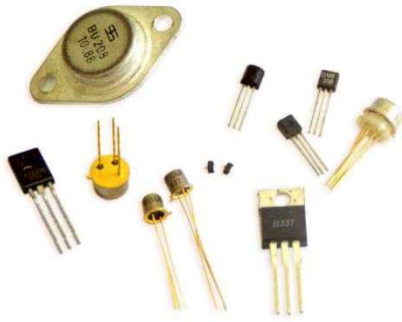


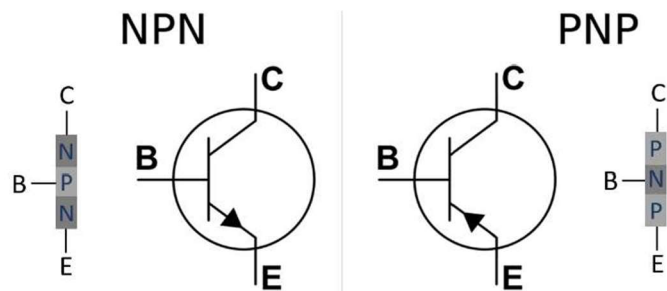
Transistores



Os transistores são considerados, sem dúvida, como os mais importantes componentes eletrônicos de todos os tempos, sendo um dos grandes responsáveis por impulsionar a tecnologia que hoje nos cerca. A sua flexibilidade, variedade de montagens e possibilidades de aplicação, o tornam um componente bem difícil de ser dominado e conhecido dentro de todo seu potencial.

Nesta disciplina, nosso objetivo é entender o funcionamento geral do tipo mais comum (e mais utilizado) de transistor (chamado de NPN) e aprender a utilizá-lo como uma chave eletrônica, dimensionando nosso circuito para isso. Além disso, outros dois transistores especiais (chamados de reguladores de tensão) serão vistos, também pensando em sua aplicação prática em nossos circuitos. Para isso, começamos com os conceitos mais gerais sobre o seu funcionamento, aprofundando somente naquilo que nos é útil.

Basicamente, um transistor é a associação de junções PN. O tipo mais comum de transistor (que recebe o nome de BJT, ou Bipolar Junction Transistor), associa duas dessas junções, unindo seus lados iguais. Quando a união se dá



pelos seus lados P, temos um transistor NPN; ao contrário, quando a união se dá pelos seus lados N, temos um transistor PNP. O lado unido (central à montagem) é chamado de Base e os outros 2 lados iguais são chamados de Coletor e Emissor.

Na prática, este tipo de transistor funciona de forma similar à associação de dois diodos, possibilitando a criação de duas áreas de depleção entre o emissor e o coletor, ligados a uma fonte. Quando uma corrente é aplicada à base (entrando por ela no tipo NPN ou saindo por ela no tipo PNP), é provocada uma diminuição na área de depleção. Pelas características dos seus materiais, essa diminuição já permite que uma corrente flua entre os elementos iguais (do coletor para o emissor em transistores NPN e do emissor para o coletor em transistores PNP). Quando maior a corrente da Base, maior é a “abertura” (como uma válvula de água) para a passagem da corrente entre coletor e emissor. Deste modo, os transistores do tipo BJT, podem estar em 3 estados distintos:

- **Estado de corte:** o estado de corte ocorre quando não existe corrente na Base (ou existe e esta é insuficiente). Deste modo, a passagem da corrente entre emissor e condutor está interrompida.

- **Estado de saturação:** o estado de saturação ocorre quando a corrente da Base atinge um valor determinado que “abre” totalmente a passagem da corrente entre emissor e condutor.
- **Estado ativo:** o estado ativo ocorre quando na base existe uma corrente nem tão baixa para o estado de corte e nem tão alta para o estado de saturação, permitindo uma passagem apenas parcial da corrente entre emissor e condutor.

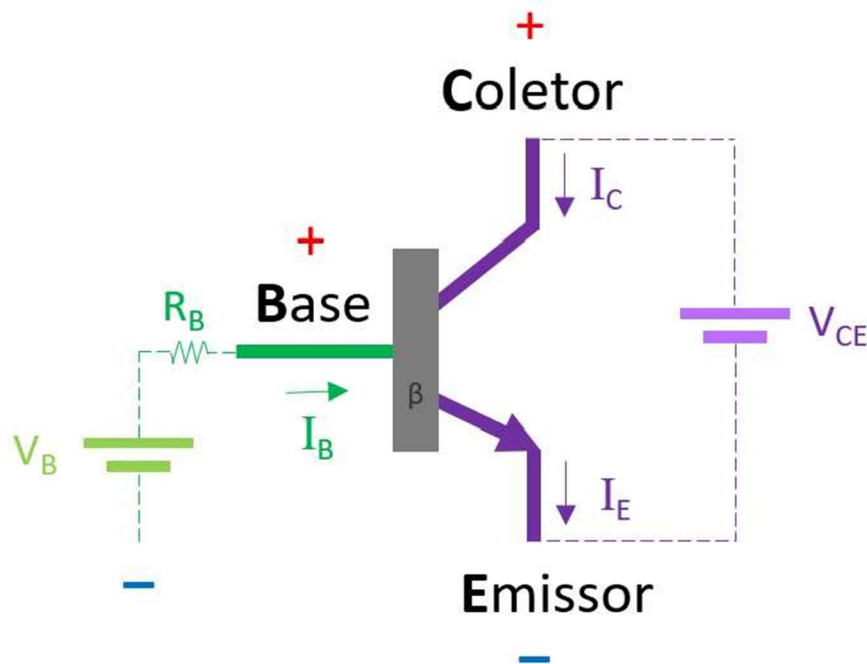
Para melhor compreensão, podemos usar uma analogia desenvolvida pela Sparkfun (www.sparkfun.com), relacionando-o com uma válvula de água. Esta válvula (base), para abrir ou fechar, deve receber uma força (no caso do transistor uma corrente) e de acordo com sua abertura controla o fluxo da água que passará por ela, percorrendo o cano:



Os transistores têm outra característica importante que os tornam ainda mais únicos e interessantes: o HFE (também conhecido como “ganho” e representado pelo símbolo β). Ele funciona como um multiplicador, fazendo com que uma pequena corrente na base gere a liberação de uma grande corrente no coletor, amplificando o sinal. É como se, mantendo a analogia com a válvula de água, a mesma fosse ligada a um sistema de esforço hidráulico que permitisse girá-la aplicando uma força mínima para isso, muito menor do que em uma válvula de água comum.

Esquematização de um transistor NPN

Para facilitar nossa exemplificação, iremos nos ater ao tipo NPN (mais comum e de mais fácil entendimento), e transformar essas observações iniciais e alguns outros conceitos importantes em um esquema que facilite a compreensão do seu funcionamento real em um circuito eletrônico:



- À esquerda do transistor, temos um circuito ligado a ele através da Base (por onde entrará a corrente de controle que ajustará a corrente permitida do lado direito entre o Coletor e o Emissor);
- Entre a fonte de tensão deste circuito de controle e a Base do transistor temos um resistor R_B que é utilizado para regular a corrente de entrada da Base. Se sabemos a tensão da fonte do circuito de controle (V_B), ajustamos a resistência para gerar a corrente de entrada desejada.
- Para o cálculo do valor do resistor que nos entregará a corrente de base desejada, podemos utilizar a Primeira Lei de Ohm, $I = U / R$. Porém, o transistor se comporta como um diodo e alimentação da base vai consumir parte desta tensão (algo em torno de 0,3 V e 0,8 V). Esse valor, chamado de V_{BE} , varia para cada transistor e é informado nas especificações do modelo. Assim, a tensão que consideramos para qualquer cálculo desejado deste lado do circuito de controle deve descontar esse valor. A partir de todas essas informações, temos que, $I_B = (V_B - V_{BE}) / R_B$.
- O transistor possui um ganho (β) e, deste modo, a corrente de entrada da Base será amplificada (multiplicada) por ele, liberando uma corrente muito mais forte no Emissor (I_E) e, indiretamente, no coletor (I_C) que tentará acompanhá-la.
- Com isso, a corrente no emissor (I_E) será a soma da corrente recebida do coletor (I_C) com a corrente recebida da base (I_B), já amplificada. Desse modo, podemos dizer que $I_E = I_C + (I_B \cdot \beta)$. Como a corrente do coletor (I_C) será drenada para acompanhar a corrente que está fluindo pelo Emissor (I_E), acaba sendo muito próxima a ela até o estado de saturação. Com isso, podemos substituí-la na fórmula original e teremos que $I_E = I_B + (I_B \cdot \beta)$.

- Já a corrente da Base (I_B) deve ser dimensionada para, após sua amplificação, gerar no emissor uma corrente suficiente para induzir no Coletor o que ele necessita para os componentes que estiver alimentando (se a corrente na base aumenta, a corrente no coletor aumenta para acompanhá-la). Deste modo, se sabemos a corrente total que precisamos no coletor, podemos calcular a corrente que devemos aplicar na Base para induzir essa liberação. Assim, temos que $I_B = I_C / \beta$
- O que será alimentado pela corrente entre coletor e emissor, deverá ser posicionado entre o terminal do coletor e o positivo da fonte do circuito principal. Essa corrente que passa pelo Coletor (I_C) virá da fonte e atravessará esses componentes neste caminho.
- A corrente da Base (I_B), entra no circuito principal e se soma à corrente do emissor pois tem que fluir para algum lugar. Caso ela seja muito alta e gere uma corrente no emissor superior à corrente máxima que o coletor pode fornecer, dizemos que o transistor está saturado (ou seja, a corrente máxima que pode estar sendo fornecida pelo coletor, está sendo). Neste momento, o equilíbrio típico do estado ativo deixa de existir.
- Se a corrente gerada no coletor for maior do que aquela suportada pelos componentes alimentados por ele, poderá haver dano a estes componentes. Desde modo, geralmente utilizamos um resistor para limitar a corrente no coletor, mantendo um nível controlado mesmo quando a corrente da base for alta e liberar uma grande passagem ao fluxo.
- Como temos a corrente suportada pelos componentes posicionados entre o coletor e a fonte de tensão do circuito principal e sabemos a tensão nesta fonte (V_C), podemos calcular o valor do resistor necessário para garantir essa corrente máxima desejada. Porém, assim como no cálculo do resistor da base, devemos considerar que parte da tensão da fonte será consumida pelo transistor quando entrar no coletor. Deste modo, para qualquer cálculo no circuito principal, devemos desconsiderar esta perda, chamada de V_{CE} (e também informada nas especificações do transistor). Assim, $I_C = (V_C - V_{BC}) / R_C$.

Apoiados nestas informações e em posse das fórmulas apresentadas, já temos condições de dimensionar um circuito que utilize o transistor como uma chave disparadora que, através da base, induza entre o coletor e o emissor exatamente a corrente necessária para alimentar os componentes desejados.

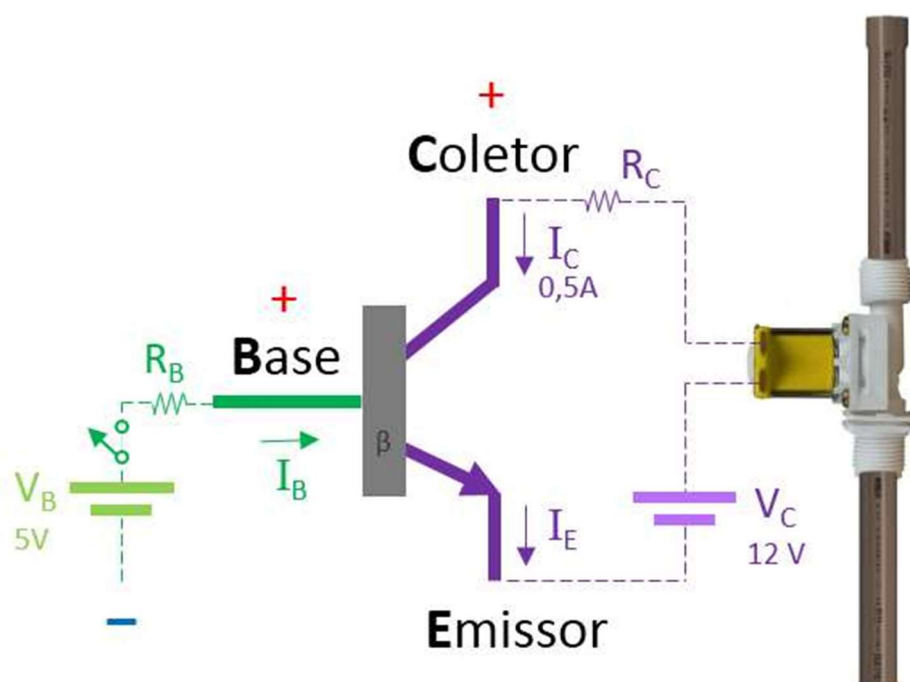
Exemplo de circuito com transistor como chave de disparo

Um pequeno produtor rural resolveu desenvolver um sistema de rega que pudesse ser acionado à distância através de um botão. Para isso, possui uma válvula de água solenoide, alimentada por 9V e que ao ser acionada para liberar a passagem da água, necessita de uma corrente máxima de até 0,5 A. Sabendo que o produtor possui apenas duas fontes de tensão (uma de 12V e outra de 5V), desenhe e dimensione um circuito para ativar e desativar essa válvula com o uso do transistor BC-548A (do tipo NPN).



Passo a passo para a solução

- 1) **Montar o circuito baseado no esquema de uso do transistor NPN:** utilizando o esquema base, nossa única modificação estrutural é a inclusão da válvula solenoide que queremos controlar (entre o coletor e a fonte do coletor) e um botão que ao ser clicado permite a entrada da corrente na Base (entre ela e o positivo da fonte que a alimenta). Além disso, já devemos incluir no esquema os valores das fontes. Como só possuímos uma fonte de 12V e outra de 5V, claramente a de 12V deve ser a que alimentará a válvula (que trabalha com 9V). Assim, a fonte de 5V pode ser utilizada no circuito de controle da Base. Além disso, esta válvula necessita de uma corrente máxima de 0,5 A que deverá ser fornecida pelo coletor. Assim, a corrente do coletor deverá ser também de 0,5 A.



- 2) **Buscar as especificações do transistor:** todo componente eletrônico possui um *datasheet*, que contém seus detalhes técnicos e características descritas. Entre todas as informações do transistor, três são fundamentais para nós: o ganho (identificado como β ou H_{CE}), a queda de tensão na base (identificada como V_{BE}) e a queda de tensão no coletor (identificada como V_{CE}). Perceba que no trecho abaixo retirado do datasheet do transistor BC-548A, os valores são informados não de forma precisa, mas dentro de uma faixa de operação que possui uma margem de erro aceitável e conhecida.

ON CHARACTERISTICS

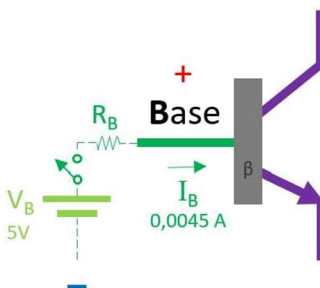
h_{FE}	DC Current Gain	$V_{CE} = 5.0 \text{ V}, I_C = 2.0 \text{ mA}$	548	110	800	
			548A	110	220	
			548B	200	450	
			548C	420	800	
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 10 \text{ mA}, I_B = 0.5 \text{ mA}$ $I_C = 100 \text{ mA}, I_B = 5.0 \text{ mA}$			0.25	V
					0.60	V
$V_{BE(on)}$	Base-Emitter On Voltage	$V_{CE} = 5.0 \text{ V}, I_C = 2.0 \text{ mA}$ $V_{CE} = 5.0 \text{ V}, I_C = 10 \text{ mA}$		0.58	0.70	V
					0.77	V

Como regra, quando trabalhamos com circuitos eletrônicos de baixas correntes, consideramos o ganho mínimo e as quedas de tensões mínimas. Esses valores chegam perto ao máximo quando o transistor opera em situações mais extremas, o que não é nosso caso. Então, nosso $\beta = 110$, $V_{BE} = 0,58 \text{ V}$ e $V_{CE} = 0,25 \text{ V}$.

- 3) **Calcular a corrente da Base (I_B):** podemos iniciar nossos cálculos descobrindo qual a corrente devemos aplicar na base para conseguir estimular a corrente total necessária pelo coletor para o acionamento da válvula solenoide. Como já sabemos o β do transistor e a corrente necessária ao coletor (0,5 A), podemos usar a fórmula:

$$I_B = I_C / \beta = 0,5 / 110 = \underline{0,0045 \text{ A}} \text{ (ou 4,5 mA).}$$

- 4) **Calcular o resistor de controle da corrente da Base (R_B):** Agora temos todas as informações que precisamos para calcular o resistor necessário no circuito de controle para garantir essa corrente de 0,0045 A na base. Aqui, como explicado anteriormente, devemos considerar que parte da tensão será dissipada pela base e o valor dessa queda (V_{BE}) já descobrimos no datasheet do transistor (0,58 V). Com isso:

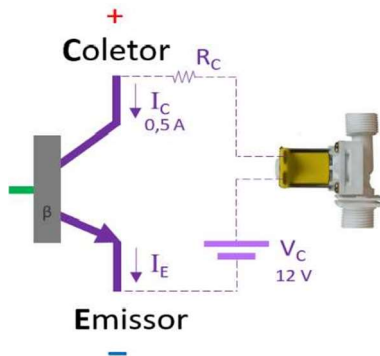


$I_B = (V_B - V_{BE}) / R_B$, onde devemos isolar R_B (o que queremos calcular). Então:

$$R_B = (V_B - V_{BE}) / I_B = (5 - 0,58) / 0,0045 = 4,42 / 0,0045 = \underline{982,2 \Omega}$$

Como não existe um resistor com esse valor, devemos buscar o resistor comercial com o valor mais próximo. Neste caso, será o de 1000Ω (1kΩ)

- 5) **Calcular o resistor de controle da corrente do Coletor (I_C):** também já temos



todas as informações que precisamos para calcular o resistor necessário entre a fonte do circuito principal e o coletor (R_C) para garantir a limitação da corrente que passará pela válvula solenoide. Parte da tensão desta fonte será dissipada pelo transistor ao entrar pelo coletor e também já buscamos do datasheet esta queda chamada de V_{CE} . Assim, temos:

$I_C = (V_C - V_{CE}) / R_C$, onde devemos isolar R_C (o que queremos calcular). Então:

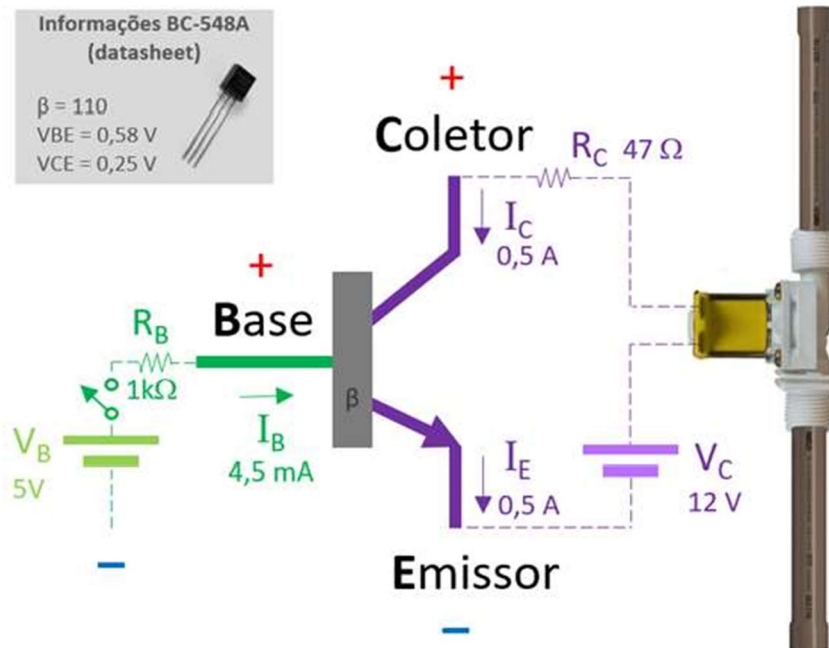
$$R_C = (V_C - V_{CE}) / I_C = (12 - 0,25) / 0,5 = 11,75 / 0,25 = \underline{47 \Omega}$$

Existe um resistor comercial com esse valor, portanto R_C será exatamente 47 Ω. Caso não existisse, por segurança, deveríamos procurar o resistor com valor comercial mais próximo e **MAIOR** do que o que calculamos, pois escolher um resistor com valor menor, permitiria uma corrente superior à máxima suportada.

- 6) **Calcular a corrente do emissor:** somente para complementar o dimensionamento e as informações no nosso circuito, a única informação que está faltando é a corrente que atravessará o emissor (I_E). Como ela é a soma das correntes do coletor (I_C) e da corrente da base já amplificada ($I_B \cdot \beta$), temos:

$$I_E = I_B + (I_B \cdot \beta) = 0,0045 + (0,0045 \cdot 110) = 0,0045 + 0,495 = \underline{0,5 A} \text{ (arredondando).}$$

- 7) **Anotar todas as informações no circuito:** nosso circuito já está totalmente dimensionado e toda vez que o botão for pressionado, uma corrente de 4,5mA na base irá liberar uma corrente de 0,5 A no coletor, acionando a válvula solenoide e liberando o fluxo de água que fará a rega da horta. Vamos então, finalmente, anotar todas os valores calculados ao nosso esquema:

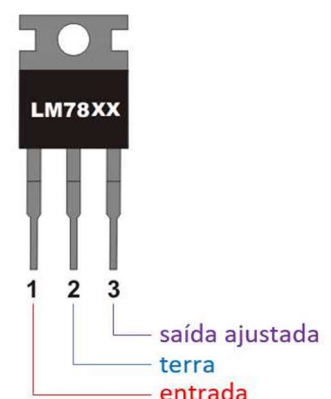


Transistores Reguladores de Tensão Fixos e Variáveis

Existem algumas categorias de transistores que são especialmente úteis pois aproveitam-se de suas características de duplo diodo para conseguir regular e garantir uma determinada tensão de saída, independentemente da tensão de entrada. Apesar de podermos fazer o mesmo com resistores em série (divisor de tensão, sem filtro de flutuações) e com diodos, estes transistores são muito mais fáceis de usar, seguros (com proteção interna) e estáveis (estabilizando a tensão). Veremos então dois desses transistores de regulação de tensão, sendo um deles fixo e o outro regulável.

Regulador de tensão fixo com o LM78xx

Essa família de transistores reguladores é a mais comum e barata do mercado, contando com proteção contra curto-circuito em sua saída. Possui tensão de saída fixa (sendo mais inflexível), porém não necessita de nenhum outro componente adicional. O valor dessa tensão de saída dá origem aos dois últimos números do nome ao transistor: LM7805 (5 V), LM7806 (6 V), LM7808 (8 V), LM7812 (12 V), LM7815 (15 V), LM7818 (18 V), LM7824 (24 V). O seu uso é muito simples: basta conectar ao pino 1 a tensão a ser regulada e o pino 2 ao terra (GND). Assim, automaticamente a tensão de saída do pino 3 será a indicada pelo transistor da família LM78xx escolhido. Para que tudo funcione de forma segura e sem surpresas, precisamos ter alguns cuidados:



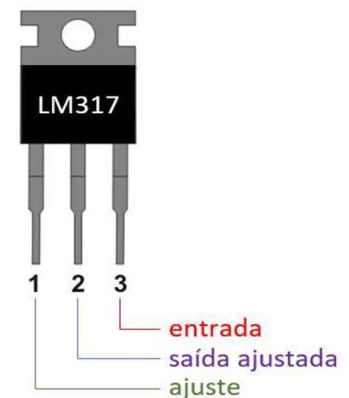
- Tensão máxima de entrada a ser regulada: máximo de 35 V (com exceção do

transistor LM7824 que suporta até 40 V na entrada).

- Para a tensão de saída ser garantida, a tensão de entrada deve ser no mínimo 3 V maior do que ela.
- A corrente máxima utilizada pelo subcircuito que utiliza a tensão de saída deve ser limitada à 1 A.
- A potência dissipada deve ser calculada e se o seu valor superar 1W, o transistor deverá utilizar um dissipador de calor. Para esse cálculo, $P = (V_{\text{entrada}} - V_{\text{saída}}) \cdot I_{\text{saída}}$.

Transistor regulador de tensão LM317 (variável): o transistor LM317 é também um regulador de tensão, com uso um pouco mais difícil do que os da família LM78xx, porém com uma grande vantagem: através da combinação de 2 resistores é possível regular a tensão de saída desejada. Para o seu uso, também é suportada uma tensão de entrada de até 40 V, com tensão de saída entre 3 e 37 V (pela queda de tensão dissipada) e corrente máxima de 1 A. Quanto ao seu uso, o LM317 pode compor

diversas montagens diferentes que variam a sua aplicação. Porém, para ser utilizado como um regulador de tensão variável (seu principal propósito), devemos reproduzir o circuito abaixo:



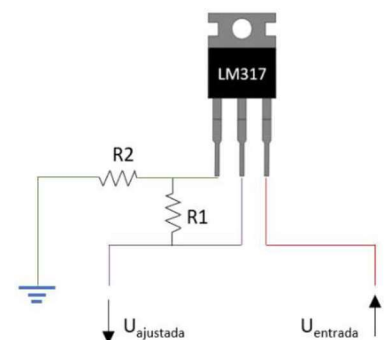
Nesta configuração, independente de qual for a tensão de entrada (desde que seja até 40 V), a tensão de saída é definida pela combinação dos resistores R_1 e R_2 .

$$U_{\text{ajustada}} = 1,25 \cdot (1 + R_2/R_1)$$

Também podemos isolar os resistores para descobrir quais valores devem possuir para chegar à tensão de saída desejada:

$$R_1 = R_2 / ((V_{\text{ajustada}}/1,25) - 1)$$

$$R_2 = ((V_{\text{ajustada}}/1,25) - 1) \cdot R_1$$



Na prática, escolhemos o valor de um dos resistores (com um chute ou alguma estimativa caso se precise limitar uma corrente) e assim calculamos o outro resistor que em conjunto garante a tensão. Outro cuidado importante é descobrir a potência dos resistores a serem utilizados (comercialmente temos resistores na casa dos mW até os W) e se o transistor vai atingir a potência de 1W, a partir da qual o mesmo deve ser associado a um dissipador de calor que impeça a queima do componente. Para isso, usamos as

seguintes fórmulas:

$$P_{R1} = 1,25 \cdot 1,25 / R_1$$

$$P_{R2} = (V_{ajustada} - 1,25) \cdot (V_{ajustada} - 1,25) / R_2$$

$$P_{lm317} = P_{R1} + P_{R2}$$

Exemplo: Imagine que precisamos obter uma tensão de saída de 10 V com o LM317. A primeira observação é que a tensão de entrada pode variar entre qualquer valor entre 13 V (por conta dos 3 V de perda) e 40 V (tensão máxima suportada na entrada). Para os resistores, vamos “chutar” um valor para o R_1 (240 Ω , por exemplo) e a partir daí podemos encontrar o R_2 :

$$R_2 = ((V_{ajustada}/1,25) - 1) \cdot R_1 = ((10/1,25) - 1) \cdot 240 = 7 \cdot 240 = 1680 \Omega = \underline{1,680 \text{ K}\Omega}$$

Assim, utilizando o transistor LM317 associado a um resistor de 240 Ω com um resistor de 1,6 K Ω (o comercial mais próximo), garantimos uma tensão de 10V regulada na saída. Porém, precisamos verificar a potência dos resistores e do transistor para garantir a segurança da operação:

$$P_{R1} = 1,25 \cdot 1,25 / R_1 = 1,25 \cdot 1,25 / 240 = 1,5625 / 240 = \underline{0,0065 \text{ W}} \text{ (ou 6,5 mW)}$$

$$P_{R2} = (V_{ajustada} - 1,25) \cdot (V_{ajustada} - 1,25) / R_2 = (10 - 1,25) \cdot (10 - 1,25) / 1600 \\ = 8,75 \cdot 8,75 / 1600 = \underline{0,0478 \text{ W}} = 47,8 \text{ mW}$$

$$P_{lm317} = P_{R1} + P_{R2} = 0,0065 + 0,0478 = \underline{0,0543 \text{ W}} \text{ (ou 54,3 mW)}$$

Assim, verificamos que o transistor não necessita de um dissipador (pois não atingiu o limite de 1W) e que resistores de 1/8 W (os mais comuns no mercado) atendem com uma boa margem de segurança.