

# Trabalho Prático 1 - Diodos e Transistores Bipolares de Potência

Matheus Barros Oliveira

2022-09-14



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSU  
SISTEMAS ELETROELETRÔNICOS E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL  
FUNDAMENTOS DE CIRCUITOS ELÉTRICOS  
PROFESSOR ANDERSON ROCHA

## 1. Introdução:

Nesse projeto os estudantes deverão utilizar seus conhecimentos sobre tecnologia dos semicondutores de potência, diodos de potência e transistores bipolares de junção na solução de problemas envolvendo a aplicação dos dispositivos como elementos de conversores estáticos.

## 2. Objetivo:

O objetivo deste trabalho é realizar cálculos e projetos em relação à semicondutores de potência diodos e transistores.

### 2.1 Problema 01:

O diodo de potência MBR20100CT, do fabricante VISHAY e cujo data sheet encontra-se em anexo, utilizado no circuito da Figura 1, tem uma tensão de threshold estimada ( $V_t$ ) igual a  $620mV$  e uma resistência em condução direta igual a  $10.1m\Omega$ . A tensão aplicada apresenta uma forma de onda triangular simétrica (Figura 2), com  $120V$  pico a pico e ciclo de trabalho  $D = 0.5$ , em uma frequência  $f_s = 20kHz$ . O circuito irá operar na temperatura ambiente de  $30^\circ C$ . Fazer o projeto térmico para a aplicação, se necessário, considerando o uso de pasta térmica e sabendo que o diodo não precisa ser isolado eletricamente de um eventual dissipador.

**Figura 1: Circuito Simplificado da Aplicação**

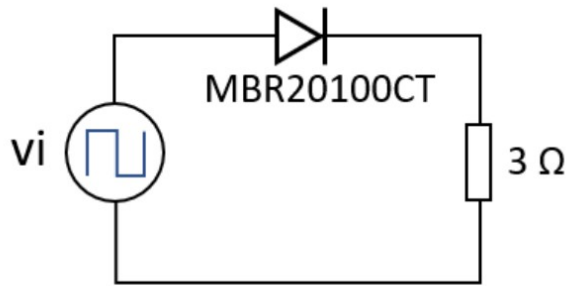


Figura 1: Circuito simplificado da aplicação

**Figura 2: Forma de Onda da Tensão  $V_i$**

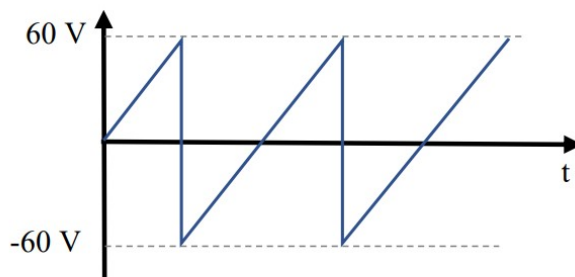


Figura 2: Forma de onda da tensão  $v_i$ .

## 2.2 Problema 02:

O conversor *c.c. – c.c.* mostrado na Figura 3 é utilizado para se elevar de  $24\text{V}$  para  $60\text{V}$  c.c. a tensão de um banco de baterias para aplicação em uma carga elétrica. Os interruptores eletrônicos empregados no conversor são o MOSFET M1 e o Diodo de potência D1. Para a aplicação em questão o projetista escolheu o diodo VS-E5TH1506, cuja folha de dados encontra-se em anexo. As formas de onda das correntes, em ampères, nos interruptores e nos componentes passivos do conversor estão representadas na Figura 4. Se o conversor opera na frequência de chaveamento  $f_s = 100\text{KHz}$ , com ciclo de trabalho  $D = 0.66$ , pede-se determinar:

- os valores médio e rms da corrente diodo D1;
- as perdas em condução em D1;
- a temperatura de junção ( $T_j$ ) do diodo D1 considerando uma temperatura ambiente de  $40^\circ\text{C}$ ;
- discutir a necessidade de se utilizar um dissipador de calor com o componente D1.

Figura 3: Conversor Boost c.c - c.c

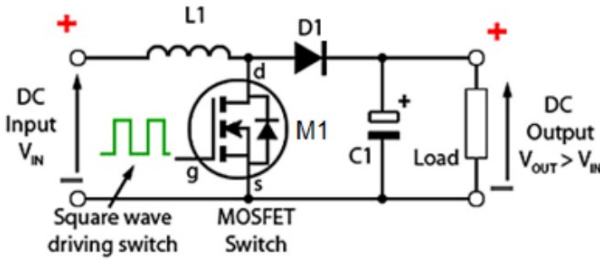
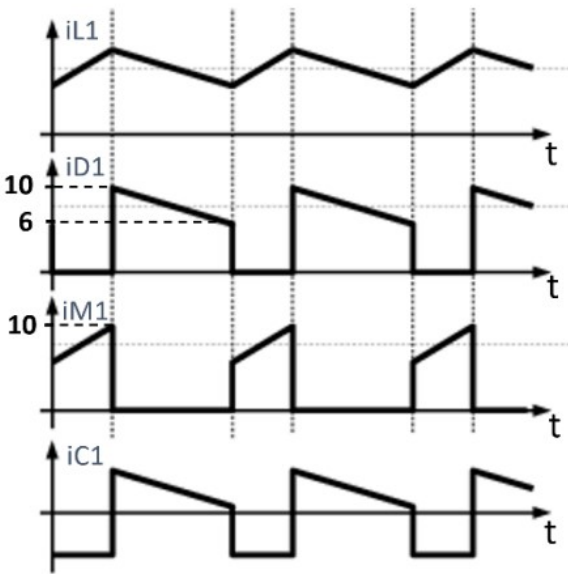


Figura 4: Formas de Onda das Correntes [A]



### 2.3 Problema 3:

Um circuito de acionamento com o transistor bipolar 2SCR582D3, cujo data sheet encontra-se em anexo, deve alimentar uma carga resistiva de  $10\Omega$  a partir de uma fonte de tensão contínua de  $24V$ . A carga deve receber uma tensão com forma de onda quadrada e frequência  $f_s = 1KHz$ , com razão cíclica 0,8 (o sinal deve permanecer em nível alto durante 80% do seu período  $T_s$ ). A tensão do circuito de comando de base do transistor tem amplitude de  $5V$ .

Sabendo que a corrente média desejada na carga deve ser em torno de  $1.92A$  e a perda por condução no transistor deve ser mínima. Pede-se projetar o resistor de base do acionamento (valor ôhmico e potência), considerando um fator de saturação  $OF = 3$ .

Comentar sobre a viabilidade de se construir um circuito semelhante ao desse problema, empregando um transistor bipolar de potência, se a fonte de tensão contínua for de  $240V$  e a corrente média desejada na carga estiver em torno de  $15A$ .

### 3 Materiais e Métodos:

Para a realização desta atividade foram utilizados os softwares LTspice XVIII versão (17.0.35.0) para as simulações dos circuitos e o Rstudio versão 4.1.2 (2021-11-01) para a criação do relatório e realização dos cálculos.

### 4. Desenvolvimento:

#### 4.1 Problema 1:

Todos os cálculos desenvolvidos abaixo foram realizados considerando o diodo modelo: TO-220AB MBR20100CT do fabricante VISHAY.

##### 4.1.1 Cálculo da Corrente Média:

Como a fonte de alimentação apresenta uma forma de onda triangular, para o cálculo da corrente média  $I_{med}$  foi utilizado a equação abaixo, onde:

$K$  é a razão cíclica;  $I_p$  é a corrente de pico;

$$I_{med} = \frac{K}{2} I_p$$

```
# Cálculo da corrente média
```

```
resistencia <- 3;  
tensao_pico <- 60;  
ciclo_trabalho <- 0.5;  
corrente_pico <- tensao_pico/resistencia;  
corrente_media <- round((ciclo_trabalho/2)*corrente_pico,2);
```

A corrente média calculada foi: 5A.

##### 4.1.2 Cálculo da Corrente RMS:

Para o cálculo da corrente  $I_{rms}$  foi utilizada a seguinte fórmula onde:

$I_p$  é a corrente de pico;

$K$  é a razão cíclica;

$$I_{rms} = I_p \sqrt{\frac{K}{3}}$$

```
# Cálculo corrente RMS
```

```
corrente_rms <- round(corrente_pico*sqrt(ciclo_trabalho/3),2);
```

O valor da corrente  $I_{rms}$  calculada foi: 8.16A.

##### 4.1.3 Cálculo Potência Condução:

Para o cálculo da potência consumida em condução foi utilizada a seguinte fórmula abaixo onde:

$V_t$  é a queda de tensão direta no diodo;

$I_d$  é a corrente direta média no diodo;

$R_d$  é a resistência de condução direta;

$I_{drms}$  é a corrente direta rms no diodo;

$$P_{cond} = V_t I_d + R_d I_{drms}^2$$

```
# Declaração da função para o cálculo da potência gasta em condução

calculo_potencia_conducao <- function(tensao_conducao, corrente_media,
                                       resistencia_direta, corrente_rms){

  potencia_conducao <- (tensao_conducao*corrente_media)+
    (resistencia_direta*(corrente_rms^2));

  return(potencia_conducao);

}

# Cálculo da potência de condução

tensao_conducao_diodo <- 620e-3;
resistencia_direta_diodo <- 10.1e-3;

potencia_conducao <-
  calculo_potencia_conducao(tensao_conducao_diodo,
                           corrente_media,resistencia_direta_diodo,corrente_rms);

potencia_conducao <-
  round(potencia_conducao,2);
```

A potência de condução direta do diodo calculada foi: 3.77W.

#### 4.1.4 Cálculo da Temperatura de Junção:

Para o cálculo da temperatura de operação da junção do diodo foi utilizada a seguinte fórmula, onde:

$T_j$  temperatura de junção;

$P_j$  potência de condução;

$R_{ja}$  resistência junção/ambiente;

$R_{ca}$  resistência case/ambiente;

$R_{ja}$  resistência junção/ambiente;

$T_a$  temperatura ambiente;

$$T_j = (P_j * R_{ja}) + T_a$$

```
#Declaração da função para o cálculo da temperatura de junção

calculo_temperatura_juncao <-
```

```
function(potencia_conducao, resistencia_ja, temperatura_ambiente){

  temperatura_juncao <- (potencia_conducao*resistencia_ja) +
    temperatura_ambiente;

  return(temperatura_juncao);

}
```

*# Cálculo da temperatura de junção*

```
temperatura_maxima_juncao <- 150;
resistencia_ja <- 60;
temperatura_ambiente <- 30;

temperatura_juncao <-
  calculo_temperatura_juncao(potencia_conducao,
    resistencia_ja, temperatura_ambiente);

temperatura_juncao <- round(temperatura_juncao,2);
```

A temperatura de junção calculada foi  $256.2^{\circ}C$  e a temperatura de junção máxima do diodo é  $150^{\circ}C$ . Desta forma ve-se a necessidade de se usar um dissipador de calor.

### 4.1.5 Cálculo do Dissipador de Calor:

Para o cálculo do dissipador de calor foram utilizadas as seguintes equações, onde:

$R_{ja}$  resistência junção/ambiente;

$R_{jc}$  resistência junção/case;

$R_{cd}$  resistência case/dissipador;

$R_{da}$  resistência dissipador/ambiente;

$T_j$  temperatura de junção, considerada 80% da temperatura de junção máxima;

$T_a$  temperatura ambiente;

$P_d$  potência consumida na condução;

$$R_{da} = R_{ja} - R_{jc} - R_{cd}$$

$$R_{ja} = \frac{(T_j - T_a)}{P_d}$$

*# Declaração da função para o cálculo do valor da resistência  $R_{ja}$ .*

```
calculo_resistencia_ja <-
  function(temperatura_juncao, temperatura_ambiente,potencia_conducao){

    resistencia_ja<-
      (temperatura_juncao-temperatura_ambiente)/potencia_conducao;

    return(resistencia_ja);

  }
```

```
# Declaração da função de cálculo da resistência do dissipador Rda.
```

```
calculo_resistencia_da <-  
  function(resistencia_ja, resistencia_jc,resistencia_cd){  
  
    resistencia_da <-  
      resistencia_ja - resistencia_jc - resistencia_cd;  
  
    return(resistencia_da);  
  
  }
```

Para a determinação do valor da resistência térmica do dissipador não foi considerada a utilização de pasta térmica entre o case e o dissipador e foi considerado um valor máximo da temperatura de junção do diodo em 80% da temperatura máxima do diodo que é 150°C.

```
# Cálculo da resistência ja para a temperatura de projeto
```

```
resistencia_jc <- 2;  
resistencia_cd <- 2; # Sem considerar a pasta térmica  
temperatura_juncao_projeto <- 0.8 * temperatura_maxima_juncao;  
  
resistencia_ja_projeto <-  
  calculo_resistencia_ja(temperatura_juncao_projeto,  
                        temperatura_ambiente,potencia_conducao);  
  
resistencia_ja_projeto <- round(resistencia_ja_projeto,2);
```

```
# cálculo da resistência da máxima
```

```
resistencia_da <-  
  calculo_resistencia_da(resistencia_ja_projeto,  
                        resistencia_jc,resistencia_cd);  
  
resistencia_da <-  
  round(resistencia_da,2);
```

```
# Valor da resistência do dissipador do catálogo
```

```
resistencia_da_final <- 12;
```

```
# cálculo da resistência ja final
```

```
resistencia_ja_projeto_final <-  
  (resistencia_jc + resistencia_cd +  
   resistencia_da_final);  
  
resistencia_ja_projeto_final <-  
  round(resistencia_ja_projeto_final,2);
```

```
# Cálculo da temperatura da junção após a instalação do dissipador
```

```
temperatura_juncao_final <-  
  calculo_temperatura_juncao(  
    resistencia_ja_projeto_final,  
    resistencia_jc,  
    resistencia_cd,  
    temperatura_ambiente,  
    potencia_conducao,  
    temperatura_maxima_juncao)
```

```
potencia_conducao,resistencia_ja_projeto_final,temperatura_ambiente);

temperatura_juncao_final <-
  round(temperatura_juncao_final,2);
```

O valor máximo da resistência térmica do dissipador de calor que atende a temperatura de junção do projeto é  $19.87^{\circ}\text{C}/\text{W}$ . Desta forma foi escolhido o dissipador de calor modelo WA-T220-101E da marca Ohmite, pois o mesmo atende às especificações do projeto e possui um valor de resistência térmica de  $12^{\circ}\text{C}/\text{W}$ . A tabela contendo as informações do dissipador de calor pode ser vista na Tabela 1 abaixo.

**Tabela 1: Informações Dissipador de Calor**

SERIES SPECIFICATIONS					
Heatsink Part Number	For Package Type	Ohmite Resistor Series	Surface Area (in <sup>2</sup> )	Weight	Thermal Resistance*
WA-T220-101E WV-T220-101E	TO-220	TBH25, TCH35	6.5	0.35 oz/10g	Rs-a=12°C/W Rs-a=13°C/W
WA-T247-101E WV-T247-101E	TO-247	TEH70, TEH100	8.4	0.42 oz/12g	Rs-a=11°C/W Rs-a=12°C/W
WA-T264-101E WV-T264-101E	TO-264	TFH85	8.4	0.42 oz/12g	Rs-a=11°C/W Rs-a=12°C/W
WA-DT2-101E WV-DT2-101E	TO-220 & TO-247	TBH25, TCH35, TEH70, TEH100	15.1	0.79 oz/22g	Rs-a=7°C/W Rs-a=8°C/W

Após a instalação do dissipador de calor no conjunto o valor final do  $R_{ja}$  será  $16^{\circ}\text{C}/\text{W}$  e a temperatura de junção final no diodo será:  $90.32^{\circ}\text{C}$ .

## 4.2: Problema 2:

Para a realização da questão foi considerado o diodo modelo VS - E5TH1506 - M3 do fabricante VISHAY.

### 4.2.1 Cálculo Corrente Média:

Como tem-se uma onda trapezoidal de alimentação do circuito, para o cálculo da corrente média foi utilizada a seguinte equação abaixo onde:

$I_{med}$  corrente média;

$k$  razão cíclica;

$I_a$  corrente base;

$I_b$  corrente final;

$$I_{med} = \frac{k(I_a + I_b)}{2}$$

Para o cálculo da corrente RMS foi utilizada a equação abaixo onde:

$I_{rms}$  corrente RMS;

$k$  razão cíclica;

$I_a$  corrente base;

$I_b$  corrente final;



$$I_{rms} = \sqrt{\frac{k(I_b^2 + I_a I_b + I_a^2)}{3}}$$

```
# Cálculo da corrente média
```

```
ciclo_trabalho_2 <- 0.66;
corrente_ia_2 <- 6;
corrente_ib_2 <- 10;

corrente_media_2 <-
  (ciclo_trabalho_2 * (corrente_ia_2 + corrente_ib_2))/2;

corrente_media_2 <-
  round(corrente_media_2,2);
```

A corrente média calculada foi: 5.28A.

### 4.2.2 Cálculo Corrente RMS:

```
# Cálculo corrente RMS
```

```
corrente_rms_2 <-
  sqrt((ciclo_trabalho_2*(corrente_ib_2^2 +
    corrente_ia_2*corrente_ib_2 +
    corrente_ia_2^2))/3);

corrente_rms_2 <-
  round(corrente_rms_2,2);
```

O valor da corrente  $I_{rms}$  calculada foi: 6.57A.

### 4.2.3 Cálculo da Potência Dissipada em Condução:

Para o cálculo da potência dissipada em condução foram considerados os valores da resistência de condução  $R_d$  e tensão direta  $V_t$  do diodo VS - E5TH1506 - M3 obtidos no arquivo em anexo “Informações Diodo VS - E5TH1506 - M3”.

```
# Cálculo potência condução
```

```
resistencia_direta_diodo_2 = 0.0334;
tensao_conducao_diodo_2 = 0.8437;

potencia_conducao_2 <-
  calculo_potencia_conducao(tensao_conducao_diodo_2,
    corrente_media_2,resistencia_direta_diodo_2,corrente_rms_2);

potencia_conducao_2 <-
  round(potencia_conducao_2,2);
```

A potência de condução direta do diodo calculada foi: 5.9W.

## 4.2.4 Cálculo da Temperatura de Junção:

Não foi possível encontrar o valor da resistência  $R_{Ja}$  no data - sheet do componente VS-E5TH1506-M3, desta forma foi utilizado o diodo modelo VS - 15ETX06 - M3, que possui características semelhantes, para a determinação do valor de  $R_{Ja}$  cujo valor encontrado foi de  $70^{\circ}C/W$ .

```
# Cálculo da temperatura de junção

temperatura_maxima_juncao_2 <- 175;
temperatura_ambiente_2 = 40;
resistencia_jc_2 = 1.72;
resistencia_ca_2 = 70;
resistencia_ja_2 = resistencia_jc_2 + resistencia_ca_2;

temperatura_juncao_2 <-
  calculo_temperatura_juncao(potencia_conducao_2,resistencia_ja_2,
                             temperatura_ambiente_2);

temperatura_juncao_2 <-
  round(temperatura_juncao_2,2);
```

Analisando o valor da temperatura de junção calculada  $463.15^{\circ}C$  e o valor da temperatura máxima de junção do diodo que é  $175^{\circ}C$  ve-se a necessidade de instalação de um dissipador de calor no projeto.

## 4.2.5 Cálculo do Dissipador de Calor:

Para o cálculo do dissipador de calor foram utilizadas as mesmas equações do item 4.1.4 deste relatório. Foi considerado para o cálculo do dissipador de calor uma temperatura de junção máxima de 80% da temperatura máxima do diodo que é  $175^{\circ}C$  e sem pasta térmica entre o case e o dissipador.

```
# Cálculo resistência ja de acordo com a nova temperatura ja

resistencia_cd_2 <- 2;
temperatura_juncao_projeto_2 <- 0.8*temperatura_maxima_juncao_2;

resistencia_ja_projeto_2 <-
  calculo_resistencia_ja(temperatura_juncao_projeto_2,
                          temperatura_ambiente_2, potencia_conducao_2);

resistencia_ja_projeto_2 <-
  round(resistencia_ja_projeto_2,2);

# Cálculo resistência da máxima

resistencia_da_2 <-
  calculo_resistencia_da(resistencia_ja_projeto_2,
                          resistencia_jc_2, resistencia_cd_2);

resistencia_da_2 <-
  round(resistencia_da_2,2);

resistencia_da_final_2 <- 12;

# Cálculo resistência ja final
```

```

resistencia_ja_projeto_final_2 <-
  (resistencia_jc_2 + resistencia_cd_2 + resistencia_da_final_2);

resistencia_ja_projeto_final_2 <-
  round(resistencia_ja_projeto_final_2,2);

# Cálculo da temperatura de junção final

temperatura_juncao_final_2 <-
  calculo_temperatura_juncao(potencia_conducao_2,
    resistencia_ja_projeto_final_2, temperatura_ambiente_2);

temperatura_juncao_final_2 <-
  round(temperatura_juncao_final_2);

```

O valor máximo da resistência térmica do dissipador de calor que atende a temperatura de junção do projeto é  $13.23^{\circ}\text{C}/\text{W}$ . Desta forma foi escolhido o dissipador de calor modelo WA-T220-101E da marca Ohmite, que pode ser visto na Tabela 1, pois o mesmo atende às especificações do projeto e possui um valor de resistência térmica de  $12^{\circ}\text{C}/\text{W}$ .

Após a instalação do dissipador de calor no conjunto o valor final do  $R_{ja}$  será  $15.72^{\circ}\text{C}/\text{W}$ .

Após a instalação do dissipador de calor a temperatura de junção final no diodo será:  $133^{\circ}\text{C}$ .

Como o valor da resistência térmica do dissipador no valor de  $12^{\circ}\text{C}/\text{W}$  está muito próxima da resistência térmica máxima calculada no valor de  $13.23^{\circ}\text{C}/\text{W}$  optou-se por utilizar uma pasta térmica para a redução da resistência  $R_{cd}$ . Os valores de resistência térmica da pasta térmica podem ser vistas na Tabela 2.

**Tabela 2: Tabela Resistência Térmica**

Tipo de Case	Tipo de isolador	Rcd ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )	
		Com pasta	Sem pasta
TO-3	Sem isolante	0,1	0,3
	Teflon	0,7 a 0,8	1,25 a 1,45
	Mica	0,5 a 0,7	1,2 a 1,5
TO-66	Sem isolante	0,15 a 0,2	0,4 a 0,5
	Mica	0,6 a 0,8	1,5 a 2,0
	Mylar	0,6 a 0,8	1,2 a 1,4
TO - 220	Sem isolante	0,3 a 0,5	1,5 a 2,0
TO - 247	Mica	2,0 a 2,5	4,0 a 6,0

Como o estamos utilizando um diodo TO - 220, o valor da resistência  $R_{cd}$  caiu de  $2^{\circ}\text{C}/\text{W}$  para  $0.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$ .

```

# Cálculo considerando a pasta térmica

resistencia_cd_2 <- 0.5;

resistencia_ja_projeto_final_2 <-
  (resistencia_jc_2 + resistencia_cd_2 + resistencia_da_final_2);

resistencia_ja_projeto_final_2 <-
  round(resistencia_ja_projeto_final_2,2);

temperatura_juncao_final_2 <-
  calculo_temperatura_juncao(potencia_conducao_2,
    resistencia_ja_projeto_final_2, temperatura_ambiente_2);

```

```
temperatura_juncao_final_2 <-  
  round(temperatura_juncao_final_2);
```

Com a utilização da pasta térmica conseguiu-se reduzir o valor da resistência  $R_{ja}$  para  $14.22^{\circ}C/W$  e consequentemente reduziu-se a temperatura de junção para  $124^{\circ}C$ .

## 4.3 Problema 3:

### 4.3.1: Parte 1:

Para determinarmos o valor da resistência de base, primeiramente temos que determinar o valor de  $I_{csat}$ , situação onde temos a menor perda de condução, e para isso devemos utilizar a corrente média desejada para o cálculo. Para a determinação do  $I_{csat}$  foi utilizada a seguinte equação, onde:

#### 4.3.1.1: Cálculo Corrente na Carga:

$I_{med}$  corrente média na carga;

$D$  ciclo de trabalho;

$I_p$  corrente de pico na carga

$$I_{med} = D * I_p$$

```
# Cálculo corrente de pico  
duty_cicle <- 0.8;  
corrente_media_3 <- 1.92;  
corrente_pico_3 <- round(corrente_media_3/duty_cicle,2);
```

Realizando o cálculo encontramos uma corrente de pico de 2.4A para uma corrente média de 1.92A e um duty cycle de 0.8. Com o valor desta corrente foi possível determinar o valor da corrente de saturação  $I_{bsat}$ , conforme pode ser visto na equação abaixo onde:

#### 4.3.1.2: Cálculo $I_b$ sat:

$I_{bsat}$  corrente de base de saturação;

$I_{cs}$  corrente de coletor de saturação;

$\beta_{min}$  ganho  $\beta$  mínimo do transistor;

$$I_{\beta sat} = \frac{I_{cs}}{\beta_{min}}$$

```
# Cálculo da corrente Ib saturação  
  
b_min <- 200;  
ib_sat <- round(corrente_pico_3/b_min, 4);
```

Para um ganho  $\beta_{min}$  de 200 e uma corrente  $I_{csat}$  de 2.4A, teremos uma corrente  $I_{\beta sat}$  de 0.012A. Com a corrente  $I_{\beta sat}$  calculada pode-se calcular o valor de  $I_b$  conforme pode-se ver abaixo:

### 4.3.1.3: Cálculo $I_b$ :

$OF$  over-drive factor;

$I_b$  corrente de base;

$I_{bsat}$  corrente de base de saturação;

$$OF = \frac{I_b}{I_{bsat}}$$

```
# Cálculo da corrente ib
```

```
over_drive <- 3;  
corrente_ib <- over_drive * ib_sat;
```

Realizando o cálculo foi encontrado um valor de  $I_b$  de 0.036A. Com este valor de  $I_b$  é possível determinar o valor de  $R_b$  a partir da equação abaixo, considerando o valor da tensão de 5V e o valor de  $V_{BE}$  de 0.7V, conforme pode-se ver abaixo, onde:

### 4.3.1.4: Cálculo $R_b$

$R_b$  resistência de base;

$V$  tensão da fonte;

$V_{BE}$  tensão base-emissor;

$I_b$  corrente de base;

$$R_b = \frac{V - V_{BE}}{I_b}$$

```
# Cálculo da resistência e potência consumida em Rb
```

```
tensao_fonte <- 5;  
tensao_vbe <- 0.7;  
  
resistencia_rb <- round((tensao_fonte - tensao_vbe)/corrente_ib,2);  
potencia_rb <- round(resistencia_rb * corrente_ib,2);
```

Para se manter uma corrente média de 1.92A com a menor perda possível em condução (transistor em saturação) deve-se usar uma resistência na base de 119.44 $\Omega$ , que provoca uma dissipação de potência de 4.3W. Os cálculos realizados podem ser comprovados com a simulação realizada no software LtSpice e que pode ser vista na Figura 3.

Figura 3: Simulação no LTSpice



### 4.3.2: Parte 2

Para a construção de um circuito similar utilizando um transistor bipolar de potência, com uma fonte de 240V alimentando uma carga com uma corrente média de 15A não podemos utilizar o transistor modelo 2SCR582D3, pois a sua tensão de bloqueio  $V_{CE}$  máxima é 30V o que é insuficiente para bloquear a tensão da fonte que é 240V.

Temos no mercado o transistor BJ modelo BUV22, cujo data sheet pode ser visto em anexo, que atenderia à aplicação, pois possui uma tensão  $V_{CEmax} = 250V$  e uma corrente máxima de  $I_c = 40A$ . Para a realização dos cálculos abaixo foram utilizadas as fórmulas já definidas no item 4.3.1.

#### 4.3.2.1: Cálculo Corrente na Carga:

```
# Cálculo corrente de pico
```

```
duty_cycle <- 0.8;  
corrente_media_3_1 <- 15;  
corrente_pico_3_1 <- round(corrente_media_3_1/duty_cycle,2);
```

Realizando o cálculo encontramos uma corrente de pico de 18.75A para uma corrente média de 15A e um duty cycle de 0.8. Com o valor desta corrente foi possível determinar o valor da corrente de saturação  $I_{bsat}$ , conforme pode ser visto na equação abaixo onde:

#### 4.3.2.2: Cálculo $I_b$ sat:

```
# Cálculo  $I_b$  saturação
```

```
b_min_1 <- 10;  
ib_sat_1 <- round(corrente_pico_3_1/b_min_1, 2);
```

Para um ganho  $\beta_{min}$  de 10 e uma corrente  $I_{csat}$  de 18.75A, teremos uma corrente  $I_{\beta sat}$  de 1.88A. Com a corrente  $I_{\beta sat}$  calculada pode-se calcular o valor de  $I_b$  conforme pode-se ver abaixo:

### 4.3.2.3: Cálculo $I_b$ :

```
# Cálculo corrente  $I_b$ 

over_drive <- 3;
corrente_ib_3 <- over_drive * ib_sat_1;
```

Realizando o cálculo foi encontrado um valor de  $I_b$  de 5.64A. Com este valor de  $I_b$  é possível determinar o valor de  $R_b$  a partir da equação abaixo, considerando o valor da tensão de 5V e o valor de  $V_{BE}$  de 0.7V, conforme pode-se ver abaixo, onde:

### 4.3.2.4: Cálculo $R_b$

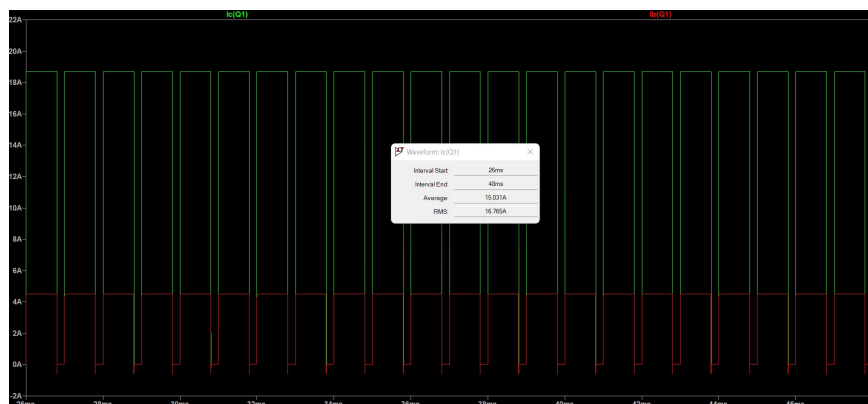
```
# Cálculo resistência e potência dissipada em  $R_b$ 

tensao_fonte <- 5;
tensao_vbe <- 0.7;

resistencia_rb_1 <- round((tensao_fonte - tensao_vbe)/corrente_ib_3,2);
potencia_rb_1 <- round(resistencia_rb_1*corrente_ib_3,2);
```

Para se manter uma corrente média de 15A com a menor perda possível em condução (transistor em saturação) deve-se usar uma resistência na base de  $0.76\Omega$  que provoca um consumo de potência de 4.29W. Os cálculos realizados podem ser comprovados com a simulação realizada no software LtSpice e que pode ser vista na Figura 4.

Figura 4: Simulação no LTSpice



## 5. Conclusão:

### 5.1 Conclusão Questões 1 e 2:

Analisando os resultados obtidos pode-se concluir que os diodos de potência, assim como outros dispositivos eletrônicos, apresentam um certo aquecimento durante a sua operação e esse aquecimento está diretamente relacionado com a razão direta de sua tensão de threshold  $V_t$ , a resistência interna  $R_d$  do diodo e a corrente  $I_d$  que percorre o dispositivo. Para amenizar este efeito uma das soluções mais utilizadas é a instalação de um dissipador de potência para diminuir a resistência térmica do conjunto, pois aumenta a área de superfície do diodo e conseqüentemente favorece a troca de calor com o ambiente.

Nas duas situações estudadas as temperaturas de junção dos diodos durante a operação estavam em  $256.2^{\circ}\text{C}$  e  $463.15^{\circ}\text{C}$  respectivamente. Após a instalação dos dissipadores de calor as temperaturas caíram para  $90.32^{\circ}\text{C}$  e  $124^{\circ}\text{C}$  respectivamente, ou seja, após a instalação dos dissipadores tivemos uma redução de aproximadamente 65% no primeiro caso e 72% no segundo caso.

Pode-se concluir que a instalação de dispositivos que diminuem a resistência térmica de um dispositivo com o ambiente é imprescindível para o bom funcionamento de equipamento eletrônicos, principalmente os que operam com grandes correntes.

## 5.2 Conclusão Questão 3:

Ao analisarmos a primeira parte da questão 3 temos um circuito de acionamento de uma carga pequena de corrente média de 1.92A alimentada por uma fonte de 24V. Para chaveramos esta carga, devemos levar o transistor, modelo 2SCR582D3, para a regição de saturação e para isso deve-se instalar no circuito de acionamento um resistor de  $119.44\Omega$ , o que gera na base do transistor uma corrente de 0.036A para um fator de saturação de 3, ou seja, para levarmos este transistor para a regição de saturação obedecendo um fator de saturação de 3, teremos uma corrente de base de 0.036A. Após os cálculos, o circuito foi simulado com os valor encontrados e obteve-se o resultado esperado de uma corrente média na carga de 1.92A, e este fator pode ser observado na Figura 3 onde temos o gráfico da corrente média  $I_b$  na carga.

Já na segunda parte do problema temos um circuito cuja corrente média é 15A e uma tensão de alimentação de 240V. Para este circuito operar com esta tensão, teve-se que escolher outro modelo de transistor, pois a tensão de bloqueio  $V_{CE}$  do transistor modelo 2SCR582D3 é somente de 30V e sua corrente  $I_c$  é de 10A. Desta forma foi escolhido o transistor modelo BUV22 que possui uma tensão de bloqueio  $V_{CE}$  de 250V e uma corrente  $I_c$  de 40A. Ao se projetar o resistor de base para que este transistor opere na faixa de saturação com um fator de saturação de 3, foi encontrado um valor de resistecia de  $0.76\Omega$  para uma corrente de base 5.64A. Após os cálculos o circuito foi simulado, e obteve-se o resultado esperado de uma corrente média na carga de 15A, este fator pode ser observado na Figura 4. Apesar de ter-se atingido o objetivo, pode-se observar que o circuito de comando possui uma corrente muito alta, pois o ganho  $\beta$  do transistor para altas correntes cai muito, o que faz com que tenhamos uma corrente alta de  $I_b$  para levar este transistor para a regição de saturação. Desta forma este circuito torna-se inviável, pois a corrente de base do transistor é muito alta, o que provocaria um circuito de comando muito grande.

Por fim, pode-se concluir que os transistores bipolares de junção (TBJ) são ótimos dispositivos para chaveamento de cargas, mas para garantir um bom funcionamento do circuito, deve-se ficar atendo às tensões de  $V_{CEsat}$ , e correntes  $I_{Csat}$ ,  $I_{bsat}$  e  $I_b$ , pois para determinadas tensões e correntes, o circuito de acionamento pode-se tornar muito grande, inviabilizando desta forma o projeto.

Clique aqui para acessar o Projeto no GitHub:

## 6 Bibliografia:

ROCHA, Anderson. **Interruptores e Comandos Eletrônicos: Diodo de Potência**, 2022. 37 slides. Acesso em: 10/09/2022

ROCHA, Anderson. **Interruptores e Comandos Eletrônicos: Modelos e Perdas de Dispositivos Semicondutores de Potência**, 2022. 24 slides. Acesso em: 10/09/2022

ROCHA, Anderson. **Interruptores e Comandos Eletrônicos: Módulo II**, 2022. 19 slides. Acesso em: 10/09/2022