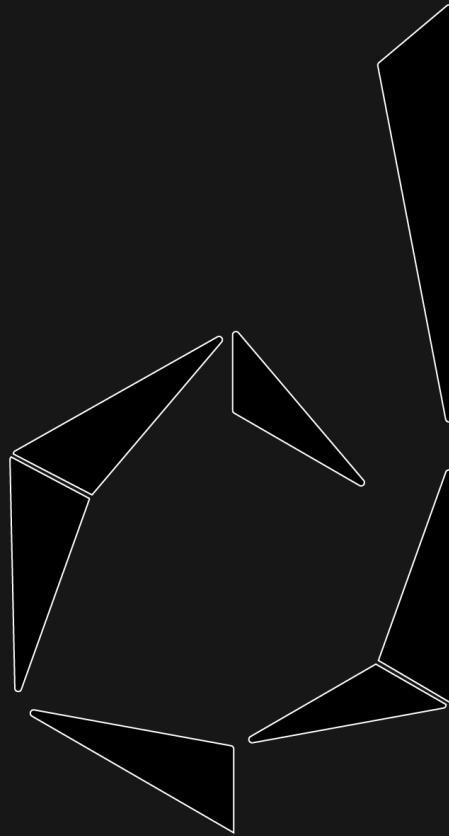


INGENIERÍA MECATRÓNICA



DI\_CERO

DIEGO CERVANTES RODRÍGUEZ

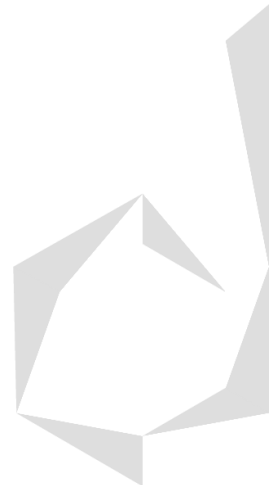
ELECTRÓNICA DE POTENCIA

CAPTURE CIS LITE

MOSFET Incremental Conmutador

## Contenido

|  |    |
|--|----|
| COMPETENCIA/OBJETIVO .....                       | 2  |
| PALABRAS CLAVE .....                             | 2  |
| INTRODUCCIÓN TEÓRICA.....                        | 2  |
| INVESTIGACIÓN PREVIA .....                       | 3  |
| EXPERIMENTOS .....                               | 10 |
| EXPERIMENTO 2. RESPUESTA A ALTA FRECUENCIA ..... | 13 |
| [REFERENCIAS] .....                              | 16 |



## COMPETENCIA/OBJETIVO

Identificar los factores que afectan la frecuencia de conmutación del MOSFET incremental.

## PALABRAS CLAVE

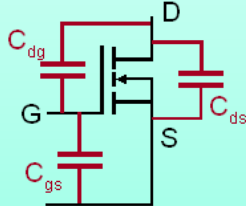
- Conmutación.
- MOSFET.
- Potencia.
- Tiempo.
- Reactancia.

## INTRODUCCIÓN TEÓRICA

El MOSFET de potencia es más rápido que otros dispositivos usados en electrónica de potencia como lo son los tiristores, transistores bipolares, etc.:

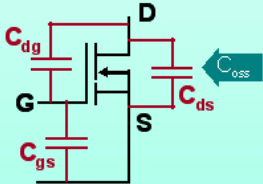
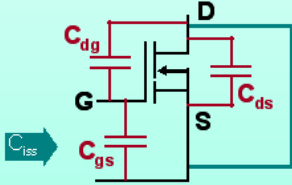
EL MOSFET DE POTENCIA

- Los MOSFET de potencia son dispositivos de conducción unipolar. En ellos, los niveles de corriente conducida no están asociados al aumento de la concentración de portadores minoritarios, que luego son difíciles de eliminar para que el dispositivo deje de conducir
- La limitación en la rapidez está asociada a la carga de las capacidades parásitas del dispositivo
- Hay, esencialmente tres:
  - $C_{gs}$ , capacidad de lineal
  - $C_{ds}$ , capacidad de transición  $C_{ds} \approx k/(V_{DS})^{1/2}$
  - $C_{dg}$ , capacidad Miller, no lineal, muy importante



EL MOSFET DE POTENCIA

- Los fabricantes de MOSFET de potencia suministran información de tres capacidades distintas de las anteriores, pero relacionadas con ellas:
  - $C_{iss} = C_{gs} + C_{gd}$  con  $V_{ds}=0$  ( $\approx$  capacidad de entrada)
  - $C_{rss} = C_{dg}$  (capacidad Miller)
  - $C_{oss} = C_{ds} + C_{dg}$  ( $\approx$  capacidad de salida)



## INVESTIGACIÓN PREVIA

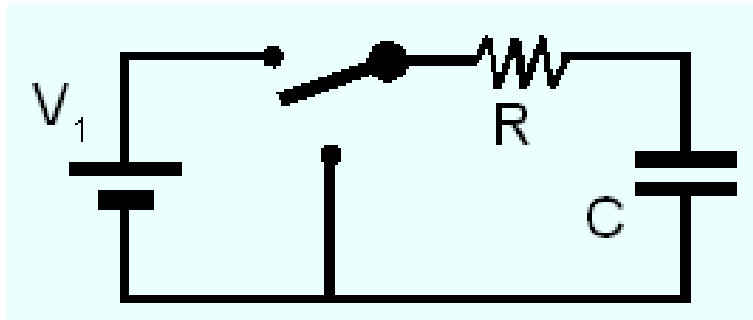
La carga y la descarga de estas capacidades parásitas generan pérdidas que condicionan las máximas frecuencias de conmutación de los MOSFET de potencia:

**En la carga de C:**

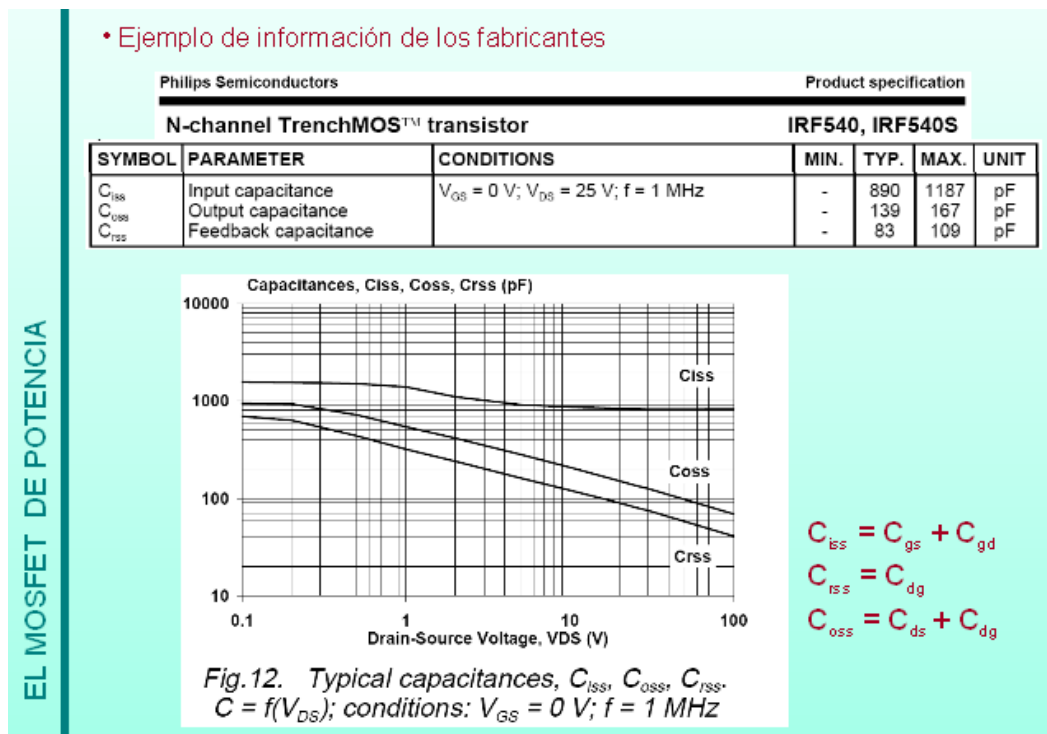
- Energía perdida en  $R = 0.5 C(V1)^2$
- Energía almacenada en  $C = 0.5 C(V1)^2$

**En la descarga de C:**

- Energía perdida en  $R = 0.5 C(V1)^2$
- Energía total perdida:  $C(V1)^2 = V1(QCV1)$

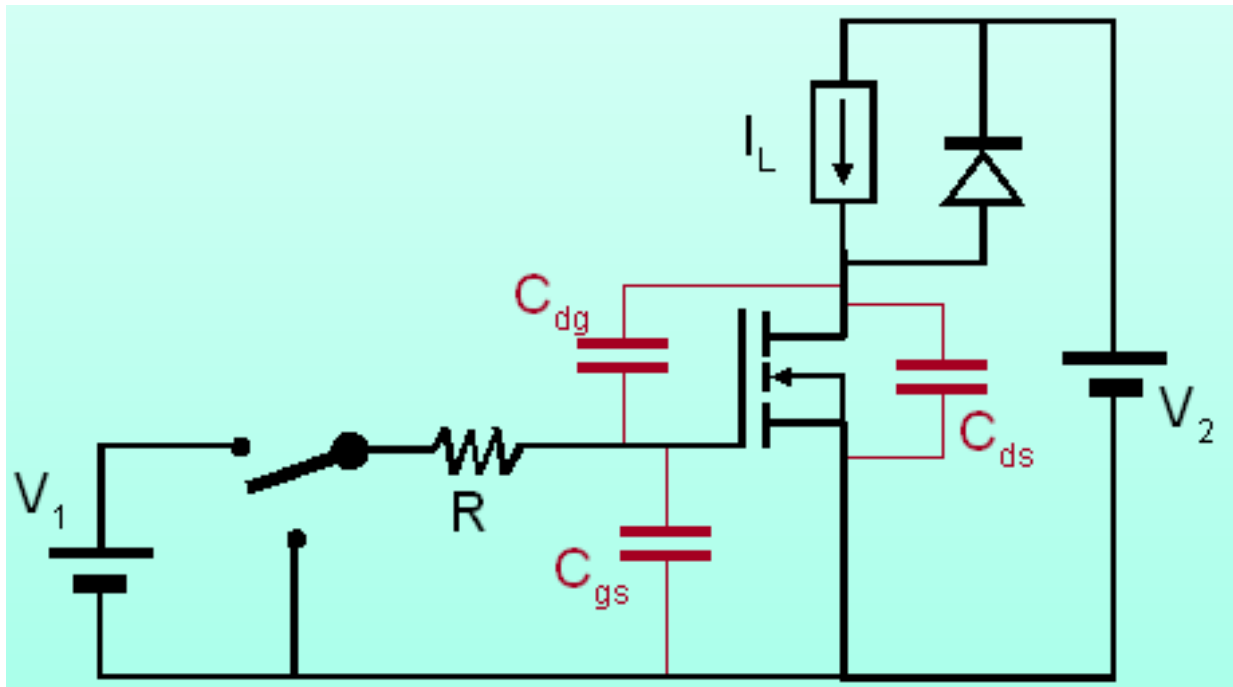


Además, en general estas capacidades parásitas retrasan las variaciones de tensión, ocasionando en muchos circuitos convivencia entre tensión y corriente, lo que implica pérdidas en el proceso de conmutación.



Análisis de una conmutación típica en conversión de energía:

- Con carga inductiva.
- Con diodo de enclavamiento.
- Suponiendo diodo ideal.



• Situación de partida:

- Transistor sin conducir (en bloqueo) y diodo en conducción

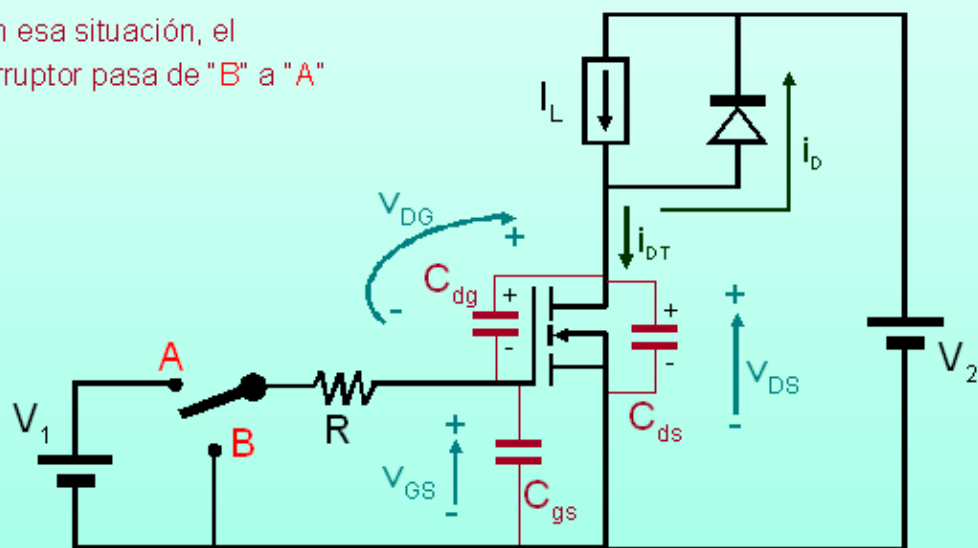
- Por tanto:

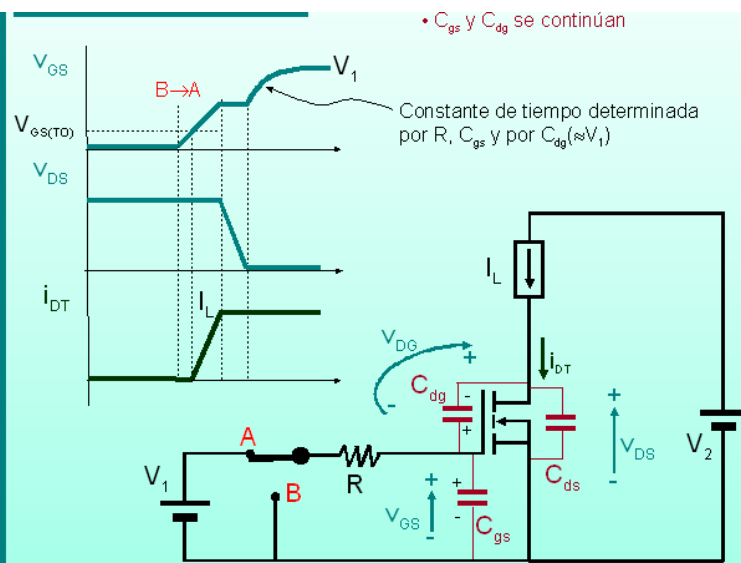
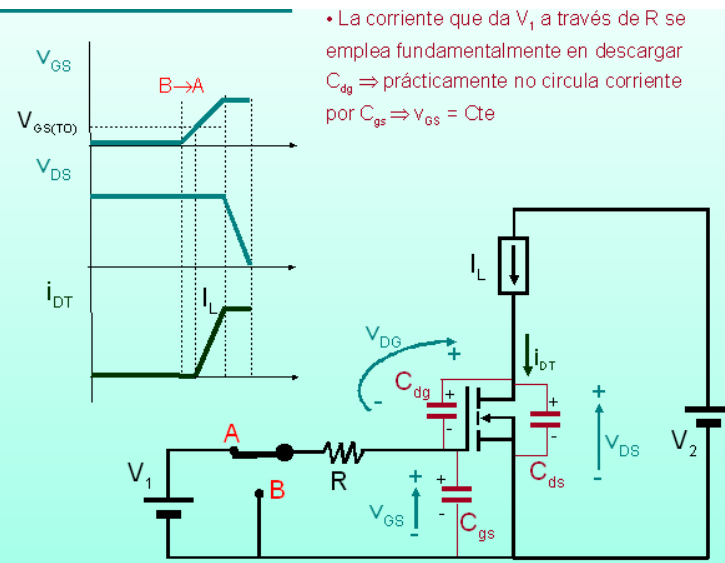
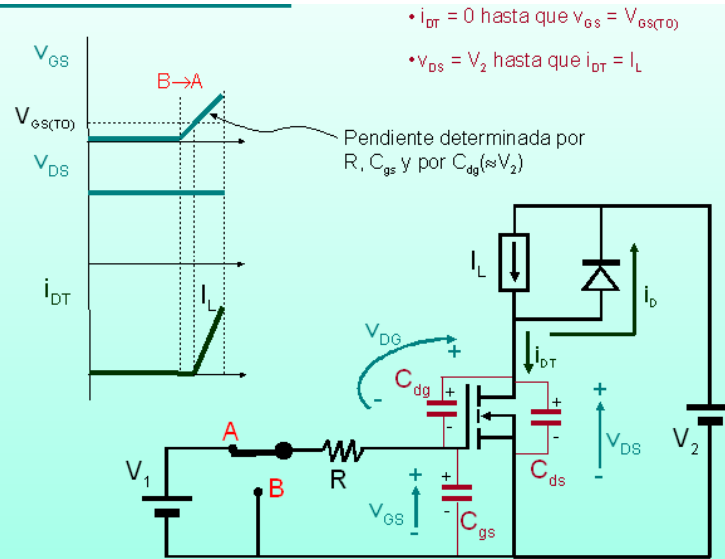
$$\triangleright V_{DG} = V_2, V_{DS} = V_2 \text{ y } V_{GS} = 0$$

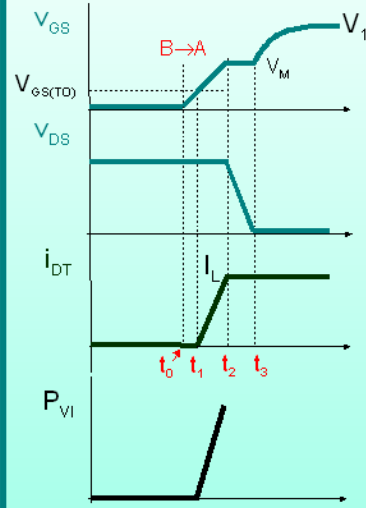
$$\triangleright i_{DT} = 0 \text{ y } i_D = I_L$$

- En esa situación, el interruptor pasa de "B" a "A"

EL MOSFET DE POTENCIA

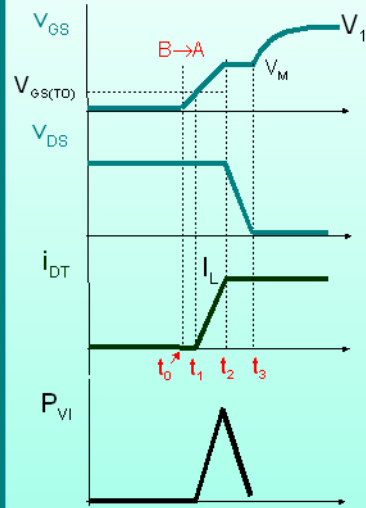
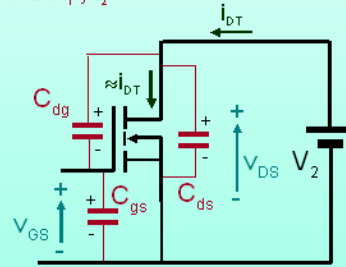






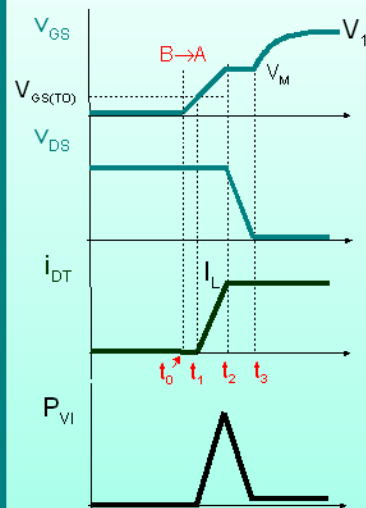
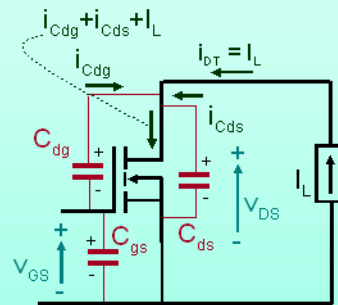
• Valoración de pérdidas entre  $t_0$  y  $t_2$ :

- Hay que cargar  $C_{gs}$  (grande) y descargar  $C_{dg}$  (pequeña)  $V_M$  voltios
- Hay convivencia tensión corriente entre  $t_1$  y  $t_2$



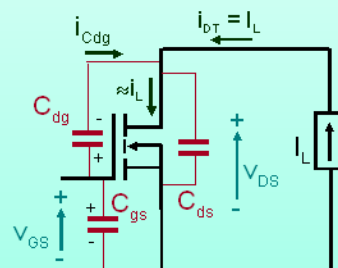
• Valoración de pérdidas entre  $t_2$  y  $t_3$ :

- Hay que descargar  $C_{ds}$  hasta 0 e invertir la carga de  $C_{dg}$  desde  $V_2 - V_M$  hasta  $-V_M$
- Hay convivencia tensión corriente entre  $t_2$  y  $t_3$



• Valoración de pérdidas a partir de  $t_3$ :

- Hay que acabar de cargar  $C_{gs}$  y  $C_{dg}$  hasta  $V_1$
- No hay convivencia tensión corriente salvo la propia de las pérdidas de conducción



• Valoración de la rapidez de un dispositivo por la "carga de puerta":

- La corriente que da la fuente  $V_1$  es aproximadamente constante entre  $t_0$  y  $t_3$  (comienzo de una exponencial, con  $I_{V1} \approx V_1/R$ )

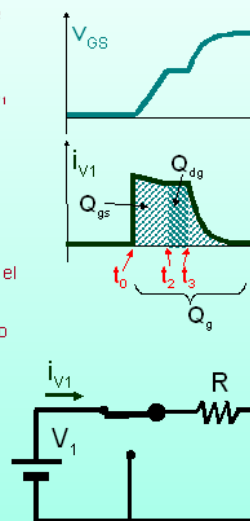
- De  $t_0$  a  $t_2$ , la corriente  $I_{V1}$  se ha encargado esencialmente en cargar  $C_{gs}$ . Se ha suministrado una carga eléctrica  $Q_{gs}$

- De  $t_2$  a  $t_3$ , la corriente  $I_{V1}$  se ha encargado en invertir la carga de  $C_{gd}$ . Se ha suministrado una carga eléctrica  $Q_{dg}$

- Hasta que  $V_{GS} = V_1$  se sigue suministrando carga.  $Q_g$  es el valor total (incluyendo  $Q_{gs}$  y  $Q_{dg}$ )

- Para un determinado sistema de gobierno ( $V_1$  y  $R$ ), cuanto menores sean  $Q_{gs}$ ,  $Q_{dg}$  y  $Q_g$  más rápido será el transistor

- Obviamente  $t_2 - t_0 \approx Q_{gs} R / V_1$ ,  $t_3 - t_2 \approx Q_{dg} R / V_1$  y  $P_{V1} = V_1 Q_g f_s$ , siendo  $f_s$  la frecuencia de conmutación



• Valoración de la rapidez de un dispositivo por la "carga de puerta":  
Información de los fabricantes

IRF 540

| SYMBOL       | PARAMETER                  | CONDITIONS   | MIN. | TYP. | MAX. | UNIT |
|--------------|----------------------------|--|------|------|------|------|
| $Q_{g(tot)}$ | Total gate charge          | $I_D = 17 \text{ A}$ ; $V_{DD} = 80 \text{ V}$ ; $V_{GS} = 10 \text{ V}$ | -    | -    | 65   | nC   |
| $Q_{gs}$     | Gate-source charge         |  | -    | -    | 10   | nC   |
| $Q_{gd}$     | Gate-drain (Miller) charge |  | -    | -    | 29   | nC   |

SIEMENS BUZ80

MOSFET de  $\approx 1984$

| Symbol   | Parameter          | Test Conditions  | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|----------|--------------------|--|------|------|------|------|
| $Q_g$    | Total Gate Charge  | $V_{DD} = 400 \text{ V}$ , $I_D = 3 \text{ A}$ , $V_{GS} = 10 \text{ V}$ |      | 42   | 55   | nC   |
| $Q_{gs}$ | Gate-Source Charge |  |      | 6    |      | nC   |
| $Q_{gd}$ | Gate-Drain Charge  |  |      | 17   |      | nC   |



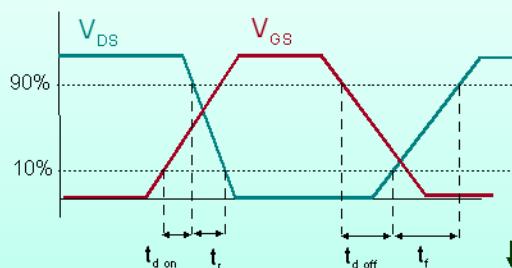
SPD04N80C3

MOSFET de los años 2000

Gate Charge Characteristics

|                       |                 |   |   |     |    |    |
|-----------------------|-----------------|---|---|-----|----|----|
| Gate to source charge | $Q_{gs}$        | $V_{DD} = 640 \text{ V}$ , $I_D = 4 \text{ A}$  | - | 2.4 | -  | nC |
| Gate to drain charge  | $Q_{gd}$        |   | - | 11  | -  | nC |
| Gate charge total     | $Q_g$           | $V_{DD} = 640 \text{ V}$ , $I_D = 4 \text{ A}$ ,<br>$V_{GS} = 0 \text{ to } 10 \text{ V}$ | - | 20  | 26 | nC |
| Gate plateau voltage  | $V_{(plateau)}$ | $V_{DD} = 640 \text{ V}$ , $I_D = 4 \text{ A}$  | - | 6   | -  | V  |

• Otro tipo de información suministrada por los fabricantes: conmutación con carga resistiva

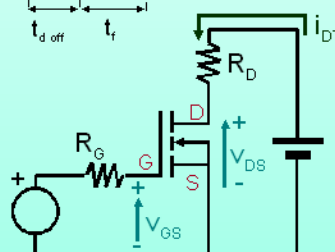


$t_{d \text{ on}}$ : retraso de encendido

$t_r$ : tiempo de subida

$t_{d \text{ off}}$ : retraso de apagado

$t_r$ : tiempo de bajada



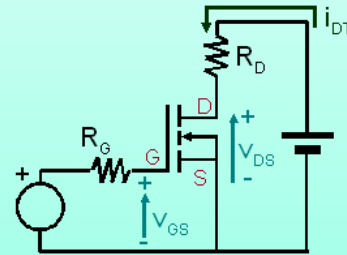


- Otro tipo de información suministrada por los fabricantes: conmutación con carga resistiva

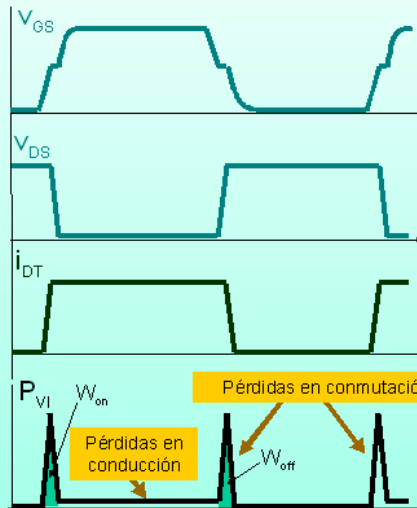
**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** IRF 540  
T<sub>J</sub> = 25°C unless otherwise specified

| SYMBOL          | PARAMETER           | CONDITIONS                                      | MIN. | TYP. | MAX. | UNIT |
|-----------------|---------------------|---|------|------|------|------|
| t <sub>on</sub> | Turn-on delay time  | V <sub>GS</sub> = 50 V; R <sub>D</sub> = 2.2 Ω; | -    | 8    | -    | ns   |
| t <sub>r</sub>  | Turn-on rise time   | V <sub>GS</sub> = 10 V; R <sub>D</sub> = 5.6 Ω  | -    | 39   | -    | ns   |
| t <sub>d</sub>  | Turn-off delay time | Resistive load                                  | -    | 26   | -    | ns   |
| t <sub>f</sub>  | Turn-off fall time  |   | -    | 24   | -    | ns   |

t<sub>g on</sub> : retraso de encendido  
t<sub>r</sub> : tiempo de subida  
t<sub>g off</sub> : retraso de apagado  
t<sub>f</sub> : tiempo de bajada

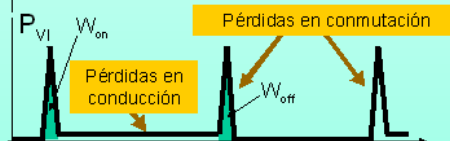


- Pérdidas por convivencia tensión corriente entre drenador y fuente

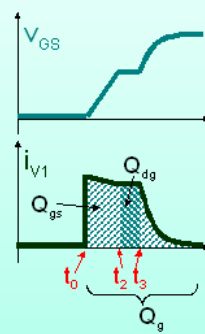


$$P_{cond} = R_{DS(on)} I_{D(rms)}^2$$

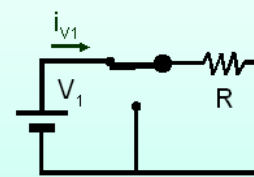
$$P_{conm} = f_s (W_{on} + W_{off})$$



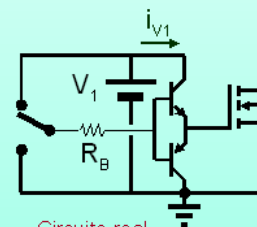
- Pérdidas en la fuente de gobierno



$$P_{V1} = V_1 Q_g f_s$$



Circuito teórico



Circuito real

## El diodo parásito suele tener malas características, sobre todo en MOSFETs de alta tensión

### REVERSE DIODE LIMITING VALUES AND CHARACTERISTICS

IRF 540

 $T_J = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified

| SYMBOL   | PARAMETER                              | CONDITIONS  | MIN. | TYP. | MAX. | UNIT |
|----------|--|---|------|------|------|------|
| $I_S$    | Continuous source current (body diode) |   | -    | -    | 23   | A    |
| $I_{SM}$ | Pulsed source current (body diode)     |   | -    | -    | 92   | A    |
| $V_{SD}$ | Diode forward voltage                  | $I_S = 28\text{ A}$ ; $V_{GS} = 0\text{ V}$   | -    | 0.94 | 1.5  | V    |
| $t_r$    | Reverse recovery time                  | $I_S = 17\text{ A}$ ; $-di/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}$ ; $V_{GS} = 0\text{ V}$ ; $V_R = 25\text{ V}$ | -    | 61   | -    | ns   |
| $Q_{rr}$ | Reverse recovery charge                |   | -    | 200  | -    | nC   |

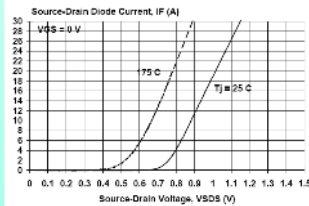
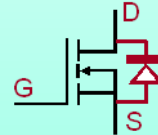


Fig.13. Typical reverse diode current.  
 $I_F = f(V_{SD})$ ; conditions:  $V_{GS} = 0\text{ V}$ ; parameter  $T_J$



## El diodo parásito en un MOSFET de alta tensión

SPD04N80C3



|              |     |          |
|--------------|-----|----------|
| $V_{DS}$     | 800 | V        |
| $R_{DS(on)}$ | 1.3 | $\Omega$ |
| $I_D$        | 4   | A        |

Electrical Characteristics, at  $T_J = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise specified

| Parameter                                     | Symbol       | Conditions                           | Values |      |      | Unit                   |
|---|--------------|--------------------------------------|--------|------|------|------------------------|
|   |              |                                      | min.   | typ. | max. |                        |
| Inverse diode continuous forward current      | $I_S$        | $T_C = 25^\circ\text{C}$             | -      | -    | 4    | A                      |
| Inverse diode direct current, pulsed          | $I_{SM}$     |                                      | -      | -    | 12   | A                      |
| Inverse diode forward voltage                 | $V_{SD}$     | $V_{GS} = 0\text{ V}$ , $I_F = I_S$  | -      | 1    | 1.2  | V                      |
| Reverse recovery time                         | $t_r$        | $V_R = 840\text{ V}$ , $I_F = I_S$   | -      | 520  | -    | ns                     |
| Reverse recovery charge                       | $Q_{rr}$     | $di_F/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}$ | -      | 4    | -    | $\mu\text{C}$          |
| Peak reverse recovery current                 | $I_{rrm}$    |                                      | -      | 12   | -    | A                      |
| Peak rate of fall of reverse recovery current | $di_{rr}/dt$ |                                      | -      | 300  | -    | $\text{A}/\mu\text{s}$ |

## • Es válido todo lo comentado para los diodos de potencia

Philips Semiconductors

Product specification

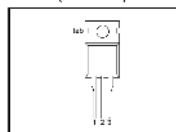
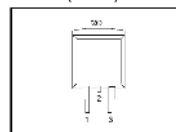
N-channel TrenchMOS<sup>TM</sup> transistor

IRF540, IRF540S

## PINNING

| PIN | DESCRIPTION        |
|-----|--------------------|
| 1   | gate               |
| 2   | drain <sup>1</sup> |
| 3   | source             |
| tab | drain              |

## SOT78 (TO220AB)

SOT404 (D<sup>2</sup>PAK)

## THERMAL RESISTANCES

| SYMBOL          | PARAMETER                                    | CONDITIONS                                     | MIN. | TYP. | MAX. | UNIT |
|-----------------|--|--|------|------|------|------|
| $R_{\theta JA}$ | Thermal resistance junction to mounting base |  | -    | -    | 1.5  | K/W  |
| $R_{\theta JA}$ | Thermal resistance junction to ambient       | SOT78 package, in free air                     | -    | 60   | -    | K/W  |
|                 |  | SOT404 package, pcb mounted, minimum footprint | -    | 50   | -    | K/W  |

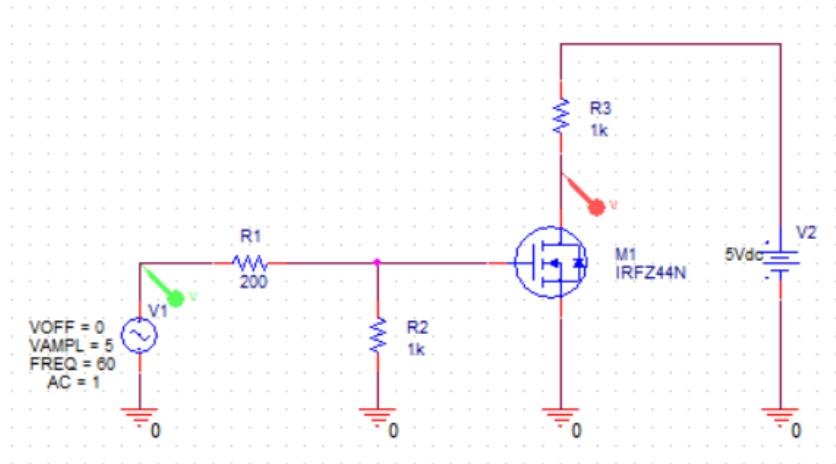
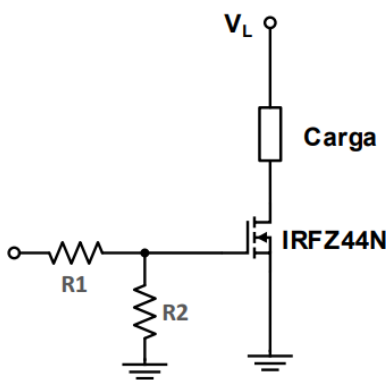
• Este fabricante denomina "mounting base" a la cápsula y suministra información de la  $R_{THja} = R_{THjo} + R_{THca}$

## EXPERIMENTOS

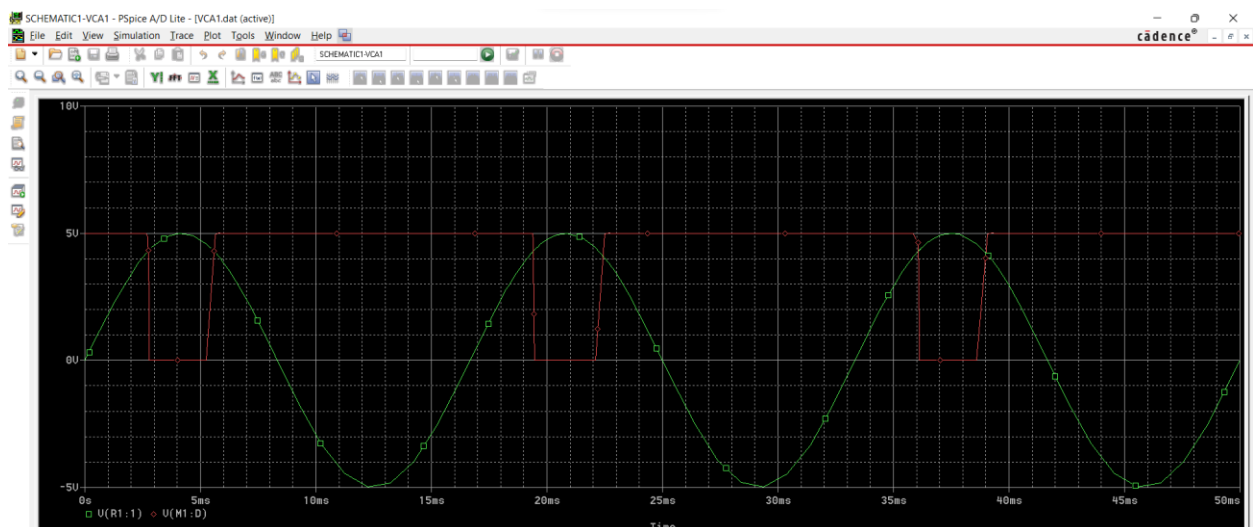
### EXPERIMENTO 1. RESPUESTA A BAJA FRECUENCIA

Arme el circuito mostrado, en el siguiente diagrama, la fuente de señal deberá ser de 60Hz, tensión 0 a 5V. Observe la tensión VDS y compárela con la tensión de entrada, realice un acercamiento para identificar con precisión la forma de onda de salida. Incremente la frecuencia de la señal y determine la frecuencia máxima de conmutación del MOSFET. Será bien valorado si utiliza un microcontrolador para generar la frecuencia variable.

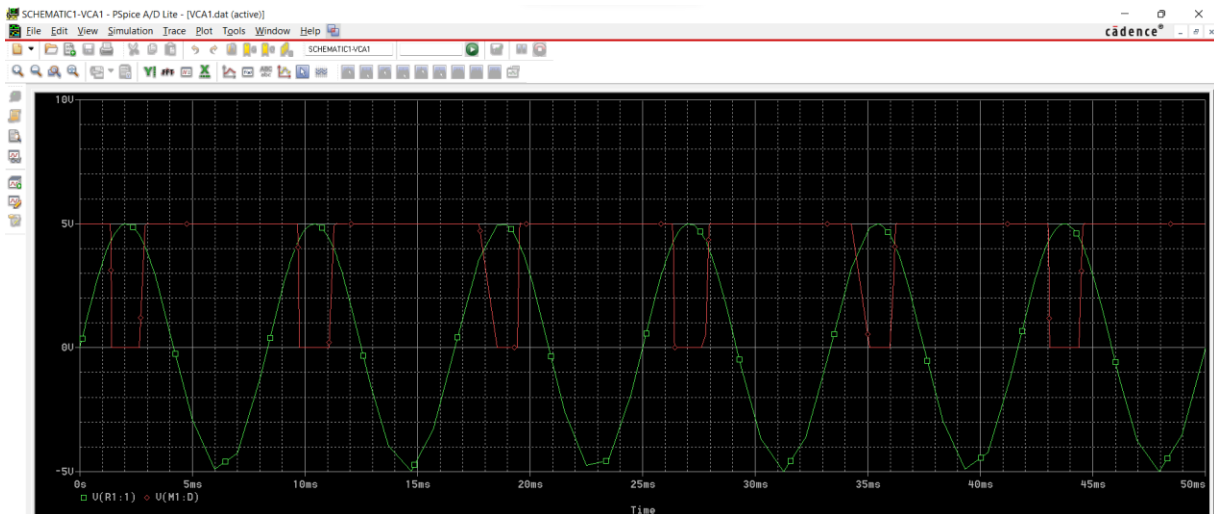
Visualice las formas de onda de encendido y apagado del MOSFET, esto lo puede medir con el osciloscopio entre drenador y fuente.



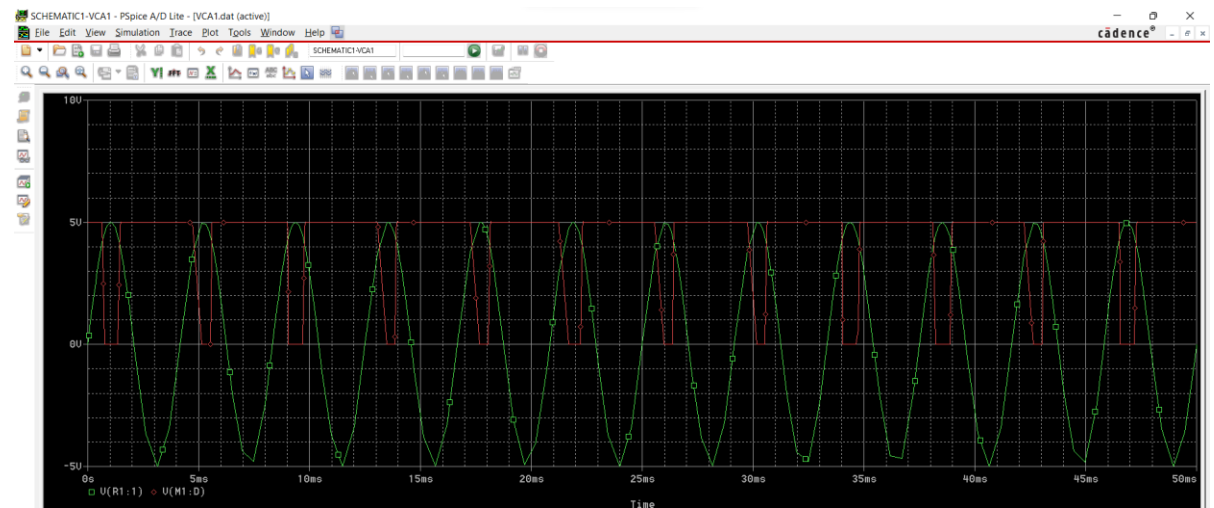
$$f = 60 \text{ Hz}$$



$$f = 120 \text{ Hz}$$



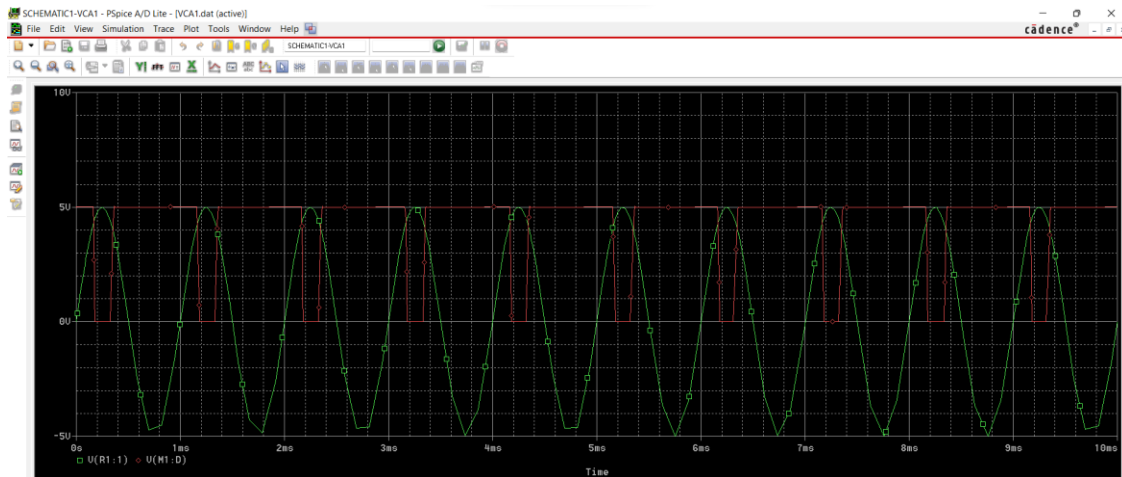
$$f = 240 \text{ Hz}$$



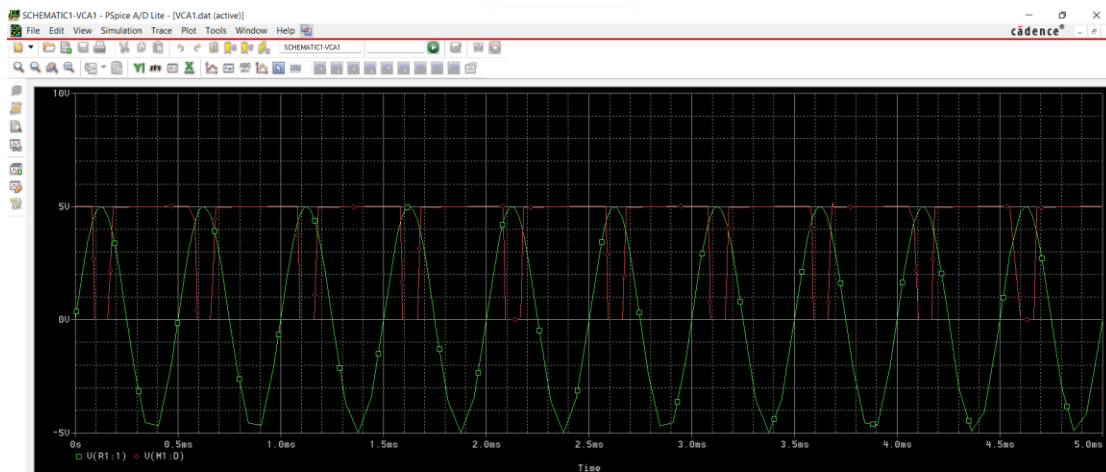
$$f = 480 \text{ Hz}$$



$$f = 1 \text{ kHz}$$



$$f = 2 \text{ kHz}$$



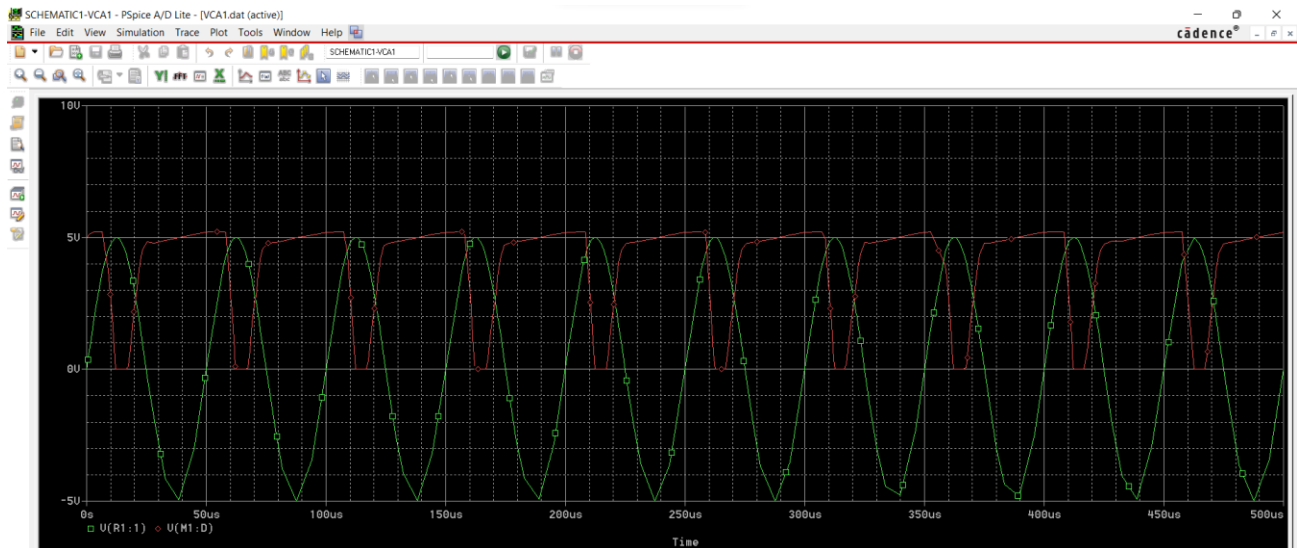
A partir de los 10 kHz, se empieza a distorsionar la señal de salida un poco, ya que no alcanza a mantener de forma constante la parte alta de la señal digital.

$$f = 10 \text{ kHz}$$



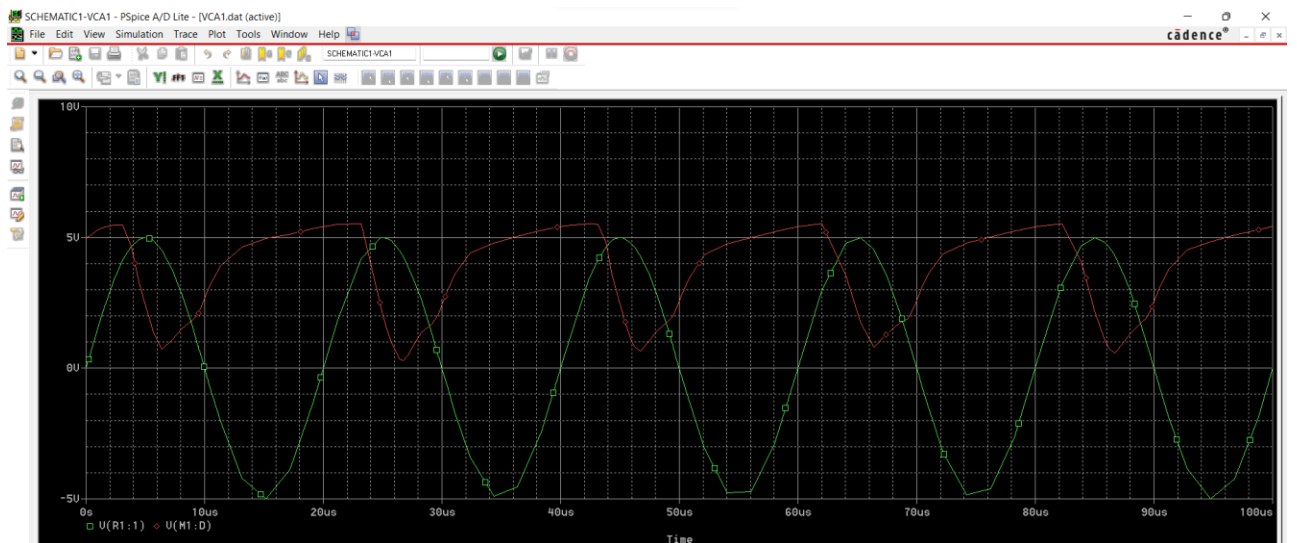
Al alcanzar los 20kHz, la señal de salida se ve cada vez más y más distorsionada.

$$f = 20 \text{ kHz}$$



Para cuando llegue a los 50kHz, la señal ya se habrá distorsionado completamente, por lo que podemos concluir que la señal de salida llega a formarse correctamente a frecuencias bajas, antes de los 10kHz.

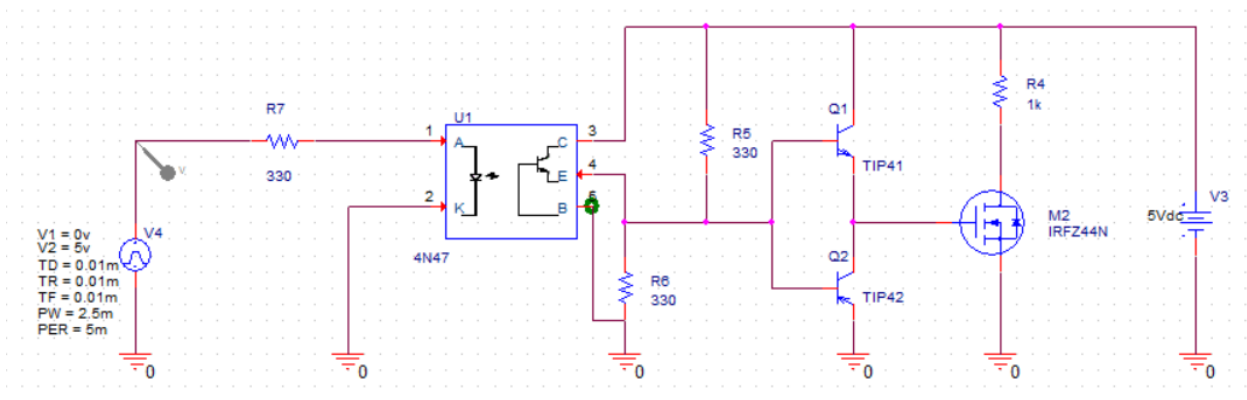
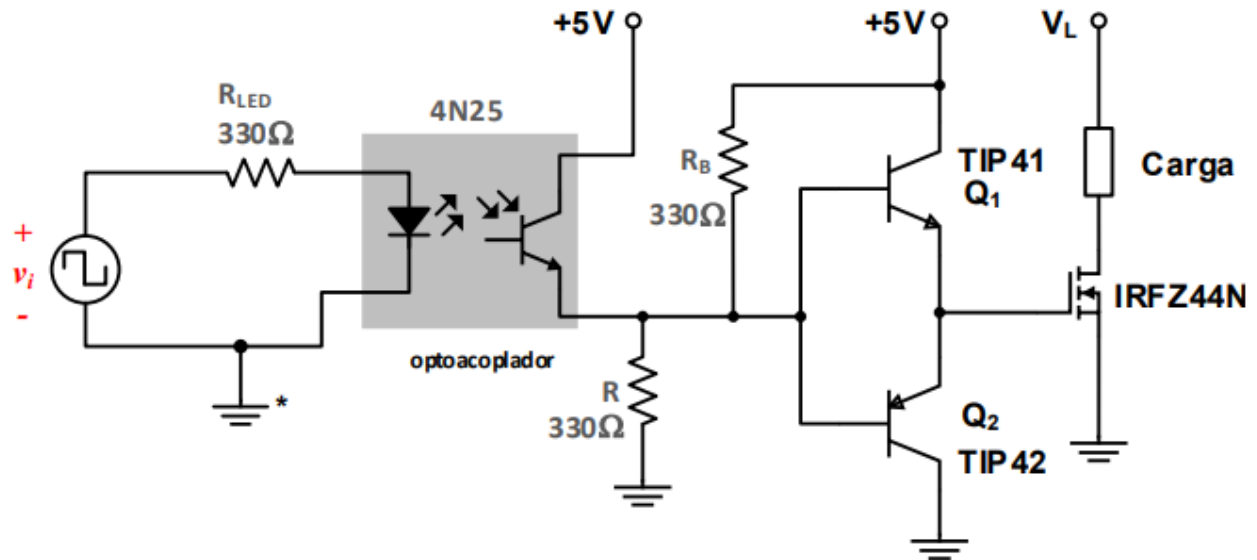
$$f = 50 \text{ kHz}$$



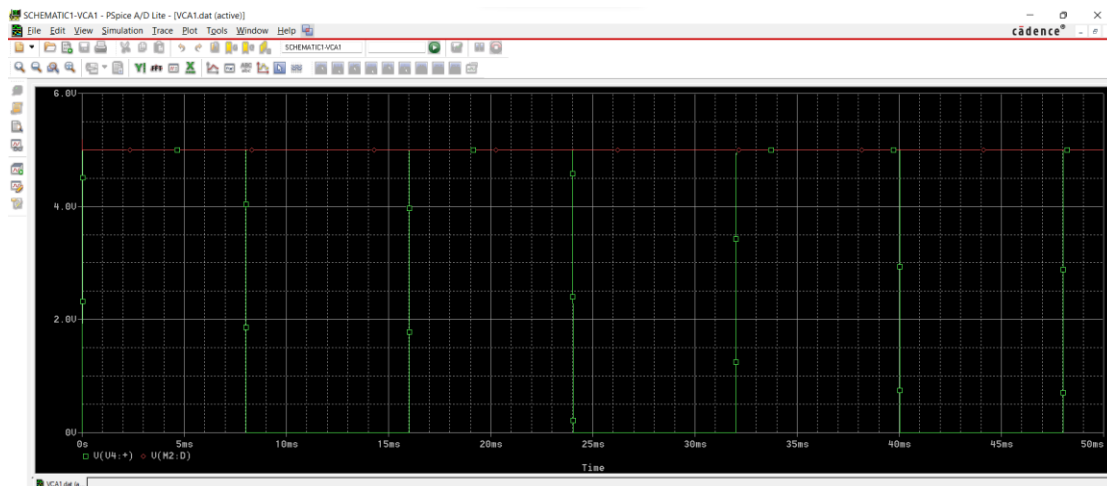
## EXPERIMENTO 2. RESPUESTA A ALTA FRECUENCIA

Armar el circuito mostrado en el siguiente diagrama e incrementar la frecuencia de la señal para determinar la frecuencia máxima de conmutación del MOSFET. Además, habrá que observar la tensión VDS y compararla con la tensión de entrada realizando un acercamiento para identificar con precisión la forma de onda de salida. Visualizar las formas de onda de encendido y apagado del MOSFET, esto se puede medir con el osciloscopio entre drenador (drain) y fuente (source). Finalmente hay que calcular la

potencia de disipación del MOSFET y medir el tiempo de establecimiento de la tensión de compuerta para determinar la frecuencia máxima de conmutación.

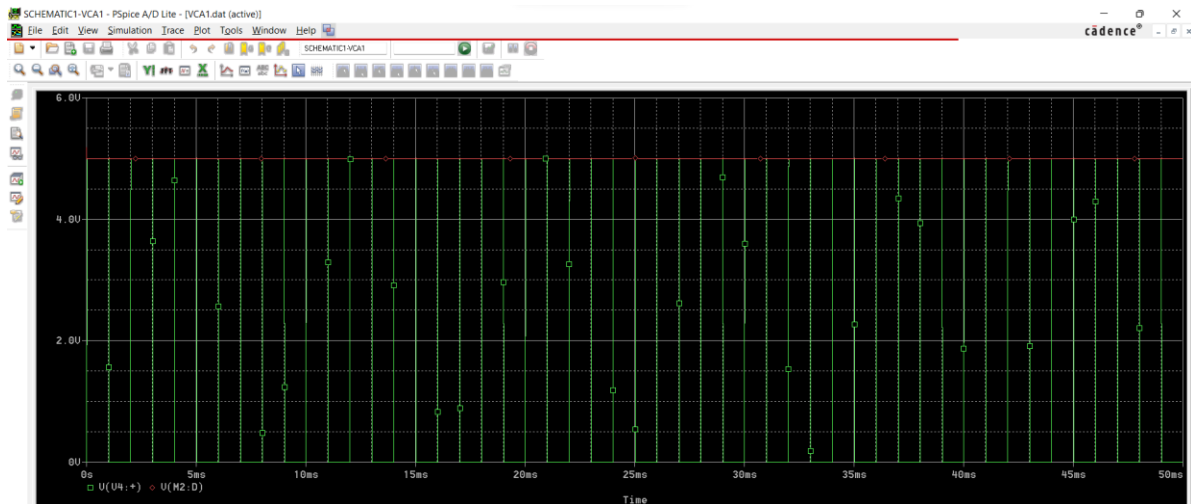


$$f = 60 \text{ Hz}$$

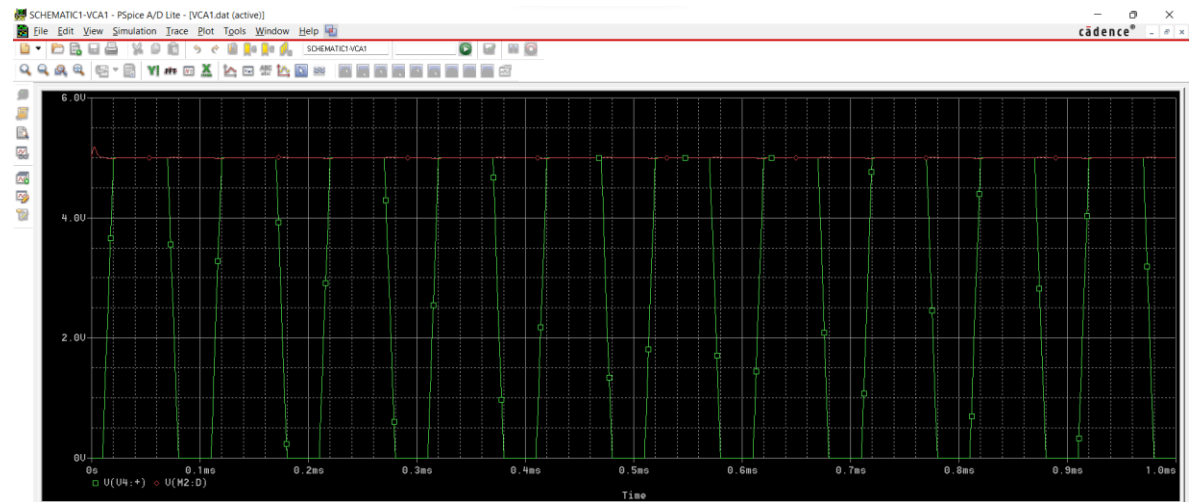




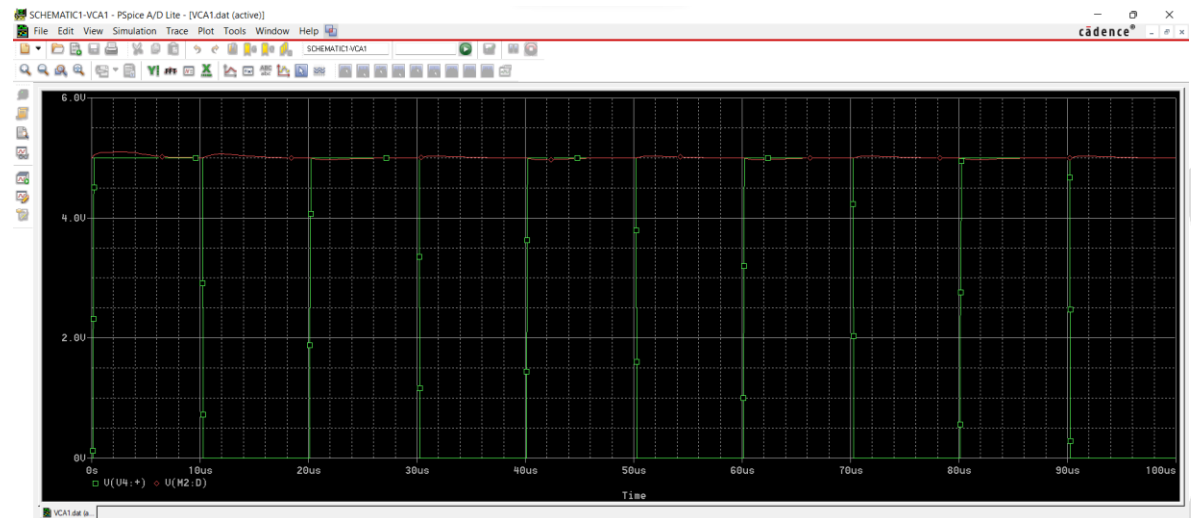
$$f = 480 \text{ Hz}$$



$$f = 10 \text{ kHz}$$



$$f = 50 \text{ kHz}$$





## [REFERENCIAS]

Electrónica: Teoría de los circuitos y dispositivos electrónicos, 10 Ed., Robert L. Boylestad Louis Nashelsky, 2009.

El MOSFET de Potencia, 2018.,

<https://www.monografias.com/trabajos104/mosfet-potencia/mosfet-potencia>

