

Determinación de las ecuaciones generales en un circuito con MOSFETs

Isabel M. Tienda Luna

En este documento vamos a analizar cómo obtener las ecuaciones generales de circuitos en los que aparecen transistores MOSFETs. Para ello haremos uso de distintas herramientas de resolución de circuitos que hemos aprendido en el tema de corriente continua. Los procedimientos que se describen a continuación son sólo ejemplos, no se analizan todas las posibles herramientas que existen y que se podrían usar.

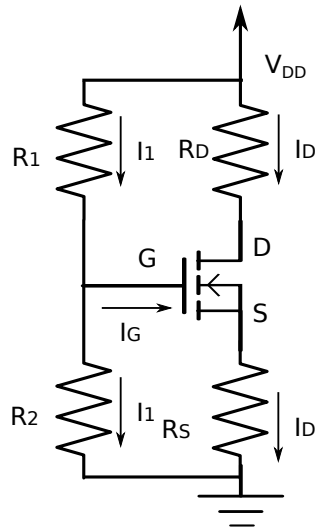


Figura 1: Circuito a resolver

El circuito con el que se va a trabajar es el que aparece en la figura 1. Las ecuaciones generales que se obtendrán serán válidas SIEMPRE, independientemente del estado en el que se encuentre el transistor (corte, lineal o saturación). Notar que como por la puerta del transistor no entra corriente NUNCA, esto es, $I_G = 0A$, la intensidad que pasa por las resistencias R_1 y R_2 es la misma (la llamaremos I_1).

1. Método de mallas

Si decidimos usar el método de mallas para obtener las ecuaciones generales que relacionan las distintas intensidades y diferencias de potencial en los elementos, lo más conveniente es redibujar el circuito de la figura 1. Esto es precisamente lo que se ha hecho en la figura 2. Como puede verse, en el circuito resultante tenemos tres mallas independientes. La aplicación de la ley de mallas a cada una de ellas dará lugar a tres ecuaciones generales.

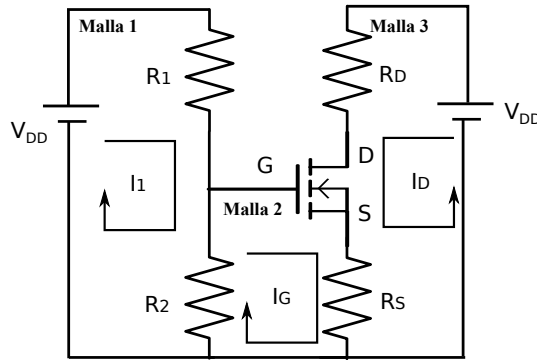


Figura 2: Circuito a resolver

Para la Malla 1, la ecuación que se obtiene es:

$$V_{DD} = R_1 I_1 + R_2 I_1 - R_2 I_G \quad (1)$$

Para la Malla 2, la ecuación que se obtiene es:

$$0 = V_{GS} + R_2 I_G + R_S I_G - R_2 I_1 + R_S I_D \quad (2)$$

Finalmente, para la Malla 3 se obtiene:

$$V_{DD} = R_D I_D + R_S I_S + V_{DS} + R_S I_G \quad (3)$$

Usando ahora que $I_G = 0A$ SIEMPRE:

$$\begin{aligned} V_{DD} &= R_1 I_1 + R_2 I_2 \\ 0 &= V_{GS} - R_2 I_1 + R_S I_D \\ V_{DD} &= R_D I_D + R_S I_D + V_{DS} \end{aligned} \quad (4)$$

que es el conjunto de ecuaciones generales que se cumplen siempre en el circuito.

2. Método del equivalente Thevenin más método de mallas

Una opción puede ser simplificar el divisor de tensión (fuente V_{DD} y resistencias en serie R_1 y R_2) que aparecen en la derecha del circuito de la figura 1 o de la figura 2 por su equivalente Thevenin. Al tratarse de un circuito divisor de tensión que ya hemos trabajado tanto desde el punto de vista teórico como práctico en esta asignatura, podemos escribir sin necesidad de explicar el resultado:

$$\begin{aligned} R_{th} &= \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \\ V_{th} &= R_2 \frac{V_{DD}}{R_1 + R_2} \end{aligned} \quad (5)$$

usando las expresiones anteriores, el circuito de la figura 1 o de la figura 2 puede redibujarse como se muestra en la figura 3.

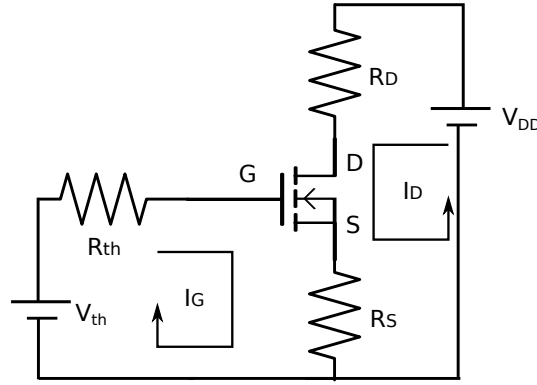


Figura 3: Circuito a resolver

Como puede verse, el circuito de la figura 3 tiene sólo dos mallas. Si aplicamos ahora el método de mallas para resolver este circuito las ecuaciones que quedan son:

$$V_{th} = R_{th}I_G + R_S I_G + V_{GS} + R_S I_D \quad (6)$$

$$V_{DD} = R_D I_D + R_S I_D + V_{DS} + R_S I_G \quad (7)$$

usando de nuevo que en un transistor MOSFET SIEMPRE se cumple que $I_G = 0A$ las ecuaciones anteriores quedan como:

$$V_{th} = V_{GS} + R_S I_D \quad (8)$$

$$V_{DD} = R_D I_D + R_S I_D + V_{DS} \quad (9)$$

Ecuaciones que son totalmente equivalentes a las tres obtenidas en la sección anterior.

3. Analizamos el circuito calculando diferencias de potencial entre distintos puntos del circuito

Otra forma de obtener las ecuaciones generales del circuito es analizar simplemente las diferencias de potencial entre distintos puntos del circuito. Para obtener ecuaciones que nos sean útiles para nuestros propósitos, algunos de los recorridos dentro del circuito que analicemos y cuya diferencia de potencial pretendamos calcular, han de incluir el transistor MOSFET. En la figura 4 se plantean con colores diferentes los caminos a escoger. Tener en cuenta que ni los caminos ni los puntos iniciales y finales de los mismos son únicos. Esto es, podemos escoger los caminos que queramos. Para obtener las ecuaciones generales que buscamos calcularemos la diferencia de potencial entre el inicio y el final de esos caminos teniendo en cuenta los elementos que haya en los mismos.

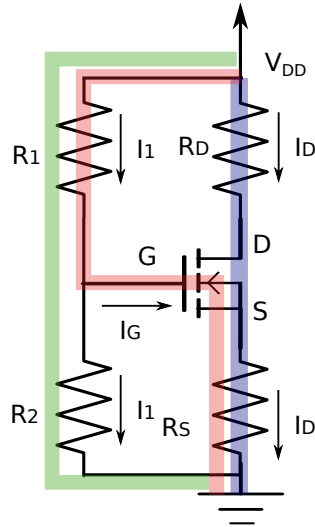


Figura 4: Circuito a resolver

3.1. Analizando el camino azul

Si nos fijamos en el camino azul, podemos ver que éste comienza en la fuente de valor V_{DD} (por tanto el potencial en ese punto es V_{DD}) y termina en el extremo de R_S , justo donde se ha situado la referencia de nuestro circuito (por tanto el potencial en ese punto es $0V$). Es por esto que la diferencia de potencial entre los extremos de ese camino es $V_{DD} - 0V = V_{DD}$.

El siguiente paso es analizar las distintas contribuciones a la anterior diferencia de potencial debidas de los elementos que encontramos en el camino. En dicho camino hay tres elementos: R_D , el MOSFET y R_S . Si

vamos desde la fuente V_{DD} hacia la referencia siguiendo el camino de la corriente I_D , lo primero que nos encontramos es R_D . En esta resistencia la diferencia de potencial es $R_D I_D$ (Ley de Ohm). Si seguimos el camino, el siguiente elemento que nos encontramos es el transistor que contribuye a la diferencia de potencial con V_{DS} puesto que pasamos desde su Drenador (D) hasta su Fuente (S). Finalmente nos encontramos la resistencia R_S que contribuye a la diferencia de potencial total con $R_S I_D$ (Ley de Ohm). De manera que podemos escribir la diferencia de potencial total entre el inicio del camino y el final como:

$$V_{DD} = R_D I_D + V_{DS} + R_S I_D \quad (10)$$

3.2. Analizando el camino verde

El camino verde de la figura 4 comienza también en la fuente de valor V_{DD} (por tanto el potencial en ese punto es V_{DD}) y termina en el extremo de R_S , justo donde se ha situado la referencia de nuestro circuito (por tanto el potencial en ese punto es 0V). Es por esto que la diferencia de potencial entre los extremos de ese camino es $V_{DD} - 0V = V_{DD}$.

El recorrido se hace a través de las ramas donde están las resistencias R_1 y R_2 y en el sentido de la corriente I_1 . Es por eso que la diferencia de potencial entre los puntos inicial y final podrá escribirse como la suma de las diferencias de potencial entre los extremos de las resistencias. Como en este camino no se atraviesa el MOSFET, este no intervendrá en las ecuaciones. Para calcular la diferencia de potencial entre los extremos de la resistencia R_1 usaremos la ley de Ohm dando como resultado que esa diferencia es $R_1 I_1$. Si hacemos lo mismo para la resistencia R_2 , el resultado será $R_2 I_1$. De manera que podemos escribir la diferencia de potencial total entre el inicio del camino y el final del mismo como:

$$V_{DD} = R_1 I_1 + R_2 I_1 \quad (11)$$

3.3. Analizando el camino rojo

El camino rojo de la figura 4 comienza también en la fuente de valor V_{DD} (por tanto el potencial en ese punto es V_{DD}) y termina en el extremo de R_S , justo donde se ha situado la referencia de nuestro circuito (por tanto el potencial en ese punto es 0V). Es por esto que la diferencia de potencial entre los extremos de ese camino es $V_{DD} - 0V = V_{DD}$.

El recorrido se hace pasando en primer lugar por la resistencia R_1 , a continuación por el MOSFET desde su puerta a la fuente y finalmente, a través de la resistencia R_S . Es por esto que habrá tres diferencias de potencial contribuyendo a la total. En primer lugar la diferencia de potencial entre los extremos de la resistencia R_1 que puede calcularse usando la Ley de Ohm: $R_1 I_1$. Como se ha comentado, el segundo elemento que nos encontramos

es el transistor MOSFET. Como pasamos desde su Puerta a su Fuente, su contribución a la diferencia de potencial total es V_{GS} . Finalmente, el último elemento en el recorrido es la resistencia R_S . La aplicación de la Ley de Ohm a la misma da como resultado $I_D R_S$ Voltios como diferencia de potencial. La contribución de las tres cantidades anteriores da como resultado la diferencia de potencial total entre el inicio y el final del camino:

$$V_{DD} = R_1 I_1 + V_{GS} + R_S I_D \quad (12)$$