

### 1- INTRODUÇÃO

UJT são iniciais decorrentes do nome Unijunction Transistor, enquanto **TUJ** já é uma sigla referente ao nome do componente em português: Transistor Unijunção.

Este componente, apesar de ter sido fabricado em 1948, somente em 1952 passou a ser disponível comercialmente.

As suas características elétricas simplificam de uma maneira extraordinária a criação de circuitos eletrônicos de controle, por causa da reduzida quantidade de componentes auxiliares necessários para o seu funcionamento.

### 2- ESTRUTURA INTERNA

O UJT possui a estrutura interna mostrada na figura 1.1. Usa-se uma barra de silício tipo N, levemente dopada (poucos elétrons livres) com um pequeno grão de material tipo P bastante dopado (bastantes lacunas) incluído em sua estrutura. Um terminal é atado a cada uma das extremidades da barra tipo N, sendo estes denominados de Base 1 e Base 2.

Na pastilha tipo P temos a conexão do terminal denominado emissor.

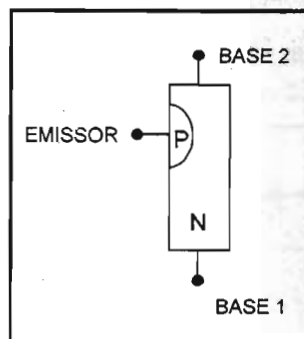


Fig.1.1. - Estrutura Interna UJT

Nota-se que a pastilha P fica localizada mais próxima do terminal Base 2.

Na constituição do transistor, uma única junção surge, daí o nome de **unijunção**.

### SÍMBOLO

Nos circuitos eletrônicos, o UJT vem representado com o símbolo demonstrado na figura 1.2.

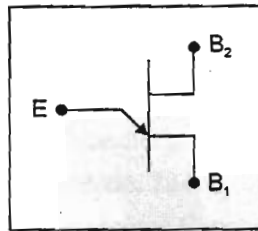


Fig. 1.2. - Símbolo do UJT.

Observa-se que a convenção é a seta apontar para a base 1 e não para a base 2 como às vezes encontra-se em alguns circuitos eletrônicos.

#### 1.4 - CIRCUITO EQUIVALENTE

Para facilitar a análise de funcionamento do UJT, utiliza-se do circuito equivalente obtido a partir da estrutura interna do componente.

Na figura 1.3 temos a representação da estrutura interna e do circuito equivalente do UJT.

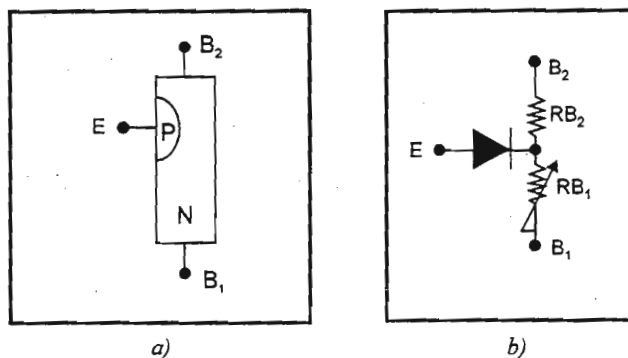


Fig. 1.3 - a) Estrutura interna.

b) Circuito equivalente.

Pelo equivalente, pode-se observar que  $RB_2$  representa a resistência da barra entre  $B_2$  e o emissor e  $RB_1$  está representada por um resistor variável, pois o UJT ao entrar em condução tem o valor desta resistência diminuído, conforme será explicado mais adiante.

A junção PN existente neste transistor, está representada no circuito equivalente através da presença do diodo.

Vale a pena ressaltar que o circuito equivalente nada mais é do que um recurso didático para o entendimento do funcionamento do componente, mas isto não quer dizer que se for unido na prática um diodo mais 2 (dois) resistores obter-se-á um UJT.

### 1.5 - IDENTIFICAÇÃO DOS TERMINAIS

Na prática, para se realizar a identificação dos terminais do UJT, deve-se medir as resistências entre os terminais e analisando os resultados obtidos proceder a identificação.

Na figura 1.4 encontra-se o circuito equivalente do UJT e os resultados que deverão ser obtidos no teste prático.

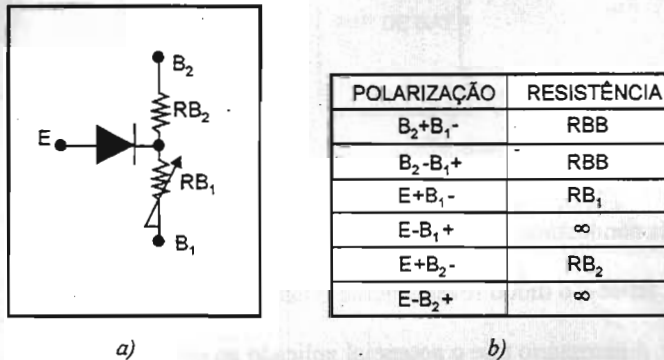


Fig. 1.4 - a) Circuito equivalente.

b) Tabela de teste.

Nota-se que entre  $B_2$  e  $B_1$  obter-se-á uma resistência na faixa de 4k a 10k chamada RBB, independente da polarização aplicada a estes terminais.

No teste, ao se encontrar 2 terminais que apresentem o mesmo valor de resistência, quando trocadas as polaridades, estes serão  $B_2$  e  $B_1$ . O terminal que sobrou, portanto, será o emissor.

Para diferenciar  $B_2$  de  $B_1$  é só verificar os valores das resistências  $RB_2$  e  $RB_1$ .

$RB_1$  deverá ser maior do que  $RB_2$ , pois a pastilha P se encontra mais próxima do terminal  $B_2$ .

### 1.6 - POLARIZAÇÃO DO UJT

Para polarizarmos o transistor unijunção, devemos ter: base 2 positiva em relação à base 1 e o emissor positivo em relação à base 1.

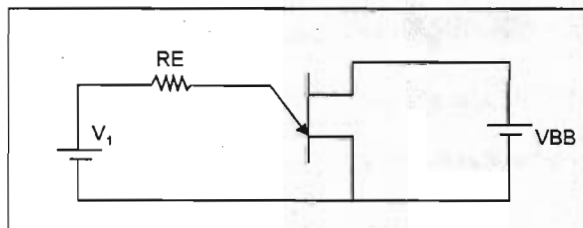


Fig. 1.5 - Circuito de polarização do UJT.

### 1.7 - FUNCIONAMENTO

O UJT só entra em funcionamento com o surgimento da corrente no emissor e para que isto ocorra será feita uma análise da condição que deve ser satisfeita.

Pelo circuito equivalente polarizado, representado na fig. 1.6, observa-se que  $V_{BB}$  mantém uma tensão entre  $B_2$  e  $B_1$  fazendo surgir  $I_{BB}$ .

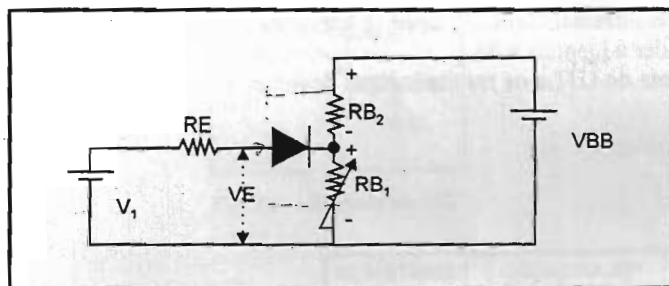


Fig. 1.6 - Circuito equivalente polarizado.

A presença de  $IBB$  não indica que o transistor está conduzindo, pois como foi mencionado anteriormente o UJT só conduz com o surgimento de  $IE$ .

A fonte  $V_{BB}$  faz surgir  $VR_{B1}$  e supondo  $V_1 = 0$ , ter-se-á o diodo reversamente polarizado, pois o potencial do catodo estará mais positivo do que o do anodo.

Para ocorrer o surgimento de  $IE$  e o UJT disparar, é necessário que o potencial aplicado ao emissor ( $VE$ ) seja:  $VE \geq VD + VR_{B1}$ , pois desta forma teremos o diodo polarizado diretamente.

$$\begin{aligned} \text{Dai temos: } VE &\geq VD + VR_{B1} \quad (I) \\ VR_{B1} &= RB_1 \cdot I_{BB} \quad (II) \\ I_{BB} &= V_{BB}/R_{BB} \quad (III) \end{aligned}$$

Substituindo III em II temos:

$$VR_{B1} = RB_1 \frac{V_{BB}}{R_{BB}} \quad (IV)$$

Substituindo IV em I teremos:

$$VE \geq VD + \frac{RB_1}{R_{BB}} \cdot V_{BB} \quad (V)$$

Sendo que:  $\frac{RB_1}{R_{BB}}$  é o valor do parâmetro  $\eta$  (êta) que é a relação intrínseca de corte (Intrinsic stand-off ratio) e este dado é fornecido pelo fabricante, como será visto adiante.

Pode-se escrever a equação V da seguinte maneira:

$$VE \geq VD + \eta V_{BB}$$

Quando a tensão de disparo for atingida, o diodo representativo da junção fica polarizado diretamente, permitindo o fluxo de corrente do emissor para a Base 1. Com o aumento da corrente, esta faz com que haja passagem de portadores do material N no material P, que é bastante dopado, permitindo assim uma fácil circulação dos portadores do material N no material P. Esta fácil circulação de portadores é traduzida como uma baixa resistência. Logo  $RB_1$  que antes do disparo era bastante alta, após o disparo cai para valores em torno de dezenas de ohms (por este motivo é que  $RB_1$  aparece representada por um resistor variável no circuito equivalente).

## 1.8 - CURVA CARACTERÍSTICA

Na figura 1.7 apresenta-se a curva característica do UJT.

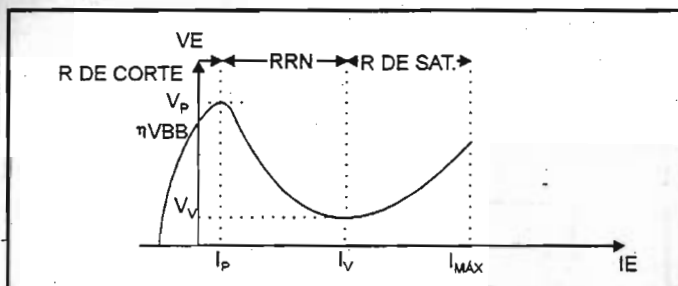


Fig. 1.7 - Curva característica do UJT.

Encontram-se 3 regiões na curva:

- Região de corte,
- RRN (Região de resistência negativa),
- Região de Saturação.

A região de corte é aquela onde o UJT ainda não está conduzindo, pelo fato da junção ainda não se encontrar diretamente polarizada.

A região de resistência negativa consiste na parte de funcionamento do componente, onde sua resistência  $R_{B1}$  diminui e por este motivo o aumento de  $I_E$  é acompanhado pela diminuição de  $V_E$ .

A região de saturação consiste na parte do funcionamento do UJT onde  $R_{B1}$  passa a ser constante, desta forma o aumento de  $I_E$  é acompanhado pelo aumento de  $V_E$ .

## 1.9 - DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS

Os parâmetros abaixo são relativos ao transistor UJT e alguns deles são encontrados em data books:

**RBB** - Resistência interbases: é a resistência medida entre os terminais de base com o emissor aberto. O valor de RBB está na faixa de 4k a 10k. A resistência interbases aumenta com a temperatura em torno de  $0,8\% / ^\circ C$ .

$\eta$  - Intrinsic stand-off ratio. Relação intrínseca de corte. É a relação  $R_{B1} / R_{BB}$  e a faixa de  $\eta$  é de 0,51 a 0,82.

$V_p$  - Tensão de pico - tensão de disparo do UJT. É calculada através da seguinte expressão:

$$V_p \geq V_D + \eta V_{BB} + I_p R_1$$

$I_p$  - Corrente de pico. É a corrente de emissor mínima necessária para disparar o UJT. O valor de  $I_p$  está na faixa de  $2\mu A$  a  $25\mu A$  para os diversos UJT's existentes no mercado.

$V_v$  - Tensão de vale. É o valor de tensão de emissor abaixo do qual ocorre o corte do UJT. A tensão de vale se encontra na faixa de 1V a 5V.



**Iv** - Corrente de vale. É o valor máximo de corrente de emissor na região de resistência negativa. Faixa de valores de **Iv** para os UJT's comerciais: **1mA a 10mA**.

### 1.10 - OSCILADOR DE RELAXAÇÃO

O circuito da figura 1.8, apresenta o oscilador de relaxação com UJT e ao lado com o circuito equivalente do UJT, a fim de facilitar a análise.

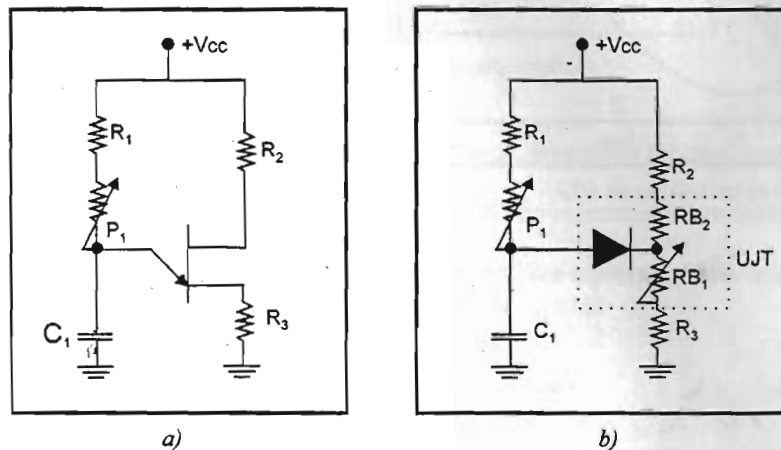


Fig. 1.8 - a) Oscilador com UJT.

b) Oscilador de relaxação com o circuito equivalente do UJT.

Pode-se observar que ao ligar o circuito o capacitor  $C_1$  se encontra descarregado e irá iniciar o seu processo de carga, visto que o UJT se encontra cortado. O percurso de carga de  $C_1$  será através de  $R_1$  e  $P_1$ .

Quando a tensão no capacitor atingir  $V_p \geq V_D + \eta V_{BB}$ , o UJT terá a sua junção PN polarizada diretamente e o capacitor passará a se descarregar através da região emissor - base 1 e do resistor  $R_3$ . Como já foi mencionado, o UJT, ao conduzir, possui sua resistência  $RB_1$  diminuída e este fato permite a tensão no capacitor cair também. O capacitor terá sua tensão diminuída até o ponto onde a junção do diodo ficará novamente reversamente polarizada, pois a tensão do anodo ficará menos positiva do que a tensão do catodo e o UJT cortará. O capacitor iniciará novamente o seu processo de carga até disparar o UJT e o ciclo se repetirá.

Na figura 1.9 são mostradas as formas de ondas no capacitor e no resistor  $R_3$ .

Analizando as formas de ondas apresentadas, percebe-se que no capacitor obtém-se dente - de - serra, pois o percurso de carga do capacitor ( $R_1 + P_1$ ) possui resistência maior do que o percurso de descarga ( $RB_1 + R_3$ ).

No resistor  $R_3$  existe tensão antes do disparo do UJT em decorrência de  $I_{BB}$ . Deve-se na hora do cálculo, colocar  $V_{R_3} < 0,6V$ , pois este circuito irá ser usado para disparar outras etapas constituídas de tiristores e transistores e se for colocada uma tensão em  $R_3$  acima de  $0,6V$ , a etapa seguinte poderá ficar sempre acionada.

Com a descarga do capacitor, surge em  $R_3$  um aumento de tensão e à medida que o capacitor vai se descarregando, a tensão em  $R_3$  vai caindo.

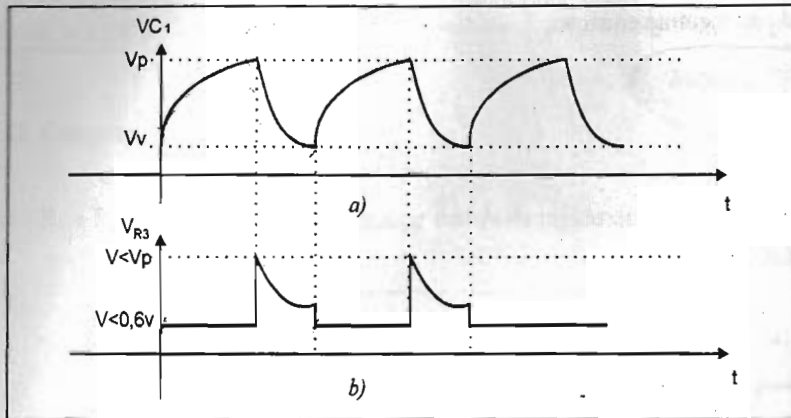


Fig. 1.9 - a) Forma de onda no capacitor.  
b) Forma de onda no resistor  $R_3$

Percebe-se que a forma de onda retirada em  $R_3$  são pulsos positivos. Estes pulsos serão usados para acionarmos outros circuitos como será visto em outros capítulos.

### 11 - FUNÇÃO DOS COMPONENTES DO OSCILADOR DE RELAXAÇÃO

A função dos componentes do oscilador de relaxação está apresentada a seguir e através do circuito da figura 1.8a você pode acompanhar qual o componente que está sendo mencionado.

$R_1$  - Limita a corrente do circuito.

$P_1$  - Controla a corrente de carga do capacitor e com isto o tempo do mesmo atingir  $V_p$ . O tempo sendo alterado, estaremos alterando a frequência de oscilação do circuito.

Ex.: aumentando  $P_1$ , a corrente de carga diminui, o capacitor leva **mais tempo** para atingir  $V_p$  e com isto a frequência diminui. Vide figura 1.10.

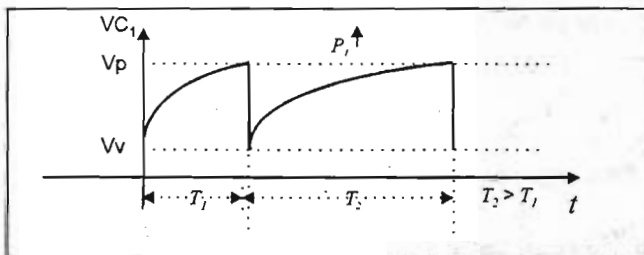


Fig. 1.10 - Forma de onda em  $C_1$  com variação de  $P_1$

$R_1$  - Responsável pelo disparo e corte do UJT. Permite também alterar a frequência do circuito.

$R_2$  - Propicia estabilidade térmica ao circuito.

Com o aumento de temperatura,  $V_D$  e  $\eta$  diminuem, desta forma  $V_p$  também diminui, pois  $V_p \geq V_D + \eta V_{BB}$ .

Sem  $R_2$ ,  $V_{BB}$  é igual a  $V_{CC}$ , pois  $V_{R3}$  é desprezível ( $V_{R3} < 0,6V$ ). Logo, o aumento de temperatura faz  $V_p$  diminuir o seu valor e com isto a frequência do circuito aumenta.

Com  $R_2$ ,  $V_{BB}$  não é mais igual a  $V_{CC}$  e, portanto, o aumento de temperatura faz  $R_{BB}$  aumentar, o que provoca a diminuição de  $I_{BB}$ . Com a diminuição de  $I_{BB}$ ,  $V_{R2}$  diminui e isto permite  $V_{BB}$  aumentar.

Este aumento de  $V_{BB}$  irá amenizar a diminuição de  $V_D$  e de  $\eta$ , pois  $V_p \geq V_D + \eta V_{BB}$ , desta forma o aumento de  $V_{BB}$  compensa a queda de  $V_D$  e  $\eta$ .

O valor de  $R_2$  é dado pelo fabricante através da seguinte equação:

$$R_2 = \frac{10.000}{\eta V_{CC}} \quad \text{para o UJT 2N2646}$$

$R_3$  - Permite a retirada dos pulsos positivos.

### 1.12- CÁLCULO DO OSCILADOR DE RELAXAÇÃO

Calcule o circuito da fig. 1.11, dados:

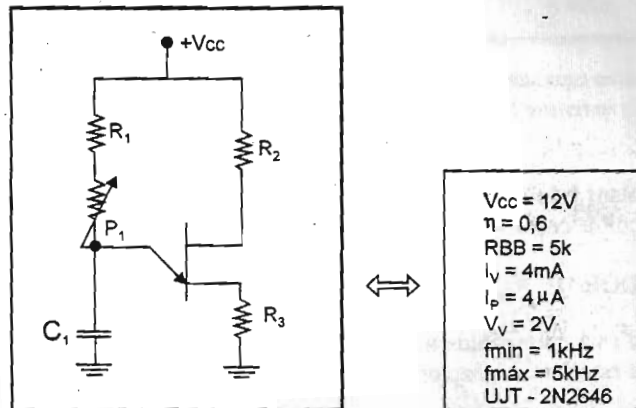


Fig. 1.11 - Oscilador de relaxação.

$R_2$  - Como foi dito anteriormente, é um resistor de compensação de temperatura e seu valor para o transistor 2N2646 é dado por:

$$R_2 = \frac{10.000}{\eta V_{CC}} = \frac{10.000}{0,6 \cdot 12} = \frac{10.000}{7,2} = 1.388,8\Omega$$

$R_2 = 1,2 \text{ K}\Omega$  Comercial.

$R_3$  - Como  $V_{R3} < 0,6V$ , a fim de garantir que a etapa seguinte não será acionada antes do disparo do UJT temos:

$$R_3 = \frac{V_{R3}}{I_{BB}} = \frac{V_{R3}}{\frac{V_{CC}}{R_{BB} + R_2 + R_3}} = \frac{V_{R3} (R_{BB} + R_2 + R_3)}{V_{CC}}$$

Para facilitar a dedução, desprezaremos a parcela de  $R_3$  que está somada a  $R_{BB}$  e  $R_2$ , pois é bem menor do que estes resistores. Nossa equação fica:

$$R_3 = \frac{V_{R3} (R_{BB} + R_2)}{V_{CC}}$$

Escolhendo  $V_{R3} = 0,3V$ , pois é menor do que  $0,6V$  temos:

PARA 2 KHz.

$$V_{CC} = 12V, I_P = 5\mu A, I_V = 5mA, \eta = 0,6, V_{P1} = 0,35$$

$$R_{BB} = 7k\Omega$$

$$R_1 = 270\Omega$$

$$R_2 = 1200\Omega$$

$$C = 0,01\mu F = 10nF$$

$$R_E = 68k\Omega$$



$$R_3 = \frac{0,3 (5K + 1,2K)}{12} = 0,155 \text{ k}\Omega$$

$R_3 = 150 \Omega$  Comercial.

Associação ( $R_1 + P_1$ ) deve permitir o UJT operar dentro da região de resistência negativa.

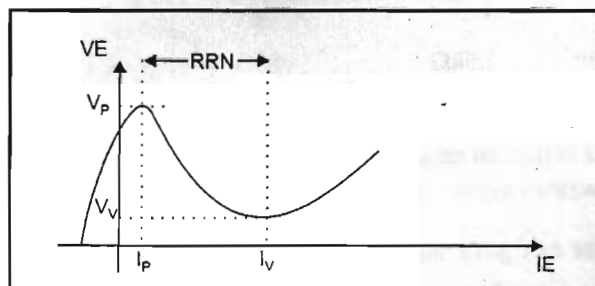


Fig. 1.12 - Curva característica do UJT.

A região de resistência negativa é limitada por 2 correntes:  $I_p$  e  $I_v$ .

O maior resistor de emissor da associação ( $R_1 + P_1$ ) deve deixar circular o menor valor de corrente:  $I_p$ .

Neste caso temos:

$$R_{E \text{ máx}} = (R_1 + P_1) = \frac{V_{CC} - V_p}{I_p}$$

O menor valor de Resistor de emissor ( $R_1$ ) deve deixar circular a maior corrente:  $I_v$ , logo:

$$R_{E \text{ mín}} = R_1 = \frac{V_{CC} - V_v}{I_v}$$

Deduzimos, portanto, que o resistor de emissor deve ficar dentro do seguinte limite:

$$\frac{V_{CC} - V_v}{I_v} < R_E < \frac{V_{CC} - V_p}{I_p}$$

Calculando temos:

$$R_{E \text{ máx}} = R_1 + P_1 = \frac{V_{CC} - V_p}{I_p}$$

$$V_{B1} \geq V_D + \eta V_{B2}$$

Ex.:  $V_{B2}$ , com a presença de  $R_2$ , não é igual a  $V_{CC}$ , logo, pelo divisor de tensão composto por  $R_2$ ,  $R_{BB}$  e pode-se calcular o valor de  $V_{B2}$ .

$$V_{B2} = V_{CC} - V_{R2} - V_{R3}$$

$$V_{B2} = 12 - \frac{1,2 \text{ K} \cdot 12}{1,2 \text{ k} + 5 \text{ k} + 150 \Omega} - 0,3$$

$$V_{BB} = 12 - 2,26 - 0,3 = 9,44V$$

$$V_p \geq 0,6 + 0,6 \cdot 9,44$$

$$V_p \geq 6,26V$$

$$R_{E \text{ máx}} = R_1 + P_1 = \frac{V_{CC} - V_p}{I_p} = \frac{12 - 6,26}{4 \mu A} = 1,43 M\Omega$$

$$R_{E \text{ mín}} = R_1 = \frac{V_{CC} - V_v}{I_v} = \frac{12 - 2V}{4mA} = 2,5k\Omega$$

O valor a ser escolhido deve ficar dentro da faixa acima, ou seja, o resistor de emissor não pode ser menor do que 2,5k nem maior do que 1,43MΩ. A faixa acima é dentro da qual você deve ter valor de RE, **nunca esqueça disto**.

Escolhendo  $R_1 = 4,7k$  (valor comercial), o valor de C para dar a frequência máxima solicitada, deverá ser calculado.

Antes de realizar o cálculo do capacitor, deve-se verificar como se calcula a frequência de oscilação deste circuito.

Pela forma de onda gerada no capacitor e representada na fig. 1.13 pode-se deduzir o valor da frequência de oscilação deste circuito.

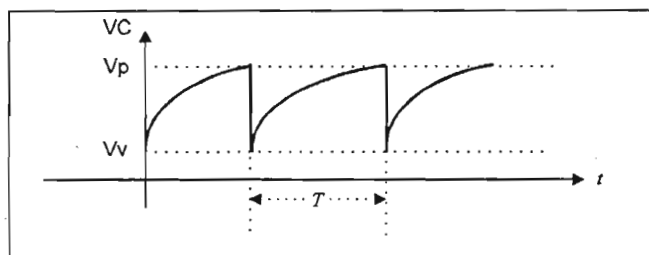


Fig.1.13 - Forma de onda no capacitor.

Será desprezado o tempo de descarga no cálculo da frequência de oscilação, pois este valor é bem menor do que o de carga.

Para calcular T, que é o período de oscilação do circuito, deve-se calcular o tempo que o capacitor leva para ir de 0V a  $V_p$  e o tempo que ele leva para ir de 0V a  $V_v$  e o tempo desejado é a diferença entre os 2(dois) tempos.

$$T = T_1 - T_2$$

$T_1$  é o tempo que o capacitor leva para ir de 0V a  $V_p$  e é dado por:

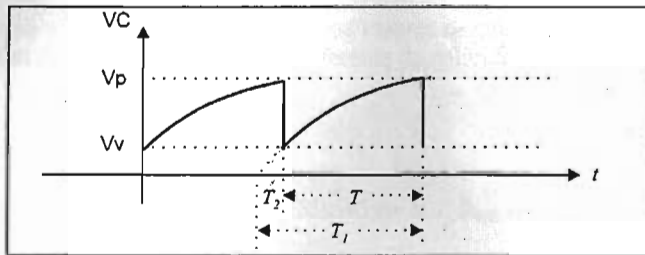


Fig. 1.14 - Forma de onda no capacitor.

$$V_c = V_f(1 - e^{-\frac{T_1}{RC}})$$

$$V_p = V_{cc}(1 - e^{-\frac{T_1}{RC}})$$

$$\frac{V_p}{V_{cc}} - 1 = -e^{-\frac{T_1}{RC}} \quad (-1)$$

$$1 - \frac{V_p}{V_{cc}} = e^{-\frac{T_1}{RC}} \quad (\text{aplicando } \ln)$$

$$\ln(1 - \frac{V_p}{V_{cc}}) = \ln e^{-\frac{T_1}{RC}} \quad \text{OBS: } \ln e = 1$$

$$\ln(1 - \frac{V_p}{V_{cc}}) = -\frac{T_1}{RC}$$

$$T_1 = R.C[-\ln(1 - \frac{V_p}{V_{cc}})]$$

$$T_1 = R.C[-\ln(\frac{V_{cc} - V_p}{V_{cc}})]$$

$$T_1 = RC \ln(\frac{V_{cc} - V_p}{V_{cc}})^{-1}$$

$$T_1 = R.C \ln(\frac{V_{cc}}{V_{cc} - V_p})$$

Deduzindo-se  $T_2$  da mesma maneira temos:

$$T_2 = R.C \ln(\frac{V_{cc}}{V_{cc} - V_v})$$

Como sabemos que  $T = T_1 - T_2$  temos:

$$T = RC \ln\left(\frac{V_{cc}}{V_{cc}-V_p}\right) - RC \ln\left(\frac{V_{cc}}{V_{cc}-V_v}\right)$$

$$T = RC \ln \frac{\frac{V_{cc}}{V_{cc}-V_p}}{\frac{V_{cc}}{V_{cc}-V_v}}$$

$$T = RC \ln \left( \frac{V_{cc}-V_v}{V_{cc}-V_p} \right)$$

Como foi pedida a frequência máxima de 5kHz, calcularemos que capacitor, juntamente com  $R_1$  escolhido de 4,7k, dará a frequência desejada.

$$T = RC \ln \left( \frac{V_{cc}-V_v}{V_{cc}-V_p} \right)$$

$$f = 5\text{kHz} \Rightarrow T = \frac{1}{5 \times 10^3} = 0,2\text{ms}$$

$$0,2 \times 10^{-3} = 4,7 \times 10^3 \cdot C \cdot \ln\left(\frac{12-2}{12-6,26}\right)$$

$$C = \frac{0,2 \times 10^{-3}}{4,7 \times 10^3 \times 0,55} = 0,077\mu\text{F} = 77\text{nF}$$

#### Comercial = 82nF

Para o circuito ter sua frequência diminuída para 1kHz, o tempo de carga deve aumentar e devemos inserir  $P_1$ . Calculando o valor de  $R_E$  para esta nova frequência, devemos lembrar que este valor é a associação de  $R_1 + P_1$ .

$$\text{Para } f = 1\text{kHz} \Rightarrow T = \frac{1}{1 \times 10^3} = 1\text{ms}$$

$$T = R \cdot C \cdot \ln \left( \frac{V_{cc}-V_v}{V_{cc}-V_p} \right)$$

$$1 \times 10^{-3} = R_E \cdot 82 \times 10^{-9} \cdot 0,55$$

$$R_E = \frac{1 \times 10^{-3}}{45,1 \times 10^{-9}} = 0,022 \times 10^6 = 22\text{k}\Omega$$

$$P_1 + R_1 = 22\text{k}$$

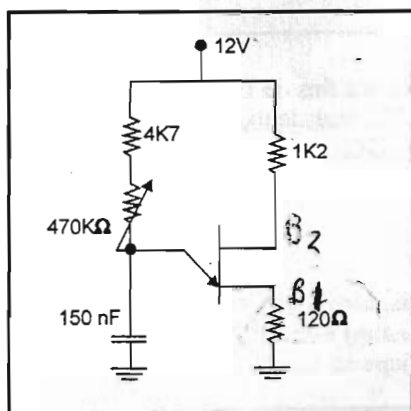
$$P_1 = 22\text{k} - R_1 = 22\text{k} - 4,7\text{k} = 17,3\text{k}$$

$$P_1 \text{ Comercial} = 22\text{k}$$

Notamos que em decorrência da diferença entre os valores calculados e os valores comerciais, o circuito irá oscilar com uma faixa de frequência um pouco diferente da solicitada.

Exercício:

1 - Para o circuito abaixo, supondo o UJT 2N2646,  $\eta = 0,7$ ,  $R_{BB} = 5 \text{ K}\Omega$ ,  $I_P = 5 \mu\text{A}$ ,  $I_V = 1 \text{ mA}$ ,  $V_V = 2 \text{ V}$ , reade-se:



- Qual o componente que apresenta valor indevido? Explique sua resposta.
- Qual a consequência do erro cometido na questão a ?
- Conserte o circuito e calcule a faixa de frequência na qual o mesmo irá operar.
- Explique como o potenciômetro permite variar a frequência de oscilação do circuito.
- Explique como é conseguida a estabilidade térmica neste circuito.