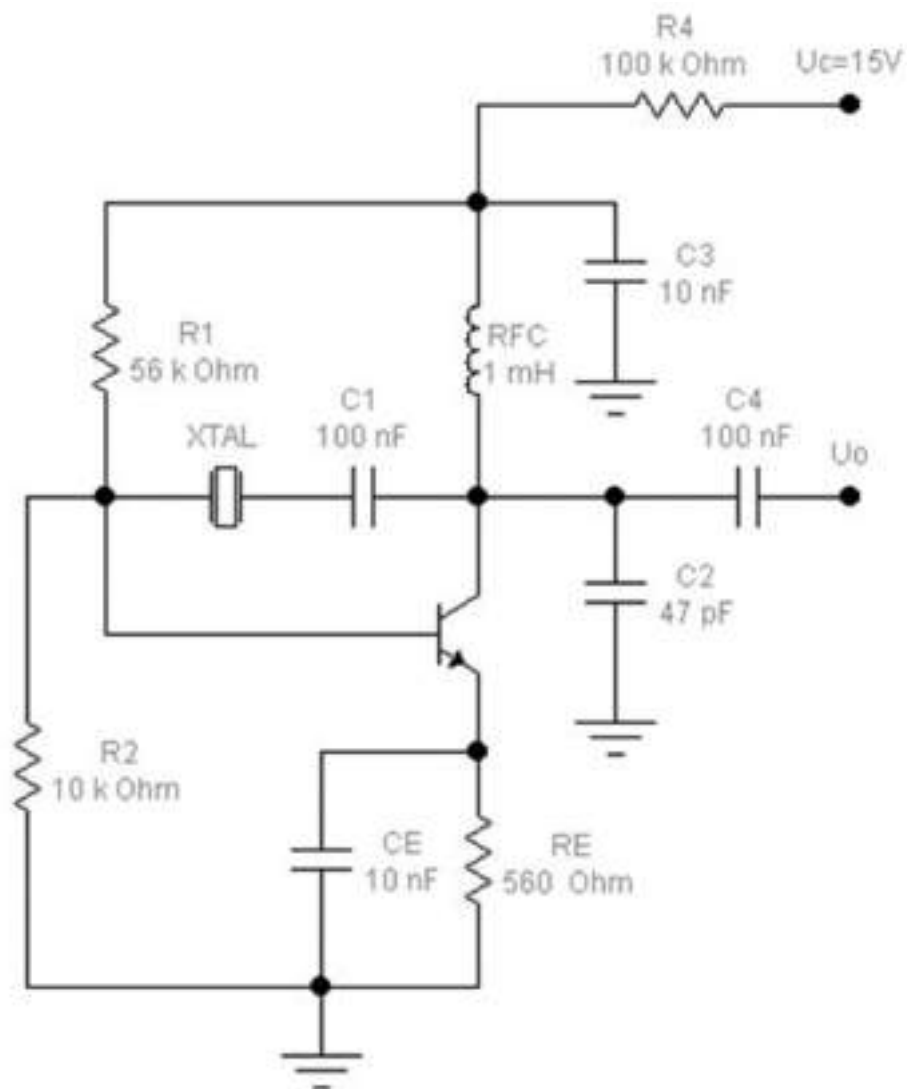
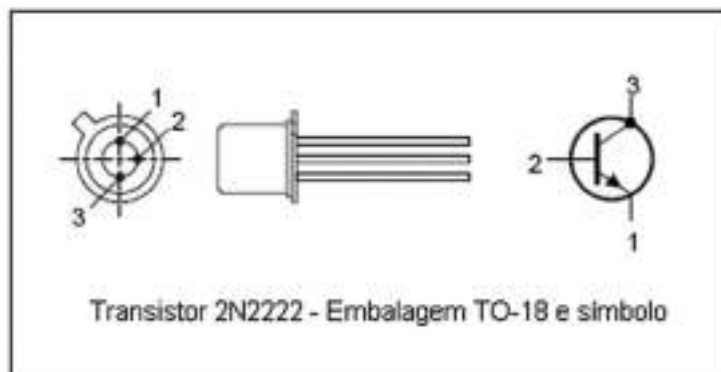


Figura 1



5 – PROCEDIMENTOS DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

- a. Montar o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 1);
- b. Observar a tensão de saída U_o , através de um dos canais do osciloscópio;
- c. Determinar experimentalmente a tensão U_o e o período T_o ;
- d. Com o valor de T_o obtido experimentalmente, calcular f_o ;
- e. Comparar o valor da frequência f_o obtida experimentalmente com a frequência do cristal.

6 – DURAÇÃO DO TRABALHO

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.

7 – ELABORAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RELATÓRIO

Elaborar um relatório do trabalho, por grupo de trabalho, respeitando os seguintes parâmetros mínimos:

I – ESTRUTURA

- a) Cabeçalho:
 - Nome da Escola
 - Nome da Disciplina
 - Número e nome do Módulo
 - Nome dos alunos, números, ano e turma
 - Identificação do trabalho
- b) Conteúdo (Mínimo):
 - 1 – Objetivos
 - 2 – Recursos necessários
 - 3 – Procedimentos do trabalho
 - 4 – Dificuldades encontradas
 - 5 – Estratégia de resolução das dificuldades
 - 6 – Esquemas das montagens
 - 7 – Conclusões finais

II – MODO DE APRESENTAÇÃO

Em ficheiro informático, ou alternativamente em folhas A4, redigido à mão.

III – PRAZO DE ENTREGA

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.



3. Osciladores não sinusoidais

Alguns osciladores não sinusoidais foram já abordados em módulos anteriores, pelo que a sua abordagem será menos aprofundada.

Os osciladores não sinusoidais são basicamente osciladores de relaxação, que utilizam condensadores que carregam e descarregam, provocando deste modo, saídas em onda quadrada.

O princípio de funcionamento destes osciladores é assim distinto do dos osciladores sinusoidais, não se pondo aqui a necessidade de cumprir as condições de Barkhausen.

Cada um destes tipos de osciladores tem um objetivo específico a cumprir, de acordo com a sua finalidade, sendo construídos com diferentes tipos de tecnologias, pelo que utilizam transístores, UJTs, SCRs, TRIACS, amplificadores operacionais, etc..

3.1.1. Oscilador de relaxação de onda quadrada com amplificador operacional

O oscilador de relaxação de onda quadrada com amplificador operacional, é também designado por multivibrador astável (não tem nenhum estado estável), tendo duas realimentações, uma positiva e outra negativa, e funciona como um Schmitt-Trigger, oscilando entre saturação positiva e negativa e vice-versa.

Na figura seguinte representa-se este circuito.

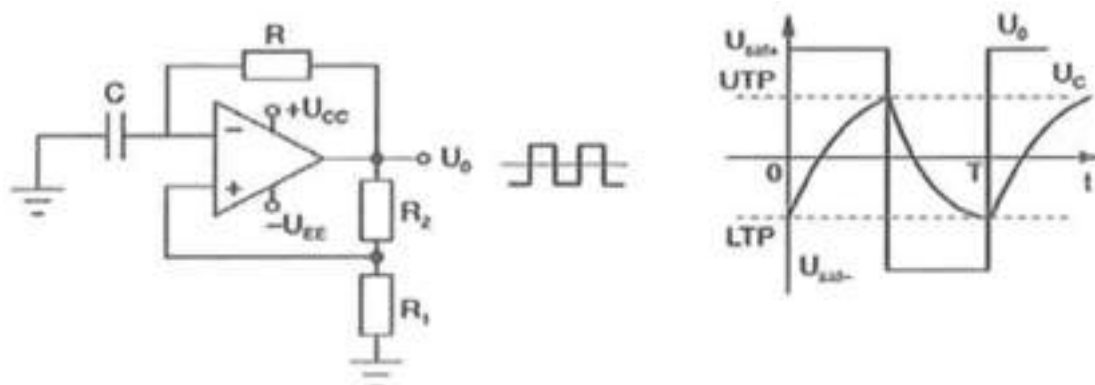


Ilustração 3-1 – Oscilador de relaxação de onda quadrada com amplificador operacional



A tensão de comutação superior (UTP) vem dada pela expressão seguinte.

$$UTP = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{SAT}$$

A tensão de comutação inferior (LTP) vem dada pela expressão seguinte.

$$LTP = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times (-V_{SAT})$$

O ganho de realimentação (B) vem dado pela expressão seguinte.

$$B = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

A frequência de oscilação (f_o) vem dada pela expressão seguinte.

$$f_o = \frac{1}{2 \times R \times C \times \ln\left(\frac{1+B}{1-B}\right)}$$

3.1.2. Oscilador de relaxação de onda triangular

Este oscilador gerador de onda triangular é constituído por um amplificador com realimentação positiva e tensão de referência nula, estando ligado a um bloco amplificador integrador, que por sua vez vai realimentar novamente o primeiro amplificador.

Na figura seguinte representa-se um oscilador deste tipo.

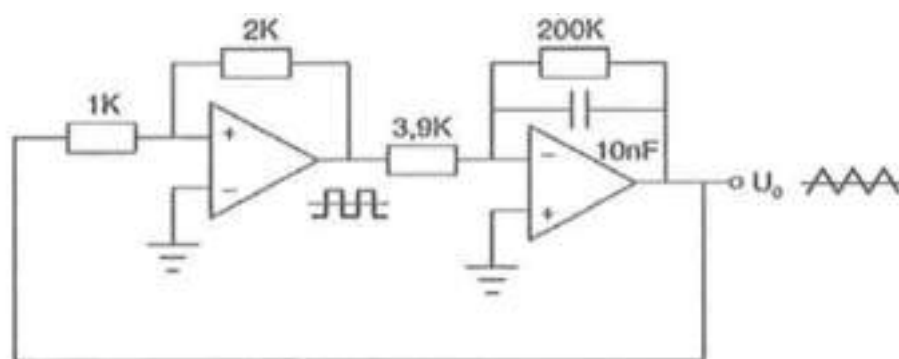


Ilustração 3-2 – Oscilador de relaxação de onda triangular



3.1.3. Oscilador de relaxação com lâmpada de néon

Este tipo de circuito é um oscilador com malha RC simples e com uma lâmpada de néon. As lâmpadas de néon são lâmpadas de descarga que só funcionam quando a tensão que lhes é aplicada atinge um determinado valor (cerca de 70 V).

Na figura seguinte representa-se um oscilador deste tipo.

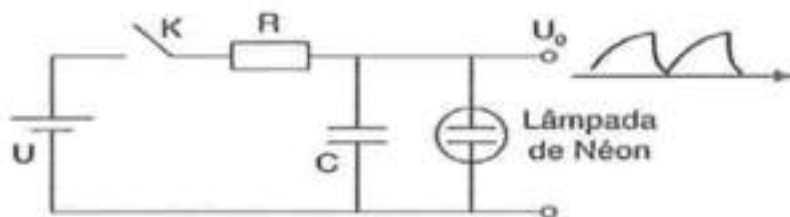


Ilustração 3-3 – Oscilador de relaxação com lâmpada de néon

3.1.4. Oscilador de relaxação com transístor UJT

Nas figuras seguintes representam-se o circuito deste oscilador, a característica do transístor unijunção, e as formas de onda no circuito.

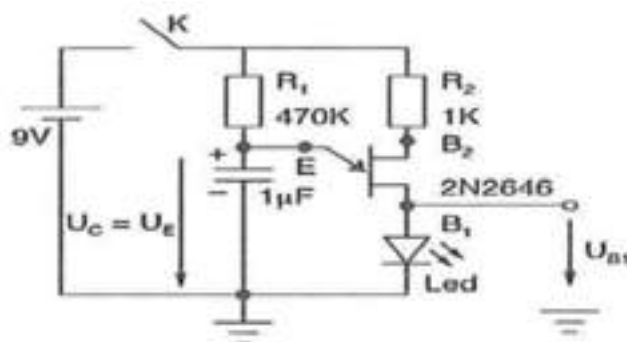


Ilustração 3-4 – Oscilador de relaxação com transístor unijunção (UJT)

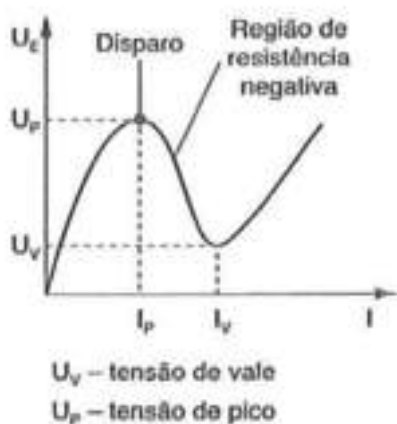


Ilustração 3-5 – Característica de um transístor unijunção (UJT)



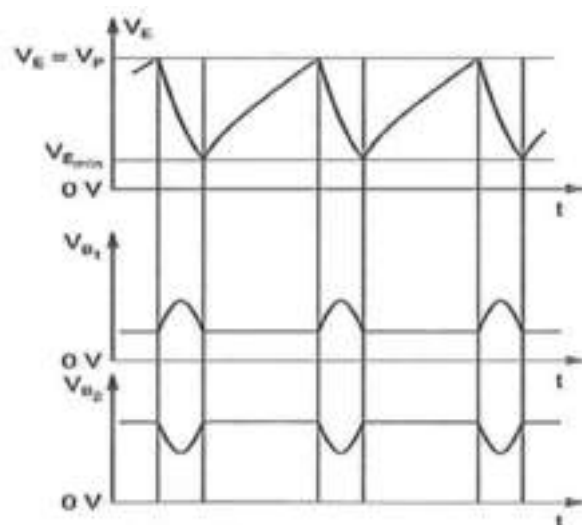


Ilustração 3-6 – Formas de onda no oscilador de relaxação com UJT

3.1.5. Multivibrador astável com transístores

Um multivibrador astável é um oscilador que não apresenta nenhum estado estável, oscilando continuamente, desde que alimentado.

Este circuito está representado na figura seguinte.

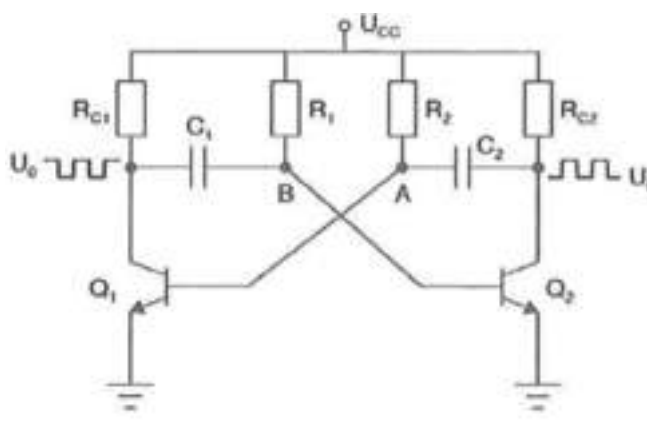


Ilustração 3-7 – Multivibrador astável com transístores

O circuito é constituído por dois transístores que conduzem alternadamente, produzindo nas saídas localizadas nos coletores dos transístores sucessões (trens) de impulsos (positivos e nulos).

Os períodos da onda em cada um dos coletores (Q_1 e Q_2) são dados pelas expressões seguintes e representam na figura seguinte.



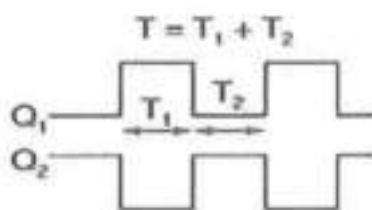


Ilustração 3-8 – Formas de onda nos coletores dos transístores

$$T_1 = 0,693 \times R_1 \times C_1$$

$$T_2 = 0,693 \times R_2 \times C_2$$

O período total da onda vem dado pela expressão seguinte.

$$T = T_1 + T_2 = 0,693 \times (R_1 \times C_1 + R_2 \times C_2)$$

A frequência da onda vem dada pela expressão seguinte.

$$f_o = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{0,693 \times (R_1 \times C_1 + R_2 \times C_2)} = \frac{1,44}{R_1 \times C_1 + R_2 \times C_2}$$

3.1.6. Osciladores em anel com portas lógicas

Existem vários osciladores que utilizam portas lógicas, particularmente das famílias TTL e CMOS.

As portas lógicas CMOS, para além de algumas vantagens relativamente às TTL, têm ainda a vantagem de poderem utilizar tensões de alimentação mais elevadas, o que permite trabalhar com tensões de entrada e de saída também mais elevadas e com menor consumo de energia.

De modo a reduzir o ruído sobre os sinais de entrada e de saída, podem ser usados osciladores com portas lógicas Schmitt-Trigger.

Podem-se usar ainda osciladores com portas lógicas compostas apenas por componentes passivos ou cristais (malhas RC) na malha de realimentação.



Por entre estes osciladores destacam-se os osciladores em anel, com portas Schmitt-Trigger, com portas NOR ou NAND inversoras, etc., conforme se representa nas figuras seguintes.

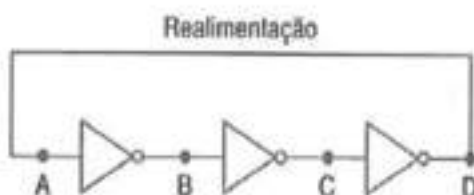


Ilustração 3-9 – Oscilador com portas lógicas em anel

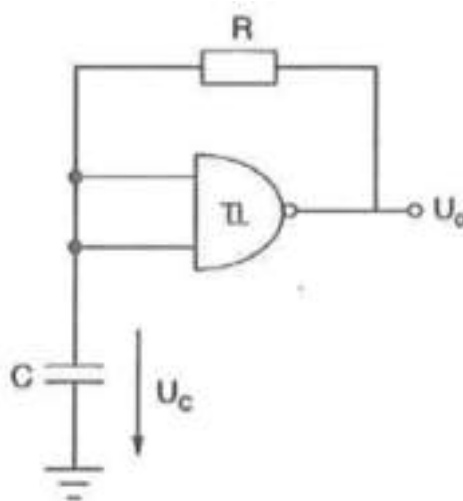


Ilustração 3-10 – Oscilador com portas Schmitt-Trigger

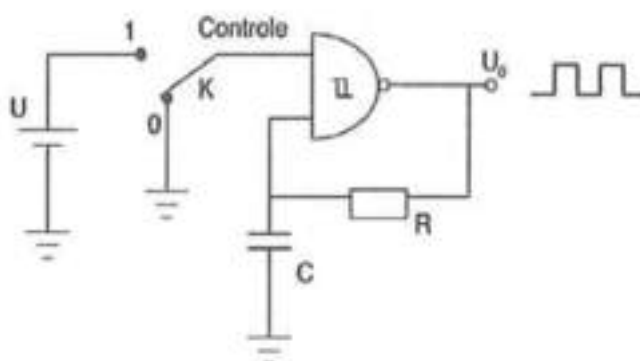


Ilustração 3-11 – Oscilador com portas Schmitt-Trigger, com entrada de controle



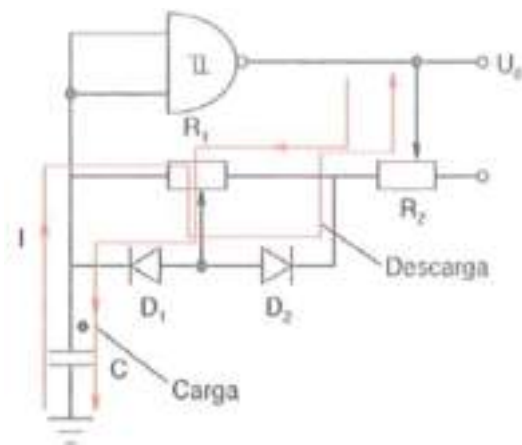


Ilustração 3-12 – Oscilador com portas Schmitt-Trigger, com regulação do ciclo de trabalho

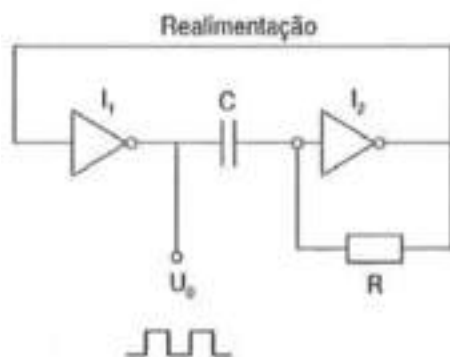


Ilustração 3-13 – Oscilador com número par de portas lógicas

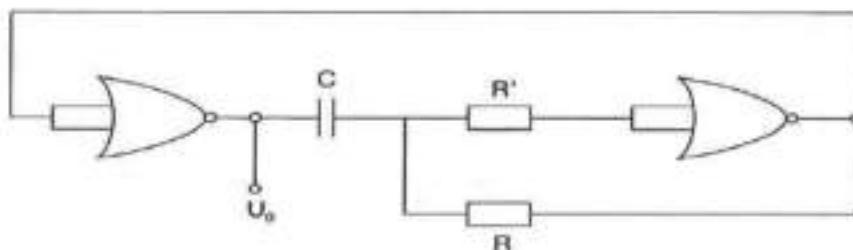


Ilustração 3-14 – Oscilador com portas NAND

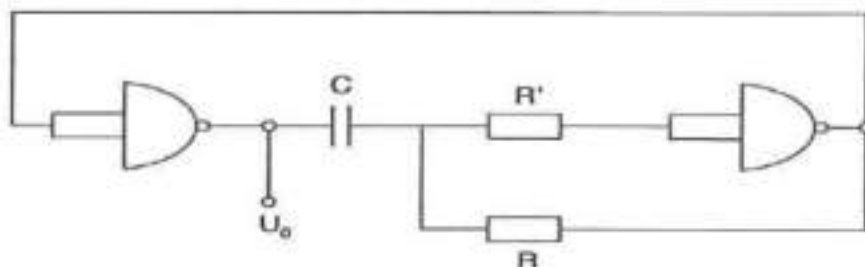


Ilustração 3-15 – Oscilador com portas NOR



Trabalhos Práticos

01 – Trabalho Prático n.º 04 – Oscilador de Relaxação

1 – INTRODUÇÃO

Na figura 1 está representado o circuito de um oscilador de relaxação, utilizando um comparador de Schmitt-Trigger inversor, em que a tensão de entrada é a tensão de carga do condensador. No instante de ligar o circuito à tensão de alimentação, basta uma pequena carga para o arranque. Supondo que a saída está em $+V_{SAT}$, o condensador carrega exponencialmente, comutando a saída para $-V_{SAT}$ quando a tensão do condensador atingir:

$$U_{REFS} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{SAT}$$

Nesta situação, o condensador descarrega até atingir:

$$U_{REFI} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times (-V_{SAT}), \text{ altura em que a saída comuta para } +V_{SAT}.$$

A tensão de saída é um sinal de onda quadrada, em que a amplitude varia de $\pm V_{SAT}$ e cujo período é dado pela expressão:

$$T = 2 \times R \times C \times \ln \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right), \text{ em que } \ln \text{ é o logaritmo neperiano.}$$

2 – OBJETIVOS

Os objetivos para este trabalho são os seguintes:

- Analisar experimentalmente um oscilador de relaxação de onda quadrada.

3 – RECURSOS NECESSÁRIOS

- 1 Fonte de alimentação simétrica regulável (0 a 15 V);
- 1 Placa de montagem eletrónica ("Breadboard");
- 1 Osciloscópio com dois canais (Duas pontas de prova);



- Condutores;
- 1 Multímetro;
- 1 Circuito integrado $\mu A741$;
- 3 Resistências de $\frac{1}{4}$ W ($R_1 = 10\text{ K}\Omega$, $R_2 = 10\text{ K}\Omega$, $R_F = 100\text{ K}\Omega$);
- 1 Condensador ($C_1 = 47\text{ nF}$);
- Ferramentas necessárias;
- Computador com acesso à internet;
- Manuais técnicos.

4 – ESQUEMAS DO CIRCUITO

Considerar os esquemas das figuras.

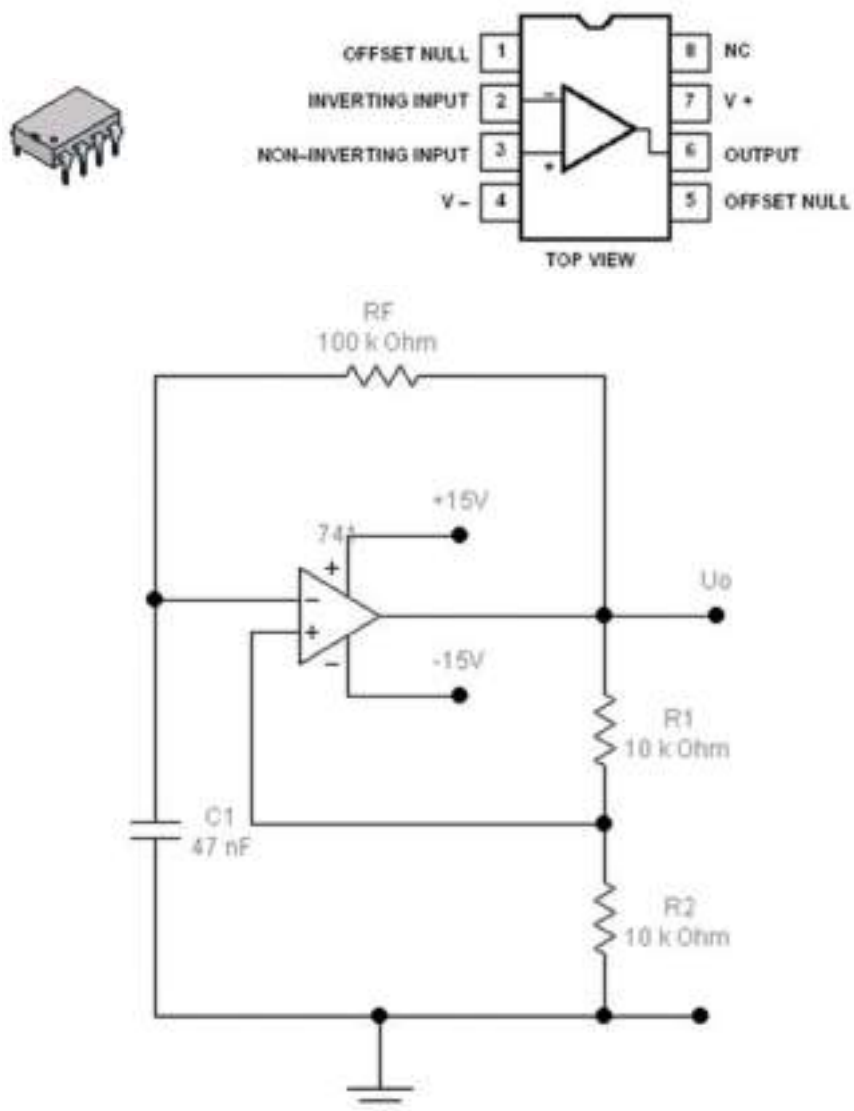


Figura 1



5 – PROCEDIMENTOS DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

- a. Montar o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 1);
- b. Ligar um dos canais do osciloscópio na saída do oscilador e o outro canal nos terminais do condensador;
- c. Observar simultaneamente o sinal de saída U_o e a tensão no condensador U_c ;
- d. Representar os sinais observados na figura 2;
- e. Indicar os valores medidos das tensões de comutação (UTP e LTP) e da frequência do sinal de saída (f_o);
- f. Calcular os valores das tensões de comutação (UTP e LTP) e da frequência do sinal de saída (f_o);
- g. Comparar os valores obtidos experimentalmente com os valores calculados.

6 – DURAÇÃO DO TRABALHO

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.

7 – ELABORAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RELATÓRIO

Elaborar um relatório do trabalho, por grupo de trabalho, respeitando os seguintes parâmetros mínimos:

I – ESTRUTURA

- a) Cabeçalho:
 - Nome da Escola
 - Nome da Disciplina
 - Número e nome do Módulo
 - Nome dos alunos, números, ano e turma
 - Identificação do trabalho
- b) Conteúdo (Mínimo):
 - 1 – Objetivos
 - 2 – Recursos necessários
 - 3 – Procedimentos do trabalho
 - 4 – Dificuldades encontradas
 - 5 – Estratégia de resolução das dificuldades
 - 6 – Esquemas das montagens
 - 7 – Conclusões finais



II – MODO DE APRESENTAÇÃO

Em ficheiro informático, ou alternativamente em folhas A4, redigido à mão.

III – PRAZO DE ENTREGA

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.



4. Circuito integrado 555

O circuito integrado 555 é um componente com variadíssimas aplicações, mas vamos analisá-lo nas duas versões mais importantes, como astável e como monoestável.

Na sua versão astável ele comporta-se como um multivibrador, gerando uma onda retangular.

Na versão monoestável, ele funciona não como oscilador, mas como temporizador, apresentando um único estado estável.

Existem ainda outras aplicações do circuito 555 com bastante utilização, como sejam o oscilador controlado por tensão (controlo de frequência), o gerador de rampa e o modulador de largura de impulso (modulador PWM).



Ilustração 4-1 – Circuito integrado 555

4.1. Constituição

Na figura seguinte apresenta-se o esquema de constituição de um circuito integrado 555, em diagrama de blocos.



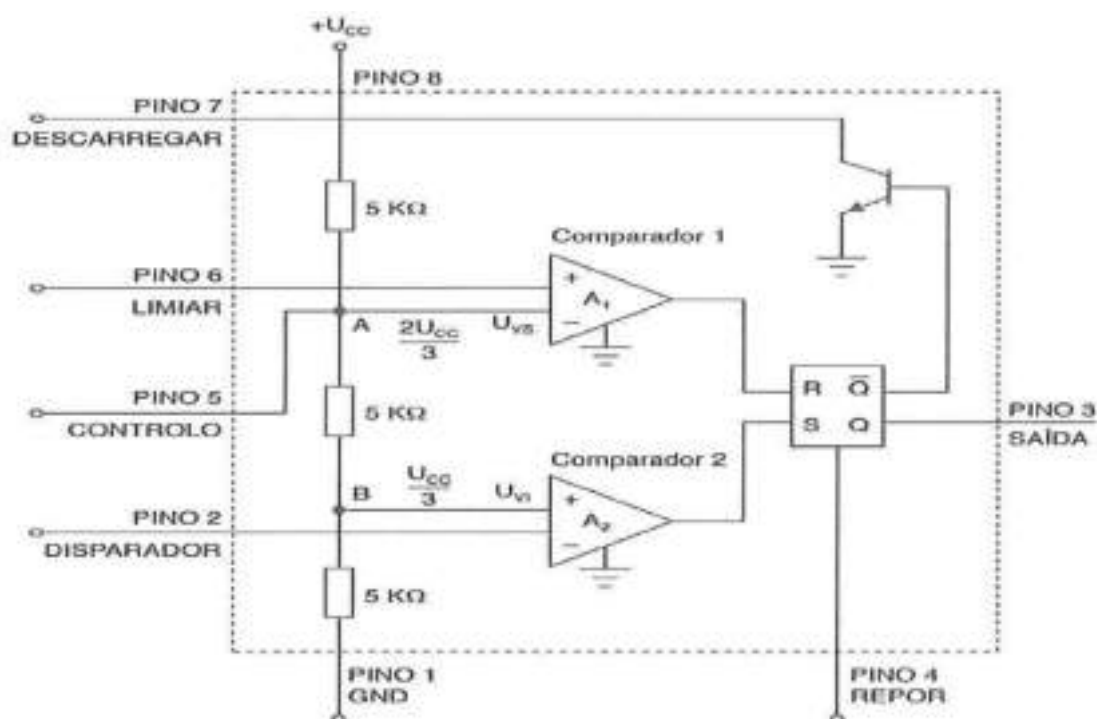


Ilustração 4-2 – Constituição do 555

A legenda dos terminais (pinos) do circuito integrado 555, é a que de seguida se indica.

PINO 1 – Terra, ou “Ground” (GND).

PINO 2 – Entrada de disparo, disparador, ou “Trigger” (TRI) – Quando a tensão no pino 2 é inferior a $U_{CC} / 3$, teremos $S=1$, o que faz com que a saída 3 fique a 1 ($Q=1$) e o transístor fica ao corte ($\bar{Q} = 0$), ficando o condensador em carga.

PINO 3 – Saída (OUT) – Saída do circuito para ligar a uma carga. Quando a saída está a 1 ($U_o = U_{CC}$), o condensador está a carregar. Quando a saída está a 0 ($U_o = 0$ V), o condensador está a descarregar.

PINO 4 – Entrada repor, ou “reset” (RES) – Um impulso ativo baixo (0 V) no pino 4, desliga a saída, isto é, fica a 0 V. Quando não se pretende fazer “reset”, deve ligar-se a U_{CC} para o funcionamento normal do temporizador ou do oscilador.

PINO 5 – Tensão de referência U_{vs} ou pino de controlo (CON) – Esta tensão é geralmente mantida igual a $2 \times U_{CC} / 3$, pelas três resistências internas de 5 KΩ, podendo, no entanto, ser alterada através de um sinal exterior aplicado a este pino. Esta tensão vai ser comparada com a tensão (exterior) aplicada ao pino 6. Se $U(6)$ for maior que $U(5)$, teremos $R=1$, logo, $Q=0$ e $\bar{Q}=1$ e, portanto, a saída cai a 0 e o transístor fica ativado, provocando a descarga do condensador sobre ele. Caso contrário, teremos $U(6) \leq U(5)$,



a saída continuará 1, e o condensador fica a carregar.

PINO 6 – Limiar de descarga (“Threshold”) do condensador (THR) – A tensão aplicada a esta entrada permite desligar a saída e ativar o transistor, descarregando o condensador, desde que se verifique $U(6) > U(5)$.

PINO 7 – Terminal de descarga (DIS) – O transistor está ligado a este pino, permitindo a descarga do condensador, quando se verifica $U(6) > U(5)$.

PINO 8 – Alimentação (VCC) – O 555 é alimentado por tensões contínuas de 3 V até 18 V. Na figura seguinte, representa-se o esquema do encapsulamento do integrado 555.

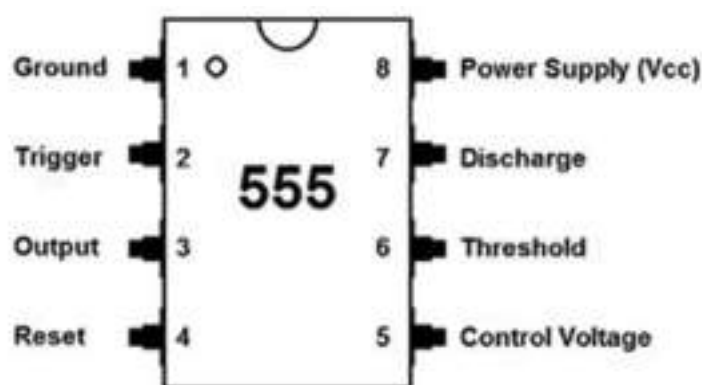


Ilustração 4-3 – Encapsulamento do 555

4.2. Caraterísticas

As principais caraterísticas principais do integrado 555, para o seu correto funcionamento, são as que a seguir se descrevem.

- Tensão de alimentação – 4,5 V a 18 V;
- Corrente máxima na saída – 200 mA;
- Dissipação máxima de potência – 600 mW;
- Frequência produzida – Desde poucos hertz até 500 KHz (com transístores bipolares) e até 2 MHz (com transístores MOSFET);
- Corrente típica absorvida da fonte de alimentação (a 15 V) – 10 mA.



4.3. Funcionamento como monoestável

Uma das configurações mais utilizadas para o funcionamento do 555, é como monoestável, tal como se indica na figura seguinte, assumindo C_c o valor típico de $0,01 \mu\text{F}$.

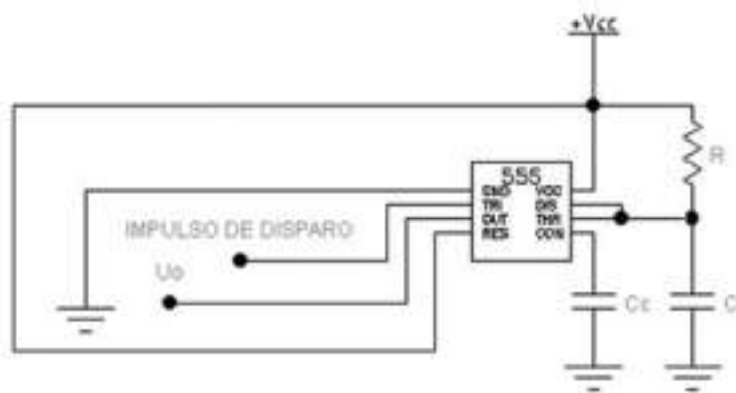


Ilustração 4-4 – Esquema de ligações do 555 como monoestável

Nesta situação ele não funciona como oscilador, mas sim como temporizador. Após a receção de um impulso no pino 2, a saída torna-se positiva durante um determinado espaço de tempo, correspondente à carga do condensador C, conforme se pode ver através da figura seguinte.

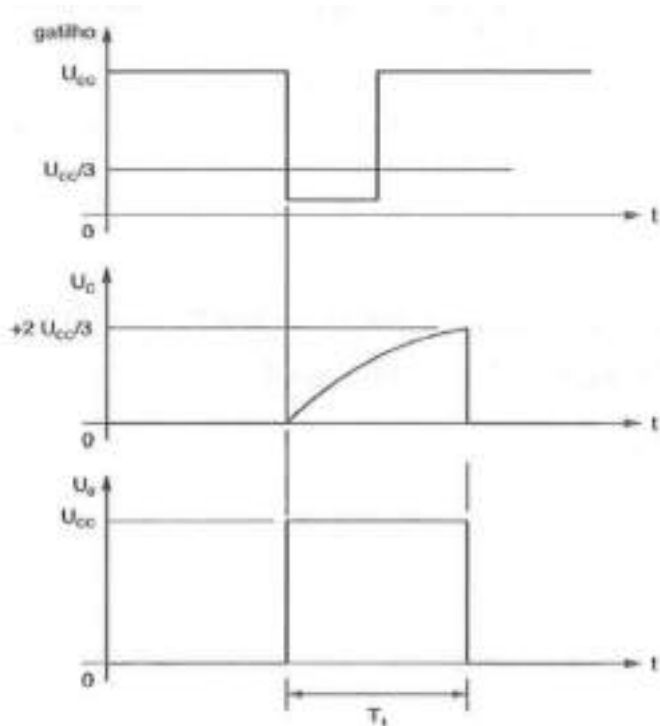


Ilustração 4-5 – Formas de onda do 555 em funcionamento como monoestável



O tempo durante o qual o condensador carrega e a saída se mantém ativa, vem dado pela expressão indicada a seguir.

$$T = 1,1 \times R \times C$$

4.4. Funcionamento como astável

A configuração do 555 para funcionamento como astável, é a que se indica na figura seguinte, em que C_c assume o valor típico de $0,01 \mu\text{F}$.

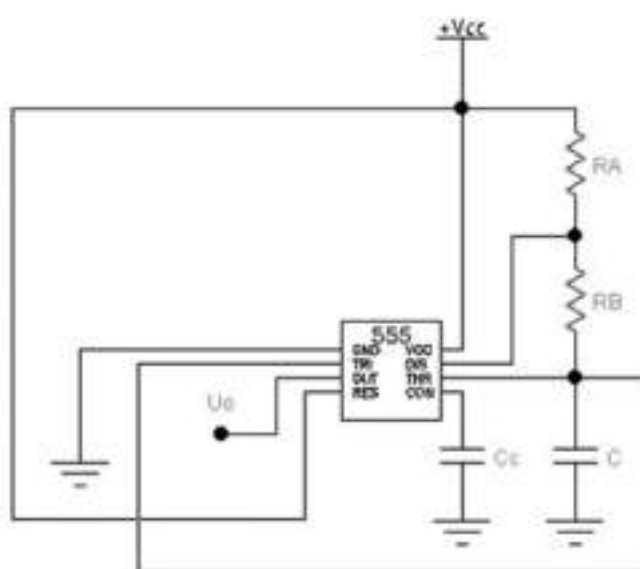


Ilustração 4-6 – Esquema de ligações do 555 como astável

Nesta configuração, ele comporta-se verdadeiramente como oscilador, apresentando uma onda na saída como a que se representa na figura seguinte.

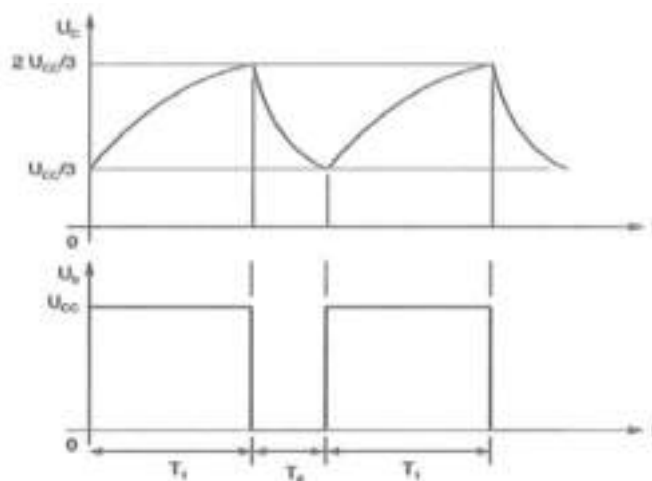


Ilustração 4-7 – Formas de onda do 555 em funcionamento como astável



O condensador carrega com um valor de corrente limitado pelas resistências R_A e R_B .

O tempo T_1 , tempo de carga do condensador C , vem dado pela expressão indicada a seguir.

$$T_1 = 0,693 \times (R_A + R_B) \times C$$

O condensador C descarrega-se através da resistência R_B para o pino 7.

O tempo T_2 , tempo de descarga do condensador C , vem dado pela expressão indicada a seguir.

$$T_2 = 0,693 \times R_B \times C$$

O período total da onda (T), igual à soma dos tempos de carga e de descarga do condensador, vem dado pela expressão seguinte.

$$\begin{aligned} T = T_1 + T_2 &= 0,693 \times (R_A + R_B) \times C + 0,693 \times R_B \times C \\ &= 0,693 \times (R_A + 2 \times R_B) \times C \end{aligned}$$

Por seu turno, como a frequência (f) é o inverso do período (T), o seu valor será calculado pela expressão seguinte.

$$f = \frac{1,44}{(R_A + 2 \times R_B) \times C}$$

Define-se ainda Ciclo de Trabalho (D), ou “Duty Cycle”, como a relação entre o tempo no estado alto (tempo de carga do condensador) e o tempo total de duração de cada ciclo (período da onda), dado pela expressão seguinte (apresentada em percentagem).

$$D = \frac{R_A + R_B}{R_A + 2 \times R_B} \times 100(\%)$$

4.5. Atividades propostas

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO:

01 – Um temporizador 555 está ligado por forma a operar como monoestável.

Sabendo que $R = 10 \text{ K}\Omega$ e $C = 0,002 \text{ }\mu\text{F}$, qual será a duração do impulso de saída?



02 – Um temporizador 555 configurado como astável, possui $R_A = 10 \text{ K}\Omega$, $R_B = 2 \text{ K}\Omega$ e $C = 0,0047 \text{ }\mu\text{F}$.

- Qual será a sua frequência de oscilação?
- Calcular o seu ciclo de trabalho (“Duty Cycle”).

03 – Na figura seguinte representa-se um circuito integrado 555, a funcionar como monoestável, e em que $U_{cc} = +12 \text{ V}$, $C_c = 0,01 \text{ }\mu\text{F}$, $C = 500 \text{ nF}$, $R_L = 1 \text{ K}\Omega$ e $R = 5 \text{ M}\Omega$.

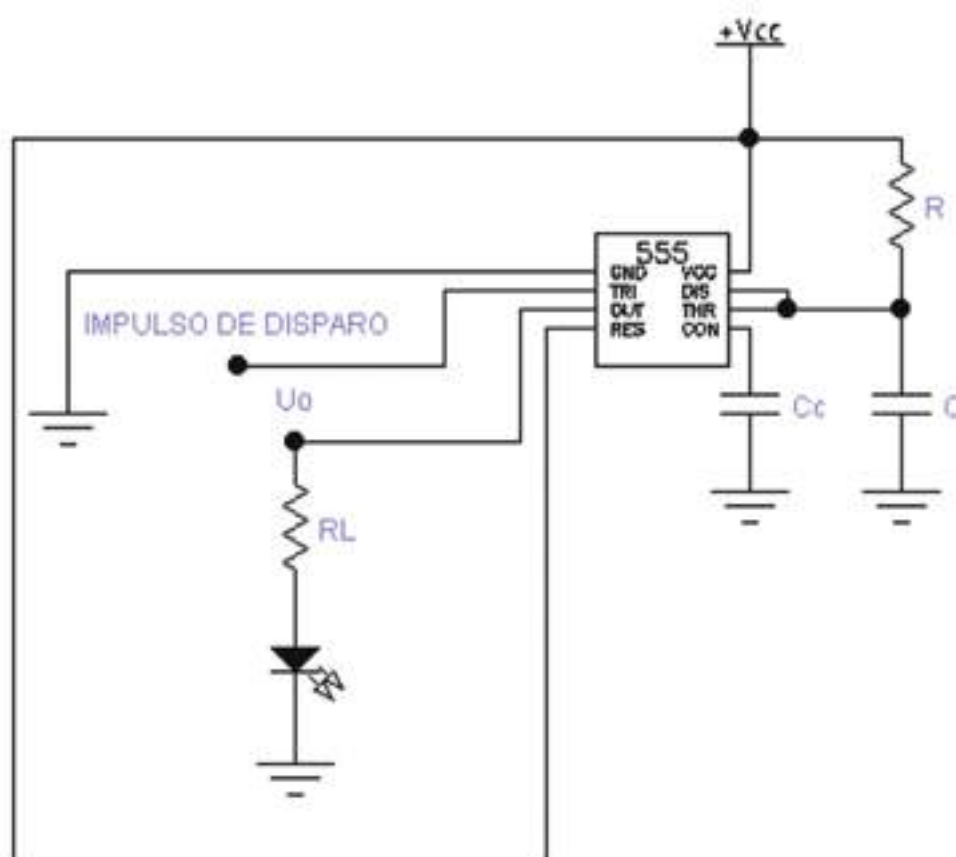


Ilustração 4-8 – Circuito do exercício 4.03

- Calcular o tempo T durante o qual o led fica ligado, após ser injetado um impulso no terminal 2.
- Se substituirmos a resistência R por um potenciômetro de igual valor máximo, qual o valor que este deve apresentar para que o led acenda durante 1 segundo.
- Considerando $R = 5 \text{ M}\Omega$, calcular o novo valor para o condensador C , que permita que o led acenda durante 1 minuto.



04 – Na figura seguinte representa-se um circuito integrado 555, a funcionar como astável, e em que $U_{CC} = +12\text{ V}$, $C_C = 0,01\ \mu\text{F}$, $C = 150\ \text{nF}$, $R_p = 470\ \text{K}\Omega$, $R_{L1} = 1\ \text{K}\Omega$, $R_{L2} = 1\ \text{K}\Omega$, $R_A = 5\ \text{K}\Omega$ e $R_B = 220\ \text{K}\Omega$.

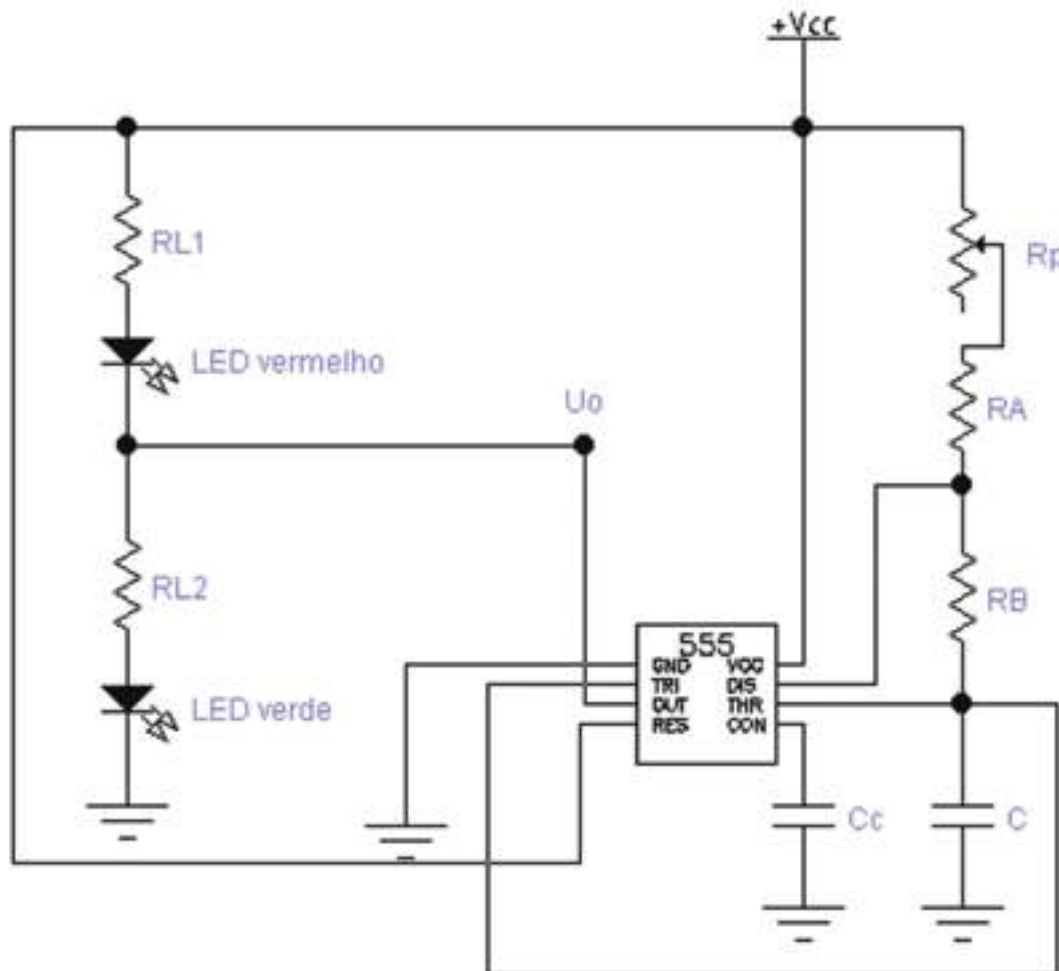


Ilustração 4-9 – Circuito do exercício 4.04

Calcular:

- O tempo que o led verde fica ligado com RP no máximo;
- O tempo que o led vermelho fica ligado;
- O período do sinal de saída;
- A frequência do sinal de saída;
- O ciclo de trabalho.



Trabalhos Práticos

05 – Trabalho Prático n.º 05 – Multivibrador Monoestável

1 – INTRODUÇÃO

Na figura 1 está representado o circuito de um multivibrador monoestável básico.

Se considerarmos que no início a saída \bar{Q} está no nível “1”, o transístor comutador T_1 estará saturado, não permitindo a carga do condensador externo e a saída será U_o igual a “0”. Esta situação manter-se-á até à aplicação do impulso de nível alto para baixo, no pino correspondente ao disparo (Trigger). Nesse instante, S fica igual a “1” e \bar{Q} igual a “0”, bloqueando T_1 e comutando a saída para U_o igual a “1”. Com T_1 bloqueado, o condensador C começa a carregar até atingir uma tensão ligeiramente superior a 2/3 de +U (Tensão limiar). Como o pino da Tensão limiar está ligado ao condensador C, \bar{Q} comuta para “1” e Q para “0”, pelo que o transístor T_1 satura, descarregando rapidamente o condensador.

O tempo em que a saída se mantém alta é dado pela expressão:

$$T = 1,1 \times R \times C$$

Para proteger o transístor T_1 de correntes elevadas, a resistência R deve ser superior 100 Ω . No pino de Controlo, deve colocar-se um condensador de 0,1 μ F ligado à massa, para evitar a influência de sinais de ruído.

2 – OBJETIVOS

Os objetivos para este trabalho são os seguintes:

- a) Projetar e ensaiar um temporizador de 15 s (Multivibrador monoestável).

3 – RECURSOS NECESSÁRIOS

- 1 Fonte de alimentação simétrica regulável (0 a 15 V);
- 1 Placa de montagem eletrónica (“Breadboard”);
- 1 Osciloscópio com dois canais (Duas pontas de prova);
- Condutores;
- 1 Multímetro;



- 1 Circuito integrado LM555;
- 3 Resistências de $\frac{1}{4}$ W ($R_1 = 10\text{ K}\Omega$, $R_2 =$ valor a determinar, $R =$ valor a determinar);
- 2 Condensadores ($C_1 = 100\text{ nF}$ e $C =$ valor a determinar);
- 1 LED vermelho (10mA, 1,8V);
- Ferramentas necessárias;
- Computador com acesso à internet;
- Manuais técnicos;

4 – ESQUEMAS DO CIRCUITO

Considerar os esquemas das figuras.

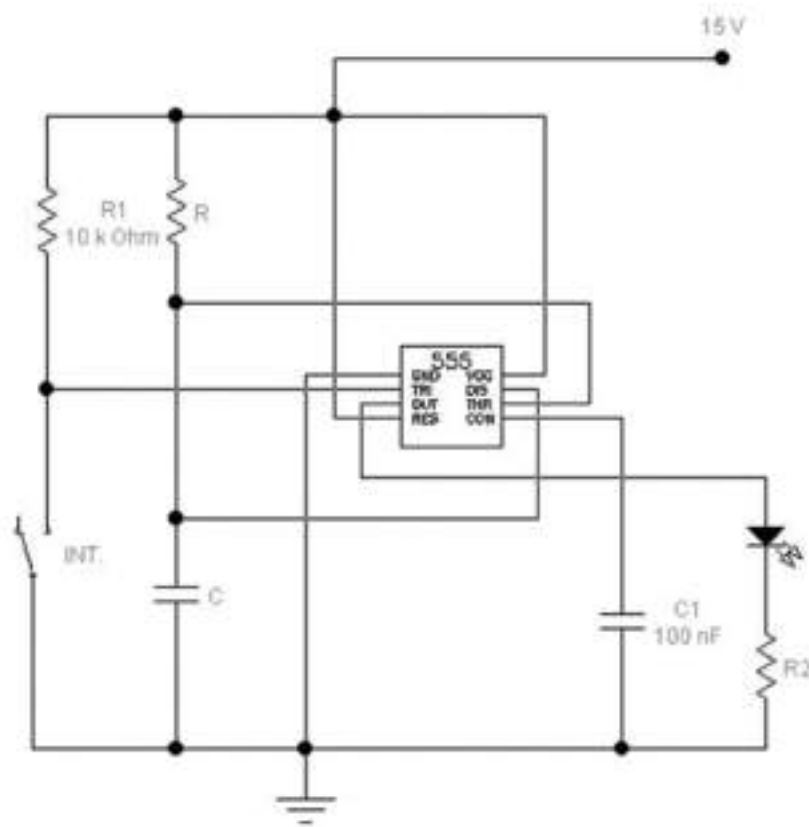
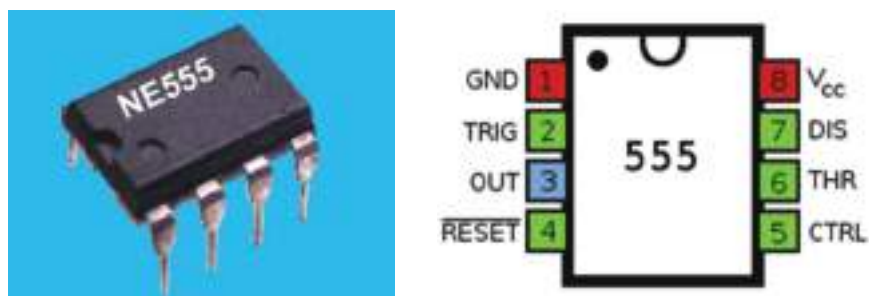


Figura 1



5 – PROCEDIMENTOS DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

- Calcular o valor da resistência de proteção do LED (R_2);
- Utilizar para R uma resistência de valor compreendido entre $47\text{ K}\Omega$ e $1\text{ M}\Omega$;
- Calcular o valor de C_1 , sabendo que $T=1,1 \times R \times C$;
- Montar o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 1);
- Observar os sinais na saída e nos terminais do condensador, através do osciloscópio;
- Desenhar na figura 2 os sinais observados na alínea anterior.



Figura 2

6 – DURAÇÃO DO TRABALHO

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.

7 – ELABORAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RELATÓRIO

Elaborar um relatório do trabalho, por grupo de trabalho, respeitando os seguintes parâmetros mínimos:

I – ESTRUTURA

- Cabeçalho:
 - Nome da Escola
 - Nome da Disciplina
 - Número e nome do Módulo
 - Nome dos alunos, números, ano e turma
 - Identificação do trabalho



- b) Conteúdo (Mínimo):
- 1 – Objetivos
 - 2 – Recursos necessários
 - 3 – Procedimentos do trabalho
 - 4 – Dificuldades encontradas
 - 5 – Estratégia de resolução das dificuldades
 - 6 – Esquemas das montagens
 - 7 – Conclusões finais

II – MODO DE APRESENTAÇÃO

Em ficheiro informático, ou alternativamente em folhas A4, redigido à mão.

III – PRAZO DE ENTREGA

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.



5. Comparação entre osciladores

Na tabela seguinte, estabelece-se uma comparação entre as características mais importantes dos diversos tipos de osciladores estudados.

TABELA COMPARATIVA DE OSCILADORES				
Tipo de oscilador	Gama de frequências	Forma de onda	Fator de qualidade Q	Estabilidade térmica
Malha RC	< 1 MHz	Quadrada, sinusoidal	< 10	Fraca
Armstrong	100 Hz a 100 MHz	Sinusoidal	10^2 a 10^4	Fraca
Colpitts	100 Hz a 100 MHz	Sinusoidal	10^2 a 10^4	Fraca
Hartley	10 Hz a 50 MHz	Sinusoidal	10^2 a 10^4	Fraca
Clapp	30 KHz a 100 MHz	Sinusoidal	10^2 a 10^4	Fraca
Cristal de quartzo	10 KHz a 250 MHz	Sinusoidal	10^4 a 10^6	Muito boa
Cristal cerâmico	10 MHz a 1 GHz	Sinusoidal	10^4 a 10^6	Muito boa
Relaxação	0,01 Hz a 100 KHz	Dente de serra, pulsos	< 10	Fraca
Deslocamento de fase	1 Hz a 100 KHz	Sinusoidal	< 10	Fraca
Multivibrador	0,1 Hz a 100 MHz	Retangular	< 10	Fraca

Ilustração 5-1 – Tabela comparativa de osciladores



6. Bibliografia

ANGULO, J. M., Enciclopédia de Electrónica Moderna, Vol. 3. Madrid. Editorial Paraninfo.

(s.d.).

CARLOS, Ângulo e outros, Teoria e Prática de Electrónica. McGrawHill. (Makron Books).

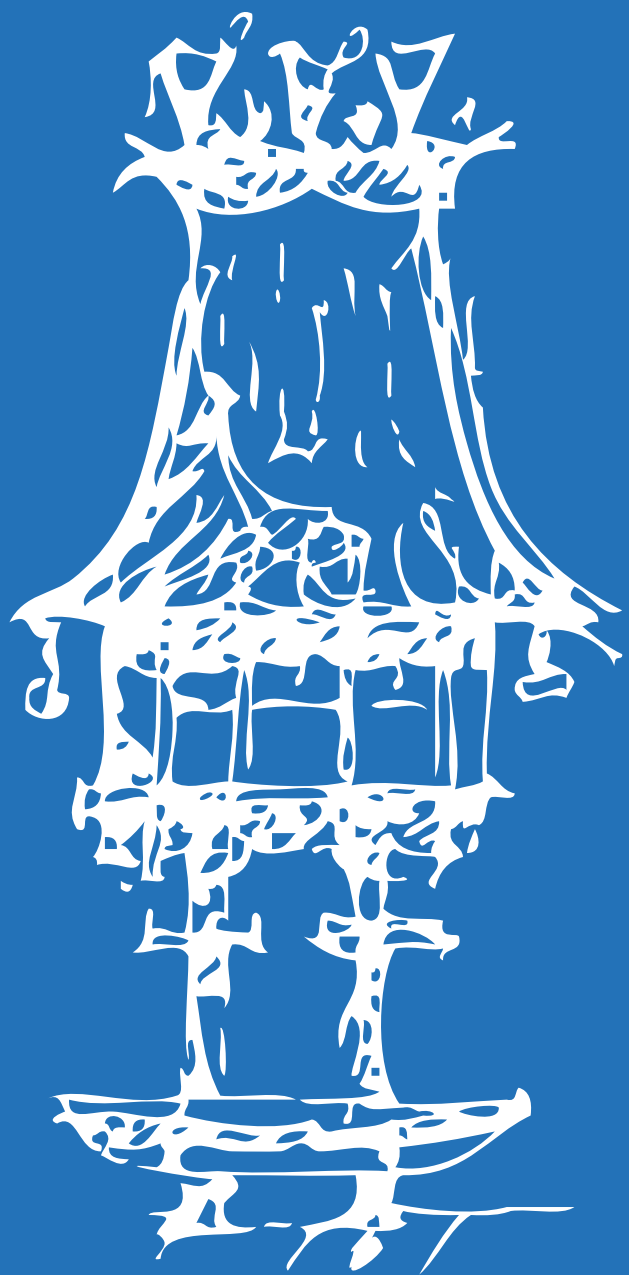
(s.d.).

MALVINO, Electrónica, Vol. 2. McGrawHill. (s.d.).

PINTO, António; CALDEIRA, José, Tecnologias, 12.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica. Porto Editora. (s.d.).

PINTO, António, Práticas Oficiais e Laboratoriais, 12.º Ano. Curso Tecnológico de Electrotecnia e Electrónica. Porto Editora. (s.d.).







Fontes de Alimentação

Módulo 12

Apresentação

Este módulo tem caráter teórico-prático, por isso deverá decorrer em parte em ambiente laboratorial de modo a que o aluno possa verificar e comprovar os conhecimentos adquiridos sobre fontes de alimentação de corrente contínua sem e com estabilização, fixa ou variável.

Introdução

Este é um módulo com caráter teórico-prático, mas com maior incidência na parte prática dos circuitos operacionais, constituindo-se como um complemento do módulo anterior. É um módulo em que serão abordadas diversas montagens típicas de circuitos de fontes de alimentação, com destaque para os elementos estabilizadores projetados com recurso a díodos zéner, transístores, estabilizadores integrados e amplificadores operacionais. Para além de exercícios de aplicação, serão realizados trabalhos práticos complementados com a utilização de programa informático dedicado, em que será feita a simulação do funcionamento desses mesmos circuitos.

Objetivos de aprendizagem

No final do módulo, o aluno deverá ter apreendido no mínimo, o conjunto de objetivos que a seguir se indicam:

- Explicar a constituição básica de uma fonte de alimentação primária;
- Descrever os diversos tipos de retificação;
- Calcular filtragens em função das correntes consumidas e tensões de “ripple”;
- Dimensionar circuitos de estabilização a diodo zéner;
- Distinguir fontes de alimentação estabilizadas de fontes de alimentação não estabilizadas;
- Aplicar reguladores de tensão integrados;
- Explicar o funcionamento de fontes de alimentação variáveis;
- Dimensionar circuitos de estabilização com recurso a transístores de potência;
- Dimensionar proteções contra sobrecargas e curto-circuitos;
- Explicar o funcionamento de fontes de alimentação comutadas.



Âmbito de conteúdos

O conjunto de conteúdos a seguir indicados, permitirá ao aluno atingir e ultrapassar os objetivos de aprendizagem definidos para este módulo:

- Fontes de alimentação de corrente contínua;
- Princípio de funcionamento do circuito estabilizador de tensão (regulador série);
- Díodo zéner como elemento estabilizador;
- Circuitos estabilizadores de tensão transistorizados;
- Circuitos estabilizadores de tensão integrados;
- Circuitos estabilizadores de tensão, usando amplificadores operacionais;
- Circuitos integrados reguladores de tensão.



1. Definições

De acordo com a função desempenhada, as fontes de alimentação podem ser classificadas como:

- Fontes de alimentação de tensão;
- Fontes de alimentação de corrente.

Uma fonte de alimentação de tensão, fonte de tensão, ou gerador de tensão, tem a capacidade de fornecer a uma carga variável ou constante (R_L), uma tensão aproximadamente constante.

Uma fonte de alimentação de corrente, fonte de corrente, ou gerador de corrente, tem a capacidade de fornecer a uma carga variável ou constante (R_L), uma tensão aproximadamente constante.

Quer isto dizer que, no primeiro caso, é o valor da tensão que se mantém, variando a corrente na carga, se esta variar; do modo semelhante, no segundo caso é o valor da corrente que se mantém, variando a tensão na carga, se esta variar.

Considerando agora a sua constituição, as fontes de alimentação podem ser classificadas como:

- Fontes de alimentação lineares;
- Fontes de alimentação comutadas.

As fontes de alimentação de tensão são muito mais utilizadas do que as fontes de alimentação de corrente, pelo que concentraremos o nosso estudo nas primeiras.

Uma fonte de alimentação linear, coloca na saída uma tensão sempre inferior à tensão de entrada e que varia de modo linear com o valor da carga.

São fontes que apresentam valores de rendimento ou eficiência na ordem dos 60%.

Uma fonte de alimentação de tensão comutada, coloca na sua saída uma tensão que pode ser maior ou menor do que a tensão de entrada, não apresentando linearidade com o valor da carga.

Nestas fontes, a tensão é fornecida com recurso a um gerador de impulsos interno, de onde deriva a designação de fonte comutada, devido ao processo contínuo de desligar e ligar (impulsos).



São fontes mais complexas e portanto, mais caras do que as fontes lineares, mas vêm sendo progressivamente mais utilizadas, devido aos valores mais elevados de eficiência que apresentam, com valores superiores a 80%.

Como inconveniente à sua utilização, aponta-se o facto de serem geradoras de frequências elevadas, devido à operação dos semicondutores, as quais são introduzidas na rede elétrica, provocando diversas interferências nos restantes recetores.

Na figura seguinte, encontra-se a imagem de uma fonte de alimentação colocada na respetiva placa e incluída na caixa que alberga a fonte.



Ilustração 1-1 – Fonte de alimentação



1.1. Atividades propostas

QUESTÕES DE REVISÃO:

01 – Quanto à sua função, como podem ser classificadas as fontes de alimentação?

02 – O que se entende por fonte de alimentação de tensão?

03 – O que se entende por fonte de alimentação de corrente?

04 – Quanto à sua constituição, como podem ser classificadas as fontes de alimentação de tensão?

05 – O que se entende por fonte de tensão linear?

06 – O que se entende por fonte de tensão comutada?



2. Fontes de alimentação lineares

Vamos então abordar as fontes de alimentação lineares, com maior incidência sobre as fontes de alimentação de tensão.

Será feita uma abordagem à sua constituição, aos conceitos de regulação de carga e de regulação de rede, ao cálculo da resistência de saída e ao cálculo dos condensadores de filtragem.

2.1. Constituição

Uma fonte de alimentação linear básica, contém os blocos apresentados na figura seguinte, ou seja, um transformador, uma unidade de retificação (neste caso, uma ponte retificadora), e uma unidade de filtragem.

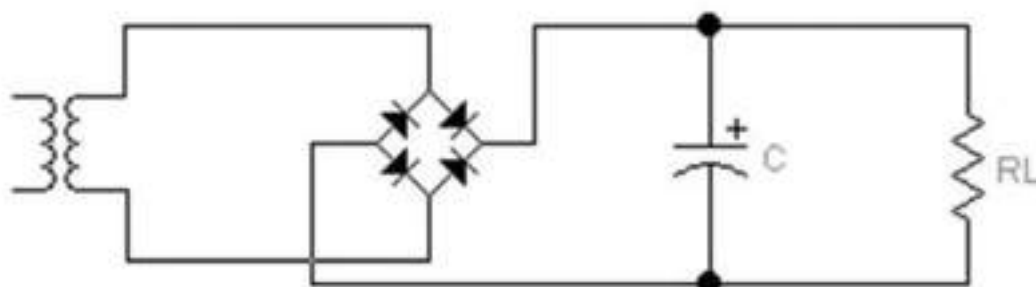


Ilustração 2-1 – Esquema elétrico básico de uma fonte de alimentação linear

A unidade redutora de tensão é constituída pelo transformador, que permite baixar a tensão da rede (230 V AC), para tensões usualmente de 12 V, 18 V, ou 24 V (tensões alternadas), que serão aplicadas à unidade retificadora.

Esta unidade retificadora é constituída por uma ponte de díodos (quatro díodos montados tal como se vê na figura anterior), que vão converter uma das arcadas do sinal (em cada ciclo), para um sinal com a totalidade das arcadas positivas (ou negativas), conforme se pode ver na figura seguinte (retificação de onda completa, conforme já abordado anteriormente).

A unidade de filtragem é constituída por um único condensador eletrolítico (neste esquema básico), que permite minimizar (idealmente, anular) a ondulação (“ripple”), conforme se pode ver na figura seguinte.



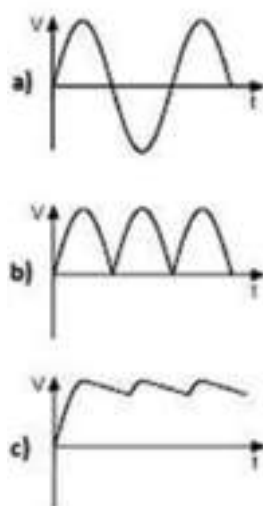


Ilustração 2-2 – Formas de onda: a) redução, b) retificação e c) filtragem

Esta fonte básica apresentada, tem um comportamento aceitável se a carga for fixa, mas já não se comporta da mesma maneira no caso de carga variável.

É no entanto importante que uma fonte de tensão mantenha a saída constante, quer quando ocorram variações no valor da carga, quer quando ocorram variações da tensão de alimentação (tensão da rede).

Vamos analisar de seguida como se podem medir essas variações da tensão de saída da fonte, nessas duas situações.

2.2. Regulação de carga

A tensão aos terminais da carga acoplada a uma fonte de tensão, varia com o valor da intensidade de corrente que percorre essa carga, diminuindo com o aumento da intensidade, devido ao aumento da queda de tensão interna.

Torna-se por isso importante, poder avaliar o efeito sobre a tensão de saída, provocado pela carga acoplada à fonte.

Designa-se então por regulação de carga (LR), o quociente entre a diferença da tensão de saída em vazio (U_{NL}) e da tensão de saída com a carga máxima (U_{FL}), e a tensão de saída com a carga máxima (U_{FL}).

Este valor é habitualmente apresentado em percentagem, e vem dado pela expressão seguinte:



$$LR = \frac{U_{NL} - U_{FL}}{U_{FL}} \times 100\%$$

Uma boa fonte de alimentação deve ter uma regulação de carga baixa, idealmente zero.

Os valores aceitáveis de regulação de carga, deverão ser inferiores a 1%.

Se por exemplo, dispusermos de uma fonte de alimentação de tensão que apresente $U_{NL} = +20,5$ V e $U_{FL} = +19,5$ V, o valor da regulação da carga será dado pela expressão seguinte:

$$LR = \frac{U_{NL} - U_{FL}}{U_{FL}} \times 100\% = \frac{20,5 - 19,5}{19,5} \times 100 = 0,051 \times 100 = 5,1\%$$

Este valor indica que esta não é uma fonte de alimentação de boa qualidade, pois $LR > 1\%$.

2.3. Regulação de rede

A tensão aos terminais de uma fonte de tensão, varia também com o valor da tensão da rede que a alimenta, dado que esta se encontra sujeita a variações.

De facto, as fontes de alimentação, são por sua vez alimentadas na maior parte dos casos, a partir de redes públicas, que devido às constantes flutuações de carga a que se encontram sujeitas, provocam variações na tensão de alimentação.

Assim sendo, uma rede alimentada a 230 V AC / 50 Hz e em que se admita uma variação da sua tensão de $\pm 5\%$, poderá apresentar valores que possam oscilar entre 218,5 V ($230 - 0,05 \times 230 = 230 - 11,5$) e 241,5 V ($230 + 0,05 \times 230 = 230 + 11,5$).

Torna-se por isso importante, poder avaliar o efeito sobre a tensão de saída, provocado pelas variações da tensão de alimentação da fonte.

Designa-se então por regulação de rede ou de linha (SR), o quociente entre a diferença da tensão de saída quando a rede apresenta a tensão elevada (U_{HL}) e da tensão de saída quando a rede apresenta a tensão baixa (U_{LL}), e a tensão de saída quando a rede apresenta a tensão baixa (U_{LL}).

Este valor é habitualmente apresentado em percentagem, e vem dado pela expressão seguinte:



$$SR = \frac{U_{HL} - U_{LL}}{U_{LL}} \times 100\%$$

Uma boa fonte de alimentação deve ter uma regulação de rede baixa, idealmente zero.

Os valores aceitáveis de regulação de rede, deverão ser inferiores a 1%.

Se por exemplo, dispusermos de uma fonte de alimentação de tensão que apresente $U_{HL} = +15,5 \text{ V}$ e $U_{LL} = +14,5 \text{ V}$, o valor da regulação da rede será dado pela expressão seguinte:

$$SR = \frac{U_{HL} - U_{LL}}{U_{LL}} \times 100\% = \frac{15,5 - 14,5}{14,5} \times 100 = 0,069 \times 100 = 6,9\%$$

Este valor indica que esta não é uma fonte de alimentação de boa qualidade, pois $SR > 1\%$.

2.4. Resistência de saída

A resistência de saída (R_{TH}) de uma fonte de alimentação, corresponde à resistência interna de um gerador, conforme abordado anteriormente.

De facto, tal como nos geradores, as fontes de alimentação apresentam uma tensão de saída sem carga (U_{NL}), e um valor diferente da sua tensão de saída (U_{RL}), quando carregadas.

A diferença entre estas duas tensões (ΔU_O), representa a queda de tensão interna da fonte, provocada pela passagem de corrente nos seus componentes internos.

Dito de outro modo, a queda $\Delta U_O = R_{TH} \times I_O$, em que R_{TH} é a resistência de saída (resistência interna) ou resistência de Thevenin da fonte de alimentação, e I_O é a corrente que percorre a carga (e a fonte).

Poderemos então escrever a equação que a seguir se indica.

$$R_{TH} = \frac{\Delta U_O}{I_O} = \frac{U_{NL} - U_{RL}}{I_O}$$

Quanto menor for a resistência de saída (R_{TH}), menor será a queda de tensão, o que provocará que será também menor a regulação de carga.



2.5. Cálculo de condensadores de filtragem

A operação de filtragem nas fontes, permite como já foi dito, reduzir a oscilação (“ripple”) da tensão de saída, conforme se compreende da análise da figura seguinte.

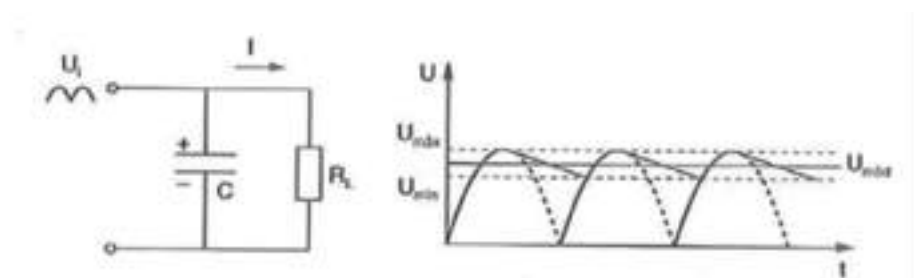


Ilustração 2-3 – Filtragem de uma fonte de alimentação

Os condensadores a utilizar são condensadores eletrolíticos, os quais vão carregar inicialmente, descarregando depois através da resistência de carga.

A determinação da sua capacidade (C) é feita através da fórmula indicada a seguir, em que a tensão de oscilação (U_{osc}) é dada pela diferença entre o valor máximo da tensão de oscilação (U_{oscmax}), e o valor mínimo da tensão de oscilação (U_{oscmin}).

$$C = \frac{U_{oscmax}}{U_{osc} \times R_L \times f} = \frac{I_{Omax}}{U_{osc} \times f}$$

2.6. Fontes de tensão reguladas ou estabilizadas

Uma fonte de tensão regulada ou estabilizada é aquela que consegue manter a sua tensão de saída dentro de uma margem de variação reduzida ou limitada.

De modo inverso, uma fonte de tensão diz-se não-regulada ou não-estabilizada, quando a sua tensão de saída não se mantém dentro de uma margem de valores definida.

A maioria das fontes existentes no mercado são fontes reguladas, ou seja, conhecem-se previamente os limites máximo e mínimo de tensão na carga, quando varia a carga ou a tensão de alimentação.

Estas fontes contêm pelo menos um díodo zéner, um transístor, ou um circuito integrado regulador de tensão, componentes que garantem essa função de regulação ou estabilização da tensão.



Por isso, a regulação de tensão de uma fonte linear pode ser conseguida com recurso a um dos quatro processos a seguir indicados.

- Regulação com diodo zéner, em paralelo;
- Regulação com transistor, em paralelo;
- Regulação com transistor, em série;
- Regulação com circuito integrado regulador de tensão.

2.6.1. Regulação com diodo zéner em paralelo

O diodo zéner é um semicondutor que pode funcionar como regulador ou estabilizador de tensão, quando polarizado inversamente e ligado em paralelo com a carga que se pretende alimentar.

Por esta razão o designamos como regulador paralelo de tensão.

Na figura seguinte, apresenta-se um circuito estabilizador de tensão simples, com diodo zéner em paralelo.

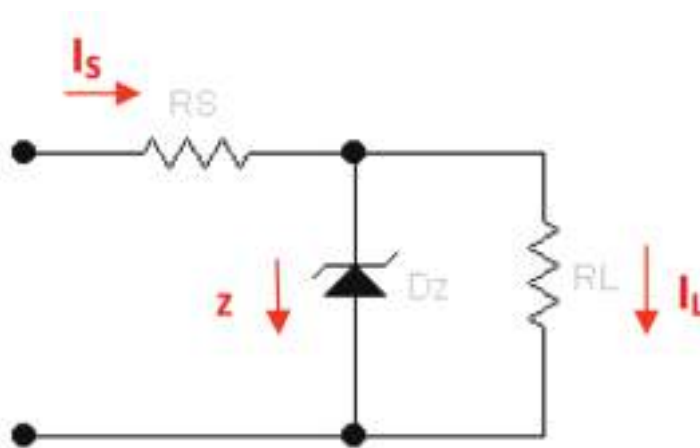


Ilustração 2-4 – Circuito estabilizador de tensão com zéner

Quando o zéner se encontrar polarizado diretamente, este vai funcionar como um diodo retificador comum, começando a condução para valores a partir de 0,6 V a 0,7 V.

Quando o zéner se encontrar polarizado inversamente, este vai funcionar como um diodo zéner a partir do seu valor de tensão de zéner (U_z), quando I_z é fornecida a corrente mínima (I_{zmin}).

Assim, quando I_z for inferior a I_{zmin} , o diodo não funciona como regulador, dado que a tensão aos seus terminais é inferior a U_z .



O diodo zéner a selecionar, deve apresentar um valor de I_z , entre $I_{z\min}$ e $I_{z\max}$ (corrente limite para proteção do zéner contra o aquecimento), de acordo com o valor da corrente de funcionamento esperado para o circuito.

A corrente que percorre o zéner, será dada pela expressão seguinte, resultante da aplicação da Lei dos Nós.

$$I_z = I_s - I_L$$

Quando a resistência de carga (R_L) varia, a corrente na carga (I_L) varia também, mas de modo inverso, e a tensão de saída (U_o) mantém-se constante, com valor imposto pelo diodo zéner ($U_o = U_z$).

A corrente no zéner (I_z) vai variar, pois a corrente da fonte (I_s) é constante, o que fará com que varie a corrente na carga (I_L).

Assim sendo, se a resistência de carga diminuir, a corrente na carga aumenta e a corrente no zéner diminui.

Se a resistência de carga aumentar, a corrente na carga diminui e a corrente no zéner aumenta.

Da expressão $I_s = I_z + I_L = \text{constante}$, concluímos que, quando a corrente na carga for máxima, a corrente no zéner será mínima, pois a corrente da fonte é constante; e quando a corrente na carga for mínima, a corrente no zéner será máxima, pois a corrente da fonte é constante.

Para além da escolha do diodo zéner, torna-se necessário dimensionar a resistência da fonte (R_s), que vai limitar a corrente que a percorre.

Os valores limite para esta resistência, vêm dados pelas duas expressões indicadas a seguir.

$$R_{S\max} = \frac{U_{i\min} - U_z}{I_{z\min} + I_{L\max}}$$

$$R_{S\min} = \frac{U_{i\max} - U_z}{I_{z\max} + I_{L\min}}$$

Este tipo de circuito pode também ser aplicado em fontes simétricas, como se indica no exemplo da figura seguinte.



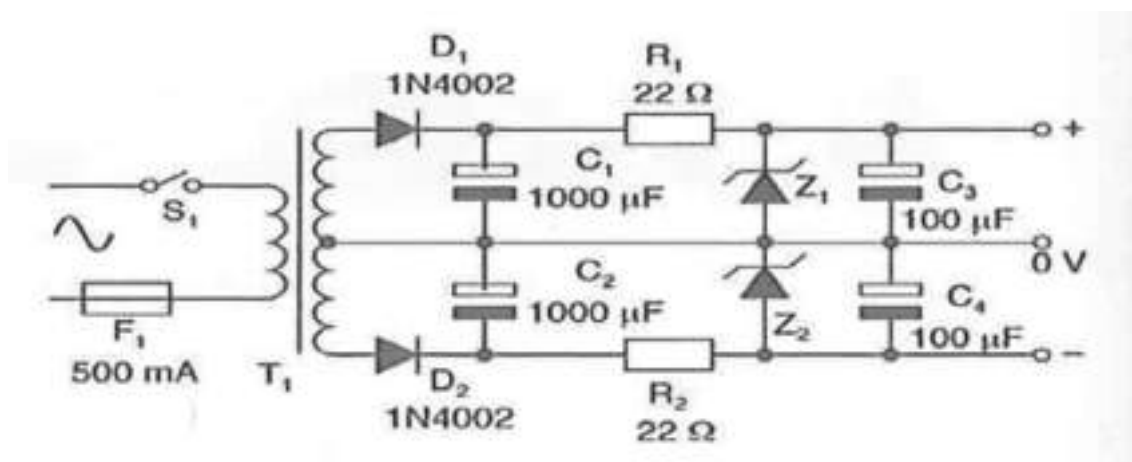


Ilustração 2-5 – Fonte de alimentação simétrica com díodos zéner

Dado o tipo de características dos díodos zéner, são muito utilizados em proteção elétrica contra sobretensões em aparelhagens de medida e recetores diversos, controlando assim as subidas de tensão bruscas, que podem danificar os equipamentos.

Na figura seguinte, apresenta-se um circuito de proteção com díodo zéner para corrente contínua.

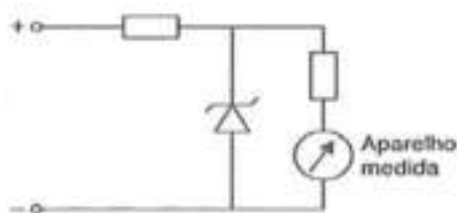


Ilustração 2-6 – Circuito de proteção com díodo zéner para corrente contínua

Na figura seguinte, apresenta-se um circuito de proteção com díodo zéner para corrente alternada.

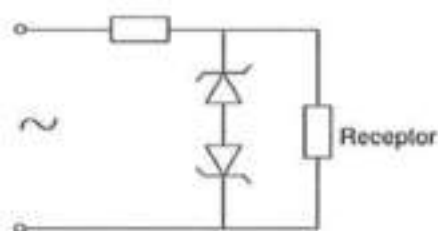


Ilustração 2-7 – Circuito de proteção com díodo zéner para corrente alternada



Os díodos zéner apresentam alguns problemas na sua utilização, particularmente uma tolerância considerável e o facto de não eliminarem completamente o “ripple” da tensão de saída.

Apresentam ainda bastante dificuldade em regular a tensão de saída para correntes elevadas.

Nas soluções seguintes, eliminam-se estes problemas.

2.6.2. Regulação com transístor em paralelo

Como abordado no ponto anterior, os díodos zéner apresentam dificuldades em estabilizar a tensão na carga, quando as correntes são mais elevadas.

Para a resolução deste problema, recorre-se à colocação de um transístor no circuito, de modo a que a base deste seja alimentada pelo zéner, tal como se indica na figura seguinte.

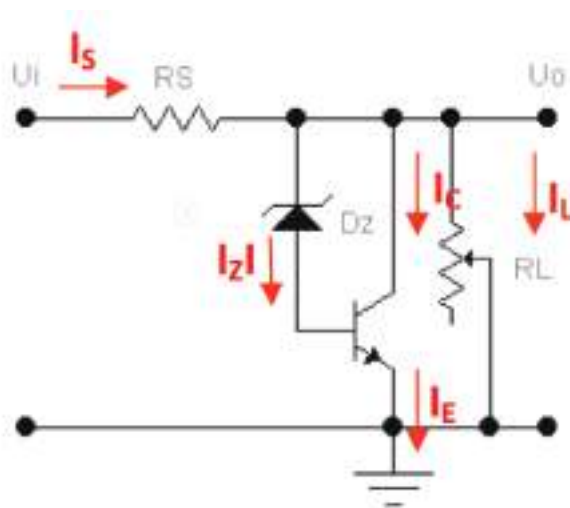


Ilustração 2-8 – Regulador de tensão com transístor ligado em paralelo com a carga

A tensão de saída vem dada pela expressão indicada a seguir, resultante da aplicação da Lei das Malhas.

$$U_o = U_z + U_{BE}$$

Se a tensão de saída tender a aumentar de valor, por diminuição da corrente na carga, então $U_z + U_{BE}$ também aumentará, bem como a corrente na base ($I_B = I_Z$), o que determinará



o aumento da corrente de coletor ($I_c = \beta \times I_b$), a corrente I_s também aumentará, o que provocará o aumento de $R_s \times I_s$, e conseqüentemente a diminuição da tensão de saída ($U_o = U_i - R_s \times I_s$), o que provoca assim a estabilização da tensão.

De modo inverso, se a tensão de saída tender a diminuir de valor, por aumento da corrente na carga, então $U_z + U_{BE}$ também diminuirá, bem como a corrente na base ($I_b = I_z$), o que determinará o abaixamento da corrente de coletor ($I_c = \beta \times I_b$), a corrente I_s também diminuirá, o que provocará a diminuição de $R_s \times I_s$, e conseqüentemente o aumento da tensão de saída ($U_o = U_i - R_s \times I_s$), o que provoca assim a estabilização da tensão.

Conclui-se portanto, que esta solução permite melhorar a estabilização da tensão na saída, através de um mecanismo de compensação, que contraria a tendência de evolução da tensão de saída, quer no aumento, quer na diminuição.

Quando estivermos perante correntes elevadas e também tensões elevadas, utiliza-se um circuito como o que se representa na figura seguinte, em que se utiliza igualmente o transistor em paralelo, mas agora com duas resistências em série, ligadas à base do transistor para aumentar a tensão na carga, constituindo um divisor de tensão.

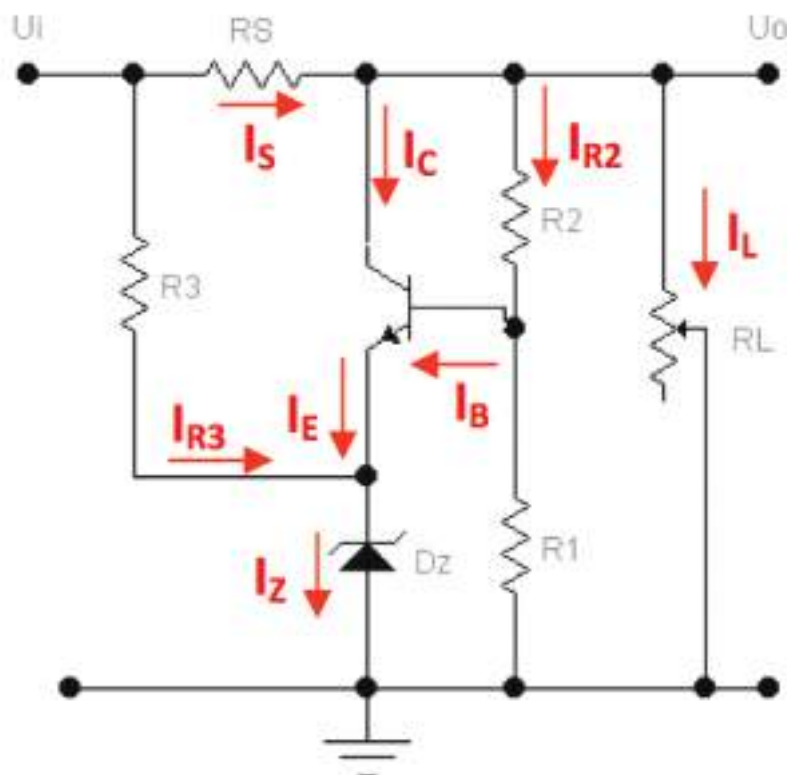


Ilustração 2-9 – Regulador de tensão com transistor em paralelo e divisor de tensão



A tensão de saída é obtida pela expressão indicada a seguir.

$$U_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \times (U_z + U_{BE})$$

Uma outra solução para melhorar ainda mais a regulação do regulador paralelo a transístor, consiste na utilização de um amplificador operacional a alimentar a base do transístor, constituindo um amplificador de erro, conforme se pode ver na figura apresentada a seguir.

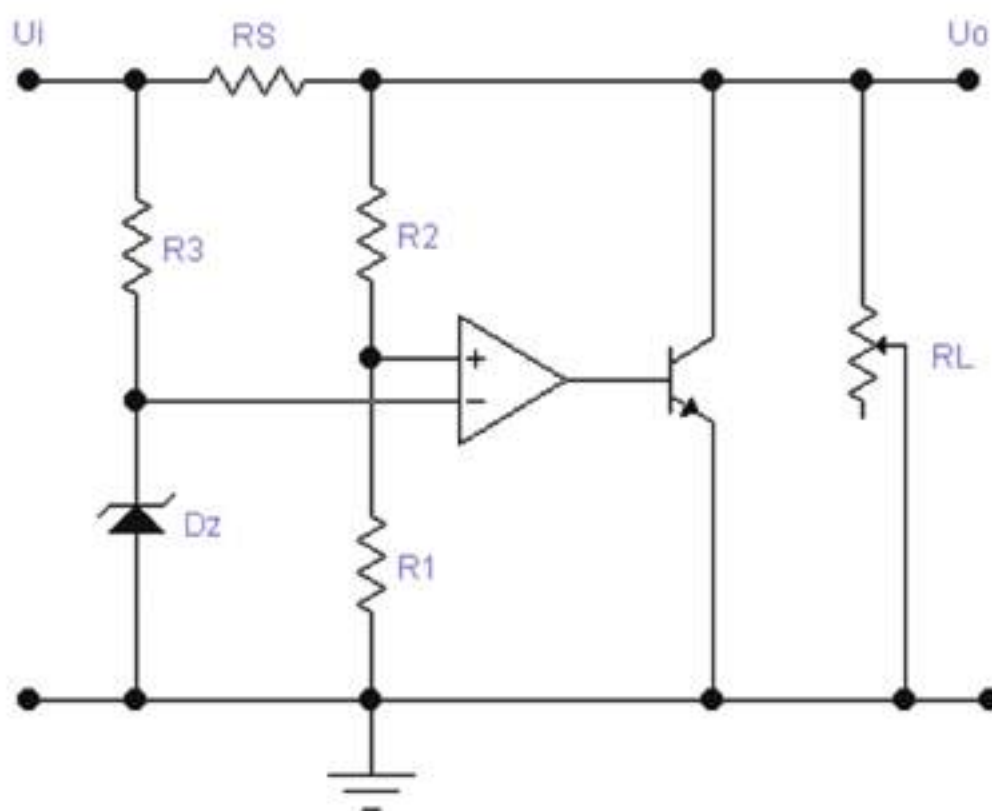


Ilustração 2-10 – Regulador de tensão com transístor em paralelo e amplificador operacional

A tensão de saída é obtida pela expressão indicada a seguir.

$$U_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \times U_z$$

Quando comparados com os reguladores série, os reguladores paralelo apresentam a vantagem de realizarem automaticamente a proteção contra curto-circuitos.



Por outro lado, o regulador paralelo apresenta algumas desvantagens relativamente ao regulador série, particularmente o facto de consumir aproximadamente a mesma potência (normalmente elevada), quer a carga consuma muita ou pouca potência, inclusivamente quando ela está desligada.

Convém introduzir nesta altura o conceito de eficiência ou rendimento (η) de uma fonte de alimentação.

Considerando a potência fornecida pela fonte $P_i = U_i \times I_i$, e a potência consumida pela carga $P_o = U_o \times I_L$, a eficiência vem dada pela expressão indicada a seguir.

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \times 100\%$$

As perdas da fonte de alimentação (P_p), que se verificam nas resistências, díodos zéner, transístores, amplificadores operacionais e condensadores, são dadas pela expressão seguinte.

$$P_p = P_i - P_o = U_i \times I_i - U_o \times I_L$$

2.6.3. Regulação com transistor em série

Com os reguladores série conseguem-se obter eficiências entre os 50% e 70%, bastante superiores aos reguladores paralelo, nos quais se não consegue atingir os 40%.

Por essa razão, as potências envolvidas com os reguladores paralelo são baixas, aplicando-se somente nesse tipo de circuitos.

Nos reguladores série existirá sempre um transistor ligado em série com a carga, de modo que a corrente do emissor será a mesma que percorrerá a carga.

Por isso, são utilizados transístores de maior potência, capazes de fornecer correntes mais elevadas e que dissipam também potências mais elevadas, com maior rendimento do regulador, pois a resistência R_s dissipa pouca potência.

Na figura seguinte está representado um regulador série com zéner seguidor.

Neste caso, a corrente da carga é igual à corrente do emissor do transistor, sendo a tensão de saída dada pela expressão seguinte.

$$U_o = U_z - U_{BE}$$



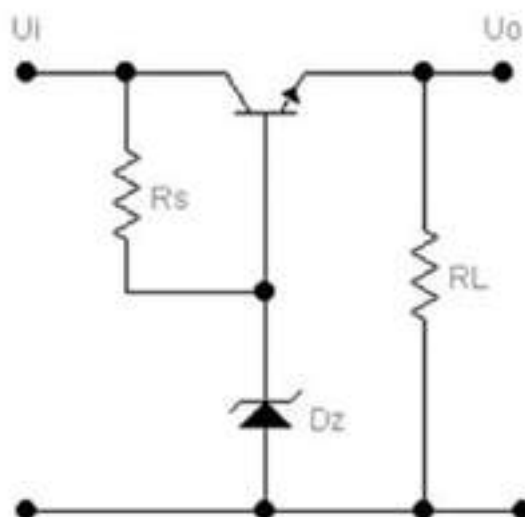


Ilustração 2-11 – Circuito regulador série com zéner seguidor

Com o zéner a funcionar dentro dos valores da sua gama de regulação, a saída mantém-se praticamente constante, pois só depende dos valores da tensão do zéner e da tensão entre base e emissor do transístor, tensões que se mantêm praticamente constantes. Portanto, qualquer tentativa de variação da tensão de saída imposta por variação da carga, será de imediato contrariada porque tanto a tensão do zéner como a tensão entre base e emissor do transístor se manterão insensíveis, o que garantirá a autorregulação do circuito.

A potência de perdas deste circuito vem dada pela expressão indicada a seguir.

$$P_p = P_i - P_o = U_i \times I_i - U_o \times I_L$$

A eficiência do circuito vem dada pela expressão indicada a seguir.

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \times 100\% = \frac{U_o \times I_L}{U_i \times I_i} \times 100\%$$

Pode-se concluir que a eficiência deste regulador é praticamente igual ao quociente entre as tensões de saída e de entrada.

Quanto menor for U_{ce} , maior será a eficiência deste regulador série.

Para tensões mais elevadas, podemos utilizar um circuito regulador série como o que se exemplifica na figura seguinte.



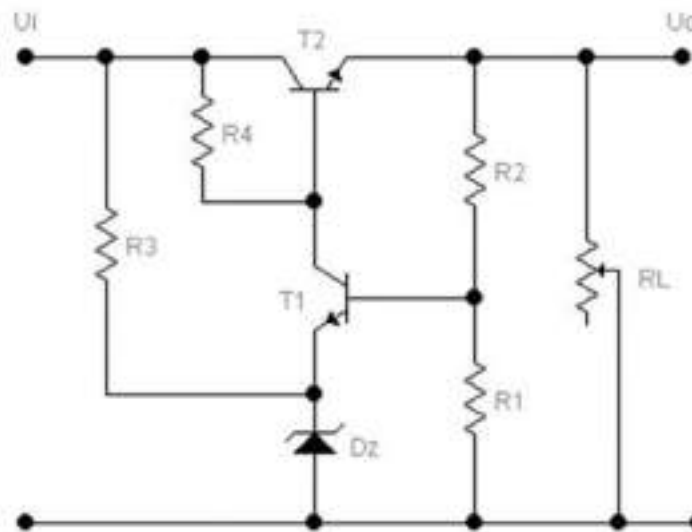


Ilustração 2-12 – Circuito regulador série para tensões mais elevadas

A tensão de saída regulada será dada pela expressão seguinte.

$$U_O = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \times (U_Z + U_{BE})$$

A adequada escolha de R_1 e de R_2 , permitirá uma gama elevada de tensões de saída a regular.

Quando a tensão na carga aumentar, aumentará U_{R1} , o que provocará o aumento de I_{B1} e o conseqüente aumento de I_{C1} , bem como a subida de U_{R4} e a descida de U_{B2} ; I_{B2} descera tal como I_{E2} e U_{CE2} , o que provocará uma descida de U_O , que compensa a tendência inicial de subida, provocando assim a estabilização da tensão.

A eficiência do circuito vem dada pela expressão indicada a seguir.

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \times 100\% = \frac{U_o \times I_L}{U_i \times I_i} \times 100\%$$

Podemos melhorar o desempenho deste regulador série, utilizando um amplificador operacional em vez do transístor em paralelo, o que permite reduzir o consumo de potência e eliminar alguma não linearidade introduzida pelo transístor.

Este circuito encontra-se representado na figura seguinte.



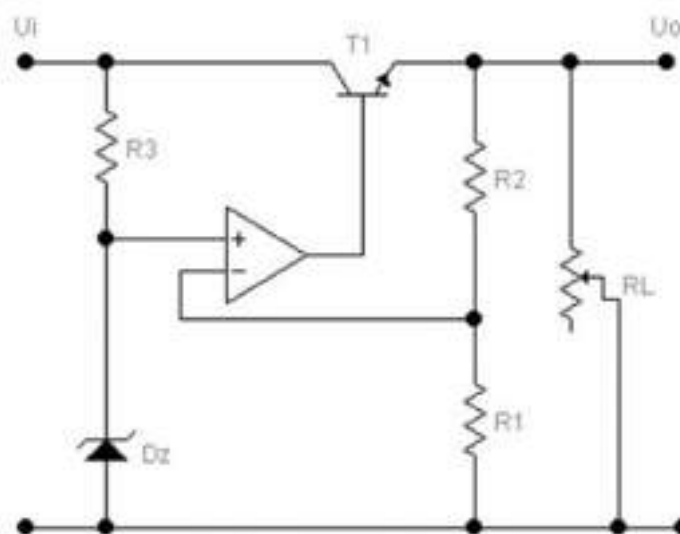


Ilustração 2-13 – Regulador série com amplificador operacional

A tensão de saída regulada será dada pela expressão seguinte.

$$U_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \times U_z$$

Este regulador não se encontra protegido contra um eventual curto-circuito que ocorra na carga (aos terminais de saída da fonte).

Como não há resistência de proteção contra esta eventualidade, poderá queimar o transistor, os díodos da ponte retificadora, ou o próprio transformador.

Para fazer face a este problema, inclui-se uma resistência sensora de corrente (“current sensing resistor”), de baixo valor, conforme se pode ver no circuito da figura seguinte.

Sempre que existir um aumento de corrente na carga, também existirá aumento nesta resistência, tal como em U_{BE1} .

Quando U_{BE1} atinge 0,7 V, o transistor T_1 entra em condução, aumentando a tensão em R_4 e diminuindo o potencial aplicado à base de T_2 (ponto B).

Nessa altura diminui a corrente I_{E2} que vai para a carga, evitando assim a subida desta corrente.



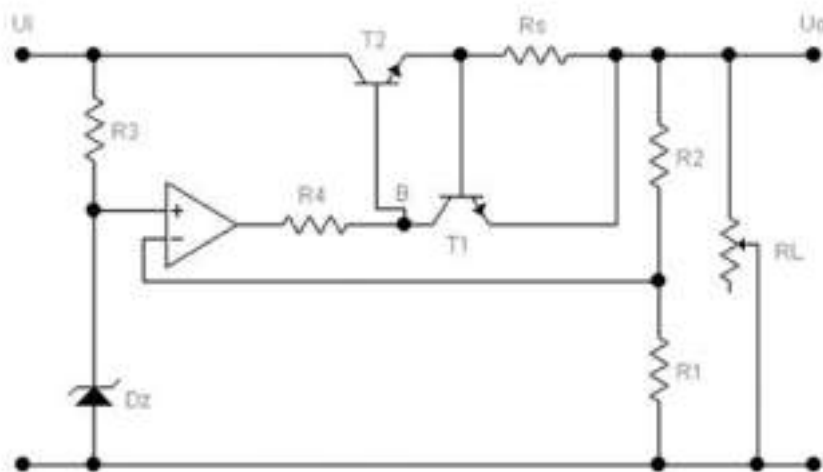


Ilustração 2-14 – Proteção do regulador série com resistência sensora

Uma das formas de proteger uma carga, é através da chamada proteção “Crowbar”. Trata-se de um sistema que utiliza um sensor (normalmente uma resistência de baixo valor), que provoca a condução de um transístor, de um SCR, ou de um triac, provocando um curto-circuito na carga sempre que a corrente elétrica que aí passa, ultrapasse um certo valor máximo definido em projeto.

Ao fazer o curto-circuito da carga, a corrente que passa no transístor, SCR, ou triac sobe rapidamente, fundindo um fusível, ou atuando um relé, protegendo o circuito pelo corte da alimentação.

Um exemplo deste circuito encontra-se representado na figura seguinte.

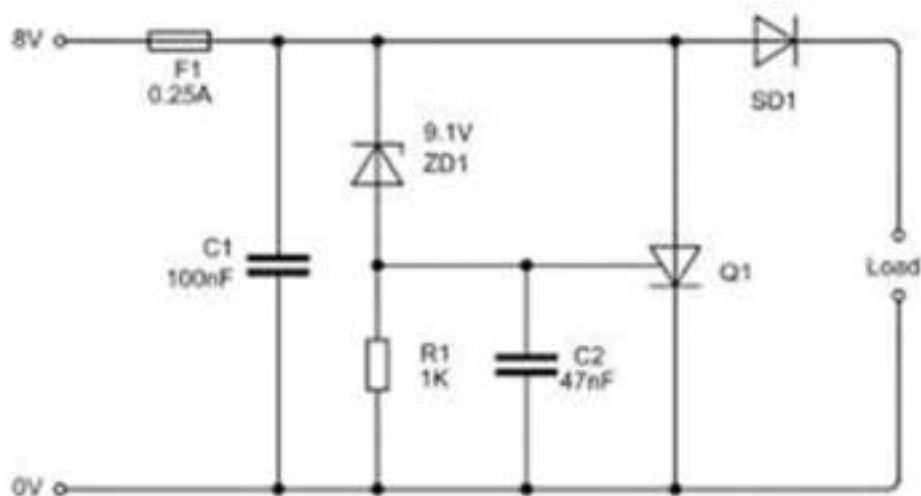


Ilustração 2-15 – Proteção “Crowbar”



Como comparação final entre vantagens e desvantagens dos reguladores série e paralelo, pode-se realçar que se o regulador série entrar em curto-circuito, a tensão da rede aparece na carga, podendo queimá-la, o que já não acontece no regulador paralelo. No regulador paralelo, a potência dissipada no transistor é constante, seja em vazio ou em carga, o que representa um desperdício de consumo de energia, e que faz com que a sua eficiência seja baixa.

Na figura seguinte apresenta-se o esquema completo de uma fonte de alimentação, construída com regulador série.

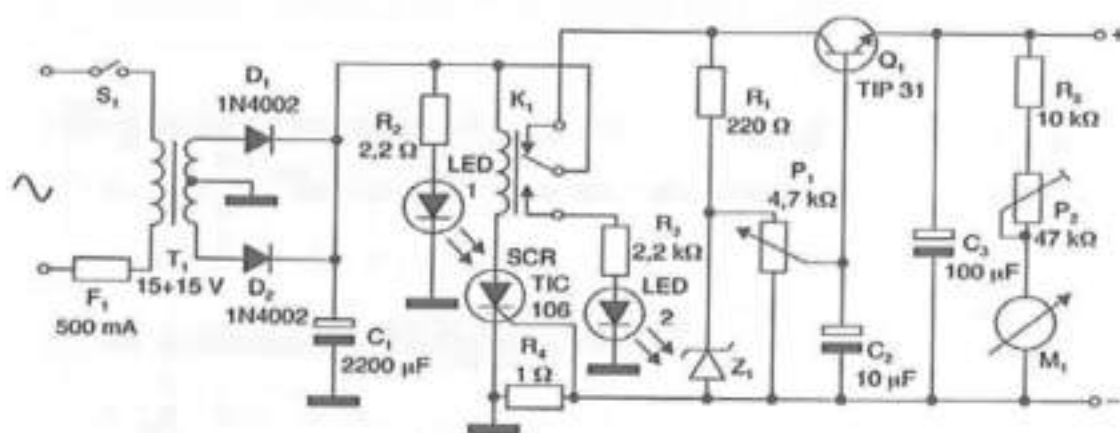


Ilustração 2-16 – Fonte de alimentação com regulador série

2.6.4. Reguladores lineares integrados

Os circuitos reguladores lineares integrados são fabricados em versões de encapsulamento de três pinos (TO-92, ou TO-220), de oito pinos (SO-8), ou em versão SMD (“Surface Mounted Devices”), contendo no seu interior vários componentes, correspondendo no fundo, aos circuitos abordados até agora.

Os reguladores integrados apresentam algumas vantagens, especialmente o facto de serem muito robustos, por estarem internamente protegidos contra sobrecargas e curto-circuitos.

Apenas apresentam alguma vulnerabilidade quando lhes é aplicada uma tensão de entrada com polaridade trocada.

Apresentam também menos “ripple” que os reguladores não integrados.



São componentes muito compactos, pelo que se tornam baratos e ocupam reduzido espaço, sendo de fácil e rápida montagem (conforme se pode ver pela figura seguinte).



Ilustração 2-17 – Circuitos reguladores integrados

Existem reguladores integrados de saída fixa e de saída ajustável.

Os de saída fixa apresentam um valor fixo de tensão regulada, positiva ou negativa, enquanto os de saída ajustável, permitem ajustar o valor da tensão regulada dentro de um determinado intervalo de valores.

2.6.4.1. Reguladores de saída fixa

Entre os reguladores de saída fixa destacam-se os das séries 78xx e 79xx, o primeiro para tensões positivas (+3,3 V, +5 V, +6 V, +8 V, +9 V, +10 V, +12 V, +15 V, +18 V e +24 V), e o segundo para os mesmos valores, mas com tensões negativas, representados nas figuras seguintes.

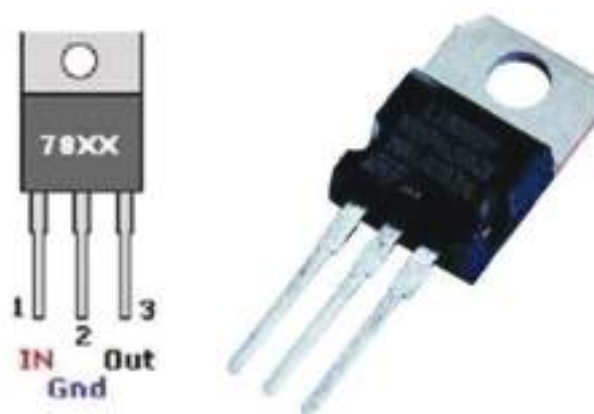


Ilustração 2-18 – Regulador 78xx



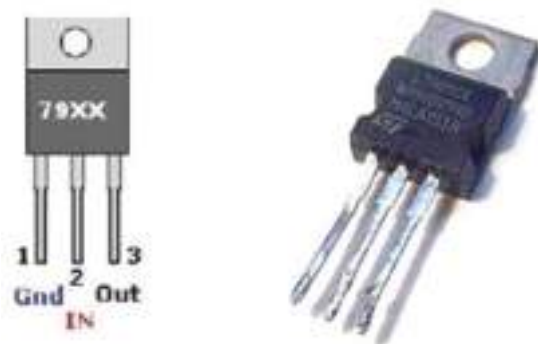


Ilustração 2-19 – Regulador 79xx

Existe também uma versão para as mesmas tensões (78Lxx e 79Lxx), mas com correntes baixas.

O valor da tensão de saída, vem dado pela expressão representada a seguir.

$$U_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \times U_{ref}$$

Os componentes indicados por esta expressão, são componentes internos do circuito integrado, não sendo acessíveis externamente, sendo apenas ajustados durante o processo de fabricação.

Os reguladores integrados apresentam usualmente uma proteção térmica, que interrompe a corrente sempre que seja ultrapassado o seu valor máximo, devido à existência de uma sobrecarga.

Uma vez que o defeito desapareça, o abaixamento de temperatura faz com que o componente volte novamente a conduzir.

Para estes reguladores a tensão de regulação de carga indicada no manual do fabricante é de aproximadamente 10 mV, para uma corrente de carga com valores entre 1,5 mA e 5 mA.

A tensão de regulação de rede indicada no manual do fabricante é um valor aproximadamente entre 5 mV e 10 mV, para uma tensão de entrada com valores entre 6 V e 25 V.

Estes reguladores apresentam três terminais, de acordo com o que se pode ver na figura seguinte (78xx).



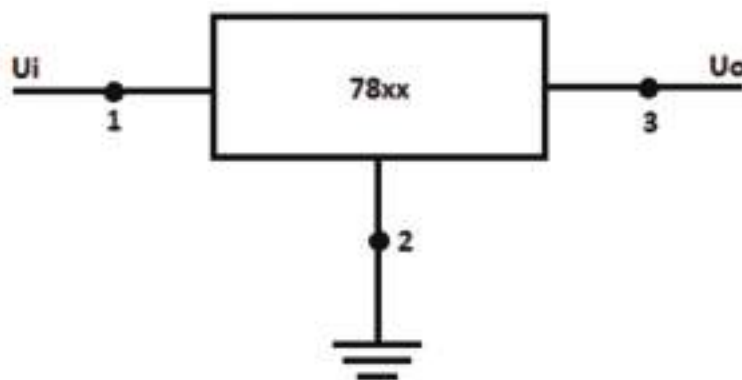


Ilustração 2-20 – Esquema de ligações externas do regulador 78xx

O esquema de ligações externas do regulador 79xx apresenta-se na figura seguinte.

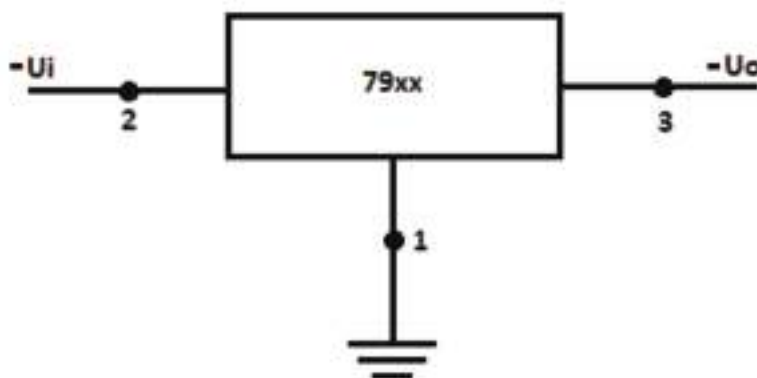


Ilustração 2-21 – Esquema de ligações externas do regulador 79xx

Com o objetivo de reduzir o ruído externo ou proveniente da rede, e ainda para atenuar as frequências de oscilação geradas no próprio regulador, o manual do fabricante sugere a instalação de condensadores não polarizados de valores 220 nF para a entrada e 100 nF para a saída, como se pode ver na figura seguinte.

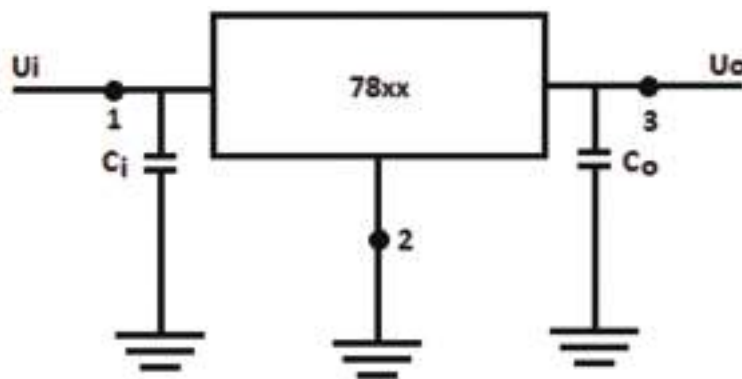


Ilustração 2-22 – Condensadores de filtragem do regulador



Os reguladores destas séries apresentam uma necessidade de valor mínimo de tensão para garantir a regulação, de cerca de 2 V a 3 V de diferença entre as tensões de entrada e de saída, resultante da queda de tensão interna, chamada “dropout” (ΔU), e dada pela expressão indicada a seguir.

$$\Delta U = U_i - U_o$$

Estes reguladores apresentam tolerância de aproximadamente 5%.

Sendo I_L a corrente disponibilizada para a carga, a potência dissipada por estes reguladores (P_D) é dada pela expressão representada a seguir.

$$P_D = (U_i - U_o) \times I_L$$

Na figura seguinte representa-se uma fonte de alimentação simétrica construída com reguladores 78xx e 79xx.

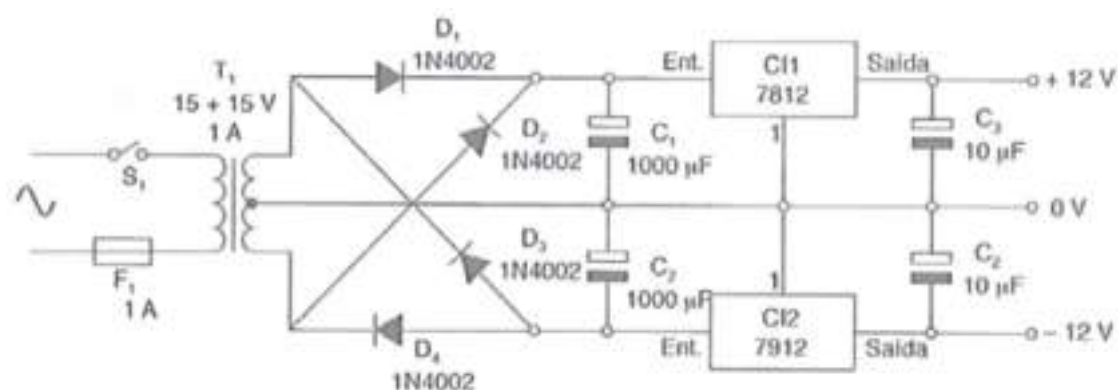


Ilustração 2-23 – Fonte de alimentação simétrica construída com reguladores 78xx e 79xx

Vamos agora indicar algumas montagens com este tipo de reguladores.

Na figura seguinte exemplifica-se um regulador fixo com tensão aumentada por resistência (R).



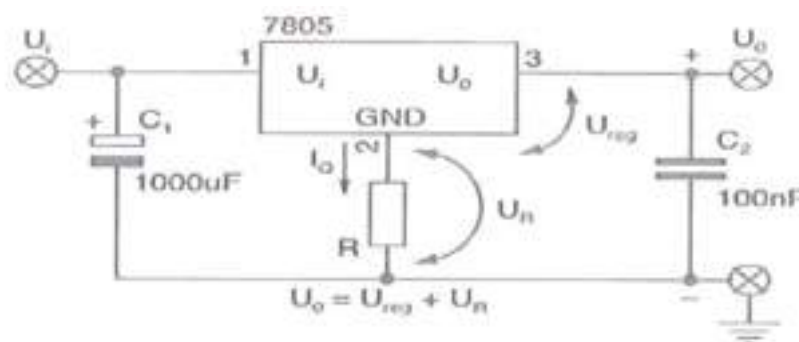


Ilustração 2-24 – Regulador fixo com tensão aumentada por resistência

Sendo U_{Reg} a tensão fixa do regulador e I_Q a corrente de polarização (valor constante aproximadamente igual a 5 mA), a tensão de saída do circuito vem dada pela expressão seguinte.

$$U_o = U_{Reg} + R \times I_Q$$

Na figura seguinte exemplifica-se um regulador fixo com saída ajustável por potenciômetro.

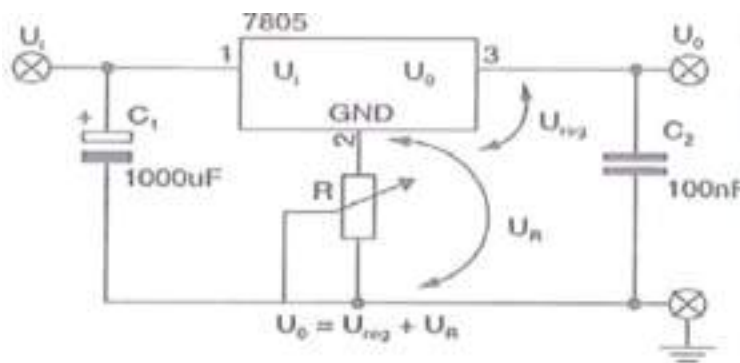


Ilustração 2-25 – Regulador fixo com saída ajustável por potenciômetro

Na figura seguinte exemplifica-se um regulador fixo com tensão aumentada por zéner.

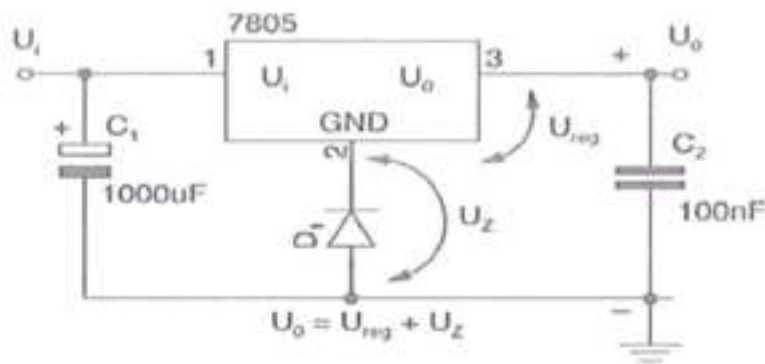


Ilustração 2-26 – Regulador fixo com tensão aumentada por zéner



O valor da tensão de saída, vem dado pela expressão representada a seguir.

$$U_O = U_{\text{Reg}} + U_Z$$

Na figura seguinte exemplifica-se um regulador fixo com tensão aumentada por díodos (de silício).

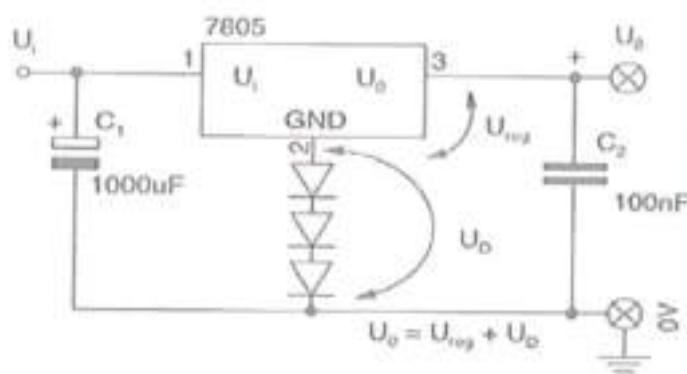


Ilustração 2-27 – Regulador fixo com tensão aumentada por díodos

Sendo N o número de díodos utilizados, o valor da tensão de saída, vem dado pela expressão representada a seguir.

$$U_O = U_{\text{Reg}} + N \times 0,7$$

Na figura seguinte exemplifica-se uma fonte de corrente constante, utilizando um regulador fixo.

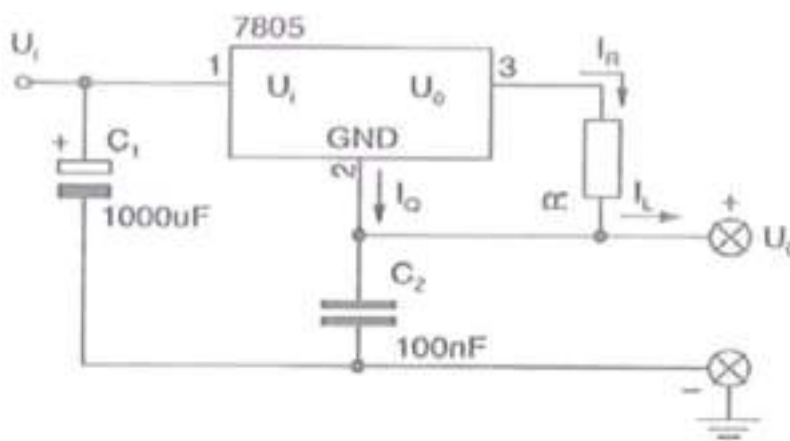


Ilustração 2-28 – Fonte de corrente constante, utilizando um regulador fixo



O valor da corrente que percorre a carga, vem dado pela expressão representada a seguir.

$$I_L = \frac{U_{Reg}}{R} + I_Q$$

Na figura seguinte exemplifica-se uma fonte de corrente ajustável, utilizando um regulador fixo.

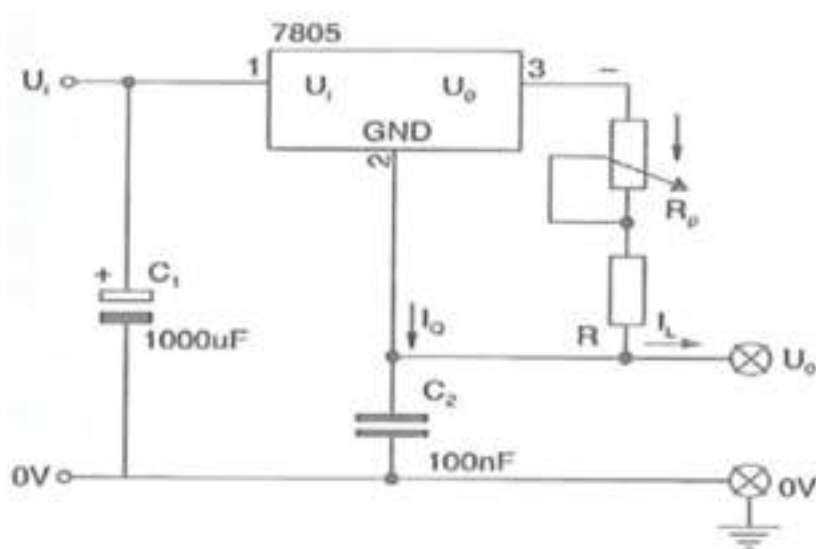


Ilustração 2-29 – Fonte de corrente ajustável, utilizando um regulador fixo

O valor máximo da corrente que percorre a carga, vem dado pela expressão representada a seguir.

$$I_{Lm\acute{o}x} = \frac{U_{Reg}}{R} + I_Q$$

O valor mínimo da corrente que percorre a carga, vem dado pela expressão representada a seguir (em que R_p é o valor do potenciômetro ligado em série com a resistência R).

$$I_{Lm\acute{i}n} = \frac{U_{Reg}}{R + R_p} + I_Q$$

Na montagem da figura seguinte, consegue-se aumentar a corrente de saída de um regulador fixo, utilizando uma resistência em paralelo.



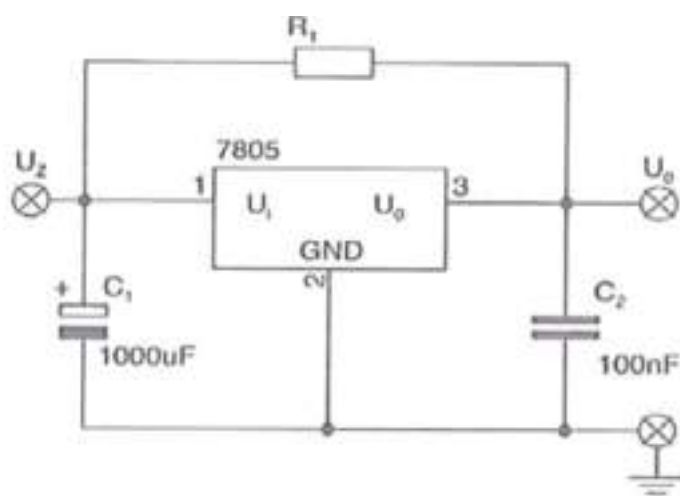


Ilustração 2-30 – Regulador fixo com resistência em paralelo

Na montagem da figura seguinte, consegue-se aumentar a corrente de saída de um regulador fixo, com vários reguladores em paralelo.

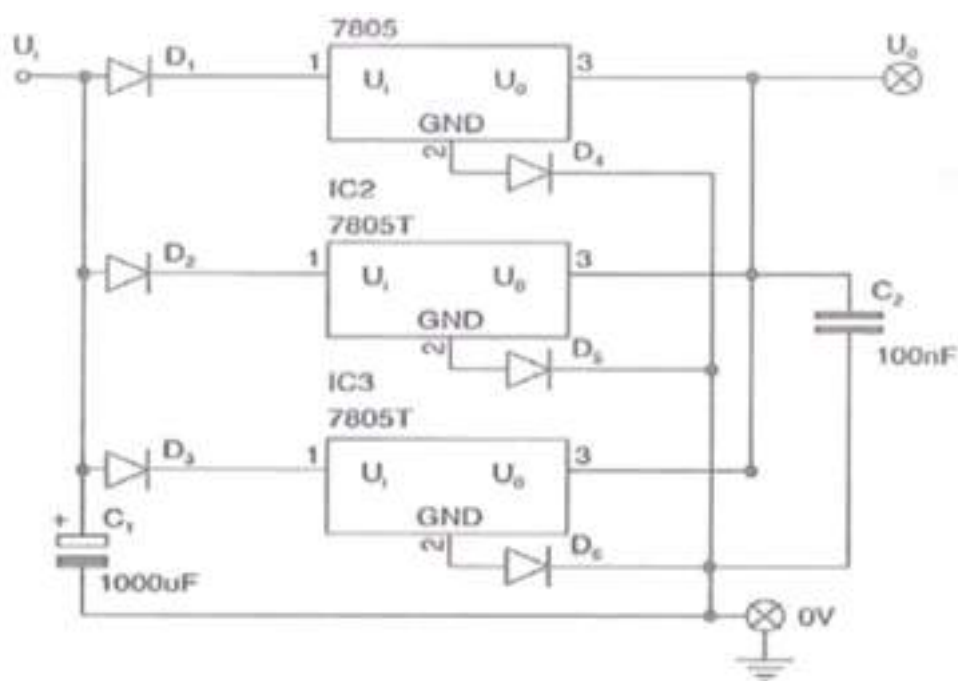


Ilustração 2-31 – Regulador fixo com vários reguladores em paralelo

Na montagem da figura seguinte, consegue-se aumentar a corrente de saída de um regulador fixo, com transístor.



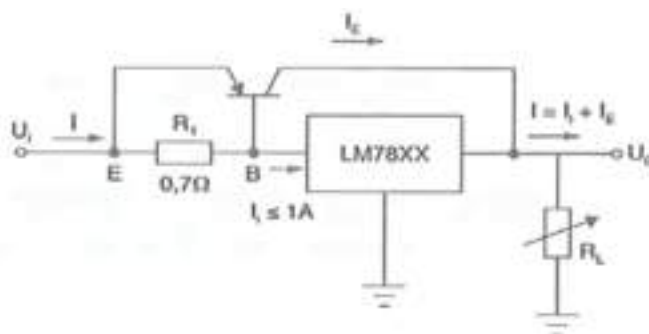


Ilustração 2-32 – Regulador fixo com transístor

Na montagem da figura seguinte, observa-se a proteção de um regulador fixo contra sobreintensidades, com transístor.

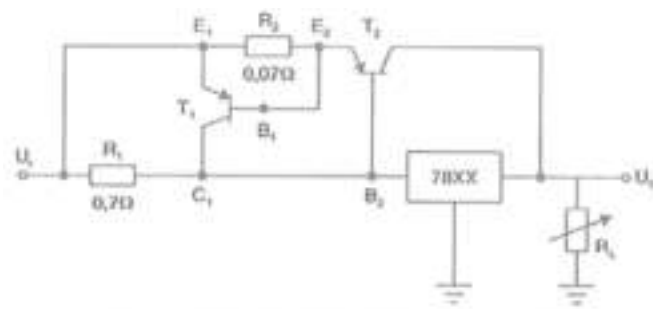


Ilustração 2-33 – Proteção de um regulador fixo contra sobreintensidades, com transístor

Na montagem da figura seguinte, observa-se um regulador de precisão, com amplificador operacional.

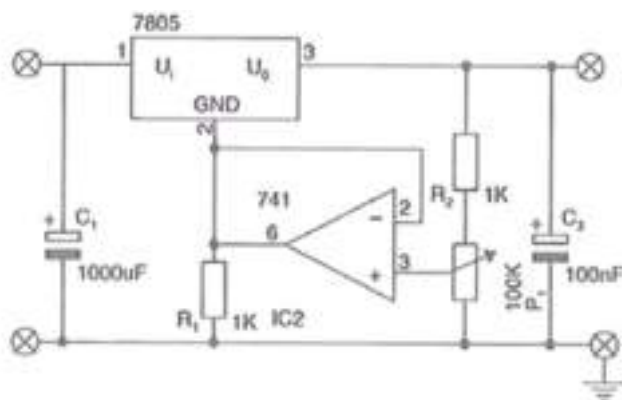


Ilustração 2-34 – Regulador de precisão, com amplificador operacional



Por último, na montagem da figura seguinte, observa-se uma fonte de alimentação regulada simétrica, utilizando dois reguladores integrados simétricos.

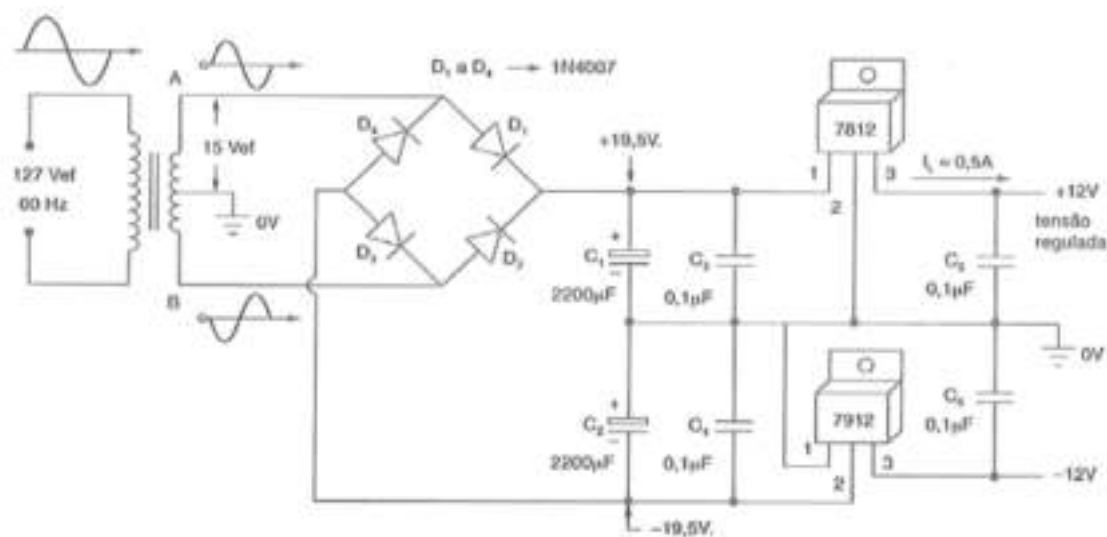


Ilustração 2-35 – Fonte de alimentação regulada simétrica, com dois reguladores integrados simétricos

2.6.4.2. Reguladores de saída variável

Entre os reguladores de saída ajustável destacam-se o LM317, LM337, LM338, LM350, entre outros.

Como exemplo de análise, vamos fazer a abordagem a um dos mais usados, o LM317, que se representa nas duas figuras seguintes.



Ilustração 2-36 – Regulador integrado de tensão ajustável LM317



Trata-se de um regulador de tensão positiva ajustável, constituído por três terminais e capaz de fornecer uma corrente máxima de 1,5 A, com tensão regulada ajustável entre 1,25 V e 37 V.

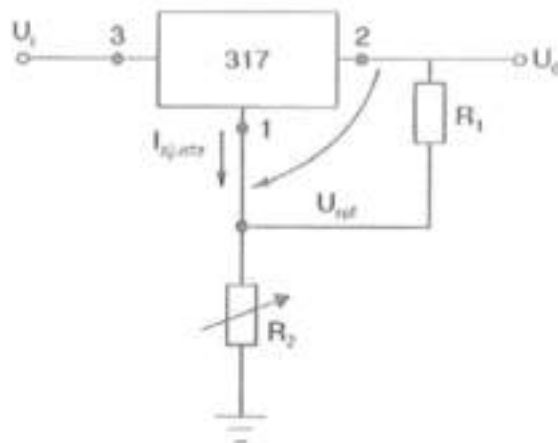


Ilustração 2-37 – Ligação básica de um regulador LM317

Relativamente aos reguladores fixos abordados, apresenta uma faixa de tensões na saída bastante considerável, o que permite uma grande adaptabilidade a diversos valores sem a necessidade de trocar de componente.

A sua corrente de ajuste é desprezável, o que permite uma maior precisão na regulação, com valores de regulação de rede de 0,3% e de regulação de carga de 0,02%, que representam efetivamente, valores bastante baixos.

Do esquema de ligações apresentado, conclui-se que o terminal de saída será ligado de modo direto ao dissipador, sendo que o terminal de massa não existe neste regulador, sendo substituído por um terminal de ajuste.

A tensão fixa de referência do regulador (U_{Ref}) é de 1,25 V e o fabricante indica como valor para a resistência R_1 de 240 Ω .

Nessa situação, a corrente que atravessa esta resistência tem um valor dado pelo cálculo seguinte.

$$I_{R1} = \frac{U_{Ref}}{R_1} = \frac{1,25}{240} = 0,0052 \text{ A} = 5,2 \text{ mA}$$

O potenciómetro é percorrido pela corrente que atravessa a resistência R_1 adicionada à corrente residual derivada do terminal 1 (aproximadamente 50 μA), formando estas duas resistências um divisor de tensão.



Desprezando a corrente de ajuste e tendo em consideração o valor da tensão de referência, a expressão da tensão de saída será dada pela expressão seguinte.

$$U_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \times 1,25$$

De seguida apresentam-se algumas soluções com os reguladores variáveis LM317.

Na figura seguinte, representa-se um gerador de corrente ajustável (com $I_{L\text{máx}} \leq 1,5 \text{ A}$).

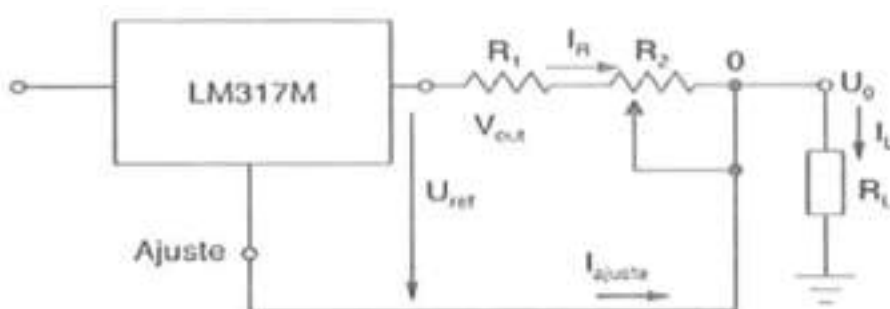


Ilustração 2-38 – Gerador de corrente ajustável com o LM317

O valor da corrente disponível na saída, virá dado pela expressão indicada a seguir.

$$I_L = \frac{U_{\text{ref}}}{R_1 + R_2} + I_{\text{ajuste}} = \frac{1,25}{R_1 + R_2} + I_{\text{ajuste}}$$

A corrente de ajuste pode ser desprezada devido ao baixo valor (já indicado anteriormente).

A tensão de saída será dada pela expressão seguinte.

$$U_o = R_L \times I_L$$

Para se conseguir um aumento importante da corrente de saída, pode utilizar-se um transistor de potência como o 2N2955, numa montagem como a que a seguir se representa.



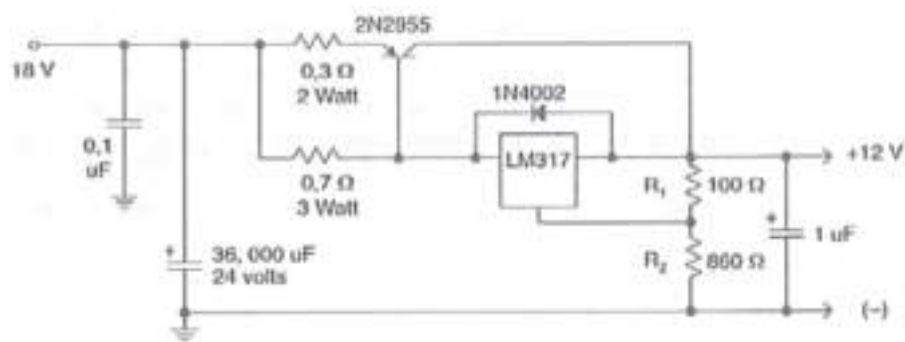


Ilustração 2-39 – Circuito para aumento da corrente de saída com transístor em paralelo

Na figura seguinte representa-se um regulador de tensão, com seleção digital do valor da tensão de saída.

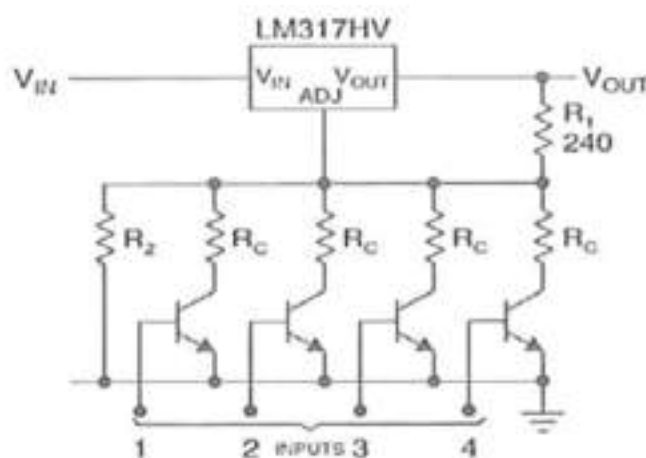


Ilustração 2-40 – Regulador de tensão, com seleção digital do valor da tensão de saída

A tensão de saída (tensão máxima) desta montagem, vem dada pela expressão seguinte.

$$U_0 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \times 1,25$$

Quando um dos transístores conduz e admitindo que satura, a corrente $I_{Ref} = 1,25 / R_1$ é constante, e conseguimos obter uma tensão inferior dividindo por R_2 e por R_C , ou seja, pelo paralelo destas duas resistências.

Na figura seguinte apresenta-se uma fonte de alimentação completa construída com um regulador LM317.

As tensões de saída são obtidas através da seleção de um comutador rotativo, que permite obter as tensões de 3 V, 6 V, 9 V, 12 V e 15 V.



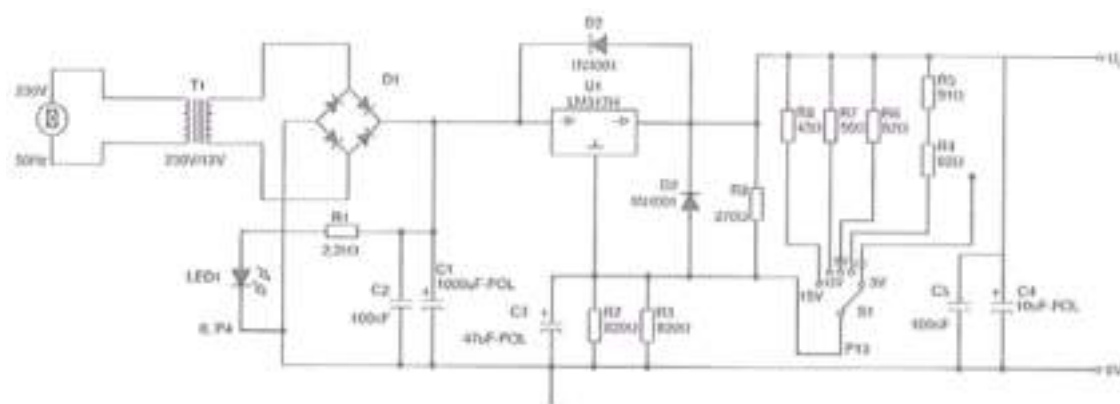


Ilustração 2-41 – Fonte de alimentação completa, com LM317

A tensão de saída desta fonte, vem dada pela expressão seguinte.

$$U_0 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \times 1,25$$

2.6.4.3. Outros reguladores

Para além dos reguladores abordados até ao momento, que fazem parte dos mais utilizados, existem vários outros provenientes de outros fabricantes.

Na tabela seguinte indicam-se alguns destes reguladores.

TABELA DE CARATERÍSTICAS DE ALGUNS REGULADORES	
Tipo	Caraterísticas
LM117	Fornece uma tensão positiva ajustável entre 1,25 V e 25 V, com uma corrente máxima de 1,5 A.
LM137	Fornece uma tensão positiva ajustável entre -1,25 V e -25 V, com uma corrente máxima de 1,5 A. É complementar do LM117.
LM138	Fornece uma tensão positiva ajustável entre 1,25 V e 32 V, com uma corrente máxima de 5 A.
LM150	Fornece uma tensão positiva ajustável entre 1,25 V e 25 V, com uma corrente máxima de 3 A.
LM337	Fornece uma tensão positiva ajustável entre -1,25 V e -37 V, com uma corrente máxima de 1,5 A. É complementar do LM317.
LM350	Fornece uma tensão positiva ajustável entre 1,25 V e 25 V, com uma corrente máxima de 3 A.

Ilustração 2-42 – Tabela de caraterísticas de alguns reguladores



2.6.4.4. Cálculo de dissipadores

Como é já de conhecimento generalizado, a passagem da corrente eléctrica num condutor provoca libertação de calor por efeito Joule.

Os componentes eletrónicos são sujeitos a temperaturas elevadas, proporcionais às correntes que os atravessam.

Assim sendo, cada componente será capaz de suportar uma temperatura máxima, sem que se danifique.

Torna-se então importante adotar procedimentos que limitem e/ou reduzam as temperaturas a que aqueles são sujeitos.

Para além do componente propriamente dito, desempenha papel importante, o tipo de encapsulamento em que estão contidos, materiais metálicos (TO-3, TO-220, etc.) ou plásticos (TO-92, TO-225, etc.).

O componente e o seu encapsulamento, em conjunto, vão ser caracterizados por uma capacidade de dissipação de calor, que leva a que nos manuais dos fabricantes seja indicada a temperatura máxima ($T_{m\acute{a}x}$) a que cada componente pode ficar sujeito.

Acontece então, que para determinados valores de corrente, temos que nos socorrer de dissipadores de calor externos (ver figura seguinte), capazes de retirar calor adicional ao componente.



Ilustração 2-43 – Dissipadores de calor

Vamos analisar agora, como se pode fazer o dimensionamento destes dissipadores.



Ilustração 2-44 – Transistor de potência instalado em dissipador



A resistência térmica (R_t) de um componente, entende-se como a resistência que este oferece ao aumento de temperatura, sendo definida como o quociente entre o diferencial de temperatura (ΔT) e a potência (P) dissipada pelo componente.

Sendo $T_{\text{junção}}$ (T_j) a temperatura interna do componente e T_{ambiente} (T_a) a temperatura exterior a que o componente está sujeito, a resistência térmica (R_t) do componente será dada pela expressão indicada a seguir.

$$R_t = \frac{\Delta T}{P} = \frac{T_{\text{junção}} - T_{\text{ambiente}}}{P}$$

A potência dissipada por um componente, calcula-se, como se sabe, pela expressão seguinte, em que U é a tensão aos seus terminais, e I é a intensidade de corrente que o atravessa.

$$P = U \times I$$

A resistência térmica total de um componente pode desdobrar-se em duas componentes a resistência térmica da junção-encapsulamento (R_{jc}) e a resistência térmica encapsulamento-ambiente (R_{ca}).

$$R_t = R_{ja} = R_{jc} + R_{ca}$$

Recorrendo à analogia entre o circuito térmico e o circuito elétrico, podemos escrever a equação seguinte.

$$T_j = T_a + (R_{jc} + R_{ca}) \times P$$

Com esta expressão podemos calcular a temperatura da junção interna do componente (T_j), quando dissipa uma dada potência (P) para o ambiente, que se encontra a uma dada temperatura (T_a).

Os valores das resistências térmicas R_{jc} e R_{ca} , constam das folhas de características dos componentes, encontrando-se nos respetivos manuais.

Na figura seguinte representa-se uma tabela de valores de resistências térmicas de alguns encapsulamentos.



TABELA DE VALORES DE RESISTÊNCIAS TÉRMICAS DE ENCAPSULAMENTOS			
Encapsulamento	R_{jc} (°C/W)	R_{ja} (°C/W)	R_{cd} (°C/W)
TO-3	0,7 a 1,75	35	0,5 a 0,7
TO-220	1,15 a 3,1	62 a 75	1 a 1,3
TO-202	12,5 a 25	62 a 78	1,5 a 2

Ilustração 2-45 – Tabela de valores de resistências térmicas de encapsulamentos

A escolha de um dissipador de calor, deverá ter em consideração a máxima temperatura que o componente possa suportar ($T_{j\text{máx}}$) e a temperatura ambiente (é usual a utilização do valor de 45 °C), para além, obviamente, das características próprias do dissipador.

Na tabela seguinte apresentam-se as condutâncias térmicas de alguns materiais utilizados na construção de dissipadores.

TABELA DE CONDUTÂNCIAS TÉRMICAS DE ALGUNS MATERIAIS	
Material	Condutância térmica C_t (W/°C.cm)
Cobre	3,85
Alumínio	2,08
Latão	1,1
Aço	0,46
Mica	0,01

Ilustração 2-46 – Tabela de condutâncias térmicas de alguns materiais

Quando aplicamos o dissipador, a resistência total (R_t) passa a ser dada pela expressão indicada a seguir.

$$R_t = R_{ja} = R_{jc} + R_d$$

Nesta expressão aparece o valor da resistência térmica do dissipador (R_d), que corresponde agora à soma da resistência térmica dissipador-ambiente (R_{da}) com a resistência térmica encapsulamento-dissipador (R_{cd}), conforme se pode concluir da expressão apresentada a seguir.



$$R_d = R_{ca} + R_{da}$$

A expressão da temperatura da junção (T_j) pode então ser dada pela expressão seguinte.

$$T_j \cong T_a + (R_{jc} + R_d) \times P$$

Para uma melhor compreensão do processo de dimensionamento de um dissipador de calor, vamos analisar um exemplo.

Supondo que se pretende dimensionar um dissipador de calor para aplicar num regulador LM7812, em que a tensão de entrada é de $U_i = 15$ V (com a tensão de saída definida pelo regulador, $U_o = 12$ V) e em que a intensidade de corrente fornecida à carga é de $I = 0,5$ A, vamos proceder então à resolução do problema.

Consultando as folhas de características do regulador, obtemos $R_{jc} = 5$ °C/W e $R_{ja} = 65$ °C/W.

Vamos inicialmente calcular as condições sem a presença do dissipador, e posteriormente, já com a instalação do mesmo.

a) Sem dissipador:

Começamos pelo cálculo da resistência térmica encapsulamento-ambiente (R_{ca}).

$$R_{ca} = R_{ja} - R_{jc} = 65 - 5 = 60^\circ\text{C/W}$$

O cálculo da potência (P) leva-nos ao valor seguinte.

$$P = U \times I = (U_i - U_o) \times I = (15 - 12) \times 0,5 = 1,5\text{W}$$

A temperatura da junção (T_j) atingirá o valor indicado pela expressão seguinte (assumindo a temperatura ambiente com o valor de 45 °C).

$$T_j \cong T_a + (R_{jc} + R_{ca}) \times P = 45 + (5 + 60) \times 1,5 = 142,5^\circ\text{C}$$

Consultando a folha de características do regulador obtemos como máxima temperatura de funcionamento, o valor de $T_{j\text{máx}} = 150$ °C.



Convém sempre adicionar uma margem de segurança, que deverá ser da ordem de 20% a 30% (a que corresponde um valor entre 30 °C e 45 °C) desse valor máximo, ou seja, para a pior situação podemos ter uma temperatura limite de $T_{\text{máx}} = 150 - 45 = 105$ °C.

b) Com dissipador:

Se escolhermos um dissipador com baixo desempenho ($R_d = 10$ °C/W), confirmaremos a temperatura atingida pelo componente, com o dissipador já instalado.

$$T_j \cong T_a + (R_{jc} + R_d) \times P = 45 + (5 + 10) \times 1,5 = 67,5^\circ\text{C}$$

Vemos assim que com o dissipador atingimos uma temperatura de 67,5 °C, inferior à temperatura máxima que admitimos para este regulador (105 °C), o que satisfaz as nossas necessidades.

Outra forma de resolver o problema será determinar a resistência térmica do dissipador a aplicar nesta situação, escolhendo posteriormente o dissipador que satisfaça as necessidades para esta situação.

Teremos então deste modo o cálculo de R_t (assumindo como valor máximo para a temperatura da junção $T_j = 80$ °C).

$$R_t = R_{ja} = \frac{T_j - T_a}{P} = \frac{80 - 45}{1,5} = 23,3^\circ\text{C/W}$$

Cálculo da resistência térmica do dissipador (R_d).

$$R_d = R_{cd} + R_{da} = R_{ja} - R_{jc} = 23,3 - 5 = 18,3^\circ\text{C/W}$$

Deveremos optar por um dissipador que tenha uma resistência térmica (R_d) de valor inferior ou igual a 18,3 °C/W, como por exemplo aquele que foi a opção anterior.



2.7. Atividades propostas

EXERCÍCIOS DE APLICAÇÃO:

01 – Calcule a regulação de carga de uma fonte de alimentação, em que a tensão de saída sem carga apresenta o valor de 12,5 V e a tensão de saída com carga máxima apresenta o valor de 11,5 V.

02 – Calcule a regulação de carga de uma fonte de alimentação, em que a tensão de saída sem carga apresenta o valor de 27,5 V e a tensão de saída com carga máxima apresenta o valor de 27,0 V.

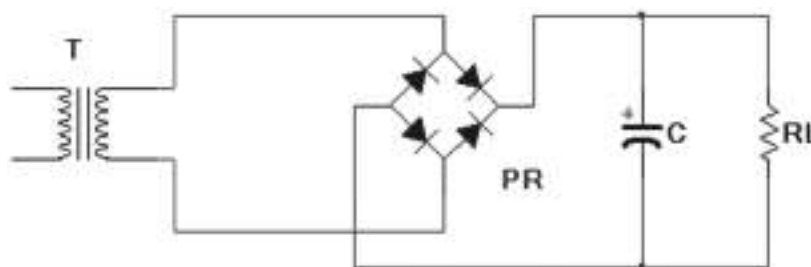
03 – Calcule a regulação de rede de uma fonte de alimentação, em que a tensão de saída com a tensão de rede elevada apresenta o valor de 13,5 V e a tensão de saída com a tensão de rede baixa apresenta o valor de 12,5 V.

04 – Calcule a regulação de rede de uma fonte de alimentação, em que a tensão de saída com a tensão de rede elevada apresenta o valor de 20,3 V e a tensão de saída com a tensão de rede baixa apresenta o valor de 19,7 V.

05 – Calcular a resistência de saída de uma fonte de alimentação, que apresente uma tensão em vazio de 12,5 V e uma tensão em carga de 12,4 V, quando coloque nessa carga uma intensidade de corrente de 1,5 A.

06 – Na figura seguinte representa-se uma fonte de tensão com redução de tensão por transformador (230 V, 50 Hz / 12 V), com retificação por fonte de Graetz e filtragem por condensador eletrolítico.

Ilustração 2-47 –
Circuito do exercício
2.06



A resistência de carga (R_L) tem o valor de $1\text{ K}\Omega$, e supondo que se pretende obter uma tensão de oscilação de ou tensão de “ripple” de $0,5\text{ V}$, calcular:

- A tensão máxima de pico no secundário do transformador ($U_{2\text{ máx}}$).
- A tensão máxima de pico aplicada à carga ($U_{O\text{ máx}}$).
- A capacidade do condensador (C), necessário à filtragem indicada.
- O valor médio da tensão aplicada à carga ($U_{O\text{ med}}$).
- O valor de U_{osc} , em percentagem da tensão máxima aplicada à carga, $U_{\text{osc}}(\%)$.

07 – Considere a figura seguinte em que se representa um regulador paralelo.

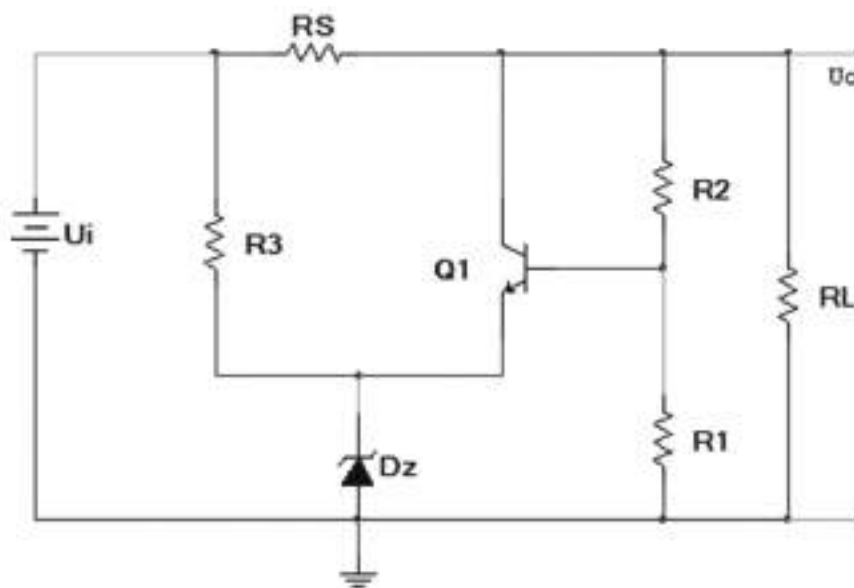


Ilustração 2-48 – Circuito do exercício 2.07

Sabendo-se que $U_i = 24\text{ V}$, $V_z = 9,1\text{ V}$, $R_s = 8,2\ \Omega$, $R_L = 82\ \Omega$, $R_1 = 470\ \Omega$, $R_2 = 470\ \Omega$ e $V_{BE} = 0,7\text{ V}$, calcular:

- A tensão de saída do circuito;
- A corrente que percorre a resistência, R_s ;
- A corrente absorvida pela carga;
- A corrente absorvida pelo divisor de tensão;
- A corrente no coletor do transístor.



08 – Para o circuito da figura seguinte (regulador paralelo de tensão), considerar $U_i = 12\text{ V}$, $U_z = 7,5\text{ V}$, $U_{BE} = 0,7\text{ V}$, $R_s = 10\ \Omega$ e $R_L = 47\ \Omega$.

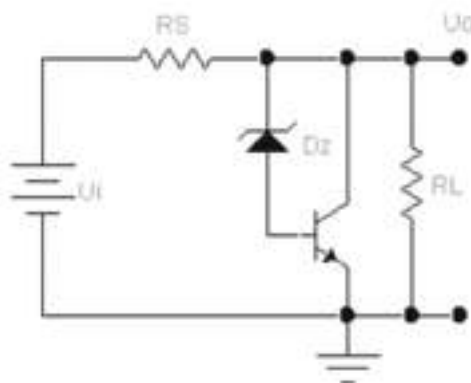


Ilustração 2-49 – Circuito do exercício 2.08

Calcular:

- A tensão de saída;
- A corrente total fornecida;
- A corrente na carga;
- A corrente no coletor do transistor (desprezando a corrente de base);
- A potência total fornecida pela fonte;
- A potência absorvida pela carga (R_L);
- A potência dissipada na resistência R_s ;
- A potência dissipada no transistor (desprezando a potência dissipada no zéner);
- A eficiência do regulador.

09 – O circuito da figura seguinte representa um regulador série.

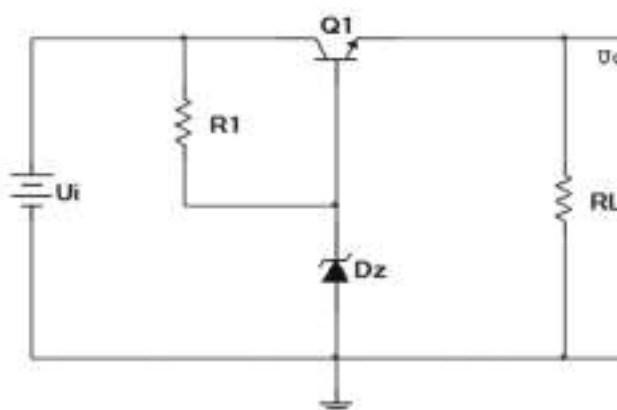


Ilustração 2-50 – Circuito do exercício 2.09



Sabendo-se que $U_i = 15 \text{ V}$, $V_z = 8,2 \text{ V}$, $R_L = 100 \Omega$, $R_1 = 680 \Omega$ e $\beta = 50$, calcular:

- A tensão de saída do circuito;
- A corrente absorvida pela carga;
- A potência dissipada na carga;
- A potência dissipada em R_1 ;
- A potência dissipada no diodo zéner;
- A potência dissipada no transistor;
- A eficiência do regulador.

10 – O circuito da figura seguinte representa um regulador série, com amplificador de dois transístores.

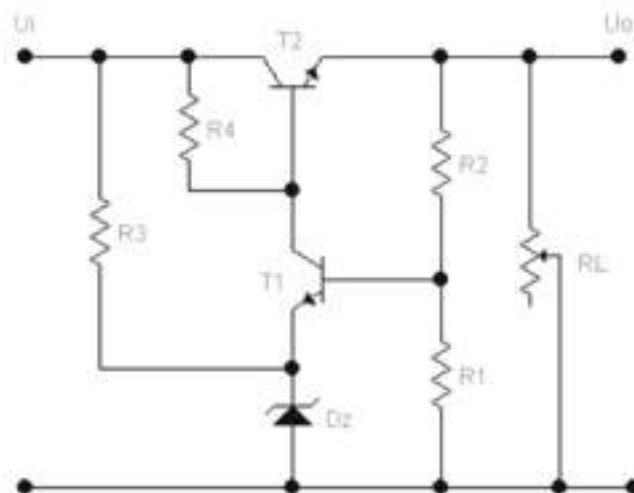


Ilustração 2-51 – Circuito do exercício 2.10

Sabendo-se que $U_i = 20 \text{ V}$, $V_z = 6,2 \text{ V}$, $R_L = 1 \text{ K}\Omega$, $R_1 = 4,7 \text{ K}\Omega$, $R_2 = 4,7 \text{ K}\Omega$, $R_3 = 1,2 \text{ K}\Omega$, $R_4 = 1 \text{ K}\Omega$, $\beta_1 = 200$ e $\beta_2 = 50$, calcular:

- A tensão de saída do circuito;
- A potência dissipada na carga;
- A potência dissipada em R_1 e R_2 ;
- A potência dissipada em R_3 ;
- A potência dissipada em R_4 ;
- A potência dissipada no diodo zéner;
- A potência dissipada no transistor T_1 ;



- h. A potência dissipada no transístor T_2 ;
- i. A eficiência do regulador.

11 – O circuito da figura seguinte representa um regulador série, com amplificador de erro.

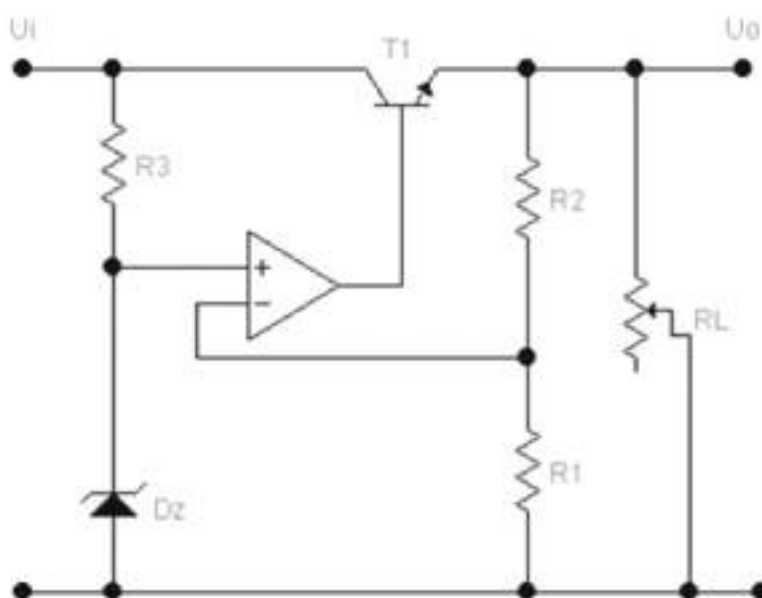


Ilustração 2-52 – Circuito do exercício 2.11

Sabendo-se que $U_i = 24 \text{ V}$, $V_z = 10 \text{ V}$, $R_L = 100 \text{ } \Omega$, $R_1 = 8,2 \text{ K}\Omega$, $R_2 = 6,8 \text{ K}\Omega$, $R_3 = 820 \text{ } \Omega$, e $\beta_1 = 50$, calcular:

- a. A tensão de saída do circuito;
- b. A potência dissipada na carga;
- c. A potência dissipada em R_3 ;
- d. A potência dissipada no díodo zéner;
- e. A potência dissipada no transístor (desprezando as potências dissipadas em R_1 e R_2);
- f. A eficiência do regulador.

12 – Pretende-se obter uma tensão de saída de 8 V , a partir de um regulador 7805.

Sabendo que $I_Q = 5 \text{ mA}$ e que a queda de tensão interna do regulador (“dropout”) é de $\Delta U = 2 \text{ V}$, calcular:



- a. O valor da resistência R necessária;
- b. O valor da tensão mínima a aplicar à entrada do regulador.

13 – Determinar os valores máximo e mínimo da tensão de saída de um regulador 7810, ao ser ligado entre a massa e o pino 2 (pino central) um potenciômetro de 1 K Ω .

14 – Calcular o valor de um potenciômetro que se deve ligar a um regulador 7812, para que se obtenha uma tensão de saída ajustável, entre 12 V e 18 V.

15 – Determinar a tensão de zéner, de um diodo zéner ligado a um regulador 7806, sabendo que na saída se obtém uma tensão de 12,2 V.

16 – Determinar o número de díodos ligados em série, entre o pino 2 e a massa de um circuito regulador 7810, para se obter 12 V na saída.

17 – Considere o circuito da figura seguinte.

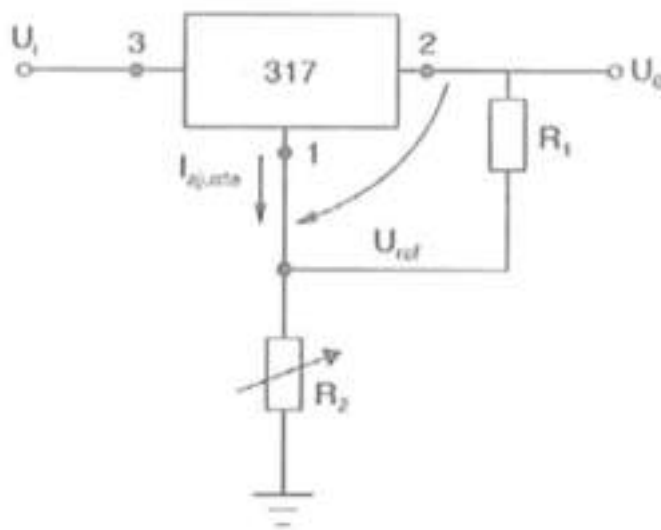


Ilustração 2-53 – Circuito do exercício 2.17

Considerando que se trata de um regulador ajustável LM317 e que $R_1 = 240 \Omega$, calcular os limites de ajuste da tensão de saída para as duas situações seguintes:

- a. Com $R_2 = 2,7 \text{ K}\Omega$;
- b. Com $R_2 = 4,7 \text{ K}\Omega$



Trabalhos Práticos

18 – Trabalho Prático n.º 01 – O Díodo Zéner como Estabilizador

1 – INTRODUÇÃO

Com a realização deste trabalho, pretende-se verificar a capacidade do díodo zéner para executar a função de estabilização do sinal de tensão da saída, nas situações de fonte de tensão variável, e de carga variável.

Em ambas as situações, o zéner mantém a tensão de saída dentro dos seus limites de tolerância (habitualmente 5%), funcionando deste modo como estabilizador de tensão, desde que a corrente I_z se mantenha dentro dos valores especificados, I_{zmin} e I_{zmax} .

2 – OBJETIVOS

Os objetivos para este trabalho são os seguintes:

- a) Ensaiar o díodo zéner com tensão de entrada variável.
- b) Ensaiar o díodo zéner com carga variável.

3 – MATERIAL NECESSÁRIO

- 1 Fonte de alimentação simétrica regulável (0 a 30 V);
- 2 Multímetros digitais;
- 1 Osciloscópio com dois canais (duas pontas de prova);
- 1 Placa de montagem eletrónica (“Breadboard”);
- Condutores;
- 1 Transformador 230 V / 12 V;
- 1 Díodo retificador 1N4002;
- 1 Díodo zéner BZX55-C9V1 / 400 mW ($I_{zmin} = 5$ mA);
- 3 Resistências $R_L = 470 \Omega$, $R_{S1} =$ Valor a determinar, $R_{S2} =$ Valor a determinar;
- 1 Potenciómetro P = 10 K Ω ;
- Ferramentas necessárias;
- Computador com acesso à internet;
- Manuais técnicos;



4 – ESQUEMA DE LIGAÇÕES DO CIRCUITO

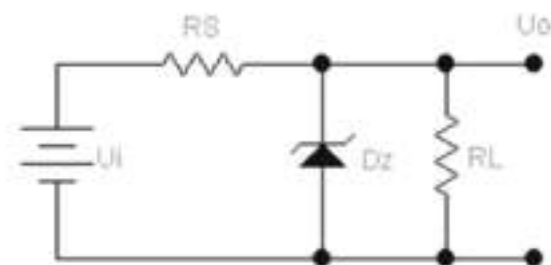


Figura 1

5 – PROCEDIMENTOS DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

- a. Montar o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 1);
- b. Calcular os valores, máximo e mínimo de R_s , de modo a que se obtenha na carga uma tensão estabilizada de 9,1 V, para uma tensão de alimentação variável entre 12 V e 15 V;
- c. Adotar um valor de R_s intermédio, entre os limites calculados, escolhendo um valor de resistência normalizado (R_{s1});
- d. Calcular as potências dissipadas nas resistências, de modo a escolher as suas potências nominais;
- e. Proceder à variação da tensão de entrada entre 0 V e 15 V, de acordo com o indicado no quadro 1;
- f. Registrar no quadro 1 os correspondentes valores da tensão U_o ;
- g. Indicar as principais conclusões;
- h. Substituir no circuito a resistência R_L pelo potenciómetro P;
- i. Calcular os valores, máximo e mínimo de R_s , considerando que a carga vai variar linearmente entre infinito (∞) e 470 Ω , para $U_i = 12$ V e $U_z = 9,1$ V;
- j. Adotar um valor de R_s intermédio, entre os limites calculados, escolhendo um valor de resistência normalizado (R_{s2});
- k. Calcular as potências dissipadas nas resistências, de modo a escolher as suas potências nominais;
- l. Registrar no quadro 2 os correspondentes valores da tensão U_o ;
- m. Indicar as principais conclusões.



6 – QUADRO DE REGISTO DE VALORES

U_i (V)	0	4	8	10	11	12	13	14	15
U_o (V)									

Quadro 1

P (K Ω)	∞	10	1	0,47
U_o (V)				

Quadro 2

7 – ELABORAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RELATÓRIO

Elaborar um relatório do trabalho, por grupo de trabalho, respeitando os seguintes parâmetros mínimos:

I – ESTRUTURA

- a) Cabeçalho:
- Nome da Escola
 - Nome da Disciplina
 - Número e nome do Módulo
 - Nome dos alunos, números, ano e turma
 - Identificação do trabalho
- b) Conteúdo (Mínimo):
- 1 – Objetivos
 - 2 – Recursos necessários
 - 3 – Procedimentos do trabalho
 - 4 – Dificuldades encontradas
 - 5 – Estratégia de resolução das dificuldades
 - 6 – Esquemas das montagens
 - 7 – Conclusões finais

II – MODO DE APRESENTAÇÃO

Em ficheiro informático, ou alternativamente em folhas A4, redigido à mão.

III – PRAZO DE ENTREGA

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.



19 – Trabalho Prático n.º 02 – Regulador de Tensão com Transístor em Paralelo

1 – INTRODUÇÃO

O díodo zéner, quando na presença de correntes elevadas, apresenta dificuldade em realizar a função de estabilização.

Para se resolver este problema, recorre-se à utilização do transístor em associação com o díodo zéner.

Para variações de tensão da fonte de alimentação ou para variações da corrente de carga, o transístor faz a compensação de corrente, de modo a manter constante a tensão de saída, desde que I_z se mantenha dentro dos valores especificados, I_{zmin} e I_{zmax} (limites de funcionamento).

2 – OBJETIVOS

Os objetivos para este trabalho são os seguintes:

- Ensaiar o estabilizador de tensão com o transístor em paralelo e com o díodo zéner.
- Ensaiar o estabilizador de tensão com o transístor em paralelo e com o díodo zéner, e com amplificação de tensão.
- Ensaiar o estabilizador de tensão com o transístor em paralelo e com o díodo zéner, e com amplificador operacional.

3 – MATERIAL NECESSÁRIO

- 1 Fonte de alimentação simétrica regulável (0 a ± 30 V);
- 2 Multímetros digitais;
- 1 Osciloscópio com dois canais (duas pontas de prova);
- 1 Placa de montagem eletrónica (“Breadboard”);
- Condutores;
- 1 Circuito operacional $\mu A741$;
- 1 Transístor BD137;
- 1 Díodo zéner BZX55-C6V2 / 400 mW ($I_{zmin} = 5$ mA);
- 3 Resistências $R_L = 470 \Omega$, $R_{S1} =$ Valor a determinar, $R_{S2} =$ Valor a determinar;



- 1 Potenciômetro P = 10 K Ω ;
- Ferramentas necessárias;
- Computador com acesso à internet;
- Manuais técnicos;

4 – ESQUEMA DE LIGAÇÕES DO CIRCUITO

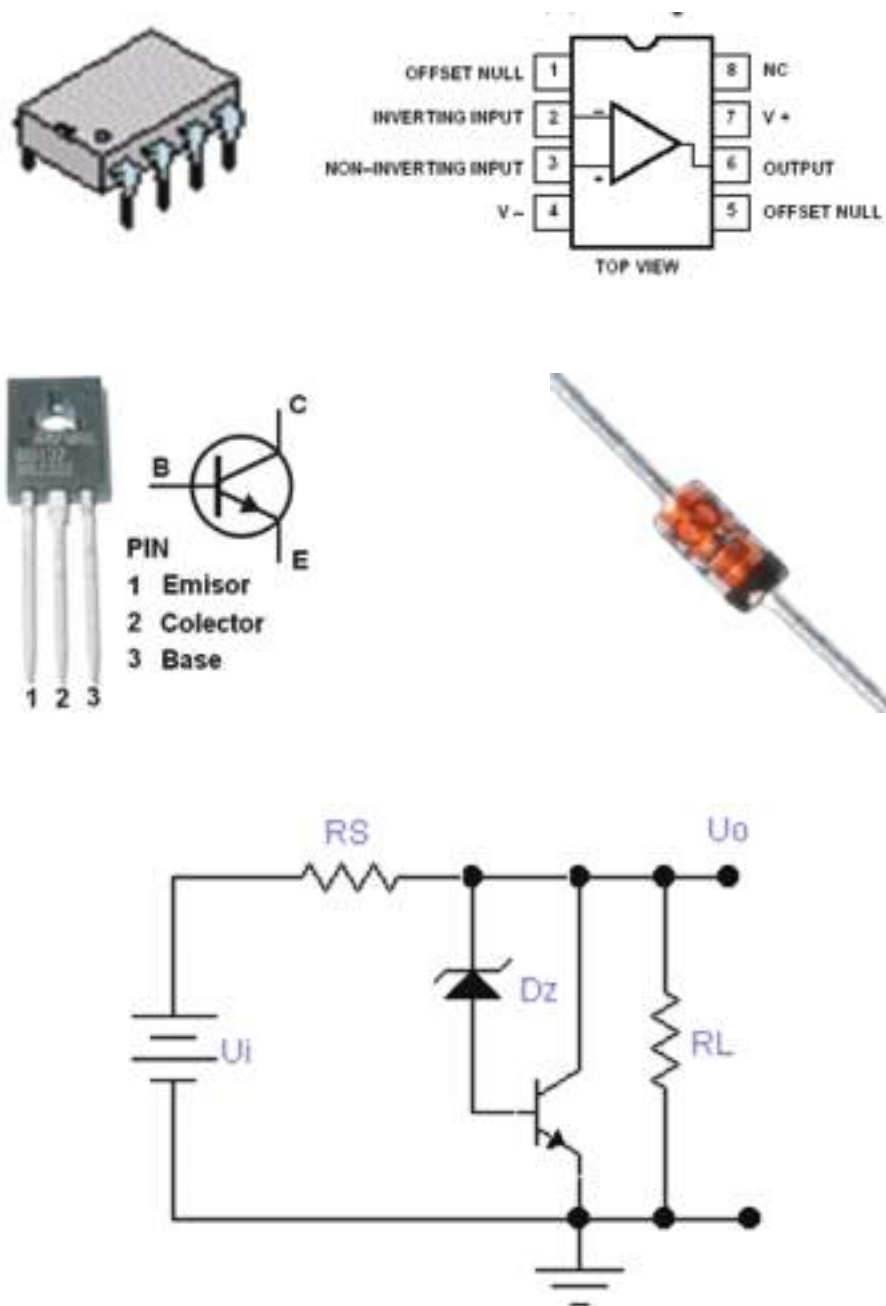


Figura 1



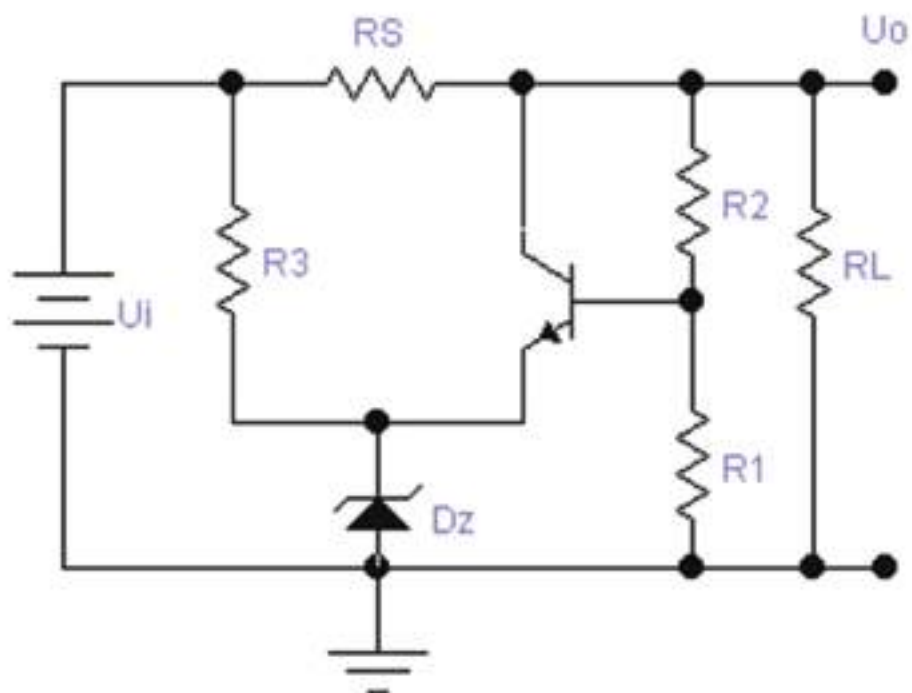


Figura 2

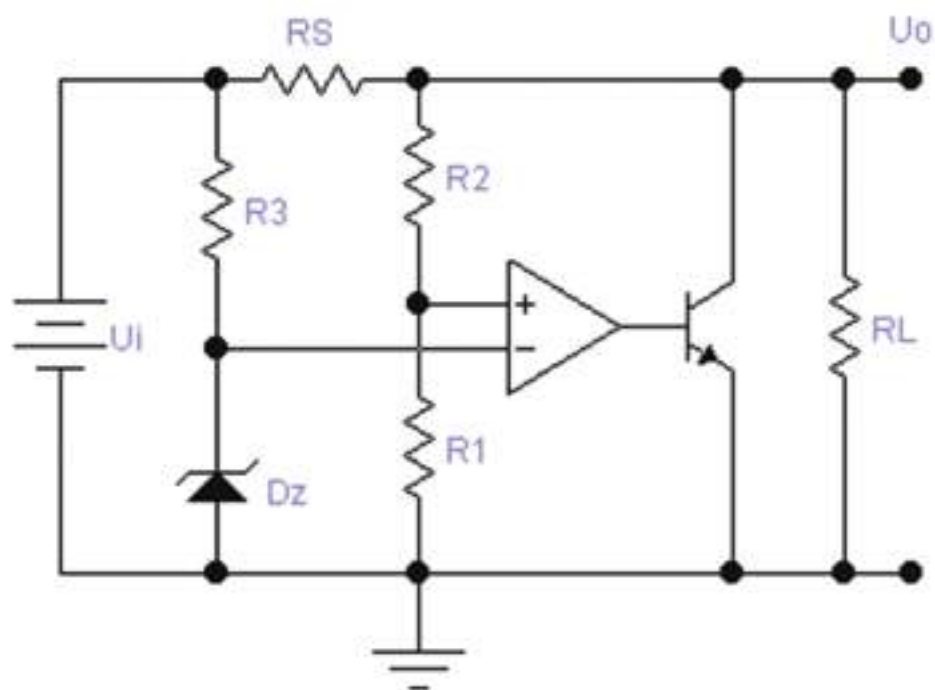


Figura 3



5 – PROCEDIMENTOS DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

- a. Montar o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 1), adotando $R_S = 220 \Omega$ e $R_L = 390 \Omega$;
- b. Ajustar U_i para o valor de 15 V;
- c. Medir a tensão U_o , registrando o valor no Quadro 1;
- d. Reduzir U_i para o valor de 12 V;
- e. Medir de novo a tensão U_o , registrando o valor no Quadro 1;
- f. Alterar R_L para o valor de 820 Ω ;
- g. Medir de novo a tensão U_o , registrando o valor no Quadro 1;
- h. Indicar as principais conclusões;
- i. Montar agora o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 2), adotando $U_i = 15$ V, $R_S = 100 \Omega$, $R_L = 390 \Omega$, $R_1 = 7,5$ K Ω , $R_2 = 2,5$ K Ω e $R_3 = 470 \Omega$;
- j. Medir a tensão U_o , registrando o valor no Quadro 1;
- k. Reduzir U_i para o valor de 12 V;
- l. Medir de novo a tensão U_o , registrando o valor no Quadro 1;
- m. Alterar R_L para o valor de 820 Ω ;
- n. Medir de novo a tensão U_o , registrando o valor no Quadro 1;
- o. Indicar as principais conclusões;
- p. Montar agora o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 3), adotando $U_i = 15$ V, $R_S = 220 \Omega$, $R_L = 390 \Omega$, $R_1 = 7,5$ K Ω , $R_2 = 2,5$ K Ω e $R_3 = 220 \Omega$;
- q. Medir a tensão U_o , registrando o valor no Quadro 1;
- r. Reduzir U_i para o valor de 12 V;
- s. Medir de novo a tensão U_o , registrando o valor no Quadro 1;
- t. Alterar R_L para o valor de 820 Ω ;
- u. Medir de novo a tensão U_o , registrando o valor no Quadro 1;
- v. Indicar as principais conclusões.

6 – QUADROS DE REGISTO DE VALORES

Alínea	c)	e)	g)	j)	l)	n)	q)	s)	u)
U_o (V)									

Quadro 1



7 – ELABORAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RELATÓRIO

Elaborar um relatório do trabalho, por grupo de trabalho, respeitando os seguintes parâmetros mínimos:

I – ESTRUTURA

- a) Cabeçalho:
- Nome da Escola
 - Nome da Disciplina
 - Número e nome do Módulo
 - Nome dos alunos, números, ano e turma
 - Identificação do trabalho
- b) Conteúdo (Mínimo):
- 1 – Objetivos
 - 2 – Recursos necessários
 - 3 – Procedimentos do trabalho
 - 4 – Dificuldades encontradas
 - 5 – Estratégia de resolução das dificuldades
 - 6 – Esquemas das montagens
 - 7 – Conclusões finais

II – MODO DE APRESENTAÇÃO

Em ficheiro informático, ou alternativamente em folhas A4, redigido à mão.

III – PRAZO DE ENTREGA

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.

20 – Trabalho Prático n.º 03 – Regulador de Tensão com Transístor em Série

1 – INTRODUÇÃO

A utilização do transístor em série com a carga é uma das formas de se conseguir a estabilização de tensão, desde que o díodo zéner seja capaz de controlar adequadamente o funcionamento daquele.



Nos circuitos que serão abordados neste trabalho (reguladores de tensão com transístor em série), a corrente da carga passa toda pelo coletor e pelo emissor do transístor, habitualmente um transístor de potência.

Nestes circuitos, a resistência de limitação da corrente do zéner (R_s) não é percorrida pela corrente da carga, pelo que a potência dissipada é habitualmente reduzida.

A eficiência ou rendimento deste tipo de estabilizadores é normalmente mais elevada do que a dos reguladores com um simples diodo zéner, ou do que a dos reguladores com transístor em paralelo com a carga.

2 – OBJETIVOS

Os objetivos para este trabalho são os seguintes:

- Ensaiai o estabilizador de tensão com diodo zéner e transístor em série com a carga.
- Ensaiai o estabilizador de tensão e amplificador, com diodo zéner e transístor em série com a carga.
- Ensaiai o estabilizador de tensão e amplificador, com circuito amplificador operacional, e com diodo zéner e transístor em série com a carga.

3 – MATERIAL NECESSÁRIO

- 1 Fonte de alimentação simétrica regulável (0 a ± 30 V);
- 2 Multímetros digitais;
- 1 Osciloscópio com dois canais (duas pontas de prova);
- 1 Placa de montagem eletrónica (“Breadboard”);
- Condutores;
- 1 Diodo retificador 1N4002;
- 1 Diodo zéner BZX55-C6V2 / 400 mW ($I_{zmin} = 5$ mA);
- 1 Circuito integrado, amplificador operacional $\mu A741$;
- 1 Transístor BD137;
- Resistências de 250 Ω , 470 Ω , 750 Ω , 1 K Ω , 1,2 K Ω , 4,2 K Ω , e 5,6 K Ω ;
- Ferramentas necessárias;
- Computador com acesso à internet;
- Manuais técnicos;



4 – ESQUEMA DE LIGAÇÕES DO CIRCUITO

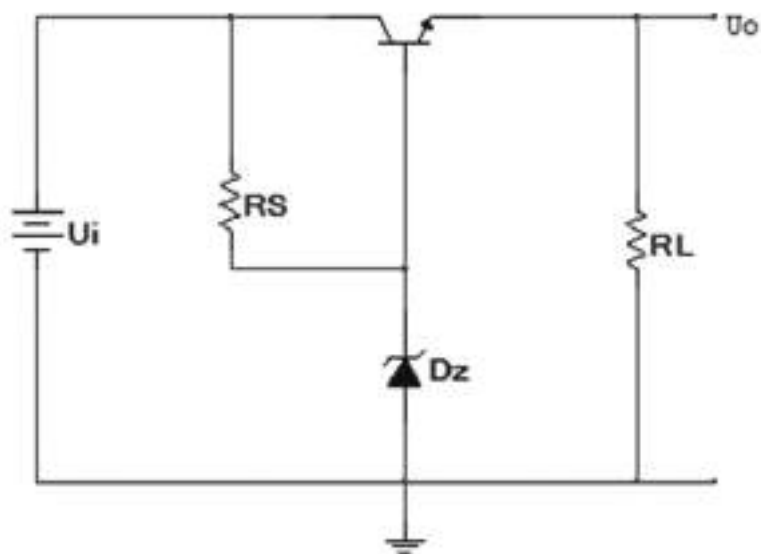
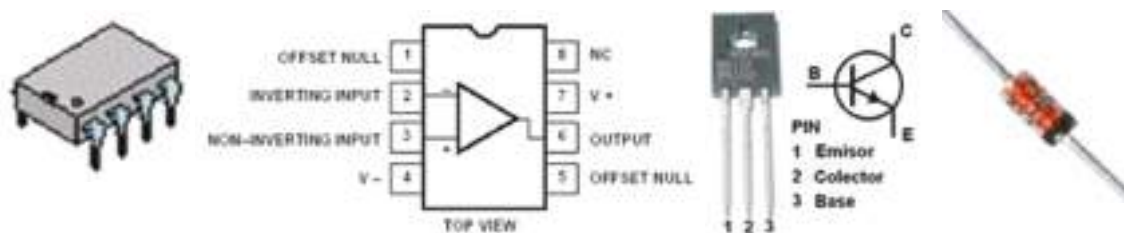


Figura 1

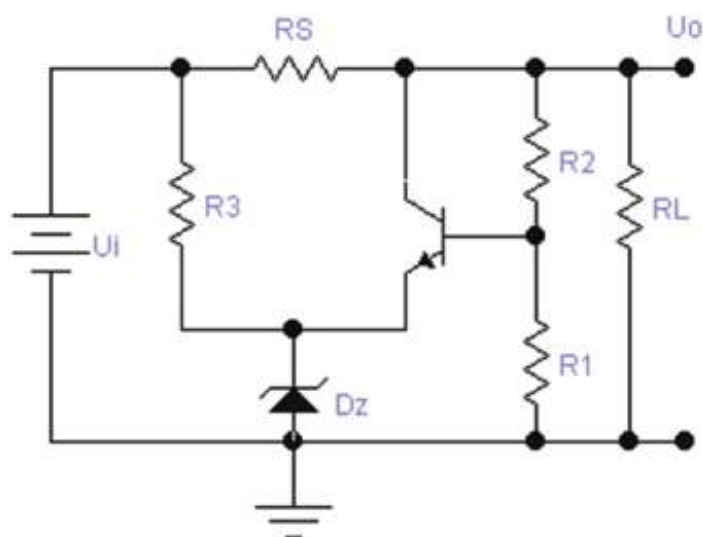


Figura 2



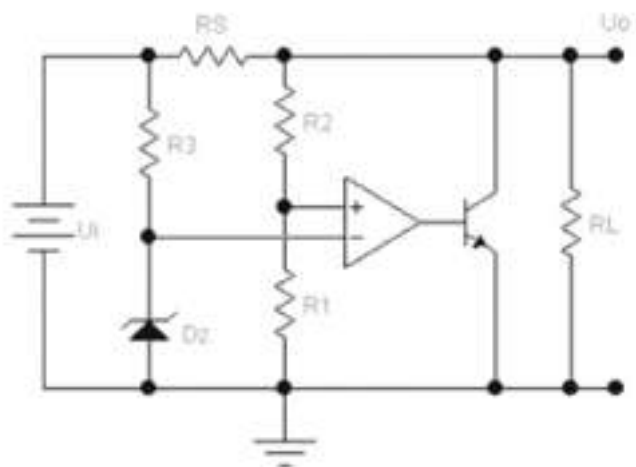


Figura 3

5 – PROCEDIMENTOS DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

- a. Montar o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 1), adotando $R_S = 750 \Omega$ e $R_L = 250 \Omega$;
- b. Ajustar U_i para o valor de 15 V;
- c. Medir a tensão U_o , registrando o valor no Quadro 1;
- d. Reduzir U_i para o valor de 12 V;
- e. Medir de novo a tensão U_o , registrando o valor no Quadro 1;
- f. Alterar R_L para o valor de 470 Ω ;
- g. Medir de novo a tensão U_o , registrando o valor no Quadro 1;
- h. Indicar as principais conclusões;
- i. Montar agora o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 2), adotando $U_i = 20$ V, $R_L = 250 \Omega$, $R_1 = 4,2$ K Ω , $R_2 = 4,2$ K Ω , $R_3 = 1,2$ K Ω e $R_4 = 1$ K Ω ;
- j. Medir a tensão U_o , registrando o valor no Quadro 1;
- k. Reduzir U_i para o valor de 17 V;
- l. Medir de novo a tensão U_o , registrando o valor no Quadro 1;
- m. Alterar R_L para o valor de 470 Ω ;
- n. Medir de novo a tensão U_o , registrando o valor no Quadro 1;
- o. Indicar as principais conclusões;
- p. Montar agora o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 3), adotando $U_i = 18$ V, $R_L = 470 \Omega$, $R_1 = 5,6$ K Ω , $R_2 = 4,2$ K Ω e $R_3 = 750 \Omega$;



- q. Medir a tensão U_o , registando o valor no Quadro 1;
- r. Reduzir U_i para o valor de 15 V;
- s. Medir de novo a tensão U_o , registando o valor no Quadro 1;
- t. Alterar R_L para o valor de 1 K Ω ;
- u. Medir de novo a tensão U_o , registando o valor no Quadro 1;
- v. Indicar as principais conclusões.

6 – QUADROS DE REGISTO DE VALORES

Alínea	c)	e)	g)	j)	l)	n)	q)	s	u
U_o (V)									

Quadro 1

7 – ELABORAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RELATÓRIO

Elaborar um relatório do trabalho, por grupo de trabalho, respeitando os seguintes parâmetros mínimos:

I – ESTRUTURA

- a) Cabeçalho:
 - Nome da Escola
 - Nome da Disciplina
 - Número e nome do Módulo
 - Nome dos alunos, números, ano e turma
 - Identificação do trabalho
- b) Conteúdo (Mínimo):
 - 1 – Objetivos
 - 2 – Recursos necessários
 - 3 – Procedimentos do trabalho
 - 4 – Dificuldades encontradas
 - 5 – Estratégia de resolução das dificuldades
 - 6 – Esquemas das montagens
 - 7 – Conclusões finais

II – MODO DE APRESENTAÇÃO

Em ficheiro informático, ou alternativamente em folhas A4, redigido à mão.



III – PRAZO DE ENTREGA

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.

21 – Trabalho Prático n.º 04 – Regulador de Tensão Integrado

1 – INTRODUÇÃO

Com a realização deste trabalho, pretende-se testar o funcionamento de reguladores de tensão integrados, com saída fixa e com saída variável.

Estes reguladores (lineares) são fabricados em tecnologia de circuito integrado, existindo em encapsulamentos de três pinos (TO-92 e TO-220), em encapsulamentos de oito pinos (SO-8), e em tecnologia de montagem superficial (SMD), sendo constituídos por várias dezenas de componentes, como sejam, resistências, condensadores, díodos, ou transístores.

De entre as suas vantagens, destaca-se o facto de serem muito resistentes, pois são protegidos internamente contra sobrecargas e curto-circuitos, podendo ser apenas destruídos por aplicação de tensões de entrada com polaridades trocadas.

São também muito compactos, ocupando espaço diminuto, têm baixo custo, e a sua montagem executa-se com facilidade.

Existem reguladores de tensão integrados com saída fixa e com saída variável (ajustável).

2 – OBJETIVOS

Os objetivos para este trabalho são os seguintes:

- a) Ensaïar um circuito regulador de tensão integrado, com saída fixa.
- b) Ensaïar um circuito regulador de tensão integrado, com saída variável.

3 – MATERIAL NECESSÁRIO

- 1 Fonte de alimentação simétrica regulável (0 a ± 30 V);
- 2 Multímetros digitais;
- 1 Osciloscópio com dois canais (duas pontas de prova);
- 1 Placa de montagem eletrónica (“Breadboard”);
- Condutores;



- 1 Regulador integrado LM78L15;
- 1 Regulador integrado LM317;
- 3 Resistências $R_L = 1\text{ K}\Omega$, $R_1 = 10\text{ K}\Omega$, $R_2 = 240\ \Omega$;
- 4 Condensadores $C_1 = 0,33\ \mu\text{F}$, $C_2 = 0,01\ \mu\text{F}$, $C_3 = 0,1\ \mu\text{F}$, $C_4 = 1\ \mu\text{F}$;
- 1 Potenciômetro linear $P_1 = 5\text{ K}\Omega$;
- Ferramentas necessárias;
- Computador com acesso à internet;
- Manuais técnicos;

4 – ESQUEMA DE LIGAÇÕES DO CIRCUITO

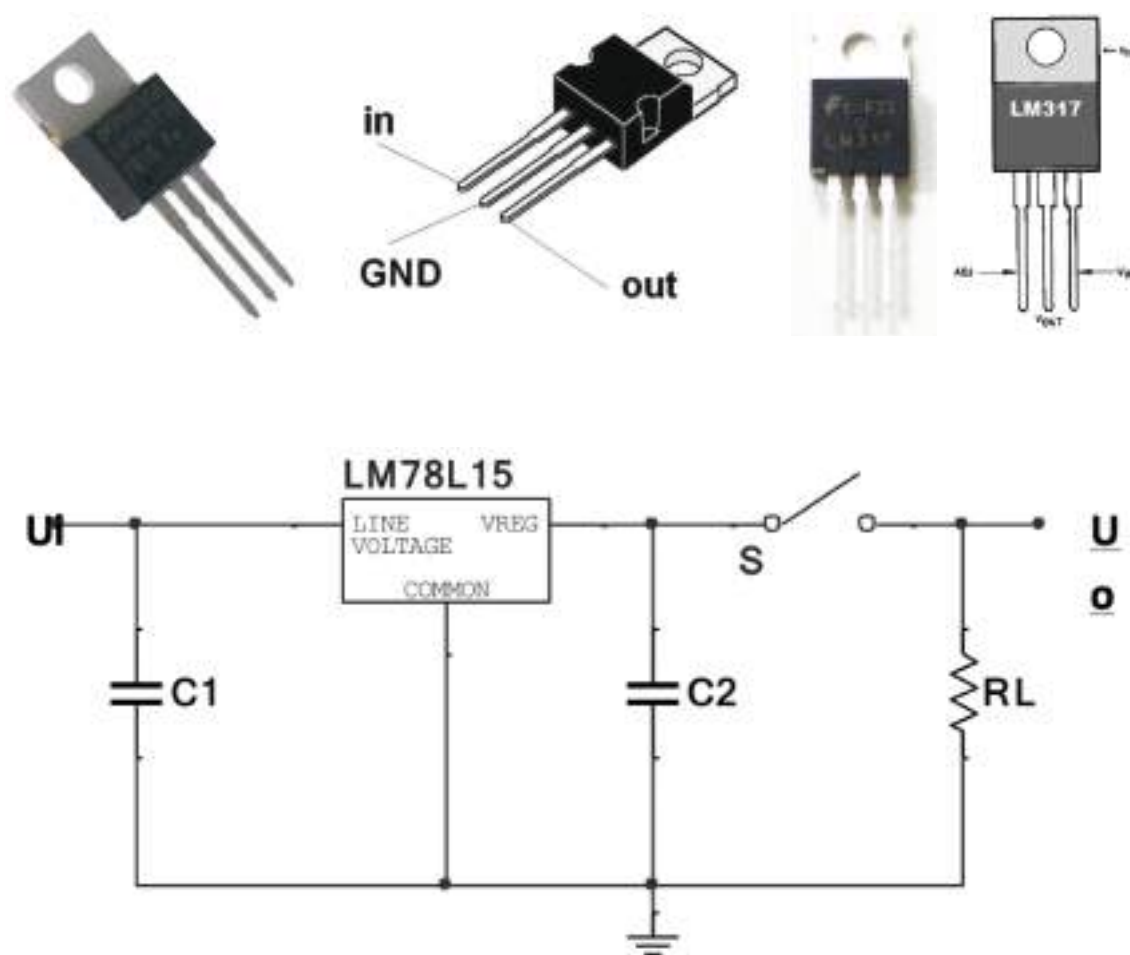


Figura 1



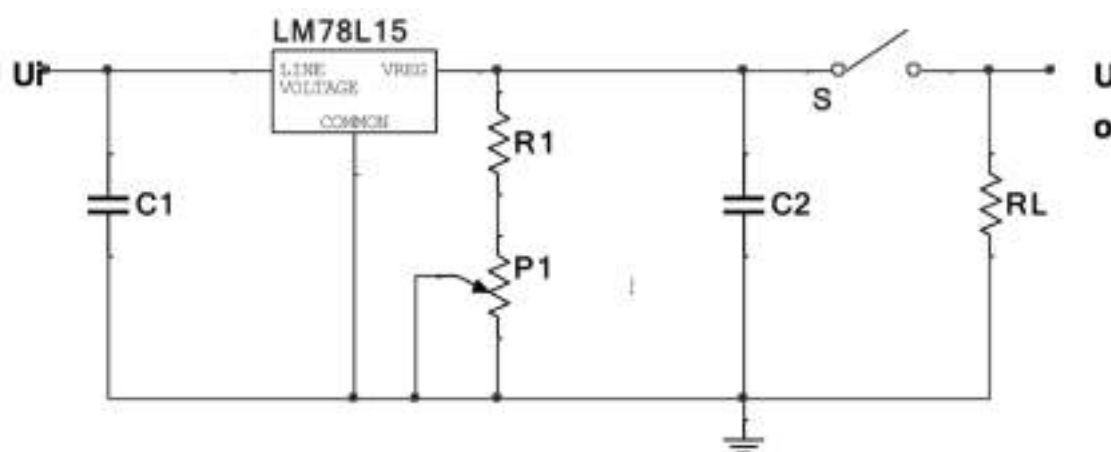


Figura 2

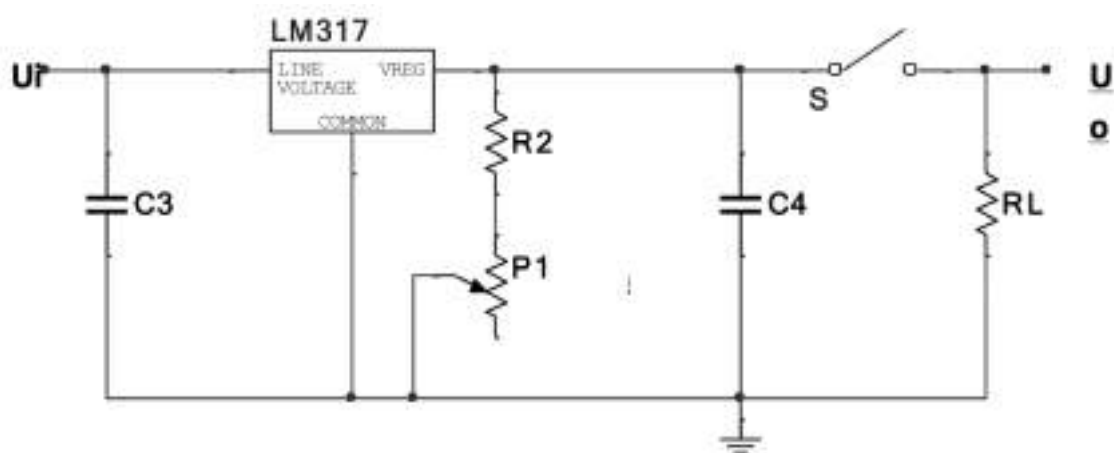


Figura 3

5 – PROCEDIMENTOS DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

- Montar o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 1);
- Ajustar U_i para o valor de 18 V;
- Medir a tensão U_o , em vazio (R_L desligado), registrando o valor no Quadro 1;
- Medir a tensão U_o , em carga (R_L ligado), registrando o valor no Quadro 1;
- Alterar o valor de U_i para 24 V;
- Medir de novo a tensão U_o (em carga), registrando o valor no Quadro 1;
- Indicar as principais conclusões;
- Montar o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 2);
- Ajustar U_i para o valor de 20 V, com a totalidade da resistência do potenciômetro inserida no circuito;



- j. Medir a tensão U_o , em carga, registando o valor no Quadro 1;
- k. Variar P_1 até se obter $U_o = 17\text{ V}$;
- l. Medir o valor de P_1 , regulado, registando o valor no Quadro 1;
- m. Alterar o valor de U_i para 24 V;
- n. Medir de novo a tensão U_o (em carga), registando o valor no Quadro 1;
- o. Indicar as principais conclusões;
- p. Montar o circuito de acordo com o esquema de ligações (Figura 3);
- q. Ajustar U_i para o valor de 20 V, com a totalidade da resistência do potenciómetro inserida no circuito;
- r. Medir a tensão U_o , em vazio, registando o valor no Quadro 1;
- s. Medir a tensão U_o , em carga, registando o valor no Quadro 1;
- t. Variar P_1 até se obter $U_o = 17\text{ V}$, em carga;
- u. Medir o valor de P_1 , regulado, registando o valor no Quadro 1;
- v. Ajustar U_i para o valor de 24 V;
- w. Medir a tensão U_o , em vazio, registando o valor no Quadro 1;
- x. Medir a tensão U_o , em carga, registando o valor no Quadro 1;
- y. Indicar as principais conclusões.

6 – QUADROS DE REGISTO DE VALORES

Alínea	c)	d)	f)	j)	l)	n)	r)	s)	u)	w)	x)
U_o (V)					---				---		
P_1 (Ω)	---	---	---	---		---	---	---		---	---

Quadro 1

7 – ELABORAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE RELATÓRIO

Elaborar um relatório do trabalho, por grupo de trabalho, respeitando os seguintes parâmetros mínimos:

I – ESTRUTURA

- a) Cabeçalho:
 - Nome da Escola
 - Nome da Disciplina
 - Número e nome do Módulo



Nome dos alunos, números, ano e turma

Identificação do trabalho

- b) Conteúdo (Mínimo):
- 1 – Objetivos
 - 2 – Recursos necessários
 - 3 – Procedimentos do trabalho
 - 4 – Dificuldades encontradas
 - 5 – Estratégia de resolução das dificuldades
 - 6 – Esquemas das montagens
 - 7 – Conclusões finais

II – MODO DE APRESENTAÇÃO

Em ficheiro informático, ou alternativamente em folhas A4, redigido à mão.

III – PRAZO DE ENTREGA

A determinar pelo professor, em função dos meios disponíveis e restantes condicionantes.



3. Fontes de alimentação comutadas

Para concluir o estudo sobre as fontes de alimentação, vamos agora fazer uma breve abordagem às fontes de alimentação comutadas.

3.1. Introdução

Entende-se por fonte de alimentação comutada ou SMPS (“Switched-Mode Power Supply”), uma fonte de alimentação que tem incorporado um regulador comutado, o qual comuta a corrente, ligando e desligando rapidamente (com frequência superior a 20 KHz), de forma a disponibilizar na saída uma tensão estabilizada.

As fontes de alimentação comutadas, são basicamente constituídas por quatro blocos, retificação, filtragem, conversão e regulação (ver figura seguinte).

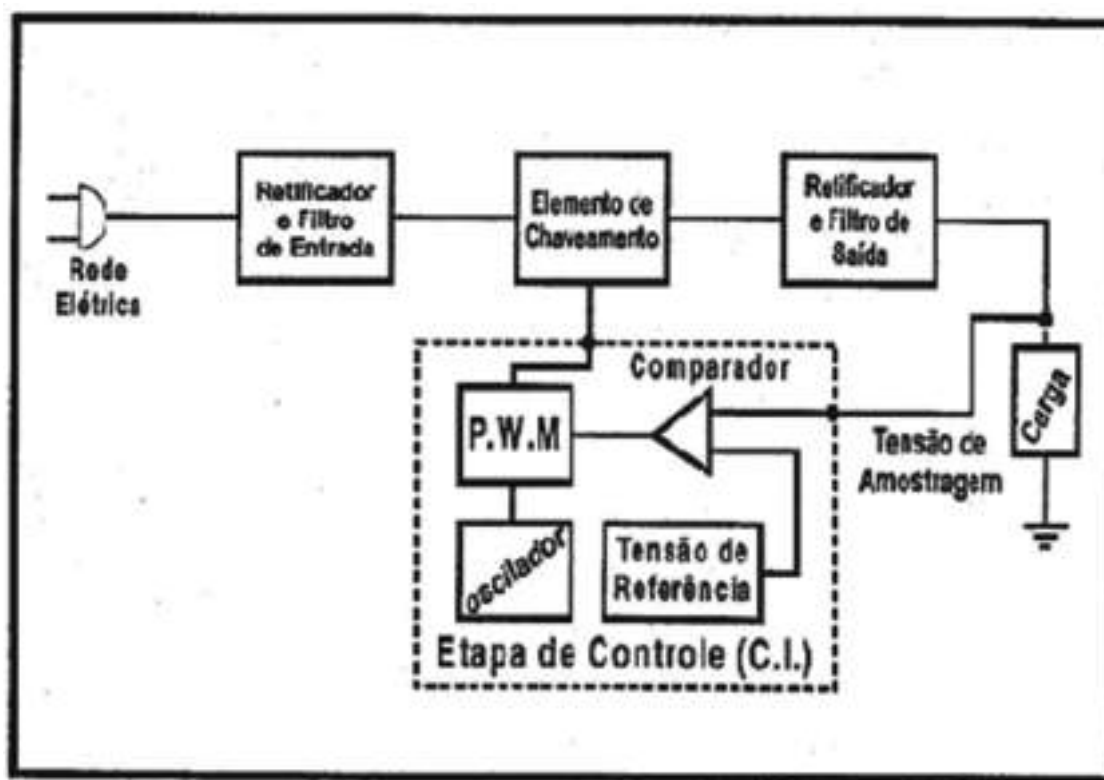


Ilustração 3-1 – Constituição de uma SMPS

O bloco conversor pode ser classificado quanto à forma de onda das tensões de entrada e de saída, do modo que a seguir se indica.



- a) Retificadores – Entrada AC e saída DC;
- b) Conversores de tensão – Entrada DC e saída DC;
- c) Conversores de frequência – Entrada AC e saída AC;
- d) Inversores – Entrada DC e saída AC.

Para as fontes abordadas neste manual, interessam os conversores para DC, e no caso particular das fontes comutadas, os conversores DC/DC.

3.2. Comutação e ciclo de trabalho

O funcionamento dos conversores baseia-se na sequência de rápidas ações de ligar e desligar (frequência elevada).

Estes circuitos contêm transístores ou SCR que permitem obter na saída que pode ser menor, igual, ou maior do que a tensão de entrada.

Este processo de comutação rápida permite obter fontes de alimentação com elevada eficiência, atingindo valores superiores a 85%.

Para melhor compreensão do sistema de comutação, consideremos o circuito representado na figura seguinte, em que uma carga R_L é alimentada por uma fonte de tensão de corrente contínua, comandada por um comutador K.

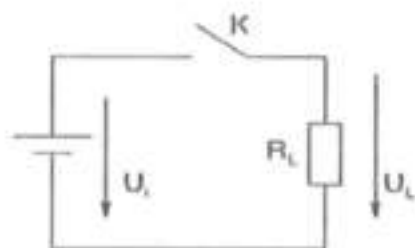


Ilustração 3-2 – Ciclo de trabalho (circuito)

Quando o interruptor K estiver ligado, a tensão que se encontra na saída é igual à tensão de entrada.

Quando o interruptor K estiver fechado, a saída tem o valor nulo.

Se fecharmos e abrirmos esse interruptor com uma dada frequência, aplicaremos à carga, não uma tensão igual à tensão de entrada, mas antes uma tensão média definida pela expressão indicada a seguir (ver também a figura seguinte).



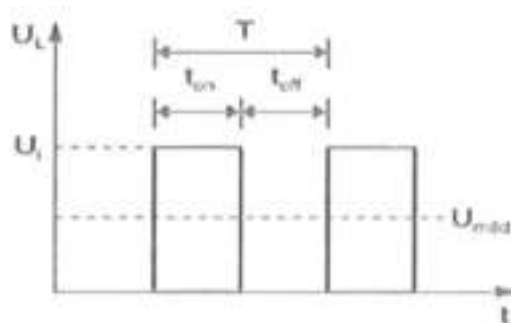


Ilustração 3-3 – Ciclo de trabalho (formas de onda)

$$U_{\text{med}} = \frac{t_{\text{on}}}{T} \times U_i$$

Na expressão anterior, temos:

- Intervalo de tempo em que K está ligado (t_{on});
- Intervalo de tempo em que K está desligado (t_{off});
- Período de operação ($T = t_{\text{on}} + t_{\text{off}}$);
- Frequência de operação ($f = 1 / T$).

O ciclo de trabalho (“Duty cycle”), define-se como o quociente entre o tempo t_{on} de duração do impulso positivo e o período T de um ciclo completo, em que $T = t_{\text{on}} + t_{\text{off}}$.

$$C_t = \frac{t_{\text{on}}}{T}$$

O ciclo de trabalho expressa-se em valor adimensional, entre 0 e 1 (ou entre 0 e 100%).

3.3. Tipos de conversores de corrente contínua

Os conversores de corrente contínua utilizados em fontes comutadas, recorrem a diferentes tipos de tecnologia, conforme indicado seguidamente.

- a) Conversor redutor (“Buck” ou “Step Down”) – A tensão de saída é menor do que a tensão de entrada;
- b) Conversor elevador (“Boost” ou “Step Up”) – A tensão de saída é maior do que a tensão de entrada;



c) Conversor redutor-elevador (“Buck-Boost”) – A tensão de saída pode ser maior ou menor do que a tensão de entrada;

d) Conversor “Fly-Back” – A tensão de saída pode ser maior ou menor do que a tensão de entrada; utiliza um transformador para alimentar a carga, sendo o primário alimentado em corrente retificada;

e) Conversor “Push-Pull” – A tensão de saída pode ser maior ou menor do que a tensão de entrada; utiliza um transformador para alimentar a carga, sendo o primário alimentado nos dois sentidos;

Abordaremos de modo breve os circuitos de cada um destes conversores.

Na figura seguinte apresenta-se o circuito de um conversor redutor (“Buck” ou “Step Down”).

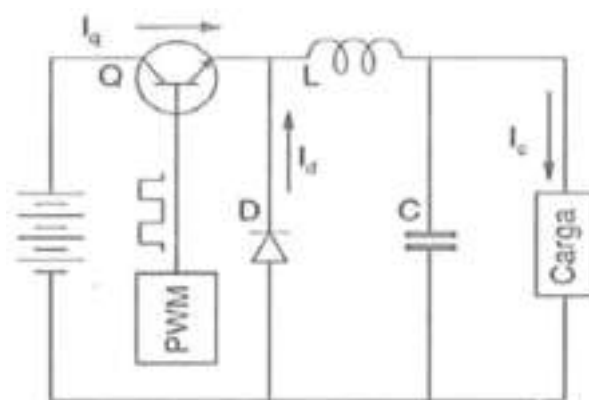


Ilustração 3-4 – Conversor redutor

O valor da tensão de saída, vem dado pela expressão representada a seguir, em que será $t_{off} < (2xL/R_L)$.

$$U_o = U_i \times C_t$$

Na figura seguinte apresenta-se o circuito de um conversor elevador (“Boost” ou “Step Up”).

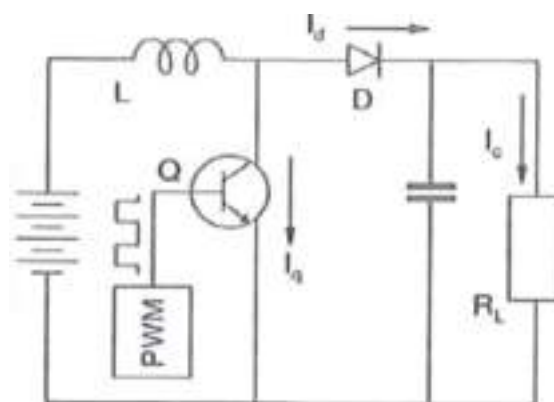


Ilustração 3-5 – Conversor elevador



O valor da tensão de saída, vem dado pela expressão representada a seguir, em que será

$$L > [(R_L \times t_{on})/2] \times (1-C_t)^2.$$

$$U_o = U_i \times \frac{1}{1-C_t}$$

Na figura seguinte apresenta-se o circuito de um conversor redutor-elevador (“Buck-Boost”).

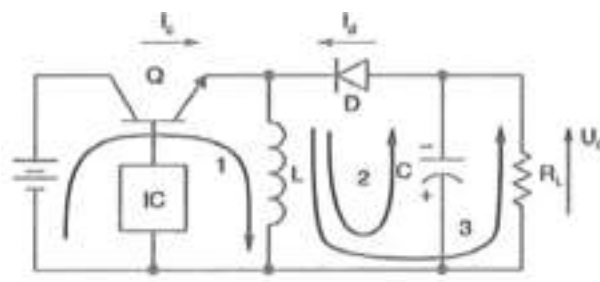


Ilustração 3-6 – Conversor redutor-elevador

O valor da tensão de saída, vem dado pela expressão representada a seguir, em que será

$$L > [R_L \times C_t \times (1-C_t)^2]/(2 \times f).$$

$$U_o = U_i \times \frac{C_t}{1-C_t}$$

Na figura seguinte apresenta-se o circuito de um conversor “Fly-back”.

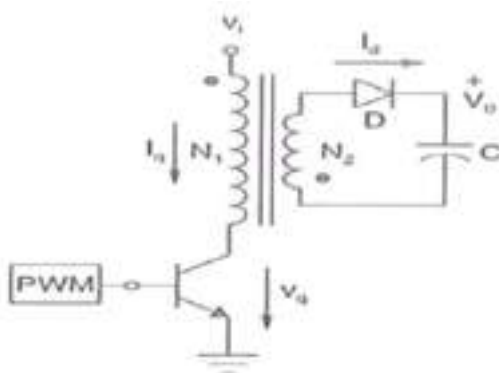


Ilustração 3-7 – Conversor “Fly-Back”

O valor da tensão de saída, vem dado pela expressão representada a seguir, em que será N_1 o número de espiras do enrolamento primário do transformador e N_2 o número de espiras do enrolamento secundário.



$$U_0 = U_i \times \left(\frac{t_{on}}{T - t_{on}} \times \frac{N_2}{N_1} \right)$$

Na figura seguinte apresenta-se o circuito de um conversor “Push-Pull”.

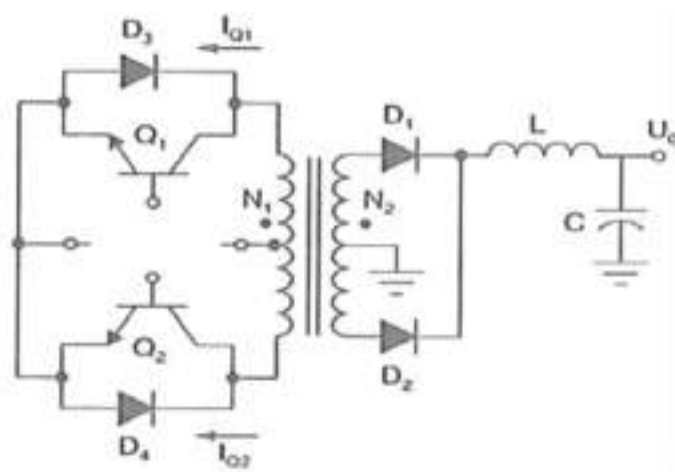


Ilustração 3-8 – Conversor “Push-Pull”

O valor da tensão de saída, vem dado pela expressão representada a seguir, em que será N_1 o número de espiras do enrolamento primário do transformador e N_2 o número de espiras do enrolamento secundário.

$$U_0 = U_i \times \left(2 \times \frac{t_{on}}{T} \times \frac{N_2}{N_1} \right)$$

Na figura seguinte representa-se uma versão do conversor “Push-Pull” com a alimentação das bases dos transístores efetuadas por um oscilador de relaxação.

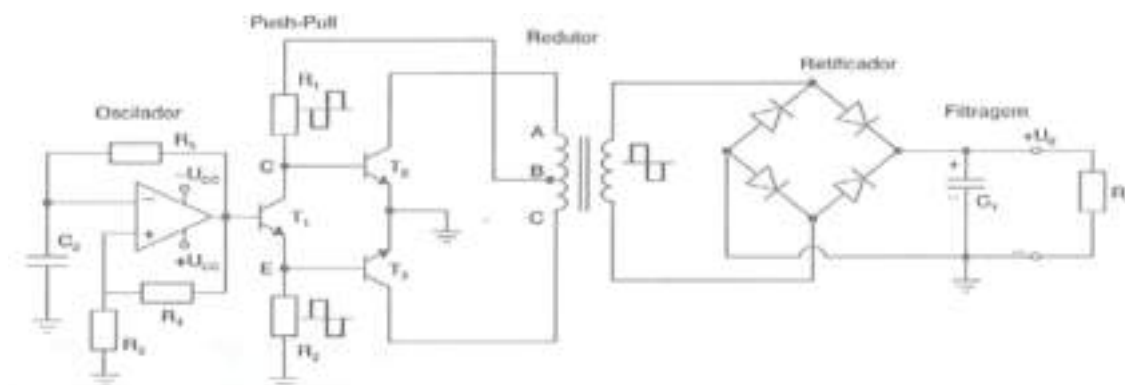


Ilustração 3-9 – Conversor “Push-Pull” com oscilador de relaxação



3.4. Constituição de uma fonte de alimentação comutada

Uma fonte de alimentação comutada deverá ser genericamente constituída por um filtro de RF, um retificador, um conversor e um regulador de tensão.

Na figura seguinte apresenta-se uma fonte de alimentação comutada, baseada num conversor “Fly-Back”.

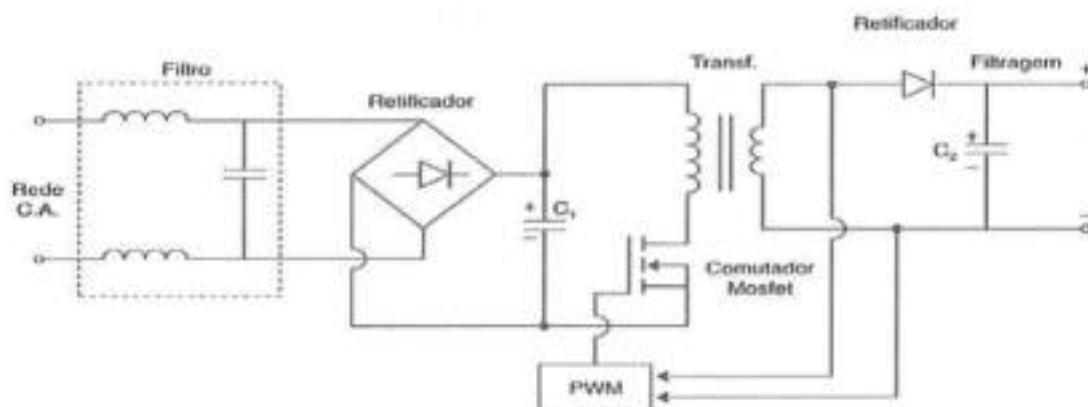


Ilustração 3-10 – Fonte de alimentação comutada

3.5. Comparação entre fontes de alimentação lineares e fontes de alimentação comutadas

Para finalizar o estudo relativo às fontes de alimentação, apresenta-se uma tabela comparativa das características das fontes lineares e das fontes comutadas.

TABELA DE CARATERÍSTICAS DE ALGUNS REGULADORES		
	Fontes lineares	Fontes comutadas
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Reduzida produção de interferências eletromagnéticas (EMI); - Fácil manutenção; - Funciona normalmente na ausência de cargas ou com pequenas cargas; - Elevado isolamento elétrico; - Fácil construção; - “Ripple” baixo (0,5 mV a 2 mV); - Boa regulação de rede (0,02% a 0,05%) e de carga (0,02% a 0,1%). 	<ul style="list-style-type: none"> - Pequeno tamanho e peso em relação à potência fornecida; - Elevada eficiência (60% a 90%); - Sistema de proteção muito rápido.



Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Grande peso e dimensões em relação à potência fornecida; - Baixa eficiência (40% a 60%) - Alto custo, principalmente dos transformadores e dos condensadores; - Grande dissipação de calor para elevadas potências; - Geração de campos magnéticos fortes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada produção de interferências eletromagnéticas (EMI), impondo a ligação de filtros na entrada; - Maior dificuldade de projeto e da montagem; - Necessidade de construir transformadores ajustados a cada caso; - Maior sensibilidade às variações de carga; - Manutenção mais difícil; - “Ripple” mais elevado (10 mV a 100 mV); - Pior regulação de rede (0,05% a 0,1%) e de carga (0,1% a 1%).
--------------	--	---

Ilustração 3-11 – Tabela comparativa de características das fontes lineares e comutadas

3.6. Atividades propostas

QUESTÕES DE REVISÃO:

01 – O que se entende por fonte de alimentação comutada?

02 – Quais os blocos que devem constituir uma fonte de alimentação comutada básica?

03 – Como se podem classificar os blocos conversores quanto à forma de onda das tensões de entrada e de saída?

04 – O que se entende por ciclo de trabalho?

05 – Quais os tipos de conversores de corrente contínua utilizados em fontes comutadas?



4. Bibliografia

ANGULO, J. M., Enciclopédia de Electrónica Moderna, Vol. 3. Madrid. Editorial Paraninfo.

(s.d.).

CARLOS, Ângulo e outros, Teoria e Prática de Electrónica. McGrawHill. (Makron Books).

(s.d.).

MALVINO, Electrónica, Vol. 2. McGrawHill. (s.d.).

