

O Transistor de Junção

2012-01-27

Sinais elétricos e amplificadores

Vimos que uma fonte elétrica é caracterizada por duas grandezas: sua força eletromotriz \mathcal{E} e sua resistência interna R_i . Imagine agora uma fonte construída de tal forma que estas características possam mudar com o tempo. Uma maneira simples de construir isto seria com ajuda de interruptores ou chaves. A figura 1 mostra uma fonte cuja força eletromotriz pode mudar entre os valores $\mathcal{E}(t) = 10\text{V}$ e $\mathcal{E}(t') = 0$, dependendo da posição da chave. Podemos imaginar também fontes com força eletromotriz continuamente variável como aquela da figura 2. Estas fontes temporalmente variáveis são

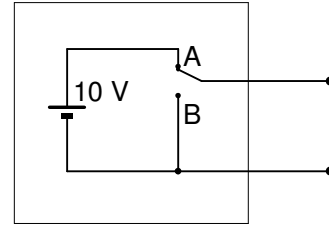


Fig. 1 Fonte variável com interruptor

fontes de *sinais elétricos*. Um sinal elétrico pode ser usado para transmitir informação. Por exemplo, a fonte da figura 1

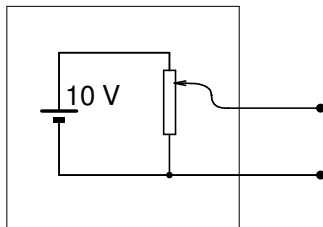


Fig. 2 Fonte variável com potenciômetro

poderia ser ligada numa campainha elétrica dentro de uma casa e o interruptor fica fora da casa. Cada vez que um visitante coloca a chave na posição A a campainha toca e desta forma transmite a informação que um visitante chegou. Um exemplo de uma fonte contínua de sinais elétricos é um *microfone*. O microfone é um equipamento que transforma um sinal acústico num sinal elétrico. Por outro lado, um *alto-falante* é um equipamento que faz a transformação inversa: ele transforma um sinal elétrico num sinal acústico.

Poderíamos pensar numa transmissão de informação da seguinte forma: num ponto A um microfone capta a fala de uma pessoa e transforma o sinal acústico num sinal elétrico. Este sinal elétrico é levado por dois fios condutores para um ponto B muito distante onde um alto-falante converte este sinal de novo num sinal acústico que seria audível para uma grande platéia (figura 3).



Fig. 3 Alto-falante ligado a um microfone

Infelizmente este esquema da figura 3 não funcionará. Em geral os sinais elétricos gerados por um microfone são bastante fracos e o alto-falante requer um sinal elétrico forte. O que queremos dizer com sinal fraco ou forte? O que significa fraco e forte neste caso é a potência envolvida. Sabemos (mostre-o !) que a potência máxima, que podemos tirar de uma fonte elétrica é dada por

$$P_{\max} = \frac{\mathcal{E}^2}{R_i} \quad (1)$$

Se o microfone fornece maximamente uma potência de um miliwatt e o alto-falante requer uma potência de 500 W, a platéia não ouvirá nada com o esquema da figura 3. Para poder realizar a idéia da transmissão da fala para a grande platéia precisamos um *amplificador*. Um amplificador substitui um sinal elétrico fraco por um sinal forte, mas de tal forma que as características que envolvem a informação contida no sinal sejam

essencialmente mantidas. Por exemplo, o amplificador poderia substituir a função $\mathcal{E}(t)$ por uma proporcionalmente maior mantendo a mesma resistência interna:

	força eletromotriz	resistência interna
antigo sinal:	$\mathcal{E}(t)$	R_i
sinal amplificado:	$A\mathcal{E}(t)$	R_i

onde o fator de amplificação A seria algum número maior que 1. Com a equação (1) podemos concluir que a potência máxima que pode ser obtida do sinal cresceria pelo fator A^2 . Outro tipo de amplificador frequentemente usado é um que abaixa a resistência interna mantendo a mesma força eletromotriz:

	força eletromotriz	resistência interna
antigo sinal:	$\mathcal{E}(t)$	R_i
sinal amplificado:	$\mathcal{E}(t)$	$\frac{1}{B}R_i$

com $B > 1$ poder-se-ia aproveitar mais potência do novo sinal do que do sinal original.

Os amplificadores parecem violar a conservação de energia substituindo um sinal fraco por um sinal forte. Mas não há violação da conservação de energia. O amplificador precisa de uma fonte de energia separada do sinal a ser amplificado.

Os elementos essenciais de um amplificador são os *elementos ativos*. Estes são os componentes que realmente amplificam um sinal. Eles podem ser comparados com torneiras ou registros de água. Sabemos que podemos abrir uma torneira com facilidade usando pouco esforço e provocar com nosso movimento um forte jato de água. Os elementos ativos da eletrônica funcionam exatamente desta forma. Os primeiros elementos ativos foram as válvulas. Nestes dispositivos gera-se uma corrente de elétrons num tubo de vácuo e esta corrente pode ser regulada com campos elétricos. As válvulas têm hoje um campo muito limitado de aplicação. A grande maioria dos elementos ativos da eletrônica hoje em dia são *transistores*. Existem dois tipos de transistores: os transistores de junção e os transistores de efeito campo. Na prática de hoje vamos conhecer o transistor de junção. Trata-se de um elemento que tem três conectores elétricos chamados de *emissor* (E), *base* (B) e *coletor* (C). Existem dois tipos de transistor de junção, os transistores NPN e os transistores PNP. Nos transistores NPN o emissor deve ser ligado num pólo negativo e o coletor num pólo positivo e nos transistores PNP a polaridade é inversa. A figura 4 mostra os sinais que se usam para representar transistores NPN e PNP em esquemas eletrônicos. Botamos as letras E, B e

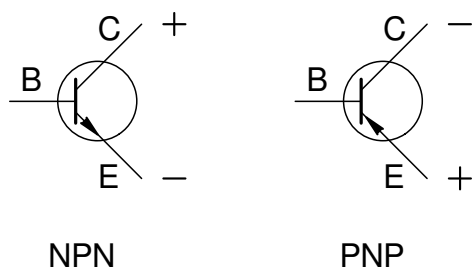


Fig. 4 Representação simbólica de transistores NPN e PNP.

C para indicar *emissor* (E), *base* (B) e *coletor* (C). Mas em esquemas eletrônicos estas letras não são em geral indicadas. Pessoas treinadas reconhecem os respectivos terminais pelo desenho: o emissor é o terminal com uma seta que lembra um símbolo de diodo e a base termina perpendicularmente num traço grosso.

Fig. 4 Representação simbólica de

A 07 Experimentos básicos com um transistor NPN.

A figura 5 mostra um transistor de junção ligado num pequeno circuito com dois amperímetros. Um potenciômetro (trimpot) é posto no circuito que serve para injetar uma pequena corrente I_B na base do transistor. Esta corrente funciona como a alavanca da torneira de água. O trajeto da água na torneira seria aqui o trajeto coletor – emissor. Se botarmos a posição do contato móvel do potenciômetro na posição 0 não teremos corrente na base e nem no coletor. Mas se levantarmos o ponto móvel do potenciômetro aparecem correntes, sendo a corrente I_C muito maior que a corrente I_B . Por exemplo, existem transistores para os quais I_C seria 300 vezes maior que a corrente I_B . Este fator de proporcionalidade entre estas correntes chama-se fator de amplificação de corrente do transistor. Frequentemente este parâmetro é escrito como h_{FE} .

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} \quad (4)$$

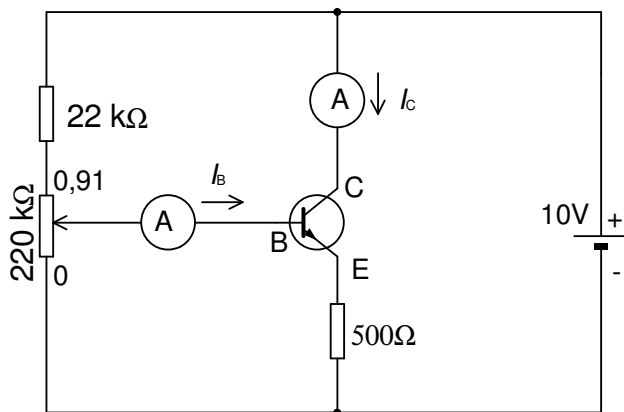


Fig. 5 Circuito teste com um transistor para medir o fator de amplificação de corrente.

Tarefa 1: Monte o circuito da figura 5 usando o transistor número 1 na placa de teste fornecida. Varie a posição do potenciômetro e meça os valores de I_B e I_C para um número suficientemente grande de posições do potenciômetro para poder elaborar um bom gráfico que mostre a correlação de I_B com I_C . A partir do gráfico determine o fator de amplificação do transistor.

Tarefa 2: Vimos nesta primeira tarefa experimental que a corrente no coletor é aproximadamente proporcional à corrente na base e ela é muito maior. Mas como será que esta corrente depende da voltagem aplicada no transistor? Para ver esta dependência monte o circuito da figura 6 usando o transistor 1.

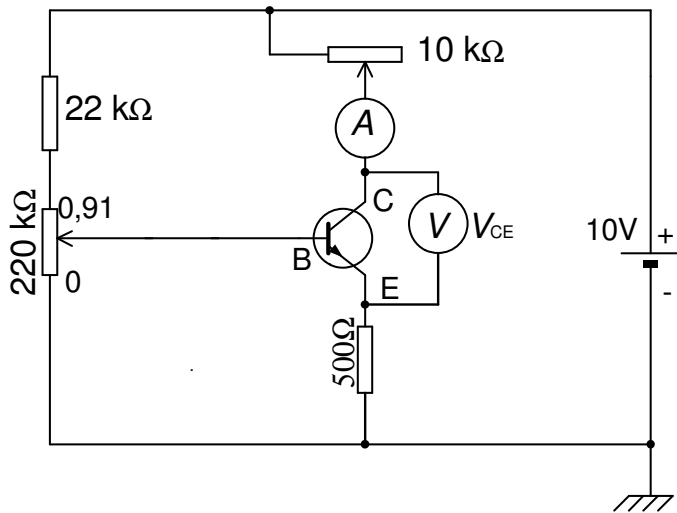


Fig. 6 Circuito teste com um transistor para medir a dependência entre I_C e V_{CE} para uma dada corrente de base.

Coloque o contato móvel do reostato (potenciômetro) de $10\text{k}\Omega$ na posição extrema tal que a resistência deste resistor variável seja praticamente nula e regule no trimpot de $220\text{k}\Omega$ uma corrente de base tal que a corrente no coletor seja aproximadamente igual a $\approx 2\text{mA}$. Para variar a voltagem aplicada no transistor V_{CE} você pode agora alterar a posição do contato móvel do reostato de $10\text{k}\Omega$. Mas faça isto sem alterar a posição do potenciômetro de $220\text{k}\Omega$! Cubra o intervalo de voltagens 9V até $0,1\text{V}$ com um número suficiente de medidas para poder elaborar um bom gráfico que mostre a corrente I_C em função de V_{CE} .

Tarefa 3: Monte o circuito da figura 7 e faça medidas que permitam elaborar um gráfico que correlacione as voltagens V_{BT} com V_{ET} . Descreva o resultado verbalmente (olhe para a diferença $V_{BT} - V_{ET}$).

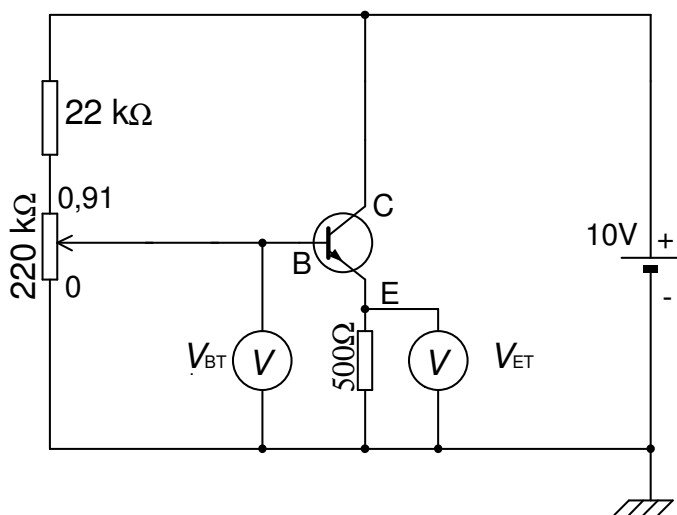


Fig. 7 Circuito teste com um transistor para comparar os potenciais da base e do emissor.

Tente finalmente descrever os resultados das três experiências verbalmente. Em qual aspecto a analogia com a torneira de água não funciona bem?

A 08 Uma teoria muito simplificada de amplificadores com transistores de junção.

Transistores de junção podem ser usados para montar vários tipos diferentes de amplificador. Aqui vamos discutir dois tipos. Começaremos com um amplificador de voltagem.

Imagine que tenhamos uma fonte de voltagem variável no tempo que forneça uma voltagem $V(t)$. Queremos substituir este sinal elétrico por um maior mantendo a informação contida na função $V(\cdot)$. Vamos aplicar esta voltagem na base de um transistor. Mas como $V(t)$ pode ser menor que $0,7V$ e pode inclusive ser negativo, não seria adequado aplicarmos $V(t)$ diretamente entre base e terra (= pólo negativo da bateria no caso de transistor NPN). Vimos na última experiência que existe uma relação bem simples entre potencial na base e no emissor desde que o potencial na base seja maior que $0,7V$ (tomando o potencial do pólo negativo da bateria como potencial zero). Para garantir que a diferença de potencial entre base e terra fique sempre maior que $0,7V$ temos que ligar a fonte da voltagem $V(t)$ em série com alguma fonte de voltagem DC que mantém uma diferença de potencial V_1 . O valor de V_1 deve ser escolhido tal que $V_B = V_1 + V(t)$ seja sempre maior que $0,7V$. O resto do amplificador é bem simples: Temos uma bateria de força eletromotriz V_0 que alimenta o transistor. O emissor e o coletor são ligados aos terminais da bateria através de dois resistores R_E e R_C como mostrado na figura 8.

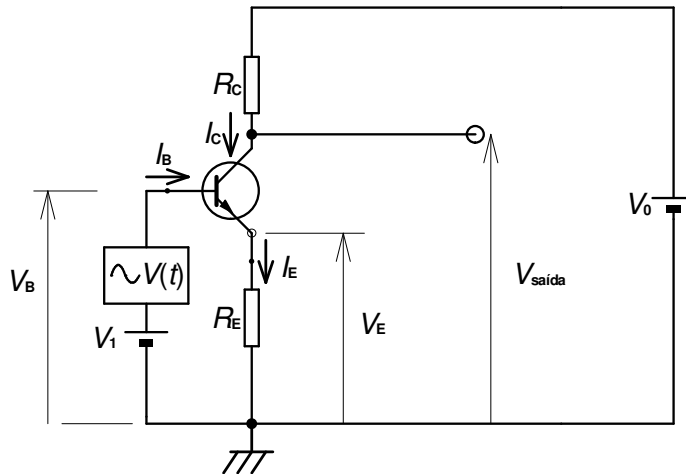


Fig. 8 Esquema de um amplificador de voltagem com transistor NPN.

Vimos na última experiência que o potencial no emissor V_E segue fielmente o potencial da base V_B . Temos aproximadamente

$$V_E \approx V_B - 0,7V \quad (5)$$

A equação (5) vale desde que $V_B > 0,7V$. A explicação desta equação é a seguinte: o trajeto Base – Emissor é simplesmente um diodo. Se tentássemos levantar o potencial da Base, a corrente iria crescer exponencialmente (lembre da curva $I \times V$ do diodo). Mas uma corrente elevada no Emissor provocaria uma maior queda de potencial no resistor R_E , o que elevaria o potencial do Emissor até que a diferença de potencial V_{BE} fique pequena.

Conhecendo o potencial V_E podemos usar a lei de Ohm para determinar a corrente no emissor:

$$I_E = \frac{V_B - 0,7V}{R_E} = \frac{V(t) + V_1 - 0,7V}{R_E} \quad (6)$$

O transistor tem pouca capacitância e praticamente não armazena carga elétrica. Por tanto, podemos tratá-lo como um nó:

$$I_E = I_B + I_C \quad (7)$$

Deste que tenhamos uma diferença de potencial suficientemente grande ($> 0,5V$) entre emissor e coletor, vale $I_C \gg I_B$. Então podemos fazer a aproximação

$$I_C \approx I_E = \frac{V(t) + V_1 - 0,7V}{R_E} \quad (8)$$

Aplicando a lei de Ohm no resistor do coletor vemos que há uma queda de potencial $R_C I_C$ neste resistor. Então o potencial do terminal de saída será

$$\begin{aligned} V_{\text{saída}}(t) &= V_0 - R_C \frac{V(t) + V_1 - 0,7V}{R_E} = \\ &= \text{const.} - \frac{R_C}{R_E} V(t) \end{aligned} \quad (9)$$

A parte temporalmente variável deste potencial é proporcional ao sinal $V(t)$. O fato que a constante de proporcionalidade é negativa não importa para muitas aplicações. Nos casos em que esta inversão de fato seja importante, podemos utilizar um segundo transistor e introduzir mais um sinal negativo para a recuperação da fase original. O que importa é que R_C/R_E pode ser escolhido maior que 1. Existem limitações para este fator de amplificação. Se escolhermos R_C/R_E grande demais esbarraremos em limitações oriundas do domínio de validade das equações (5) e (8). Também podem ocorrer instabilidades que levariam a oscilações. Aliás, esta era a razão pela qual utilizamos um resistor de 500Ω no emissor nas experiências 1 e 2.

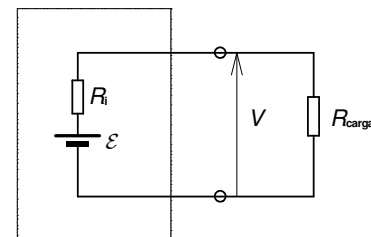
O amplificador junto com a bateria de alimentação pode ser considerado uma fonte com força eletromotriz

$$\mathcal{E}_{\text{saída}}(t) = \left[V_0 - R_C \frac{V_1 - 0,7V}{R_E} \right] - \frac{R_C}{R_E} V(t) \quad (10)$$

Olhamos até agora somente para a força eletromotriz desta fonte. Temos que olhar também para a resistência interna da fonte.

Para testar a resistência interna de uma fonte podemos ligar a fonte numa resistência carga R_{carga} . O nome *resistência carga* é linguagem usual da engenharia. No caso *carga* não se refere à carga elétrica, mas é usado no sentido de *ônus* ou *fardo*. A voltagem nos terminais de uma fonte de força eletromotriz \mathcal{E} e resistência interna R_i quando ligado num resistor R_{carga} seria (lembre do divisor de voltagem!)

Fig. 9 Teste de resistência interna de uma fonte.



$$V = \frac{R_{\text{carga}}}{R_i + R_{\text{carga}}} \mathcal{E} \quad (11)$$

Desta relação obtemos a resistência interna da fonte:

$$R_i = \left(\frac{\mathcal{E}}{V} - 1 \right) R_{\text{carga}} \quad (12)$$

Para poder julgar o valor da resistência interna da saída do amplificador, vamos considerar um resistor de carga ligado na saída, como indicado na figura 10.

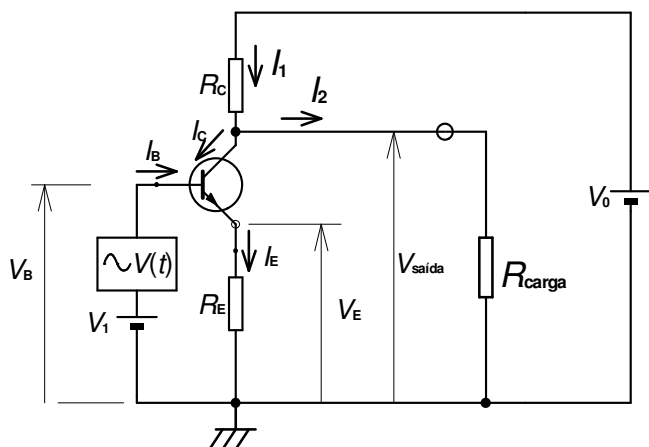


Fig. 10 Amplificador ligado a um resistor de carga.

Temos

$$I_2 = \frac{V_{\text{saída}}}{R_{\text{carga}}} \quad (13)$$

e $I_1 = I_2 + I_C$. A queda de potencial no resistor R_C é agora dado pela corrente I_1 . Correspondentemente temos para o potencial de saída:

$$V_{\text{saída}} = V_0 - R_C \left(\frac{V_{\text{saída}}}{R_{\text{carga}}} + \frac{V(t) + V_1 - 0,7V}{R_E} \right) \quad (14)$$

Resolvendo isto para $V_{\text{saída}}$ obtemos:

$$V_{\text{saída}} = \frac{V_0 - R_C \frac{V(t) + V_1 - 0,7V}{R_E}}{1 + R_C / R_{\text{carga}}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{saída}}(t)}{1 + R_C / R_{\text{carga}}} \quad (15)$$

Inserindo este resultado na fórmula da determinação de resistência interna (12) obtemos

$$\boxed{R_{i(\text{saída})} = R_C} \quad (16)$$

Então, se queremos um fator de amplificação R_C / R_E grande e para isto escolhemos um R_C grande, temos que pagar um preço: a resistência interna da saída do amplificador se torna grande. Muitas vezes um valor grande da resistência interna da saída de um amplificador não é aceitável. Isto acontece quando se pretende usar o amplificador com uma carga (no sentido de ônus) de resistência interna pequena (lembre do princípio de casamento de resistências internas que deve ter sido discutido nas aulas teóricas).

Este problema nos leva ao segundo tipo de amplificador que pode ser realizado com um transistor de junção. A figura 11 mostra um esquema deste tipo de amplificador. De novo ligamos o sinal a ser amplificado em série com uma fonte auxiliar na base do transistor. Mas desta vez a saída do amplificador não é no coletor mas no emissor. Na figura já mostramos o resistor de carga que representa o equipamento que usará o sinal amplificado. Este pode por exemplo ser um alto-falante. Estamos prevendo que a fonte do sinal a ser amplificado tenha uma resistência interna R_i . O funcionamento deste amplificador é simples: O potencial na base V_B é dado por

$$V_B = V_1 + \mathcal{E}(t) - R_i I_B \quad (17)$$

Em condições normais de operação sabemos então que o potencial na saída é

$$V_{saída} = V_1 + \mathcal{E}(t) - R_i I_B - 0,7V \quad (18)$$

Se desprezarmos a pequena corrente de base completamente, vemos que a voltagem de saída segue fielmente a força eletromotriz da fonte da entrada, mas a corrente na sua maior parte não precisa vir da fonte de entrada mas ela vem do coletor. A voltagem não é amplificada, mas este amplificador reduz a resistência interna. Para avaliar esta redução da resistência interna mais quantitativamente vamos agora considerar a corrente de base na equação (18).

Temos

$$I_E = I_B + I_C = (1 + h_{FE}) I_B \quad (19)$$

e

$$I_E = \frac{V_{saída}}{R_{carga}} \quad (20)$$

Então vale

$$I_B = \frac{V_{saída}}{(1 + h_{FE}) R_{carga}} \quad (21)$$

Inserindo isto na (18) e resolvendo para $V_{saída}$ obtemos:

$$V_{saída} = \frac{V_1 - 0,7V + \mathcal{E}(t)}{1 + \frac{R_i}{(1 + h_{FE}) R_{carga}}} \quad (22)$$

A saída do amplificador se comporta como uma fonte de força eletromotriz

$$\mathcal{E}_{saída}(t) = V_1 - 0,7V + \mathcal{E}(t) \quad (23)$$

e (compare com a equação (12)) de resistência interna

$$R_{i(saída)} = \frac{R_i}{1 + h_{FE}} \quad (24)$$

Então este amplificador reduz a resistência interna pelo fator $1 + h_{FE}$.

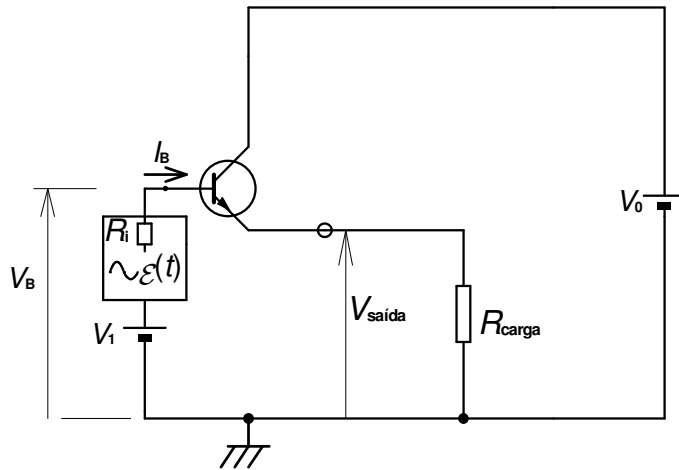


Fig. 11 Redutor de resistência interna.

O ideal para aplicações práticas é uma combinação dos dois tipos de amplificador. Num primeiro passo a voltagem é amplificada e no final a resistência interna é reduzida.

Esta tarefa de juntar vários amplificadores nos obriga a falar de mais um assunto. Um pequeno detalhe precisa ser retificado na nossa teoria dos amplificadores.

Em toda discussão dos amplificadores usamos fontes auxiliares em série com as fontes de entrada. Seria pouco prático encher um aparelho eletrônico com dúzias de baterias auxiliares. Existe uma forma de substituir estas fontes auxiliares por divisores de voltagem. A figura 12 mostra uma possibilidade que funciona com sinais alternados (AC).

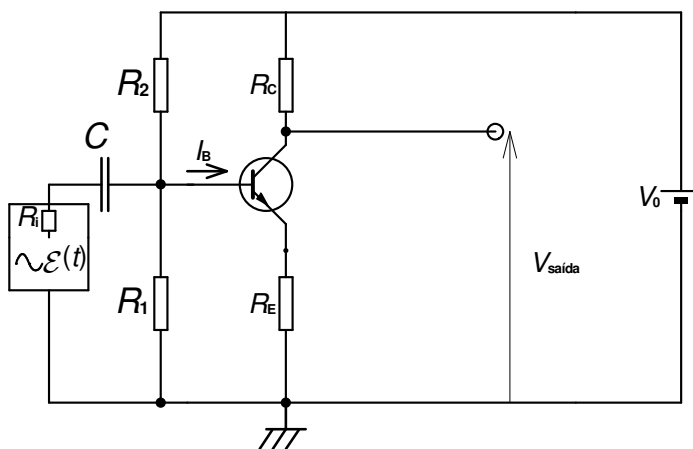


Fig. 12 Acoplamento de uma fonte através de um capacitor.

A idéia deste esquema é baseada na hipótese que o capacitor seja muito grande de tal forma que a diferença de potencial nas placas do mesmo praticamente não muda nas oscilações da força eletromotriz da fonte. Com

esta hipótese e com um pouco de análise de circuitos pode-se mostrar que o potencial na base do transistor é dado por

$$V_B \approx \frac{R_3}{R_3 + R_2} V_0 + \frac{R_3 R_2}{R_1 (R_3 + R_2) + R_3 R_2} (\mathcal{E}(t) - \bar{\mathcal{E}}) \quad (25)$$

onde $\bar{\mathcal{E}}$ é a média temporal da força eletromotriz da fonte de entrada e

$$R_3 = \frac{R_1 (1 + h_{FE}) R_E}{R_1 + (1 + h_{FE}) R_E} \quad (26)$$

Com $h_{FE} \gg 1$ e com R_E não exageradamente pequeno temos $R_3 \approx R_1$. A equação (25) tem essencialmente a mesma forma que se obtém botando a fonte em série com uma

bateria auxiliar. Especialmente com $R_1 \ll \min\{R_2, R_3\}$ isto fica evidente. Neste caso teríamos

$$V_B \approx \underbrace{\frac{R_3}{R_3 + R_2}}_{=V_1} V_0 - \bar{\mathcal{E}} + \mathcal{E}(t) \quad (27)$$

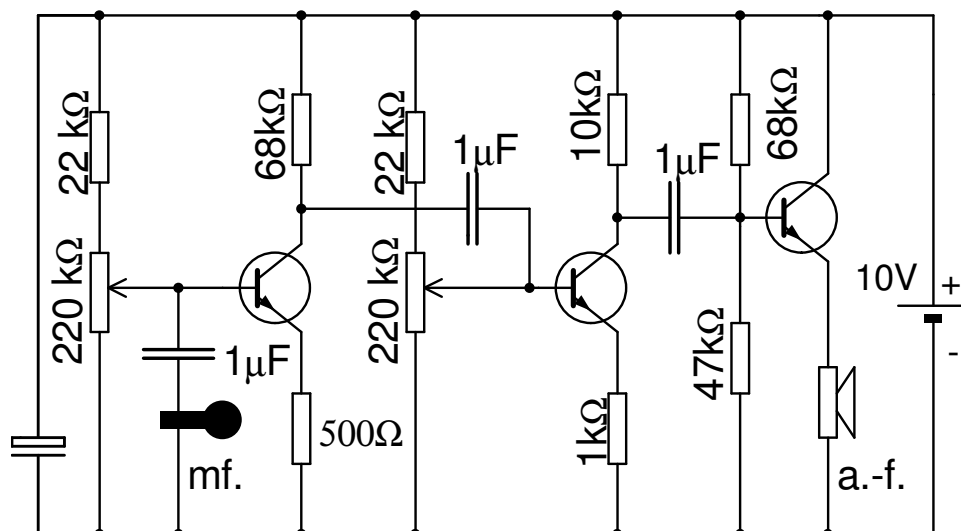
Agora temos os conhecimentos necessários para poder construir um pequeno amplificador de som. O sinal a ser amplificado será um sinal oriundo de um microfone. Como microfone utilizaremos simplesmente um alto-falante. Da mesma forma que um motor elétrico em geral pode ser usado como dínamo um alto-falante pode ser usado também como microfone.

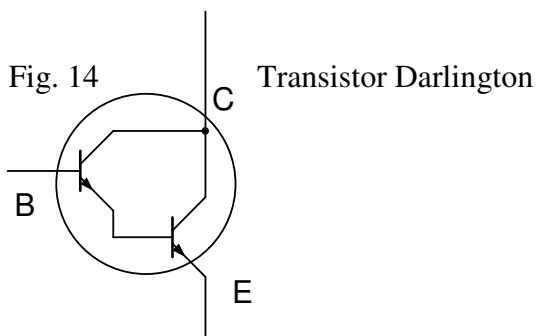
Tarefa 4: Para poder apreciar o funcionamento do amplificador vamos primeiramente testar o circuito da figura 3. Ligue um alto-falante no outro. Encoste um alto-falante no ouvido e cante, assobie ou fale no outro. Com um pouco de atenção dá para ouvir que um sinal acústico é realmente emitido no alto-falante que está no ouvido. Mas este som é extremamente fraco.

Tarefa 5: Monte o circuito da figura 13. Regule os trimpots dos transistores 1 e 2 tal que o potencial nos coletores destes transistores fique aproximadamente em 5V. Depois pode brincar com o amplificador: **5a)** assobie ou cante no microfone, **5b)** aproxime o alto-falante ao microfone de tal forma que um cone de papelão enfrente o outro! **5c)** Coloque capacitores de $0,22\mu\text{F}$ em paralelo aos resistores dos emissores dos transistores 1 e 2 e observe o comportamento do amplificador. Observação: na verdade o terceiro transistor é uma combinação de dois transistores tal que a corrente de emissor do primeiro fornece a corrente de base do segundo. Esta associação equivale a um transistor com altíssimo fator de amplificação de corrente. Esta associação tem o nome de *transistor Darlington* (compare a Fig. 14).

Pense como poderia tornar o fator de amplificação variável.

Fig. 13 Pequeno amplificador de som (Repare que um cruzamento de linhas **sem ponto** não é uma ligação elétrica entre as linhas.)





O Transistor de junção como interruptor.

No Amplificador da figura 13 tomamos o cuidado de operar os transistores num regime tal que os sinais de saída estejam relacionados com os de entrada de forma aproximadamente linear. Para um amplificador de som esta condição é importante. Mas esta maneira de operar um transistor tem certas desvantagens. Para poder alterar os potenciais do coletor ou emissor continuamente numa ampla faixa temos que operar o transistor de tal forma que haja normalmente certa diferença de potencial V_{EC} de alguns volt entre emissor e coletor e que tenha uma corrente I_C razoavelmente grande fluindo no coletor. Nesta condição o transistor dissipa permanentemente a potência $P_{\text{Transistor}} = V_{EC} I_C$. Isto corresponde a um gasto de energia e cria problemas de resfriamento. Você deve ter notado que o transistor 3 está acoplado a um dissipador de calor. Sem este dissipador o transistor 3 correria perigo de estragar com o uso do amplificador da figura 13.

Existe uma forma de utilizar os transistores que apresenta muito menos gastos de energia dentro do transistor. O truque é variar V_{EC} e I_C de tal forma que $P_{\text{Transistor}} = V_{EC} I_C$ é sempre pequeno. O transistor é mantido em somente dois estados:

estado *ligado* com $V_{EC} \approx 0$ e I_C grande

estado *desligado* com $V_{EC} \approx V_{\text{Alimentação}}$ (= grande) e $I_C \approx 0$

A configuração básica para este tipo de operação é mostrada na figura 15

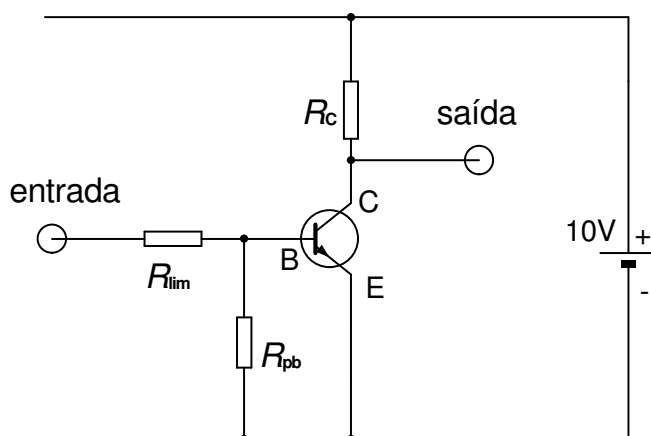


Fig. 15 Transistor como interruptor.

Podemos pensar neste circuito como um amplificador de voltagem com fator de amplificação (R_C / R_E) infinito. O resistor R_{lim} serve para limitar a corrente da base. Geralmente usa-se um valor em torno de 300Ω a 500Ω para este resistor. O trajeto

base – emissor é nada mais do que um diodo. A corrente neste diodo iria adquirir valores gigantes se o potencial da base fosse levado acima de 0,7V. Isto iria destruir o transistor e possivelmente também a fonte de sinal da entrada. É extremamente importante lembrar da necessidade deste resistor de limitação de corrente. Por exemplo, o esquecimento deste resistor num circuito de interface que é ligado na porta paralela (porta de impressora) de um PC leva à destruição da placa mãe do computador! Somente quando a fonte de entrada tiver uma resistência interna alta pode-se dispensar este resistor. O resistor R_{pb} serve para puxar o potencial da base para baixo para garantir que o estado do transistor esteja *desligado* quando a entrada for aberta, isto é, indefinida.

Veremos como funciona este tipo de circuito na prática.:

Tarefa 6 : Monte o circuito da figura 16. O símbolo de círculo com uma cruz representa uma lâmpada incandescente. Observação: não é necessário eliminar os resistores nos emissores dos transistores 1 e 2. Ligue simplesmente fios paralelos aos resistores. Também você não deve desmontar os divisores de voltagem das bases dos transistores 1 e 2. Simplesmente desligue-as dos transistores. Desta forma você ajuda o próximo grupo de alunos. Ligue o circuito na fonte e estabeleça uma ligação entre voltagem de alimentação (+10V) e base do transistor 1 com os dedos.

Fig. 16 Detector de toque

