

AULAS PRÁTICAS

# ELETRÔNICA

# ANALÓGICA

(Laboratório de Eletrônica Analógica - ELET0031)

**Prof. ISNALDO COELHO, DSc.**

isnaldo.coelho@univasf.edu.br

**2012**

## NORMAS PARA APRESENTAÇÃO DE RELATÓRIOS

Os relatórios deverão seguir as normas de formação apresentadas nas disciplinas de *Comunicação e Expressão* e *Metodologia da Pesquisa*, devendo conter minimamente: 1) uma seção de **introdução teórica**, onde deve ser apresentada uma breve fundamentação teórica dos ensaios experimentais propostos, sempre enfatizando quais aspectos teóricos serão verificados na prática. É interessante incluir aplicações dos conceitos explorados em implementações de sistemas de interesse tecnológico e, quando necessário, também fórmulas e esboços gráficos; 2) uma seção de **procedimentos**, com a seqüência das montagens experimentais realizadas e testadas com o emprego dos instrumentos de medição, bem como ajustes e “improvisos”; 3) uma seção de **resultados**, expondo de forma sistemática e organizada cronologicamente as medições de grandezas elétricas relacionadas à avaliação de requisitos de qualidade e de parâmetros de performance do sistema/projeto. Sempre comparar com os valores teóricos esperados; e, finalmente, 4) uma seção de **conclusões**, com discussões sobre os resultados relatados anteriormente, e hipóteses justificativas para eventuais discrepâncias entre teoria e prática. É interessante comentar sobre a contribuição da experiência para a sua formação.

### AValiação dos Relatórios

Nos relatórios observar os seguintes pontos indicados:

- ( ) Colocar Introdução Teórica
- ( ) Na Introdução Teórica focalizar o assunto da prática
- ( ) Na Introdução Teórica apresentar as equações utilizadas
- ( ) Colocar desenho dos circuitos ensaiados
- ( ) Melhorar os desenhos dos circuitos
- ( ) Colocar equações utilizadas
- ( ) Colocar lista de materiais
- ( ) Descrever o procedimento prático executado
- ( ) Colocar tabelas com resultados medidos
- ( ) Colocar formas de ondas observadas/medidas
- ( ) Colocar gráfico \_\_\_\_\_
- ( ) Arrumar os eixos na escala  
(no Excel usar Dispersão XY, não usar gráfico Colunas ou Linha)
- ( ) No gráfico a curva é teórica
- ( ) No gráfico os pontos são medidos
- ( ) Cuidar com as unidades (A , V , Hz ,  $\Omega$  , s , F , H , dB, \_\_\_\_\_ )
- ( ) Cuidar com os prefixos ( p , n ,  $\mu$  , m , k , M , G , \_\_\_\_\_ )
- ( ) Colocar Conclusão
- ( ) Melhorar a Conclusão
- ( ) Comentar as diferenças entre valores teóricos e práticos
- ( ) Comentar sobre o que foi (ou não foi) observado na prática
- ( ) Comentar sobre o que foi aprendido na prática
- ( ) \_\_\_\_\_



## Experiência 1

### DIODOS – CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

---

Esta experiência tem como objetivos: verificar o comportamento  $I$ - $V$  dos diodos (retificador, Zener e LED), compreender o procedimento para análise de circuitos contendo diodos e introduzir aspectos relativos ao projeto de fontes de alimentação cc.

#### Revisão Bibliográfica:

- 1) Junções  $p$ - $n$ ;
- 2) circuitos com diodos;
- 3) equivalentes de Thèvenin e de Norton.

Alguns conceitos úteis:

**Equação de Shockley.** Também conhecida como “equação do diodo”, deriva dos processos de difusão de portadores através da interface entre os materiais no interior dos diodos (junções  $p$ - $n$  e metal-semicondutor). Modela o *comportamento não-linear* da curva característica  $I$ - $V$ , sendo utilizada em projetos para determinação do “ponto de operação” do dispositivo nas aplicações em circuitos elétricos.

**Tensão de limiar ( $V_{on}$ ).** Também referida como “tensão de joelho” corresponde à tensão de polarização *direta* a partir da qual o dispositivo começa a conduzir corrente apreciável do ânodo ao cátodo.

**Tensão de ruptura (*break-down*).** Também referida como “tensão de Zener” corresponde à tensão de polarização *reversa* para a qual o dispositivo rapidamente passa a conduzir elevados níveis de corrente no sentido *reverso*, ou seja, do cátodo para o ânodo.

**Fator de Idealidade.** Parâmetro “ $n$ ” da Equação de Shockley que “ajusta” o comportamento real do diodo. Valores típicos situam-se na faixa  $1 < n < 2$  enquanto valores adequados para bons dispositivos estão próximos da unidade.

**Corrente de Saturação Reversa.** Parâmetro “ $I_0$ ” da Equação de Shockley, corresponde ao nível de corrente que se estabelece quando da *polarização reversa* do diodo, em níveis de potencial aplicado aos eletrodos de módulo inferior à tensão de ruptura (*break-down*).

**Reta de Carga.** Equação da reta que relaciona a corrente  $I$  que atravessa o diodo à diferença de potencial  $V$  aplicada aos seus eletrodos (terminais), e que é *definida pelo circuito externo* de polarização do dispositivo.

**Ponto de Operação.** Também chamado de “*ponto quiescente*” ou “*ponto Q*”, é o *ponto de intersecção* no plano  $I$ - $V$  entre a curva característica do diodo e a reta de carga do circuito de polarização. Pode ser obtido *graficamente*, via “plotagem” das curvas e verificação direta do ponto de intersecção, ou *analiticamente*, através da solução do sistema de duas equações a duas incógnitas (sistema *determinado*, porém *não-linear*).

No laboratório utilizaremos diodos retificadores, diodos *Zeners* e diodos emissores de luz (LEDs) para verificação experimental das características elétricas  $I$ - $V$  respectivas.

## PRÉ-RELATÓRIO

### Exercício 1. Características Elétricas dos Diodos

Pesquise em fontes confiáveis (listar referências) informações sobre as características  $I$ - $V$  de diodos retificadores, diodos Zeners e LEDs, bem como suas aplicações típicas em circuitos eletrônicos, para subsidiar a seção de *introdução teórica* do relatório parcial referente a esta atividade prática.

### Exercício 2. Montagem Experimental para Caracterização $I$ - $V$

Analise o circuito proposto (Fig.1 abaixo), em termos de seus *equivalentes de Thèvenin e de Norton*, para obtenção das características  $I$ - $V$  dos diodos. Quais seriam (teoricamente) as tensões *máxima* e *mínima* na derivação do potenciômetro na ausência do *dispositivo sob teste* (DUT) ? Que papel desempenham as resistências fixas de  $220\ \Omega$  ?

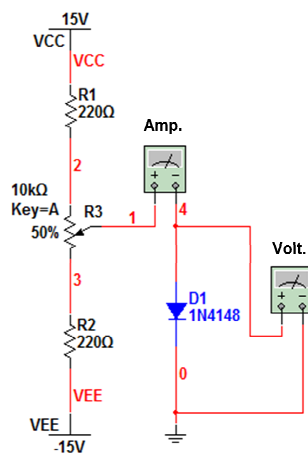


Fig. 1 – Caracterização  $I$ - $V$  utilizando um *amperímetro* e um *voltímetro*.

### Exercício 3. Análise do comportamento $I$ - $V$

- Seria possível estimar a *corrente reversa de saturação* ( $I_0$ ) do diodo retificador a partir dos pontos da sua curva  $I$ - $V$  obtidos com as tensões negativas ?
- Defina um critério para estabelecer a *tensão de limiar* da condução direta ( $V_{on}$ ).
- Considerando apenas os pontos de polarização acima do limiar, na polarização direta, seria possível estimar a *corrente reversa*  $I_0$  ? E o *fator de idealidade*  $n$  ? Explique.
- Quais são os valores esperados para os *limiares de condução direta*: de um diodo retificador de Silício; de um diodo Zener; e de um LED ? E para os *fatores de idealidade* ?

### Exercício 4. Análise de regime $cc$

Expresse a *reta de carga* e determine o *ponto Q* do circuito da Fig. 1, assumindo o diodo retificador operando no *limite máximo de polarização direta* (assuma:  $n = 1,5$ ;  $I_0 = 1\ \text{pA}$ ).

## LABORATÓRIO

---

### Atividade 1. Equivalentes de Norton e de Thèvenin

Execute a montagem do divisor de tensões da Fig. 1 sem DUT, e.g., mantendo a *derivação central do potenciômetro em circuito-aberto*, sem desconectar o voltímetro. Anote:

- a) o valor *mínimo* e o *máximo* da tensão, medidos no terminal central do potenciômetro;
- b) o que foi observado, i. é, se foi ou não possível controlar a excursão do nível de tensão com precisão (digamos com avanços de  $\sim 100\text{ mV}$ ) entre o valor mínimo e o valor máximo.

### Atividade 2 . Levantamento das Curvas I-V

- a) Conecte o *diodo retificador* (ref. 1N4148) ao terminal central do potenciômetro, da forma ilustrada na Fig. 1. Iniciando pela *tensão mínima* (e.g, *mais negativa*), excursione progressivamente o nível de tensão na derivação central do potenciômetro, de forma a obter um ponto experimental da curva I-V a intervalos regulares de tensão de  $\sim 50\text{ mV}$ . Registre se agora é possível controlar a excursão com precisão durante todo o intervalo.
- b) Repita o procedimento do item anterior com o *LED vermelho*. Registre o nível de tensão para o qual se inicia a eletroluminescência do LED. Observe se os limiares de condução direta e de eletroluminescência coincidem.
- c) Repita o procedimento do item (a) com o diodo Zener (**atenção: iniciar a excursão a partir do nível zero de tensão, seguindo progressivamente para os níveis positivos, até alcançar a tensão máxima; retornar novamente ao nível zero de tensão, agora seguindo regressivamente para os níveis negativos, até alcançar a tensão mínima**). Registre o que foi observado nas duas excursões (progressiva e regressiva, a partir do nível zero).

### Atividade 3 – Caracterização dinâmica

Proponha uma montagem para visualização direta, de forma dinâmica, das características I-V dos diodos, utilizando o *gerador de sinais* e o *osciloscópio* da bancada. (**sugestão:** Utilize a forma de onda “dente de serra” como fonte de tensão num circuito de polarização onde o resistor (colocado em série com o DUT) possa fornecer a leitura da corrente instantânea, através da leitura da tensão nos seus terminais. Com o osciloscópio no *modo dual* visualiza as formas de onda da tensão no CANAL 1 e da corrente no CANAL 2).

## RELATÓRIO

---

Prepare o relatório a partir dos dados colhidos. O relatório deve conter:

1. As anotações solicitadas nas atividades da parte prática
2. O pré-relatório “expandido” da equipe.
3. As respostas para as questões abaixo.

### 1) (1,5 pontos) Equivalentes de Norton e de Thèvenin (Atividade 1)

- a) (0,5) Quais foram as *tensões máxima e mínima* observadas no terminal central do potenciômetro na ausência de carga ? Compare com as previsões teóricas.
- b) (0,25) Para que servem as resistências fixas de  $220\ \Omega$  ?
- c) (0,25) Por que é mais difícil controlar a *tensão* entre os terminais dos diodos para níveis de polarização aplicados acima dos limiares de *condução direta* ?
- d) (0,25) Por que o nível de tensão máximo não mais foi alcançado na derivação central do potenciômetro quando um diodo estava conectado ?
- e) (0,25) Por que também foi difícil controlar a *tensão reversa* aplicada ao diodo Zener a partir de certo nível de tensão ? Que nome se dá a esse nível de tensão ?

### 2) (2,5 pontos) Levantamento das curvas *I-V* (Atividade 2)

Você deve ter verificado que os *limiares de condução direta* para os diodos retificador e Zener são próximos, enquanto que o limiar de condução direta para o LED é bem superior.

- a) (0,25) Que critério foi utilizado para definir os limiares de condução dos diodos ?
- b) (0,25) Quais foram os valores estimados para os limiares de condução direta nos três diodos e para o limiar de condução reversa para o diodo Zener ?
- c) (0,5) Qual a explicação para as semelhanças e discrepâncias observadas ?
- d) (0,5) Por que o limiar de condução direta coincide com o limiar de emissão de luz no LED ? Qual a origem física da luz emitida por esse dispositivo ?
- e) (0,5) O *diodo Zener* se destaca dos demais por possuir um *limiar de condução reversa* num nível negativo de tensão “relativamente próximo”. A origem física desse limiar de condução reversa é a mesma dos limiares de condução direta ? Explique.
- f) (0,5) O limiar de condução reversa é uma característica exclusiva dos diodos Zener ?

### 3) (2,0 pontos) Equação de Shockley (relativo à Atividade 2)

- a) (0,5) Foi possível observar experimentalmente o valor da *corrente reversa de saturação* ( $I_0$ ) na região de polarização reversa ?
- b) (0,5) Como proceder para estimar a *corrente reversa de saturação* ( $I_0$ ) e o *fator de idealidade* ( $n$ ) a partir dos pontos experimentais ?
- c) (0,5) É razoável admitir que as características *I-V* experimentais são bem ajustadas pela Equação de Shockley ? Os fatores de idealidade ( $n$ ) estimados para os três diodos caracterizados estão próximos ? E as correntes reversas de saturação ( $I_0$ ) ?
- d) (0,5) Como proceder para estimar as *resistências dinâmicas* ( $r_d$ ) a partir dos pontos experimentais obtidos na região acima dos limiares de condução ?

### 4) (2,0 pontos) Análise dos Dados Experimentais

- a) (0,5) Lance os pontos experimentais obtidos num *Editor de Gráficos* (sugestão: Origin ou Excel) e trace as curvas *I-V* para os três diodos caracterizados. Identifique os *níveis de limiar de condução direta* de acordo com o critério estabelecido anteriormente.
- b) (0,5) Estime os parâmetros da Equação de Shockley ( $n$  e  $I_0$ ), a partir dos pontos *acima do limiar de condução direta* das curvas experimentais, para os três diodos analisados. Qual é o valor da “tensão de Zener” ? Por que o “ $n$ ” do LED é maior ?
- c) (0,5) Edite a Equação de Shockley com os parâmetros estimados num *Editor de Equações* (sugestão: MathCAD ou MatLAB) e trace as *curvas I-V teóricas* para os três

diodos caracterizados, apenas nas regiões de polarização direta). Compare com as curvas experimentais obtidas no item (a).

- d) **(0,5)** A partir das curvas teóricas obtidas no item (b), estime os valores das *resistências dinâmicas* dos dispositivos acima do limiar de condução. Apenas para o Zener, estime a resistência dinâmica na região de operação reversa (região de ruptura).

**5) (1,0 ponto) Reta de carga e ponto quiescente**

Explique como se processa o levantamento dos pontos das curvas  $I$ - $V$  dos diodos em termos do comportamento da reta de carga e do seu ponto de interseção com a equação do diodo sob teste.

**6) (1,0 pontos) Caracterização dinâmica (Atividade 3)**

Caso tenha desenvolvido a Atividade 3, ilustre e explique sua montagem.

**OBSERVAÇÃO:** Na confecção de seu relatório verifique as “Normas para Apresentação de Relatórios”, atentando para o *check-list* na página inicial dessa apostila.



## Experiência 2

### DIODOS – APLICAÇÕES

---

Esta experiência tem como objetivos: verificar a dinâmica de funcionamento dos dispositivos (diodos retificador, Zener e LED) em um sistema de interesse prático, compreender as restrições impostas na etapa de projeto pelas suas limitações físicas, e abordar aspectos relativos ao dimensionamento dos componentes para atendimento a especificações de qualidade.

#### Revisão Bibliográfica:

- 1) Circuitos retificadores de meia-onda e de onda-completa;
- 2) Redes RC;
- 3) Regulação de tensão.

Alguns conceitos úteis:

**Linearização por partes.** Aproximação útil na aplicação de dispositivos que possuem *características elétricas intrinsecamente não-lineares*, para simplificação da análise e projeto de circuitos práticos. Consiste na substituição de trechos da curva característica elétrica por segmentos de reta, permitindo que o dispositivo seja substituído por *modelos equivalentes lineares* na análise dos circuitos, desde que sua operação seja restrita à “região linear”.

**Característica de Transferência.** Curva no plano *saída vs. entrada* que define a forma dos sinais de saída em função do tempo, que resultam da aplicação de formas de onda conhecida na entrada do circuito.

**Corrente direta máxima do diodo ( $I_{Dmáx}$ ).** Corrente cc máxima que um diodo pode conduzir sem prejuízo de sua estrutura física interna. Corresponde à condição de *máxima potência que o dispositivo consegue dissipar* em condições normais de operação e em regime de *polarização direta*.

**PIV (“Peak Inverse Voltage”).** Máxima *tensão reversa* aplicada a um diodo numa montagem específica, sem que este alcance a condição de *ruptura* (“break-down”) da junção. Tipicamente, se a tensão de ruptura do dispositivo for conhecida, damos  $V_Z$ , deve-se garantir que  $V_{PIV} < (2/3)V_Z$ .

No laboratório utilizaremos diodos retificadores, diodos *Zener* e diodos emissores de luz (LED) para verificação experimental da operação em regime dinâmico num sistema de interesse prático: uma fonte cc de + 5 V.



## PRÉ-RELATÓRIO

### Exercício 1. Linearização por Partes

Pesquise em fontes confiáveis (listar referências) informações sobre os modelos eletrônicos equivalentes correspondentes à *linearização por partes* das características *I-V* de diodos retificadores, diodos Zener e LEDs, bem como suas aplicações típicas em circuitos eletrônicos, para subsidiar a seção de *introdução teórica* do relatório parcial referente a esta atividade prática.

### Exercício 2. Montagem Experimental de um Retificador de Meia-Onda

Analise o circuito proposto (Fig.1 abaixo) para retificação do sinal *ac* da fonte do Kit Scientech ST 2613 (5  $V_{rms}$ , 60 Hz). Qual a expressão para a  $V_{PIV}$  desta montagem? Ilustre as formas de onda de entrada e de saída considerando o modelo linearizado para o diodo retificador (a partir da análise dos dados da **Experiência 1** da última aula).

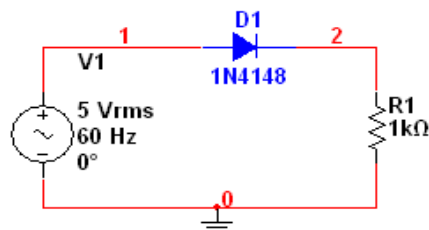


Fig. 1 – Montagem para retificação de meia-onda.

### Exercício 3. Montagem Experimental de Retificadores de Onda-Completa

Analise os circuitos propostos (Fig.2 a-b) para retificação do sinal *ac* da fonte do Kit Scientech ST 2613 (5  $V_{rms}$ , 60 Hz). Quais as expressões para a  $V_{PIV}$  destas montagens? Ilustre as formas de onda de entrada e de saída considerando o modelo linearizado para o diodo retificador (a partir da análise dos dados da **Experiência 1** da última aula).

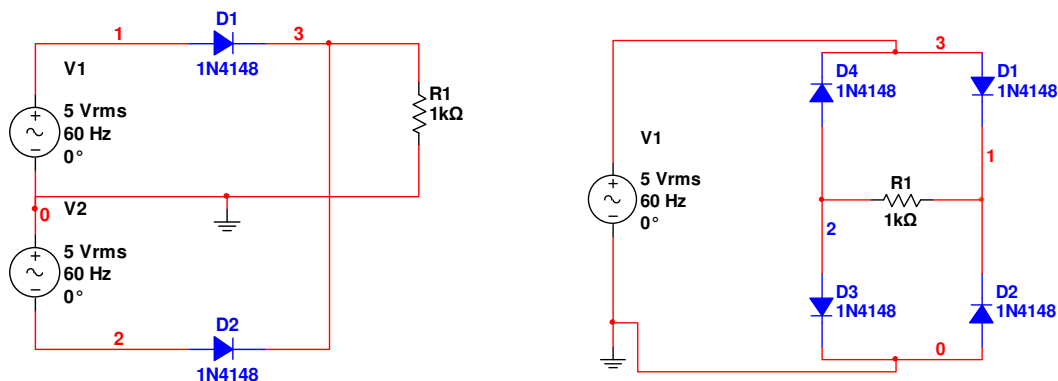


Fig. 2 – Montagens para retificação de onda-completa:

a) utilizando a derivação central como referência zero; b) utilizando a montagem em ponte com 4 diodos.

### Exercício 4. Implementação do Filtro Capacitivo

Dimensione a capacitância necessária a ser associada em paralelo com a resistência de carga na Fig. 1, para garantia de uma *tensão de ripple* inferior a 0,5 V. Para a implementação do filtro com o capacitor escolhido, estime a *corrente média* que fluiria no diodo. É possível eliminar completamente o *ripple* elevando o valor da capacitância? Justifique sua resposta.

### Exercício 5. Regulação de Tensão utilizando um Zener

Considere o circuito proposto na Fig. 3, onde a capacitância assumirá o mesmo valor dimensionado anteriormente (cf. Exercício 4). O Zener empregado (4V7) e o LED (vermelho) seriam substituídos por seus *modelos equivalentes linearizados* (a partir da análise dos dados da **Experiência 1** da última aula). A corrente drenada pela carga variará na faixa 5mA - 50mA.

- Estime o valor da resistência  $R_1$  a ser empregada na montagem.
- Estime o valor da resistência  $R_2$  que limita a corrente no LED indicador a 20 mA.
- Estime a *regulação de linha* e a *regulação de carga* desta fonte cc.

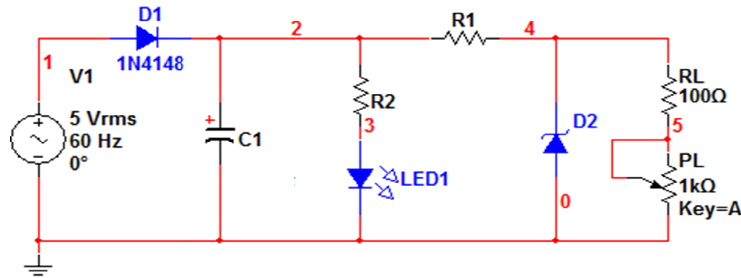


Fig. 3 – Montagem sugerida para implementação de uma fonte cc de 5 V regulada por um diodo Zener

### Exercício 6. Regulação de Tensão utilizando Diodos Retificadores

Considerando que um *conjunto de 8 diodos retificadores associados em série* com a mesma polaridade seja conectado em substituição ao Zener da Fig. 3 (cf. Fig. 4 abaixo), repita as estimativas do **item c** do **exercício anterior**. Qual seria o *modelo linearizado equivalente* desta associação? A substituição seria vantajosa? Justifique sua resposta.

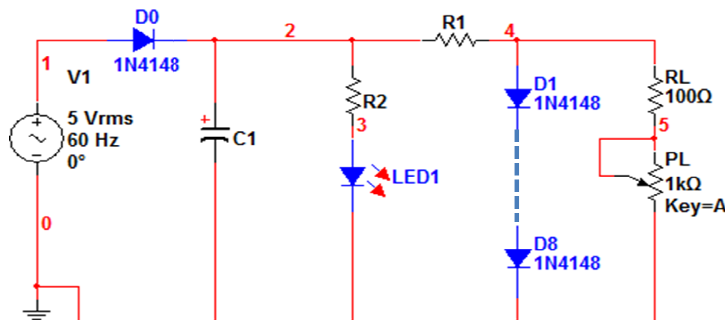


Fig. 4 – Montagem sugerida para implementação da mesma fonte cc de 5 V regulada por diodos retificadores.

## LABORATÓRIO

---

### Atividade 1. Retificador de Meia-Onda

Execute a montagem do *retificador de meia-onda* da Fig. 1 utilizando o diodo retificador *1N4148*, cuja característica elétrica *I-V* foi obtida na aula passada. Visualize a *característica de transferência* e as *formas de onda de entrada e de saída* com o auxílio do osciloscópio da bancada (CANAL 1: sinal  $5 V_{rms}$ ; CANAL 2: sinal retificado na carga). Para o relatório *anote*:

- a) a *tensão de limiar* de condução direta do diodo;
- b) o período observado das formas de onda;
- c) o valor de pico da corrente no diodo (estimada);
- d) o valor da corrente *cc* na carga (estimada);
- e) o valor da diferença (em *volts*) observada entre os picos das formas de onda de entrada e de saída.

### Atividade 2 . Retificadores de Onda-Completa

Execute sequencialmente as montagens dos *retificadores de onda-completa* ilustradas na Fig. 2 a-b utilizando diodos retificadores *1N4148*. Visualize a *característica de transferência* (somente para a montagem da Fig. 2 a) e as *formas de onda de entrada e de saída* com o auxílio do osciloscópio da bancada (CANAL 1: sinal  $5 V_{rms}$ ; CANAL 2: sinal retificado na carga). Para o relatório *anote*:

- a) os valores das correntes *cc* na carga (estimadas) em cada montagem;
- b) os valores das diferenças (em *volts*) observadas entre os picos das formas de onda de entrada e de saída (somente para a montagem da Fig. 2 a).

### Atividade 3. Filtro Capacitivo

Com o auxílio do osciloscópio verifique a amplitude da tensão de *ripple* sobre a resistência de carga no circuito da Fig. 1, quando o capacitor dimensionado anteriormente (Exercício 4) estiver conectado.

### Atividade 4. Regulação de Tensão utilizando o Zener

Utilizando a fonte *ac ajustável* do kit *Scientech ST 2613*, reduza a amplitude do sinal de entrada de 10% relativamente à tensão de entrada anterior. Verifique com isso a *razão de rejeição de "ripple"*, as *regulações de linha e de carga* da fonte *cc* implementada pelo circuito da Fig. 3 nas três situações:

- a) na *ausência de carga*, i.e, quando os terminais de saída estão em *circuito-aberto*;
- b) na presença da *carga mínima* ( $1.100 \Omega$ );
- c) na presença da *carga máxima* ( $100 \Omega$ ).

### Atividade 5. Regulação de Tensão utilizando Diodos Retificadores

Com o mesmo procedimento descrito na atividade anterior, verifique a *razão de rejeição de "ripple"*, as *regulações de linha e de carga* da fonte *cc* implementada pelo circuito da Fig. 4 nas três situações:

- a) na *ausência de carga*, i.e, quando os terminais de saída estão em *circuito-aberto*;
- b) na presença da *carga mínima* ( $1.100 \Omega$ );
- c) na presença da *carga máxima* ( $100 \Omega$ ).

## RELATÓRIO

---

Prepare o relatório a partir dos dados colhidos. O relatório deve conter:

1. As anotações solicitadas nas atividades da parte prática.
2. O pré-relatório “expandido” da equipe.
3. As respostas para as questões abaixo.

### 1) (2,0 pontos) Retificador de meia-onda (Atividade 1)

- a) (0,25) Qual é a expressão para a  $V_{PIV}$  da montagem da Fig. 1 ?
- b) (0,25) Qual foi o modelo linearizado por partes utilizado para previsão teórica da forma de onda da tensão através da carga ?
- c) (0,25) Qual é a tensão de limiar de condução direta do diodo, segundo a forma de onda de saída ? Justifique sua resposta.
- d) (0,25) Qual foi o *período* observado das formas de onda de entrada e de saída ?
- e) (0,25) Qual foi o valor de pico estimado para a corrente no diodo ?
- f) (0,25) Qual foi o valor estimado para a corrente  $cc$  na carga ?
- g) (0,5) Qual foi o valor da diferença entre as tensões de pico observadas nas formas de onda de entrada e de saída ? Este valor é coerente com o modelo teórico adotado ?

### 2) (2,0 pontos) Retificadores de onda-completa (Atividade 2)

- a) (0,5) Quais são as expressões para a  $V_{PIV}$  das montagens da Fig.2 a-b ?
- b) (0,5) Quais foram os valores estimados para as correntes  $cc$  na carga em cada caso ?
- c) (0,5) Quais foram os valores das diferenças entre as tensões de pico observadas nas formas de onda de entrada e de saída em cada caso considerado ?
- d) (0,5) Que valor seria esperado para a diferença entre os picos no caso da Fig. 2 b ?

### 3) (2,0 pontos) Filtro capacitivo (Atividade 3)

- a) (0,5) Que valor o capacitor teria para uma amplitude de *ripple* de 0,5 V exatamente ?
- b) (0,5) Que valor seria estimado para a corrente média fluindo no diodo neste caso ?
- c) (0,5) Qual o valor da capacitância utilizada na montagem real ?
- d) (0,5) Qual foi o valor da amplitude do *ripple* observada ?

### 4) (2,0 pontos) Regulação de tensão utilizando diodo Zener (Atividade 4)

- a) (0,25) Qual foi o valor da resistência  $R_1$  empregada no projeto da fonte  $cc$  ?
- b) (0,25) Qual foi o valor da resistência  $R_2$  empregada para limitar a corrente no LED ?
- c) (0,25) Quais foram os modelos linearizados por partes utilizados para o LED e para o Zener no projeto da fonte ?
- d) (0,25) Qual foi a *regulação de linha* estimada para a fonte  $cc$  na ausência de carga ?
- e) (0,5) Qual foi a *razão de rejeição de “ripple”* e quais foram as *regulações de linha e de carga* estimadas para a fonte  $cc$  na presença da *carga máxima* ?
- f) (0,5) Qual foi a *razão de rejeição de “ripple”* e quais foram as *regulações de linha e de carga* estimadas para a fonte  $cc$  na presença da *carga mínima* ?

### 5) (2,0 pontos) Regulação de tensão utilizando diodos retificadores (Atividade 5)

- a) (0,5) Qual foi o modelo linearizado equivalente para a associação dos 8 diodos ?
- b) (0,25) Qual(is) seria(m) a(s) vantagem(ns)/desvantagem(ns) da substituição ?
- c) (0,25) Qual foi a *regulação de linha* estimada para a fonte  $cc$  na ausência de carga ?
- d) (0,5) Qual foi a *razão de rejeição de “ripple”* e quais foram as *regulações de linha e de carga* estimadas para a fonte  $cc$  na presença da *carga máxima* ?
- e) (0,5) Qual foi a *razão de rejeição de “ripple”* e quais foram as *regulações de linha e de carga* estimadas para a fonte  $cc$  na presença da *carga mínima* ?

**OBSERVAÇÃO:** Na confecção de seu relatório verifique as “Normas para Apresentação de Relatórios”, atentando para o *check-list* na página inicial dessa apostila.

## Experiência 3

### TBJs – CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

---

Esta experiência tem como objetivos: verificar os comportamentos  $I$ - $V$  de entrada e de saída dos Transistores Bipolares de Junção (TBJ), compreender o princípio da *amplificação de corrente* no TBJ e apresentar aspectos relativos ao projeto de fontes de alimentação  $cc$  empregando esses dispositivos.

#### Revisão Bibliográfica:

- 1) Junções  $p$ - $n$ ;
- 2) Princípio físico de funcionamento dos TBJs;
- 3) Polarização de TBJs.

Alguns conceitos úteis:

**Equação de Shockley.** Também conhecida como “equação do diodo”, deriva dos processos de difusão de portadores através da interface entre os materiais nas junções  $p$ - $n$  e metal-semicondutor. Modela o *comportamento não-linear* da curva característica  $I$ - $V$  de entrada do TBJ, sendo utilizada em projetos para determinação do “ponto de operação” do dispositivo nas aplicações em circuitos elétricos.

**Tensão de limiar ( $V_{on}$ ).** Também referida como “tensão de joelho” corresponde à tensão de polarização *direta* da *junção base-emissor* a partir da qual o dispositivo começa a conduzir corrente apreciável no terminal do *coletor*, mesmo quando a *junção base-coletor* se encontra *reversamente polarizada*. Delimita a “fronteira” entre a operação no *corte* e na *região ativa* do TBJ.

**Reta de Carga de Entrada.** Equação da reta que relaciona a corrente  $I_B$  fluindo no terminal da *base* à ddp  $V_{BE}$  aplicada entre os terminais da *base* e do *emissor* do TBJ, e que é *definida pelo circuito externo* de polarização de entrada do dispositivo. A intersecção no plano  $i_B - v_{BE}$  da *reta de carga de entrada* com uma das curvas da *família de características de entrada* do TBJ (específica para uma dada ddp  $V_{CE}$  aplicada entre os terminais do *coletor* e do *emissor*) determina o *ponto de operação quiescente* do circuito de entrada.

**Reta de Carga de Saída.** Equação da reta que relaciona a corrente  $I_C$  fluindo no terminal do *coletor* à ddp  $V_{CE}$  aplicada entre os terminais do *coletor* e do *emissor* do TBJ, e que é *definida pelo circuito externo* de polarização de saída do dispositivo. A intersecção no plano  $i_C - v_{CE}$  da *reta de carga de saída* com uma das curvas da *família de características de saída* do TBJ (específica para uma dada ddp  $V_{BE}$  aplicada entre os terminais da *base* e do *emissor* e/ou para uma dada corrente  $I_B$  fluindo no terminal da *base*) determina o *ponto de operação quiescente* do circuito de saída.

No laboratório utilizaremos um TBJ  $n-p-n$  para verificação experimental das características elétricas  $I-V$  de entrada ( $i_B - v_{BE}$ ) e de saída ( $i_C - v_{CE}$ ).

## PRÉ-RELATÓRIO

### Exercício 1. Características Elétricas dos TBJ

Pesquise em fontes confiáveis (listar referências) informações sobre a origem teórica das curvas características  $I-V$  de entrada e de saída de TBJs, bem como das distorções atribuídas ao *Efeito Early*, para subsidiar a seção de *introdução teórica* do relatório parcial referente a esta atividade prática.

### Exercício 2. Montagem Experimental para Caracterização $I-V$ de entrada

Analise o circuito proposto na Fig.1a abaixo em termos de seu *equivalente de Thévenin* para obtenção da *característica de entrada*  $i_B - v_{BE}$  do TBJ. Que comportamento se espera da curva  $i_B - v_{BE}$  para um dado valor (fixo) de polarização  $V_{CE}$ ? Por que o valor de  $V_{CE}$  afetaria o comportamento desta curva? Que comportamento seria esperado para uma condição de medição com o terminal *coletor em aberto* ( $i_B - v_{BE0}$ )?

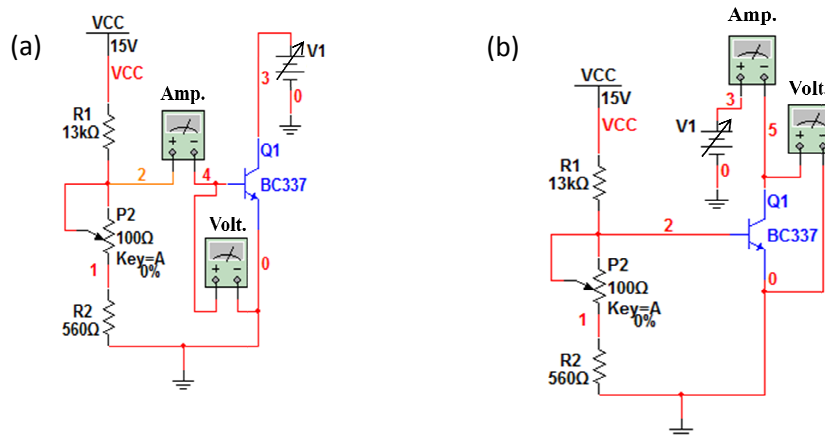


Fig. 1 – Montagens para caracterização elétrica do TBJ utilizando um *amperímetro*, um *voltímetro* e uma *fonte cc ajustável* ( $V_1$ ):  
a) levantamento da curva característica  $i_B - v_{BE}$  de entrada; b) levantamento da curva característica  $i_C - v_{CE}$  de saída.

### Exercício 3. Montagem Experimental para Caracterização $I-V$ de saída

Com relação ao circuito proposto na Fig.1b, analise o comportamento da corrente de coletor  $i_C$  com base na dinâmica interna do fluxo dos portadores de carga no TBJ para uma *tensão de entrada fixa*  $v_{BE}$  e uma *tensão de saída* variando continuamente  $0 < v_{CE} < 15 \text{ volts}$ . Que comportamento se espera da curva  $i_C - v_{CE}$  para um dado valor (fixo) de polarização  $v_{BE}$ ? Por que o valor da corrente  $i_C$  não seria independente do valor da tensão  $v_{CE}$  para um dado valor (fixo) de  $v_{BE}$ ? Que comportamento seria esperado para uma condição de medição com o terminal *base em aberto* ( $i_C - v_{CE0}$ )?

### Exercício 4. Análise de regime cc com resistência de coletor $R_C$

Considere que uma resistência  $R_C$  será conectada entre o terminal do coletor e o terminal da fonte cc ajustável ( $V_1$ ), posteriormente à etapa de caracterização elétrica do TBJ. Que efeito terá  $R_C$  sobre o valor da corrente  $i_C$  para uma dada tensão de entrada fixa  $v_{BE}$ ? Determine as *equações das retas de carga* e os *pontos de operação* (*pontos Q*) dos circuitos de entrada e de saída. Que importância teria a estabilidade da fonte cc para a determinação da *corrente de entrada*  $i_B$  do TBJ? Que importância tem a estabilidade da mesma fonte cc para a determinação da *corrente de saída*  $i_C$  quando o *Efeito Early* for desprezível? E quando o *Efeito Early* for considerável?

## LABORATÓRIO

---

### Atividade 1. Equivalentes de Thèvenin

Execute a montagem do divisor de tensões com a fonte cc fixa ( $V_{CC} = 15V$ ) da Fig. 1 sem carga (e.g., mantendo a saída do divisor em *circuito-aberto*), conectando o voltímetro. Anote:

- a) os valores *mínimo* e *máximo* de tensão *reais* no terminal de saída do divisor;
- b) o que foi observado, i. é, se foi ou não possível controlar a excursão do nível de tensão com precisão (digamos com avanços de  $\sim 100\text{ mV}$ ) entre o valor mínimo e o valor máximo.

### Atividade 2 . Levantamento de *Curvas Características de Entrada* $i_B - v_{BE}$

- a) Conecte o terminal da *base* do TBJ *n-p-n* (ref. BC 337) ao terminal de saída do divisor de tensões, o terminal do *emissor* à referência de potencial nulo (*terra*) e o terminal do *coletor* à fonte cc ajustável (0-15 volts) do Kit Scientech ST 2613, cf. ilustrado na Fig. 1a. Ajuste a fonte cc do kit didático em  $\sim 5\text{ volts}$ . Iniciando pela *tensão mínima*, excursione progressivamente o nível de tensão no divisor através do potenciômetro do circuito de entrada, de forma a obter um ponto experimental da curva  $i_B - v_{BE}$  a intervalos regulares de tensão de  $\sim 100\text{ mV}$ .
- b) Ajuste a fonte cc do kit didático em  $\sim 10\text{ volts}$  e repita o procedimento do item anterior.
- c) Ajuste a fonte cc do kit didático em  $\sim 15\text{ volts}$  e repita o procedimento do item (a).
- d) Desconecte a fonte cc fixa do kit didático e repita o procedimento do item (a).

### Atividade 3 . Levantamento de *Curvas Características de Saída* $i_C - v_{CE}$

- a) Conecte o terminal da *base* do TBJ *n-p-n* (ref. BC 337) ao terminal de saída do divisor de tensões, o terminal do *emissor* à referência de potencial nulo (*terra*) e o terminal do *coletor* à fonte cc ajustável (0-15 volts) do Kit Scientech ST 2613, cf. ilustrado na Fig. 1b. Mantendo *nulo* o potencial na fonte cc ajustável do kit didático, ajuste o potenciômetro do circuito de entrada de forma a *fixar a tensão de polarização*  $V_{BE}$  em  $\sim 600\text{ mV}$ . Iniciando pela *tensão nula*, excursione progressivamente o nível de tensão da fonte cc ajustável do kit, de forma a obter um ponto experimental da curva  $i_C - v_{CE}$  a intervalos regulares de tensão de  $\sim 100\text{ mV}$  no intervalo 0-15 volts.
- b) Após *anular novamente o potencial da fonte cc*, ajuste o potenciômetro do circuito de entrada *fixando a tensão de polarização*  $V_{BE}$  agora em  $\sim 650\text{ mV}$  e repita o procedimento do item anterior.
- c) Após *anular novamente o potencial da fonte cc*, ajuste o potenciômetro do circuito de entrada *fixando a tensão de polarização*  $V_{BE}$  agora em  $\sim 700\text{ mV}$  e repita o procedimento descrito no item (a).
- d) Desconecte o terminal da base do terminal de saída do divisor de tensões e repita o procedimento do item (a).

### Atividade 4 – Verificação do efeito da *resistência de coletor* $R_C$

Conecte uma resistência  $R_C = 1\text{ k}\Omega$  entre o terminal do coletor e o terminal da fonte cc ajustável ( $V_I$ ), posteriormente à etapa de caracterização elétrica do TBJ. Repita os procedimentos sugeridos na **Atividade 3, itens a-c**, para verificar o efeito da presença de  $R_C$  sobre o valor da corrente  $i_C$  em cada tensão de entrada fixa  $V_{BE}$ . Compare os resultados.

### Atividade 5 - EXTRA

Proponha uma montagem para visualização direta, de forma dinâmica, das características de saída  $i_C - v_{CE}$  do TBJ, utilizando o gerador de sinais e o osciloscópio.

## RELATÓRIO

---

Prepare o relatório a partir dos dados colhidos. O relatório deve conter:

1. As anotações solicitadas nas atividades da parte prática
2. O pré-relatório “expandido” da equipe.
3. As respostas para as questões abaixo.

### 1) (1,5 ponto) Equivalente de Thèvenin (Atividade 1)

- a) (0,5) Quais foram as *tensões máxima e mínima* observadas no terminal de saída do divisor de tensões na ausência de carga ? Compare com as previsões teóricas.
- b) (0,25) Para que servem as resistências fixas  $R_1 = 13\text{ k}\Omega$  e  $R_2 = 560\text{ }\Omega$  ?
- c) (0,25) Por que é mais difícil controlar a *tensão* no terminal do divisor (i. e,  $V_B$ ) para níveis de polarização aplicados acima de  $\sim 600\text{ mV}$  ?
- d) (0,5) Por que o *nível máximo de corrente entrando no terminal da base* (i. e,  $I_B$ ) não alcança a escala de  $\text{mA}$ , como seria esperado numa junção  $p-n$  comum ?

### 2) (2,5 pontos) Levantamento das curvas características de entrada $i_B - v_{BE}$ (Atividade 2)

Você deve ter verificado que o *limiar de condução direta da junção base-emissor do TBJ* não é afetado pela tensão aplicada entre os terminais de *coletor* e de *emissor* ( $V_{CE}$ ), mas que os valores máximos da corrente entregue ao terminal da *base* ( $I_B$ ) para o valor máximo da tensão de entrada ( $V_{BE, \text{Máx}}$ ) são menores para valores maiores de  $V_{CE}$ .

- a) (0,5) Quais foram os *valores máximos de corrente de entrada* ( $I_B$ ) medidos para os valores estabelecidos da tensão de saída ( $V_{CE}$ ) ? Qual é o valor estimado ?
- b) (1,5) Qual a explicação para as semelhanças e discrepâncias observadas ?
- c) (0,5) Qual a explicação para o comportamento observado na condição de levantamento da curva  $i_B - v_{BE}$  com o *terminal do coletor em aberto* ?

### 3) (4,0 pontos) Levantamento das curvas características de saída $i_C - v_{CE}$ (Atividade 3)

Você deve ter verificado que, após fixar a *tensão da junção base-emissor* ( $V_{BE}$ ) do TBJ em um nível  $cc$  (i.e, em  $600\text{ mV}$ ,  $650\text{ mV}$  ou  $700\text{ mV}$ ) a *corrente no terminal do coletor* ( $I_C$ ) é pouco afetada pela tensão aplicada entre os terminais de *coletor* e de *emissor* ( $V_{CE}$ ), para valores tais como  $V_{CE} > 1\text{ volt}$ . Contudo, na faixa  $1 < V_{CE} < 15\text{ volts}$  as maiores variações de  $I_C$  com  $V_{CE}$  foram verificadas para os maiores valores de  $V_{BE}$ .

- a) (1,5) Quais foram os valores *máximos e mínimos* da corrente de saída ( $I_C$ ) medidos nos extremos do intervalo de variação  $1 < V_{CE} < 15\text{ volts}$ , para os valores estabelecidos da tensão de entrada ( $V_{BE}$ ) ? Quais são os valores estimados para  $I_C$  em cada caso ?
- b) (1,5) Qual o valor estimado da relação  $\Delta V_{CE} / \Delta I_C$  em cada caso do item anterior ?
- d) (0,5) Qual a explicação para as semelhanças e discrepâncias observadas nos níveis de corrente  $I_C$  para os níveis de tensão de controle  $V_{BE}$  ?
- e) (0,5) Qual a explicação para o comportamento observado na condição de levantamento da curva  $i_C - v_{CE}$  com o *terminal da base em aberto* ?

### 4) (1,0 ponto) Verificação do efeito da *resistência de coletor* $R_C$ (Atividade 4)

Explique como se processa o levantamento dos pontos das curvas  $i_B - v_{BE}$  e  $i_C - v_{CE}$  dos TBJs em termos do comportamento das *retas de carga de entrada e de saída* e dos respectivos pontos de interseção com as curvas características elétricas de entrada e de saída.

### 5) (1,0 pontos) Teste Dinâmico (Atividade 5 - EXTRA)

Caso tenha desenvolvido a Atividade 5, ilustre e explique sua montagem.

**OBSERVAÇÃO:** Na confecção de seu relatório verifique as “Normas para Apresentação de Relatórios”, atentando para o *check-list* na página inicial dessa apostila.



## Experiência 4

### TBJs – APLICAÇÕES

---

Esta experiência tem como objetivos: verificar a dinâmica de funcionamento dos dispositivos (diodos retificador, Zener e LED, e transistor bipolar de junção - TBJ) em um sistema de interesse prático, compreender as restrições impostas na etapa de projeto pelas suas limitações físicas, abordar aspectos relativos ao dimensionamento dos componentes para atendimento a especificações de qualidade, e verificar a estabilidade da tensão da fonte regulada quanto a variações da tensão da rede pública e da resistência de carga.

#### Revisão Bibliográfica:

- 1) Circuitos retificadores;
- 2) Redes RC;
- 3) Regulação de tensão;
- 4) Transistores bipolares de junção - TBJs;
- 5) Análise cc de circuitos com TBJs.

Alguns conceitos úteis:

**Linearização por partes.** Aproximação útil na aplicação de dispositivos que possuem características elétricas *intrinsecamente não-lineares*, para simplificação da análise e do projeto de circuitos práticos. Consiste na substituição de trechos da curva característica elétrica por segmentos de reta, permitindo que o dispositivo seja substituído por *modelos equivalentes lineares* na análise dos circuitos, desde que sua operação seja restrita à “região linear”.

**Corrente direta máxima do diodo ( $I_{Dmáx}$ ).** Corrente cc máxima que um diodo pode conduzir sem prejuízo de sua estrutura física interna. Corresponde à condição de *máxima potência que o dispositivo consegue dissipar* em condições normais de operação e em regime de polarização direta.

**Sinal de Ripple ( $V_r$ ).** Forma de onda decorrente dos sucessivos ciclos de recarga e descarga do componente capacitivo na rede RC que implementa o filtro de uma fonte cc, num dos estágios do processo de retificação da tensão ac da rede elétrica de distribuição.

**Tensão de limiar ( $V_{BEon}$ ).** Também referida como “tensão de joelho”, corresponde à *tensão de polarização direta da junção base-emissor (JBE)* a partir da qual o dispositivo começa a conduzir níveis apreciáveis de corrente de base ( $I_B$ ) e de coletor ( $I_C$ ), quando há uma *ddp* aplicada entre os terminais de coletor e emissor ( $V_{CE}$ ).

**Tensão de saturação ( $V_{CE,sat}$ ).** Diferença de potencial entre os terminais de coletor e de emissor a partir da qual ocorre a efetiva *polarização reversa da junção base-coletor (JBC)*, concomitante à *polarização direta da junção base-emissor (JBE)*, acarretando uma relativa independência do nível de corrente de coletor  $I_C$  para com a *ddp* aplicada entre os terminais de coletor e emissor ( $V_{CE}$ ). Essa condição de independência de  $I_C$  com  $V_{CE}$  caracteriza a *região ativa* de operação do TBJ.

**Região ativa.** Região das características de saída do TBJ ( $i_C - v_{CE}$ ) onde o nível de corrente de saída ( $i_C$ ) independe do nível da tensão de saída ( $v_{CE}$ ), dependendo apenas do nível da tensão de entrada ( $v_{BE}$ ). Esta é a região onde o transistor deve operar para promover a *estabilidade da corrente cc entregue à carga (corrente de coletor,  $I_C$ )* diante das *ondulações do ripple na tensão coletor-emissor ( $v_{CE}$ )*. Fisicamente, corresponde à polarização do dispositivo que promove a “polarização reversa da JBC”, restringindo o controle da corrente de saída  $i_C$  à tensão de entrada  $v_{BE}$ .

**Região de Corte.** Região das características de saída do TBJ onde o nível de corrente de saída ( $i_C$ ) é efetivamente zero, independe do nível da tensão de saída ( $v_{CE}$ ), em consequência de um nível de tensão de entrada ( $v_{BE}$ ) inferior ao valor crítico ( $V_{BEon}$ ). Fisicamente, corresponde à polarização do dispositivo que não promove o “trânsito” dos portadores (i. e, dos majoritários nas regiões de emissor e coletor ) através da região de base, que daria origem às correntes de entrada ( $I_B$ ) e de saída ( $I_C$ ).

**Região de Saturação.** Região das características de saída do TBJ onde o nível de corrente de saída ( $i_C$ ) é determinada não somente pela tensão de controle na entrada ( $v_{BE}$ ) mas também pela tensão de saída ( $v_{CE}$ ). Fisicamente, corresponde à polarização do dispositivo tal que as junções *p-n internas (JBE e JBC)* não oferecem “barreiras efetivas” para a injeção dos portadores majoritários das regiões de emissor e de coletor na região de base, “saturando” a região de base de portadores minoritários e reduzindo significativamente a resistência medida entre os terminais de saída do TBJ.

No laboratório utilizaremos um TBJ *n-p-n* de aplicação geral (ref. BC 337) para implementação de *fontes reguladas de tensão* em duas configurações usuais de circuito.

## PRÉ-RELATÓRIO

### Exercício 1. Fontes reguladas de tensão

Pesquise em fontes confiáveis (listar referências) informações sobre as implementações usuais de fontes reguladas utilizando componentes discretos e *CIs reguladores monolíticos*, bem como aplicações típicas dessas fontes em circuitos eletrônicos analógicos e digitais, para subsidiar a seção de *introdução teórica* do relatório parcial referente a esta atividade prática. Defina *razão de rejeição de "ripple" ( $R_{rr}$ )*, *regulação de linha ( $Reg_L$ )* e *regulação de carga ( $Reg_C$ )* e mostre como se determinam esses parâmetros/requisitos de projeto a partir da observação da tensão da rede pública e da tensão de saída sobre a carga.

### Exercício 2. Montagem experimental das fontes reguladas com TBJ

Analise os circuitos propostos (Fig.1 a-c) para verificação da estabilidade da tensão fornecida à resistência de carga pelas fontes reguladas nessas configurações. Considere que a fonte *ac* (+10  $V_{rms}$ ) do *Kit Scientech ST 2613* será utilizada para fornecer o sinal para retificação, simulando o sinal *ac* disponível na rede pública através do secundário de um transformador. Dimensione a capacitância  $C_1$  do filtro de entrada, bem como a resistência  $R_1$  de polarização do LED, para que as oscilações de *ripple* não sejam superiores a 5 % do valor *cc* da tensão no terminal de *coletor* do TBJ ( $Q_1$ ). Estime as *correntes dos coletores ( $i_C$ )* e considere as *resistências "vistas" a partir daqueles terminais como sendo idealmente infinitas*. Estime também a corrente média fluindo através do(s) diodo(s) retificador(es).

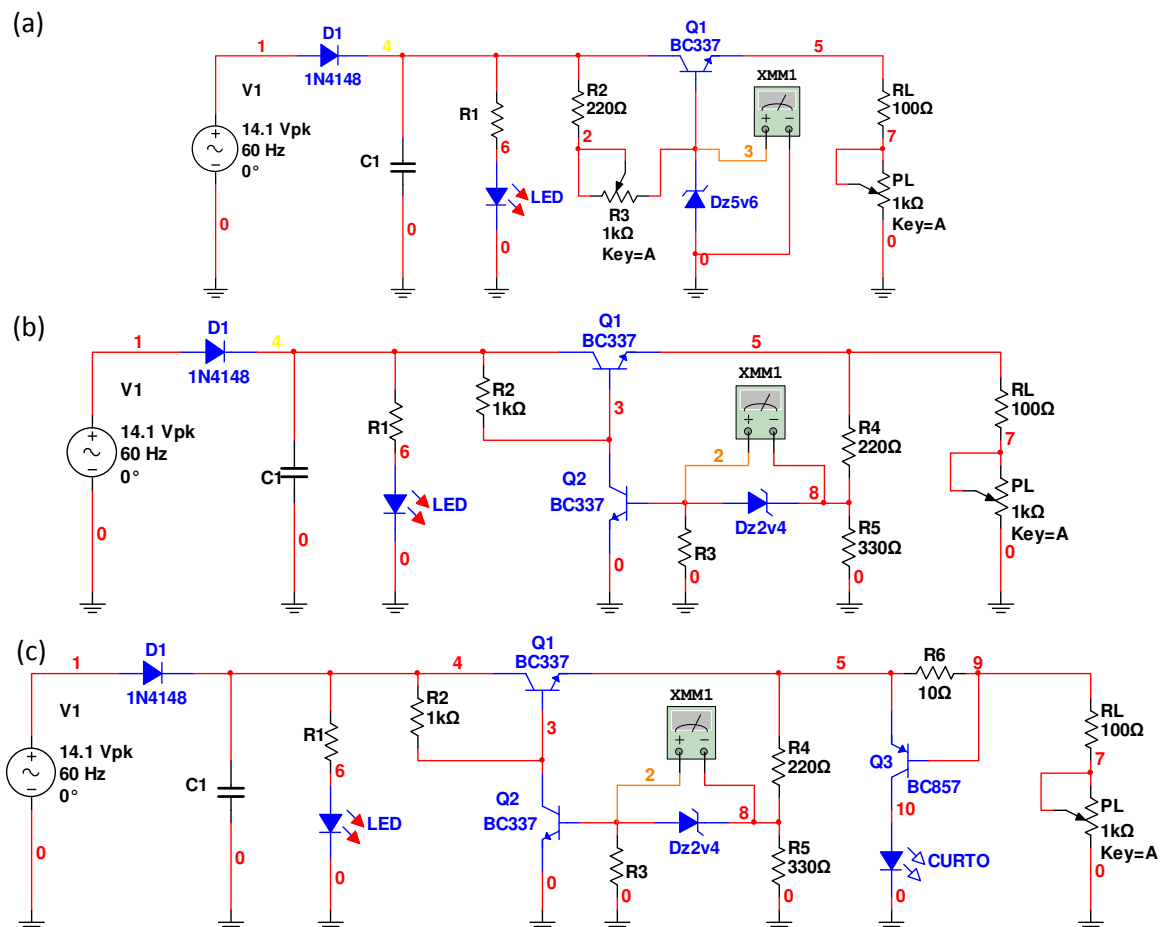


Fig. 1 – Montagens para verificação da estabilidade das tensões entregues às resistências de carga conectadas nas saídas dos circuitos: a) fonte regulada típica; b) fonte regulada aprimorada; c) fonte regulada com proteção contra curto-circuito.

**Importante:** Um voltímetro está sendo empregado para verificação do estado de funcionamento dos diodos reguladores Zener.

### Exercício 3. Avaliação do desempenho da fonte regulada típica

O circuito ilustrado na Fig.1a utiliza um *diodo Zener* de 5,6 volts e o TBJ *n-p-n* de aplicação geral caracterizado a partir da análise dos dados da **Experiência 3** (ref. BC 337), com  $h_{FE} \# 200$  (valor típico), para implementação de uma *fonte regulada de tensão de +5 V*. Sabe-se que o *Zener* mantém a tensão nos seus terminais estável desde que seja percorrido por uma corrente não inferior a 10 mA, e que sua resistência dinâmica no ponto de operação do circuito é de  $r_z = 3,8 \Omega$ .

- Explique como este circuito “reagiria” a variações da tensão de saída sobre uma carga de valor fixo, assumindo que o Zener mantém a tensão de base  $V_B$  estável.
- Estime os valores *mínimo* e *máximo* da corrente e da tensão no Zener, obtidas nas condições extremas de excursão do potenciômetro  $R_3$ , admitindo válido o modelo linearizado na operação na região de ruptura reversa.
- Estime os valores *mínimo* e *máximo* da corrente da base do TBJ ( $I_B$ ), obtidas nas condições extremas de carregamento da fonte (i.e, para  $R_L = 1,1 k\Omega$  e para  $R_L = 100 \Omega$ ), admitindo que o TBJ opere na *região ativa* com o valor típico de  $h_{FE}$  dado.
- Obtenha expressões que lhe permitam estimar as *regulações de linha* (R.L.) e de carga (R.C.), considerando a *tensão na JBE constante* ( $V_{BE} = 600 mV$ ).
- Qual o valor *mínimo* da carga  $R_L$  que pode ser alimentada por essa fonte ?
- A performance dessa fonte melhora ou piora quando a carga  $R_L$  aumenta ? Por quê ?

### Exercício 4. Avaliação do desempenho da fonte regulada aprimorada

O circuito ilustrado na Fig.1b utiliza um *diodo Zener* de 2,4 volts e dois TBJs *n-p-n* de aplicação geral (ref. BC 337), com  $h_{FE} \# 200$  (valor típico), para implementação de outra *fonte regulada de tensão de +5 V*. Sabe-se que o *Zener* mantém a tensão nos seus terminais estável desde que seja percorrido por uma corrente não inferior a 10 mA, e que sua resistência dinâmica no ponto de operação pode ser desprezada nessa configuração.

- Explique como este circuito “reagiria” a variações da tensão de saída sobre uma carga de valor fixo, assumindo que o Zener mantém uma tensão fixa entre seus terminais.
- Dimensione o valor da resistência  $R_3$  para que o Zener opere adequadamente.
- Explique por que se espera que o desempenho dessa fonte seja superior ao apresentado pela configuração anterior.
- Que função desempenha o conjunto formado pelas resistências  $R_4$  e  $R_5$  ?
- Estime os valores *mínimo* e *máximo* da corrente da base de  $Q_1$  ( $I_B$ ), obtidas nas condições extremas de carregamento da fonte (i.e, para  $R_L = 1,1 k\Omega$  e para  $R_L = 100 \Omega$ ), admitindo que aquele TBJ opere na *região ativa* com o valor típico de  $h_{FE}$  dado. De que forma essa corrente na carga afeta a corrente de polarização do Zener agora ?

### Exercício 5. Avaliação do desempenho da fonte regulada com proteção contra curto-circuito

O circuito ilustrado na Fig.1c utiliza um *diodo Zener* de 2,4 volts e três TBJs de aplicação geral, sendo dois destes *n-p-n* (ref. BC 337), e um *p-n-p* (ref. BC 557). Todos possuem o mesmo  $h_{FE} \# 200$  (valor típico). A diferença fundamental relativamente à montagem anterior reside na presença de aparato para proteção automática da fonte em caso de curto-circuito nos seus terminais de saída.

- Explique como funciona este aparato.
- Que valor crítico da corrente de saída aciona a proteção ? O que ocorre para valores menores de corrente de saída ?
- Avalie o efeito da presença de  $R_6$  sobre a tensão de saída da fonte ?

### Atividade 1. Filtro capacitivo das fontes reguladas de tensão

Com o auxílio do osciloscópio verifique a amplitude da tensão de *ripple* no terminal do coletor do TBJ ( $Q_1$ ) no circuito da Fig. 1a, quando o capacitor  $C_1$  dimensionado anteriormente (Exercício 2) estiver conectado em paralelo com o “bloco sinalizador” ( $R_1 + LED$ ) e o “bloco regulador de entrada” ( $R_2 + R_3 + Zener$ ), nas condições extremas:

- $R_3 = 0$  e *sem carga* (i.e, saída da fonte regulada em “circuito-aberto”);
- $R_3 = 0$  e na presença da *carga máxima* ( $1.100 \Omega$ );
- $R_3 = 0$  e na presença da *carga mínima* ( $100 \Omega$ );
- $R_3 = 1 k\Omega$  e *sem carga* (i.e, saída da fonte regulada em “circuito-aberto”);
- $R_3 = 1 k\Omega$  e na presença da *carga máxima* ( $1.100 \Omega$ );
- $R_3 = 1 k\Omega$  e na presença da *carga mínima* ( $100 \Omega$ ).

### Atividade 2. Regulação de Tensão utilizando a configuração típica

Verifique a *regulação de linha* (R.L.) da fonte cc implementada pelo circuito da Fig. 1a nas seis situações anteriores, anotando para cada caso o valor do *nível cc da tensão de saída*.

- $R_3 = 0$  e *sem carga* (i.e, saída da fonte regulada em “circuito-aberto”);
- $R_3 = 0$  e na presença da *carga máxima* ( $1.100 \Omega$ );
- $R_3 = 0$  e na presença da *carga mínima* ( $100 \Omega$ );
- $R_3 = 1 k\Omega$  e *sem carga* (i.e, saída da fonte regulada em “circuito-aberto”);
- $R_3 = 1 k\Omega$  e na presença da *carga máxima* ( $1.100 \Omega$ );
- $R_3 = 1 k\Omega$  e na presença da *carga mínima* ( $100 \Omega$ );
- utilize os valores cc da tensão dos itens (b) e (c) para obter uma estimativa da *regulação de carga* (R.C.) da fonte quando  $R_3 = 0$ ;
- utilize os valores cc da tensão dos itens (e) e (f) para obter uma estimativa da *regulação de carga* (R.C.) da fonte quando  $R_3 = 1 k\Omega$ .

### Atividade 3. Regulação de Tensão utilizando a configuração aprimorada

Verifique a *regulação de linha* (R.L.) da fonte cc implementada pelo circuito da Fig. 1b nas três situações extremas de carregamento, anotando para cada caso o valor do *nível cc da tensão de saída*.

- sem carga* (i.e, saída da fonte regulada em “circuito-aberto”);
- na presença da *carga máxima* ( $1.100 \Omega$ );
- na presença da *carga mínima* ( $100 \Omega$ );
- utilize os valores cc da tensão dos itens (b) e (c) para obter uma estimativa da *regulação de carga* (R.C.) dessa fonte.

### Atividade 4. Regulação de Tensão utilizando a proteção contra curto-circuito

Verifique a *regulação de linha* (R.L.) da fonte cc implementada pelo circuito da Fig. 1c nas três situações extremas de carregamento, anotando para cada caso o valor do *nível cc da tensão de saída*.

- sem carga* (i.e, saída da fonte regulada em “circuito-aberto”);
- na presença da *carga máxima* ( $1.100 \Omega$ );
- na presença da *carga mínima* ( $100 \Omega$ );
- utilize os valores cc da tensão dos itens (b) e (c) para obter uma estimativa da *regulação de carga* (R.C.) dessa fonte;
- “curto-circuite” os terminais de saída dessa fonte para verificar a atuação do “bloco de proteção”. Por que não se faz necessário associar um resistor em série com o LED sinalizador (dispositivo “CURTO”, ilustrado na figura) ?

## RELATÓRIO

---

Prepare o relatório a partir dos dados colhidos. O relatório deve conter:

1. As anotações solicitadas nas atividades da parte prática.
2. O pré-relatório “expandido” da equipe.
3. As respostas para as questões abaixo.

### 1) (2,0 pontos) Filtro capacitivo das fontes reguladas de tensão (Atividade 1)

- a) (0,5) Qual é o valor calculado para capacitância  $C_1$  das Fig. 1a-c ? Qual foi o valor utilizado na implementação dos circuitos ?
- b) (0,5) Qual é o valor calculado para resistência  $R_1$  das Fig. 1a-c ? Qual foi o valor utilizado na implementação dos circuitos ?
- c) (0,5) Qual foi o valor estimado para a corrente de coletor em  $Q_1$  e para a corrente média no(s) diodo(s) retificador(es) na montagem da Fig. 1a ?
- d) (0,5) Quais foram as *amplitudes das oscilações de “ripple”* medidas nas condições extremas especificadas para  $R_3$  e a resistência de carga na montagem da Fig. 1a ?

### 2) (3,0 pontos) Regulação de tensão utilizando a configuração *típica* (Atividade 2)

- a) (0,75) Quais foram os *níveis cc da tensão de saída* medidos nas condições extremas especificadas para a resistência  $R_3$  e a resistência de carga na montagem da Fig. 1a ?
- b) (0,75) Quais foram as *regulações de linha* estimadas nas condições extremas especificadas para a resistência  $R_3$  e a resistência de carga na montagem da Fig. 1a ?
- c) (0,5) Qual foi a *regulação de carga* estimada a partir das condições extremas especificadas para a resistência de carga, com  $R_3 = 0 \Omega$  na montagem da Fig. 1a ?
- d) (0,5) Qual foi a *regulação de carga* estimada a partir das condições extremas especificadas para a resistência de carga, com  $R_3 = 1 k\Omega$  na montagem da Fig. 1a ?
- e) (0,5) Qual é o valor mínimo da carga que pode ser alimentada por essa fonte ?

### 3) (3,0 pontos) Regulação de tensão utilizando a configuração *aprimorada* (Atividade 3)

- a) (0,5) Qual é o valor calculado para resistência  $R_3$  da Fig. 1b ? Qual foi o valor utilizado na implementação do circuito ?
- b) (0,75) Quais foram os *níveis cc da tensão de saída* medidos nas condições extremas especificadas para a resistência de carga na montagem da Fig. 1b ?
- c) (0,75) Quais foram as *regulações de linha* estimadas nas condições extremas especificadas para a resistência de carga na montagem da Fig. 1b ?
- d) (0,5) Qual foi a *regulação de carga* estimada a partir das condições extremas especificadas para a resistência de carga na montagem da Fig. 1b ?
- e) (0,5) De que forma a corrente na carga afeta a corrente de polarização no Zener ?

### 4) (2,0 pontos) Regulação de tensão utilizando a *proteção contra curto-circuito* (Atividade 4)

- a) (0,5) Quais foram os *níveis cc da tensão de saída* medidos nas condições extremas especificadas para a resistência de carga na montagem da Fig. 1c ?
- b) (0,75) Quais foram os *níveis cc da tensão de saída* medidos nas condições extremas especificadas para a resistência de carga na montagem da Fig. 1c ?
- c) (0,75) Quais foram as *regulações de linha* estimadas nas condições extremas especificadas para a resistência de carga na montagem da Fig. 1c ?

**OBSERVAÇÃO:** Na confecção de seu relatório verifique as “Normas para Apresentação de Relatórios”, atentando para o *check-list* na página inicial dessa apostila.

## Experiência 5

### TBJs – AMPLIFICAÇÃO DE SINAIS

---

Esta experiência tem como objetivos: visualizar a característica de transferência do circuito amplificador na montagem *emissor-comum*, estimar a tensão de *limiar da JBE* do dispositivo, verificar o efeito da escolha adequada do ponto de operação e da amplitude do sinal de entrada, verificar a validade do modelo de *amplificação de pequenos sinais*, compreender o procedimento de análise de circuitos amplificadores a transistor e abordar aspectos relacionados ao projeto de amplificadores de um único estágio empregando TBJs.

#### Revisão Bibliográfica:

- 1) Transistores Bipolares de Junção - TBJ;
- 2) Análise *cc* de circuitos com TBJ na configuração *emissor-comum* (EC);
- 3) Características de saída  $i_C - v_{CE}$  e retas de carga de saída;
- 4) Características de transferência  $v_O - v_I$ ;
- 5) Modelos do TBJ para amplificação de *pequenos sinais*.

Alguns conceitos:

**Tensão de limiar ( $V_{BEon}$ ).** Também referida como “tensão de joelho”, corresponde à *tensão de polarização direta da junção base-emissor (JBE)* a partir da qual o dispositivo começa a conduzir níveis apreciáveis de corrente de *base* ( $I_B$ ) e de *coletor* ( $I_C$ ), quando há uma *ddp* aplicada entre os terminais de *coletor* e *emissor* ( $V_{CE}$ ).

**Tensão de saturação ( $V_{CE,sat.}$ ).** Diferença de potencial entre os terminais de *coletor* e de *emissor* a partir da qual ocorre a efetiva *polarização reversa da junção base-coletor (JBC)*, concomitante à *polarização direta da junção base-emissor (JBE)*, acarretando uma relativa independência do *nível de corrente de coletor*  $I_C$  para com a *ddp* aplicada entre os terminais de *coletor* e *emissor* ( $V_{CE}$ ). Essa condição de independência de  $I_C$  com  $V_{CE}$  caracteriza a *região ativa* de operação do TBJ.

**Característica de Transferência de um Amplificador.** Curva que relaciona o *nível tensão de saída* ao *nível de tensão de entrada* num circuito amplificador. A tensão de saída pode ser expressa analiticamente como uma *função não-linear* da tensão de entrada, que pode ser “linearizada” numa faixa do domínio onde a inclinação é consideravelmente elevada, permitindo a *amplificação linear* de um sinal de interesse.

**Ponto Quiescente (Q).** Ponto no plano  $v_O \times v_I$  sobre a característica de transferência, definido pela análise *cc* do circuito, em torno do qual serão promovidas variações da tensão de entrada que resultarão em variações proporcionais (ampliadas) da tensão de saída.

**Região ativa.** Região das características de saída do TBJ ( $i_C - v_{CE}$ ) onde o nível de *corrente de saída* ( $i_C$ ) independe do nível da *tensão de saída* ( $v_{CE}$ ), dependendo apenas do nível da *tensão de entrada* ( $v_{BE}$ ). Esta é a região onde o transistor deve operar para promover a *estabilidade da corrente cc entregue à carga* (*corrente de coletor,  $I_C$* ) *diante das ondulações do ripple na tensão coletor-emissor* ( $v_{CE}$ ). Fisicamente, corresponde à polarização do dispositivo que promove a “polarização reversa da JBC”, restringindo o controle da corrente de saída  $i_C$  à tensão de entrada  $v_{BE}$ .

**Região de Corte.** Região das características de saída do TBJ onde o nível de *corrente de saída* ( $i_C$ ) é efetivamente zero, independe do nível da *tensão de saída* ( $v_{CE}$ ), em consequência de um nível de *tensão de entrada* ( $v_{BE}$ ) inferior ao valor crítico ( $V_{BEon}$ ). Fisicamente, corresponde à polarização do dispositivo que não promove o “trânsito” dos portadores (i. e, dos majoritários nas regiões de *emissor* e *coletor* ) através da região de *base*, que daria origem às correntes de entrada ( $I_B$ ) e de saída ( $I_C$ ).

**Região de Saturação.** Região das características de saída do TBJ onde o nível de *corrente de saída* ( $i_C$ ) é determinada não somente pela tensão de controle na entrada ( $v_{BE}$ ) mas também pela tensão de saída ( $v_{CE}$ ). Fisicamente, corresponde à polarização do dispositivo tal que as junções *p-n internas* (*JBE* e *JBC*) não oferecem “barreiras efetivas” para a injeção dos portadores majoritários das regiões de *emissor* e de *coletor* na região de *base*, “saturando” a região de base de portadores minoritários e reduzindo significativamente a resistência medida entre os terminais de saída do TBJ.

Nas aplicações em que o transistor opera como *chave analógica*, o ponto de operação do circuito deve excursionar diretamente entre a região de corte e a região de saturação.

No laboratório utilizaremos um TBJ *n-p-n* de aplicação geral (ref. BC 337) para implementação de um amplificador de tensão de estágio único na configuração EC.



## PRÉ-RELATÓRIO

### Exercício 1. Características Elétricas de Saída de TBJs

Pesquise em fontes confiáveis (listar referências) informações sobre as características  $i_C - v_{CE}$  de TBJs, suas regiões *ativa*, de *saturação* e de  *corte*, bem como aplicações típicas desses transistores em circuitos eletrônicos amplificadores e digitais, para subsidiar a seção de *introdução teórica* do relatório parcial referente a esta atividade prática. Defina *reta de carga* e mostre como se determina o ponto *quiescente* ( $Q$ ) de operação do circuito transistorizado.

### Exercício 2. Montagem experimental com um TBJ em *emissor-comum* (EC)

Analise os circuitos propostos (Fig.1a-b) para verificação da característica de transferência do TBJ na configuração EC. Considere que a fonte cc (+15 V) do Kit *Scientech ST 2613* será utilizada para polarização dos terminais de saída do dispositivo, e que a fonte cc de polarização dos terminais de entrada será “simulada” pelo nível de “*off-set*” do sinal de entrada fornecido pelo gerador de sinais da bancada. Obtenha a expressão da *reta de carga* a partir do circuito de saída ilustrado. Que valor de  $R_C$  deve ser adotado para que esta reta intercepte o eixo das correntes em  $I_C = 15\text{ mA}$  ?

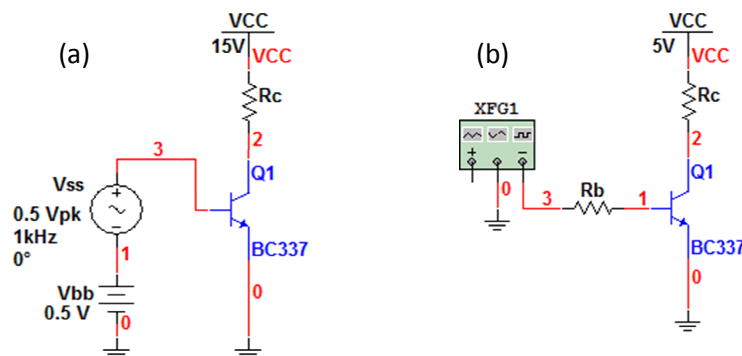


Fig. 1 – Montagens com TBJ em EC para verificação: a) da característica de transferência  $v_O - v_I$ ; b) da “porta inversora”.

### Exercício 3. Característica de transferência $v_O - v_I$

Ilustre a *característica de transferência* no plano  $v_O - v_I$  do circuito da Fig. 1a, indicando seus “pontos notáveis” e a região de interesse para amplificação de sinais. Escolha um *ponto de operação quiescente* (ponto  $Q$ ) adequado para transferência de sinal com distorção reduzida, consultando o *data-sheet* do TBJ *n-p-n* de referência BC 337. Obtenha uma expressão para estimativa da *corrente de saturação*  $I_S$  deste TBJ a partir dos valores de  $R_C$ ,  $V_{CC}$  e  $V_{IK}$  (tensão crítica de entrada a ser obtida a partir da observação experimental da característica de transferência). Calcule os parâmetros do modelo de pequenos sinais do TBJ ( $g_m$ ,  $r_\pi$ ,  $r_e$  e  $r_o$ ).

### Exercício 4. Amplificação de sinal

Suponha que um sinal de tensão com *forma de onda triangular*, de amplitude  $100\text{ mV}_p$  *p.p.* e frequência de  $1\text{ kHz}$ , seja superposto à tensão quiescente de entrada ( $V_{IQ}$ ). Para um TBJ com  $I_S = 1\text{ fA}$  estime os valores *máximo* e *mínimo* da forma de onda da tensão de saída  $v_O$ . Esboce essa forma de onda. Compare com os valores previstos pela aplicação do modelo de pequenos sinais dessa montagem.

### Exercício 5. Operação na função de chaveamento digital

Mostre que o circuito da Fig. 1b, com  $V_{CC} = 5\text{ V}$  e um valor de  $R_B$  adequado, também pode implementar uma *porta lógica inversora* (*NOT*), quando a tensão  $v_{BE}$  assume um dos valores cc de 0 ou 5V (padrão nas tecnologias TTL e CMOS).

## LABORATÓRIO:

---

### Atividade 1. Verificação do funcionamento do TBJ

Execute a montagem ilustrada na Fig. 1a utilizando o transistor BC 337 \_\_ cujas características elétricas  $i_C - v_{CE}$  se encontra na folha de dados do fabricante \_\_ sem sinal ( $v_i = 0$ ) e com  $V_{CC} = 15\text{ V}$ . Monitorando a *tensão na base*  $v_{BE} = v_i$  e a *tensão no coletor*  $v_C = v_O$  com as pontas de prova do osciloscópio da bancada, varie lentamente o nível de *off-set* do gerador de sinais fazendo  $v_{BE}$  variar no intervalo  $0,0 - 0,65\text{ V}$ . Anote o valor de  $v_{BE}$  a partir do qual se observa alguma variação de  $v_C$ .

### Atividade 2. Visualização da característica de transferência $v_O - v_i$

Ainda com a montagem do *amplificador a TBJ na configuração EC* da Fig. 1a, agora com um sinal  $v_i$  do tipo *onda triangular* ( $1\text{ kHz}$ ,  $500\text{ mV}_p$ ) fornecido pelo *gerador de sinais* da bancada, ajuste o nível de *off-set* para conferir uma *tensão cc* na *base* de  $V_{BE} = 500\text{ mV}$ . Visualize a *característica de transferência*  $v_O - v_i$  com o auxílio do osciloscópio no *modo dual* (CANAL 1: *sinal triangular* de entrada  $v_i$  de  $1\text{ V p.p.}$ , *sobreposto a*  $V_{BE}$ ; CANAL 2: *sinal de saída*  $v_O$ ). Para o relatório, anote:

- a *tensão de limiar*  $V_{BEon}$  de condução do transistor;
- a *tensão crítica*  $v_{IK}$  que delimita o início da *região de saturação*;
- o valor mínimo da *tensão de saída*  $v_O$  na característica  $v_O - v_i$  observada;
- o ponto dessa característica de transferência que você adotaria para operação do circuito como *amplificador de baixa distorção*. Justifique sua escolha.

### Atividade 3. Amplificador na configuração EC

Na montagem da Fig. 1a ajuste o nível de *off-set* do sinal de entrada no valor quiescente adotado (cf. **Exercício 3**) e visualize as *formas de onda de entrada e de saída* com o auxílio do osciloscópio da bancada (CANAL 1: *sinal triangular* de entrada  $v_i$  de  $200\text{ mV}_{pp}$  *sobreposto a*  $V_{BE}$ ; CANAL 2: *sinal de saída*  $v_O$ ). Para o relatório, anote:

- o nível *cc* da *tensão de saída*,  $V_O$ ;
- a *amplitude p.p.* da *forma de onda* do sinal de saída;
- a *amplitude* do sinal de saída se a *tensão cc* na base  $V_{BE}$  for variada de  $50\text{ mV}$  para mais e para menos. Explique o comportamento observado.
- o que ocorre com a *forma de onda* do sinal de saída se a *amplitude* do sinal do gerador for reduzida para  $100\text{ mV}_{pp}$ ? Explique o comportamento observado.

### Atividade 4. Verificação do funcionamento como porta NOT

Na montagem da Fig. 1b aplique um sinal do tipo *onda quadrada* de amplitude  $2,5\text{ V}_p$  à base do TBJ, com o nível de *off-set ajustado em*  $V_{BE} = 2,5\text{ V}$ . Observe a *forma de onda* da *tensão de saída*  $v_O$  com o auxílio do osciloscópio. Para o relatório, anote:

- há algum atraso da resposta  $v_O$  em relação à excitação  $v_i$ ?
- como se explica o comportamento do circuito utilizando a característica de transferência  $v_O - v_i$  obtida anteriormente?
- como se explica o comportamento do circuito utilizando as características elétricas de saída  $i_C - v_{CE}$  e a *reta de carga*?

## RELATÓRIO

---

Prepare o relatório a partir dos dados colhidos. O relatório deve conter:

1. As anotações solicitadas nas atividades da parte prática.
2. O pré-relatório “expandido” da equipe.
3. As respostas para as questões abaixo.

### 1) (2,5 pontos) Verificação do funcionamento do TBJ (Atividade 1)

- a) (0,25) Qual foi o valor utilizado para a resistência  $R_C$  na montagem da Fig. 1a ?
- b) (0,25) Qual é a amplitude mínima do sinal fornecido pelo gerador da bancada ? Qual é a amplitude do ruído ? Foi possível distinguir sinal de ruído na amplitude mínima ?
- c) (0,25) Qual é o valor esperado para o limiar de condução da JBE ? Qual foi o valor verificado para este limiar na implementação do circuito da Fig. 1a ?
- d) (0,25) Foi possível distinguir sinal de ruído na saída, mantendo o sinal de entrada com a amplitude mínima fornecida pelo gerador ?
- e) (0,5) Estime as *relações sinal/ruído na entrada e na saída* do circuito da Fig. 1a para um nível de tensão de *off-set* ligeiramente acima do limiar de condução da JBE.
- f) (0,5) Qual foi o nível de tensão  $V_O$  na saída ( $V_O$ ) observado para o valor máximo de *off-set* de entrada ( $V_I = 0,65\text{ V}$ ) ? Qual a corrente  $I_C$  de coletor correspondente estimada ?
- g) (0,5) Qual foi a expressão obtida para estimativa da *corrente de saturação*  $I_S$  do TBJ utilizado ? Qual o valor estimado para  $I_S$  com base nessa expressão ?

### 2) (2,5 pontos) Visualização da característica de transferência $v_O - v_I$ (Atividade 2)

- a) (0,5) Foi possível visualizar a característica  $v_O - v_I$  do circuito amplificador da Fig.1a ? Explique em detalhes o perfil obtido da curva característica obtida.
- b) (1,0) Explique as causas das distorções observadas nas formas de onda de entrada e de saída do circuito da Fig. 1a, quando o sinal de entrada foi ajustado conforme as especificações da Atividade 2 (*onda triangular, 1 kHz, 500mV<sub>p</sub>, off-set de 500 mV*).
- c) (1,0) Obtenha um *modelo equivalente de grandes sinais* para o circuito da Fig. 1a.

### 3) (2,5 pontos) Amplificador na configuração EC (Atividade 3)

- a) (0,5) Qual foi o valor escolhido de *off-set* de entrada para operação quiescente do circuito da Fig. 1a ? Justifique a escolha com base nas observações da Atividade 1.
- b) (0,5) Foi possível distinguir sinal de ruído na entrada, quando a amplitude de sinal foi ajustada em  $50\text{ mV}_p$  ? E na saída ?
- c) (0,5) Qual foi a amplitude *p.p.* da forma de onda de saída ? Esta forma de onda estava distorcida e/ou defasada em relação à forma de onda de entrada ? Comente.
- d) (0,5) O que aconteceu com a forma de onda de saída quando o nível de *off-set* de entrada foi variado de  $50\text{ mV}$  para mais e para menos ? Comente.
- e) (0,5) Compare os resultados experimentais com os resultados teóricos previstos a partir do *modelo equivalente de pequenos sinais* para este amplificador EC.

### 4) (2,5 pontos) Verificação do funcionamento como porta NOT (Atividade 4)

- a) (0,5) Qual foi o valor utilizado para a resistência  $R_B$  na montagem da Fig. 1b ?
- b) (0,5) Qual o valor estimado da corrente  $I_C$  de base ( $I_B$ ) para o nível de entrada *alto* ?
- c) (0,5) Estime o  $h_{FE}$  (ganho de corrente  $I_C$ ) do TBJ com base nas suas observações.
- d) (0,5) Explique o comportamento do circuito utilizando a característica de transferência  $v_O - v_I$  visualizada na Atividade 2.
- e) (0,5) Explique o comportamento do circuito utilizando as características elétricas de saída  $I_C - V_{CE}$  e a reta de carga de saída.

**OBSERVAÇÃO:** Na confecção de seu relatório verifique as “Normas para Apresentação de Relatórios”, atentando para o *check-list* na página inicial dessa apostila.

## Experiência 6

### AMPLIFICADORES – TBJ NA CONFIGURAÇÃO EMISSOR-COMUM (EC)

---

Esta experiência tem como objetivos: verificar o efeito da escolha adequada do ponto de operação, verificar a validade do modelo de pequenos sinais para amplificadores transistorizados, compreender o procedimento de análise de circuitos amplificadores a transistor e abordar aspectos relacionados ao projeto de amplificadores de um único estágio empregando *transistores bipolares de junção (TBJs)*.

#### Revisão Bibliográfica:

- 1) Transistores Bipolares de Junção - TBJ;
- 2) Características de entrada e de saída dos TBJs;
- 3) Polarização do TBJ (análise cc);
- 4) Modelos do TBJ para amplificação de *pequenos sinais*.

Alguns conceitos:

**Característica de Transferência de um Amplificador.** Curva que relaciona o *nível tensão de saída* ao *nível de tensão de entrada* num circuito amplificador. A tensão de saída pode ser expressa analiticamente como uma *função não-linear* da tensão de entrada, que pode ser “linearizada” numa faixa do domínio onde a inclinação é consideravelmente elevada, permitindo a *amplificação linear* de um sinal de interesse.

**Ponto Quiescente (Q).** Ponto no plano  $v_O - v_I$  sobre a característica de transferência, definido pela análise cc do circuito, em torno do qual serão promovidas variações da tensão de entrada que resultarão em variações proporcionais (ampliadas) da tensão de saída.

**Região Ativa.** Região das características de saída do TBJ ( $i_C - v_{CE}$ ) onde o nível de *corrente de saída* ( $i_C$ ) independe do nível da *tensão de saída* ( $v_{CE}$ ), dependendo apenas do nível de *tensão de entrada* ( $v_{BE}$ ) ou, equivalentemente, do nível da *corrente de entrada* ( $i_B$ ). Esta é a região onde o transistor deve operar para promover a *amplificação linear* do sinal de interesse. Fisicamente, corresponde à polarização direta da *junção base-emissor* (JBE) concomitante à polarização reversa da *junção base-coletor* (JBC).

**Região de Corte.** Região das características de saída do TBJ ( $i_C - v_{CE}$ ) onde o nível de *corrente de saída* ( $i_C$ ) é efetivamente *zero*, independentemente do nível da *tensão de saída* ( $v_{CE}$ ), em consequência de um nível de tensão de entrada inferior ao limiar ( $V_{BEon}$ ) ou, equivalentemente, de um nível de *corrente de entrada* ( $i_B$ ) nulo. Fisicamente, corresponde à polarização da JBE aquém do limiar de condução daquela junção *p-n* concomitante à polarização reversa da JBC.

**Região de Saturação.** Região das características de saída do TBJ ( $i_C - v_{CE}$ ) onde o nível de *tensão de saída* ( $v_{CE}$ ) é *efetivamente zero*, independentemente do nível da *corrente de saída* ( $i_C$ ). Corresponde à polarização direta de ambas JBE e JBC.

Nas aplicações em que o transistor opera como *chave analógica*, o ponto de operação do circuito deve excursionar diretamente entre a região de corte e a região de saturação.

No laboratório utilizaremos um TBJ *n-p-n* de aplicação geral (ref. BC 337) para implementação de diferentes circuitos amplificadores de tensão de estágio único, em variações clássicas de configuração EC.

## PRÉ-RELATÓRIO

### Exercício 1. Características de circuitos amplificadores a TBJ

Pesquise em fontes confiáveis (listar referências) informações sobre as configurações exploradas nas montagens sugeridas nessa prática (Fig. 1 a-d), suas vantagens e desvantagens, características de *impedância de entrada* e de *impedância de saída*, e aplicações típicas desses circuitos amplificadores em sistemas eletrônicos de interesse, a fim de subsidiar a seção de *introdução teórica* do relatório parcial referente a esta atividade prática. Defina as correspondentes *retas de carga* e mostre a influência das estratégias de realimentação utilizadas na estabilização dos *ganhos de tensão* obtidos.

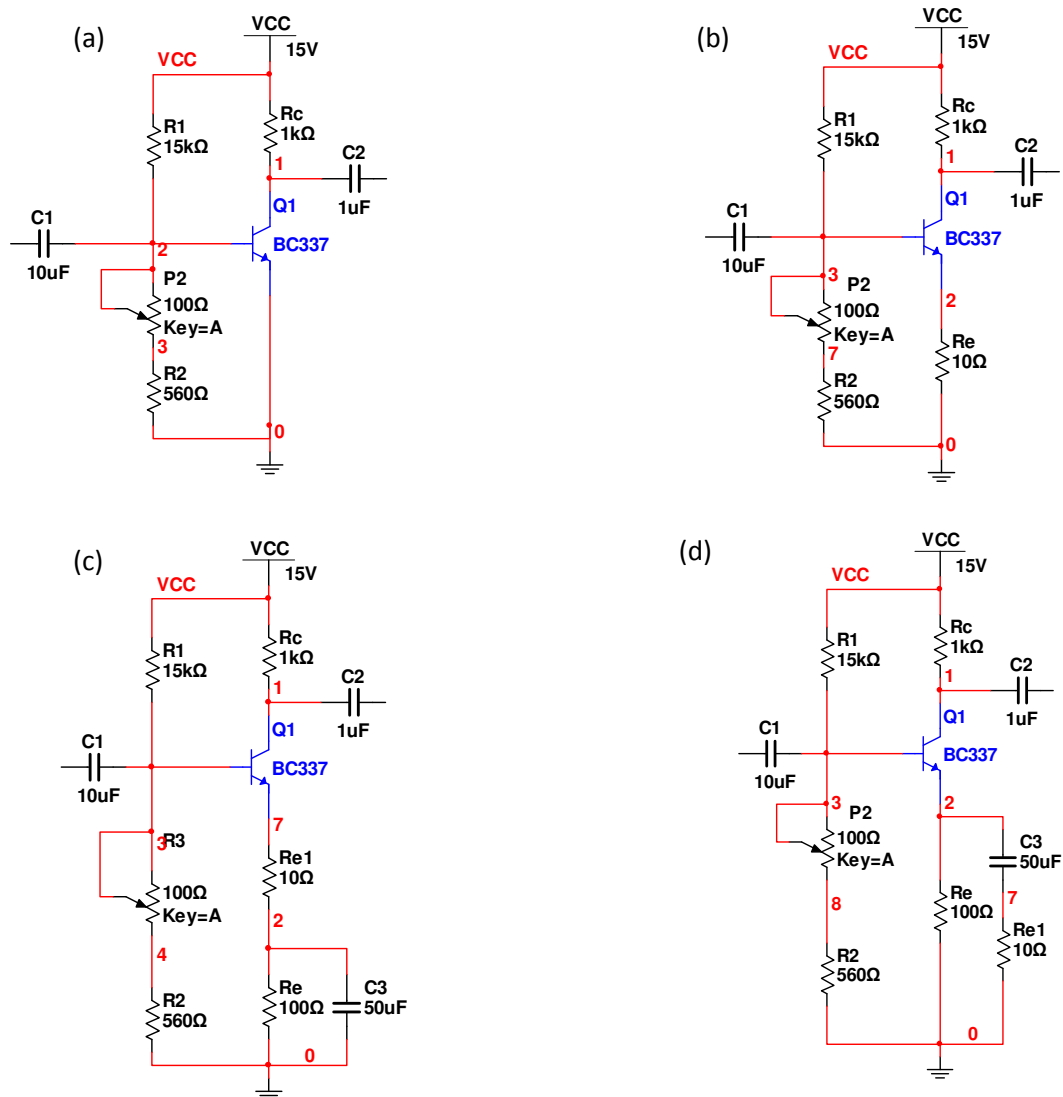


Fig. 1 – Amplificadores a TBJ: a) configuração EC; b) configuração EC com resistor de emissor  $R_e$ ; c) configuração EC com *bypass* do resistor de polarização  $R_e$ ; d) configuração EC com *bypass* do resistor de polarização  $R_e$  e realimentação através de  $R_{e1}$ .

### Exercício 2. Estágio EC

Analise o circuito proposto na Fig.1a para verificação da instabilidade do ganho de tensão relativamente à substituição do elemento ativo (TBJ). Considere que a fonte cc (+15 V) do Kit *Scientech ST 2613* será utilizada. Explique o que acontecerá com o ganho de tensão da montagem quando for efetivada a substituição do TBJ do circuito por outro similar.

### Exercício 3. Montagem EC com resistor de emissor $R_e$

Analise o circuito proposto na Fig.1b para verificação da instabilidade do ganho de tensão relativamente à substituição do elemento ativo (TBJ). O que acontecerá com o ganho de tensão da montagem quando for efetivada a substituição do transistor do circuito por outro similar ? Compare com o exercício 2 anterior.

### Exercício 4. Montagem EC com *bypass* do resistor de polarização de emissor

Analise o circuito proposto na Fig.1c para verificação da instabilidade do ganho de tensão relativamente à substituição do elemento ativo (TBJ). O que acontecerá com o ganho de tensão da montagem quando for efetivada a substituição do transistor do circuito por outro similar ? Compare com os exercícios 2 e 3 anteriores.

### Exercício 5. Montagem EC com realimentação através do resistor de emissor $R_{e1}$

Analise o circuito proposto na Fig.1d para verificação da instabilidade do ganho de tensão relativamente à substituição do elemento ativo (TBJ). O que acontecerá com o ganho de tensão da montagem quando for efetivada a substituição do transistor do circuito por outro similar ? Compare com os exercícios 2, 3 e 4 anteriores.

### Exercício 6. Amplificação de pequenos sinais

Suponha que um sinal de tensão *senoidal* (amplitude  $50\text{ mV p.p.}$ , frequência de  $1\text{ kHz}$ ) seja sobreposto à tensão quiescente de entrada ( $V_{iQ}$ ) em cada montagem proposta (Fig. 1 a-d). Para um TBJ típico (BC 337) com  $h_{fe} = 100$  estime os valores máximos e mínimos da forma de onda da tensão de saída  $v_o$ . Esboce as formas de onda de saída a partir dos modelos de pequenos sinais para os amplificadores de tensão correspondentes. Explique o que acontecerá com o *ganho de tensão* de cada montagem quando uma *carga* de  $1\text{ k}\Omega$  for conectada à saída e uma *fonte de sinal de tensão* com impedância interna de  $50\ \Omega$  for conectada à entrada.

### Exercício 7. Casamento de impedâncias

Projete um *estágio de saída* utilizando um TBJ típico (BC 337), com  $h_{fe} = 100$ , para adequar a impedância de saída do sistema à impedância de carga de  $1\text{ k}\Omega$ , mantendo o *ganho de tensão sem carga* ( $A_{vo}$ , das Tabelas V, VI, VII e VIII), conseguido no *estágio de entrada EC* em cada uma das configurações sugeridas (Fig. 1a-d).

## LABORATÓRIO:

### Atividade 1. Verificação da instabilidade do ganho de tensão

Execute consecutivamente as montagens ilustradas nas Figs. 1a-d utilizando o transistor especificado. Com o auxílio do multímetro digital, verifique as tensões de polarização  $V_B$ ,  $V_E$ ,  $V_C$ ,  $V_{BE}$  e  $V_{CE}$  dos circuitos e compare com os valores previstos teoricamente (preencha as Tabelas I a IV abaixo). Em cada montagem aplique o *signal de tensão senoidal* (amplitude  $50\text{ mV p.p.}$  e frequência  $1\text{ kHz}$ ) através do *capacitor de acoplamento ac de entrada* ( $C_1$ ). Com o auxílio das pontas de prova do osciloscópio da bancada, observe os ganhos de tensão *sem carga* (preencha as Tabelas V a VIII abaixo). O sinal de entrada possui a amplitude prevista em todas as montagens? Há alguma distorção presente nos sinais de entrada e/ou saída em cada montagem? Anote os *ganhos de tensão*  $A_{V_0}$  e  $A_{V_s}$ , bem como as *amplitudes dos sinais de saída* correspondentes. Desligue a alimentação dos circuitos e substitua o transistor por outro de mesma referência. Aplique novamente o sinal e anote o *novo ganho de tensão*  $A_{V_0}$ . Confira o resultado com o desenvolvimento dos Exercícios 2 a 5.

**Tabela I** – Tensões e correntes de polarização do circuito da Fig. 1a.

	$V_{BE}$	$V_{CE}$	$I_B$	$I_C$
Teórico				
Prático				

**Tabela II** – Tensões e correntes de polarização do circuito da Fig. 1b.

	$V_B$	$V_C$	$V_E$	$I_E$	$I_C$
Teórico					
Prático					

**Tabela III** – Tensões e correntes de polarização do circuito da Fig. 1c.

	$V_B$	$V_C$	$V_E$	$I_E$	$I_C$
Teórico					
Prático					

**Tabela IV** – Tensões e correntes de polarização do circuito da Fig. 1d.

	$V_B$	$V_C$	$V_E$	$I_E$	$I_C$
Teórico					
Prático					



**Tabela V** – Amplitudes dos sinais de entrada e de saída no circuito da Fig. 1a.

	$V_s$	$V_i$	$V_o$	$A_{Vo} = V_o/V_i$	$A_{Vs} = V_o/V_s$
<i>Teórico*</i>					
<i>Prático</i> (TBJ 1)	X				
<i>Prático</i> (TBJ 2)	X				

**Tabela VI** – Amplitudes dos sinais de entrada e de saída no circuito da Fig. 1b.

	$V_s$	$V_i$	$V_o$	$A_{Vo} = V_o/V_i$	$A_{Vs} = V_o/V_s$
<i>Teórico*</i>					
<i>Prático</i> (TBJ 1)	X				
<i>Prático</i> (TBJ 2)	X				

**Tabela VII** – Amplitudes dos sinais de entrada e de saída no circuito da Fig. 1c.

	$V_s$	$V_i$	$V_o$	$A_{Vo} = V_o/V_i$	$A_{Vs} = V_o/V_s$
<i>Teórico*</i>					
<i>Prático</i> (TBJ 1)	X				
<i>Prático</i> (TBJ 2)	X				

**Tabela VIII** – Amplitudes dos sinais de entrada e de saída no circuito da Fig. 1d.

	$V_s$	$V_i$	$V_o$	$A_{Vo} = V_o/V_i$	$A_{Vs} = V_o/V_s$
<i>Teórico*</i>					
<i>Prático</i> (TBJ 1)	X				
<i>Prático</i> (TBJ 2)	X				

\* Nas estimativas teóricas utilize os *valores medidos* das correntes e tensões cc (inseridos nas Tabelas I a IV) para obtenção dos *parâmetros dos modelos equivalentes de pequenos sinais dos TBJs*, empregando-os na análise do comportamento ac dos circuitos propostos. Considere que os dispositivos operam em condição de equilíbrio térmico à temperatura ambiente.

## Atividade 2. Estimativa da impedância interna do gerador de sinais

A partir do valor estimado para a *resistência base-emissor* ( $r_{\pi}$ ) do modelo de pequenos sinais empregado para análise *ac* da montagem da Fig. 1a, e das amplitudes dos sinais de entrada  $V_i$  medidos (Tabela V), estime o valor da *impedância interna* ( $r_s$ ) do gerador de sinais.

## Atividade 3. Estimativa das impedâncias de entrada e de saída

Nas montagens das Figs. 1a-d acrescente um *resistor*  $R_s$  de  $500\ \Omega$  à entrada (entre o gerador de sinais e o capacitor de acoplamento de entrada  $C_1$ ), e também um *resistor de carga*  $R_L$  de  $1\ k\Omega$  à saída (após o capacitor de acoplamento de saída  $C_2$ ). Com o auxílio das pontas de prova do osciloscópio da bancada, observe os sinais *antes* e *depois* de  $R_s$  (ou seja,  $v_s$  e  $v_i$ , respectivamente), e sobre  $R_L$  (ou seja,  $v_{oL}$ ), preenchendo as Tabelas IX a XII abaixo.

**Tabela IX** – Impedâncias de entrada e saída do circuito da Fig. 1a.

	$V_s$	$V_i$	$V_{oL}$	$A_V$ ( $V_{oL}/V_i$ )	$I_i$ ( $V_s-V_i$ )/ $R_s$	$Z_i$ ( $V_i/I_i$ )	$I_o$ ( $V_{oL}/R_L$ )	$Z_o$ ( $V_o-V_{oL}$ )/ $I_o$
Teórico*								
Prático								

**Tabela X** – Impedâncias de entrada e saída do circuito da Fig. 1b.

	$V_s$	$V_i$	$V_{oL}$	$A_V$ ( $V_{oL}/V_i$ )	$I_i$ ( $V_s-V_i$ )/ $R_s$	$Z_i$ ( $V_i/I_i$ )	$I_o$ ( $V_{oL}/R_L$ )	$Z_o$ ( $V_o-V_{oL}$ )/ $I_o$
Teórico*								
Prático								

**Tabela XI** – Impedâncias de entrada e saída do circuito da Fig. 1c.

	$V_s$	$V_i$	$V_{oL}$	$A_V$ ( $V_{oL}/V_i$ )	$I_i$ ( $V_s-V_i$ )/ $R_s$	$Z_i$ ( $V_i/I_i$ )	$I_o$ ( $V_{oL}/R_L$ )	$Z_o$ ( $V_o-V_{oL}$ )/ $I_o$
Teórico*								
Prático								

**Tabela XII** – Impedâncias de entrada e saída do circuito da Fig. 1d.

	$V_s$	$V_i$	$V_{oL}$	$A_V$ ( $V_{oL}/V_i$ )	$I_i$ ( $V_s-V_i$ )/ $R_s$	$Z_i$ ( $V_i/I_i$ )	$I_o$ ( $V_{oL}/R_L$ )	$Z_o$ ( $V_o-V_{oL}$ )/ $I_o$
Teórico*								
Prático								

\* Nas estimativas teóricas utilize os *valores medidos* das correntes e tensões *cc* (inseridos nas Tabelas I a IV) para obtenção dos *parâmetros dos modelos equivalentes de pequenos sinais dos TBJs*, empregando-os na análise do comportamento *ac* dos circuitos propostos. Considere que os dispositivos operam em condição de equilíbrio térmico à temperatura ambiente.

#### Atividade 4. Verificação da eficácia do estágio adicional de saída

Execute consecutivamente as montagens ilustradas nas Figs. 1a-d acoplando-lhes à saída o estágio projetado no **Exercício 7**. Com o auxílio do multímetro digital, verifique as tensões e estime as correntes de polarização do novo estágio  $V_B$ ,  $V_C$ ,  $V_E$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  e  $I_E$  comparando com os valores previstos teoricamente (preencha a Tabela XIII). Em seguida aplique à *entrada do primeiro estágio* (não esqueça do resistor  $R_S$ ) de cada montagem um sinal de tensão senoidal de amplitude  $50\text{ mV p.p.}$  e frequência  $1\text{ kHz}$ . Com o auxílio das pontas de prova do osciloscópio da bancada observe as amplitudes dos sinais de saída e os ganhos de tensão *sem carga* (preencha as Tabelas XIV a XVII) e *com carga* (preencha as Tabelas XVIII a XXI).

**Tabela XIII** – Tensões de polarização do estágio de saída acoplado.

	$V_B$	$V_C$	$V_E$	$I_B$	$I_C$	$I_E$
<i>Teórico</i>						
<i>Prático</i>						

**Tabela XIV** – Amplitudes dos sinais de entrada e de saída no circuito da Fig. 1a acoplado ao estágio adicional de saída.

	$V_s$	$V_i$	$V_o$	$A_{V_o} = V_o/V_i$	$A_{V_s} = V_o/V_s$
<i>Teórico*</i>					
<i>Prático</i>	X				

**Tabela XV** – Amplitudes dos sinais de entrada e de saída no circuito da Fig. 1b acoplado ao estágio adicional de saída.

	$V_s$	$V_i$	$V_o$	$A_{V_o} = V_o/V_i$	$A_{V_s} = V_o/V_s$
<i>Teórico*</i>					
<i>Prático</i>	X				

**Tabela XVI** – Amplitudes dos sinais de entrada e de saída no circuito da Fig. 1c acoplado ao estágio adicional de saída.

	$V_s$	$V_i$	$V_o$	$A_{V_o} = V_o/V_i$	$A_{V_s} = V_o/V_s$
<i>Teórico*</i>					
<i>Prático</i>	X				

\* Nas estimativas teóricas utilize os *valores medidos* das correntes e tensões *cc* (inseridos nas Tabelas I a IV) para obtenção dos *parâmetros dos modelos equivalentes de pequenos sinais dos TBJs*, empregando-os na análise do comportamento *ac* dos circuitos propostos. Considere que os dispositivos operam em condição de equilíbrio térmico à temperatura ambiente.

**Tabela XVII** – Amplitudes dos sinais de entrada e de saída no circuito da Fig. 1d acoplado ao estágio adicional de saída.

	$V_s$	$V_i$	$V_o$	$A_{Vo} = V_o/V_i$	$A_{Vs} = V_o/V_s$
<i>Teórico*</i>					
<i>Prático</i>	X				

**Tabela XVIII** – Impedâncias de entrada e saída do circuito da Fig. 1a acoplado ao estágio adicional de saída.

	$V_s$	$V_i$	$V_{oL}$	$A_V$ ( $V_{oL}/V_i$ )	$I_i$ ( $V_s-V_i$ )/ $R_S$	$Z_i$ ( $V_i/I_i$ )	$I_o$ ( $V_{oL}/R_L$ )	$Z_o$ ( $V_o-V_{oL}$ )/ $I_o$
<i>Teórico*</i>								
<i>Prático</i>								

**Tabela XIX** – Impedâncias de entrada e saída do circuito da Fig. 1b acoplado ao estágio adicional de saída.

	$V_s$	$V_i$	$V_{oL}$	$A_V$ ( $V_{oL}/V_i$ )	$I_i$ ( $V_s-V_i$ )/ $R_S$	$Z_i$ ( $V_i/I_i$ )	$I_o$ ( $V_{oL}/R_L$ )	$Z_o$ ( $V_o-V_{oL}$ )/ $I_o$
<i>Teórico*</i>								
<i>Prático</i>								

**Tabela XX** – Impedâncias de entrada e saída do circuito da Fig. 1c acoplado ao estágio adicional de saída.

	$V_s$	$V_i$	$V_{oL}$	$A_V$ ( $V_{oL}/V_i$ )	$I_i$ ( $V_s-V_i$ )/ $R_S$	$Z_i$ ( $V_i/I_i$ )	$I_o$ ( $V_{oL}/R_L$ )	$Z_o$ ( $V_o-V_{oL}$ )/ $I_o$
<i>Teórico*</i>								
<i>Prático</i>								

**Tabela XXI** – Impedâncias de entrada e saída do circuito da Fig. 1d acoplado ao estágio adicional de saída.

	$V_s$	$V_i$	$V_{oL}$	$A_V$ ( $V_{oL}/V_i$ )	$I_i$ ( $V_s-V_i$ )/ $R_S$	$Z_i$ ( $V_i/I_i$ )	$I_o$ ( $V_{oL}/R_L$ )	$Z_o$ ( $V_o-V_{oL}$ )/ $I_o$
<i>Teórico*</i>								
<i>Prático</i>								

\* Nas estimativas teóricas utilize os *valores medidos* das correntes e tensões *cc* (inseridos nas Tabelas I a IV) para obtenção dos *parâmetros dos modelos equivalentes de pequenos sinais dos TBJs*, empregando-os na análise do comportamento *ac* dos circuitos propostos. Considere que os dispositivos operam em condição de equilíbrio térmico à temperatura ambiente.

## RELATÓRIO

---

Prepare o relatório a partir dos dados colhidos. O relatório deve conter:

1. As anotações solicitadas nas atividades da parte prática.
2. O pré-relatório “expandido” da equipe.
3. As respostas para as questões abaixo.

### 1) (2,0 pontos) Filtro capacitivo das fontes reguladas de tensão (Atividade 1)

- h) (0,5) Qual é o valor calculado para capacitância  $C_1$  das Fig. 1a-c ? Qual foi o valor utilizado na implementação dos circuitos ?
- i) (0,5) Qual é o valor calculado para resistência  $R_1$  das Fig. 1a-c ? Qual foi o valor utilizado na implementação dos circuitos ?
- j) (0,5) Qual foi o valor estimado para a corrente de coletor em  $Q_1$  e para a corrente média no(s) diodo(s) retificador(es) na montagem da Fig. 1a ?
- k) (0,5) Quais foram as amplitudes das oscilações de “ripple” medidas nas condições extremas especificadas para  $R_3$  e a resistência de carga na montagem da Fig. 1a ?

### 2) (3,0 pontos) Regulação de tensão utilizando a configuração *típica* (Atividade 2)

- d) (0,75) Quais foram os níveis cc da tensão de saída medidos nas condições extremas especificadas para a resistência  $R_3$  e a resistência de carga na montagem da Fig. 1a ?
- e) (0,75) Quais foram as regulações de linha estimadas nas condições extremas especificadas para a resistência  $R_3$  e a resistência de carga na montagem da Fig. 1a ?
- f) (0,5) Qual foi a regulação de carga estimada a partir das condições extremas especificadas para a resistência de carga, com  $R_3 = 0 \Omega$  na montagem da Fig. 1a ?
- g) (0,5) Qual foi a regulação de carga estimada a partir das condições extremas especificadas para a resistência de carga, com  $R_3 = 1 k\Omega$  na montagem da Fig. 1a ?
- h) (0,5) Qual é o valor mínimo da carga que pode ser alimentada por essa fonte ?

### 3) (3,0 pontos) Regulação de tensão utilizando a configuração *aprimorada* (Atividade 3)

- f) (0,5) Qual é o valor calculado para resistência  $R_3$  da Fig. 1b ? Qual foi o valor utilizado na implementação do circuito ?
- g) (0,75) Quais foram os níveis cc da tensão de saída medidos nas condições extremas especificadas para a resistência de carga na montagem da Fig. 1b ?
- h) (0,75) Quais foram as regulações de linha estimadas nas condições extremas especificadas para a resistência de carga na montagem da Fig. 1b ?
- i) (0,5) Qual foi a regulação de carga estimada a partir das condições extremas especificadas para a resistência de carga na montagem da Fig. 1b ?
- j) (0,5) De que forma a corrente na carga afeta a corrente de polarização no Zener ?

### 4) (2,0 pontos) Regulação de tensão utilizando a *proteção contra curto-circuito* (Atividade 4)

- d) (0,5) Quais foram os níveis cc da tensão de saída medidos nas condições extremas especificadas para a resistência de carga na montagem da Fig. 1c ?
- e) (0,75) Quais foram os níveis cc da tensão de saída medidos nas condições extremas especificadas para a resistência de carga na montagem da Fig. 1c ?
- f) (0,75) Quais foram as regulações de linha estimadas nas condições extremas especificadas para a resistência de carga na montagem da Fig. 1c ?

**OBSERVAÇÃO:** Na confecção de seu relatório verifique as “Normas para Apresentação de Relatórios”, atentando para o *check-list* na página inicial dessa apostila.



## Experiência 7

### AMPLIFICADORES – CONFIGURAÇÕES BASE-COMUM (BC) E COLETOR-COMUM (CC)

Esta experiência tem como objetivos verificar o funcionamento dos amplificadores a TBJ nas configurações *base-comum* (BC) e *coletor-comum* (CC), e compreender a importância da otimização das relações entre as impedâncias dos estágios associados em cascata.

#### Revisão Bibliográfica:

- 1) Transistores Bipolares de Junção - TBJs;
- 2) Análise cc de circuitos com TBJs;
- 3) Aproximação de *pequenos sinais* para TBJs;
- 4) Modelos do TBJ para amplificação de *pequenos sinais*;
- 5) Estágios amplificadores acoplados em cascata.

Alguns conceitos:

**Característica de Transferência de um Amplificador.** Curva que relaciona o *nível tensão de saída* ao *nível de tensão de entrada* num circuito amplificador. A tensão de saída pode ser expressa analiticamente como uma *função não-linear* da tensão de entrada, que pode ser “linearizada” numa faixa do domínio onde a inclinação é consideravelmente elevada, permitindo a *amplificação linear* de um sinal de interesse.

**Ponto Quiescente (Q).** Ponto no plano  $v_o \times v_i$  sobre a característica de transferência, definido pela análise cc do circuito, em torno do qual serão promovidas variações da tensão de entrada que resultarão em variações proporcionais (ampliadas) da tensão de saída.

**Ganho de tensão sem carga ( $A_{vo}$ ).** Relação entre o *fasor tensão de saída* e o *fasor tensão de entrada*, para uma dada frequência fixa do sinal de excitação, quando o amplificador tem como carga um *circuito aberto*. A *impedância interna da fonte de sinal* não é levada em conta.

**Ganho de tensão com carga ( $A_v$ ).** Relação entre o *fasor tensão de saída* e o *fasor tensão de entrada*, para uma dada frequência fixa do sinal de excitação, quando o amplificador é conectado a uma *carga de impedância finita*. A *impedância interna da fonte de sinal* não é levada em conta.

**Ganho de tensão global ( $A_{vs}$ ).** Relação entre o *fasor tensão de saída* e o *fasor tensão de sinal*, para uma dada frequência fixa do sinal de excitação, quando o amplificador é conectado a uma carga de impedância finita e a *impedância interna da fonte de sinal* é levada em conta no acoplamento com a entrada do circuito.

**Impedância de entrada ( $z_i$ ).** Relação entre o *fasor tensão de entrada* e o *fasor corrente de entrada*, para uma dada frequência fixa do sinal de excitação.

**Impedância de saída ( $z_o$ ).** Relação entre o *fasor tensão de teste* e o *fasor corrente de teste*, para uma dada frequência fixa do *signal de excitação de teste* aplicado entre os terminais de saída do circuito, quando não há excitação aplicada aos terminais de entrada.

No laboratório utilizaremos um TBJ *npn* de aplicação geral para implementação dos estágios amplificadores.

## PRÉ-RELATÓRIO:

### Exercício 1. Estágios BC e CC isolados

Pesquise em fontes confiáveis (listar referências) informações sobre as configurações exploradas nas montagens sugeridas nessa prática (Fig. 1 a-b), suas vantagens e desvantagens, características de *ganho de tensão* e de *ganho de corrente* sem carga e com carga, *impedâncias de entrada e de saída*, e aplicações típicas desses circuitos em sistemas eletrônicos de interesse, a fim de subsidiar a seção de *introdução teórica* do relatório parcial referente a esta atividade prática.

### Exercício 2. Montagem experimental com TBJ em *coletor-comum* (CC)

Analise o circuito proposto na Fig.1a considerando que a fonte cc (+15 V) do Kit *Scientech ST 2613* será utilizada para polarização do elemento ativo. Estime todas as tensões e correntes de polarização decorrentes dos valores utilizados para os componentes e considerando o valor de  $h_{FE}$  especificado pelo fabricante do transistor. Explique o que acontecerá com o *ganho de tensão* da montagem quando uma carga de  $100\ \Omega$  for conectada à saída e uma *fonte de sinal de tensão* com impedância interna de  $50\ \Omega$  for conectada à entrada.

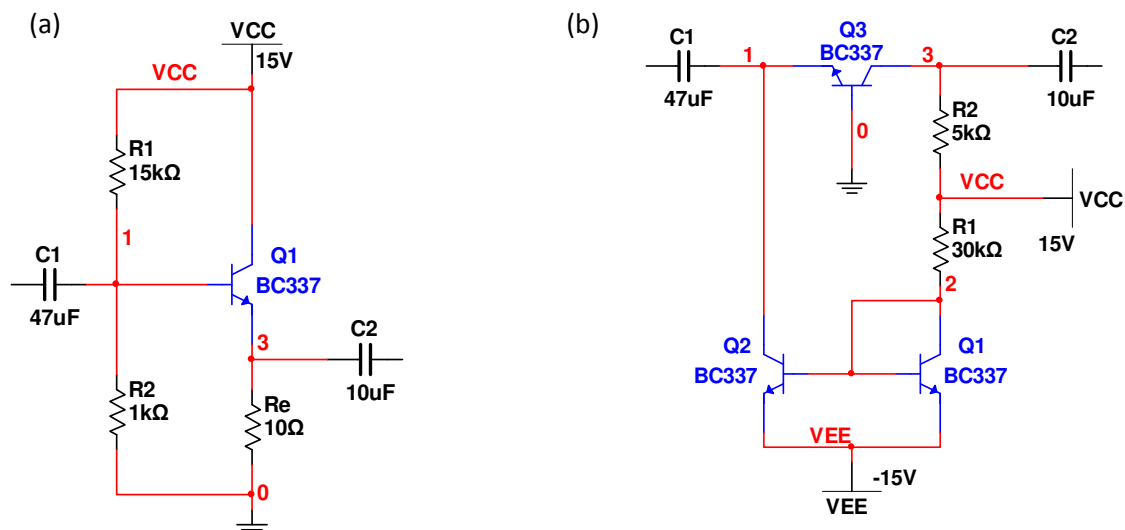


Fig. 1 – Amplificadores a TBJ: a) configuração CC (*seguidor de emissor*; b). ) configuração BC (*cascode*).

### Exercício 3. Montagem experimental com TBJ em *base-comum* (BC)

Analise o circuito proposto na Fig.1b considerando que as fontes cc (+15 V e -15 V) do Kit *Scientech ST 2613* serão utilizadas. Estime todas as tensões e correntes de polarização. Explique o que acontecerá com o *ganho de tensão* da montagem quando uma *carga* de  $100\ \Omega$  for conectada à saída e uma *fonte de sinal de tensão* com impedância interna de  $50\ \Omega$  for conectada à entrada do circuito, excitando-o com uma forma de onda senoidal de amplitude  $40\ mV\ p.p.$  e frequência de  $1\ kHz$ .

### Exercício 4. Amplificador de tensão com 2 estágios

Suponha que a montagem da Fig. 1a (amplificador *seguidor de emissor*) seja conectada à entrada da montagem da Fig. 1b (amplificador *cascode*). Analise o circuito resultante, supondo que uma *fonte de sinal de tensão* com impedância interna de  $50\ \Omega$  será conectada à entrada do primeiro estágio, e que uma *carga resistiva* de  $100\ \Omega$  será conectada à saída do último estágio. Utilize os modelos de amplificação de pequenos sinais correspondentes a cada estágio para estimativa do ganho de tensão e do ganho de corrente da montagem em cascata.



### Exercício 5. Amplificador de tensão com 3 estágios

Projete um *estágio EC* utilizando um TBJ típico (*BC 337*), com  $h_{FE}$  especificado pelo fabricante, para substituir o estágio *CC* na entrada do circuito amplificador sugerido no Exercício 4. O estágio *CC* passará a ser o *terceiro estágio*, na saída do circuito, para adequar a impedância de saída do amplificador à impedância de carga de  $100\ \Omega$ , mantendo o *ganho de tensão* conseguido nos *estágios anteriores (EC e BC)*. Projete o estágio adicional *EC* de modo que o ganho de tensão do *amplificador de 3 estágios* seja superior a  $300\text{ V/V}$ . Estime também os *ganhos de corrente e de potência do sinal*, promovidos por este amplificador. Haveria alguma vantagem se a carga fosse conectada diretamente no *emissor* do TBJ no estágio de saída (no lugar de “*Re*”) ?

## LABORATÓRIO:

### Atividade 1. Estimativa da impedância interna do gerador de sinais

Conecte um resistor de  $100\ \Omega$  diretamente no canal de saída do gerador de sinais da bancada, que deve estar ajustado para fornecer um sinal senoidal de frequência  $1\text{ kHz}$ , sem tensão de *off-set* e com amplitude de  $50\text{ mV p.p.}$  Verifique o sinal de tensão efetivamente presente nos terminais do resistor (carga). Estime o valor da *impedância interna* ( $r_s$ ) do gerador de sinais a partir do valor da amplitude deste sinal. Anote.

### Atividade 2. Implementação do estágio CC

Execute a montagem ilustrada na Fig. 1a utilizando resistores de  $1/8\text{ W}$  e um dos transistores disponíveis no LESD (BC 337). Com o auxílio do multímetro digital, verifique as tensões de polarização  $V_B$  e  $V_E$  do transistor  $Q_1$  e compare com os valores previstos teoricamente (preencha a Tabela I abaixo). Em seguida aplique o sinal ajustado previamente ( $50\text{ mV p.p.}$ ,  $1\text{ kHz}$ ) ao terminal de entrada monitorando, por meio do osciloscópio da bancada, o sinal naquele terminal e no terminal de saída, *sem* e *com* o resistor de carga  $R_L = 100\ \Omega$  conectado. Observe e anote os ganhos de tensão *sem carga* (preencha a Tabela II) e *com carga* (preencha a Tabela III). Verifique que agora o sinal na carga possui a amplitude ajustada no gerador de sinais. Pode-se dizer que o estágio CC “casou” a carga ao gerador de sinais?

Com base na medida da amplitude do sinal de entrada  $V_i$  e na resistência interna da fonte ( $50\ \Omega$ ), estime a *impedância de entrada* do amplificador; e, com base nas medidas da tensão de saída *com* e *sem carga* ( $V_{oL}$  e  $V_o$ , respectivamente) e na corrente na carga  $I_o$ , estime a *impedância de saída* (preencha a Tabela VI). Compare com os valores teóricos estimados no Exercício 1.

**Tabela I** – Tensões e correntes de polarização do circuito da Fig. 1a.

	$V_B$	$V_E$	$I_B$	$I_E$
Teórico				
Prático				

**Tabela II** – Amplitudes dos sinais no circuito da Fig. 1a *sem carga*.

	$V_i$	$V_c$	$V_o$	$A_{V_o} = V_o/V_i$
Teórico*				
Prático				

**Tabela III** – Amplitudes dos sinais no circuito da Fig. 1a *com carga*.

	$V_i$	$V_c$	$V_{oL}$	$A_V = V_o/V_i$
Teórico*				
Prático				

\* Nas estimativas teóricas utilize os valores medidos das correntes e tensões cc (inseridos na Tabela I) para obtenção dos parâmetros dos modelos equivalentes de pequenos sinais dos TBJs, empregando-os na análise do comportamento ac dos circuitos propostos. Considere que os dispositivos operam em condição de equilíbrio térmico à temperatura ambiente.

**Tabela IV – Impedâncias de entrada e saída do circuito da Fig. 1a.**

	$V_s$	$V_i$	$V_o$	$V_{oL}$	$Z_i = r_s V_i / (V_s - V_i)$	$I_o = V_{oL} / R_L$	$Z_o = (V_o - V_{oL}) / I_o$
<i>Teórico</i>							
<i>Prático</i>							

**Atividade 3. Implementação do estágio BC**

Execute a montagem ilustrada na Fig. 1b utilizando resistores de  $1/8\ W$  e os transistores disponíveis no LESD (BC 337). Com o auxílio do multímetro digital, verifique as tensões de polarização  $V_E$  e  $V_C$  do transistor de sinal ( $Q_3$ ) e compare com os valores previstos teoricamente (preencha a Tabela V abaixo). Em seguida aplique o sinal ajustado previamente ( $50\ mV\ p.p.$ ,  $1\ kHz$ ) ao terminal de entrada monitorando, por meio do osciloscópio da bancada, o sinal naquele terminal e no terminal de saída, *sem* e *com* o resistor de carga  $R_L = 100\ \Omega$  conectado. Observe e anote os ganhos de tensão *sem carga* (preencha a Tabela VI) e *com carga* (preencha a Tabela VII). Verifique que o sinal de entrada mais uma vez *não possui* a amplitude ajustada no gerador de sinais. Há alguma distorção presente nos sinais de entrada e/ou de saída? Pode-se dizer que se trata de um bom estágio amplificador de tensão?

Com base na medida da amplitude do sinal de entrada  $V_i$  e na resistência interna da fonte ( $50\ \Omega$ ), estime a *impedância de entrada* do amplificador; e, com base nas medidas da tensão de saída *sem* e *com carga* ( $V_{oL}$  e  $V_o$ , respectivamente) e na corrente na carga  $I_o$ , estime a *impedância de saída* (preencha a Tabela VIII). Compare com os valores teóricos estimados no Exercício 1.

**Tabela V – Tensões e correntes de polarização do circuito da Fig. 1b.**

	$V_E$	$V_C$	$I_E$	$I_C$
<i>Teórico</i>				
<i>Prático</i>				

**Tabela VI – Amplitudes dos sinais no circuito da Fig. 1b *sem carga*.**

	$V_s$	$V_i$	$V_o$	$A_{Vo} = V_o / V_i$	$A_{Vos} = V_o / V_s$
<i>Teórico**</i>					
<i>Prático</i>					

**Tabela VII – Amplitudes dos sinais no circuito da Fig. 1b *com carga*.**

	$V_s$	$V_i$	$V_{oL}$	$A_V = V_{oL} / V_i$	$A_{Vs} = V_{oL} / V_s$
<i>Teórico**</i>					
<i>Prático</i>					

\*\* Nas estimativas teóricas utilize os *valores medidos* das correntes e tensões *cc* (inseridos na Tabela V) para obtenção dos *parâmetros dos modelos equivalentes de pequenos sinais dos TBJs*, empregando-os na análise do comportamento *ac* dos circuitos propostos. Considere que os dispositivos operam em condição de equilíbrio térmico à temperatura ambiente.

**Tabela VIII – Impedâncias de entrada e saída do circuito da Fig. 1b.**

	$V_s$	$V_i$	$V_o$	$V_{oL}$	$Z_i =$ $r_s V_i / (V_s - V_i)$	$I_o =$ $V_{oL} / R_L$	$Z_o =$ $(V_o - V_{oL}) / I_o$
<i>Teórico**</i>							
<i>Prático</i>							

**Atividade 4. Implementação do amplificador de 2 estágios**

Conecte a entrada do estágio BC (Fig. 1b) à saída do estágio CC (Fig. 1a), não esquecendo o capacitor de acoplamento. Aplique o sinal ajustado previamente ao terminal de entrada do primeiro estágio (CC), monitorando o sinal naquele terminal e nos terminais do resistor de carga  $R_L = 100 \, \Omega$ , que deve estar conectado ao terminal de saída do segundo estágio (BC) através de outro capacitor de acoplamento. Estime os ganhos de tensão *sem carga* ( $A_{V_o}$ ) e *com carga* ( $A_V$ ) (preencha as Tabelas IX e X); repita o procedimento substituindo a carga por um resistor de  $10 \, k\Omega$  (preencha a Tabela XI). Pode-se dizer que o estágio CC “casou” a entrada do estágio BC ao gerador de sinais? Pode-se dizer que a saída do amplificador está “casada” com a carga de  $100 \, \Omega$ ? E com relação à carga de  $10 \, k\Omega$ ?

**Tabela IX – Amplitudes dos sinais no circuito dos estágios acoplados e *sem carga*.**

	$V_i$	$V_e$	$V_o$	$A_{V_o} = V_o / V_i$
<i>Teórico**</i>				
<i>Prático</i>				

**Tabela X – Amplitudes dos sinais no circuito dos estágios acoplados e *com a carga de 100 Ω*.**

	$V_i$	$V_e$	$V_{oL}$	$A_V = V_o / V_i$
<i>Teórico**</i>				
<i>Prático</i>				

**Tabela XI – Amplitudes dos sinais no circuito dos estágios acoplados e *com a carga de 10 kΩ*.**

	$V_i$	$V_e$	$V_{oL}$	$A_V = V_o / V_i$
<i>Teórico</i>				
<i>Prático</i>				

\*\* Nas estimativas teóricas utilize os *valores medidos* das correntes e tensões cc (inseridos nas Tabelas I e V) para obtenção dos *parâmetros dos modelos equivalentes de pequenos sinais dos TBJs*, empregando-os na análise do comportamento *ac* dos circuitos propostos. Considere que os dispositivos operam em condição de equilíbrio térmico à temperatura ambiente.

### Atividade 5. Implementação do estágio EC

Execute a montagem do estágio EC projetado anteriormente no Exercício 5, utilizando um dos transistores disponíveis no LESD (BC 337). Com o auxílio do multímetro digital, verifique as tensões e as correntes de polarização do novo estágio e compare com os valores previstos teoricamente (preencha a Tabela XII). Aplique o sinal ajustado previamente (50 mV p.p., 1 kHz) ao terminal de entrada desse estágio, monitorando o sinal naquele terminal e nos terminais de um resistor de  $R_L = 10\ \Omega$  conectado a sua saída (esse valor simula a impedância de entrada do estágio BC). Estime os ganhos de tensão *sem carga* ( $A_{V_0}$ ) e *com carga* ( $A_V$ ) (preencha as Tabelas XIII e XIV).

Com base na medida da amplitude do sinal de entrada  $V_i$  e na resistência interna da fonte (50  $\Omega$ ), estime a *impedância de entrada* do amplificador; e com base nas medidas da tensão de saída *com* e *sem carga* ( $V_{oL}$  e  $V_o$ , respectivamente) e na corrente na carga  $I_o$ , estime a *impedância de saída* (preencha a Tabela XV).

**Tabela XII – Tensões de polarização do estágio EC de entrada.**

	$V_{BE}$	$V_{CE}$	$I_B$	$I_C$
Teórico				
Prático				

**Tabela XIII – Amplitudes dos sinais no circuito do estágio EC sem carga.**

	$V_s$	$V_i$	$V_o$	$A_{V_0} = V_o/V_i$	$A_{V_{os}} = V_o/V_s$
Teórico***					
Prático					

**Tabela XIV – Amplitudes dos sinais no circuito do estágio EC com carga.**

	$V_s$	$V_i$	$V_{oL}$	$A_V = V_{oL}/V_i$	$A_{V_s} = V_{oL}/V_s$
Teórico***					
Prático					

**Tabela XV – Impedâncias de entrada e saída do circuito do estágio EC.**

	$V_s$	$V_i$	$V_o$	$V_{oL}$	$Z_i = r_s V_i / (V_s - V_i)$	$I_o = V_{oL} / R_L$	$Z_o = (V_o - V_{oL}) / I_o$
Teórico***							
Prático							

\*\*\* Nas estimativas teóricas utilize os *valores medidos* das correntes e tensões cc (inseridos na Tabela V) para obtenção dos *parâmetros dos modelos equivalentes de pequenos sinais dos TBJs*, empregando-os na análise do comportamento *ac* dos circuitos propostos. Considere que os dispositivos operam em condição de equilíbrio térmico à temperatura ambiente.

### Atividade 6. Implementação do amplificador de 3 estágios

Conecte a entrada do estágio CC (Fig. 1a) à saída do estágio BC, e à entrada desse último conecte a saída do estágio EC caracterizado anteriormente (Atividade 5), não esquecendo os respectivos capacitores de acoplamento. Aplique o sinal ajustado previamente ( $50\text{ mV p.p.}$ ,  $1\text{ kHz}$ ) ao terminal de entrada do primeiro estágio (EC), monitorando o sinal naquele terminal e nos terminais do resistor de carga  $R_L = 100\ \Omega$ , que deve estar conectado ao terminal de saída do terceiro estágio (CC) através de um outro capacitor de acoplamento. Estime os ganhos de tensão  $A_{V_o}$  e  $A_V$ . Pode-se dizer que o estágio EC “casou” a entrada do estágio BC ao gerador de sinais? Pode-se dizer que a saída do amplificador está “casada” com a carga de  $100\ \Omega$ ? Qual(is) o(s) estágio(s) responsável pelo *ganho de tensão* deste amplificador? Qual(is) o(s) estágio(s) responsável pelo *ganho de corrente* deste amplificador?

Repita os procedimentos conectando a *carga diretamente ao terminal emissor* do transistor no estágio CC de saída (no lugar do resistor de emissor  $R_e = 10\ \Omega$ ) (preencha as Tabelas XVI a XVIII abaixo). Há alguma vantagem evidente nessa substituição?

**Tabela XVI** – Amplitudes dos sinais no circuito dos estágios acoplados e *sem carga*.

	$V_i$	$V_{i2}$	$V_{o2}$	$V_o$	$A_{V_o} = V_o/V_i$
<i>Teórico†</i>					
<i>Prático</i>					

**Tabela XVII** – Amplitudes dos sinais no circuito dos estágios acoplados e *com a carga de  $100\ \Omega$* .

	$V_i$	$V_{i2}$	$V_{o2}$	$V_{oL}$	$A_V = V_o/V_i$
<i>Teórico†</i>					
<i>Prático</i>					

**Tabela XVIII** – Amplitudes dos sinais no circuito dos estágios acoplados e *com  $R_L$  no lugar de  $R_e$* .

	$V_i$	$V_{i2}$	$V_{o2}$	$V_{oL}$	$A_V = V_o/V_i$
<i>Teórico†</i>					
<i>Prático</i>					

† Nas estimativas teóricas utilize os *valores medidos* das correntes e tensões cc (inseridos nas Tabelas I, V e XII) para obtenção dos *parâmetros dos modelos equivalentes de pequenos sinais dos TBJs*, empregando-os na análise do comportamento *ac* dos circuitos propostos. Considere que os dispositivos operam em condição de equilíbrio térmico à temperatura ambiente.