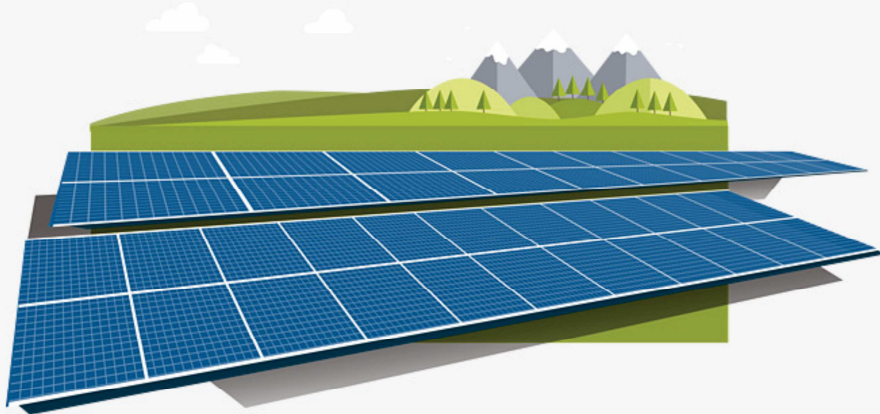
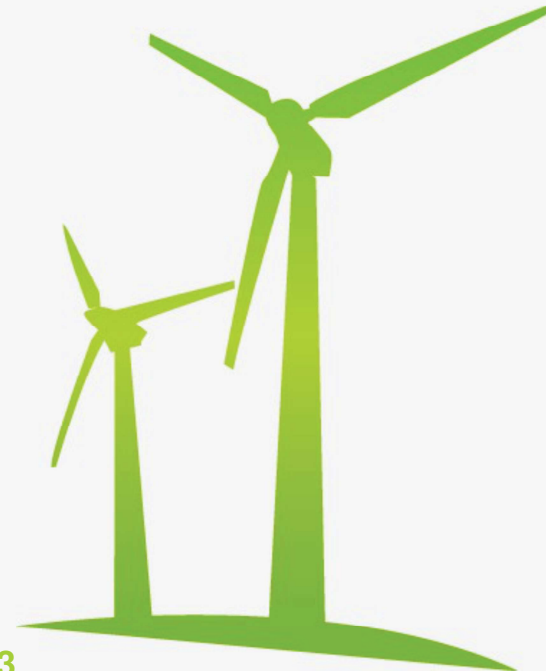


## Aula 04 – Transistores de potência

### Parte 3 - Circuito de acionamento



Prof. Heverton Augusto Pereira  
[heverton.pereira@ufv.br](mailto:heverton.pereira@ufv.br)



# Limitações de $di/dt$ e $dv/dt$

- Durante a entrada em condução, a corrente de coletor sobe, e a  $di/dt$  é

$$\frac{di}{dt} = \frac{I_L}{t_r} = \frac{I_{cs}}{t_r}$$

- Durante o desligamento, a tensão coletor-emissor deve subir em relação à queda da corrente de coletor, e a  $dv/dt$  é

$$\frac{dv}{dt} = \frac{V_s}{t_f} = \frac{V_{cs}}{t_f}$$

# Limitações de $di/dt$ e $dv/dt$

- O circuito RLC é, em geral, criticamente amortecido a fim de evitar oscilações.
- Para um amortecimento crítico unitário,  $d = 1$ ,

$$R_s = 2\sqrt{\frac{L_s}{C_s}}$$

- Um tempo de descarga de um terço do período de chaveamento  $T_s$  é geralmente adequado.

$$3R_s C_s = T_s = \frac{1}{f_s}$$

- Ou

$$R_s = \frac{1}{3f_s C_s}$$

# Operação em série e em paralelo

- Os transistores podem operar em série para aumentar a capacidade de tensão.
- Os transistores são conectados em paralelo para poder lidar com a demanda de corrente.

## Paralleling

### *PT IGBTs are more difficult*

- ♣ Sorting is required for good current sharing
  - Recommend sort  $V_{CE(on)}$  at nominal test current to within 0.1V
  - Part-to-part variation in  $V_{CE(on)}$  is wider because of
    - p+ substrate and epi
    - Minority carrier lifetime control
- ♣ Negative temperature coefficient of  $V_{CE(on)}$  (secondary issue)
  - PT IGBTs can be paralleled if *sorted* and they *share heat*
  - Can avoid paralleling by using single large die size PT IGBT

### *NPT and Field Stop IGBTs are easy*

- ♣ Good current sharing due to narrow part-to-part distribution of  $V_{CE(on)}$ 
  - Tight parameter distribution simplifies or eliminates sorting requirement
- ♣ Positive temperature coefficient of  $V_{CE(on)}$ 
  - Inherent thermal stability
- ♣ Parallel similar to MOSFETs

# Circuito de acionamento de MOSFET

- Primeiramente vamos entender as características de um MOSFET real.



## R6015FNX

Nch 600V 15A Power MOSFET

Datasheet

$V_{DSS}$	600V
$R_{DS(on)}(Max.)$	0.35 $\Omega$
$I_D$	$\pm 15A$
$P_D$	50W

### ●Features

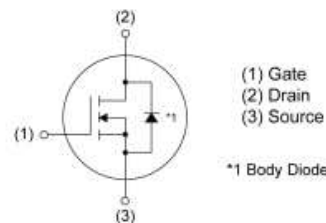
- 1) Low on-resistance.
- 2) Fast switching speed.
- 3) Gate-source voltage ( $V_{GSS}$ ) guaranteed to be  $\pm 30V$ .
- 4) Drive circuits can be simple.
- 5) Parallel use is easy.
- 6) Pb-free lead plating ; RoHS compliant

### ●Outline

TO-220FM



### ●Inner circuit



### ●Packaging specifications

# Circuito de acionamento de MOSFET

- Primeiramente vamos entender as características de um MOSFET real.

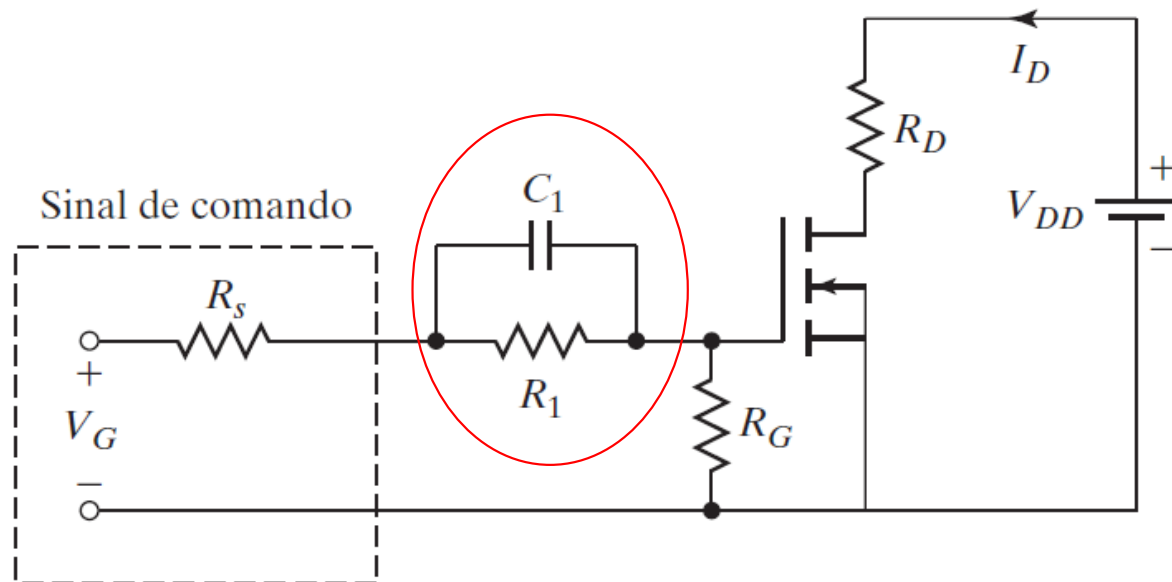
Static drain - source on - state resistance	$R_{DS(on)}$ <sup>*6</sup>	$V_{GS} = 10V, I_D = 7.5A$				
		$T_j = 25^\circ C$	-	0.27	0.35	$\Omega$
		$T_j = 125^\circ C$	-	0.59	-	
Gate input resistance	$R_G$	$f = 1MHz, \text{open drain}$	-	10.2	-	$\Omega$

# Circuito de acionamento de MOSFET

Parameter	Symbol	Conditions	Values			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
Transconductance	$g_{fs}^{*6}$	$V_{DS} = 10V, I_D = 7.5A$	4.5	10	-	S
Input capacitance	$C_{iss}$	$V_{GS} = 0V$	-	1660	-	pF
Output capacitance	$C_{oss}$	$V_{DS} = 25V$	-	1110	-	
Reverse transfer capacitance	$C_{rss}$	$f = 1MHz$	-	45	-	
Effective output capacitance, energy related	$C_{o(er)}$	$V_{GS} = 0V,$ $V_{DS} = 0V \text{ to } 480V$	-	54.6	-	pF
Effective output capacitance, time related	$C_{o(tr)}$		-	183	-	
Turn - on delay time	$t_{d(on)}^{*6}$	$V_{DD} \approx 300V, V_{GS} = 10V$ $I_D = 7.5A$	-	38	-	ns
Rise time	$t_r^{*6}$		-	45	-	
Turn - off delay time	$t_{d(off)}^{*6}$	$R_L = 40.2\Omega$	-	120	240	
Fall time	$t_f^{*6}$	$R_G = 10\Omega$	-	35	70	

# Circuito de acionamento de MOSFET

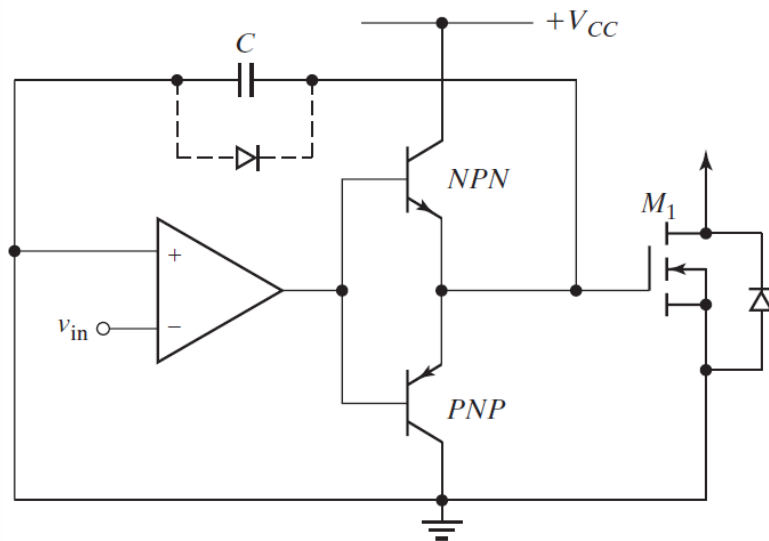
- O tempo para ligar um MOSFET depende do tempo de carga da capacitância de entrada
- Circuito de acionamento rápido da porta consiste em adicionar um circuito TO, para carregar mais rapidamente a capacitância de entrada





# Circuito de acionamento de MOSFET

- Circuito de acionamento com arranjo totem-pole e adequação da borda do pulso.
- Transistores operam na região linear
- Sinal de comando gerado por um amplificador





# Circuito de acionamento de MOSFET

**MC34152, MC33152,  
NCV33152**

**High Speed Dual  
MOSFET Drivers**

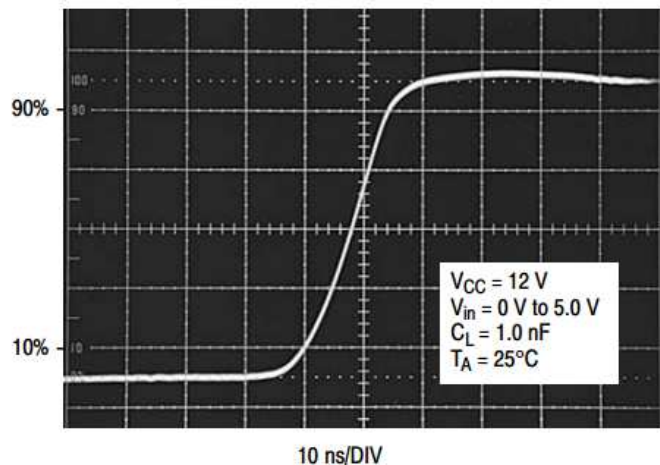


Figure 11. Drive Output Rise Time

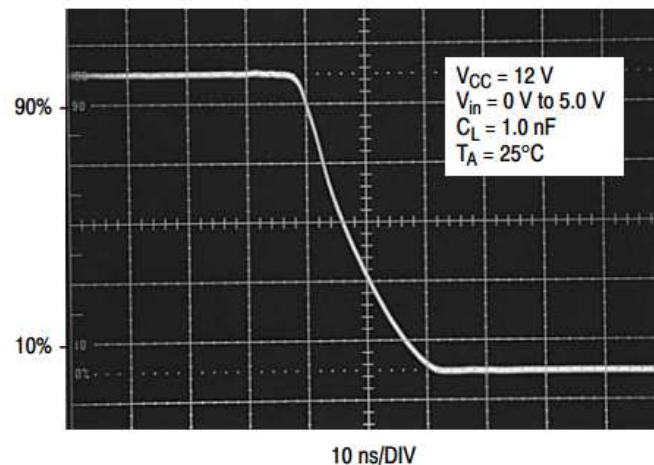


Figure 12. Drive Output Fall Time

# Circuito de acionamento de JFET

**NTE489**  
**Silicon P-Channel JFET Transistor**  
**General Purpose AF Amplifier**  
**TO92 Type Package**

**Electrical Characteristics:** ( $T_A = +25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
<b>Static Characteristics</b>						
Gate-Source Breakdown Voltage	$V_{(BR)GSS}$	$I_G = 1^\circ\text{A}, V_{DS} = 0$	30	-	-	V
Gate Reverse Current	$I_{GSS}$	$V_{GS} = 20\text{V}, V_{DS} = 0, \text{Note 2}$	-	-	200	pA
Gate-Source Cutoff Voltage	$V_{GS(off)}$	$I_D = -1\text{nA}, V_{DS} = -15\text{V}$	0.5	-	2.0	V
Gate Current	$I_G$	$I_D = -2\text{mA}, V_{DG} = -15\text{V}, \text{Note 2}$	-	15	-	pA
Saturation Drain Current	$I_{DSS}$	$V_{DS} = -15\text{V}, V_{GS} = 0$	-2	-	-15	mA

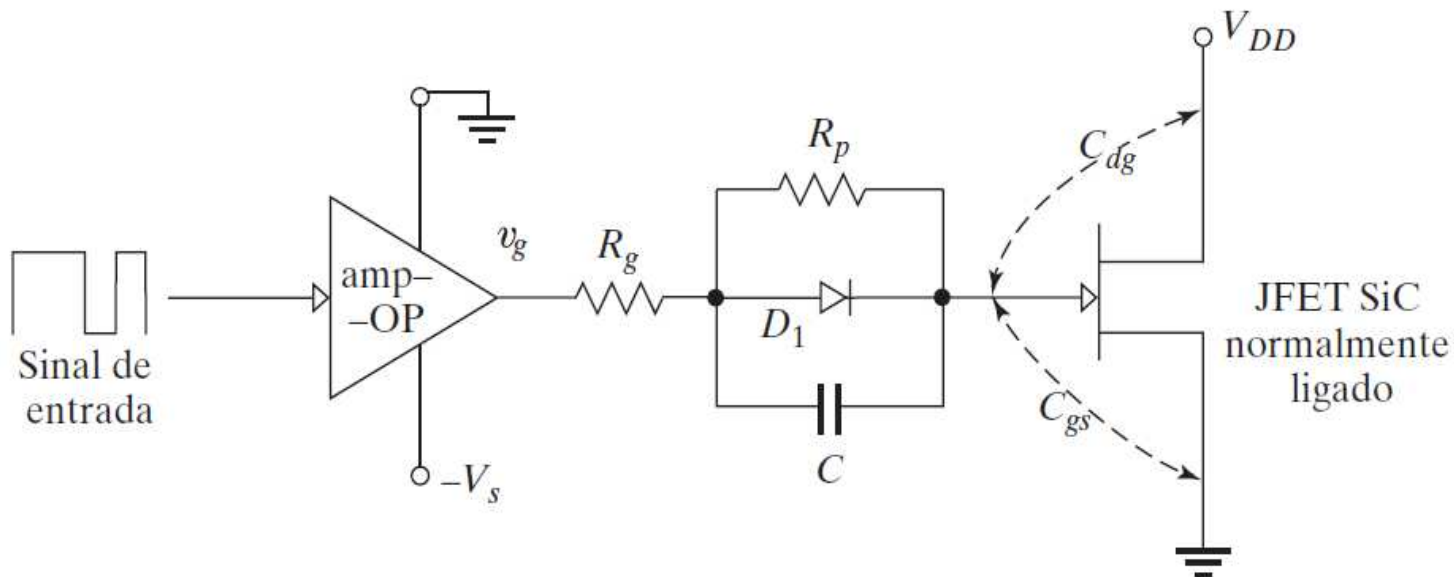
# Circuito de acionamento de JFET

**NTE489**  
**Silicon P-Channel JFET Transistor**  
**General Purpose AF Amplifier**  
**TO92 Type Package**

Dynamic Characteristics						
Common-Source Forward Transconductance	$g_{fs}$	$V_{DS} = -15V, V_{GS} = 0, f = 1kHz,$ Note 3	6000	-	15000	$^{\circ} mho$
Common-Source Output Conductance	$g_{os}$	$V_{DS} = -15V, V_{GS} = 0, f = 1kHz$	-	-	200	$^{\circ} mho$
Common-Source Input Capacitance	$C_{iss}$	$V_{DS} = -15V, V_{GS} = 0, f = 1MHz$	-	32	-	pF
Common-Source Reverse Transfer Capacitance	$C_{rss}$	$V_{DS} = -15V, V_{GS} = 0, f = 1MHz$	-	4	-	pF
Equivalent Short-Circuit Input Noise Voltage	$e_n$	$V_{DS} = -10V, I_D = -2mA, f = 1kHz$	-	6	-	$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$

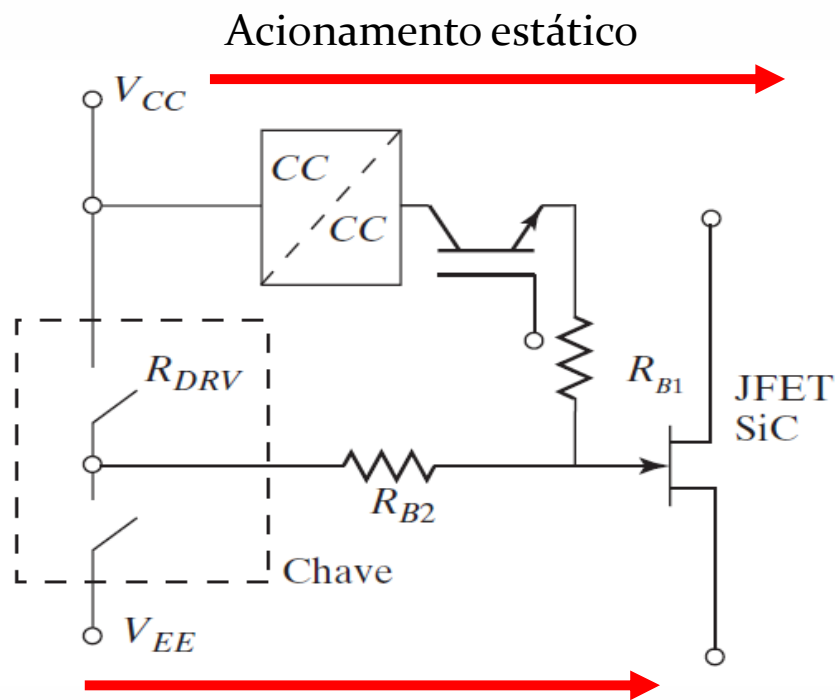
# Circuito de acionamento de JFET

- JFET são chaves normalmente ligadas.
- Para desligar essa chave é necessário um sinal de tensão porta-dreno negativa menor que a tensão de pinçamento



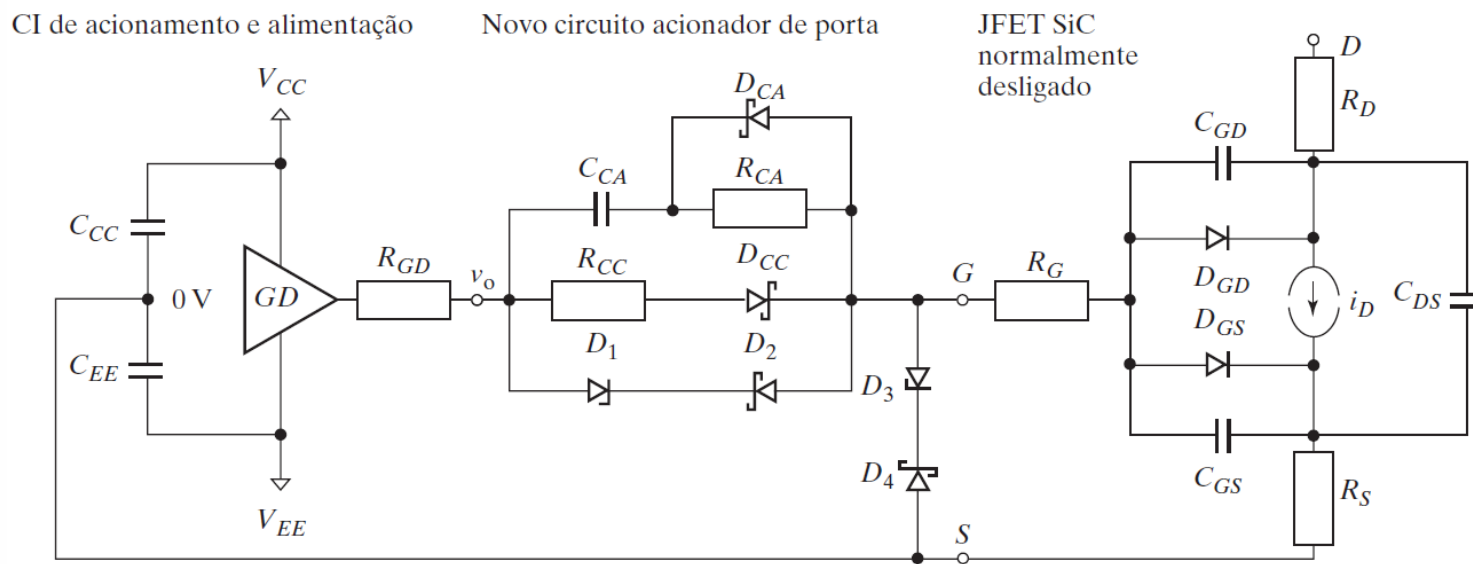
# Circuito de acionamento de JFET

- Acionador em dois estágios para JFET SiC normalmente desligado:



# Circuito de acionamento de JFET

- Acionador em dois estágios para JFETs SiC normalmente desligados:





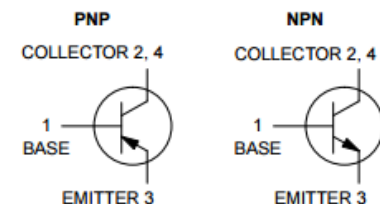
# Circuito de acionamento de TBJ

**2N6487, 2N6488 (NPN),  
2N6490, 2N6491 (PNP)**

**Complementary Silicon  
Plastic Power Transistors**

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector-Emitter Voltage 2N6487, 2N6490 2N6488, 2N6491	$V_{CEO}$	60 80	Vdc
Collector-Base Voltage 2N6487, 2N6490 2N6488, 2N6491	$V_{CB}$	70 90	Vdc
Emitter-Base Voltage	$V_{EB}$	5.0	Vdc
Collector Current - Continuous	$I_C$	15	Adc
Base Current	$I_B$	5.0	Adc
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	75 0.6	W W/ $^\circ\text{C}$
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	1.8 0.014	W W/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-65 to +150	$^\circ\text{C}$

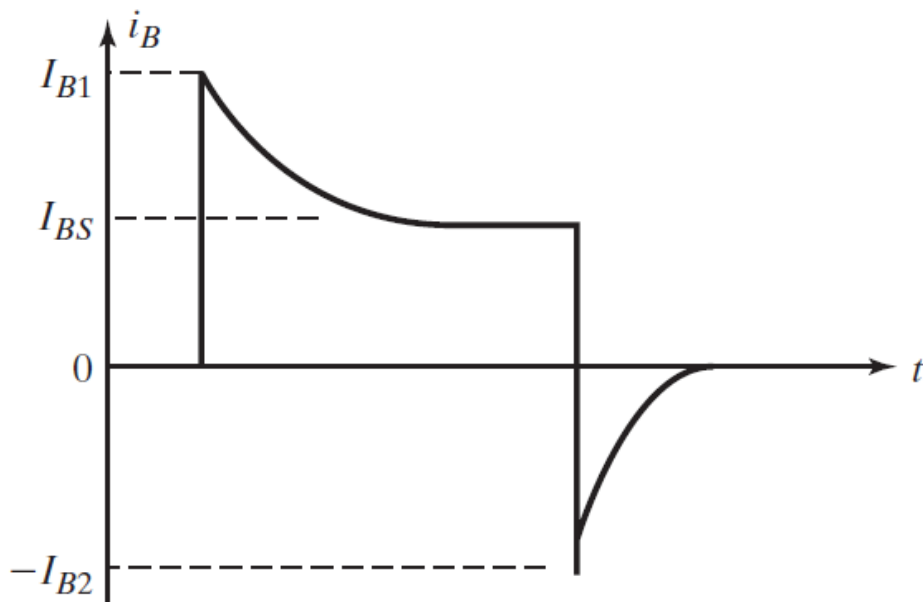
**15 AMPERE  
COMPLEMENTARY SILICON  
POWER TRANSISTORS  
60-80 VOLTS, 75 WATTS**



TO-220  
CASE 221A  
STYLE 1

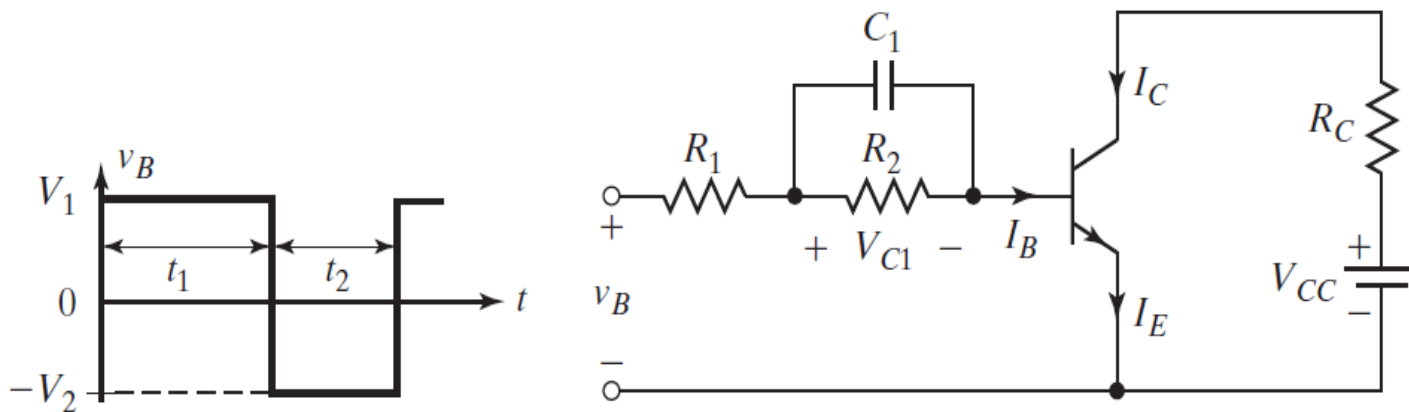
# Circuito de acionamento de TBJ

- Forma de onda da corrente de acionamento de base:



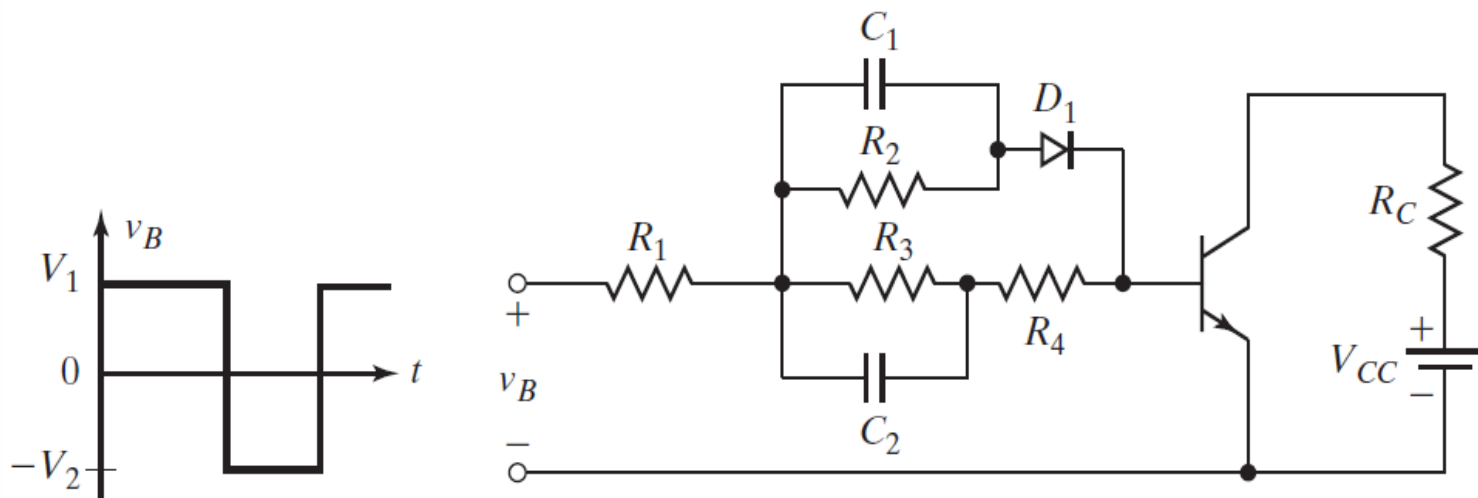
# Circuito de acionamento de TBJ

- Pico da corrente na base durante o fechamento:



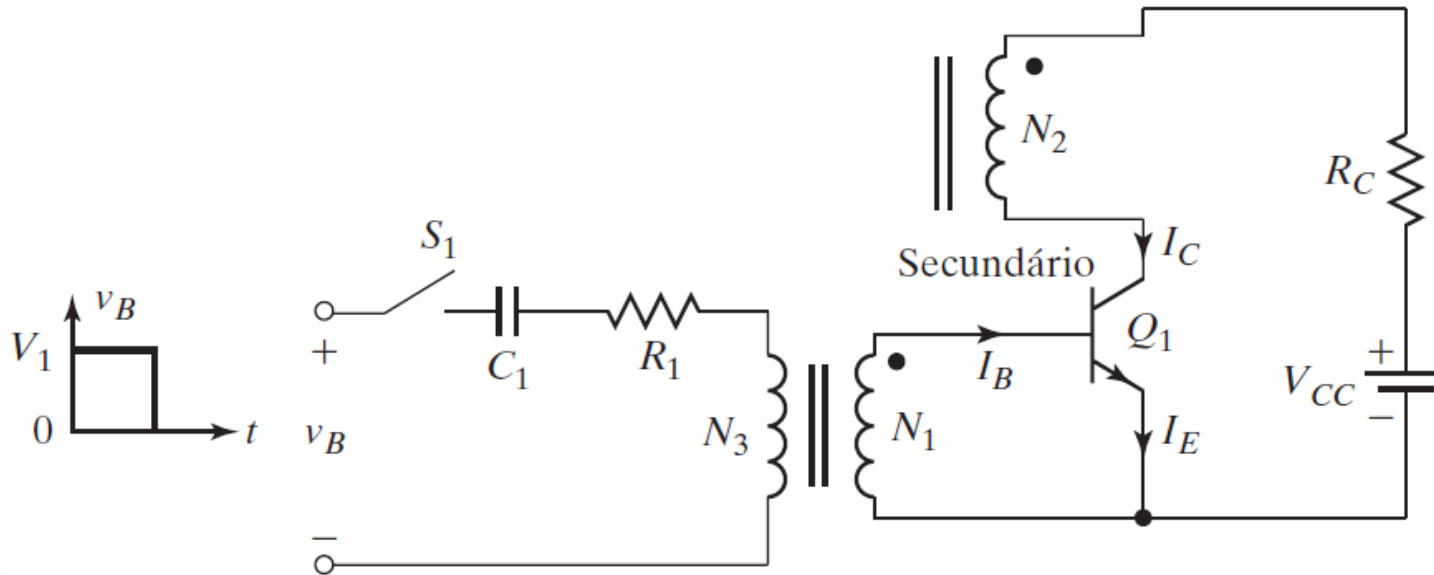
# Circuito de acionamento de TBJ

- Pico da corrente na base durante o fechamento e o desligamento:



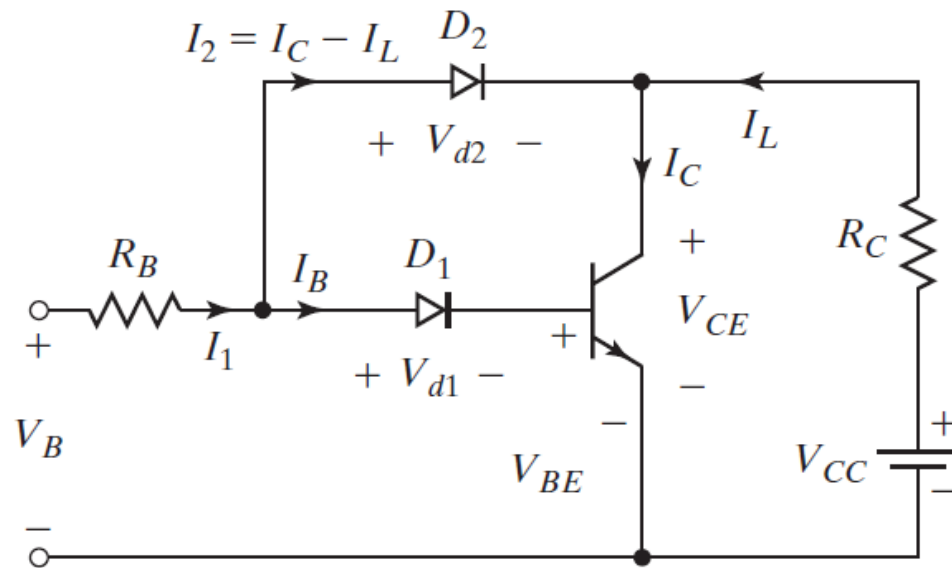
# Circuito de acionamento de TBJ

- Circuito proporcional de comando de base:



# Circuito de acionamento de TBJ

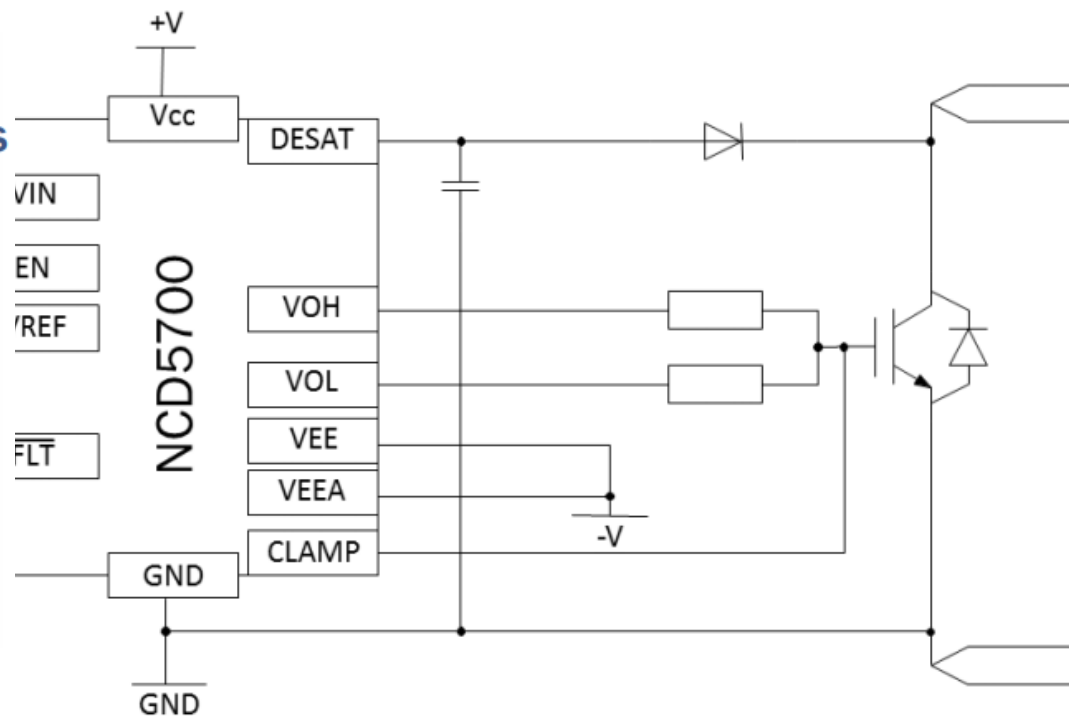
- Circuito de grampeamento do coletor:



# Circuito de acionamento de IGBT

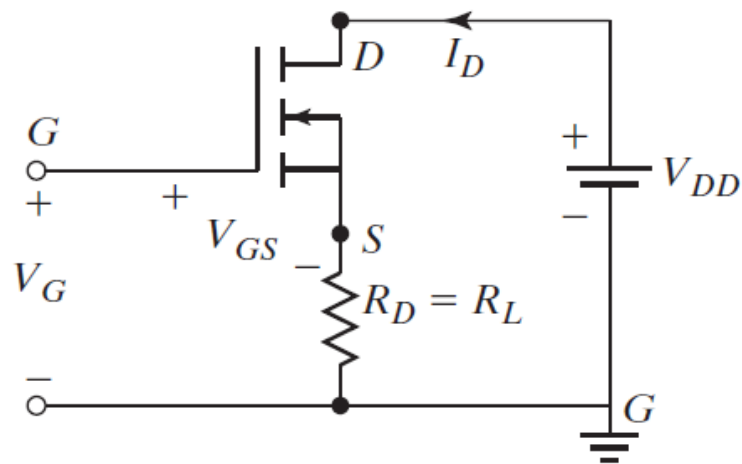
## IGBT-Drive:

- Low impedance Drive – low Sw Losses
- Short distance / low inductive Layout
- 4-lead-package
- UVLO of IGBT-Driver >12V
- Single or Bipolar drive
- Miller-clamp
- Desat-detection (OCP/SCP)
- Soft-off (overvoltage)



# Isolação dos circuitos de acionamento

- A importância de aplicar o sinal de comando de um transistor entre seus terminais porta e fonte pode ser demonstrada com a figura a seguir, em que a resistência de carga está conectada entre o terminal fonte e o terra.
- A tensão porta-fonte efetiva é  $V_{GS} = V_G - R_L I_D(V_{GS})$
- Existem basicamente duas formas de isolar ou desprender o sinal de comando em relação ao terra:
  1. Transformadores de pulso
  2. Optoacopladores





# Isolação dos circuitos de acionamento

- 1. Transformadores de pulso
- 2. Optoacopladores

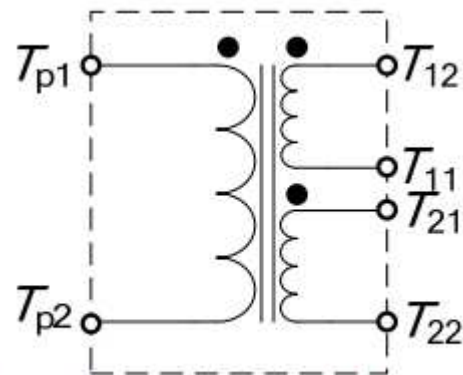


Fig. 1 - Diagrama do transformador de pulso

Fonte: <http://www.supplier.ind.br/site/arquivosprodutos/trm480d20a28.pdf>





# Abraço!

---

**Heverton Augusto Pereira**

Prof. Departamento de Engenharia Elétrica | UFV

Coordenador da Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência | Gesep

Membro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica | PPGEL/CEFET-MG

E-mail: [heverton.pereira@ufv.br](mailto:heverton.pereira@ufv.br)