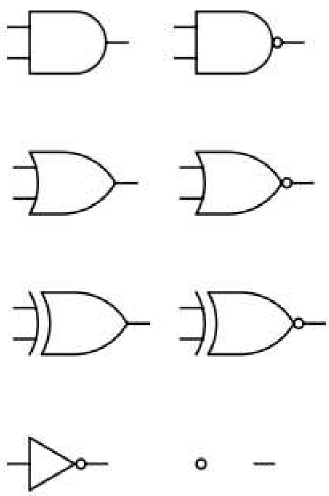
2 temas de PFE(síntesis): Transistores de efecto campo/ Introducción a la electrónica digital

Juan F. González Hernández



Índice

La Electrónica analógica se basa en el fundamento o idea de que cierta función o señal que pasa a través de un circuito es transformada en otra señal. Desde este punto de vista, todo circuito eléctrico puede ser imaginado como una caja negra ("black box") que actúa sobre sobre ciertos parámetros de entrada (in signal) y que produce otros parámetros de salida (out signal). Estos parámetros suelen ser la amplitud, la frecuencia, la fase (más precisamente la diferencia de fase), y resto de parámetros relacionados con los fenómenos ondulatorios ("campos clásicos"). Generalmente las señales poseen información y "ruido", información dada por los parámetros de control antes mencionados y "ruido" dada por parámetros que podemos o no controlar como la temperatura ambiente y otro tipo de factores aleatorios o sistemáticos que pueden o no controlarse. Además, la Electrónica analógica tiene dos vertientes: lineal y no lineal.

En general, en circuitos lineales ideales la señal a la salida no se recanaliza a la entrada en los circuitos lineales (ausencia de "feedback" o retroalimentación) ni se consideran las influencias no lineales que pueden tener en ciertos regímenes de comportamiento cierta clase de circuitos no lineales que se aproximan por circuitos lineales en muchas situaciones prácticas.

1. FET: Transistores de efecto campo

1.1. Introducción

Transistor de efecto de campo (FET) son dispositivos semiconductores donde el control de la corriente se realiza mediante un campo eléctrico.

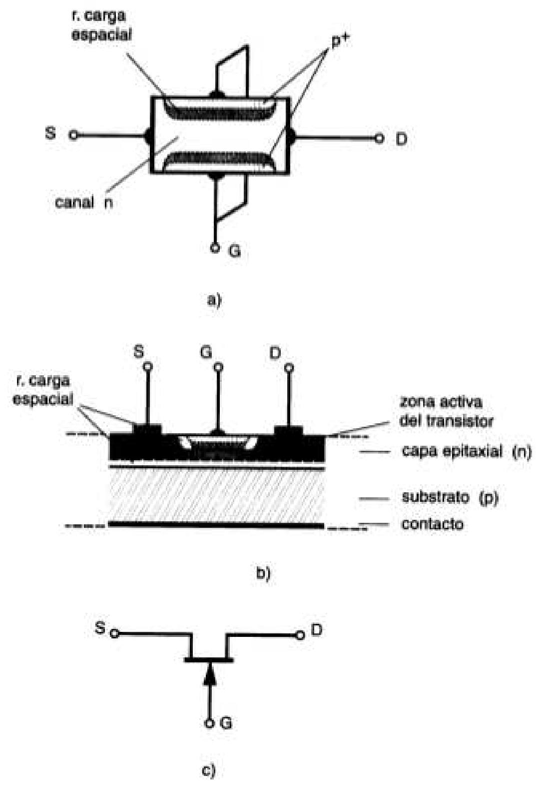
☺RECUERDA:

La idea básica de este tipo de transistores es el control de la corriente (o voltaje) mediante campos eléctricos. ☺

Así, en este tipo de transistores, la señal de entrada crea un campo eléctrico que controla el paso de los electrones (o en su caso de los huecos) a través del dispositivo. Se les llama unipolares precisamente por ese hecho diferenciado respecto de los bipolares (BJT): solamente un tipo de portadores de carga (electrones o huecos circulan por ellos).

Los primeros transistores de efecto campo fueron los transistores de unión o de Chockley (1952), y se fundamentan en el control de la corriente por el mencionado campo eléctrico aplicado a un terminal G (llamado **puerta** o "gate"), constituida por una o varias uniones PN polarizadas **EN INVERSA**. Así pues, la estructura básica de un transistor de efecto campo de unión está dada por un semiconductor tipo N o P, con un terminal "puerta" G, con dos contactos óhmicos (resistencias internas) en sus extremos: uno S ("source") denominado **fuente o surtidor**, y otro D ("drain") llamado **drenador o sumidero**. La puerta o gate G está formada por dos regiones de tipo P distribuidas a ambos lados de la estructura del semiconductor, de forma que en el contacto las dos uniones PN conectan entre sí y con la corriente polarizada en inverso, de forma que la corriente que pasa por ellas es nula (las uniones PN son de subtipo P^+N, donde una zona P se halla más dopada que la N, y se llama zona activa a aquella zona en la que ocurre la acción del transistor).

La estructura del FET es por tanto como sigue:



a) Esquema de la estructura de un JFET de canal tipo n. b) Esquema de un transistor JFET de canal n fabricado según la tecnología planar. c) Símbolo de circuitos de un JFET de canal n.

En resumen: “Los FETs con mayoritariamente dispositivos portadores de carga de un solo tipo(P o N), generalmente los portadores de carga son aquellos que se hallan en mayor cantidad en el dispositivo, y consisten de un canal activo por el que pasan dichos portadores, desde la fuente al drenador (S a D). Fuente y drenador son dos terminales conductores conectados al semiconductor con contactos óhmicos (resistencias) y la conductividad del canal por el que fluyen los portadores de carga es una función del potencial eléctrico que se aplique a la puerta G y la fuente”.

Sobre los terminales, debes recordar que:

La fuente S: es el canal o terminal por el que pasan los portadores. Generalmente la corriente en dicha fuente se representa como I_S.
El drenador D: es el canal o terminal por el que los portadores abandonan el circuito. Generalmente la corriente en D se representa como I_D. El voltaje entre D y S se denota por V_{DS}.
La puerta G: es el terminal que modula la conductividad de todo el circuito. Aplicando un voltaje en G V_G se puede controla la corriente del drenador I_D.

Importante: todos los FET tienen 3 terminales como mínimo (G,D,S), que son los análogos del emisor, colector y base de un BJG (bipolar). Sin embargo, muchos (la mayoría de hecho) de los FET poseen un cuarto terminal denominado sustrato, cuerpo, o base (“body” in lengua inglesa). En castellano se prefiere la denominación sustrato pero se le representa generalmente con la letra B (de “body”). Este cuarto terminal tiene una función “secreta”: sesgar el comportamiento del transistor y ponerle en algún modo específico de funcionamiento. Es raro hacer un uso no trivial del sustrato, y en muchas aplicaciones se ignora completamente su existencia, pero es importante conocerla porque es precisamente su existencia la que hace posible un buen set-up de un circuito integrado que posea FETs (aunque como hemos mencionado, puede ignorarse en aplicaciones predeterminadas).

Es de igual importancia recordar que los nombres de los terminales de los FET hacen referencia específica a sus funciones. Intuitivamente, es bueno recordar que la puerta puede ser imaginada como “algo” que abre y cierra una puerta de corriente “física”, el sustrato se refiere así al cuerpo del conductor donde los terminales D,G y S se encuentran, mientras que la puerta permite o no a los portadores de carga fluir creando o no un canal entre D y S (drenador y fuente). Los electrones fluyen generalmente desde la fuente S (de ahí su nombre) hacia el drenador D.

Los FET tienen, por otra parte, las siguientes características generales:

- Es un dispositivo ("device") unipolar: un único tipo de portadores de carga pasa a través de sus "patas" o terminales.
- Ocupa menos espacio en un circuito integrado que el bipolar, lo que supone una gran ventaja para aplicaciones de microelectrónica.
- Tienen una gran impedancia de entrada (del orden de $M\Omega$).
- La corriente depende únicamente del flujo de portadores de carga mayoritarios (electrones o huecos) lo que también permite su subclasificación en "unipolares" de tipo p o de tipo n.

Existen dos tipos principales de transistores de efecto campo:

- De unión: JFET (Junction Field Effect Transistor) o simplemente FET.
- De "puerta aislada". Ejemplos de este tipo son: IGFET, MOS, MOST, MESFET o MOSFET.

1.2. JFET

Estructura de los JFET:
- Barra semiconductora con contactos óhmicos en los extremos.
- Puerta o elemento de control muy impurificado con portadores distintos a los de la barra.
- Elementos: Fuente o surtidor (S), Drenador (D), Puerta (G), y Canal (región situada entre las dos difusiones de puerta).
-La tensión puerta surtidor (VGS) polariza inversamente las uniones.
-La corriente entre Drenador (D) y Fuente (S) se controla mediante el campo creado por la polarización inversa aplicada a la puerta (G).

Algunos conceptos y diferencias de los FET frente a los BFJT:

- El BJT es un dispositivo no lineal controlado por corriente.
- El BJT tiene tres modos de funcionamiento: corte, activa y saturación.
- Los FET son la siguiente "generación" de transistores después de los BJT.
- El flujo de corriente del FET depende solo de los portadores mayoritarios (Unipolares) a diferencia de los BJT (Bipolares).

- La corriente de salida es controlada por un campo eléctrico (fuente de tensión de sencillo control).

- El apagado y encendido por tensión es más fácil que por corriente.

Las ventajas de FET frente a BJT se observa en estas propiedades:

- Los FET son dispositivos sensibles al voltaje, con una gran impedancia de entrada (del orden de 10 MΩ a 1 GΩ). Al ser mucho más alta que la correspondiente a los BJT, se prefieren como etapa de entrada en amplificadores multietapa.

- Los JFET generan menos ruido que los BJT. Es decir, la degradación de la señal que produce esta clase de circuitos es mucho menor que la de los transistores bipolares.

- Los FET son más fáciles de fabricar que los BJT, pudiéndose incluir un mayor número de FET en un solo chip (requieren menor área), de aquí que memorias y microprocesadores se implementen únicamente con MOSFET. Se pueden miniaturizar con suma facilidad debido a esta propiedad.

- Los FET funcionan como resistencias variables controladas por voltaje para valores pequeños de voltaje de drenaje a fuente.

- La elevada impedancia de entrada de los FET permite que almacenen la carga durante tiempo suficientemente largo como para usarlos como elementos de almacenamiento.

- Los FET de potencia controlan potencia elevadas y conmutan grandes corrientes.

- Los FET no son tan sensibles a la radiación como los BJT.

- Velocidad de "conmutación" elevada.

- Baja sensitividad a temperatura ambiental.

- Las curvas características no cambian generalmente con el tiempo como lo hacen la de los BJT.

- Los FET pueden usarse de forma sencilla para construir amplificadores, aunque también pueden usarse como interruptores, como los BJT.

Inconvenientes de los FET frente a los BJT:

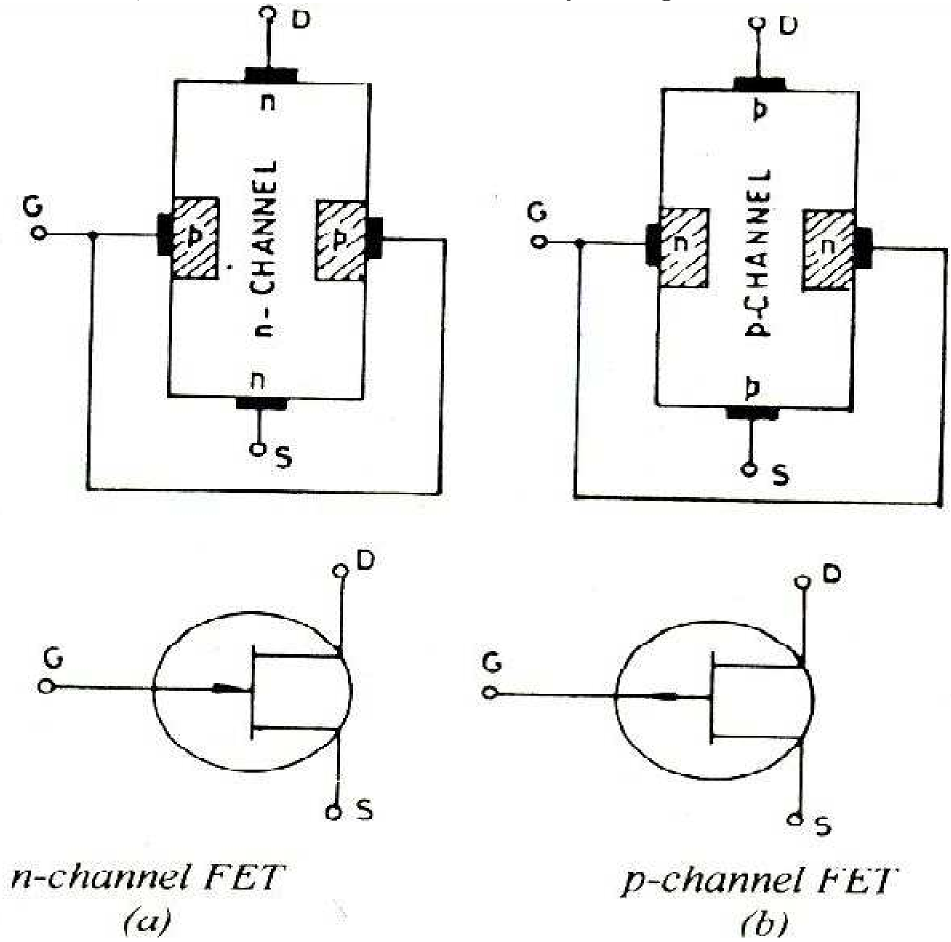
- Como amplificadores, menor producto ganancia-anchura de banda. Esto tiene la siguiente consecuencia: Los FET exhiben una pobre respuesta en frecuencia, debido a la alta capacidad de entrada.

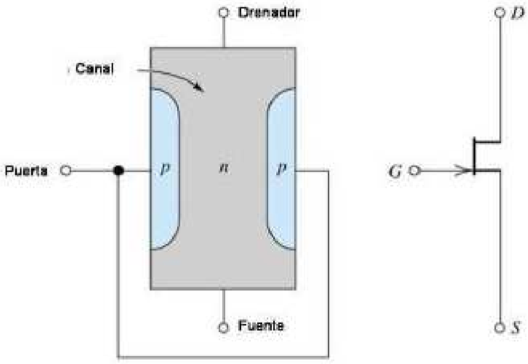
- Algunos FET tienen una pobre linealidad, con lo que el modelo lineal de circuito falla en mayor medida para éstos que para los BJT u otros FET.

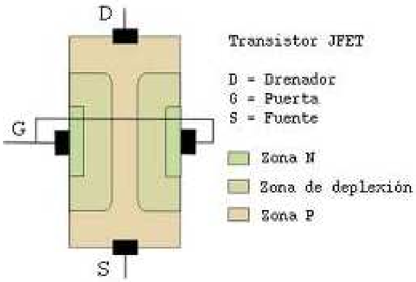
- Los FET se dañan con el manejo debido a la electricidad estática. Por tanto, en el montaje de esta clase de circuitos hay que tener especial cuidado puesto que una manipulación dudosa o un entorno eléctrico poco controlado hará que no funcionen debidamente.

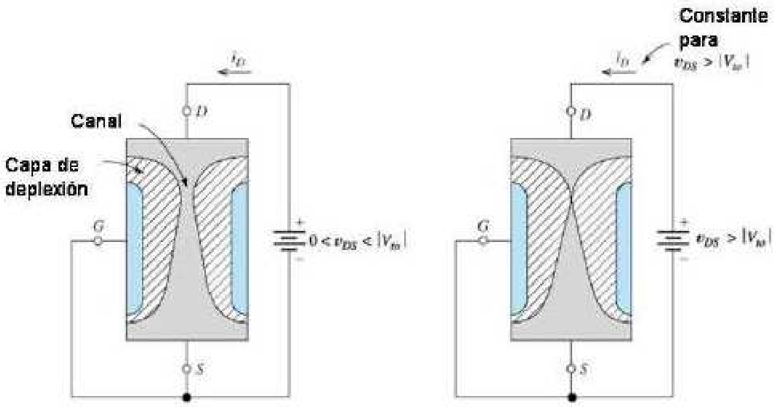
1.3. JFET: simbología y curvas características

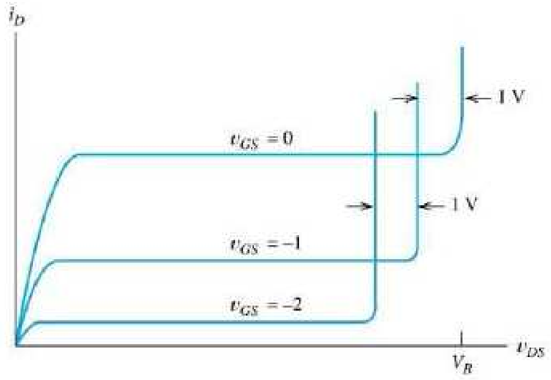
En esta sección veremos algunos dibujos, símbolos y diagramas relevantes para los JFET, como las curvas características y las regiones de funcionamiento:



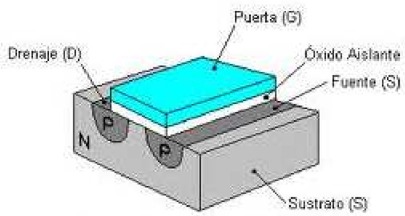

Drenador
Canal
Puerta
p
n
p
Fuente
D
G
S


D
G
S
Transistor JFET
D = Drenador
G = Puerta
S = Fuente
Zona N
Zona de deplexión
Zona P


Canal
Capa de deplexión
D
G
S
Constante para
D
G
S



Tensiones de Ruptura del JFET



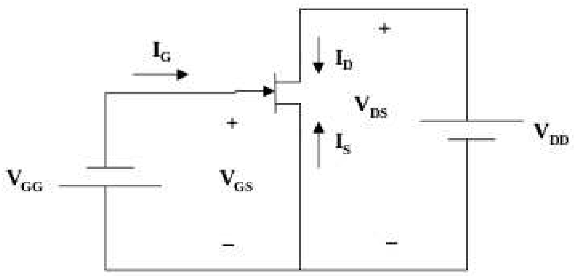
Esquema de un transistor MOS de canal P

JFET: CURVAS CARACTERÍSTICAS

Símbolos de los JFET:

Canal N Canal P

Esquema básico de polarización:



Para canal P el esquema es idéntico con polaridades invertidas

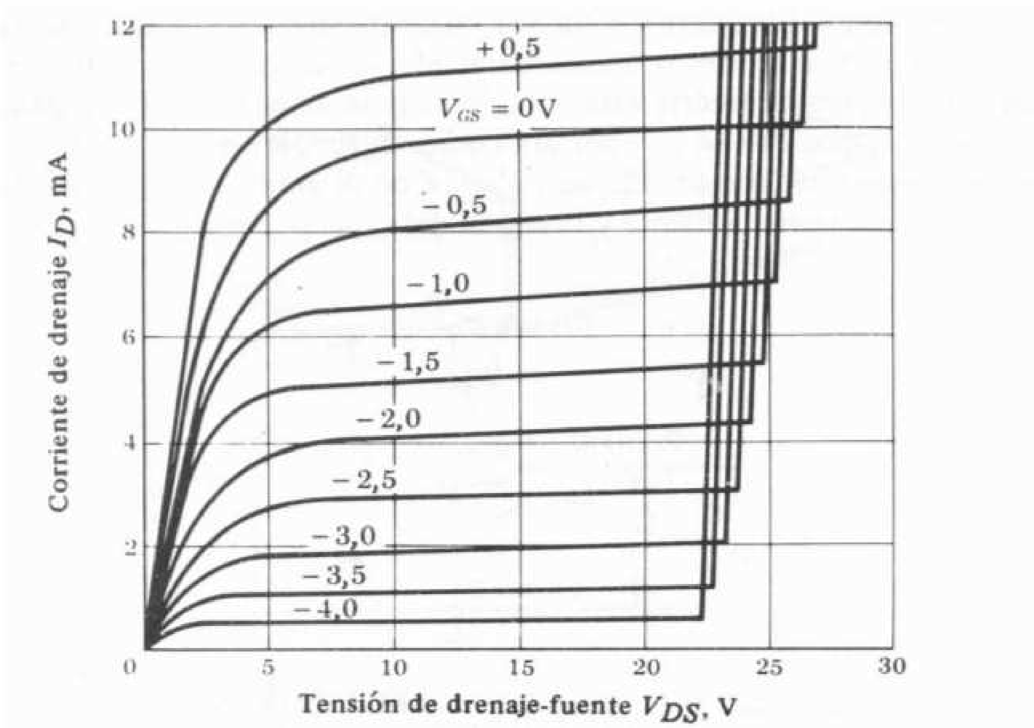
Para $V_{GS} = 0$: Con V_{DS} pequeña ($< V_P$) el canal casi completamente abierto, lo que implica una resistencia pequeña y aproximadamente constante, esto conlleva un comportamiento aproximadamente lineal. Esta región es la llamada REGIÓN ÓHMICA. Notar que $I_D = f(V_{DS})$ debe ser una función lineal y que en general cada voltaje V_{GS} define un valor de resistencia distinto.

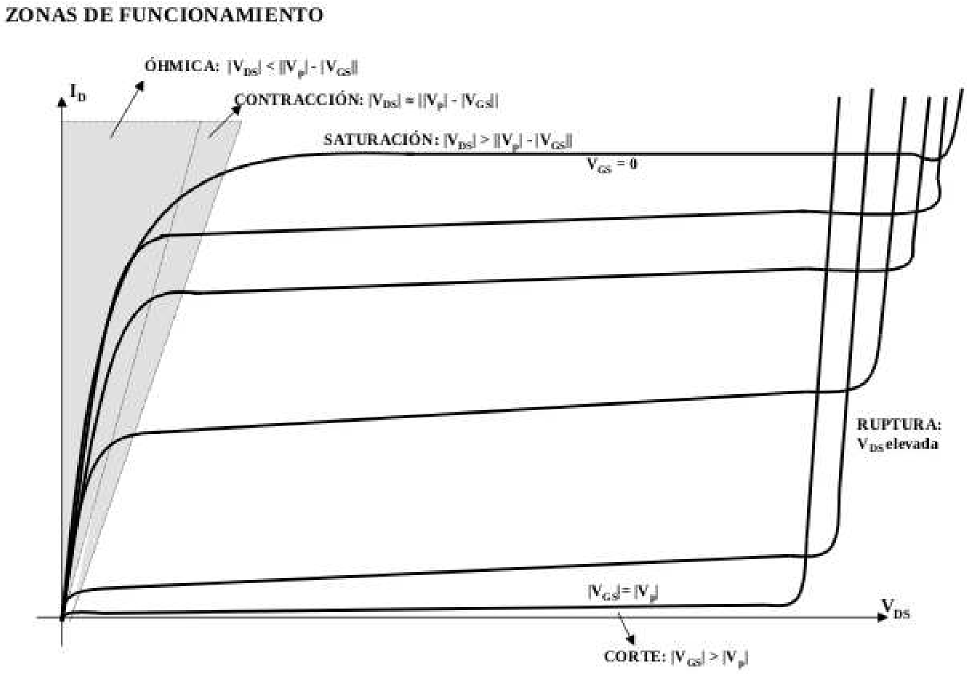
Para V_{DS} cercana a V_P : el canal se va cerrando por un punto y la resistencia aumenta con la tensión. El transistor entra a funcionar con un comportamiento no lineal. Es la llamada REGIÓN DE CONTRACCIÓN.

Si $V_{DS} > V_P$: La resistencia R_{DS} es grande y aproximadamente constante, con lo que el JFET funciona como fuente de corriente y "satura". Es el equivalente modo de funcionamiento al BJT. Es la llamada zona o REGIÓN DE SATURACIÓN.

Caso de una tensión V_{DS} muy elevada: la conducción inversa en las uniones, hace que la corriente I_D se dispare y se produce fácilmente la destrucción del JFET. Es la REGIÓN DE RUPTURA (a la que normalmente se prefiere no llegar...).

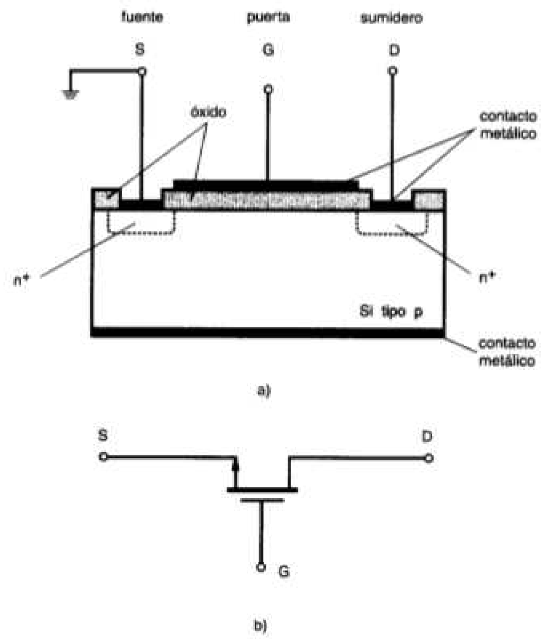
Curvas características: $I_D = f(V_{DS}, V_{GS})$



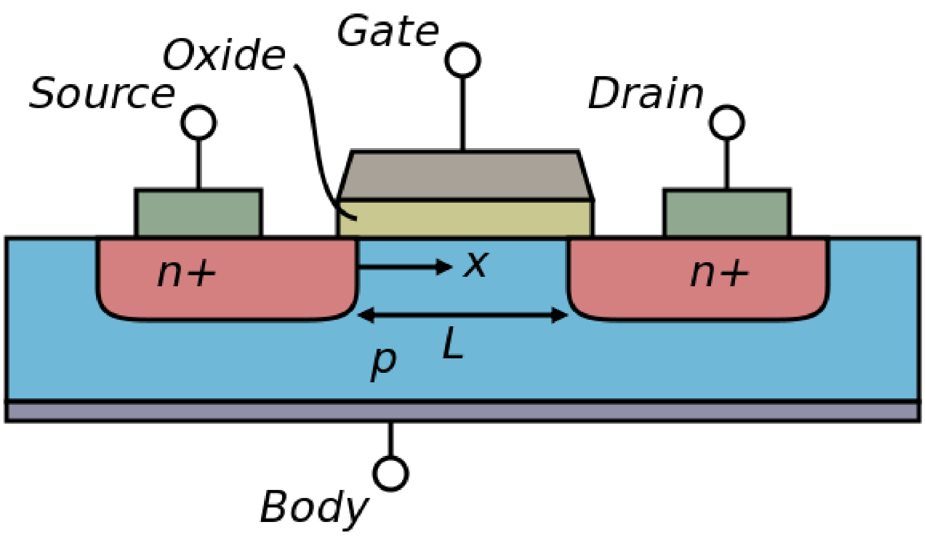


1.4. MOSFET

Otro tipo muy importante de transistor de efecto campo son los llamados MOS (Metal Oxide Semiconductor) o más popularmente llamados MOSFET. Su estructura es la siguiente:



a) Estructura típica de un MOSFET de canal n. b) Símbolo del MOSFET de canal n utilizado en circuitos.

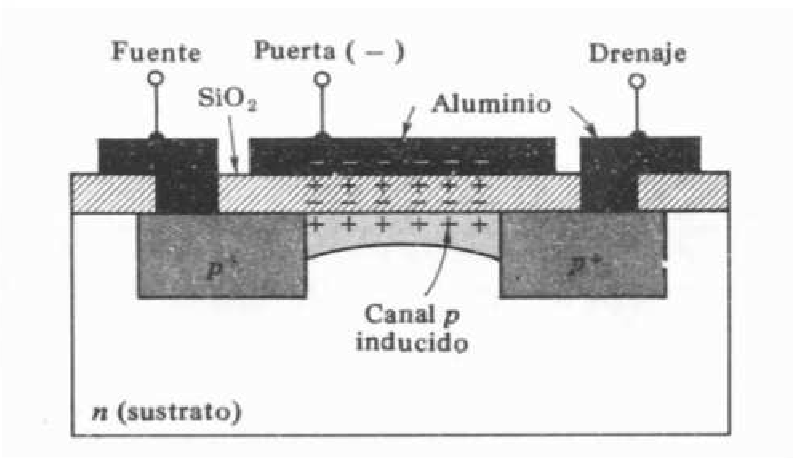


Por simplicidad, supondremos que el sustrato es un semiconductor de tipo p, que generalmente se conecta a la fuente. La puerta G se halla aislada del sustrato por una capa de SiO_2 (dióxido de silicio) y por el terminal de la puerta fluye una corriente despreciable.

Cuando se aplica una tensión positiva respecto a S, los electrones se mueven hacia la puerta, debido al canal inducido por el material semiconductor. Esta corriente establecida por el potencial se controla pues con dicha tensión eléctrica. El MOSFET de tipo N, también llamado en ocasiones NMOS, es ideal para usarse como circuito conmutador (y en operaciones de lógica binaria o booleana). Esto puede hacerse cuando el NMOS se caracteriza por su tensión umbral y revolucionó en su momento la industria de la computación. Cuando la tensión de la puerta es mayor que la tensión umbral, el dispositivo conduce. Así pues, así como los FET pueden usarse como amplificadores, el MOSFET tiene la particularidad de poder usarse como conmutador (por ejemplo como inversor) de forma mucho menos exigente. De esta forma, en síntesis se puede decir diagramáticamente lo siguiente, de acuerdo a lo anteriormente mencionado:

Los transistores de efecto campo de unión JFET estudiados hasta ahora presentan la característica de que con $V_{GS} = 0$, I_D no es nula cuando $V_{DS} \neq 0$.

Los transistores de efecto campo de puerta aislada (de acumulación) tienen I_D nula con $V_{GS} = 0$, lo cual es interesante para trabajar en conmutación.



MOSFET de acumulación de canal P

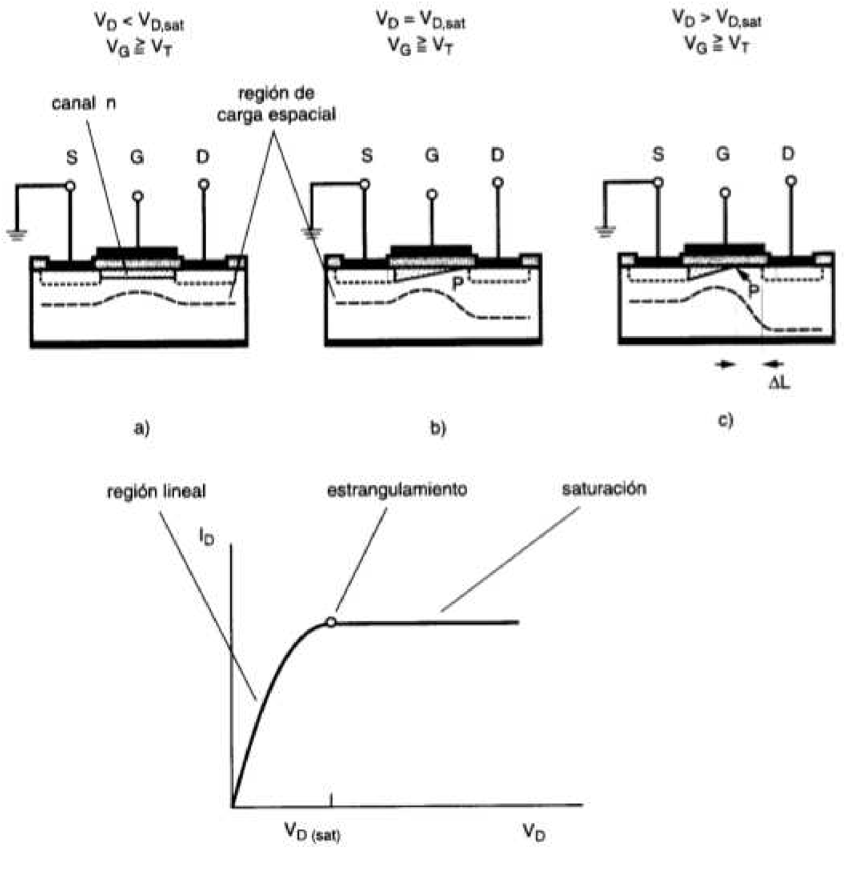
Al igual que ocurre con los JFET, el MOSFET tiene unas zonas de funcionamiento bien diferenciadas:

1. Lineal.

2. Estrangulamiento.

3. Saturación.

Gráficamente, puede verse como sigue:

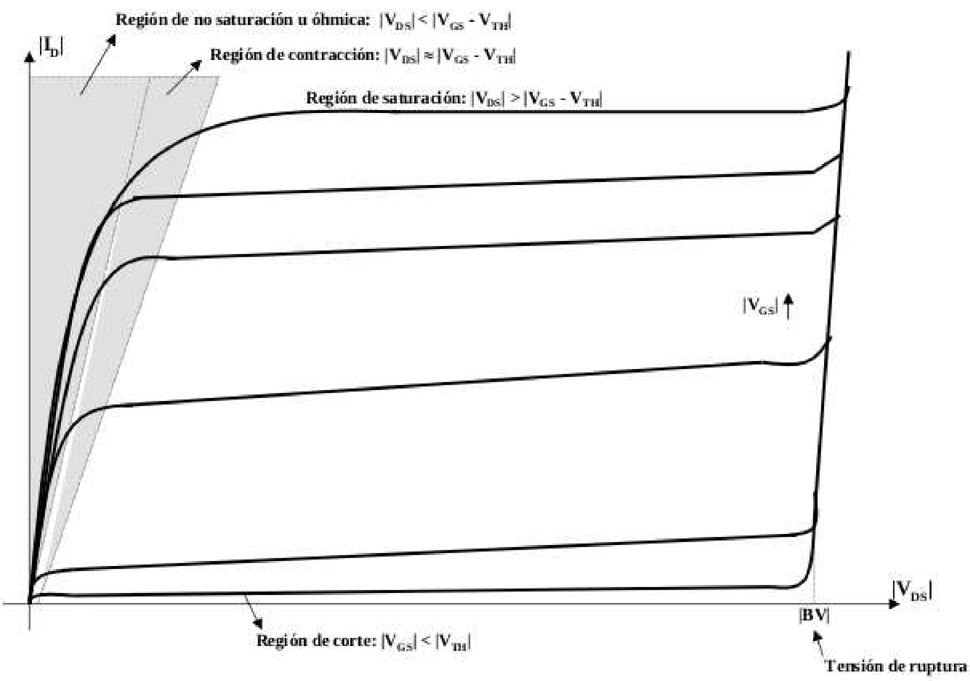


Esquema de la variación de la anchura del canal al aplicar voltajes de drenador crecientes en un MOSFET de canal n. En la parte inferior se muestra la correspondiente curva característica I_D-V_D.

Las curvas características también tienen bonitas representaciones:

<u>Curvas de salida</u>: $I_D = f(V_{DS}, V_{GS})$

MOS de acumulación

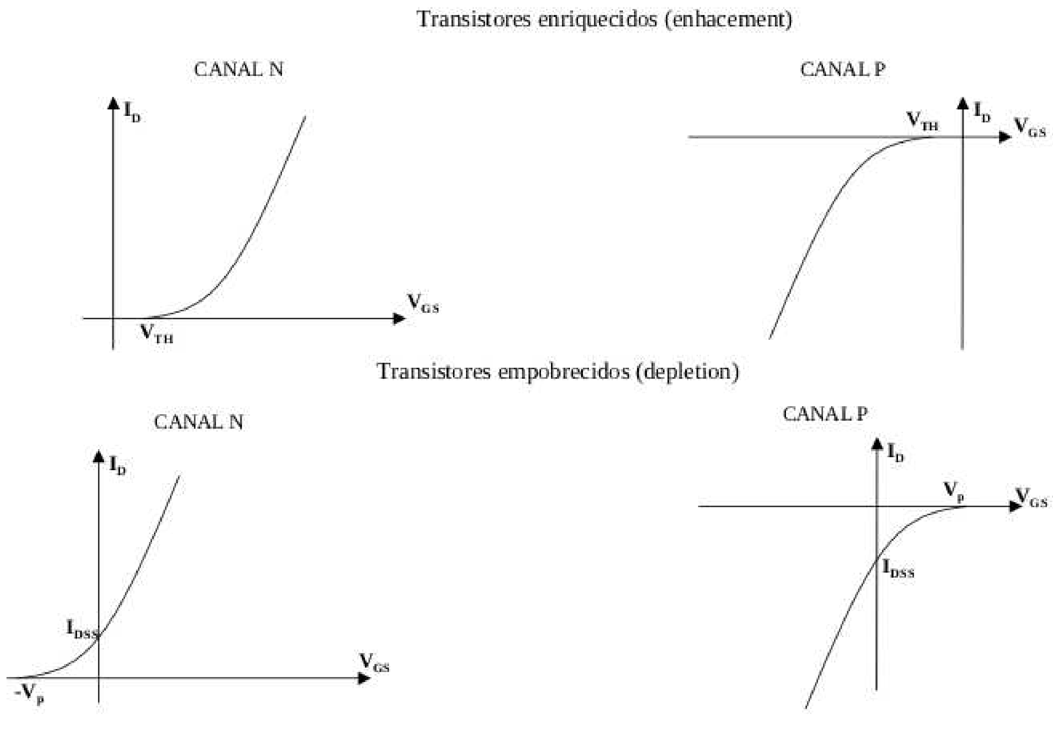


CURVAS CARACTERÍSTICAS

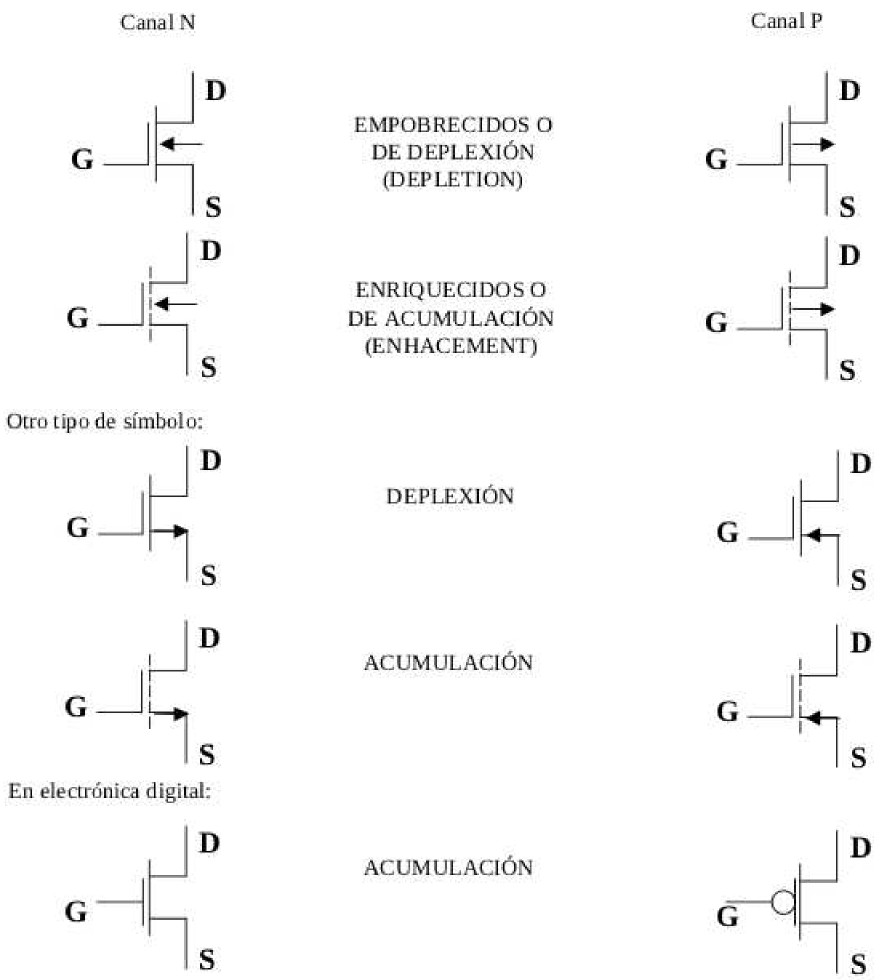
Es la representación de la corriente de drenador I_D en función de la tensión entre la puerta y la fuente V_{GS}

$$I_D = f(V_{GS})$$

Con V_{DS} constante se varía V_{GS} y se observa I_D , obteniéndose curvas diferentes para cada tipo de transistor:



Los símbolos para algunos MOSFET que pueden encontrarse en diversos tipos de referencias son los siguientes:



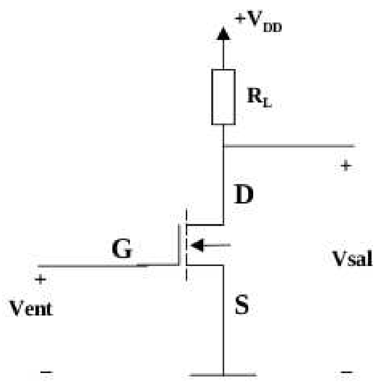
1.5. El MOSFET como conmutador

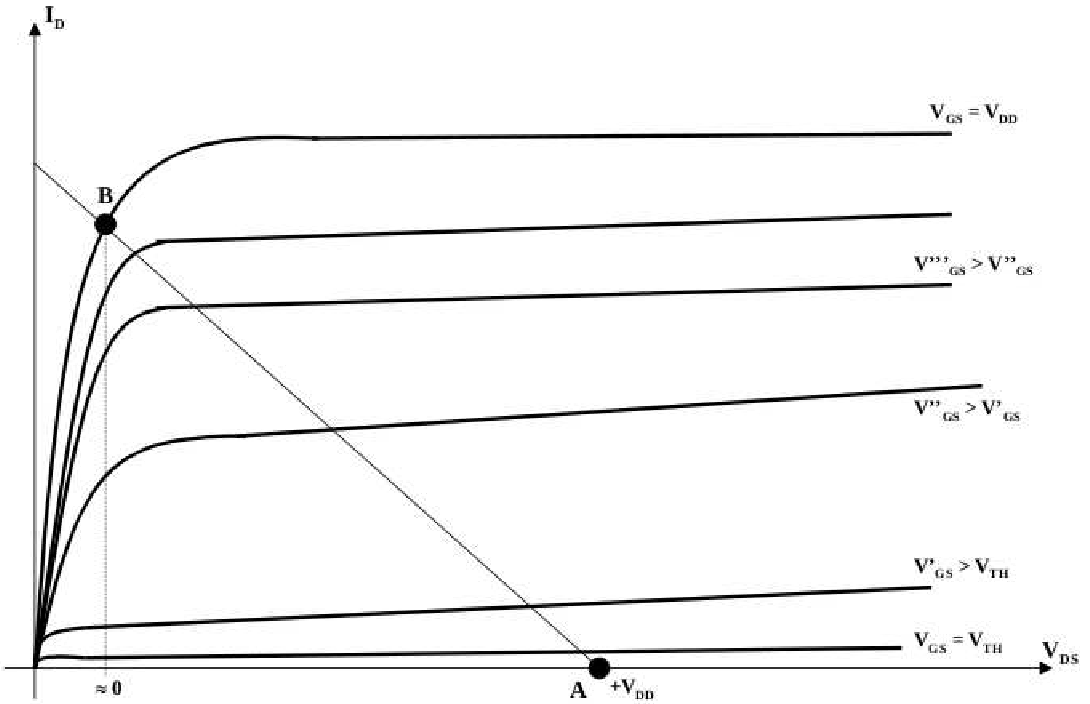
Como vimos en clase, el esquema equivalente de un MOSFET/MOS/NMOS en actuando como conmutador es el siguiente (incluyo la recta de carta que deducimos fácilmente por las reglas de Kirchoff):

EL MOS EN CONMUTACIÓN

Se usa el transistor de acumulación. R_L ocupa aproximadamente veinte veces más área en un circuito integrado que el transistor.

Recta de carga: $V_{DD} = I_D R_L + V_{DS}$





Vent	Vsalida	-> En lógica digital ->	Vent	Vsalida
0	$+V_{DD}$	punto A	0	1
$+V_{DD}$	≈ 0	punto B	1	0

De hecho, como expliqué en clase, el circuito anterior es un inversor lógico (cierta puerta lógica elemental, ver el siguiente capítulo).

1.6. Otros transistores FET y su composición

Una lista no exhaustiva de transistores tipo FET se encuentra en la wikipedia (versión inglesa): CNTFET (Carbon nanotube FET), DEPFET, DG-MOSFET, DNAFET, FREDFET, HEMT, HIGFET, IGBT, ISFET, JFET, MESFET(MEtal-Semiconductor FET), MODFET (MOdulation-Doped FET), MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor FET), NOMFET (Nanoparticle Organic Memory FET), OFET, GNRFET, VeSFET,TFET,. . .

Los transistores FET se fabrican generalmente con algún compuesto semiconductor, usualmente silicio, aunque cada vez se ven más alternativas, especialmente aquellas basadas en el carbono. Son populares pues los FET de silicio amorfo o policristalino, carburo de silicio (SiC), arseniuro de galio

(GaAs), nitruro de galio (GaN), arseniuro de indio y galio (InGaAs). En 2011 IBM confirmó que había construido exitosamente un FET de grafeno en un circuito integrado con frecuencia de corte 2.23 GHz, mucho mayor que cualquier FET conocido basado en el silicio o semiconductores conocidos hasta el momento (nota del autor: os lo conté en las noticias que os pasé por escrito, y que incluyo en estos apuntes en la parte final).

2. Principios de electrónica digital

2.1. Introducción

En Ingeniería (o Física), usamos las ecuaciones y modelos matemáticos que describen los procesos en los que estamos interesados, o que nosotros mismos construimos. Un ejemplo podría ser la ecuación siguiente:

$$V_m = 2W \log_2 n$$

Dicha ecuación describe la velocidad máxima de transmisión de la "información" por un canal que tien un ancho de banda W y por el que hay hasta n-estados diferentes de la señal transmitida. Pero su significado puede parecernos algo oscuro debido al uso de las palabras "ancho de banda" o velocidad de transmisión de la información. Sin embargo, claro debería estar las operaciones aritméticas suma o producto, y también en menor grado la noción o idea de logaritmo. Otro ejemplo, quizás más intuitivo, y que mencioné en clase, es la noción de "señal" como función matemática, en particular como función de onda (¡Sí! De esas funciones de onda que habéis estado estudiando este año en la asignatura de Física ...). Una función de onda es una señal caracterizada por ciertos parámetros:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$$

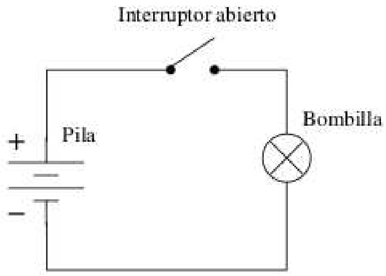
La elongación x(t) es función de la amplitud, la frecuencia angular (o período T), el desfasaje (φ) y el tiempo para una señal sinusoidal (tipo seno o coseno).

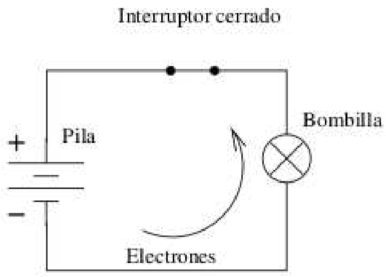
La electrónica analógica tiene como fundamento principal que el "input" y el "output" de todo circuito son "funciones" o "señales" matemáticas con cierto tipo de propiedades físicas concretas: amplitud, frecuencia, periodo, fase,...

Todo circuito analógico (generalmente "memoryless", o sin memoria) pasivo es una caja negra/black box como conté reiteramente en clase. ¿Qué ocurre con la electrónica digital? ¿Cuál es la idea de su funcionamiento? Esta pregunta nos retrotrae al origen de la misma Electrónica como concepto. Hay que recordar lo siguiente:

El objetivo esencial de la electrónica aplicada es construir circuitos electrónicos para que los electrones se comporten de la manera que a nosotros nos interese.

Uno de los primeros circuitos que ve uno en la vida es el de la bombilla y es realmente simple:



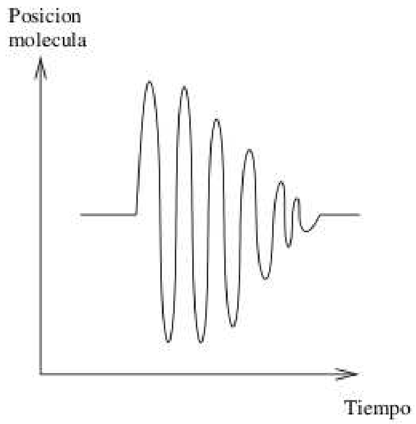


Uno de los grandes retos del nuestra especie es el de manipular, almacenar, recuperar y transportar la información que tenemos del mundo en el que vivimos, lo que nos permite ir progresando poco a poco, cada vez con más avances tecnológicos que facilitan nuestra vida y que nos permiten encontrar respuestas a preguntas que antes no se podían responder y resolver problemas que antes no era posible resolver y tener comodidades que antes no se poseían de ninguna forma (en especial en el ocio con las consolas, videojuegos, smartphones,...).

La aparición de la Electrónica permite aumentar las posibilidades para desarrollar esas capacidades y para comprender los principios de la electrónica analógica, nos centraremos en un ejemplo concreto: la manipulación, almacenamiento, recuperación y transporte de una voz humana.

Cuando hablamos, nuestras cuerdas vocales vibran de una determinada manera, lo que originan que las moléculas del aire también lo hagan, chocando unas con otras y propagando esta vibración. Si no existiesen esas moléculas, como en el espacio, el sonido no se podría propagar (Notad que en el espacio exterior no hay explosiones sonoras o sonido de ninguna clase debido a la ausencia de aire o un medio que vibre).

El tratamiento de la voz es conceptualmente simple en principio. Desde el punto de vista analógico es una onda o vibración. Gráficamente podemos entenderla como algo así:



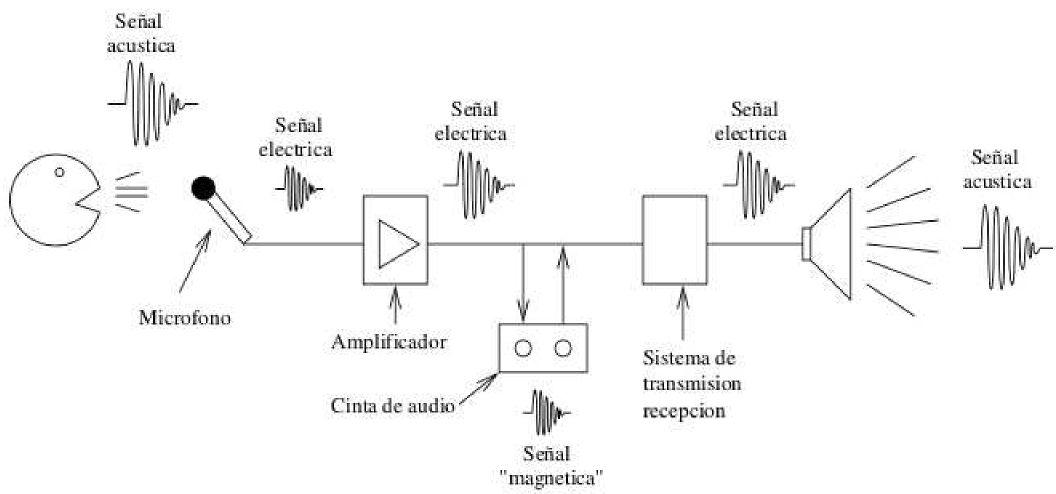
Un trozo de una señal acústica

Cuando esta se´ nal acústica incide sobre un dispositivo como un micrófono, aparece una se´ nal eléctrica que tiene una forma análoga a la de la se´ nal acústica. Las vibraciones de las moléculas se han convertido en variaciones del voltaje, que al final se traducen en vibraciones de los electrones. Es decir, que con los micrófonos lo que conseguimos es que los electrones vibren de una manera análoga a cómo vibran las moléculas de aire. Precioso.

En resumen: "La nueva se´ nal eléctrica que aparece, se denomina señal anal´ogica, puesto que es análoga a la señal acústica original. De esta manera, con señales eléctricas imitamos otras que existen en el mundo real. Y lo que es mucho más interesante, conseguimos que la información que se encuentra en la vibración de las moléculas del aire, pase a los electrones. Cuanto mejor sea el micrófono, más se parecerá la se´ nal eléctrica a la acústica original, y la información se habrá “copiado”/clonado con mayor fidelidad.”

Idea esencial: La electrónica analógica trata con señales eléctricas de imitar a “funciones análogas” a las que hay en el mundo natural o real, modificando sus propiedades (por ejmplo, se puede amplificar, atenuar, filtrar,...).

De esta forma, se trata la información en electrónica analógica. Por ejemplo, en nuestro ejemplo de la voz, tenemos que sería posible el siguiente proceso:



Podemos transformar, recuperar, transportar las señales analógicas. Sin embargo, los sistemas analógicos presentan una serie de problemas que no se pueden obviar:

1. La información está ligada a la onda, y si la onda se degrada (lo cual es muy frecuente y probable), se pierde información.

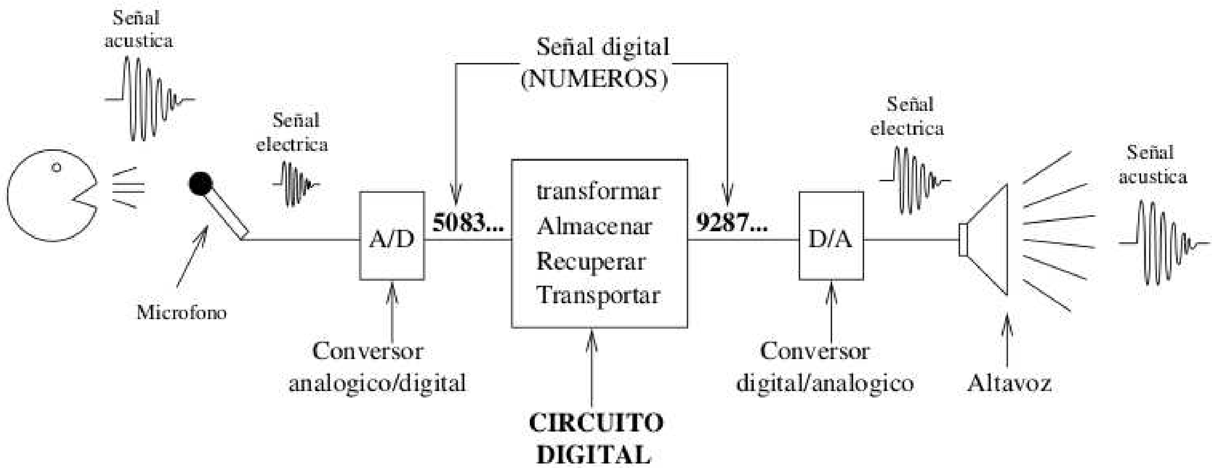
2. Cada tipo de señal analógica requiere un dispositivo particular. No hay un sistema analógico universal que permita tratar a la vez dispositivos de audio y vídeo, por poner sólo un ejemplo.

Recuerda: en las señales analógicas, la información se encuentra en la forma y propiedades de la onda.

La Electrónica digital se basa en una idea absolutamente genial y elemental para tratar la información solucionando los problemas de la electrónica analógica. Esta forma equivalente y sencilla de modificar, almacenar, recuperar y transportar la información o señales se debe en términos matemáticos al llamado "teorema de Nyquist". Este teorema garantiza que cualquier señal, bajo condiciones muy generales, se puede representar mediante una serie de números y que dichos números permiten la reconstrucción total de la señal original. Por tanto, la idea de la Electrónica digital es simple y se puede poner en un par de frases simples:

La Electrónica digital se basa en el principio de discretizar una señal por medio de números. Toda señal digital es un conjunto de números desde este punto de vista[1].

En nuestro ejemplo anterior de la voz, el tratamiento digital lleva consigo un nuevo esquema, que incluyo en el siguiente dibujo adjunto:



El utilizar circuitos y sistemas que trabajen sólo con números tiene una ventaja muy importante: se pueden realizar manipulaciones con independencia de la señal que introduzcamos como input: datos, voz, vídeo ... Un ejemplo muy claro es internet. Internet es una red digital, especializada en la transmisión de números. Y esos números pueden ser datos, canciones, vídeos, programas,...Cualquier cosa. La red no sabe qué tipo de se´ nal transporta, sólo "ve números". El propio ADN se puede ver como un conjunto de números de elevada complejidad. Pero esa es otra historia que no tiene nada que ver con esta asignatura.

[1]Y volvemos a la escuela, a ser niños nuevamente de 4 años aprendiendo a "contar". Resulta que los griegos tenían razón en aquello de que todo es un número, como decía Pitágoras hace miles de años.

Resumen: La electrónica digital trabaja con números. La información está en los números y no en la forma de señal. Cualquier señal siempre se puede convertir a números, almacenarse y recuperarse posteriormente.

Un circuito electrónico digital es, entonces, una caja negra a la que llegan una serie de números a la entrada y produce otra serie de números (generalmente distintos) a la salida. Un concepto diferente de black box pero es una caja negra al fin y al cabo, como ocurría en la Electrónica analógica.

No nos preocuparemos de dónde proceden estos números, pero ya sabemos que o bien vendrán de otro sistema digital, o bien de una señal analógica que se ha convertido en números (y que se ha digitalizado). Pero esto nos lleva de nuevo a regresar a la escuela...¿Cómo se representan los números ? Porque si representar el mundo y las señales se reduce a eso, debemos entender cómo se representan los números de forma básica. Ese es el asunto del siguiente epígrafe o apartado de estos apuntes (basados en las lecciones que expliqué en clase, no lo olvidéis).

2.2. Sistemas de numeración. Bases y números

Un sistema de representación o de numeración esta formado por una serie de símbolos con cierto valor y que se ordenan de cierta forma. La cantidad de símbolos básico del sistema de numeración se llama base. Así, el sistema más simple es el sistema binario, que consiste sólo en combinaciones de dos números, (generalmente denotados por 0 y 1) y sus combinaciones. También hay sistemas de base 8 (0,1,2,3,4,5,6,7), llamado octal, el decimal (que usamos frecuentemente), el hexadecimal (base 16: 0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,A,B,C,D,E,F) y en general, podemos construir sistemas con cualquier base.

Generalmente representamos los números usando el sistema decimal, que usa 10 dígitos o símbolos 0,1,2,3,4,5,6,7,8,9. De esta forma, tenemos el siguiente ejemplo sencillo.

Analicemos con un poco más de detalle el *sistema decimal*, que es el que manejamos habitualmente. Vamos a representar el número "tres mil doscientos ochenta y uno":

$$3281$$

Observamos lo siguiente:

- Está constituido por cuatro dígitos: '3','2','8' y '1'.
- El **orden** en el que están colocados **es muy importante** y si se modifica, se está representando otro número.
- **Cuanto más a la izquierda está un dígito, más importante es**.

El dígito '3' es más importante que todos los que tiene a su derecha. Tiene un **peso mayor** que el resto de dígitos. De hecho, este dígito '3' está representando al número tres mil. El dígito '2' por estar en tercera posición comenzado desde la derecha, representa el número doscientos, el '8' al ochenta y el '1' al uno. Podemos descomponer el número de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \mathbf{3281} &= 3000 + 200 + 80 + 1 = \\ &= \mathbf{3}\cdot 1000 + \mathbf{2}\cdot 100 + \mathbf{8}\cdot 10 + \mathbf{1} = \\ &\mathbf{3}\cdot 10^3 + \mathbf{2}\cdot 10^2 + \mathbf{8}\cdot 10^1 + \mathbf{1}\cdot 10^0 \end{aligned}$$

Observamos que cada dígito está multiplicando una pontencia de 10. Cuanto más a la izquierda se sitúe el dígito, mayor será la pontencia de diez por la que se multiplica.

En la figura 2.2 se muestra el número 3281 descompuesto en dígitos y pesos, y se indica cuál es el dígito de mayor peso y cuál es el de menor.

También es posiblem cambiar o expresar cualquier número en cualquier base específica. Números grandes en una base pequeña son pequeños en una base elevada. De hecho, el sistema octal o hexadecimal sirven para "empaquetar" números que en sistema binario requerirían una enorme cantidad de espacio su almacenaje o envío.

En nuestro ejemplo anterior:

Nosotros representamos los números en el sistema decimal, que consta de diez dígitos diferentes, asignándoles un peso que es una potencia de diez, y que será mayor cuanto más a la izquierda se encuentre el dígito.

¿Qué nos impide que utilicemos unos sistemas de representación en los que los pesos de los dígitos, o incluso los dígitos sean diferentes de los del sistema decimal? Nada. Por ejemplo, podemos emplear un **sistema de representación octal** (Base 8), que utiliza sólo ocho dígitos (0,1,2...7) para representar cualquier número y los pesos de los diferentes dígitos serán potencias de 8. En este sistema, si escribimos los dígitos 352 no se corresponden con el número "trescientos cincuenta y dos" . Para calcular cuál es el número que representa hay que multiplicar cada dígito por su correspondiente peso, obteniendo **el número equivalente en el sistema decimal**.

$$\mathbf{352} = \mathbf{3}\cdot 8^2 + \mathbf{5}\cdot 8^1 + \mathbf{2}\cdot 8^0 =$$
$$3\cdot 64 + 5\cdot 8 + 2 = 248$$

El número 352 **en representación octal** es equivalente al número **248 del sistema decimal**. En el sistema octal, los dígitos tienen pesos que son potencias de 8, en lugar de potencias de 10 como en el **sistema decimal**. Para evitar confusiones cuando se trabaja con sistemas de representación diferentes, se emplea la siguiente notación:

$$352_8 = 248_{10}$$

¿Se podrían utilizar sólo dos dígitos para representar cualquier numéro? Si, se denomina **sistema binario**. Este sistema de representación sólo utiliza los **dígitos 0** y **1 para representar cualquier número**. Fijémonos en lo interesante que resulta esto, *¡¡¡sólo con dos dígitos podemos representar cualquiera de los infinitos números!!!*

En el **sistema binario** los pesos de estos dígitos son pontencias de 2. Veamos un ejemplo del número binario 101001

$$101001= \mathbf{1}\cdot 2^5+ \mathbf{0}\cdot 2^4 + \mathbf{1}\cdot 2^3+ \mathbf{0}\cdot 2^2+\mathbf{0}\cdot 2^1+\mathbf{1}\cdot 2^0=$$
$$2^5+2^5+2^5= 41$$

El número binario 101001 se corresponde con el número 41 en decimal.

El **sistema binario tiene mucha importancia** y **lo utilizaremos constantemente en esta asignatura**. Fijémonos en lo que significa esta forma de representación. Utilizando sólo dos dígitos, es posible representar cualquiera de los infinitos números. En la tecnología actual disponemos de un elemento, llamado **transistor**, que se puede encontrar en dos *estados* diferentes, abierto o cerrado[2], a los que le asociamos los dígitos 0 y 1. Todos los circuitos intregrados o chips se basan en estos transistores y trabajan internamente en binario. Todas las operaciones se realizan utilizando este sistema de representación, por eso es muy importante que lo conozcamos, para entender cómo funcionan los microprocesadores y los chips por dentro.

El sistema binaro utiliza sólo dos dígitos diferentes para representar cualquier número. El peso de los dígitos es una potencia de 2.

---

[2]El nombre técnico para estos estados es Corte y Saturación, pero es más intuitivo pensar en un transistor como en un pequeño interruptor que puede estar abierto o cerrado.

¿Y sería posible utilizar más de 10 dígitos para representar los números?. También es posible. Ese es el caso del **sistema hexadecimal**, en el que se emplean **16 dígitos**: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E y F, donde las letras representan los números 10, 11, 12, 13, 14 y 15 respectivamente. Los pesos de los dígitos son pontencias de 16. Por ejemplo, el número hexadecimal FE2A se puede descomponer de la siguiente manera:

$$FE2A = F{\cdot}16^3 + E{\cdot}16^2 + 2{\cdot}16^1 + A{\cdot}16^0 =$$
$$15{\cdot}16^3 + 14{\cdot}16^2 + 2{\cdot}16^1 + 10{\cdot}16^0 = 65066$$

El **sistema hexadecimal** es muy curioso. Permite escribir números como los siguientes: CACA, DE, BACA :-). Se deja como ejercicio el obtener sus correspondientes números en el sistema decimal.

Este sistema, como veremos más adelante, se emplea para escribir números binarios de una manera más compacta, dado que el paso de hexadecimal a binario y vice-versa es inmediato.

El siguiente resultado, no lo expliqué en clase, pero es totalmente general:

> Dado un número de *m* dígitos $(a_m...a_0)$, y usando un sistema en base *b*, se puede expresar en el **sistema decimal** utilizando la siguiente fórmula:
>
> $$a_m a_{m-1}...a_2 a_1 a_0 = \sum_{i=m}^{0} a_i.b^i$$
>
> Esta fórmula no es más que la generalización de los ejemplos expuestos en el apartado anterior. Si estamos trabajando con un sistema en base 7 (b=7) y el número que queremos convertir al sistema decimal tiene 4 dígitos (m=4), la fórmula de conversión sería:
>
> $$a_3 a_2 a_1 a_0 = a_3{\cdot}7^3 + a_2{\cdot}7^2 + a_1{\cdot}7^1 + a_0{\cdot}7^0$$
>
> En esta asignatura **nos centraremos en el sistema binario**, que será el que tendremos que comprender para utilizarlo en el diseño de circuitos digitales.

La tabla siguiente es una tabla de conversión de algunos números que se usan en Electrónica digital muy frecuentemente. Es útil en algunos casos prácticos:

DECIMAL	BINARIO	HEXADECIMAL
0	0000	0
1	0001	1
2	0010	2
3	0011	3
4	0100	4
5	0101	5
6	0110	6
7	0111	7
8	1000	8
9	1001	9
10	1010	A
11	1011	B
12	1100	C
13	1101	D
14	1110	E
15	1111	F

Para expresar un número decimal en una determinada base, basta con dividir ese número sucesivamente por la base hasta que quede resto cero. El número en la base deseada se obtiene al leer de "abajo hacia arriba" los sucesivos cocientes obtenidos. Para expresar un número de n dígitos en una base no decimal en su valor decimal, simplemente multiplicamos posicionalmente cada dígito por la potencia de la base correspondiente a su lugar (exponente cero en la cifra más a la derecha y exponente n-1 en su última cifra; notar que una cifra de n-dígitos tiene n-1 dígitos si empezamos por el lugar "cero" a la derecha).

Con la tecnología que hay actualmente, los **circuitos digitales** manipulan números que están representados en binario. Así podemos decir que un **circuito digital** actual **tiene como entradas y salidas números en binario**. Es decir, números que vienen expresados con los dígitos '0' y '1'.

En los circuitos digitales, los números que se procesan, están expresados en binario, tanto en la entrada como en la salida.

Un **dígito binario**, que puede ser '0' ó '1', recibe el nombre de **BIT**, del término ingles ***BI****nary digi****T*** (dígito binario). Utilizaremos los bits para indicar el tamaño de las entradas y salias de nuestros circuitos.

Los circuitos digitales *sólo saben trabajar con números en binario*, sin embargo a los humanos nos es más cómodo trabajar en decimal. Trabajar con número binarios puede parecer "poco intuitivo". Vamos a ver cómo en determinadas ocasiones resulta muy intuitivo el trabajar con números binarios.

Sobre el sistema hexadecimal, una aclaración al comentario anterior que hice sobre el asunto de la simplificación que ofrece para el sistema binario tal representación.

El **sistema hexadecimal** se utiliza para **representar números binarios de una forma más compacta**. Cada dígito hexadecimal codifica 4 bits, de manera que un número hexadecimal de 4 bits permite representar un número binario de 16 bits. Veamos un ejemplo:

1011000111101101 = B1ED

1011	0001	1110	1101
B	1	E	D

Todavía nos queda una cosa por resolver. En la electrónica trabajamos con electrones, forzándolos a que hagan lo que nosotros queremos. En el caso de los circuitos digitales, lo que hacemos es operar con números. *¿Cómo conseguimos esto? ¿Cómo introducimos los números en los circuitos digitales?*

La solución a esto es ***asignar un voltaje a cada uno de los dos estados de un bit***. Lo normal, conocido como lógica TTL, es asignar el valor de 5 voltios al dígito '1' y 0 voltios al dígito '0'. Esta asignación de valores depende de la tecnología empleada.

En los circuitos digitales, se usan dos tensiones diferentes, una para representar el dígito '1' y otra para representar el dígito '0'. En la electrónica tradicional se usan 5 voltios para el digito '1' y 0 voltios para el digito '0'

Finalmente, hay que recordar la diferencia (que en ocasiones se observa) entre BIT y Byte:

BIT Dígito binaro. Un bit puede tomar los valores 0 ó 1. Es la abreviatura de las palabras inglesas de Binary digiT.

Byte Conjunto de 8 bits. El número más alto que se puede representar es el 11111111, que en decimal es 255.

$\boxed{\text{1 Byte = 8bits}}$

Unos ejercicios para practicar conversiones de números en sistemas de diferentes bases:

1. **Pasar los siguientes números a decimal**

    a) 347_8

    b) 2201_3

    c) $AF2_{16}$

    d) 10111_2

2. **Pasar de binario a hexadecimal**

    a) 0101101011111011

    b) 10010001110000101

    c) 1111000011110000

    d) 0101010110101010

3. **Pasar de hexadecimal a binario**

    a) FFFF

    b) 01AC

    c) 55AA

    d) 3210

2.3. Álgebras de Boole: propiedades

En Electrónica digital, el sistema más simple es el sistema binario de numeración, que simplifica mucho las cosas. El eslogan ahora cambia un poco, debido a que las variables que tratamos no son reales sino números discretos en general. La síntesis del enfoque que vamos emplear es la siguiente:

> ***Para describir un circuito digital utilizaremos ecuaciones matemáticas. Sin embargo, estas ecuaciones tienen variables y números que NO SON REALES, por lo que NO podemos aplicar las mismas propiedades y operaciones que conocemos. Hay que utilizar nuevas operaciones y nuevas propiedades, definidas en el ALGEBRA DE BOOLE.***

Necesitamos entonces conocer los axiomas o propiedades de este "nuevo álgebra" o lógica binaria que determina las variables numéricas de formato binario. A continuación se exponen las propiedades elementales del álgebra de Boole:

Las operaciones del *Álgebra de Boole* las podemos definir utilizando *tablas de verdad*:

- **Operación +**

A	B	A+B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

- **Operación ·**

A	B	A·B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Las **propiedades** del *Algebra de Boole* son las siguientes:

1. **Las operaciones + y · son CONMUTATIVAS**

   $A + B = B + A$

   $A \cdot B = B \cdot A$

2. **Elemento Neutro**

   A+0=A

   A·1=A

3. **Distributiva**

   $A + (B \cdot C) = (A + B) \cdot (A + C)$

   $A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$

4. **Elemento inverso**

   $A + \overline{A} = 1$

   A·$\overline{A}$=0

   Operación de **negación** definida por:

   $\overline{0} = 1$

   $\overline{1} = 0$

- **Asociatividad**

  $A + B + C = (A + B) + C = A + (B + C)$

  $A \cdot B \cdot C = (A \cdot B) \cdot C = A \cdot (B \cdot C)$

- **Idempotencia**:

  $B + B = B$

  $B \cdot B = B$

- **Ley de Absorción**

  $A + A \cdot B = A$

  $A \cdot (A + B) = A$

  Este teorema es muy importante puesto que nos permite realizar simplificaciones en las expresiones.

- **Leyes de DeMorgan**

  $\overline{B_1 + B_2 + B_3 + ... + B_n} = \overline{B_1} \cdot \overline{B_2} \cdot \overline{B_3} \cdot ... \cdot \overline{B_n}$

  $\overline{B_1 \cdot B_2 \cdot B_3 \cdot ... \cdot B_n} = \overline{B_1} + \overline{B_2} + \overline{B_3} + ... + \overline{B_n}$

  Este teorema es también muy importante y lo usaremos constantemente. Vamos a hacer algunos ejemplos para aprender a utilizarlo:

  - **Ejemplo 1**: $\overline{A + B} = \overline{A} + \overline{B}$
  - **Ejemplo 2**: $\overline{A \cdot B + C.D} = \overline{A \cdot B} \cdot \overline{C \cdot D} = (\overline{A} + \overline{B}) \cdot (\overline{C} + \overline{D})$
  - **Ejemplo 3**: $\overline{A \cdot B \cdot C} = \overline{A} + \overline{B} + \overline{C}$
  - **Ejemplo 4**: $\overline{A \cdot \overline{B} + \overline{C}} = \overline{A \cdot \overline{B}} \cdot \overline{\overline{C}} = (\overline{A} + \overline{\overline{B}}) \cdot C = (\overline{A} + B) \cdot C$

Existen dos maneras de representar una función booleana. Una ya la conocemos, y es utilizado expresiones booleanas. Así por ejemplo se puede definir la función booleana siguiente:

$$F = A \cdot \overline{B}$$

y hemos visto cómo podemos obtener todos los valores de esta función.

Existe otra manera de especificar una función booleana y es utilizando las **tablas de verdad**. En ellas lo que estamos representando es el valor que debe tomar la función cuando las variables de entrada toman todos los valores posibles. Así por ejemplo yo puedo definir una función G de la siguiente manera:

A	**B**	**G**
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	1

¿Cuánto vale G si A=0 y B=1?. Miramos la tabla y vemos que G vale 1. Esta forma de definir funciones booleanas es muy sencilla. El número de filas de la tabla de verdad depende del número de variables que usemos.

Cuanto mayor número de variables, mayor cantidad de filas tendrá la tabla de verdad.

La regla que se cumple es la siguiente: "Si la función tienen n variables, la tabla de verdad tendrá 2^n filas". Veamos algunos ejemplos:

- Si una función tiene **2 variables**, su tabla de verdad tendrá **4 filas**
- Si la función tiene **3 variables**, la tabla tendrá 2^3 =**8 filas**
- Si la función tiene **4 variables**, la tabla tendrá 2^4 =**16 filas**
- .....

En la práctica no haremos tablas de verdad de más de 4 variables. Para eso están los ordenadores :-). Nosotros aprenderemos a definirlas y manejarlas.

Lo mejor es ver un ejemplo. Imaginemos que nos han dado la siguiente función, definida por la expresión:

$$F = \overline{A} \cdot B$$

1. La función tiene 2 variables, luego **la tabla de verdad tendrá $2^2 = 4$ filas**

2. Dibujamos una tabla de verdad con 4 filas, y ponemos en la parte de la izquierda el número de fila en *binario natural*, comenzando por la fila 0.

A	**B**	**F**
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

3. Aplicando la expresión, vamos calculando el valor de F. La primera fila se corresponde con F(0,0), la seguna con F(0,1), la tercera con F(1,0) y la última con F(1,1):

   - $F(0,0) = \overline{0} \cdot 0 = 1 \cdot 0 = 0$
   - $F(0,1) = \overline{0} \cdot 1 = 1 \cdot 1 = 1$
   - $F(1,0) = \overline{1} \cdot 0 = 0 \cdot 0 = 0$
   - $F(1,1) = \overline{1} \cdot 1 = 0 \cdot 1 = 0$

La tabla de verdad es pues

A	**B**	F
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	1

Veamos otro ejemplo, ahora con una **función de 3 variables**:

$$G = A \cdot \overline{B} + C$$

1. Como la función tiene 3 variables, **la tabla de verdad tendrá** 2^3 =**8 filas**.

2. Dibujamos la tabla, poniendo en binario natural el número de fila, comenzando por 0:

A	**B**	**C**	**G**
0	0	0	
0	0	1	
0	1	0	
0	1	1	
1	0	0	
1	0	1	
1	1	0	
1	1	1	

3. Calculamos el valor de la función para cada una de las filas. El resultado se muestra a continuación, dejándose al lector su comprobación:

A	**B**	**C**	**G**
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

2.4. Puertas lógicas básicas

Resumamos brevemente las ideas previas de un álgebra de Boole en un contexto de Electrónica elemental y en forma diagrática y axiomática:

Un álgebra de Boole es toda clase o conjunto B de elementos que pueden tomar dos valores perfectamente diferenciados (representados por 0 y 1) y que están relacionados por dos operaciones binarias, denominadas suma lógica + y producto lógico · que cumplen los siguientes postulados:

(a) Ambas operaciones son conmutativas:

$$a + b = b + a$$
$$a \cdot b = b \cdot a \qquad \forall\, a, b \in B$$

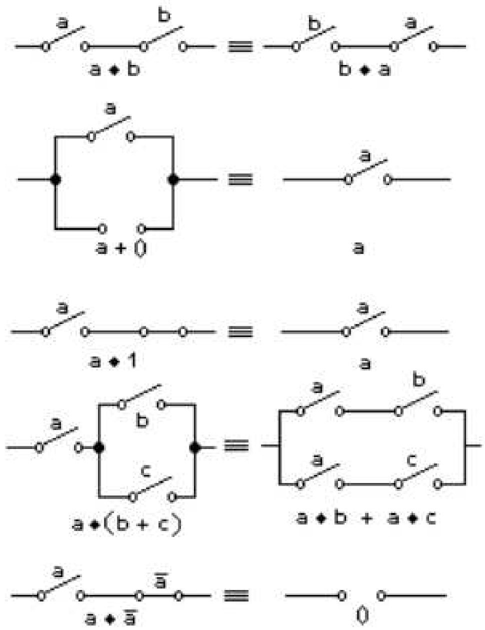
(b) Existen elementos neutros dentro de B para ambas operaciones:

$$a + 0 = 0 + a = a \qquad \forall\, a \in B$$
$$a \cdot 1 = 1 \cdot a = a \qquad \forall\, a \in B$$

(c) Las operaciones son distributivas cada una respecto a la otra:

$$a + (b \cdot c) = (a + b) \cdot (a + c)$$
$$a \cdot (b + c) = (a \cdot b) + (a \cdot c) \qquad \forall\, a, b, c \in B$$

(d) Cada elemento de B tiene su complemento:



Existen algunos circuitos básicos elementales que conviene conocer en digital. Son las llamadas puertas lógicas elementales. Se exponen a continuación las que contamos en clase:

- La salida de una puerta AND es 1 solo si todas las variables valen 1 a la vez.
- La salida de una puerta OR es 0 cuando todas las variables valen 0 a la vez.
- En un *buffer* la salida sigue a la entrada.
- La salida de una puerta NAND es la negada de la función AND.
- La salida de una puerta NOR es la negada de la función OR.
- En un inversor, obtenemos a la salida la negación de la entrada.
- La puerta EXOR tendrá un 1 en la salida cuando una de sus entradas sea 1 y la otra 0.
- La salida de una puerta NEXOR es la negada de la función EXOR.

TablaVerdad	Función	Nombre	Símbolo	Símbolo
a b | F(a,b) 0 0 | 0 0 1 | 0 1 0 | 0 1 1 | 1	$F(a,b) = a \cdot b$	AND		&
a b | F(a,b) 0 0 | 0 0 1 | 1 1 0 | 1 1 1 | 1	$F(a,b) = a + b$	OR		≥1
a | F(a) 0 | 0 1 | 1	$F(a) = a$	*BUFFER*		1
a b | F(a,b) 0 0 | 1 0 1 | 1 1 0 | 1 1 1 | 0	$F(a,b) = \overline{a \cdot b}$	NAND		&
a b | F(a,b) 0 0 | 1 0 1 | 0 1 0 | 0 1 1 | 0	$F(a,b) = \overline{a + b}$	NOR		≥1
a | F(a) 0 | 1 1 | 0	$F(a) = \bar{a}$	NOT		1
a b | F(a,b) 0 0 | 0 0 1 | 1 1 0 | 1 1 1 | 0	$F(a,b)=\bar{a}\cdot b+a\cdot\bar{b}$ ó $F(a,b) = a \oplus b$	EXOR		=1
a b | F(a,b) 0 0 | 1 0 1 | 0 1 0 | 0 1 1 | 1	$F(a,b)=\bar{a}\cdot\bar{b}+a\cdot b$ ó F(a,b) = a ? b	NEXOR		=1

Además, son importantes también los conceptos de minterm y maxterm, así como el llamado teorema de Shannon (que puede entenderse como cierta generalización de las Leyes de Morgan):

Minterm: dadas n variables, un *mimterm* es un término producto en el que aparecen todas las variables solo una vez, complementadas o sin complementar.
Maxterm: dadas n variables, un *maxterm* es un término suma en el que aparecen todas las variables sólo una vez, complementadas o sin complementar.

Teorema de expansión de Shannon: Toda función digital de n variables se puede expresar como suma de *mimterms* o producto de *maxterms*.

La forma canónica de una función digital sería su expresión como suma de *mimterms* o como producto de *maxterms*. La siguiente tabla nos indica como obtenerla:

Tipo de ecuación	Método de obtención	Convenio a aplicar
Ecuación *minterms*	Obtener suma de *mimterms* que hacen 1 la función	0 Variable negada 1 Variable sin negar
Ecuación *maxterms*	Obtener producto de *maxterms* que hacen 0 la función	0 Variable sin negar 1 Variable negada

Para el resto de ideas, me repito al resto de apuntes que poseéis y que ahí lo explican convenientemente bien. Simplemente, recordaros que hay toda una clase de sistemas de tipo digital: sumadores, restadores, codificadores/decodificadores, comparadores, multiplexores, conversores de código que pueden entenderse como combinaciones de las tipos de puertas anteriores vistos en clase.

2.5. Circuitos combinacionales

Cualquier circuito digital se puede crear como combinaciones de las puertas esenciales anteriores. De hecho, se llama sistema combinacional a todo sistema digital en el que sus salidas son función exclusiva del valor de sus entradas en un momento dado, sin que intervengan en ningún caso estados anteriores de las entradas o de las salidas. Las funciones OR,AND, NAND y XOR son booleanas y cada una de ellas puede representarse por tablas de verdad, carecen de memoria y de retroalimentación. La teoría de sistemas combinacionales está contenida en la teoría de autómatas finitos, que a su vez son un subconjunto de las máquinas de Turing y la teoría general de autómatas.

Hay una serie de recetas:

Los pasos que seguiremos para el diseño son los siguientes:

1. **Estudio de las especificaciones iniciales**, para entender realmente **qué** es lo que hay que diseñar. Este punto puede parecer una trivialidad, sobre todo en el entorno académico donde las especificaciones son muy claras. Sin embargo, en la realidad, es muy difícil llegar a comprender o entender qué es lo que hay que diseñar.

2. **Obtención de las tablas de verdad y expresiones booleanas necesarias**. En el entorno académico este suele ser el punto de partida. Nos describen qué función es la que se quiere implementer y lo hacemos.

3. **Simplificación de las funciones booleanas**. ¡¡¡Este punto es importantísimo!!! No basta con implementar una función y ya está. ¡¡Somos ingenieros!!. **Hay que implementar la mejor función**, de manera que obtengamos el mejor diseño posible, reduciendo el número de puertas lógicas empleadas, el número de circuitos integrados o minimizando el retraso entre la entrada y la salida.

4. **Implementación de las funciones booleanas utilizando puertas lógicas**. Aquí podemos tener restricciones, como veremos. Puede ser que por especificaciones del diseño sólo se dispongan de puertas tipo NAND. O puede ser que sólo podamos utilizar puertas lógicas con el mínimo número de entradas. En ese caso habrá que tomar la función más simplificada y modificarla para adaptarla a este tipo de puertas. El resultado de esto es la obtención de un esquema o plano del circuito.

Y el paso final es la construcción fáctica y experimental del circuito en un circuito integrado.

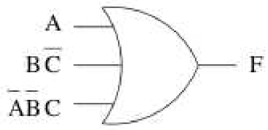
Veamos una serie de ejemplos de circuitos combinacionales básicos (en clase vimos cómo se obtiene la función básica elemental a partir de los minterm o maxterm, que también explican vuestros apuntes complementarios):

Ejemplo 1:

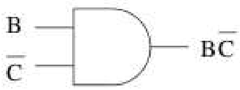
Implementar la siguiente función, utilizando cualquier tipo de puertas lógicas:

$$F = A + B \cdot \overline{C} + \overline{A} \cdot \overline{B} \cdot C$$

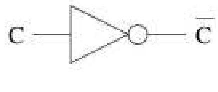
Se trata de implementar un circuito que tiene tres bits de entrada: A, B y C y como salida se quiere obtener la función F indicada. Se puede realizar de muchas formas, pero vamos a ir poco a poco. Primero nos fijamos que no tenemos ninguna restricción. Es decir, en el enunciado nos permiten utilizar cualquier tipo de puerta lógica, y con cualquier número de entradas. Tampoco vamos a simplificar la función, porque lo que queremos es ver cómo implementarla, aunque ya hemos visto que siempre hay que simplificar!!! (y de hecho, esta función se puede simplificar más, ¿como?, se deja como ejercicio). Vemos que en la función hay tres términos que van sumados: A, $B \cdot \overline{C}$, y $\overline{A} \cdot \overline{B} \cdot C$. La puerta lógica que representa la suma es la OR, por lo que podemos escribir:



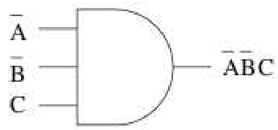
Ahora el problema es más sencillo. Hay que obtener esos tres términos independientemente. Uno ya lo tenemos, que es A (es directamente una de las entradas). El término $B{\cdot}\overline{C}$ es el producto de B y $\overline{C}$, y lo podemos obtener con una puerta AND así:



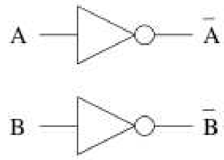
El término $\overline{C}$ lo obtenemos directamente a partir de un inversor:



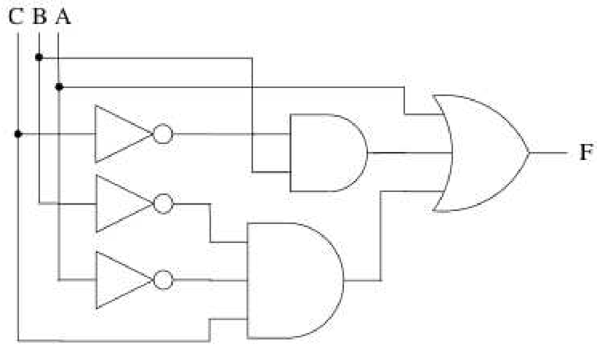
Para obtener el término $\overline{A} \cdot \overline{B} \cdot C$, que es el último que nos falta, nos fijamos que es un producto de tres elementos, por lo que usaremos una puerta AND de tres entradas:



y finalmente para obtener $\overline{A}$ y $\overline{B}$ usamos un par de inversores:



y ahora unimos todas las pierzas para obtener el circuito final:



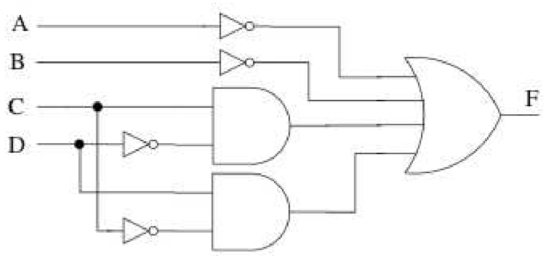
Ejemplo 2:

Implementar la siguiente función, utilizando el menor número posible de puertas lógicas de cualquier tipo. La función está simplificada al máximo.

$$F = \overline{A} + \overline{B} + C \cdot \overline{D} + \overline{C} \cdot D$$

En este caso nos dicen que la función está simplificada al máximo, por lo que no hay que hacer. ¡¡¡Pero es una pregunta que siempre nos tendremos que hacer!! ¿Está simplificada al máximo?. También nos introducen una restricción: usar el menor número posible de puertas lógicas.

Lo primero que se nos puede ocurrir es utilizar el método del ejemplo anterior, sustituyendo las operaciones del Algebra de Boole por puertas lógicas. El circuito que obtenemos es el siguiente:



Hemos usado

- 4 inversores
- 2 puertas AND de dos entradas
- 1 puerta OR de cuatro entradas

La única restricción que nos han impuesto es utilizar el menor número posible de puertas lógicas... ¿Podemos implementar este circuito con menos puertas?. Echemos un vistazo la función F. Teniendo en cuenta que existen otras puertas, como las NAND, XOR, etc... vamos a realizar las siguientes operaciones:

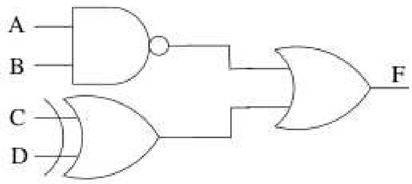
$$\overline{A}+\overline{B}=\overline{A\cdot B}$$

$$C\cdot\overline{D}+\overline{C}\cdot D=C\oplus D$$

La expresión de F que nos queda es la siguiente:

$$F=\overline{A\cdot B}+C\oplus D$$

y si ahora implementamos el circuito:



¡¡Sólo hemos utilizado 3 puertas!!. Una puerta NAND, una XOR y una OR, todas de dos entradas.

Ejercicio: expresar todas las puertas básicas que hemos visto usando puertas NAND solamente.

2.6. Mapas de Karnaugh

En este apartado veremos ***un método para obtener la función más simplificada a partir de una tabla de verdad***.

Vamos a ir poco a poco, viendo los fundamentos de este método. Supongamos que tenemos una función *F(A,B,C)* de tres variables, cuya tabla de verdad es:

A	B	C	F
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

Si la desarrollamos por la primera forma canónica obtenemos:

$$F = \overline{A} \cdot B \cdot \overline{C} + \overline{A} \cdot B \cdot C + A \cdot \overline{B} \cdot \overline{C} + A \cdot \overline{B} \cdot C + A \cdot B \cdot \overline{C} + A \cdot B \cdot C$$

Veremos como aplicando el método de Karnaugh podemos simplificar esta función.Vamos a organizar esta misma tabla de la siguiente manera:

BC / A	00	01	11	10
0	0	0	1	1
1	1	1	1	1

Observamos lo siguiente:

- En total hay 8 casillas, cada una correspondiente a una fila de la tabla de verdad
- En cada casilla está colocado el valor de la función F, correspondiente a esa entrada. En la tabla de verdad hay dos filas en las que F=0 y 6 filas en las que F=1. En el nuevo diagrama hay dos casillas con '0' y 6 con '1'.
- Hay dos filas, en al primera fila están todos los valores de F correspondientes a A=0, y en la segunda correspondientes a A=1.
- Hay 4 columnas, y el número que está en la parte superior de cada una de ellas nos indica los valores de las variables B y C en esa columna.
- Dada una casilla cualquiera, mirando el número situado en la misma fila, a la izquierda del todo nos informa del valor de la variable A y los dos valores superiores, en la misma columna, nos dan los valores de B y C. Así por ejemplo, si tomamos como referencia la casilla que está en la esquina inferior derecha, se corresponde con el valor que toma F cuando A=1, B=1 y C=0.
- Entre dos casillas adyacentes cualesquiera, sólo varía una variable de entrada, quedando las otras dos con los mismos valores. Por ejemplo, si estamos en la casilla inferior derecha, en la que A=1, B=1 y C=0. Si vamos a la casilla que está a su izquierda obtenemos un valor de las variables de: A=1, B=1, C=1. Si lo comparamos los valores de las variables correspondientes a la casilla anterior, vemos que sólo ha cambiado una de las tres variables, la C. Lo mismo ocurre si nos desplazamos a cualquier otra casilla adyacente.

Ahora vamos a ver una propiedad "mágica" de esta tabla. Si obtenemos la primera forma canónica, obtenemos una función con 6 términos. Vamos a fijarnos sólo en los términos que obtenemos si desarrollamos sólo dos casillas adyacentes, como por ejemplos las marcadas en gris en la figura:

A \ BC	00	01	11	10
0	0	0	1	1
1	1	1	1	1

Los valores de las variables en estas casillas son: A=1, B=1, C=1 y A=1, B=1, C=0. Si obtenemos los términos de la primera forma canónica y los sumamos:

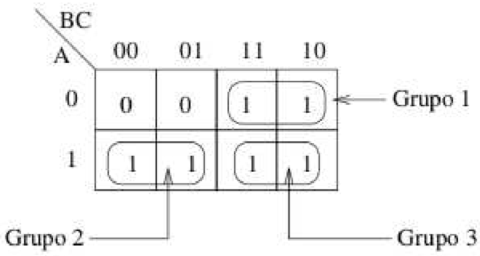
$$A \cdot B \cdot C + A \cdot B \cdot \overline{C} = A \cdot B \cdot (C + \overline{C}) = A \cdot B$$

¡¡Se nos han simplificado!! Es decir, por el hecho de agrupar los términos obtenidos de estas dos casillas y sumarlos, se han simplificado. Y esto es debido a la propiedad antes comentada de que entre dos casillas adyacentes sólo varía una de las variables, de manera que podemos sacar factor común. Estos dos términos son los sumandos 5 y 6 de la primera forma canónica obtenida anteriormente, que al sumarlos y aplicar aglunas propiedades se han simplificado.

Si nos fijamos en estas dos casillas adyacentes, la variable C, que es la única que varía de una a otra, ha desaparecido en la suma. De esta manera podemos afirmar lo siguiente:

Si tomamos dos casillas adyacentes cuyo valor es '1' y desarrollamos por la primera forma canónica, desaparecerá una de las variables. Sólo permanecen las variables que no cambian de una casilla a otra.

De esta manera, vamos a ver qué pasa si tomamos los siguientes grupos:



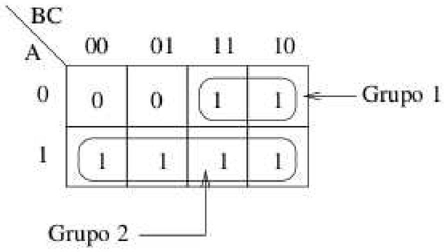
y sumamos los términos de estos grupos:

- **Grupo 1**: $\overline{A} \cdot B \cdot C + \overline{A} \cdot B \cdot \overline{C} = \overline{A} \cdot B \cdot (C + \overline{C}) = \overline{A} \cdot B$
- **Grupo 2**: $A \cdot \overline{B} \cdot \overline{C} + A \cdot \overline{B} \cdot C = A \cdot \overline{B} \cdot (\overline{C} + C) = A \cdot \overline{B}$
- **Grupo 3**: El que teníamos antes: $A \cdot B$

Por tanto, la función F también la podemos expresar como suma de estos grupos:

$$F = \overline{A} \cdot B + A \cdot \overline{B} + A \cdot B$$

¡¡Y está más simplificada que la forma canónica!! Pero...¿Se puede simplificar más? ¡Si!. Inicialmente la función F tenía 6 sumandos, puesto que tenía 6 unos. Al hacer 3 grupos, ahora tiene 3 sumandos. ¿Podemos reducir el número de grupos? Si, vamos a ver qué pasa si tomamos los siguientes grupos:



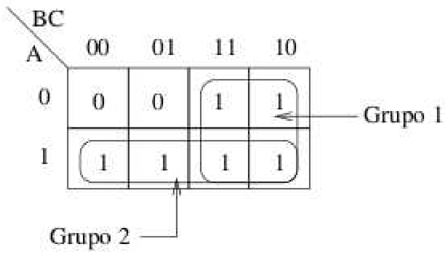
Ahora sólo hay 2 grupos. El nuevo grupo 2 está constituido por 4 casillas en las que F=1. La expresión de este grupo se obtiene sumando las expresiones de estas 4 casillas. Las nuevas expresiones de los grupos quedarían:

- **Grupo 1**: Igual que antes: $\overline{A} \cdot B$
- **Grupo 2**: $A \cdot \overline{B} + A \cdot B = A \cdot (\overline{B} + B) = A$

La nueva función F que obtenemos es:

$$F = \overline{A} \cdot B + A$$

¡¡Que está más simplificada que la anterior!! Pero... ¿Es la más simplificada? No, todavía podemos simplificarla más. ¿Por qué no podemos tomar 2 grupos de 4 casillas adyacentes?. Tomemos los grupos siguientes:



Las nuevas expresiones de los grupos son:

- **Grupo 1**: $\overline{A} \cdot B + A \cdot B = B \cdot (\overline{A} + A) = B$
- **Grupo 2**: Igual que antes: A

Por tanto, la nueva función F simplificada es:

$$F = A + B$$

¡¡¡Esta función está simplificada al máximo!!!

Criterio de máxima simplificación:
Para obtener una función que no se puede simplificar más hay que tomar el menor número de grupos con el mayor número de '1' en cada grupo.

Hay que tener en cuenta que los grupos cd unos que se tomen sólo pueden tener un tamaño de 1, 2, 4, 8, 16,... (es decir, sólo potencias de dos). Esa es la razón por la que en el ejemplo anterior los grupos que se han tomado son de tamaño 4 (y no se han tomado de tamaño 3).

- $F_C = \overline{A}.B.\overline{C} + \overline{A}.B.C + A.\overline{B}.\overline{C} + A.\overline{B}.C + A.B.\overline{C} + A.B.C$ (**CANONICA**)
- $F_1 = A.\overline{B} + A.B + \overline{A}.B$ (**3 grupos de 2 1's por grupo**)
- $F_2 = A + \overline{A}.B$ (**1 grupo de 4 1's y 1 grupo de 2 1's**)
- $F_3 = A + B$ (**2 grupos de 4 1's**)

¡¡Todas son funciones booleanas equivalentes!! (Porque tienen la misma tabla de verdad). ¡¡Pero es la función F_3 la que usamos!! ¡¡Sómos Ingenieros y queremos optimizar al máximo!!!

Ejemplo

Veamos con un ejemplo cómo podemos aplicar directamente el criterio para obtener una función simplificada. Dada la siguiente tabla de verdad, obtener la expresión de F más simplificada posible:

A	**B**	**C**	**F**
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

Colocamos la tabla de verdad como un diagrama de Karnaugh y hacer tres grupos de dos unos:

A \ BC	00	01	11	10
0	0	1	1	1
1	0	0	1	0

La función F la obtenemos sumando las expresiones de los tres grupos, siendo cada uno de ellos el producto de las dos variables booleanas que permanecen sin cambios dentro de cada grupo:

$$F = \overline{A} \cdot C + \overline{A} \cdot B + B \cdot C$$

Como hemos aplicado correctamente **el criterio de máxima simplificación**, tenemos la certeza absoluta de que esta es la expresión más simplificada posible para la función F.

A la hora de formar los grupos hay que tener en cuenta que las casillas situadas más a la derecha de la tabla son adyacentes a las que están más a la izquierda. Veamos un ejemplo:

Ejemplo:

Simplificar la siguiente función, utilizando el método de Karnaugh:

A	**B**	**C**	**F**
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	0

Lo representamos en un diagrama de Karnaugh y tomamos el siguiente grupo:

A \ BC	00	01	11	10
0	1	0	0	1
1	1	0	0	1

con el que obtenemos la siguiente función simplificada:

$$F = \overline{C}$$

Ejemplo:

Dada la siguiente tabla de verdad, obtener la expresión de F más simplificada posible:

A	**B**	**C**	**D**	**F**
0	0	0	0	1
0	0	0	1	0
0	0	1	0	1
0	0	1	1	0
0	1	0	0	1
0	1	0	1	1
0	1	1	0	1
0	1	1	1	1
1	0	0	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	0	1
1	1	0	1	0
1	1	1	0	1
1	1	1	1	0

Lo primero que hacemos es pasarlo a un diagrama de Karnaugh, de la siguiente manera (cuidado de no confundirse!!):

AB \ CD	00	01	11	10
00	1	0	0	1
01	1	1	1	1
11	1	0	0	1
10	1	0	0	1

Vemos que ahora en la izquierda de la tabla están los valores de las variables A y B y en la parte superior los valores de C y D. Lo siguiente es agrupar los '1's. Vamos a hacer primero los siguientes grupos:

AB \ CD	00	01	11	10
00	1	0	0	1
01	1	1	1	1
11	1	0	0	1
10	1	0	0	1

La expresión que obtenemos es:

$$F = \overline{C} \cdot \overline{D} + C \cdot \overline{D} + \overline{A} \cdot B$$

Sin embargo, ¿es esta la función más simplificada? O lo que es lo mismo, podemos hacer menos grupos de '1's. La respuesta es sí, porque no olvidemos que las casillas de la derecha son adyacentes a las de la izquierda de la tabla, por lo que podemos hacer sólo dos grupos:

AB \ CD	00	01	11	10
00	1	0	0	1
01	1	1	1	1
11	1	0	0	1
10	1	0	0	1

Un grupo es de 8 unos y el otro de 4. Obtenemos la siguiente función:

$$F = \overline{D} + \overline{A} \cdot B$$

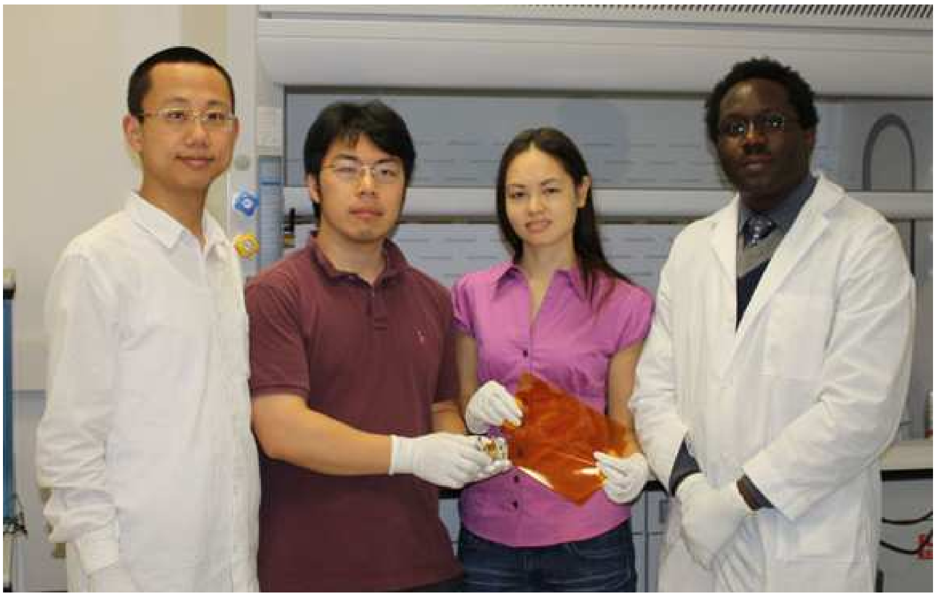
Esta sí es la más simplificada.

3. Electrónica moderna en noticias/Modern electronics in news

3.1. Noticia 1: Grafeno (I)/Graphene (I)

Flexible graphene transistor sets new records (Transistores flexible de grafeno alcanzan nuevos records). Dec 10, 2012

Flexing their electronics (Electrónica flexible e inteligente)



Researchers at the University of Texas at Austin in the US say that they have made state-of-the-art flexible graphene field-effect transistors with record current densities and the highest power and conversion gain ever. The transistors also show near-symmetric electron and hole transport, are the most mechanically robust flexible graphene devices fabricated to date, and can be immersed in a liquid without any ill effects.

Investigadores de la Universidad de Austin (Texas) en los EEUU dicen que han fabricado los prometedores y actuales transistors de efecto campo de grafeno flexible con densidades record y la más alta potencia y ganancia jamás construida. Los transistores también muestran propiedades de transporte electrón-hueco simétricos (ambos son igualmente válidos) y son los dispositivos de grafeno flexible más robustos mecánicamente hablando fabricados hasta la fecha, y pueden ser introducidos en un líquido sin que afecte su funcionamiento.

Graphene is a single, flat sheet of carbon arranged in a honeycombed lattice. It has many unique electronic and mechanical properties, such as extremely high carrier mobility - which means that it is an ideal material for use in ultrafast transistors. The material can also absorb light over a range of wavelengths in the electromagnetic spectrum from the visible to mid-infrared and is highly transparent to light. The fact that it is mechanically flexible while being incredibly strong is good news too.

El grafeno es una capa simple de átomos de carbono dispuestos en forma de “panal de abeja”. Tiene muchas propiedades electrónicas y mecánicas únicas, tales como una movilidad de portadores extremadamente alta, lo que significa que es un material ideal para su uso como transistor ultrarrápido (posiblemente hasta la escala THz). El material puede también absorber luz en un rango de longitudes de onda en el espectro electromagnético que va desde el visible hasta el infrarrojo intermedio, y es altamente transparente a la luz. El hecho de que es mecánicamente flexible mientras que es increiblemente “fuerte” (duro) es una buena noticia también.

The researchers, led by Deji Akinwande and Rodney Ruoff, made their graphene field-effect transistors (GFETs) directly atop patterned dielectrics on plastic sheets using conventional microelectronic lithography. The devices have a unique structure, explains Akinwande, in which multi-finger metal gate electrodes are embedded in the plastic sheet. They are also made using graphene that has been grown by chemical vapour deposition (CVD), which can now produce as good graphene flakes as can be obtained by exfoliation (the famous “sticky-tape” method).

Los investigadores, liderados por Deji Akinwande y Rodney Ruoff, construyeron sus transistors de efecto campo de grafeno (GFET) directamente encima de unas capas de dieléctrico en “láminas” de plástico usando la técnica comúnmente usada hoy día de la litografía microelectrónica. Los dispositivos tienen una estructura única, explica Akinwande, debido a que los electrodos que actúan como puerta hechos de metal y con varios “conectores” están inmersos o integrados en la propia lámina de plástico. También están usando grafeno que han hecho crecer por deposición química de vapor (CVD), y que ahora produce “obleas” de grafeno tan buenas como las que se obtienen por el método de exfoliación (el famoso método de la “cinta de celo”).

Record properties /Propiedades récord

The innovative production technique means that graphene can easily be integrated and fabricated on plastic sheets that have been pre-patterned with metal gates. This produces transistors in which charge carriers can move extremely fast and in which electrons and holes move in the same way. The devices are also extremely compliant and can accommodate mechanical strains of up to 9 % and can be bent and unbent over for more 20 continuous cycles – a record number for flexible GFETs.

La innovadora técnica de producción significa que el grafeno puede ser fácilmente integrado y fabricado en láminas de plástico que han sido preparadas con puertas metálicas. Esto produce transistores en los que los portadores de carga pueden moverse extremadamente rápido y en los que los electrones y huecos se mueven exactamente de la misma forma. Los dispositivos son extremadamente fiables y resistentes, pudiendo acomodar tensiones de hasta un 9 % y pueden ser retorcidos y estirados más de 20 veces o ciclos continuos -un récord para flexibles GFET.

“Overall, our transistors feature record circuit performance, the largest mechanical bending and the highest extrinsic cut-off frequencies (of about 2.23 GHz) to date for any graphene flexible nanoelectronic device,” says Akinwande. “What is more, the devices are liquid-resistant thanks to the fact that the surface of the graphene is passivated with silicon nitride and the plastic substrate is self-passivated. In short, we found that they could be accidentally dropped into everyday liquids, such as milk, tea or coffee, and can even survive being run over by a moving vehicle - all without suffering damage to their outstanding properties.”

“Globalmente, nuestros transistors logran un funcionamiento con un calidad o performance- récord, la más grande deformación y la más alta frecuencias de corte extrínseca (unos 2.23 GHz) hasta la fecha para cualquier dispositivos flexible nanoelectrónico de grafeno”, dice Akinwande. “Y lo que es más, los dispositivos son resistentes los líquidos gracias al hecho de que la superficie del grafeno se trata con nitruro de silicio y el sustrato plástico, al igual que la superficie de grafeno, funcionan como pasivos. En síntesis, encontramos que estos transistores podrían ser accidentalmente arrojados en cualquier líquido corriente, como leche, té o café, y ellos seguirían funcionando incluso si son atropellados por un vehículo, en todo caso sin sufrir daño o alterar sus propiedades excepcionales”.

Smart applications (Aplicaciones inteligentes)

The extremely flexible, high-performance devices could be ideal for smart, conformal, advanced electronics that could offer performance capabilities beyond today's silicon-based technology while also being cheaper, lighter, more environmentally friendly and with arbitrary form factors, claims Akiwande. "Potential applications include flexible smartphones, displays, fabric and even smart walls," he adds.

Los extremadamente flexible dispositivos de grafeno GFET son así dispositivos que muestran un enorme rendimiento de funcionamiento y podrían ser ideales para electrónica avanzada, inteligente y escalable, pudiendo ofrecer capacidades de funcionamiento más allá de la tecnología de silicio actual mientras que son más baratos, más ligeros, y más limpios medioambientalmente, así como poderse fabricar con casi cualquier forma, según nos comenta Akiwande. "Aplicaciones potenciales incluyen smartphones flexibles, displays flexibles, tejidos(telas) inteligentes o incluso muros inteligentes".

The team, which is presenting its work this week at the International Electron Devices Meeting in San Francisco, is now busy trying to make flexible wireless radios and mobile systems using the new GFETs at gigahertz frequencies. "From a basic research point of view, we are also looking into heat management in these devices on flexible plastic substrates, which is a major issue for transistors operating at high speeds and current densities," adds Akinwande.

El equipo, que presentará su trabajo esta semana en el Meeting Internacional de Dispositivos Electrónicos de San Francisco, está ahora ocupado intentando fabricar radios wireless flexibles y sistemas móviles usando los nuevos GFET a frecuencias de GHz (potencialmente podrían alcanzar hasta los THz). "Desde un punto de vista de investigación básico, estamos buscando la administración de calor en estos dispositivos en estos dispositivos sobre sustratos plásticos flexibles, que es un problema mayor para transistores operando a altas velocidades y densidades de corriente", añade Akinwande.

About the autor (Sobre el autor del artículo): Belle Dumé is a contributing editor to nanotechweb.org

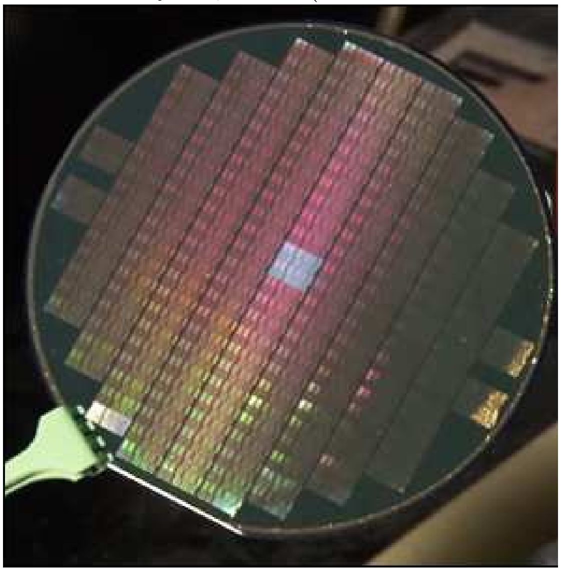
(Belle Dumé es un editor trabajando para nanotechweb.org)

3.2. Noticia 2: Grafeno (II)/Graphene (II)

Complex circuits made of carbon nanotubes demonstrated

(Demostración de circuitos complejos hechos de nanotubos de carbono)

February 27, 2013 (27 de Febrero de 2013)



Pic/Dibujo: This wafer is patterned with a complex carbon nanotube circuit that serves as a sensor interface (credit: Stanford University). Esta "oblea" está marcada con un circuito de nanotubo de carbon que sirve como sensor de en la intercara. Imagen: Universidad de Stanford.

A simple sensor circuit made of hard-to-handle but promising carbon nanotubes is a first step in making the materials practical for computing, MIT Technology Review reports.

Un simple sensor de circuito hecho de los "difícil de conseguir" pero prometedores nanotubos de carbonos es el primer paso para fabricar materiales "prácticos" para la computación, según cuenta la revista MIT Technology Review.

Transistors made from these nanomaterials are faster and more energy efficient than silicon ones, and computer models predict that carbon nanotube processors could be ten times less power-hungry. But it's proved difficult to turn individual transistors into complex working circuits.

Los transistores hechos de estos nanomateriales son más rápidos y más eficientes que los de silicio, y los modelos de computación predicen que los procesadores de nanotubos de carbonos podrían ser hasta 10 veces menos consumidores de “potencia”. Pero se ha probado difícil convertir transistores individuales en circuitos complejos “operativos”.

Now researchers at Stanford University have demonstrated a way that this gap can be bridged, by building one of the most complex carbon nanotube circuits yet.

Ahora, investigadores en la Universidad de Stanford han demostrado una forma de que este gap(problema) puede ser solventado, construyendo uno de los circuitos más complicados de nanotubos de carbono hasta la fecha.

The demonstration carbon nanotube circuit shows that nanotube transistors can be made at high yields, says Subhasish Mitra, an associate professor of electrical engineering and computer science, who led the work with Philip Wong, a professor of electrical engineering at Stanford.

El logro de este circuito de nanotubo de carbon muestra que los transistores de nanotubos pueden ser fabricados en grandes cantidades, de acuerdo a Subhasish Mitra, un professor asociado de ingeniería eléctrica y ciencia computacional, quien realizó este trabajo con Philip Wong, un profesor de ingeniería eléctrica en Stanford. -“This shows that carbon nanotube transistors can be integrated into logic circuits that perform at low voltage,” says Aaron Franklin, who is developing nanotube electronics at the IBM Watson Research Center.

“Esto muestra que los transistores de nanotubos de carbon pueden ser integrados en circuitos lógicos que funcionan a bajo voltaje”, dice Aaron Franklin, quien está desarrolando la electrónica de nanotubos en el Centro de Investigación IBM Watson (USA).

3.3. Noticia 3: Topological insulators(Aislantes topológicos)

Exotic conductors from lab and nature

Mineral proves to be remarkably clean topological insulator.

Zeeya Merali, 13 March 2013

They say that it's what's on the inside that counts. But that is not true for topological insulators - exotic materials that conduct electricity only along their surfaces. A team of physicists has now demonstrated this property in a naturally occurring mineral1, and another group has synthesized the first two-dimensional topological insulator that conducts at room temperature. Having a broader range of such materials could boost researchers' efforts to build spintronic devices - in which currents are driven by an intrinsic property of electrons called spin, rather than by voltages. The materials could also help the design of quantum computers that would use spin to encode information. Predicted to exist in 2005 (ref. 3), topological insulators that work at low temperatures were first synthesized from heavy elements in 2008 (ref. 4). Their odd conducting abilities arise because each electron's spin becomes coupled to its motion. This relationship compels each electron to circle around a specific spot, preventing them from moving through the bulk material, which means that they cannot conduct electricity. But at the material's edge, the electrons do not have enough space for this circling motion; instead, they are forced to hop along the surface in semicircular jumps, enabling conduction.

Like some advanced artificial materials, kawazulite conducts electricity at its surface but not in its bulk. Picture by the Am. Chem. Soc.

The thin conducting layer of a topological insulator makes it relatively easy for physicists to manipulate the spin current. "Topological insulators raise the possibility of building spintronic devices that use electron spin, rather than charge," says Pascal Gehring, a solid-state physicist at the Max Planck Institute for Solid State Research in Stuttgart, Germany, and a co-author of the mineral study. Spins can be rotated quickly without expending much energy, so spintronic devices should be more efficient than their electronic counterparts, in which energy is required to change charges, he adds.

Physicists attempting to construct quantum computers that would outperform the best current machines are also interested in encoding information in electron spins. In theory, it is difficult to corrupt spin values in a topological insulator. That is because, to flip the spin value accidentally, you would have to knock the system hard enough to cause the electron to make a complete U-turn. "It may turn out to be cheaper to use a natural supply."

In search of materials that display these properties, Gehring and his colleagues examined a natural sample of kawazulite, which contains bismuth, tellurium, selenium and sulphur, found at a former gold mine in the Czech Republic. Lab-made samples of kawazulite have already been shown to be topological insulators, but no one had checked for the property in natural samples. The team cleaved off single crystalline sheets 0.7 millimetres wide and applied the standard test for a topological insulator: photoelectron spectroscopy. This involves measuring the properties of electrons dislodged when ultraviolet light is fired at a material's surface. Their results confirm that the electrons' energy and momentum distribution matches predictions for a topological insulator.

Feng Liu, a materials scientist at the University of Utah in Salt Lake City, notes that the team's natural sample contains fewer structural defects than its lab-made counterparts, reducing unwanted conduction in the bulk. "It may turn out to be cheaper to use a natural supply of topological insulators," says Liu. Even in the lab, topological insulators require less exotic conditions than had been thought. Jeroen van den Brink, a physicist at the Leibniz Institute for Solid State and Materials Research in Dresden, Germany, and his colleagues stacked bismuth-containing sheets with a honeycomb structure like that of graphene. The result is a bulk material that acts as topological insulator at room temperature. The next step should be to find organic materials that act as topological insulators, says Liu. His team recently proposed a design for such a compound, and says that another group has synthesized a candidate structure. "Ultimately, these will be these cheapest and most versatile materials to work with."

Article in Nature 495, 153 (14 March 2013)

References

1. Gehring, P. et al. Nano Lett. http://dx.doi.org/10.1021/nl304583m (2013).

2. Rasche, B. et al. Nature Mater. http://dx.doi.org/10.1038/nmat3570 (2013).

3. Kane, C. L. & Mele, E. J. Phys. Rev. Lett. 95, 146802 (2005).

4. Hsieh, D. et al. Nature 452, 970–974 (2008).

5. Wang, Z. F., Liu, Z. & Liu, F. Nature Commun. http://dx.doi.org/10.1038/ncomms2451 (2013).

3.4. Noticia 4: Topological insulators (II)

Hopes surface for exotic insulator

Findings by three teams may solve a 40-year-old mystery. Aarticle by Eugenie Samuel Reich

11 December 2012

Remark: Despite being insulators inside, samarium hexaboride crystals can conduct electricity on their surface. Image by John Pierre Paglione

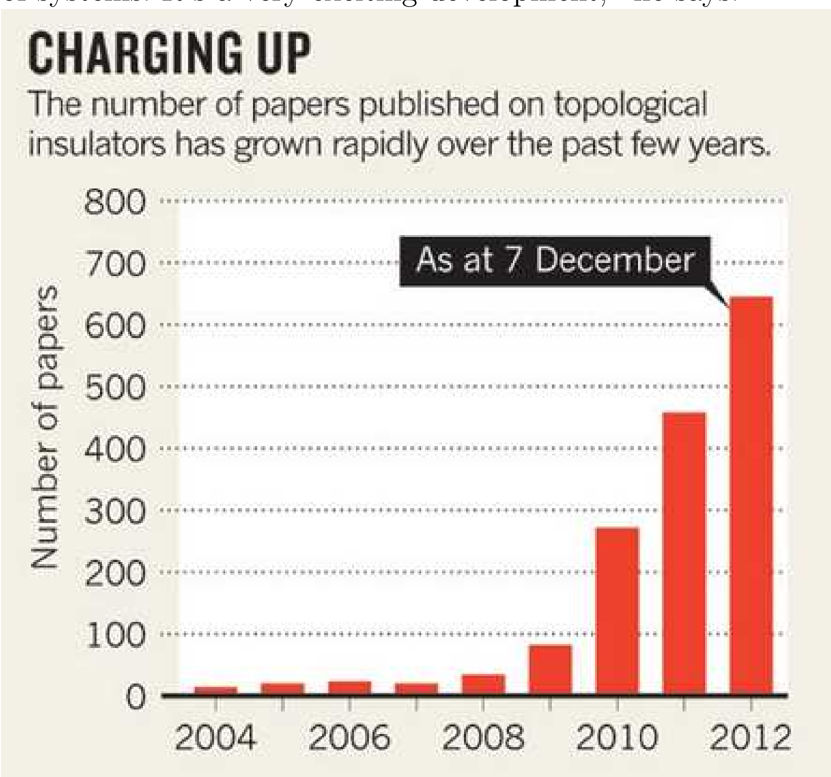
A compound whose odd electrical behaviour has puzzled physicists for decades could turn out to be a boon for quantum physics and electronic-device makers. When theorists proposed in 2005 that it should be possible to find materials that conduct electricity at the surface while the rest of the sample behaves as an insulator, physicists were intrigued. They wanted to study the quantum effects that should emerge in such materials, and to explore applications in low-power electronics and quantum computing. But topological insulators, as the materials were called, proved fiendishly difficult to make. Some researchers have slaved to produce thin films using complex techniques that are unlikely ever to scale up to the levels needed for industrial purposes. Others have contented themselves with compounds that approximate topological insulators but still have a degree of internal conductivity.

Now, three papers(ref.1-3) suggest that samarium hexaboride, a poorly understood compound that was first found to gain conducting properties at very low temperatures (ref.4)in 1969 by researchers at Bell Labs in New Jersey, may in fact be a topological insulator in its bulk form. In the most recent paper (ref.1) in the trend, posted online on 28 November, researchers at the University of California, Irvine, report seeing remarkably fast-moving electrons on the surface of SmB_6 crystals, which they take as a sign of a superb surface conductor. Five days earlier, researchers at the University of Maryland in College Park had reported measurements tracing the path of electrons injected into SmB6 samples as they were cooled. Those results suggest that the material is insulating in its interior at temperatures below around 30 kelvin. And, in a paper posted on 21 November, scientists from the University of Michigan in Ann Arbor and University of California, Irvine, describe their measurements of conductivity through the surface and bulk of the material, and find evidence that the surface conducting behaviour persists despite imperfections and impurities, as would be expected from a true topological insulator.

A spurt of interest in topological insulators over the past few years (see 'Charging up') led to a 2010 prediction that SmB_6 would be such a material-see ref.5. "I'd say we've been tentatively vindicated," says Piers Coleman of Rutgers University in Piscataway, New Jersey, one of the four theoretical physicists who made the prediction. "We're thrilled by these new results."

Cool characteristics

The prediction grew, in part, from studies of materials known as Kondo insulators, which, unlike ordinary insulators, retain some of the small amount of conductivity they do have when they are cooled to a few degrees above absolute zero. SmB6, which is often categorized as a Kondo insulator, fits this description. Coleman and other theorists realized that the material's behaviour would make sense if it were a topological insulator. That would mean that the quantum properties of the material would be such that electrons cannot flow through it freely, as they would in an ordinary conductor, except at the material's surface. If this proves correct, Coleman thinks that insights gleaned from SmB_6 and other Kondo insulators could carry over to all topological insulators. SmB_6 is an unusual topological insulator because the electrons in the outer shells of the samarium atoms interact with one another strongly, such that a coordinated motion emerges. This could make the material useful for creating some exotic quantum effects, including magnetic monopoles, or Majorana fermions - quasiparticles that might be useful for quantum computing, says Shoucheng Zhang, who has pioneered work on topological insulators at Stanford University in California. Zhang adds that the rush of interest in SmB_6 is part of a trend to study materials with electrons that interact strongly with each other. "Now we're looking at a number of systems. It's a very exciting development," he says.



Peter Armitage, who has been working on topological insulating behaviour in bismuth-based compounds at Johns Hopkins University in Baltimore, Maryland, says that in the field of condensed-matter physics, experiment usually leads theory, but this is a remarkable example of the opposite. He is now hoping to start experiments on SmB_6 in the next week or two to confirm and study the surface states. “These are beautiful effects that were hiding under our noses,” he says. “This is a very big advance.”

Article in Nature 492, 165 (13 December 2012)

References

1. Botimer, J. et al. Preprint at http://arxiv.org/abs/1211.6769 (2012).

2. Zhang, X. et al. Preprint at http://arxiv.org/abs/1211.5532 (2012).

3. Wolgast, S. 5 al. Preprint at http://arxiv.org/abs/1211.5104 (2012).

4. Menth, A., Buehler, E. & Geballe, T. H. Phys. Rev. Lett. 22, 295–297 (1969).

5. Dzero, M., Sun, K., Galitski, V. & Coleman, P. Phys. Rev. Lett. 104, 106408 (2010).

3.5. Noticia 5: Topological insulators(III)

Topological insulators: Star material.

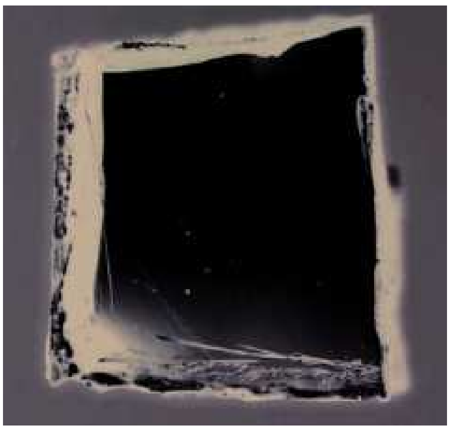
Article by Geoff Brumfiel.

For a brief time in Portland, Oregon, this past spring, thousands of physicists moved from session to session at the annual March meeting of the American Physical Society (APS) on the lookout for the next big thing.

It was a talent search not unlike the one that unfolds every night in the bars and converted dance halls of Portland’s famous music scene, where locals listen for the next big sound. The physicists’ quest is a lot harder, though. Trends in music come and go, but the disciplines that dominate the APS March meeting — such as optics, electronics and condensed-matter physics — are rooted in the original theories of quantum mechanics, which were more-or-less completed in the 1930s. When it comes to describing how light and matter behave, only a few phenomena have emerged since then to become the physics equivalent of superstars. At this year's APS meeting, however, the hallways were filled with talk of a promising newcomer — an eccentric class of materials known as topological insulators. The most striking characteristic of these insulators is that they conduct electricity only on their surfaces. The reasons are mathematically subtle — so much so that one physicist, Zahid Hasan of Princeton University in New Jersey, tried to explain the behaviour using 'simpler' concepts such as superstring theory. ("It's awfully beautiful stuff," he said reassuringly.) Yet the implications are rich, ranging from practical technology for quantum computing to laboratory tests of advanced particle physics.

Hence the excitement. It is still too early to say whether topological insulators are the next big thing. But physicists are auditioning various formulations of the insulators in their labs, eager to determine whether the material can live up to its many promises.

A topological insulator sounds simple enough — a block of material that lets electrons move along its surface, but not through its inside. In fact, it is far from straightforward. Ordinary metals conduct electrons all the way through, whereas ordinary insulators don't conduct electrons at all. A copper-plated block of wood conducts only on the surface, but that is two materials, not one. The idea of a topological insulator is so strange that for a long time, physicists had no reason to believe that such a material would exist.


Electrons move along the surface of, but not through, topological insulators such as bismuth selenide. J. SEO/P. ROUSHAN/A. YAZDANI

Quantum dance

Things changed in 2004, when Charles Kane, a theoretical physicist at the University of Pennsylvania in Philadelphia, was studying sheets of carbon called graphene. Kane's calculations suggested that electrons would move through this one-atom-thick material in a way that reminded him of the quantum Hall effect: a phenomenon first observed in 1980. This effect occurs when electrons are confined to thin films of certain materials, subjected to large electric and magnetic fields, and cooled to within just a fraction of a degree above absolute zero. At that point, the ordinarily chaotic motion of the electrons gives way to a more orderly collective behaviour governed by quantum mechanics. The transition shows up in the laboratory as a series of discrete quantum steps in the capacity of the material to conduct electricity.

What Kane and his group saw in their graphene calculations wasn't exactly the same as the quantum Hall effect. Even so, further analyses showed that there might be other thin-film materials with similar behaviour. This time there would be no need for huge external magnetic fields or ultra-low temperatures to get the electrons moving in unison. Such a material would produce the magnetic field from the nuclei of its own atoms — possibly even at room temperature.

These coordinated electrons would mostly end up just spinning in place. Intriguingly, however, those at the edge of the thin film would be forced to skip along the boundary. The net result would be that thin samples would conduct electricity along the edge — and only along the edge — but in separate quantum steps, similar to those seen in the quantum Hall effect.

The work of Kane and his colleagues got noticed almost immediately. Joel Moore, a theorist at the University of California, Berkeley, and his coworkers built on Kane's calculations to show that three-dimensional blocks of material would also display quantum effects, although the way electrons moved along the surface would be more complex than in the flat sheet used by Kane. Moore also gave the materials a new name. They were originally termed "novel Z_2 topological invariants" by Kane, in reference to the quantum-mechanical properties that cause the electrons to skip along the edge. "We got tired of typing that out, so we called it a 'topological insulator'," says Moore. "I don't know if that term is particularly explanatory, but at least it's short."

Meanwhile, Shoucheng Zhang at Stanford University in Palo Alto, California, and his team were researching what types of real material could be topological insulators. In most materials, Zhang realized, the link between electrons and nuclei is too weak to create a topological-insulating behaviour. But the link gets stronger as the nuclei get heavier. In 2006, Zhang predicted that one material in particular, a crystal made of the heavy elements mercury and tellurium, would be able to do the trick. And within a year, Laurens Molenkamp, a physicist at the University of Würzburg in Germany, and his group had grown a thin layer of mercury telluride crystal and showed that its conductance hopped from one quantum value to the next along the edge of the sample. The experiment by Molenkamp proved that the theorists were onto something, but by itself it didn't cause much excitement. Mercury telluride crystals are difficult to obtain — they have to be grown one layer at a time using a laborious process known as molecular beam epitaxy — and they are not pure topological insulators because they conduct some electricity on their inside. New compounds based around bismuth, which are simple to make and cheap to work with, have caused the field to take off. "What got so many talks at the March meeting was the bismuth-based compounds," says Hasan. "Anybody can grow them, you can buy them off the shelf, and you don't need a high-purity crystal to see the topological effects."

Those effects go beyond the way electrons move on the surface. For example, all electrons are spinning in a quantum mechanical way. Usually, the spins are constantly knocked about by random collisions and stray magnetic fields. But spinning electrons on the surface of a topological insulator are protected from disruption by quantum effects. This could make the materials beneficial for spin-related electronics, which would use the orientation of the electron spin to encode information, thereby opening up a whole new realm of computer technology.

Mathematical mimicry

Researchers also believe that the collective motions of electrons inside topological insulators will mimic several of the never-before-seen particles predicted by high-energy physicists. Among them are axions, hypothetical particles predicted in the 1970s; magnetic monopoles, single points of north and south magnetism; and Majorana particles — massless, chargeless entities that can serve as their own antiparticles.

This mimicry is not entirely surprising. Almost by definition, collective electron motions can be described by just a handful of variables obeying simple equations, says Frank Wilczek, a Nobel-prizewinning particle physicist at the Massachusetts Institute of Technology in Cambridge. "There are only a few kinds of equations that you can write down that are really simple," he says. So topological-insulator theorists and particle physicists have almost inevitably ended up in the same place. Majorana particles could prove particularly useful for practical quantum computing. The idea is to perform calculations using the laws of quantum mechanics, which could make computers much faster than the normal variety at certain tasks such as code-breaking. But the fragile quantum states essential to their operation are easily destroyed by jolts from the outside environment. Majorana particles would spread quantum information across particles, making them far more resistant to interference, says Kane. If Majorana particles could be harnessed on the surface of a topological insulator, "this would be big", he says.

The wealth of calculations, experiments and applications offered by topological insulators, together with their availability, have given the field a white-hot status at the moment — as has a certain thirst for glory. Two variations of the quantum Hall effect have won their discoverers Nobel prizes, and some researchers think that a Nobel awaits whoever can contribute the most to the growing field. "I'm not thinking about that at this point," says Kane, but the competitiveness has forced him to ensure that others are aware of his work. "I sort of feel like if I don't assert myself, then I'm going to get buried," he says. Yet trips to Stockholm are some way off. Although samples of topological insulators are now easy to get hold of, most still contain impurities that cause them to conduct electricity on the inside, disrupting the states on the surface. Getting things perfect remains more of an art than a science. Furthermore, some of the sought-after effects will require topological insulators to be combined with more common materials. To create Majorana particles, for example, topological insulators will have to merge with superconductors. Many experiments on how best to do that are under way.

The results of these studies will determine whether topological insulators are more than a one-hit wonder. Regardless, says Moore, there is an undeniable appeal in how the collective behaviour of electrons can lead to so many wonderful things. "There's something about many-particle quantum mechanics that causes perfection to emerge out of imperfection," he says.

"That's somewhat cheering as far as our everyday lives are concerned."

References
1. Kane, C. L. & Mele, E. J. Phys. Rev. Lett. 95, 146802 (2005).
2. Moore, J. E. & Balents, L. Phys. Rev. B 75, 121306 (2007).
3. Bernevig, B. A., Hughes, T. L., Zhang, S.-C. Science 314, 1757-1761 (2006).
4. König, M. et al. Science 318, 766-770 (2007).

3.6. Noticia 6: Topological insulators(IV)

Are the Universe's secrets hiding on a chip?

Topological insulator could help to test quantum field theory. An article by Geoff Brumfiel.

An obscure class of materials could be used to simulate a slew of exotic particles predicted by physicists but never seen.

Preliminary results presented on 14 March on the eve of the American Physical Society's meeting in Portland, Oregon, suggest that a large enough chunk of a 'topological insulator' has been made to test some of the odd predictions of quantum field theory — a version of quantum mechanics that is commonly used in particle physics. The theory predicts the existence of a number of unusual particles, which if reproduced in the material could prove useful for future applications such as code-cracking quantum computers, or in spintronics — electronics that relies on particles' spin as well as their charge.

Now Laurens Molenkamp, a physicist at the University of Würzburg in Germany, believes that he has created a mercury telluride (HgTe) topological insulator thick enough to put the theory through its paces. Topological insulators are materials that conduct electrons on the outside but act as insulators on the inside. The origin of that seemingly mundane property lies in the way that electrons move through the material. Electrons carry a quantum mechanical 'spin' that points either 'up' or 'down'. Spin is normally independent of an electron's motion, but inside topological insulators, electrons' spins are strongly related to how they move.

A 'Multiverse' on a chip

That relationship between spin and motion makes the insulators a good medium in which to model some formulations of quantum field theory, says Shoucheng Zhang, a theoretical physicist at Stanford University in California.

Quantum field theory has been extraordinarily successful in describing the Universe, but some of its predictions have proved difficult to verify. Some formulations suggest the existence of axions — weakly interacting particles proposed to account for unseen 'dark matter', which could make up almost a quarter of the Universe's mass. The theory also allows for the existence of magnetic monopoles, points of individual north and south that have never been seen in nature.

"We live in one kind of universe, but inside these solids you can create these unusual universes," says Ali Yazdani, a physicist at Princeton University in New Jersey. "That's cool."

“We live in one kind of universe, but inside these solids you can create these unusual universes.”

The particles wouldn’t be the same as those predicted by quantum field theory — for instance, a study by Zhang and his colleagues shows that axions could be simulated as magnetic fluctuations inside a topological insulator1. But the analogy could guide scientists on where to look for the particle’s real equivalents in the Universe. Shining polarized light through the insulator could reveal telltale signs of axions. If axions really do exist, then the same signature might also appear in the cosmic microwave background radiation, the primordial radiation left over from the Big Bang.

Some of the proposed exotic particles could also have practical uses. One class, known as Majorana fermions, predicted to be very stable, could be used in quantum computers to store data.

Funky things

The HgTe used by Molenkamp is a well known topological insulator, but so far the topological insulating behaviour has been seen only along the edges of razor thin slivers of the material. In preliminary results presented at a tutorial ahead of the meeting, Molenkamp revealed evidence that electrons on the surface of his three-dimensional sample were behaving as though they were in a topological insulator. “If this is all working, we can experimentally check quantum field theory,” he says. If HgTe lives up to his expectations, Molenkamp says he may soon begin the search for the “funky things” predicted to reside inside it. Yazdani, who works with an alternative class of materials based on bismuth, says that if Molenkamp has achieved the results he describes, this would be a significant step forwards for the field. But, he adds, Ï haven’t seen his data so I can’t say how convincing it is.”Zhang says that the results are exciting. However, he acknowledges that although axions and monopoles might live in a topological insulator, that doesn’t mean they’ll exist in the real world. “It doesn’t mean that we will see it in the Universe,” he says. “But at least it tells us these equations are not crazy.”

References

Li, R., Wang, J., Qi, X.-L. & Zhang, S.-C. Nature Phys. doi:10.1038/nphys1534 (2010).

Nota final: Documento dedicado a mis alumnos del IES Senda Galiana y su profesor Nicolás Romo. Con mis mejores deseos, para que les sea útil en el futuro y/o recuerden a este profesor algo chalado que les estuvo dando clases (I wish!).