

# Dispositivos electrónicos

**LEOPOLDO PARRA REYNADA**

**Red Tercer Milenio**

# DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

# DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

LEOPOLDO PARRA REYNADA

RED TERCER MILENIO



## AVISO LEGAL

---

**Derechos Reservados © 2012, por RED TERCER MILENIO S.C.**

Viveros de Asís 96, Col. Viveros de la Loma, Tlalnepantla, C.P. 54080, Estado de México.

Prohibida la reproducción parcial o total por cualquier medio, sin la autorización por escrito del titular de los derechos.

Datos para catalogación bibliográfica

Leopoldo Parra Reynada

*Dispositivos electrónicos*

ISBN 978-607-733-186-5

**Primera edición: 2013**

Revisión pedagógica: Germán Adolfo Seelbach González

Revisión editorial: Ma. Eugenia Buendía López

## DIRECTORIO

---

**Bárbara Jean Mair Rowberry**  
*Directora General*

**Jesús Andrés Carranza Castellanos**  
*Director Corporativo de Administración*

**Rafael Campos Hernández**  
*Director Académico Corporativo*

**Héctor Raúl Gutiérrez Zamora Ferreira**  
*Director Corporativo de Finanzas*

**Luis Carlos Rangel Galván**  
*Director Corporativo de Mercadotecnia*

**Ximena Montes Edgar**  
*Directora Corporativo de Expansión y Proyectos*

## ÍNDICE

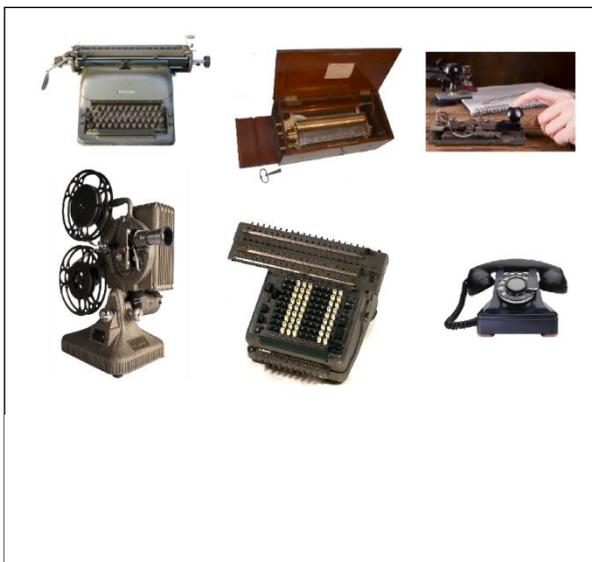
Introducción	4
Objetivo general de aprendizaje	6
Mapa conceptual general	7
Unidad 1. Introducción	8
Mapa conceptual	9
Introducción	10
1.1 Antecedentes históricos	11
1.2 Aplicaciones	15
1.3 Conceptos básicos	17
1.3.1 Señal eléctrica	17
1.3.2 Transductor	18
1.3.3 Señal analógica	18
1.3.4 Señal digital	19
1.3.5 Acoplamiento	20
1.3.6 Amplificación	21
1.3.7 Proceso de señal	21
Autoevaluación	23
Unidad 2. Concepto de física de semiconductores	26
Mapa conceptual	27
Introducción	28
2.1 Modelos de bandas	30
2.2 Semiconductores intrínsecos y extrínsecos	34
2.3 Conducción eléctrica en semiconductores	38
2.4 Unión P-N y características asociadas: densidad de carga, campo eléctrico, potencial electroestático, capacitancia y relación I-V	40
2.5 Unión PIN	46
Autoevaluación	48
Unidad 3. El diodo semiconductor y modelos	53
Mapa conceptual	54

Introducción	55
3.1 Diodo semiconductor	56
3.2 Modelos: ideal, exponencial, de señal grande y de señal pequeña	63
Autoevaluación	70
Unidad 4. El transistor de efecto de campo (FET)	73
Mapa conceptual	74
Introducción	75
4.1 Estructura, funcionamiento y curvas características de un FET	78
4.2 Modelos y polarización	82
4.3 El MOSFET como elemento de conmutación	86
4.4 El amplificador básico	90
4.5 Especificaciones de fabricante	92
Autoevaluación	97
Unidad 5. El transistor bipolar de juntura (TBJ)	101
Mapa conceptual	102
Introducción	103
5.1 Estructura, funcionamiento y curvas características	105
5.2 Modelos y polarización	109
5.3 El TBJ como inversor y compuertas lógicas	114
5.4 El amplificador básico	117
5.5 Especificaciones del fabricante	120
Autoevaluación	126
Unidad 6. El amplificador operacional	130
Mapa conceptual	131
Introducción	134
6.1 Modelo ideal	134
6.2 Análisis de circuitos lineales: inversor, no inversor, sumador, diferencial, integrador, derivador, convertidores de voltaje a corriente y corriente a voltaje	136
6.3 Análisis de circuitos no lineales: el rectificador de precisión, comparadores y amplificadores logarítmicos	148

Autoevaluación	145
Unidad 7: Reguladores de voltaje	160
Mapa conceptual	161
Introducción	162
7.1 El regulador de aire	164
7.2 Reguladores integrados y especificaciones del fabricante	166
7.3 Fuente de poder	176
7.3.1 Fuente regulada simple positiva	180
7.3.2 Fuente regulada simple negativa	181
7.3.3 Fuente múltiple	181
7.3.4 Fuente regulada variable	182
7.3.5 Fuente simétrica	183
Autoevaluación	186
Unidad 8: Otros dispositivos electrónicos	190
Mapa conceptual	191
Introducción	192
8.1 Tubos al vacío	193
8.2 SCR, triac y diac	197
8.3 Dispositivos optoelectrónicos	205
8.3.1 Diodos emisores de luz o LED	205
8.3.2 Diodo láser	208
8.3.3 Fotodetectores	208
8.3.4 Optoacopladores	211
Autoevaluación	217
<i>Glosario</i>	221
<i>Bibliografía</i>	225

## INTRODUCCIÓN

Sería muy difícil imaginar qué sería del mundo actual si no existiera la tecnología electrónica. No habría televisores para disfrutar de programas internacionales, ni radio para escuchar las noticias; para lograr la

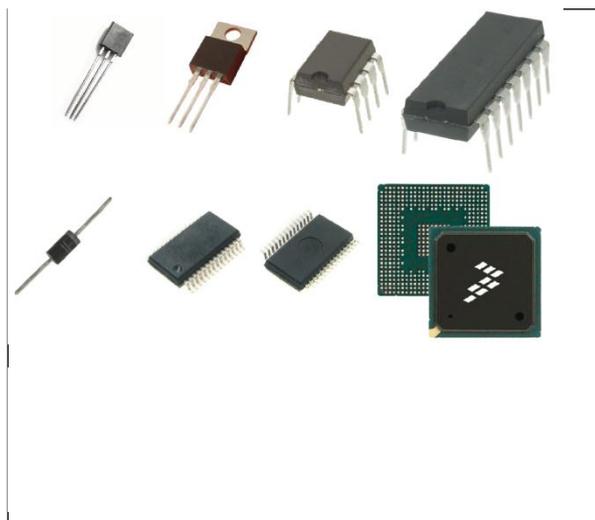


comunicación con familiares o amigos, se usaría un teléfono convencional, el telégrafo o el correo normal; no habría reproductores MP3 para escuchar música; en fin, una gran parte del trabajo, del entretenimiento, de los medios de comunicación, etcétera, simplemente no existirían o serían remplazados por alternativas incómodas y poco

accesibles.

Resulta evidente entonces que la electrónica ha revolucionado al mundo, permitiendo la masificación del entretenimiento, de la información, de las comunicaciones, etcétera, incluso está invadiendo campos en los que hasta hace poco no se empleaban dispositivos electrónicos, como la iluminación, el control de aparatos electrodomésticos, el manejo de grandes cantidades de voltaje y corriente, etcétera.

Pero todo esto tuvo un inicio, y el edificio de la electrónica en general descansa sobre los cimientos de gran cantidad de años de investigación y desarrollo, que permitieron la elaboración de diversos componentes y dispositivos básicos, que constituyen los “ladrillos



funcionales” con los que está construido desde un reloj de cuarzo hasta la computadora más avanzada.

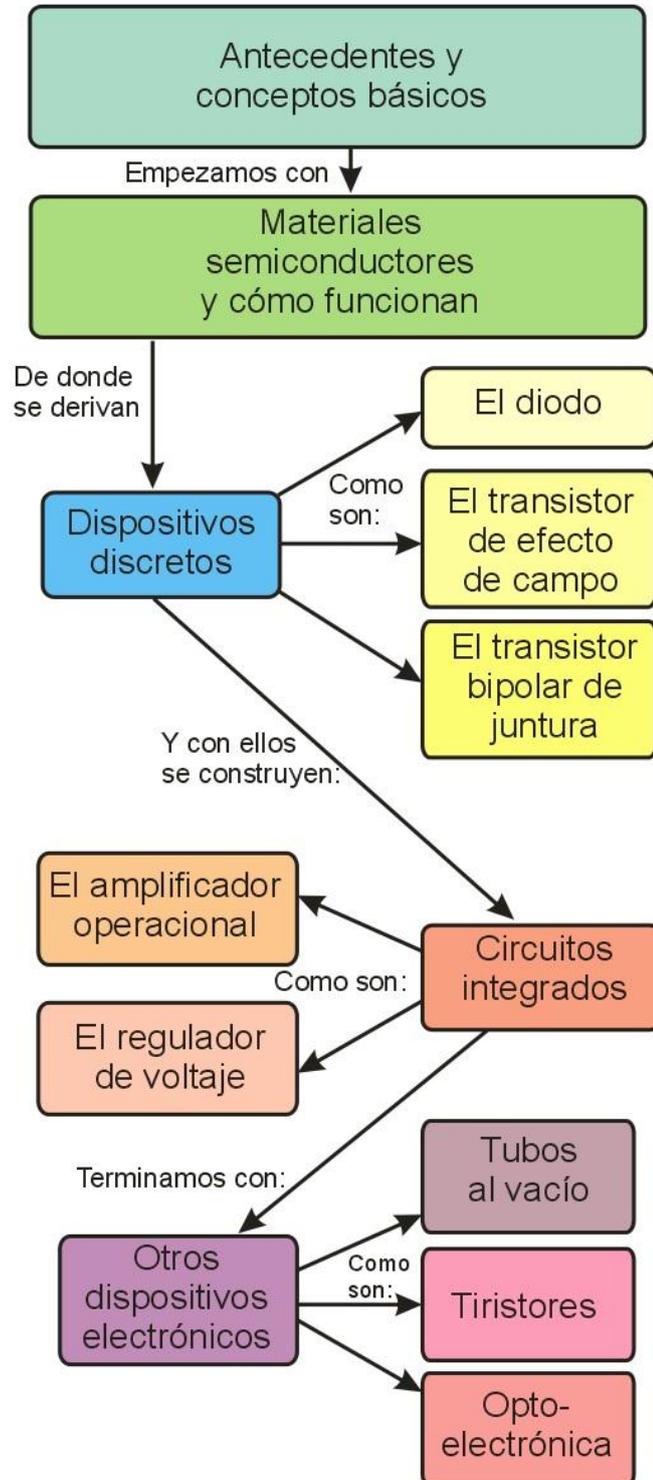
A lo largo de este libro se distinguirá que, en realidad, estos dispositivos son fáciles de entender y de aplicar, y al concluir su lectura, se tendrán las bases para enfrentar el diseño y construcción de circuitos más complejos y especializados.

## OBJETIVO DE APRENDIZAJE GENERAL

Ofrecer una introducción a los principios de la electrónica, a sus fundamentos más importantes, a los dispositivos básicos, a sus aplicaciones y a la manera de combinarlos para obtener el resultado esperado.

# MAPA CONCEPTUAL

## DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS



# UNIDAD 1

## INTRODUCCIÓN

### OBJETIVO

El estudiante conocerá los fundamentos básicos de la tecnología electrónica, así como sus orígenes y principales ramas de aplicación en la actualidad, además de los diferentes conceptos principales de la técnica, como una señal eléctrica, un transductor, las diferencias entre señal analógica y digital, etcétera.

### TEMARIO

#### 1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

#### 1.2 APLICACIONES

#### 1.3 CONCEPTOS BÁSICOS

##### *1.3.1 Señal eléctrica*

##### *1.3.2 Transductor*

##### *1.3.3 Señal analógica*

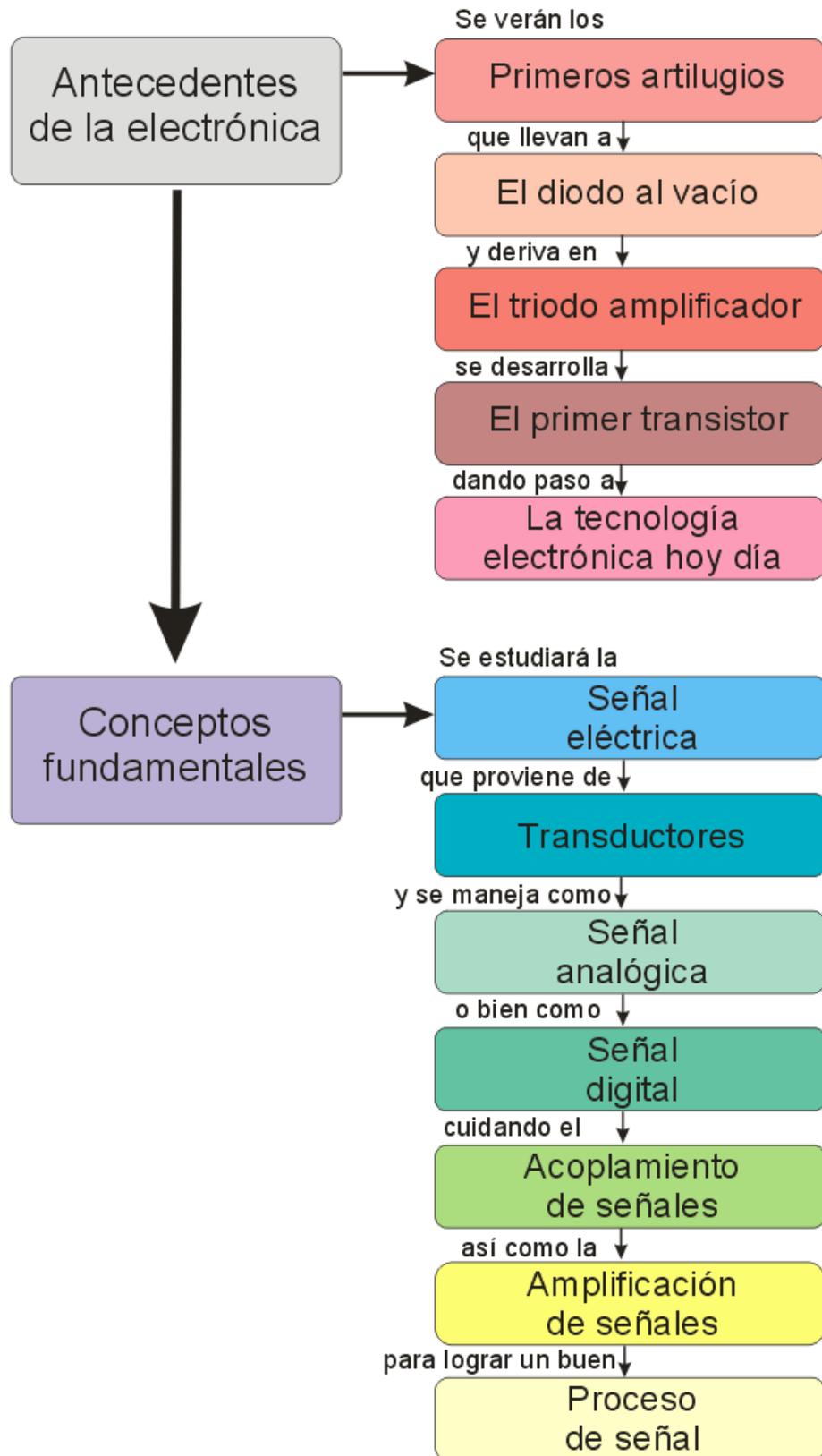
##### *1.3.4 Señal digital*

##### *1.3.5 Acoplamiento*

##### *1.3.6 Amplificación*

##### *1.3.7 Proceso de señal*

# MAPA CONCEPTUAL



## INTRODUCCIÓN

Dice la sabiduría popular: “el viaje más largo comienza por un primer paso”; y este refrán puede aplicarse perfectamente al desarrollo de la tecnología electrónica, que descansa sobre el trabajo de gran cantidad de investigadores que, cada uno por su lado, contribuyó con su “grano de arena” para la edificación de una tecnología que ha revolucionado por completo la forma de trabajar, de descansar, así como de comunicación, de diversión, etcétera, de la mayoría de las personas.

Los inicios de la electrónica fueron muy modestos, y seguramente nadie imaginó que se convertiría en la industria multimillonaria que es actualmente. Precisamente en esta primera unidad, se tratarán los primeros pasos en el desarrollo de la tecnología electrónica, y cómo fue evolucionando hasta llegar a lo que se tiene en la actualidad. Además, se tratarán algunos conceptos básicos fundamentales para la correcta comprensión de los temas tratados en unidades posteriores, por lo que una lectura cuidadosa es importante para entender adecuadamente los conceptos que se describirán a lo largo del presente libro.

## 1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

De manera estricta, y considerando el sentido amplio del término “electrónica” como “la ciencia de la manipulación de señales eléctricas”, se tiene que esta tecnología es muy antigua. Se remonta a finales del siglo XIX, cuando apenas se encontró que el átomo no era tan indivisible como se había pensado originalmente, y se fueron descubriendo sus tres partículas más importantes; a saber, protones, neutrones y electrones. Estos últimos



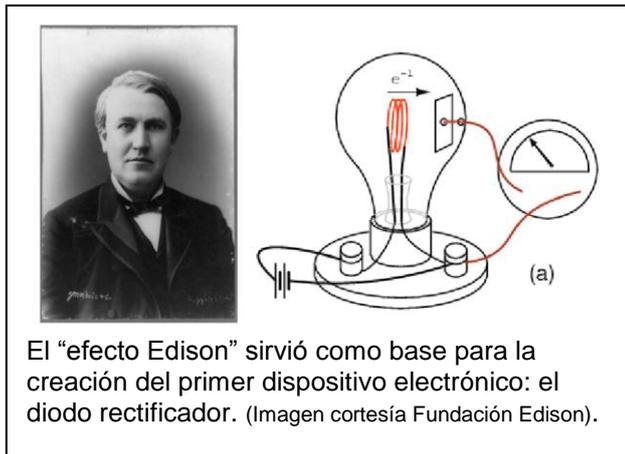
llamaron la atención de muchos investigadores, quienes intentaron aprovecharlos para diversas aplicaciones, pero el que se considera el primer artilugio electrónico de la historia, es el tubo de Crookes, desarrollado en 1895 por el científico inglés William Crookes. Este tubo es una especie muy primitiva de

cinescopio, y precisamente aprovecha los electrones para crear una imagen burda sobre una superficie recubierta de fósforo.

Dos años después, el científico alemán Karl F. Braun desarrolló el primer osciloscopio, adaptando un tubo de Crookes de modo que produjera un haz delgado de electrones, y colocando placas de deflexión horizontal y vertical, con lo que en la pantalla del tubo aparecía un trazo equivalente a la señal eléctrica que se estuviera estudiando. La aparición de este aparato fue pieza clave para acelerar el desarrollo de la tecnología electrónica, ya que por primera vez se tenía una forma confiable de observar el comportamiento de ciertos fenómenos, a pesar de que ocurrieran a muy altas frecuencias.

Sin embargo, tanto el tubo de Crookes como el osciloscopio aprovechan los electrones producidos por un electrodo, pero no los manipulan en sentido estricto. El primer dispositivo electrónico que sí modifica el comportamiento de una señal eléctrica aplicada, se produjo a raíz de una investigación completamente distinta, y en un principio, ni siquiera se apreció el potencial que tenía.

En 1873, el investigador inglés Frederick Guthrie descubrió que un electrodo caliente cargado positivamente, podía descargarse si se le acercaba una laminilla con polaridad negativa, pero no sucedía lo mismo si la laminilla tenía polaridad positiva. Esto demostró que la corriente sólo fluye en una dirección; pero en ese momento no se encontró ninguna aplicación práctica para el fenómeno.



De forma independiente, en la década de 1880, cuando Tomás Alva Edison estaba haciendo investigaciones para mejorar su bombilla, en uno de sus experimentos colocó una laminilla metálica en la proximidad del filamento

incandescente, y encontró que cuando se aplicaba un voltaje positivo al filamento y uno negativo a la laminilla, se establecía un flujo de corriente entre ambos elementos, pero si el voltaje se invertía no pasaba nada. Edison tampoco encontró aplicación a este fenómeno, pero como buen comerciante que era, lo patentó y se olvidó de él. Años más tarde, en 1904, un grupo de investigadores de la compañía Marconi, comandado por John A. Fleming, rescató este principio para la elaboración del que se considera el primer dispositivo electrónico de la historia: el diodo rectificador.

Este dispositivo se creó con el objetivo de servir como pieza fundamental en la recepción y recuperación de señales de radio en amplitud modulada, ya que su característica de sólo conducir en una dirección y no en la opuesta, lo hacía ideal para recortar la señal de AM recibida, por lo que bastaba colocar un filtro a su salida, para recuperar la señal de audio transmitida.



Esto permitió la fabricación de receptores de radio más precisos, lo que le dio un impulso muy importante a esta industria.



Radio de galena, muy popular durante el primer cuarto del siglo XX. (Foto: Museo de la radio).

También, a principios de siglo, apareció el primer dispositivo electrónico de estado sólido: el diodo de cristal, desarrollado alrededor de 1906 con base en las investigaciones hechas por Karl F. Braun con cristales de un material denominado galena. Las radios de galena fueron muy populares en el primer cuarto del siglo XX, ya que no necesitaban fuente de

energía adicional para funcionar, recuperando la señal que llegaba a través de las ondas de radio, y con su misma energía alimentaban un altavoz pequeño, normalmente en un audífono.

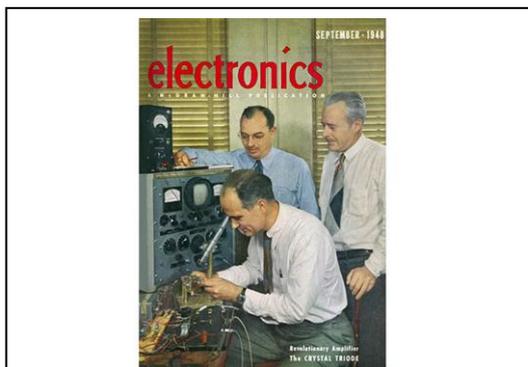
Sin embargo, un problema al que se enfrentaban los productores de radio es que la señal que se recibía en las antenas era de muy baja intensidad, por lo que se requería con urgencia, alguna forma de aumentar su potencia. Los experimentos realizados con los diodos de vacío demostraron que, si se coloca una rejilla entre los electrodos del mismo, y en esta rejilla se aplica una señal



Durante bastante tiempo, los triodos fueron los amplificadores de señal por excelencia. (Foto: Museo del tubo).

de

bajo nivel, a través de los electrodos principales de este dispositivo aparece la misma señal, pero amplificada. Así surgió el triodo, inventado por Lee DeForest en 1907, considerado el primer amplificador electrónico y que es la base para una enorme cantidad de circuitos, que incluso en la actualidad se siguen utilizando.



Portada de la revista "Electronics", donde se anuncia oficialmente el desarrollo del transistor. (Foto: revista "Electronics").

Durante la primera mitad del siglo XX, los tubos de vacío (diodo, triodo y demás variantes) dominaron la tecnología electrónica, al grado que las primeras computadoras estaban formadas por cientos o miles de estos dispositivos; sin embargo, esto cambió radicalmente a partir de 1947, cuando tres científicos que trabajaban en los laboratorios Bell, Bardeen, Shockley y Brattain, descubrieron el primer “triodo de cristal”, que después recibiría el nombre de “transistor”. A partir de ese momento, la tecnología electrónica ha evolucionado a pasos agigantados, pasando de grandes y estorbosos tubos de vacío, a componentes semiconductores discretos, luego a los circuitos integrados, y finalmente a la situación actual, donde existen chips que incluyen en su interior cientos de millones de transistores individuales, trabajando en conjunto para hacer más cómoda la vida diaria, tanto en el trabajo como en el entretenimiento.

En la actualidad, es difícil encontrar algún aparato o mecanismo que no utilice algún tipo de dispositivo electrónico; ya sea en labores de control, de rectificación, en el encendido o apagado de señales, en el proceso de las mismas, etc., la electrónica está invadiendo todas las ramas de la tecnología, como se describirá a continuación.

## ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 1A

Responde las siguientes preguntas:

- a) ¿Quién inventó el que se considera el primer artilugio electrónico de la historia?
- b) ¿En qué consiste el “efecto Edison”?
- c) ¿Qué personaje inventó el primer diodo rectificador?
- d) ¿De qué material se hacían los primeros diodos de cristal para los receptores de radio?
- e) ¿Quién inventó el triodo?
- f) ¿Cuál fue la principal aplicación de los triodos?
- g) ¿Cuáles científicos desarrollaron el primer transistor?

## 1.2 APLICACIONES

En la actualidad, la tecnología electrónica es tan popular, que es difícil llegar a algún sitio en donde no se encuentren varios aparatos que la aprovechan ampliamente para su funcionamiento. A continuación se muestran algunos ejemplos:



En el hogar, la electrónica está detrás de dispositivos tan simples como el reloj despertador, en una calculadora electrónica, en un receptor de radio, en el reproductor de discos compactos, en el equipo de sonido, en el televisor, en la computadora, en el teléfono (ya sea fijo o móvil), incluso ya invadió aplicaciones que tradicionalmente se controlaban con elementos electromecánicos, como la lavadora de ropa, el refrigerador, la cafetera, los ventiladores y el aire acondicionado, etc. En realidad, resulta difícil encontrar algún sitio en el hogar donde no se apliquen circuitos electrónicos.

En la oficina, las tradicionales máquinas de escribir han sido reemplazadas por computadoras e impresoras, las cuales también sirven para llevar la contabilidad, mantener comunicación con los amigos a través de correo electrónico o mensajería instantánea, compartir fotos y una amplia variedad de usos. También se puede encontrar electrónica en el reloj

checador de la entrada hasta en las lámparas fluorescentes que iluminan el área de trabajo. La calculadora, el interfono, el teléfono sobre el escritorio, el horno de microondas, la copiadora, en fin, prácticamente todos los aparatos que se encuentran en una oficina moderna están impulsados por circuitos electrónicos.



Incluso al caminar por la calle, difícilmente se puede estar ajeno a la electrónica que nos rodea. Los semáforos, los anuncios luminosos de las tiendas, las lámparas de iluminación urbana

que se encienden automáticamente al atardecer y se apagan cuando amanece, los múltiples circuitos electrónicos que invaden los automóviles modernos, los sistemas de control del transporte público, los cajeros de los bancos, las cajas registradoras de los comercios, las cámaras de seguridad, el reloj de la esquina, todo eso está controlado por circuitos electrónicos. Incluso, los aviones y aeronaves se controlan mediante circuitos electrónicos; y los satélites artificiales, de los cuales dependen en gran parte las comodidades que tenemos, tampoco podrían existir si no existiera esta tecnología.

Entonces, resulta obvio que la electrónica está por todos lados, interactuando de forma sutil o directa con las personas, y permitiéndoles realizar actividades que, de otra forma, serían mucho más complejas, tardadas o costosas.

## ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE 1B

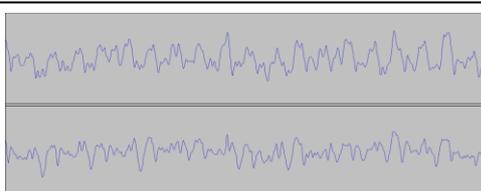
- a) Realiza un inventario rápido de todos los artículos que utilicen circuitos electrónicos que tengas a tu alcance en este momento. No olvides incluir el teléfono celular, el reloj de cuarzo, el reproductor MP3 y en general, cualquier objeto que use componentes electrónicos para funcionar. Te sorprenderá la cantidad de electrónica que tienes disponible cotidianamente sin darle mayor importancia.
- b) Repite lo anterior en la sala de tu casa, y trata de imaginar qué pasaría si no contaras con todos esos aparatos electrónicos.
- c) Ahora imagina cómo sería el trabajo en una oficina sin equipo electrónico. El objetivo es que consideres la importancia que tiene

### 1.3 CONCEPTOS BÁSICOS

Antes de comenzar con el estudio de los dispositivos electrónicos propiamente, es conveniente establecer ciertos conceptos básicos, que se utilizarán desde este momento para explicar el comportamiento de estos elementos. Estos conceptos básicos son de aplicación general en el área de la electrónica, así que es muy importante comprenderlos perfectamente, para que a su vez los conceptos derivados de ellos también queden lo más definidos posible.

#### 1.3.1 Señal eléctrica

Así se denomina a un flujo de corriente eléctrica o a la variación de un voltaje, a través del cual se está transmitiendo algún tipo de información o parámetro. Esto significa que, por ejemplo, en una línea de CA (corriente alterna) común como la que llega a los hogares, está circulando electricidad, pero no se considera señal eléctrica, porque no lleva una información aparejada; por el contrario, una señal de radio de



La característica principal de una señal eléctrica, es que lleva aparejada cierta información relevante, misma que se desea aprovechar de una u otra forma.

amplitud modulada sí es una señal eléctrica, ya que una vez que ha sido captada y procesada, puede recuperarse de ella la información de audio transmitida. Esto es lo que hace especiales a las señales eléctricas: su capacidad de transportar cierta información en ellas; y de ahí surge la necesidad darles un manejo especial para que la información viaje de un punto a otro, se almacene, se despliegue de alguna forma, etc.

### 1.3.2 Transductor

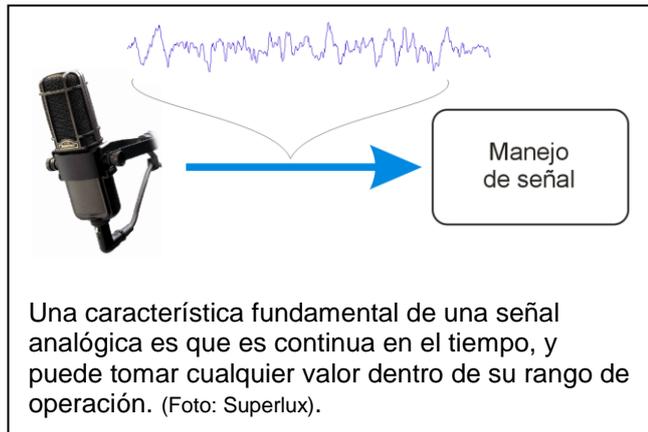
Un transductor es un dispositivo capaz de tomar algún parámetro físico en uno de sus extremos, y expedir como salida una señal eléctrica que, de alguna forma u otra, representa al parámetro que se está monitoreando. Por ejemplo, un termistor es un dispositivo electrónico cuya conductividad varía conforme cambia la temperatura ambiente; una fotocelda capta la luz que incide sobre ella y produce a su salida un voltaje equivalente a la cantidad de luz recibida; un micrófono percibe los sutiles cambios en la presión de aire que provocan las ondas sonoras, y las transforma en una variación



eléctrica que represente fielmente a ese sonido; en resumen, un transductor sirve para captar el fenómeno que se desea medir, y producir a su salida una señal eléctrica equivalente, misma que ya puede ser manejada como mejor convenga.

### 1.3.3 Señal analógica

Una señal eléctrica puede tomar varios aspectos, pero a grandes rasgos, se pueden dividir estas señales en dos grandes grupos: señales analógicas y señales digitales. Las señales analógicas se caracterizan porque siempre están presentes (esto es, son continuas en el tiempo), y pueden tomar un número de valores infinito, dentro de sus rangos de operación. Por ejemplo,

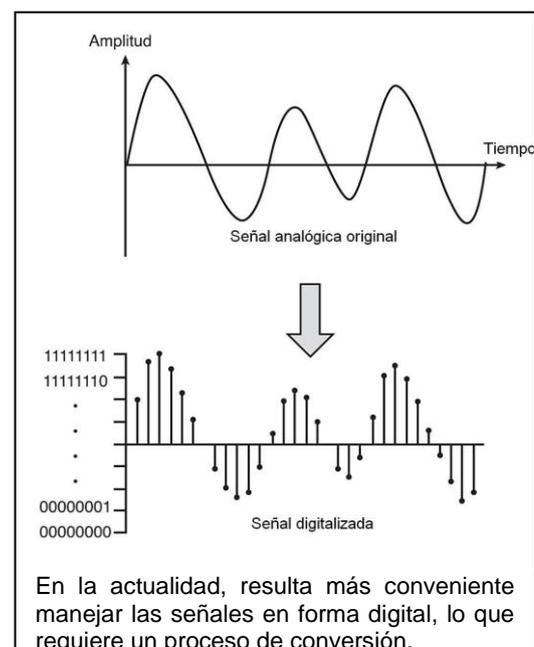


si se tiene un termistor monitoreando la temperatura de cierta región, su voltaje de salida siempre está presente, indicando la temperatura en ese preciso momento; no importa si se toma la lectura a cierta hora, o con

algunos segundos o minutos de retraso, siempre habrá un voltaje a su salida representando la temperatura detectada. Si se coloca un micrófono captando los sonidos del ambiente, también se tendrá siempre una salida, que puede ser tan animada o tan aburrida como lo sea el sonido que capta el dispositivo, pero siempre habrá una salida que observar. No sólo eso, una señal análoga puede tomar cualquier valor dentro de su rango de operación, incluyendo valores fraccionarios. Esto significa que una señal análoga es la representación más fiel del comportamiento de un fenómeno que se pueda tener.

### 1.3.4 Señal digital

Debido a la popularidad del procesamiento digital de señales, en la actualidad se prefiere transmitir, almacenar, manejar y expedir una señal en forma digital y no en forma analógica. Una señal digital sólo está presente en momentos muy precisos, y sólo puede tomar un cierto número de valores, determinados por la resolución (en bits) que se esté manejando. Un ejemplo de esto es el audio grabado en un disco compacto, que se captó como una señal analógica, pero después se transformó en una señal digital con una

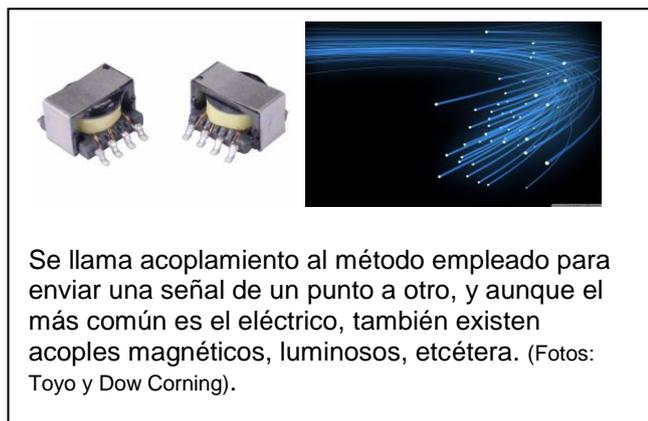


frecuencia de muestreo de poco más de 40KHz, y una resolución de 16 bits,

para así ser grabada en la superficie del disco. Esto significa que al momento de recuperar esta información, se captan los “unos” y “ceros” almacenados en el CD, se procesan, se reconstruye la señal digital primigenia, y a partir de ella se reproduce la señal análoga original, misma que se envía hacia el amplificador de audio y hacia las bocinas. Resulta indudable que en el proceso de transformar una señal de análoga a digital se pierde parte de la información original, pero esta pérdida se compensa por la facilidad y precisión con que se puede almacenar y manejar una señal digital.

### 1.3.5 Acoplamiento

Así se llama a la forma como se transmite una señal eléctrica de un punto a otro. En la mayoría de los casos, se tienen acoplamientos de tipo eléctrico



directo, esto es, los electrones de un circuito fluyen de forma directa hacia el circuito siguiente, a través de conductores colocados con ese fin; sin embargo, existen otros tipos de acoplamiento muy empleados en tecnología

electrónica, y se usan para garantizar la mejor transmisión de la información que se desee manejar; por ejemplo:

- *Acoplamiento magnético:* cuando una señal eléctrica se convierte en un flujo magnético, que a su vez induce una corriente eléctrica en otra parte del circuito. Para ello se usan los transformadores de acoplamiento.
- *Acoplamiento óptico:* una señal eléctrica se convierte en un flujo luminoso, que es captado por un sensor especial, y vuelto a convertir en señal eléctrica. Es el caso típico de las transmisiones a través de fibra óptica.

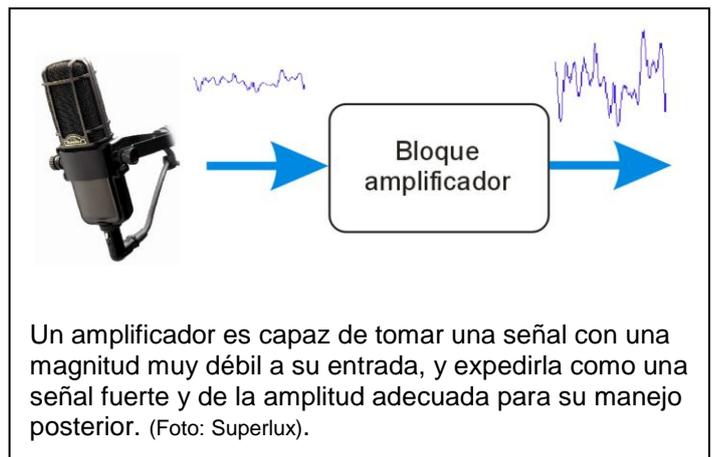
- *Acoplamiento piezoeléctrico*: una señal eléctrica se convierte en una serie de vibraciones mecánicas inducidas en un cristal piezoeléctrico, para que unas terminales en el otro extremo capten esas vibraciones y las conviertan nuevamente en señal eléctrica. Es el principio de funcionamiento de los filtros cerámicos, muy usados en prácticamente todas las aplicaciones que usen ondas de radio para transmitir información.

Como estos ejemplos, hay algunos otros tipos de acoplamiento entre circuitos que se describirán más adelante conforme sea necesario.

### 1.3.6 Amplificación

Casi siempre, cuando se obtiene una señal eléctrica de un transductor, ésta resulta demasiado débil como para aplicarse directamente a otros circuitos. Esto implica que uno de los primeros bloques que deberá encontrar en su camino esta señal es un

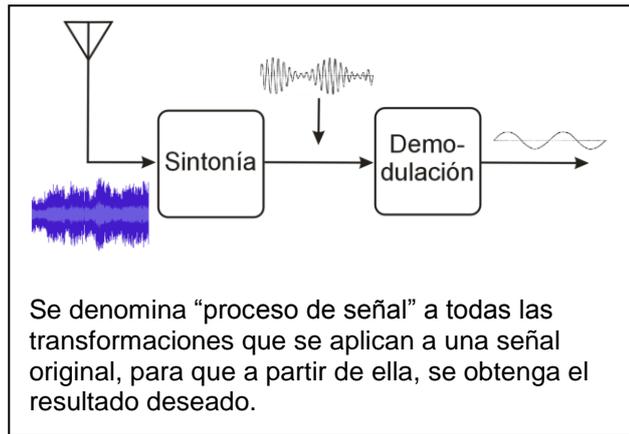
amplificador, que como su nombre lo indica, toma a su entrada una señal con una magnitud muy débil, y la expide a su salida sin haber cambiado en absoluto su forma, pero aumentando su voltaje, su corriente, su



potencia o lo que sea necesario para su posterior manejo. La amplificación de señales fue uno de los principales retos que se tuvieron en los inicios de la electrónica, y hasta la fecha sigue siendo una de las aplicaciones más utilizadas en los ámbitos más diversos.

### 1.3.7 Proceso de señal

Se ha mencionado bastante el término “manejo de señal”; pero ¿qué significa este manejo? Una vez que se tiene una señal representando un fenómeno, por lo general es necesario modificarla de alguna forma para hacerla más adecuada para lo que se requiera; por ejemplo, en el caso de



un micrófono, si se desea captar el audio del ambiente, y sabiendo que el oído humano sólo capta sonidos entre los 20 y los 20,000 Hz, sería conveniente aplicar un filtrado a la señal resultante para eliminar cualquier sonido por debajo de 20 y

por arriba de 20,000 Hz, ya que de todos modos casi nadie puede escucharlos. Cuando se recibe una señal de radio AM, se debe sintonizar por medio de un proceso de heterodinación, luego se filtra para obtener sólo la señal de la estación deseada, se recorta la mitad de la señal y se aplican una serie de filtros paso-bajos, para finalmente recuperar la señal de audio transmitida. Pues bien, a todos estos pasos que hay desde la obtención inicial de una señal eléctrica y su aprovechamiento final, se denominan "proceso de señal", y este proceso puede ser tan simple o tan complejo como lo amerite el caso en particular.

Estos son los conceptos básicos que se deben considerar al estudiar los dispositivos electrónicos; conviene tenerlos presentes, porque se mencionarán constantemente de aquí en adelante.

## ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 1C

- ¿Cuál es la principal característica que distingue a una señal eléctrica?
- ¿Qué es un transductor y para qué sirve?
- Define una señal analógica:
- Define una señal digital:
- ¿Por qué se acostumbra convertir una señal de analógica a digital?
- ¿Qué es el acoplamiento de señales?
- Indica tres ejemplos de acoplamientos de señales:
- ¿Por qué se necesita la amplificación de señales?
- ¿A qué se llama "proceso de señal"?

## AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Cuál fue el primer artilugio electrónico y quién lo inventó?
2. ¿Quién inventó el primer dispositivo electrónico, y en qué efecto se basó?
3. Menciona el nombre del primer dispositivo de amplificación electrónica, y quién fue su creador:
4. ¿Quiénes inventaron el primer transistor?
5. ¿Qué es una señal eléctrica, y cuál es su principal característica?
6. ¿Qué es un transductor?
7. Define una señal analógica y una señal digital:
8. ¿Por qué en la actualidad se prefiere convertir las señales analógicas en señales digitales?
9. ¿Qué es el acoplamiento de señal? Menciona dos ejemplos:
10. ¿A qué se llama “proceso de señal”?

## RESPUESTAS

1. El tubo de Crookes, inventado por William Crookes.
2. John A. Fleming desarrolló el diodo, basado en el efecto Edison.
3. El triodo, inventado por Lee DeForest.
4. Brattain, Bardeen y Shockley.
5. Es un flujo eléctrico que lleva aparejado consigo cierta información necesaria para el usuario.
6. Es un dispositivo que transforma un fenómeno físico en una señal eléctrica.
7. Las señales analógicas están presentes todo el tiempo y pueden tomar cualquier valor dentro de su rango de operación, mientras que las señales digitales sólo están presentes en momentos específicos, y pueden tomar únicamente ciertos valores predeterminados, dependiendo del número de bits empleado.
8. Porque el proceso digital de señales ha mostrado muchas ventajas sobre el proceso análogo de las mismas.
9. Es el método que se usa para transmitir una señal de un circuito a otro. Existen acoplamientos eléctricos, magnéticos, ópticos, piezoeléctricos, etc.
10. A toda transformación que se aplica a una señal, desde su punto de entrada a un circuito hasta la obtención del resultado deseado.

## RESPUESTAS A LAS ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE

### *Actividad de aprendizaje 1A:*

- a) El científico inglés William Crookes.
- b) Si se coloca una laminilla metálica en la cercanía de un filamento incandescente, y se aplica un voltaje negativo a esa laminilla, habrá flujo de electrones entre el filamento y la laminilla, pero si se aplica un voltaje positivo, no existirá flujo.
- c) John A. Fleming.
- d) De galena.
- e) Lee DeForest.
- f) Como amplificador electrónico de señales.
- g) Brattain, Bardeen y Shockley.

### *Actividad de aprendizaje 1C:*

- a) Que lleva aparejada cierta información útil para el usuario.
- b) Es un dispositivo que toma algún fenómeno físico (temperatura, sonido, presión, etc.) y lo convierte en una señal eléctrica a su salida.
- c) Es aquella que es continua en el tiempo y que puede tomar cualquier valor posible dentro de su rango de operación.
- d) Es aquella que sólo está presente en momentos muy específicos, y sólo puede tomar cierto número predefinido de valores, dependiendo del número de bits empleado.
- e) Porque el proceso digital de señales ha demostrado ser más efectivo, veloz, flexible y económico que el procesamiento analógico.
- f) Es la transmisión de una señal de un circuito a otro, procurando siempre que esa señal se reciba de la mejor forma posible.
- g) Eléctrico, magnético, luminoso, piezoeléctrico, etc.
- h) Porque muchas veces, la señal original tiene una magnitud muy pequeña, lo que implica que se necesita ampliar para poderla manejar adecuadamente.
- i) A todas las transformaciones que se aplican a una señal, desde su inicio hasta obtener el resultado final deseado.

## UNIDAD 2

### CONCEPTO DE FÍSICA DE SEMICONDUCTORES

#### OBJETIVO

El estudiante comprenderá el concepto de semiconductor y los principios físicos que existen detrás de su comportamiento eléctrico, analizando sus propiedades básicas, la forma como conducen, y cómo se obtienen los semiconductores P y N, y así tener los cimientos necesarios para el posterior estudio de los principales dispositivos electrónicos.

#### TEMARIO

2.1 MODELOS DE BANDAS

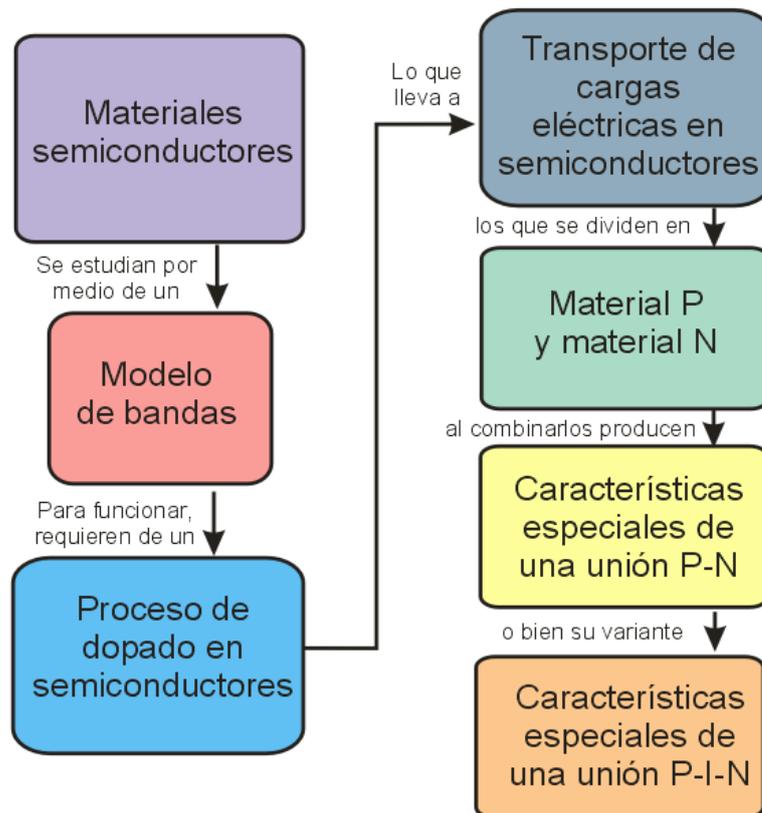
2.2 SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS

2.3 CONDUCCIÓN ELÉCTRICA EN SEMICONDUCTORES

2.4 UNIÓN P-N Y CARACTERÍSTICAS ASOCIADAS: DENSIDAD DE CARGA, CAMPO ELÉCTRICO, POTENCIAL ELECTROESTÁTICO, CAPACITANCIA Y RELACIÓN I-V

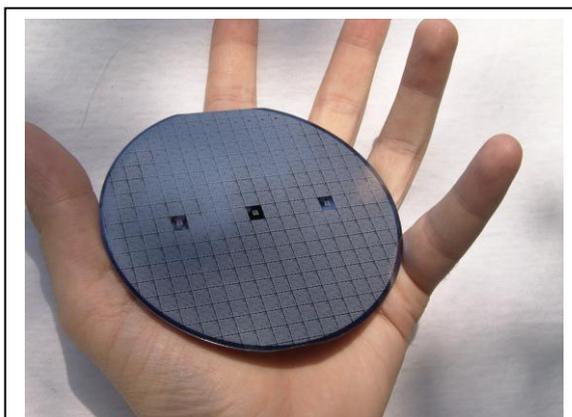
2.5 UNIÓN PIN

# MAPA CONCEPTUAL



## INTRODUCCIÓN

Antes de comenzar con el estudio detallado de los dispositivos electrónicos, es conveniente conocer el material del que están hechos y sus peculiares



Los materiales semiconductores son pieza clave para el desarrollo de la tecnología electrónica. (Foto: DHD galleries).

propiedades eléctricas, sin las cuales la electrónica tal y como se conoce no existiría. Se trata de los materiales semiconductores, que son pieza clave en el desarrollo de diodos, transistores, circuitos integrados y demás componentes que se utilizan en los modernos circuitos electrónicos. Qué son y cuáles son las propiedades de

los principales semiconductores, es lo que se describirá en esta unidad.

¿Por qué es importante estudiar el comportamiento de los semiconductores? Precisamente, porque es debido a las propiedades físicas tan particulares que tienen estos materiales, que se pueden construir dispositivos diminutos que funcionen como interruptores de paso, amplificadores, rectificadores, sensores, indicadores, etcétera. Los dispositivos semiconductores marcan un cambio en el desarrollo de la electrónica, ya que antes de ellos prácticamente todo se tenía que hacer con voluminosas, frágiles y poco eficientes válvulas de vacío o bulbos, lo que limitaba seriamente las aplicaciones en que podían utilizarse estos elementos. Con los dispositivos semiconductores, ahora esos bulbos



Antes del desarrollo de los dispositivos semiconductores, la electrónica se basaba casi en su totalidad en válvulas de vacío o bulbos. (Foto: National).

han sido sustituidos por pequeñísimos transistores o circuitos integrados, y

esto ha permitido que la electrónica invada prácticamente todas las actividades humanas, desde el trabajo más complejo hasta el entretenimiento.

Para comprender de forma adecuada cómo es que los dispositivos electrónicos pueden hacer todo lo que realizan, es necesario profundizar en el mundo de las propiedades físicas de la materia, entender cómo se lleva a cabo la conducción eléctrica, y qué es lo que hace tan especiales a los materiales conocidos como semiconductores.

## 2.1 MODELOS DE BANDAS

Una de las propiedades físicas intrínsecas de todo material, es su conductividad eléctrica; y es bien sabido que básicamente, los materiales se dividen en dos grandes grupos, dependiendo de su capacidad para



transportar o no energía eléctrica. Se tienen así por un lado a los conductores, que son materiales capaces de transmitir sin problemas la corriente eléctrica con mínimas pérdidas; y en el extremo opuesto están los aislantes, cuya capacidad de conducir electricidad es casi nula. Casi todos los materiales

en la naturaleza pueden clasificarse en uno u otro grupo, pero existen algunos cuyo comportamiento no está tan definido, así que resulta un poco difícil ubicarlos como un conductor o como un aislante.

Así está por ejemplo el carbono; desde que se comenzaron a hacer experimentos con la electricidad, se encontró que ciertas variedades de carbono, como el grafito, presentaban algunos comportamientos curiosos, como tener distinta conductividad eléctrica dependiendo de en qué sentido circulara la corriente. Tiempo después se encontró que el grafito en realidad está formado por una serie de capas superpuestas, y que la electricidad fluía distinto si corría en el sentido de las capas o si trataba de pasar a través de ellas. Por este comportamiento, se considera al carbono como el primer material de conductividad variable conocido, pero no fue el único.

A finales del siglo XIX se hicieron importantes descubrimientos en el área de la electricidad, y entre ellos están las investigaciones de W. Smith, que en 1873 descubrió que la conductividad eléctrica del silicio variaba si se le aplicaba una iluminación intensa; esto significa que el material conducía mejor si estaba iluminado que si estaba a la sombra, lo cual resultó muy curioso si se compara con el resto de los metales, que conducen bien sin importar las condiciones de iluminación.

Poco tiempo después, en 1874, Karl Ferdinand Braun descubre que cuando ciertos metales hacen contacto con algunos materiales, como la galena, conducían de forma distinta si se polarizaban en un sentido o en otro; surgen así los primeros “diodos de galena”, usados extensivamente en los



Las curiosas propiedades de la galena sirvieron para elaborar los primeros diodos rectificadores de cristal. (Foto: Fabre minerals).

primeros receptores de radio, y que se consideran por algunos el primer dispositivo semiconductor; sin embargo, en realidad aquí se estaban aprovechando algunas propiedades de la galena sin comprender muy bien qué estaba sucediendo, así que estrictamente, aún no se llega al primer dispositivo semiconductor.

Uno de los estudios más importantes sobre estos materiales, lo realizó E. H. Hall en la década de 1930, cuando descubre que ciertos elementos, como el germanio y el silicio, tienen una cantidad muy baja de portadores eléctricos, pero que eso podía modificarse cambiando ligeramente las condiciones del material, por ejemplo, incrementando su temperatura externa. Esto originó diversos estudios sobre esos elementos, lo que finalmente resultó en el descubrimiento de sus propiedades semiconductoras, y su aprovechamiento para el desarrollo de la electrónica.

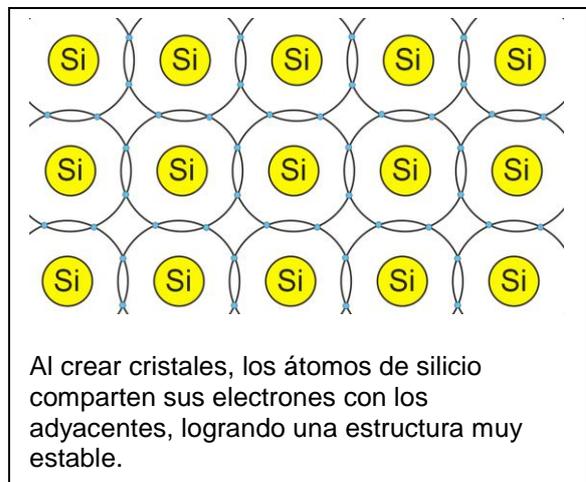
¿Por qué el germanio y el silicio se comportan como semiconductores? En primer lugar, se debe mencionar que los materiales metálicos, que en su mayoría son excelentes conductores, tienen algo en



El germanio y el silicio fueron los primeros elementos que demostraron propiedades semiconductoras. (Fotos: Wikimedia).

común entre ellos: las órbitas de valencia de sus átomos tienen muy pocos electrones libres, lo que permite que un incremento en el potencial eléctrico externo fácilmente haga que estos electrones comiencen a saltar de átomo en átomo, estableciéndose una corriente eléctrica. Conviene recordar de los cursos de química que, para que un elemento se considere como “estable”, en su órbita de valencia debe tener 8 electrones; si se tienen unos cuantos (entre 1 y 2), estos electrones fácilmente pueden saltar al átomo colindante, y es esta propiedad de que sus electrones viajen fácilmente, lo que distingue a los buenos conductores eléctricos.

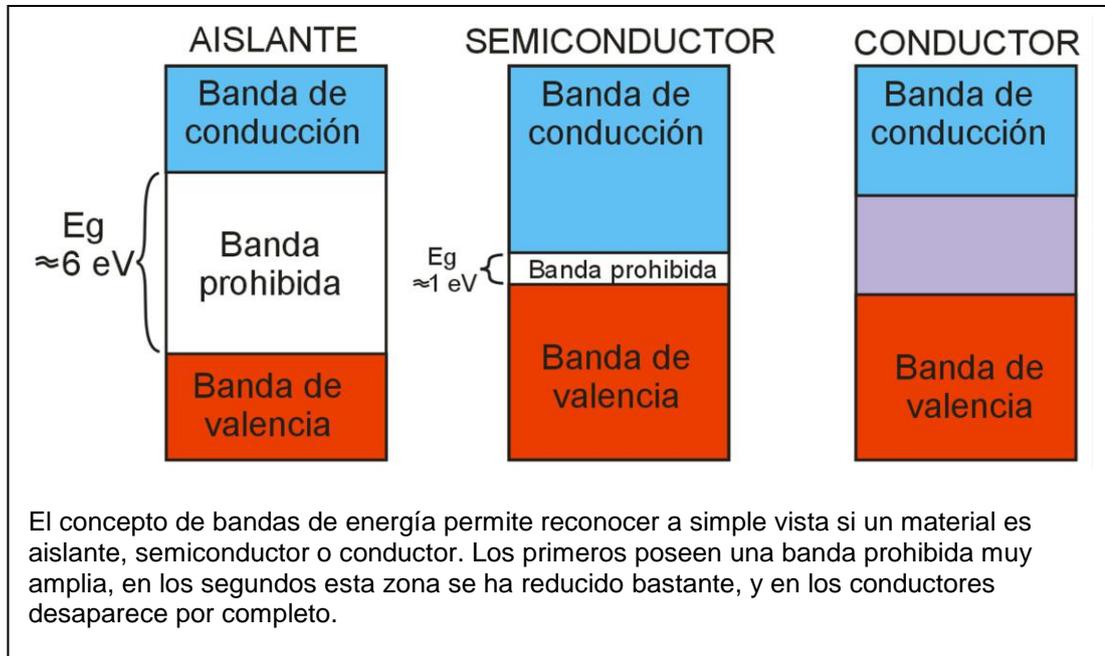
En el caso del germanio y el silicio, existe una situación muy peculiar: cada uno tiene 4 electrones en su órbita de valencia, lo que teóricamente tendría que convertirlos en aceptables conductores eléctricos; el problema es que ambos materiales de forma natural tratan de acomodarse en cristales, lo que significa que cada átomo se rodea de otros 4 iguales,



y aparece un fenómeno interesante: los átomos colindantes “comparten” sus electrones de modo que, viéndolos de forma instantánea, cada uno parece tener 8 electrones en su órbita de valencia, lo que le da una gran estabilidad a la estructura, evitando que los electrones “salten” de forma espontánea de un átomo a otro, e impidiendo casi por completo la circulación de electricidad; sin embargo, bajo ciertas condiciones esto puede reducirse o eliminarse, haciendo que el material comience a conducir.

Este fenómeno puede explicarse por medio del concepto de “bandas de energía”, según el cual un material puede clasificarse dependiendo del número de electrones libres que tenga disponibles para el transporte de electricidad. Por ejemplo, los aislantes poseen muy escasos electrones libres, lo que hace que la circulación de corriente eléctrica a través de ellos sea casi nula. Los semiconductores poseen una mayor cantidad de electrones libres, y esta cantidad puede variar por influencias externas, como añadir otros elementos, la presencia de luz o calor, etcétera, esto quiere

decir que los semiconductores pueden funcionar como aislantes o como conductores, dependiendo de factores adicionales. Finalmente, los conductores poseen una gran cantidad de electrones libres, lo que facilita la circulación de corriente en ellos.



Esta situación puede representarse por medio de un gráfico con tres bandas, como se muestra en la figura anexa: se tiene una banda de conducción, una banda prohibida y una banda de valencia. Se puede observar que los aislantes tienen bandas de conducción y de valencia reducidas, separadas por una muy amplia zona prohibida; esto significa que se necesitaría una tensión muy alta para hacer que este material entrara en su modo de conducción, así que para fines prácticos, impide el flujo de corriente eléctrica.

Los semiconductores, por su parte, poseen amplias bandas de conducción y valencia, separadas por una zona prohibida muy reducida; esto implica que a estos materiales no se les dificulta saltar de “modo conductor” a “modo aislante”, dependiendo de distintos factores internos y/o externos. Si se habla de los materiales semiconductores más conocidos, es decir, el germanio y el silicio, el primero tiene una banda prohibida de apenas 0.7eV, mientras que el segundo tiene una banda prohibida de 1.1eV, lo que significa que basta con aplicar cierto voltaje o reunir algunas características especiales, para que el material entre en estado de conducción.

Finalmente, los conductores poseen bandas muy amplias de conducción y valencia, tan grandes que se superponen entre sí, eliminando la zona prohibida; esto significa que en un conductor no se necesita prácticamente de ningún esfuerzo para hacer que el material conduzca la electricidad. Este modelo de las bandas de energía, permite visualizar de forma rápida y directa si un material es aislante, conductor o semiconductor.

## ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 2A

- a) ¿Cuál fue el primer elemento de conductividad variable conocido?
- b) ¿Cuál es el primer indicio sobre la semiconductividad del silicio?
- c) ¿Cuántos electrones posee el silicio y el germanio en su órbita de valencia?
- d) ¿Qué sucede cuando estos materiales forman cristales?
- e) ¿Cuáles son las tres “bandas de energía” que maneja el modelo de bandas?
- f) ¿De qué valor es la banda prohibida del silicio? ¿y del germanio?

### 2.2 SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS

Sabiendo que el silicio es uno de los elementos más comunes en el planeta, y que los investigadores que sentaron las bases para el desarrollo de la tecnología eléctrica y electrónica experimentaron con toda clase de materiales, incluso los más exóticos, ¿cómo fue que las propiedades semiconductoras de este elemento no se descubrieron antes? Si bien algunos fenómenos relacionados si fueron encontrados (como el hecho de que conduce mejor en presencia de luz que en su ausencia), la verdad es que el silicio metálico es un elemento difícil de localizar en la naturaleza, ya que normalmente está combinado con otros elementos para formar distintas sustancias, de las cuales la más



A pesar de ser uno de los elementos más abundantes en el planeta, el silicio normalmente está mezclado con otros elementos. (Foto: Pacific Agregates).

abundante es la arena común.

Además, las propiedades semiconductoras del silicio se manifiestan



El silicio metálico normal (en lingotes) se comporta ligeramente distinto al silicio monocristalizado (en cilindros). (Foto: China Rectifier).

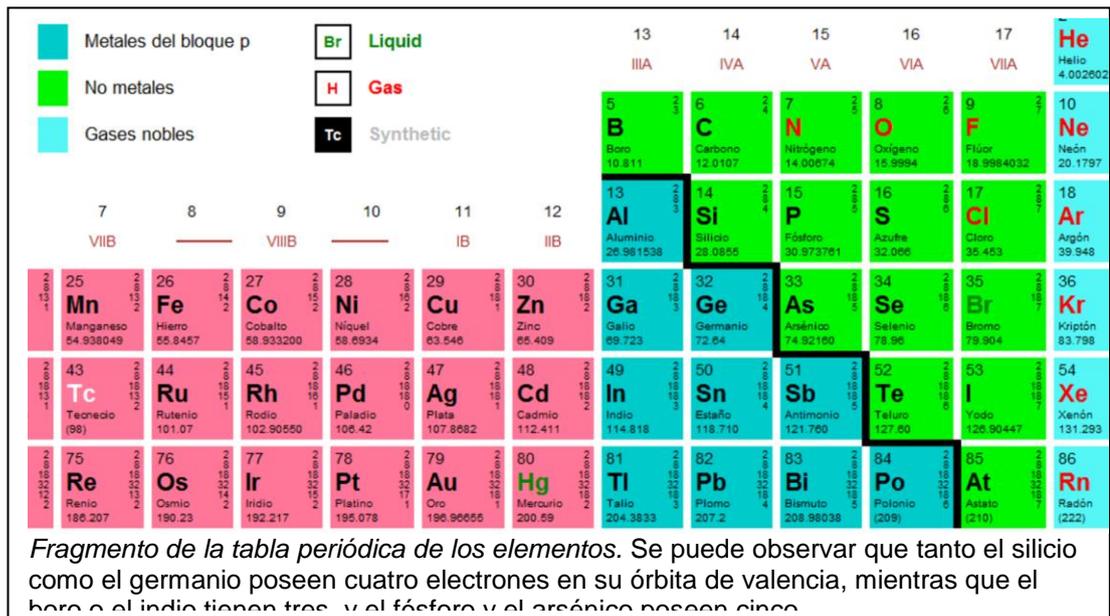
en plenitud cuando está en forma cristalina, pero incluso cuando el silicio se separa y se refina, normalmente forma micro-cristales que se mezclan entre sí para crear una masa algo amorfa, donde no se manifiestan al 100% las curiosas propiedades eléctricas de este material. Fue hasta que se comenzó a experimentar con silicio fabricado artificialmente en

forma de un cristal uniforme y continuo, que las características especiales de este elemento salieron a la luz.

Entonces se concluye que existen dos tipos de semiconductores según si se encuentran o no en forma natural: los *semiconductores intrínsecos* son materiales que por sí mismos tienen propiedades semiconductoras. El silicio y el germanio son buenos ejemplos, aunque el efecto semiconductor no sea tan pronunciado debido al crecimiento desordenado de sus cristales en forma natural. Esto significa que en una barra de silicio o germanio puro, si se aplica un voltaje entre sus extremos, lo más probable es que sí circule una corriente eléctrica, la cual dependerá de factores como la temperatura externa, si hay una fuente luminosa cerca, etcétera. Por tanto, y en forma general, un semiconductor intrínseco es aquel material que, tal y como se encuentra en la naturaleza, puede comportarse como aislante o como conductor, dependiendo de las características de la prueba.

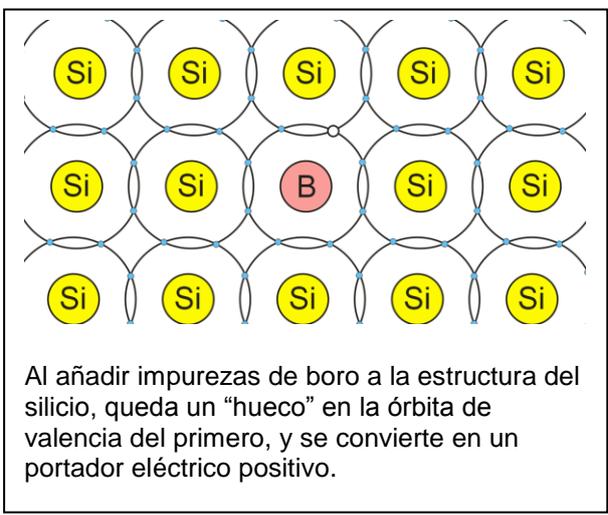
Estos materiales por sí mismos ya representan un gran avance en el manejo de la energía eléctrica, pero su propia naturaleza poco predecible los hace no muy convenientes al tratar de construir dispositivos que presenten siempre el mismo comportamiento ante casi cualquier circunstancia. Es por ello que se desarrollaron los *semiconductores extrínsecos*, que son materiales a los cuales se les obliga a comportarse como semiconductores

por medios externos, el más común de ellos es la adición de pequeñas cantidades de impurezas de otros elementos.



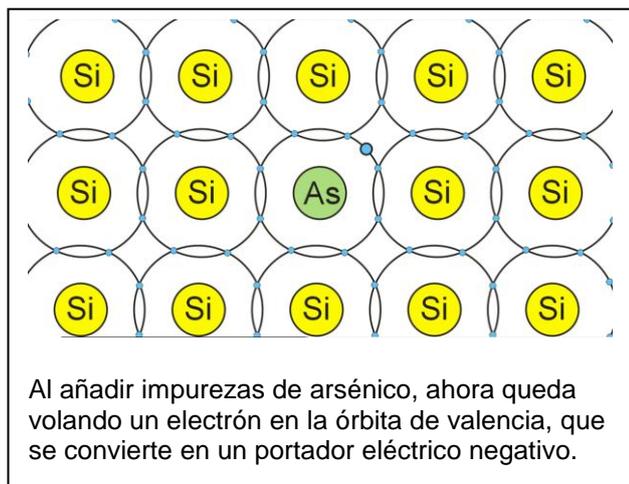
Por ejemplo, para fabricar los transistores y circuitos integrados modernos, se utilizan cristales de silicio de enorme pureza, al grado que se considera que los residuos no deseados en estos cristales equivaldrían a menos de una cucharada de sal mezclada con un vagón de ferrocarril lleno de azúcar; sin embargo, y como ya se mencionó, el silicio cristalino no es un buen conductor eléctrico, así que durante el proceso de fabricación de los dispositivos electrónicos se añaden algunas impurezas de elementos como el arsénico o el boro, para que el material resultante se comporte de forma muy específica.

Si se consulta la tabla periódica de los elementos, se puede observar que el boro posee sólo tres electrones en su órbita de valencia, mientras que el arsénico posee cinco electrones. Cuando se mezclan estos átomos en la estructura cristalina del silicio, como se observa en el primer caso, queda un “huevo” que fácilmente puede atraer a un electrón adyacente, haciendo



que circule corriente al momento en que ese “hueco” comienza a pasar de un átomo al contiguo conforme es atraído por algún campo eléctrico externo. Debido a que este “hueco” implica la ausencia de un electrón, para fines prácticos se considera que es una carga positiva, y al silicio al que se le han añadido impurezas de boro se le conoce entonces como “semiconductor tipo P”.

Por su parte, si ahora se añaden impurezas de arsénico, al tener éste



cinco electrones en su órbita de valencia, esto significa que al entrar a la estructura cristalina del silicio, un electrón queda “volando”, y fácilmente se le puede hacer circular de átomo en átomo, para establecer una corriente eléctrica. Debido a que en este material se

puede decir que hay un electrón que “sobra”, al silicio con impurezas de arsénico se le conoce como “semiconductor tipo N”, debido a la carga negativa de los electrones “sobrantes”.

Este tipo de materiales que son diseñados por el ser humano, no se encuentran de forma natural en el planeta, sino que son elaborados por medio de complejos procesos industriales; de ahí su nombre de *semiconductores extrínsecos*, ya que sus propiedades semiconductoras han sido potenciadas debido a la intervención humana. En la práctica, todos los dispositivos electrónicos están elaborados con semiconductores extrínsecos, ya que la adición de cantidades controladas de impurezas externas le da al silicio (o al germanio, u otras sustancias semiconductoras) propiedades muy particulares, que se aprovechan para la construcción de un simple diodo hasta el más avanzado circuito integrado.

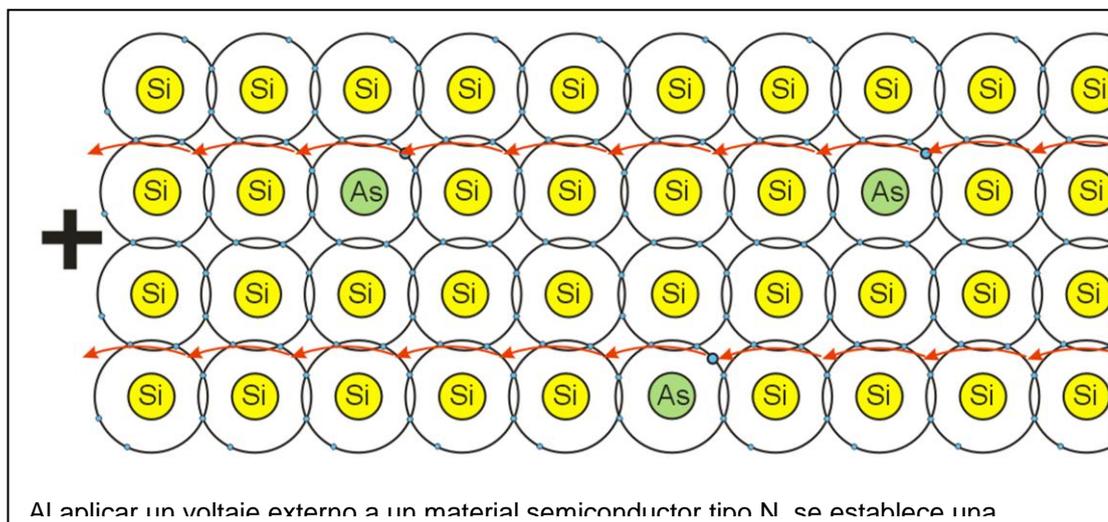
## ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 2B

a) ¿Qué es un semiconductor intrínseco?

- b) ¿A qué se le llama semiconductor extrínseco?
- c) ¿Cuáles son los semiconductores más usados en la electrónica moderna?
- d) ¿Qué elementos se utilizan regularmente como impurezas para fabricar semiconductores?
- e) ¿Cuál es la característica que hace especiales a estos elementos?

### 2.3 CONDUCCIÓN ELÉCTRICA EN SEMICONDUCTORES

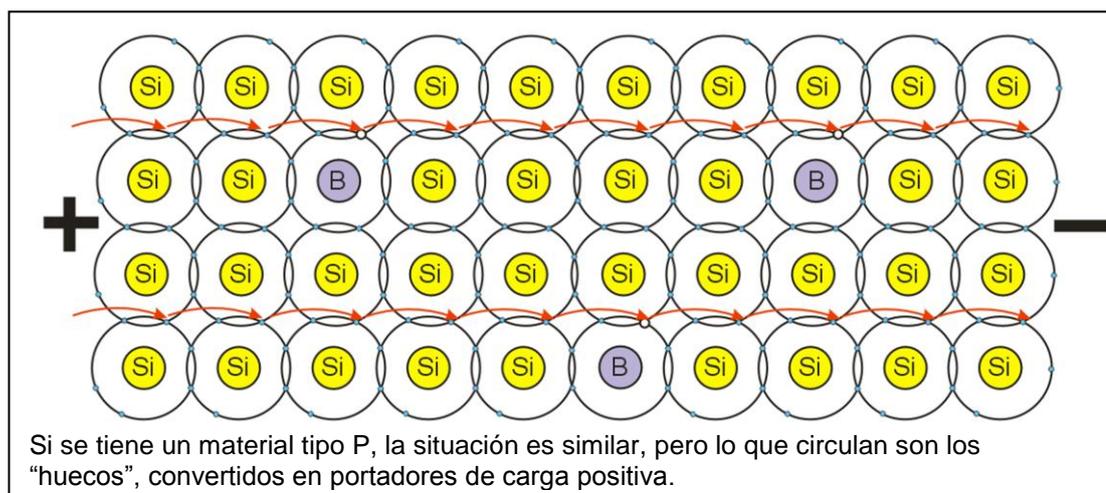
Ahora que se conoce la estructura de un cristal de silicio al que se le han añadido impurezas de otros elementos (a este proceso se le denomina “dopado”), ha llegado el momento de identificar cómo se establece una corriente eléctrica dentro de un semiconductor de este tipo. En la figura anexa se muestra un cristal de silicio con una impureza de arsénico, lo que implica que se trata de un material tipo “N”. Es evidente que en el átomo de arsénico, uno de sus electrones no establece un enlace molecular con los átomos adyacentes, así que se puede considerar que se trata de un electrón “libre”, con poca atracción a su átomo original, por lo que basta con un pequeño impulso externo para obligarlo a salir de esa posición, y empezar a viajar a través del material.



Ese impulso externo generalmente aparece en forma de una diferencia de potencial (un voltaje externo aplicado), con lo cual el electrón es rechazado por el extremo negativo del voltaje y atraído por el positivo, con lo que comienza a “saltar” de átomo en átomo de la estructura cristalina, pero como en cada átomo que llega sigue teniendo el papel de “electrón

libre”, es difícil que pueda mantenerse demasiado tiempo en una posición, así que continúa su viaje hasta alcanzar el extremo positivo del voltaje aplicado. Una vez que sucede esto, se podría pensar que el material se queda sin electrones libres y se tendría que convertir en un aislante, pero como la fuente de voltaje por lo general está inyectando más electrones al material, entonces se establece un flujo constante de corriente, aunque la magnitud de ese flujo estará limitada por factores como el porcentaje de dopado, la temperatura del material, la iluminación externa, etcétera.

Si el material es tipo “P”, esto es, un cristal de silicio con impurezas de boro, entonces se tiene lo que se muestra en la figura adyacente: es obvio aquí que en la posición del átomo de boro se tiene una situación no estable donde sólo se tienen siete electrones en la órbita de valencia; y como ya se mencionó, para lograr la estabilidad es necesario que hayan ocho electrones en esta órbita; esto significa que en este átomo existe un “hueco” en esa órbita.



En condiciones normales, no habría circulación de corriente, pero cuando se aplica un estímulo externo en forma de un voltaje, entonces el átomo de boro trata de “robar” un electrón a los átomos contiguos, para lograr la estabilidad en su órbita de valencia; pero este robo a su vez deja con siete electrones al átomo afectado, el cual también tratará de arrebatarse un electrón al que sigue, y así sucesivamente; estableciéndose una circulación de “huecos” que viajan desde el extremo positivo hacia el negativo del voltaje aplicado. De ahí la denominación de “material tipo N” o “material tipo P”: en el tipo “N”, los portadores de electricidad son los

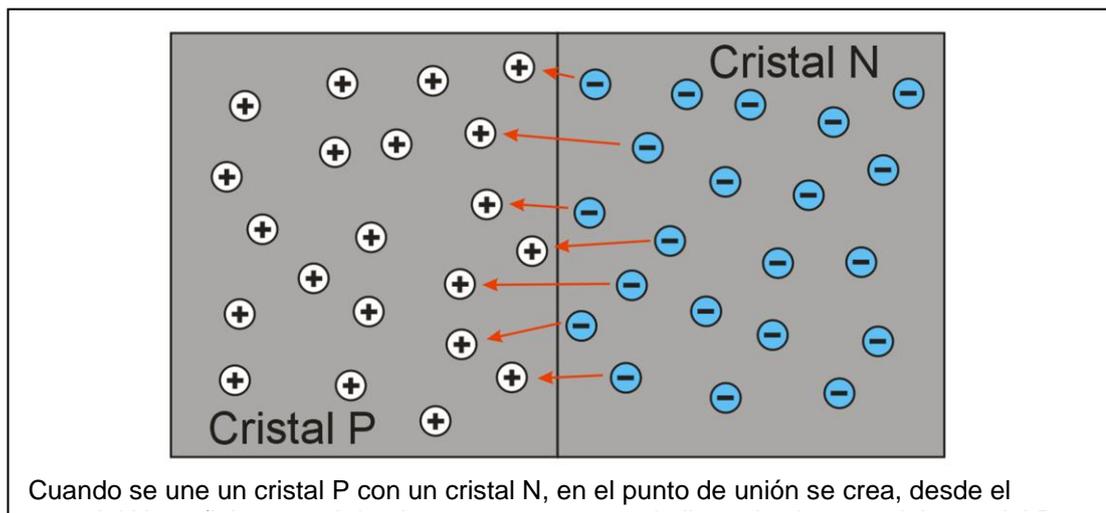
electrones negativos, mientras que en el tipo “P” los portadores son los huecos positivos. Se debe tener esto en cuenta, ya que resulta muy importante para comprender el principio de operación de los dispositivos semiconductores.

## ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 2C

- Menciona la característica de los materiales semiconductores tipo “N”:
- Señala las características de los materiales semiconductores tipo “P”:
- ¿Cómo se establece una corriente eléctrica dentro de un semiconductor “N”?
- ¿Cómo se denominan los portadores eléctricos en un semiconductor tipo “P”?

### 2.4 UNIÓN P-N Y CARACTERÍSTICAS ASOCIADAS: DENSIDAD DE CARGA, CAMPO ELÉCTRICO, POTENCIAL ELECTROESTÁTICO, CAPACITANCIA Y RELACIÓN I-V

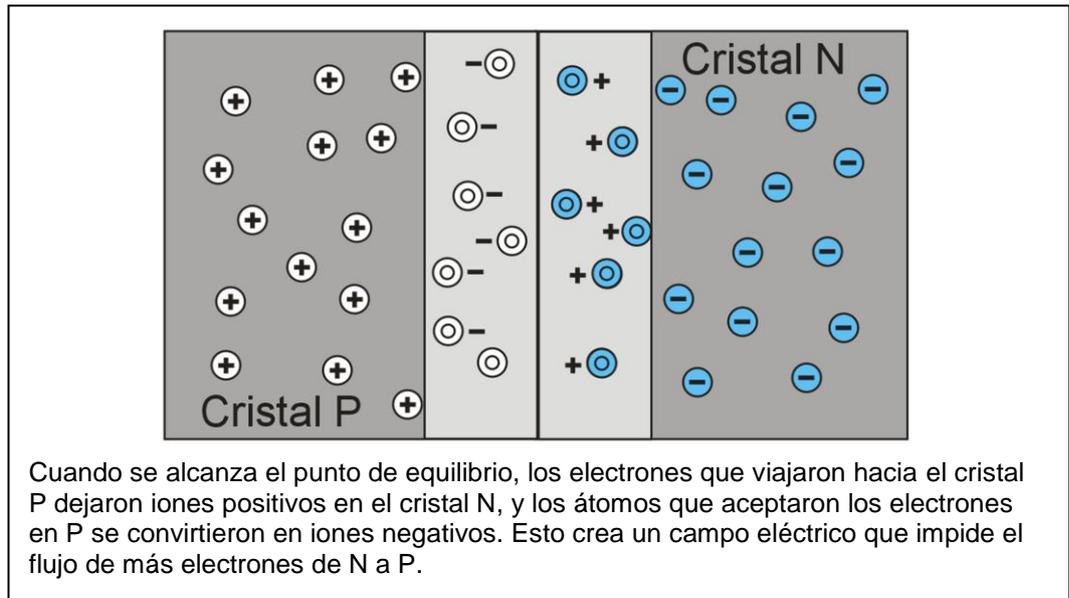
Si ya se tienen dos materiales semiconductores distintos, uno tipo P y otro tipo N, ¿qué sucede si se juntan? Se forma lo que se conoce como una “unión P-N”, y esta zona donde hacen contacto ambos materiales posee características muy particulares, que se describirán enseguida.



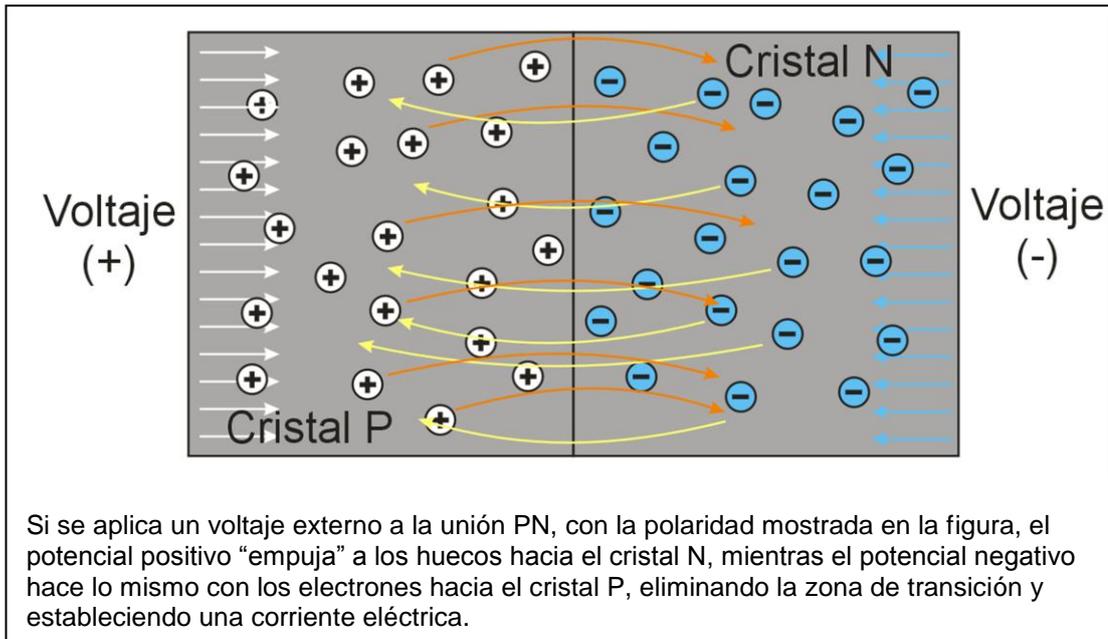
En la figura anexa se presenta un diagrama simplificado de lo que sucede en una zona de unión P-N; es importante recordar que el material P tiene exceso de “huecos” o cargas positivas disponibles, mientras que el “N”

tiene un exceso de electrones o cargas negativas. En condiciones de reposo, y dado que un cristal con “huecos” trata naturalmente de atraer a electrones libres para cubrir esos huecos, algunos de los electrones del cristal N pasan al P, lográndose un equilibrio de potencial en esa zona de contacto, que recibe el nombre de “zona de transición”, en la cual no habrá portadores libres, y que para fines prácticos se comporta como una delgada capa aislante. Esta capa es tan amplia como lo sea el dopado de los materiales N y P (a mayor dopado, más amplia será la zona de transición), pero llega un momento en que se alcanza el equilibrio y ya no existe más traslado de cargas de un cristal al otro.

Sin embargo, aquí se presenta un problema: esos huecos y electrones que viajaron hacia el material contiguo, dejaron en sus respectivos cristales núcleos con exceso o falta de protones (esto es, átomos ionizados), lo que significa que aparece una pequeña diferencia de potencial (un voltaje) en esa zona de transición. Este campo eléctrico se opone a la difusión de los electrones y huecos en el material adyacente, y es lo que impide que todos los huecos libres del material P se vayan al cristal N y viceversa. Esto significa que en una unión P-N en reposo, se tiene una capa amplia de material P aun con sus portadores positivos intactos, luego aparece la capa de transición neutra, que impide el viaje de nuevos electrones o huecos hacia el material adyacente, y finalmente se tiene una capa de material N con sus electrones libres listos para comenzar a transportar carga. Este equilibrio se consigue cuando el campo eléctrico provocado por los átomos ionizados en los cristales, es suficiente para impedir el traslado de más electrones o huecos de un cristal a otro; esto es, la densidad de carga en las zonas de contacto P y N se contraponen entre sí, creando una zona de no conducción.

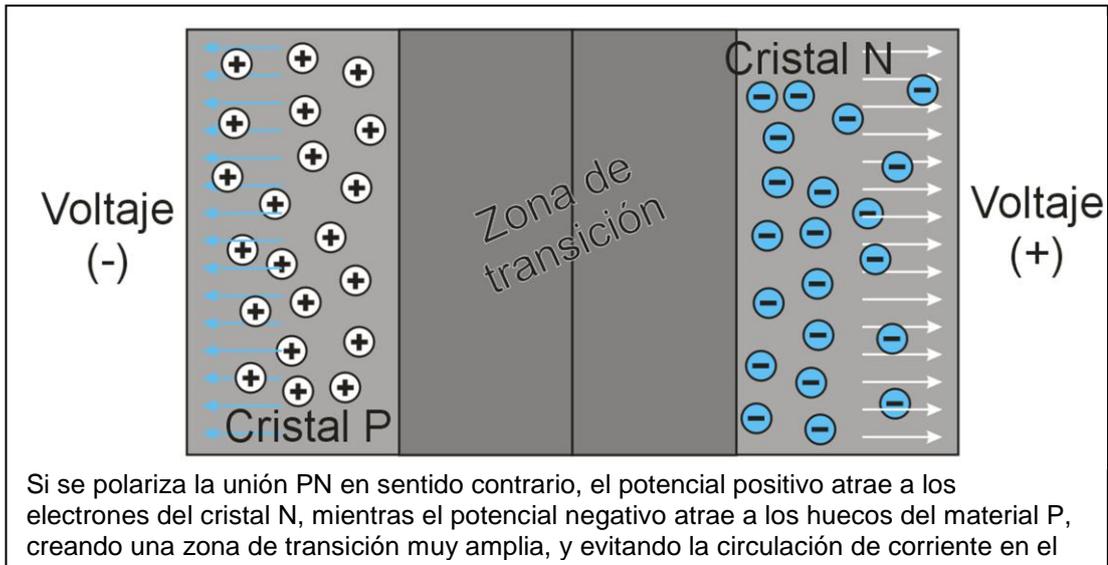


¿Qué sucede si se desea hacer circular una corriente a través de la unión PN? Para lograrlo, es necesario eliminar la condición de reposo y aplicar un estímulo externo que movilice a los portadores de carga internos, siendo generalmente este estímulo un voltaje aplicado entre los extremos P y N del material. Para lograr que los huecos del material P y los electrones del material N “salten” la zona de transición, es necesario aplicar un voltaje mínimo, ligeramente superior al campo eléctrico formado por los átomos ionizados de esa zona intermedia. Este voltaje varía dependiendo del material semiconductor empleado; por ejemplo, para el germanio es de aproximadamente 0.3 voltios, mientras que para el silicio es de alrededor de 0.7 voltios; mientras no se alcance ese voltaje entre los extremos P y N, el material no podrá entrar en conducción; y este voltaje no se puede aplicar en cualquier dirección, tiene que conectarse el extremo positivo de la fuente hacia el cristal P y el negativo hacia el N, ya que de lo contrario el material tampoco dejará fluir la corriente eléctrica.

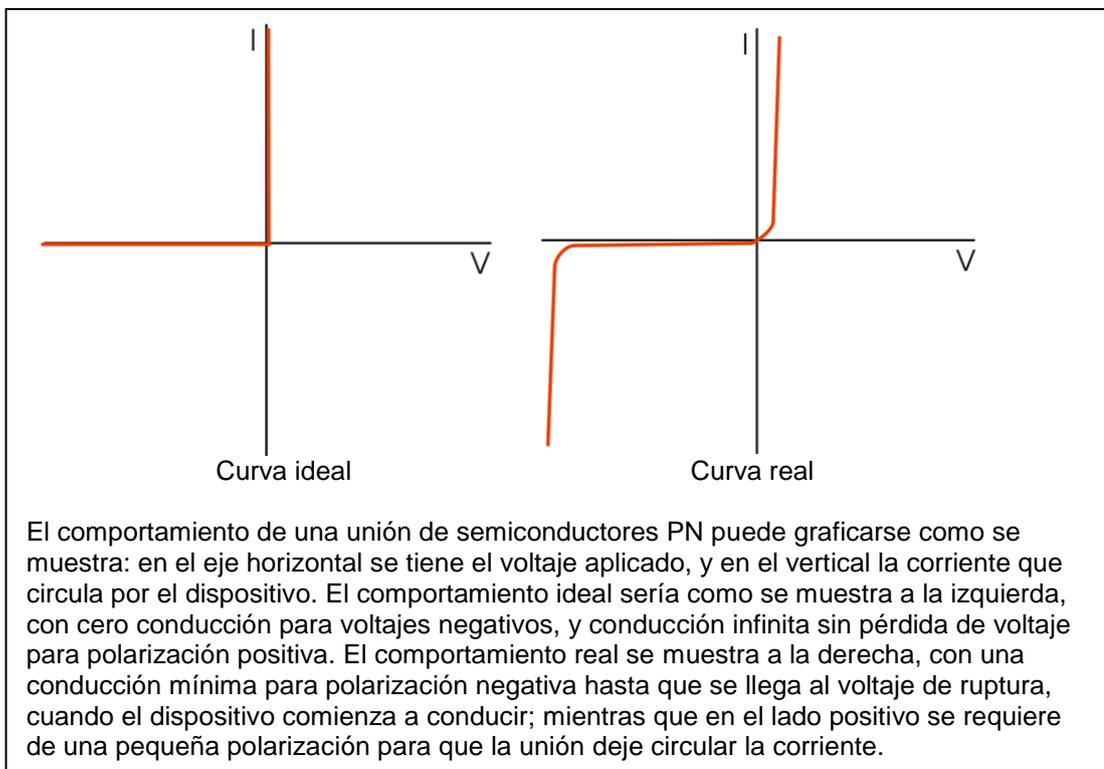


Cuando se aplica un voltaje de modo que el extremo positivo de la fuente vaya a P y el negativo a N, se produce el fenómeno ilustrado en la figura anexa: el potencial positivo de la fuente “empuja” a los huecos del material P hacia el material N, y el potencial negativo aplicado a N “empuja” a los electrones hacia el material P; si el voltaje es suficiente como para “romper” el campo creado en la zona de transición, se establecerá un flujo de huecos desde P hacia N y un flujo de electrones de N hacia P, con lo que la corriente eléctrica podrá fluir desde el extremo positivo hacia el negativo de la fuente externa, estableciéndose un circuito eléctrico.

¿Qué ocurre si se invierte la polaridad del voltaje aplicado? En la figura anexa se muestra qué sucede si se aplica el extremo negativo de la fuente al cristal P y el positivo al N; los huecos del material P serán atraídos por el potencial negativo de la fuente, y los electrones lo serán por el extremo positivo, pero una vez que los huecos y electrones se concentren en los extremos del cristal, ya no habrá más portadores en el resto del material para llevar carga de un extremo a otro, y la zona de transición no conductora en la unión PN crecerá de forma considerable. Esto significa que si se polariza en este sentido una unión PN, no existirá circulación de corriente dentro del material, ya que todos los portadores de carga se concentran en sus extremos y no fluyen de un lado a otro.



Este comportamiento puede representarse en una gráfica de voltaje aplicado contra corriente circulando (gráfica I-V), la cual se muestra enseguida. Se tienen aquí las gráficas ideal y real: se puede observar que en la ideal no importa el valor del voltaje negativo aplicado, la unión PN nunca conducirá, mientras que basta que el voltaje sea ligeramente positivo, para que la unión entre en conducción de forma ilimitada.



En la realidad, el comportamiento es ligeramente distinto: en la zona negativa, por lo general una unión PN sí permite cierta circulación de

corriente, pero es tan pequeña, que para fines prácticos se considera despreciable; sin embargo, si el voltaje aplicado es demasiado alto, ocurre un fenómeno llamado “avalancha”, en el cual los portadores internos de la unión PN comienzan a circular rompiendo el potencial opuesto de la zona de transición. Esto normalmente implicaría la destrucción del material, aunque el fenómeno de avalancha también puede aprovecharse dopando cuidadosamente los materiales P y N.

En el extremo positivo del voltaje aplicado, se puede observar que la unión PN no comienza a conducir de inmediato, sino que es necesario aplicar un voltaje de polarización capaz de cancelar el campo eléctrico intrínseco de la zona de transición. Una vez alcanzado este voltaje, el material comienza a conducir, pero entre más corriente conduce, mayor voltaje se necesita para mantener ese flujo.

De este modo, se tienen un par de comportamientos muy peculiares de una unión PN: puede funcionar como un interruptor que sólo deje pasar corriente cuando el voltaje aplicado sea en un cierto sentido, bloqueándola cuando se polarice en sentido contrario; esto es, sirve para rectificar un voltaje a su entrada. Por otra parte, la imagen de un par de capas metálicas con carga eléctrica, separadas por una zona aislante, recuerda de inmediato la estructura básica de un condensador, y de hecho, las uniones PN también poseen una capacitancia intrínseca, la cual se puede aprovechar para ciertos dispositivos. Todo esto se detallará en la siguiente unidad al describir a los diodos.

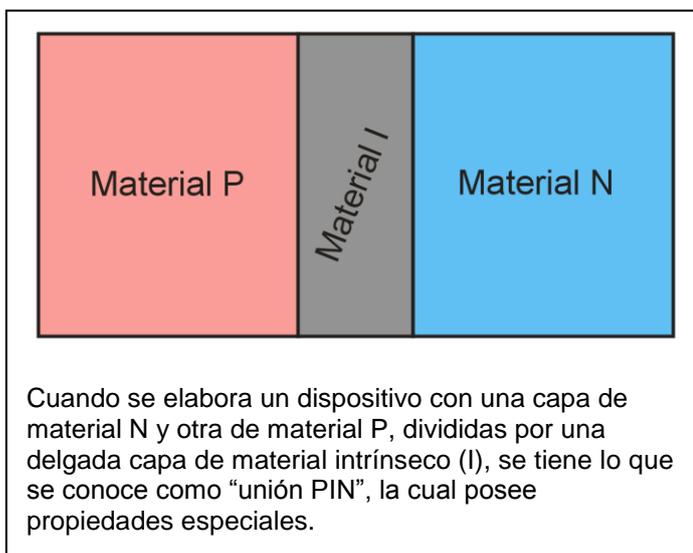
## ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 2D

- a) ¿Qué sucede cuando se unen un material P y un material N?
- b) ¿Cómo se le denomina a la zona de no conducción entre ambos materiales?
- c) ¿Qué es lo que impide que los electrones del material N sigan viajando hacia el material P?
- d) ¿Qué ocurre si se aplica un voltaje positivo al cristal P y uno negativo al cristal N?
- e) ¿Qué sucede cuando se invierte la polaridad?

f) ¿Para qué sirve la gráfica I-V?

## 2.5 UNIÓN PIN

Es importante también mencionar un tipo de unión muy particular, que fue la que se utilizó cuando comenzaron a producirse los primeros dispositivos electrónicos semiconductores comerciales; se trata de la unión PIN, que son las siglas de P-intrínseco-N, y que significa que se tiene un material que posee una zona P en un extremo, una zona N en el opuesto, pero en su centro se tiene una delgada capa de material que no es ni P ni N, sino que es cristal sin dopaje o "intrínseco" (I). Este tipo de uniones fueron comunes al principio de la electrónica, ya que el proceso de fabricación implicaba hacer delgadas láminas de silicio o germanio, y colocarlas en una cámara donde se aplicaba vapor de arsénico o boro para inducir las impurezas, pero esto provocaba que a veces se creara precisamente una estructura P-I-N, en lugar de una unión PN estricta. A continuación se indican las características especiales de este tipo de unión.

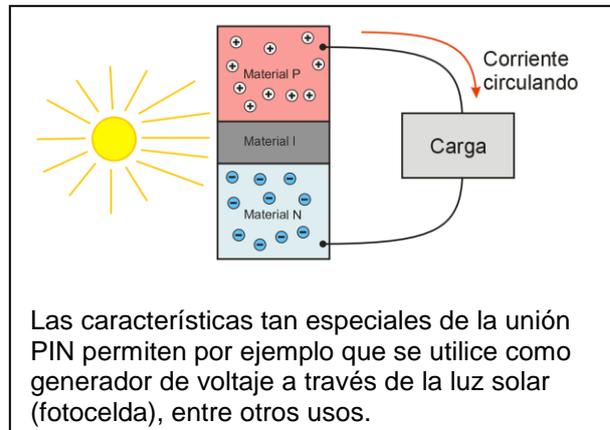


En la figura anexa se muestra: un material con una capa de cristal tipo P, una capa de material sin dopar, y una capa de material N. En este caso, se produce un fenómeno similar al explicado en la unión PN, de huecos viajando hacia el material N y electrones

viajando hacia el P, pero en este caso, al tener una capa de cristal sin dopar entre ambos tipos de material, la zona de transición se hace mucho más amplia. Esto crea una concentración de cargas eléctricas en los extremos de la unión, la cual se encuentra en estado inestable, dispuesta a saltar ante cualquier estímulo externo.

Éste puede darse de distintas formas: un aumento en la temperatura o, de forma más común, una exposición a una luz brillante. Cuando sucede

esto, los portadores internos de los materiales P y N se incrementan y tratan de alcanzarse uno al otro, pero al existir una zona de transición tan amplia, no pueden viajar de forma directa a través de la unión P-I-N; pero ¿qué ocurre si se coloca un conductor externo entre los materiales P y N?, sucederá que los huecos de P tratarán de llegar a N a través de ese conductor, lo mismo que los electrones de N tratarán de alcanzar a P. Esto



significa que se establece una corriente eléctrica entre ambos, producida por la excitación que provoca la exposición a la luz de la unión P-I-N; y este es precisamente el principio básico de operación de las fotoceldas. Este fenómeno también se aprovecha en algunos otros dispositivos electrónicos.

De este modo, el estudio de los materiales semiconductores y su funcionamiento interno resulta fundamental para comprender cómo trabajan los distintos dispositivos electrónicos, lo cual se describirá a partir de la siguiente unidad.

## ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 2E

- ¿Qué significado tienen las siglas PIN?
- ¿Por qué eran comunes estas estructuras en los primeros procesos de fabricación de semiconductores?
- ¿Qué sucede si se da una excitación externa a una unión PIN?
- ¿Por qué es necesario colocar un conductor externo entre los extremos P y N de esta estructura?
- ¿Cómo se le llama al dispositivo semiconductor que convierte la luz en electricidad?

## AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Por qué se le denominan “semiconductores” a los materiales base para la electrónica?
2. ¿Cuál fue el primer semiconductor descubierto?
3. ¿Qué es el modelo de bandas de energía?
4. ¿Cuáles son los elementos más empleados en la electrónica moderna?
5. Menciona la diferencia entre un semiconductor intrínseco y uno extrínseco:
6. Menciona las características especiales de los materiales tipo “P” y tipo “N”:
7. ¿Qué sucede cuando se une un material P con uno N?
8. ¿Qué ocurre si se aplica un voltaje (+) en el extremo P y uno (-) en el extremo N?
9. ¿Qué pasa si se invierte la polaridad?
10. ¿Qué tiene de especial la unión PIN y para qué puede servir?

## RESPUESTAS

1. Porque pueden comportarse como conductores o como aislantes, dependiendo de características internas y externas.
2. El silicio.
3. Es un modo de visualizar rápidamente si un material es aislante, semiconductor o conductor, trazando sus bandas de conducción, prohibida y valencia.
4. El silicio y el germanio.
5. El intrínseco se encuentra en la naturaleza tal cual es, y el extrínseco requiere de manipulación humana para potenciar sus propiedades semiconductoras.
6. En los materiales tipo N, por el elemento usado como dopaje se tienen algunos electrones “libres”, mientras que en el material P, por falta de electrones, se tienen “huecos”; ambos tipos de portadores son capaces de transportar corriente eléctrica, si se dan las condiciones adecuadas.
7. Se establece un intercambio de electrones desde N hacia P hasta alcanzar una condición de equilibrio.
8. El campo eléctrico entre (+) y (-) obliga a los portadores dentro de los cristales a desplazarse, estableciendo una corriente eléctrica.
9. El campo eléctrico tiende a concentrar a los portadores de los cristales en sus extremos, impidiendo el flujo de corriente.

10. Que puede usarse para convertir alguna excitación externa en energía, como en el caso de las fotoceldas.

## RESPUESTAS A LAS ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE

### *Actividad de aprendizaje 2A:*

- a) El carbono o grafito.
- b) Que conduce mejor cuando está iluminado que en la oscuridad.
- c) Cuatro electrones.
- d) Comparten sus electrones con los átomos adyacentes logrando estabilidad atómica.
- e) Banda de conducción, banda prohibida y banda de valencia.
- f) Silicio: 1.1 eV; germanio: 0.7eV

### *Actividad de aprendizaje 2B:*

- a) Es aquel que tiene propiedades semiconductoras tal y como se encuentra en la naturaleza.
- b) Son aquellos producidos de forma artificial, esto es, que necesitan de algún proceso industrial adicional para potenciar sus propiedades semiconductoras.
- c) Los semiconductores extrínsecos.
- d) Boro, indio, fósforo y arsénico.
- e) Los dos primeros sólo tienen tres electrones en su órbita de valencia, y los dos segundos poseen cinco electrones

### *Actividad de aprendizaje 2C:*

- a) Que debido a sus impurezas, poseen electrones algunos libres en sus órbitas de valencia.
- b) Que debido a sus impurezas, tienen “huecos” o electrones faltantes en sus órbitas de valencia.
- c) Los electrones libres comienzan a circular de un átomo al siguiente, impulsados por un voltaje externo.
- d) Los portadores positivos reciben el nombre de “huecos”, porque implican la ausencia de un electrón.

*Actividad de aprendizaje 2D:*

- a) Los electrones libres de N comienzan a viajar a P, hasta lograr una condición de equilibrio.
- b) Zona de transición.
- c) El campo eléctrico formado por los iones de los átomos que aceptaron o cedieron un electrón.
- d) El potencial positivo empuja los huecos de P hacia N, mientras que el potencial negativo empuja a los electrones de N hacia P, estableciéndose una corriente eléctrica dentro del material.
- e) Los huecos de P son atraídos por el potencial negativo, mientras que los electrones de N son atraídos por el potencial positivo, concentrándose ambas cargas en los extremos, y creando una zona de no conducción entre ambos cristales.
- f) Para ver de forma rápida el comportamiento de una unión P-N cuando se varía el voltaje aplicado entre sus extremos.

*Actividad de aprendizaje 2E:*

- a) Material P – Material Intrínseco – Material N
- b) Porque originalmente se aplicaban gases de boro y arsénico a delgadas laminillas de silicio o germanio, dopando ambas caras y quedando una ligera capa sin dopar al centro.
- c) Los huecos de P y los electrones de N tratan de alcanzar el material contrario, pero no pueden hacerlo por la presencia de la capa I.
- d) Para que los portadores de carga de P y N puedan alcanzar al cristal contrario.
- e) Fococelda.

## UNIDAD 3

### EL DIODO SEMICONDUCTOR Y MODELOS

#### OBJETIVO

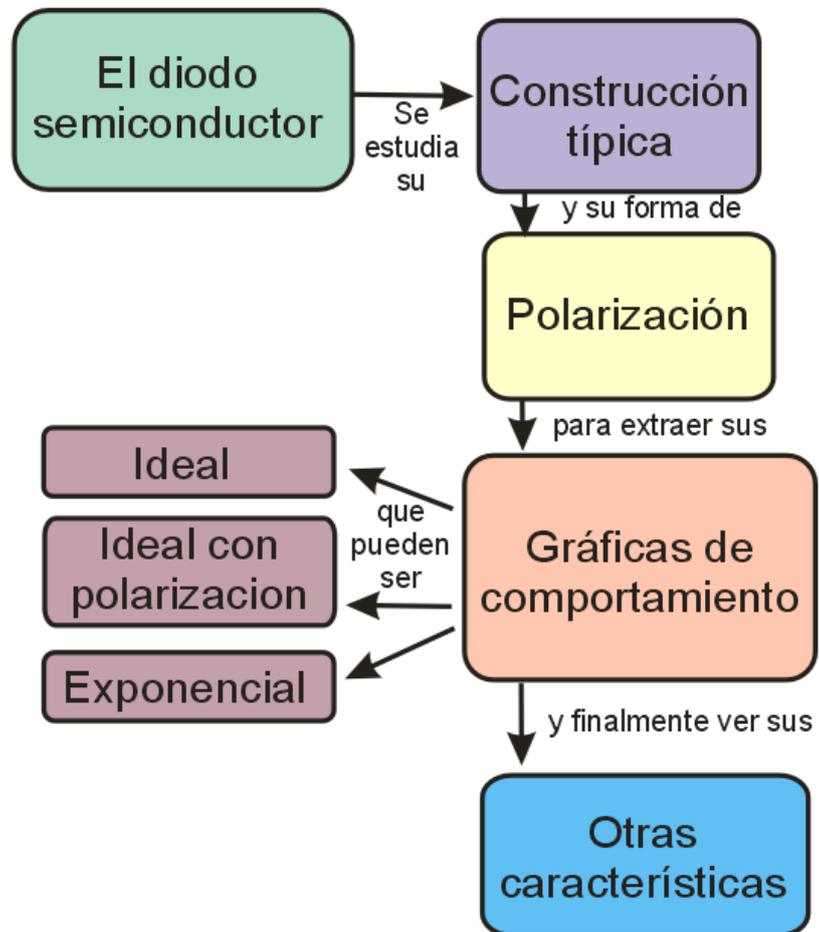
El estudiante conocerá la estructura básica de un diodo semiconductor para distinguir su principio de operación, comportamiento ideal y real, los modelos que se han establecido para su estudio y las gráficas que representan su funcionamiento.

#### TEMARIO

3.1 DIODO SEMICONDUCTOR

3.2 MODELOS: IDEAL, EXPONENCIAL, DE SEÑAL GRANDE Y DE SEÑAL PEQUEÑA

# MAPA CONCEPTUAL

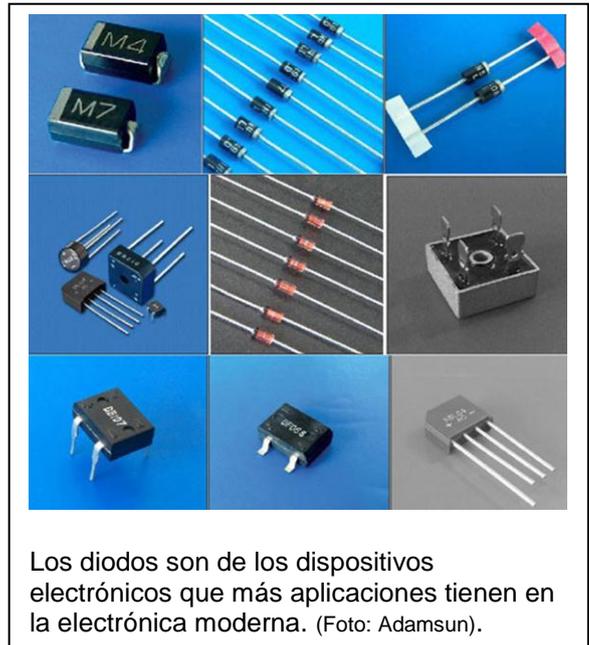


## INTRODUCCIÓN

Ahora que se tienen las bases sobre el principio de funcionamiento de los materiales semiconductores, y específicamente de lo que ocurre cuando se une un cristal tipo P con uno tipo N, se puede iniciar el estudio de los dispositivos electrónicos básicos más conocidos, y que han resultado ser una de las estructuras más flexibles y funcionales descubiertas por el ser humano: el diodo semiconductor.

Aunque en un principio la principal aplicación que se buscaba en un diodo era su capacidad de sólo conducir electricidad si se polarizaba en la dirección correcta (modo rectificador), en la actualidad existe una gran variedad de diodos que se utilizan en múltiples aplicaciones dentro de la industria electrónica. Esto significa que conocer a profundidad el principio de operación de los diodos resulta fundamental para la comprensión de diversos circuitos electrónicos complejos.

Ese es precisamente el objetivo de esta unidad: mostrar a detalle el principio de operación de un diodo semiconductor, para comenzar a explorar el mundo de los dispositivos electrónicos, su comportamiento y su aplicación.



### 3.1 DIODO SEMICONDUCTOR

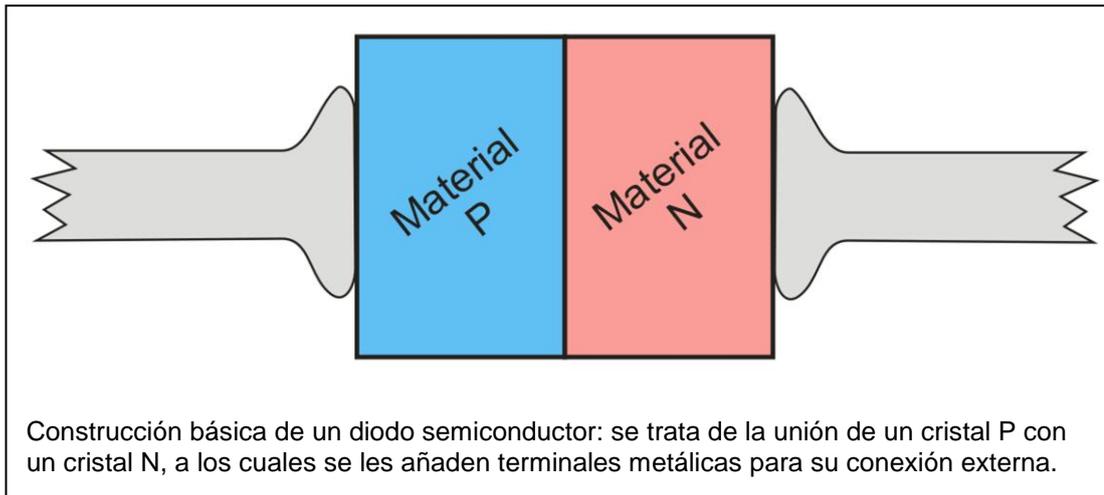
Como se mencionó en unidades anteriores, una de las aplicaciones más necesarias en los primeros tiempos de la electrónica, era la obtención de un dispositivo que fuera capaz de conducir la corriente eléctrica cuando se le aplicara un voltaje en cierto sentido, pero que la bloqueara si la polarización cambiaba. Este comportamiento era indispensable para la correcta recepción y demodulación de las señales de radio transmitidas en amplitud modulada, así que toda la industria de la radio dependía de que se desarrollara un dispositivo que tuviera ese comportamiento, y que al mismo tiempo fuera lo más económico y confiable posible.

En un principio se utilizaban los diodos de vacío, que eran grandes, voluminosos y poco eficientes; más tarde se desarrollaron los diodos de galena, más pequeños pero que tenían en ocasiones un comportamiento algo errático; sin embargo, con el desarrollo de los materiales semiconductores, se logró por fin construir un dispositivo que sólo condujera cuando se le aplicaba voltaje en su polaridad correcta, y que al mismo



tiempo era muy económico y de operación confiable: el diodo semiconductor.

Un diodo semiconductor es una unión de un material extrínseco tipo P con otro material extrínseco tipo N. El peculiar comportamiento de esta unión se estudió en la unidad anterior, así que ahora sólo se dará un repaso rápido.



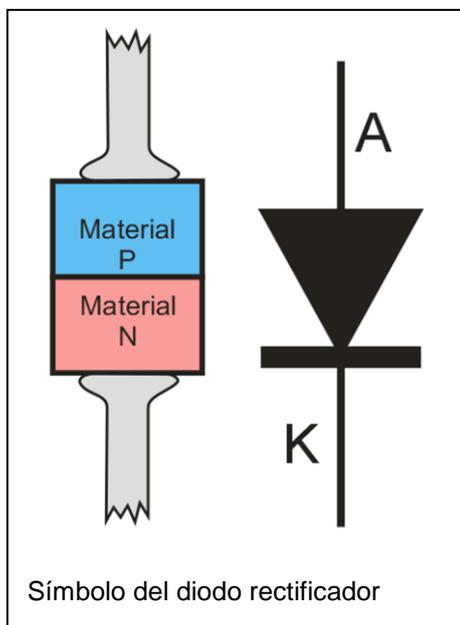
En la figura anexa se presenta un resumen del comportamiento de una unión P-N: si el dispositivo está en modo de reposo, los electrones del material N cercanos a la unión se desplazan para tratar de cubrir los huecos en el material P; esto provoca la aparición de un campo eléctrico formado por los iones de los átomos que han perdido o ganado un electrón, y este campo impide la migración de más electrones desde N hacia P, formando lo que se conoce como “zona de transición”, la cual al no poseer portadores libres, se comporta como un aislante.

Resumen del comportamiento de una unión P-N en reposo y con voltaje externo aplicado en ambas polaridades.		
		Unión de cristales semiconductores P-N en condición de reposo.
		Unión P-N con voltaje externo aplicado: polaridad (+) hacia P y polaridad (-) hacia N.
		Unión P-N con voltaje externo aplicado: polaridad (-) hacia P y polaridad (+) hacia N.

Enseguida se observa qué sucede cuando se aplica un voltaje externo al dispositivo con la polaridad positiva (+) hacia el cristal P y la negativa (-) hacia el cristal N. En este caso, el campo positivo en P “empuja” a los huecos hacia N, y una vez ahí, son atraídos hacia el campo negativo aplicado en tal cristal; lo mismo sucede con los electrones de N: son repelidos por el campo aplicado al cristal, y una vez que alcanzan el material P, son atraídos por la polaridad aplicada a esa capa. Esto significa que con este sentido de polarización, sí existe conducción de electricidad dentro del dispositivo, y por tal razón, se dice que el diodo está conectado en “directa”.

Finalmente se observa qué sucede cuando se invierte la polaridad: en este caso, los electrones de N se ven atraídos por la polaridad positiva aplicada, mientras que los huecos de P se atraen con la polaridad negativa externa. Esto despoja de portadores la región central del dispositivo (el punto de unión), creando una capa aislante bastante amplia, e impidiendo el flujo de corriente en su interior. En este caso, se dice que el dispositivo está polarizado en “inversa”.

Este es el principio básico de operación de un diodo rectificador: cuando se polariza de tal modo que a su extremo P llegue un voltaje positivo



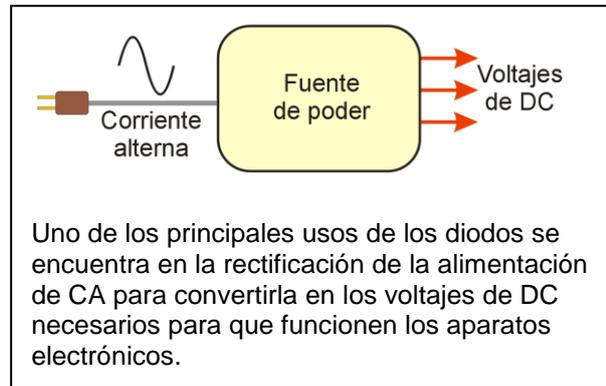
y a su extremo N llegue un voltaje negativo, el dispositivo entrará en modo de conducción, permitiendo el flujo de energía eléctrica; por el contrario, si la polaridad se invierte, el dispositivo se comporta como un aislante, impidiendo el paso de la corriente. Debido a que en las válvulas de vacío que hacían esta misma función se había bautizado a las terminales de este dispositivo como “cátodo” y “ánodo”, estos nombres también se aplicaron al diodo semiconductor, denominando como

“ánodo” (A) al extremo que corresponde al cristal P, y “cátodo” (K) al extremo del cristal N.

Para representar fácilmente a este dispositivo en los diagramas electrónicos, se le asignó un símbolo muy simple, que se muestra en la

figura anexa: se puede observar que parece una punta de flecha que indica el flujo normal de corriente si el dispositivo está polarizado en directa, con una línea en el vértice de la punta. En este caso, la base del triángulo corresponde al ánodo, mientras que la línea en el vértice corresponde al cátodo del dispositivo.

¿Cuál es la principal aplicación de un diodo semiconductor? Como ya se ha mencionado, se usan principalmente para rectificar una señal, esto es, dejarla pasar sólo cuando la polaridad sea la adecuada, y bloquearla



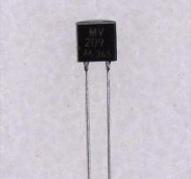
si se invierte. Esto resulta fundamental, por ejemplo, para alimentar los aparatos electrónicos en los hogares, ya que como es bien sabido, la energía eléctrica llega en forma de corriente alterna o CA, pero los dispositivos electrónicos requieren de corriente directa o CD para funcionar; esto significa que una de las primeras etapas que se encuentra en prácticamente todos los aparatos electrónicos, es un bloque de conversión de CA a CD, y en él los diodos tienen un papel muy importante, tomando por un extremo la corriente de polaridad alterna y expidiendo a su salida una corriente con polaridad directa. Por eso, a este tipo de diodos se les denomina “diodo rectificador”.

Sin embargo, y como ya se ha indicado, la estructura del diodo ha resultado extremadamente flexible, al grado que se han encontrado un gran número de variantes con distintos comportamientos y diversas aplicaciones. En la tabla de la siguiente página se muestran algunos de los diodos más empleados en la industria electrónica moderna.

En la actualidad, prácticamente es imposible encontrar algún aparato electrónico que no utilice diodos de alguna u otra forma. Se usan para la rectificación de señales de CA, como luces indicadoras para señalar que el equipo está encendido y funcionando, para estabilizar los voltajes que se aplican a circuitos integrados, como capacitores variables en procesos de sintonía, en fin, sus aplicaciones son muy variadas, y debido al desarrollo de

dispositivos de potencia, se fabrican diodos capaces de manejar desde unos cuantos miliamperes (para circuitos de muy baja señal), hasta decenas o cientos de amperes, para procesos industriales o de distribución de energía eléctrica. Sin duda, el diodo es uno de los dispositivos semiconductores más usados en la actualidad.



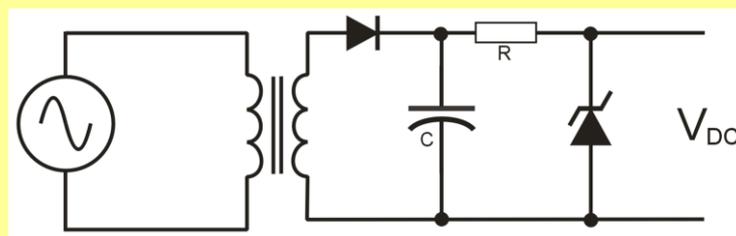
Tipos de diodos más comunes en aplicaciones electrónicas			
Diodo	Símbolo	Aspecto típico	Características
Rectificador			Es el diodo más simple, y sirve para rectificar una señal con polaridad alterna a su entrada, logrando una salida con una sola polaridad.
Zener			Funciona como regulador de voltaje, aprovechando el fenómeno de avalancha cuando se polariza en inversa.
LED			Emisor de luz, se usa como indicador o visualizador, aunque cada vez tiene más aplicaciones en telecomunicaciones o para recuperar información almacenada por métodos ópticos.
Varactor			Diodo con capacitancia variable dependiendo de su polarización, muy utilizado en procesos de sintonía y recepción de señales de radio.
Fotodiodo			Receptor de luz que conduce o no dependiendo de la iluminación recibida; muy usado en sistemas de control o en telecomunicaciones.
Túnel			Dispositivo que posee en su curva característica una zona de "resistencia negativa", lo que lo hace ideal para ciertas aplicaciones de radiofrecuencia.
PIN			Diodo conmutador, se usa para activar o desactivar bloques dentro de circuitos electrónicos; muy usado en procesos de sintonía de señales de radio.
Shottky			Diodo de muy alta velocidad de recuperación, empleado para aplicaciones donde es necesario rectificar señales de muy alta frecuencia.

### El concepto de simbología electrónica

Prácticamente desde que comenzaron a construirse los primeros circuitos electrónicos, fue conveniente contar con un lenguaje gráfico propio, que pudiera representar, de forma rápida y fácil de interpretar, los distintos dispositivos que forman un circuito. Por tanto, se desarrolló una simbología electrónica, que representa con un símbolo característico a cada uno de los componentes usuales en esta rama de la tecnología. En la siguiente tabla se muestran algunos de estos símbolos:

Componente	Símbolo	Componente	Símbolo
Conductor		Resistencia	
Batería		Condensador	
Referencia de tierra		Condensador electrolítico	
Alimentación CA		Diodo común	
Bobina		Diodo zener	
Transformador		LED	

Con ellos se pueden representar diversos circuitos electrónicos; por ejemplo, una fuente simple que toma el voltaje de CA de la línea de alimentación y lo convierte en voltaje de CD podría quedar así:



Este es un conocimiento básico para cualquier estudiante de electrónica,

### ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 3A

- a) ¿Qué tipo de diodos se usaron en los primeros años de la industria radiofónica?
- b) ¿Cómo se construye un diodo semiconductor típico?
- c) ¿Cómo se denominan las terminales de este dispositivo?
- d) ¿Qué polaridad debe tener el voltaje externo para que un diodo entre en conducción?
- e) Dibuja el símbolo del diodo:
- f) ¿Cuál es uno de los usos más frecuentes de los diodos?
- g) Menciona por lo menos tres tipos de diodos que conozcas:

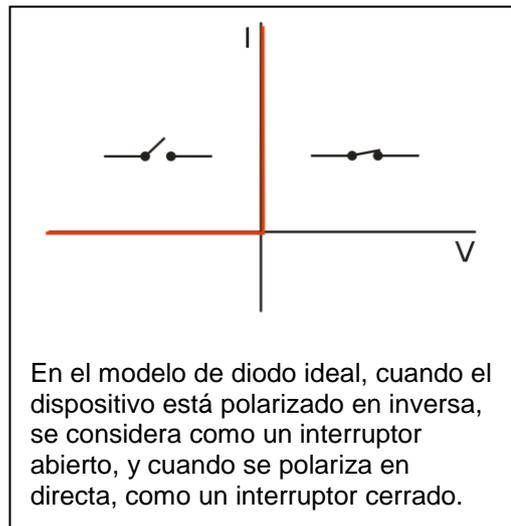
#### 3.2 MODELOS: IDEAL, EXPONENCIAL, DE SEÑAL GRANDE Y DE SEÑAL PEQUEÑA

Cuando se diseña un circuito electrónico, se debe considerar el comportamiento de un dispositivo, para saber cómo influye en la operación total del conjunto. Existen distintas formas de visualizar la forma como se comporta un diodo rectificador, cada una con ventajas y desventajas en comparación a las demás. A continuación se describirán algunas de ellas.

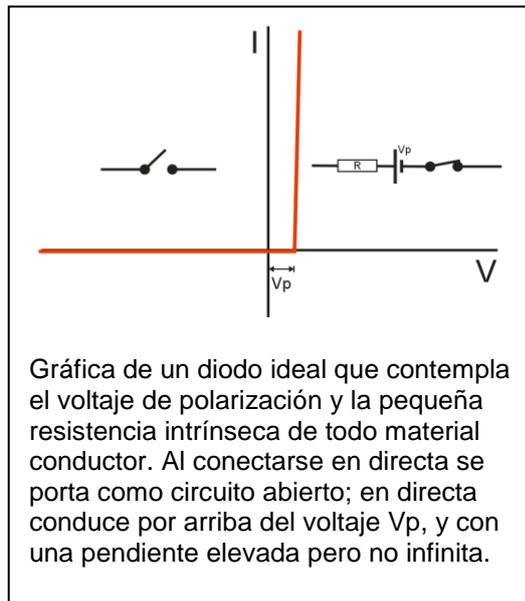
La más simple de todas, sin duda es considerar al diodo como un dispositivo ideal, que bloquea por completo la circulación de corriente cuando se polariza en inversa, pero la deja pasar de forma total cuando se polariza en forma directa. En la figura anexa se presenta una gráfica de este modelo ideal.

Si bien hay ocasiones en las que sí se puede considerar al diodo

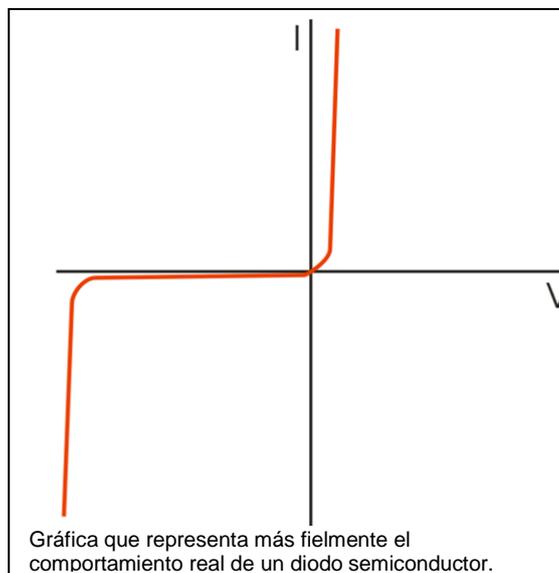
como un dispositivo ideal, en la realidad este componente se porta de manera ligeramente distinta, y existen algunos aspectos operativos que hay que tomar en cuenta, sobre todo si se trabaja con señales muy grandes o con señales muy pequeñas. Esto es especialmente crítico cuando se habla de señales que caen en el rango de polarización de un diodo, esto es, de



menos de 0.3V en el caso de los dispositivos de germanio, o de menos de 0.7V en el caso de los de silicio.



Ante este problema, se diseñó un segundo modelo de diodo ideal, donde se considera el voltaje de polarización del dispositivo. En la imagen anexa se muestra esta gráfica; es obvio que el diodo no conduce en absoluto ni en su porción de polarización negativa, ni antes de alcanzar su voltaje de polarización, pero cuando se alcanza este voltaje, el dispositivo comienza a conducir con una pendiente muy pronunciada (de hecho, la línea es casi vertical). Este modelo describe de forma más precisa el comportamiento de un diodo, pero no es un reflejo fiel de la realidad.



La curva real que muestra el comportamiento de este dispositivo se observa en la gráfica ubicada a un costado. Es notorio que en su porción negativa, el diodo prácticamente no conduce nada de electricidad, sólo una especie de “corriente residual” transportada por los portadores minoritarios dentro del material

semiconductor; sin embargo, si la polarización negativa crece demasiado, el dispositivo puede entrar en un modo de conducción forzado denominado “avalancha”, donde se pierde su capacidad aislante, y sí existe flujo de electricidad. En diodos rectificadores, se busca que este voltaje de avalancha sea lo más elevado posible, muy por encima de los voltajes que maneje normalmente un circuito, pero para ciertas aplicaciones, y manipulando cuidadosamente el porcentaje de dopado de los cristales del diodo, se puede regular el valor de esta tensión de ruptura, para que siempre ocurra a un voltaje predeterminado. Este es precisamente el principio de operación de los diodos zener, que como ya se mencionó, se han convertido en una de las referencias de voltaje más empleadas en la industria electrónica.



Al pasar a la porción positiva de la curva, se observa que, cuando se conecta en directa un diodo, antes de alcanzar su voltaje de polarización sí existe un pequeño flujo de corriente, pero para fines prácticos puede considerarse también despreciable. Cuando el voltaje comienza a alcanzar el valor de polarización, esta corriente comienza a subir de forma cada vez más pronunciada, y cuando por fin se alcanza el voltaje de conducción, la corriente puede aumentar muy rápidamente sin que esto implique un crecimiento significativo en el voltaje aplicado.

Este comportamiento de inmediato hace recordar la gráfica de una

$$I = I_S \left( e^{\frac{V - IR}{nV_T}} - 1 \right)$$

I = Corriente que circula por el diodo.  
 I<sub>S</sub> = Corriente inversa de saturación.  
 V = Voltaje aplicado.  
 R = Resistencia intrínseca del diodo.  
 V<sub>T</sub> = Potencial térmico.  
 n = Factor de idealidad.

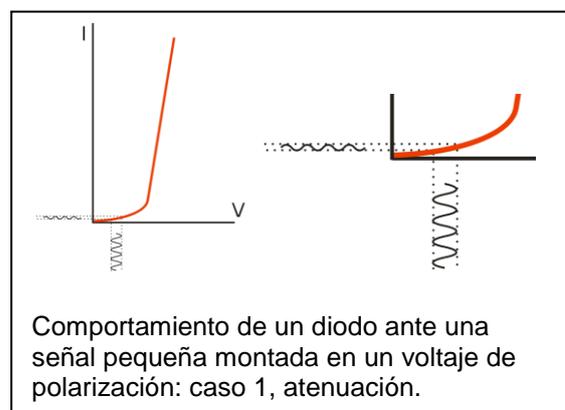
ecuación exponencial, y por eso se ha desarrollado un modelo que aprovecha esta similitud para representar de la forma más fiel posible el comportamiento de un diodo real. La ecuación que se usa para representar esta gráfica

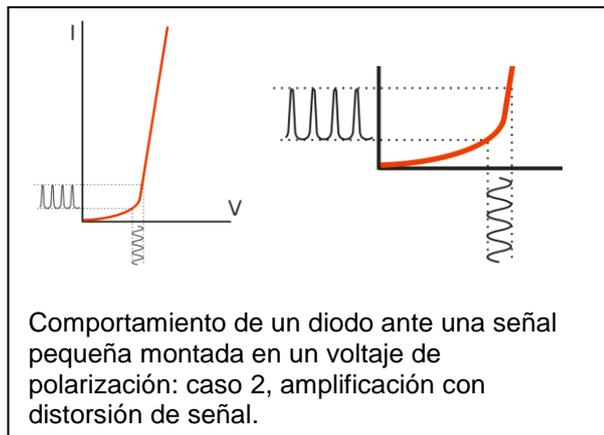
es la que se muestra a un lado, con su correspondiente descripción, indicando lo que significa cada uno de los términos de ésta. Cuando se usa esta fórmula para hacer la gráfica de un diodo, se obtiene una curva muy parecida a la de un dispositivo real, así que este modelo exponencial es el que se considera que mejor representa las características particulares de un diodo real.

Si se diseñan circuitos de muy alta precisión, será necesario que se use esta fórmula para hacer los cálculos correspondientes, pero para aplicaciones de tipo normal, el modelo ideal que sí contempla el voltaje de polarización del diodo suele ser suficiente. Precisamente por esta razón, cuando a un diodo se le aplica una señal de gran tamaño, se puede usar como modelo el que se mostró anteriormente: la gráfica ideal a la que se le ha añadido el voltaje de polarización y la resistencia intrínseca del dispositivo. En términos generales, a este modelo se le denomina “de señal grande”, y si bien no representa el comportamiento real del dispositivo, sí es lo suficientemente parecido como para que las diferencias entre los cálculos realizados y la realidad sean despreciables.

Sin embargo, aquí aparece un problema muy importante: ¿qué sucede cuando se aplica a un diodo un cierto voltaje de polarización, y éste trae “montada” una señal de valor muy pequeño? Esto puede representar algunos problemas, dependiendo del valor del voltaje de polarización y del valor de la señal asociada.

En la figura anexa se muestra el primer caso: un voltaje de polarización muy bajo, de modo que la señal montada en él cae dentro de la parte de baja conducción de la curva (conviene descartar por el momento la parte negativa de la curva). Es obvio que en este caso, las variaciones de voltaje a la entrada provocarán una variación muy pequeña en la corriente que circula en el diodo, obteniéndose para fines prácticos una atenuación de la señal.

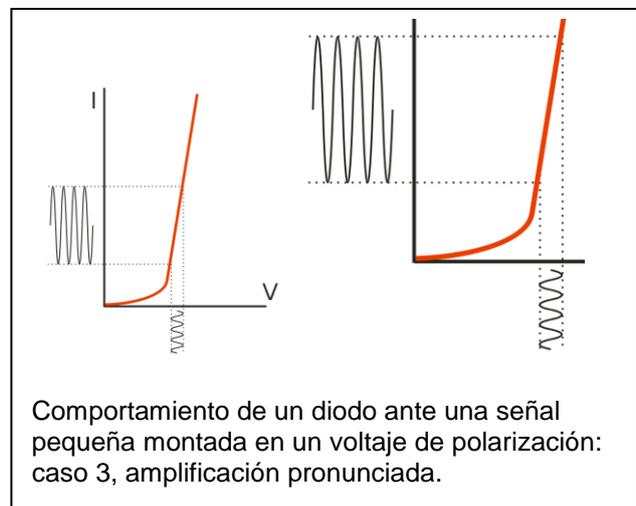




Si se aumenta el voltaje de polarización, de modo que ahora la señal anexa caiga en la región donde el diodo comienza a conducir, se tiene que ahora una pequeña variación del voltaje a la entrada se refleja como un cambio más pronunciado en la

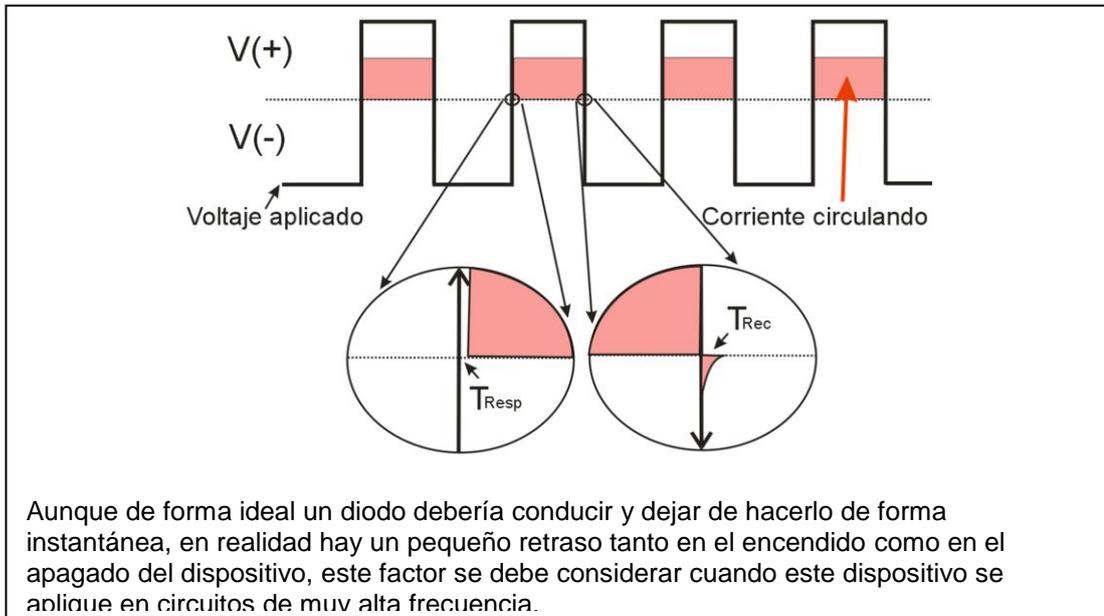
corriente circulando, pero debido a que la señal cae en una porción no lineal de la curva, la corriente reflejada estará bastante distorsionada, como se observa en la figura anexa.

Finalmente, si el voltaje de polarización crece un poco más, ahora la señal cae en la parte lineal de la curva donde el diodo ya está en conducción, lo que significa que un cambio de voltaje muy pequeño en los extremos del diodo se refleja como cambios muy



pronunciados en la corriente interna del dispositivo, lográndose una amplificación considerable.

Esto refuerza algo que ya se había mencionado: si se utilizan diodos en un circuito que maneje señales de muy baja amplitud, es necesario tomar las precauciones necesarias al momento de efectuar los cálculos correspondientes, ya que de no hacerlo, en lugar de amplificar una señal, se podría atenuar o distorsionar. Es por ello que cuando hay señales de baja amplitud involucradas, lo mejor es utilizar el modelo exponencial del diodo, ya que es el que mejor refleja el comportamiento real de este dispositivo; y es por esto que, de manera general, se considera que el modelo ideal con polarización es el que se debe utilizar cuando se hagan cálculos con señales grandes, pero cuando se involucren señales pequeñas, es mejor utilizar el modelo exponencial.



Antes de concluir el tema de los diodos, conviene mencionar otro aspecto importante de su operación: cuando a un dispositivo de estos se le aplica una señal de voltaje alterno a su entrada, en el momento en que esta señal pasa de polaridad directa a polaridad inversa, el diodo tarda un instante en reaccionar, por lo que estrictamente hablando, el diodo permanece en modo de conducción por un breve instante después de que la polaridad ya se ha invertido. A este pequeño lapso se le conoce como “tiempo de recuperación”, y la mayoría de las veces es tan breve que puede ser despreciado; sin embargo, cuando se aplica un diodo en condiciones de muy alta frecuencia, este factor comienza a influir en el comportamiento general del circuito, y hay que tomarlo en cuenta.

De igual forma, cuando un diodo entra en conducción, existe un pequeño retraso entre el momento en que aparece el voltaje directo, y el momento en que el dispositivo comienza a conducir. A este lapso se le denomina “tiempo de respuesta”, y al igual que en el caso anterior, la mayoría de las veces se puede despreciar y considerar que el diodo responde de forma instantánea; sólo cuando el componente se aplique a señales de muy alta frecuencia, este factor comienza a ser importante, y hay que considerarlo en los cálculos respectivos.

Ahora que se conoce en detalle la operación del más sencillo de los dispositivos semiconductores, ha llegado la hora de pasar a componentes

más complejos, por lo que en la siguiente unidad se estudiarán los transistores.

### ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 3B

- a) ¿Cómo es el modelo ideal de un diodo?
- b) ¿Cómo es el modelo ideal con voltaje de polarización?
- c) ¿Por qué se dice que el modelo exponencial es el más fiel de todos?
- d) ¿Qué fenómeno aprovechan los diodos zener para funcionar como referencia de voltaje?
- e) ¿Cuál de los anteriores modelos se usa en caso de señales grandes?
- f) ¿Qué sucede cuando a un diodo se le aplica una señal de valor pequeño?
- g) ¿Cuándo hay que tomar en cuenta los tiempos de recuperación y respuesta de los diodos?

## AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Cómo se construye un diodo semiconductor?
2. ¿Por qué se les dio el nombre de “ánodo” y “cátodo” a sus terminales?
3. ¿Cómo debe estar polarizado un diodo para conducir? ¿Qué sucede si se invierte la polaridad?
4. ¿Para qué sirve un diodo varactor? ¿Y un fotodiodo?
5. Dibuja las curvas de modelo ideal, ideal con polarización y exponencial de un diodo:
6. ¿Cuál de ellas se utiliza cuando se aplica el diodo con señales grandes?
7. Escribe la fórmula del modelo exponencial de un diodo:
8. ¿Qué ocurre si se aplica una señal muy pequeña a un diodo en la zona donde apenas está entrando en conducción?
9. ¿Se puede usar un diodo como amplificador de señal?
10. ¿Cómo se le denomina al tiempo que tarda un diodo en comenzar a conducir? ¿y para apagarse?

## RESPUESTAS

1. Con la unión de un cristal semiconductor tipo P con un cristal semiconductor tipo N.
2. Porque así se llamaban las terminales de los diodos de vacío.
3. Con el voltaje positivo en el ánodo y el negativo en el cátodo. Si se invierte la polaridad, el diodo no conduce.
4. El varactor funciona como capacitancia variable dependiendo de su polarización, y el fotodiodo como detector de presencia de luz.
5. Evaluar los dibujos presentados.
6. La gráfica del diodo ideal con polarización.

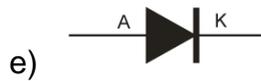
7. 
$$I = I_s \left( e^{\frac{V-IR}{nV_T}} - 1 \right)$$

8. Se produce una amplificación, pero se distorsiona la salida.
9. Sí, aplicando la señal de entrada en la zona de conducción de su curva característica.
10. Tiempo de respuesta y tiempo de recuperación.

## RESPUESTAS A LAS ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE

### *Actividad de aprendizaje 3A:*

- a) Los diodos al vacío y los diodos de galena.
- b) Con la unión de un cristal semiconductor tipo P con otro tipo N.
- c) Ánodo y cátodo.
- d) El voltaje positivo debe ir al ánodo, y el negativo al cátodo.



- f) Como rectificador de señal, convirtiendo una entrada de CA en salida de CD.
- g) Rectificador, zener, LED, varactor, fotodiodo, PIN, Schottky y túnel.

### *Actividad de aprendizaje 3B:*

- a) El diodo se porta como un interruptor abierto cuando se polariza en inversa, y como un interruptor cerrado al polarizarse en directa.
- b) El diodo se comporta como un interruptor abierto al polarizarse en inversa y también en directa antes de alcanzar su voltaje de polarización; al alcanzar este voltaje, comienza a conducir, con una pendiente muy pronunciada (casi vertical).
- c) Porque la curva de comportamiento real de un diodo se porta de forma muy similar a una gráfica exponencial, al menos en su zona de conducción.
- d) El fenómeno de avalancha que aparece cuando se polariza en inversa.
- e) El modelo ideal con voltaje de polarización.
- f) Puede atenuar, distorsionar o amplificar la señal, dependiendo de en qué punto de la curva de conducción caiga.

## UNIDAD 4

### EL TRANSISTOR DE EFECTO DE CAMPO (FET)

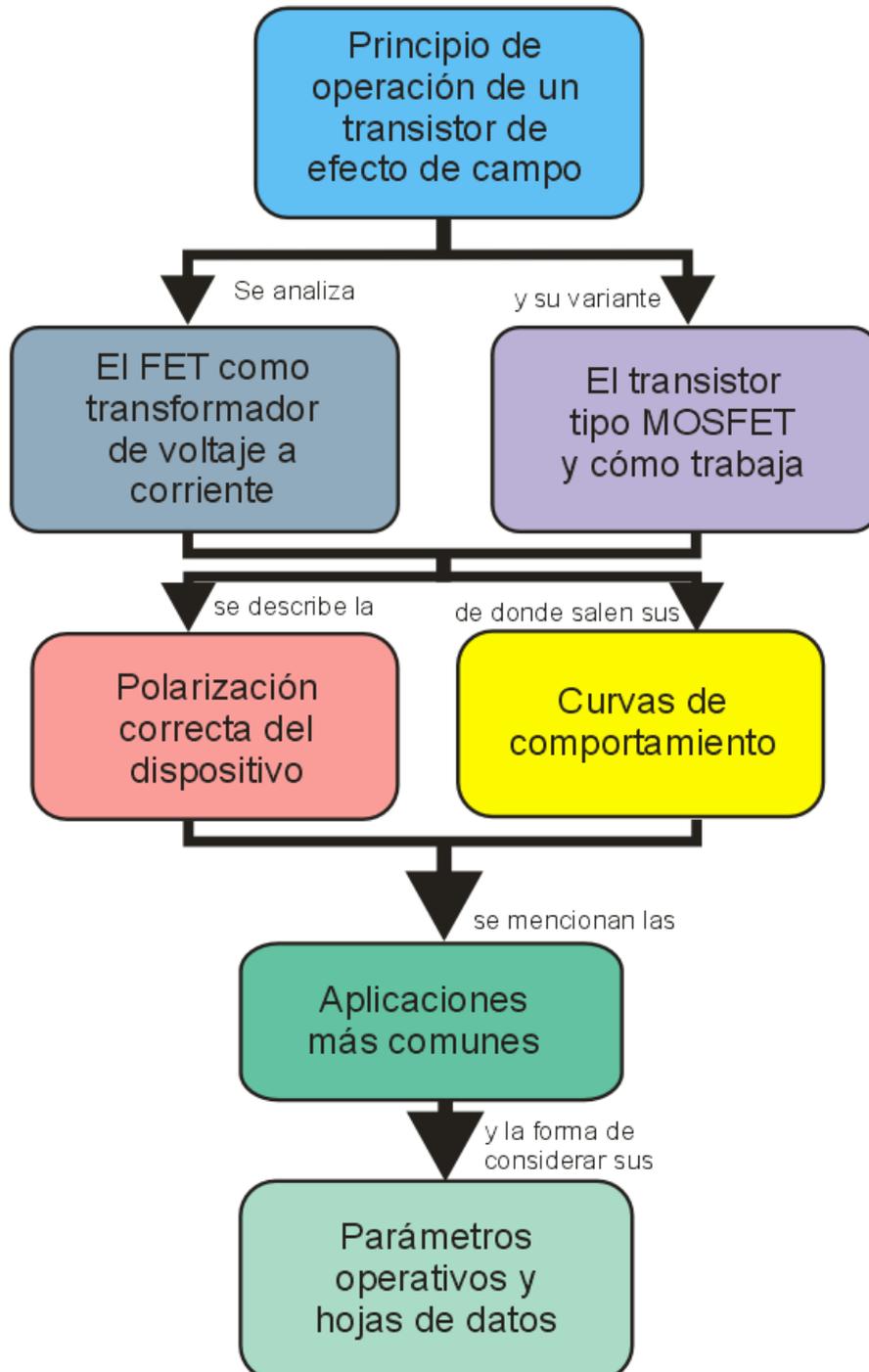
#### OBJETIVO

Mostrar al estudiante el principio básico de operación de un transistor de efecto de campo, sus aplicaciones más comunes, su forma de uso como interruptor o amplificador, las variantes más usuales de esta tecnología, y qué se puede lograr con ella.

#### TEMARIO

- 4.1 ESTRUCTURA, FUNCIONAMIENTO Y CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN FET
- 4.2 MODELOS Y POLARIZACIÓN
- 4.3 EL MOSFET COMO ELEMENTO DE CONMUTACIÓN
- 4.4 EL AMPLIFICADOR BÁSICO
- 4.5 ESPECIFICACIONES DE FABRICANTE

# MAPA CONCEPTUAL



## INTRODUCCIÓN

Uno de los principales retos que enfrentó la industria electrónica prácticamente desde sus inicios, fue la necesidad de amplificar señales de muy baja amplitud, para que éstas tuvieran un nivel adecuado para su posterior proceso. Por ejemplo, si se tiene un micrófono que capta los sonidos, la señal que sale de él por lo general tiene una amplitud de unos cuantos milivoltios, lo cual evidentemente no es adecuado para aplicarlo a una bocina o a un aparato



de proceso de audio. Cuando se recibe una estación de radio por medio de una antena, la magnitud de señal recibida también es minúscula, y es necesario amplificarla para poder finalmente captar el audio transmitido. Y como éstas, hay muchas más aplicaciones para un dispositivo capaz de amplificar una señal de entrada.

En un principio, para realizar esta labor se utilizaban las válvulas de

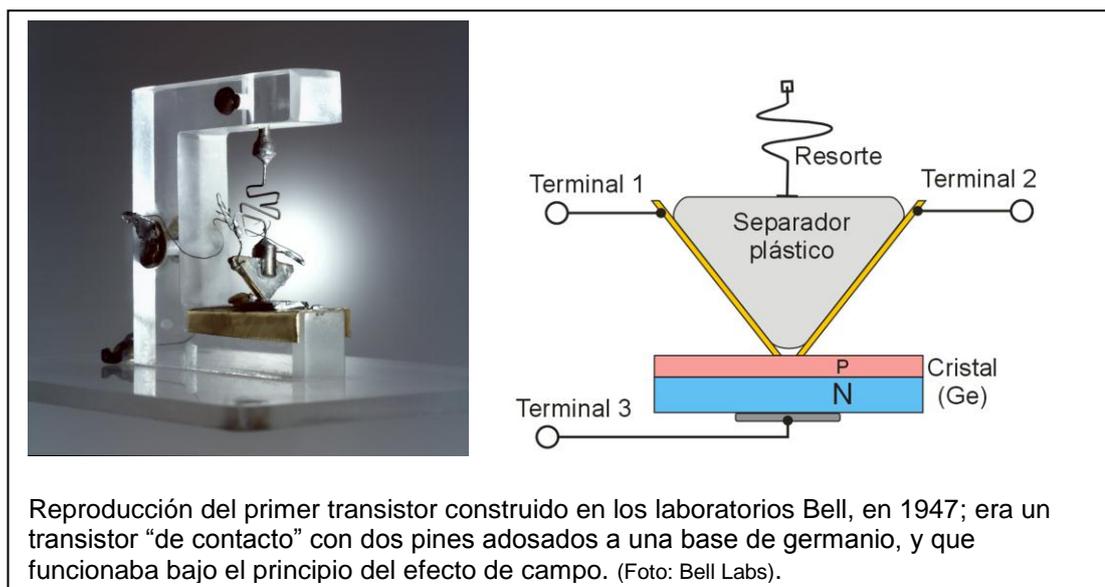


vacío o bulbos, específicamente uno denominado “triodo”. Estos dispositivos cumplían adecuadamente con su labor, pero tenían varios inconvenientes, como ser demasiado voluminosos y frágiles, además de gastar demasiada energía por la necesidad de contar con un filamento incandescente. Por

eso, cuando se descubrió que un diodo semiconductor podía reemplazar a un diodo al vacío, de inmediato se buscaron formas de conseguir, mediante

cristales semiconductores, un efecto de amplificación similar al que se obtenía con estas válvulas.

Las primeras noticias relacionadas con “amplificadores de cristal”, surgieron a mediados de la década de 1920, cuando J. E. Lilienfield patentó una idea básica de cómo funcionaría un dispositivo de éstos, aunque nunca pudo construir uno. Tuvieron que pasar más de 20 años para que de la teoría se pasara a la práctica: en 1947, un equipo de investigadores de los laboratorios Bell, formado por Brattain, Bardeen y Shockley, desarrollaron el primer “triodo de cristal” de la historia, el cual precisamente funcionaba bajo el principio de “efecto de campo” que caracteriza a los transistores tipo FET (siglas de *Field Effect Transistor* o transistor de efecto de campo). En el diagrama anexo se muestra la construcción de este primer transistor, y una descripción de su estructura interna. Por tal descubrimiento, este equipo de investigadores ganó el premio Nobel de física en 1956.



A partir de ese momento, los transistores rápidamente reemplazaron a las grandes y poco eficientes válvulas de vacío, revolucionando la tecnología electrónica, y dando paso a la miniaturización tan característica de esta industria. Durante todo este tiempo, y hasta la actualidad, los transistores tipo FET han contribuido notablemente con el desarrollo de la electrónica en todos sus campos; de hecho, estos dispositivos son la base para prácticamente todos los circuitos integrados de proceso digital que se conocen actualmente. Definitivamente, los transistores tipo FET son la

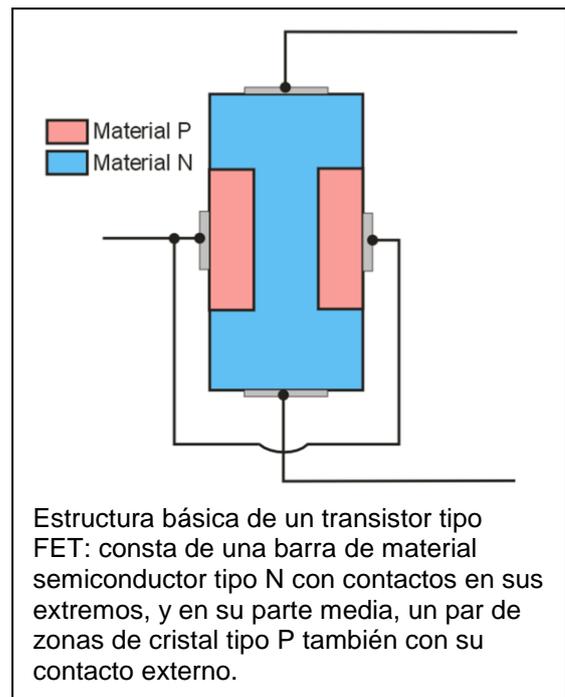
pedra angular de la tecnología moderna, y al parecer lo seguirán siendo por muchos años más.

#### 4.1 ESTRUCTURA, FUNCIONAMIENTO Y CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN FET

¿Cuál es el origen del término “transistor”? Cuando el departamento legal de la compañía Bell comenzó los trámites para patentar el descubrimiento hecho por Barden, Brattain y Shockley, los abogados decidieron buscar un nombre característico, que fuera fácil de recordar y que al mismo tiempo describiera de alguna forma la función del dispositivo. Debido a que el componente *transformaba* un voltaje en una *resistencia variable* (*transform-resistor*), decidieron darle el nombre de *transistor* al nuevo dispositivo creado.

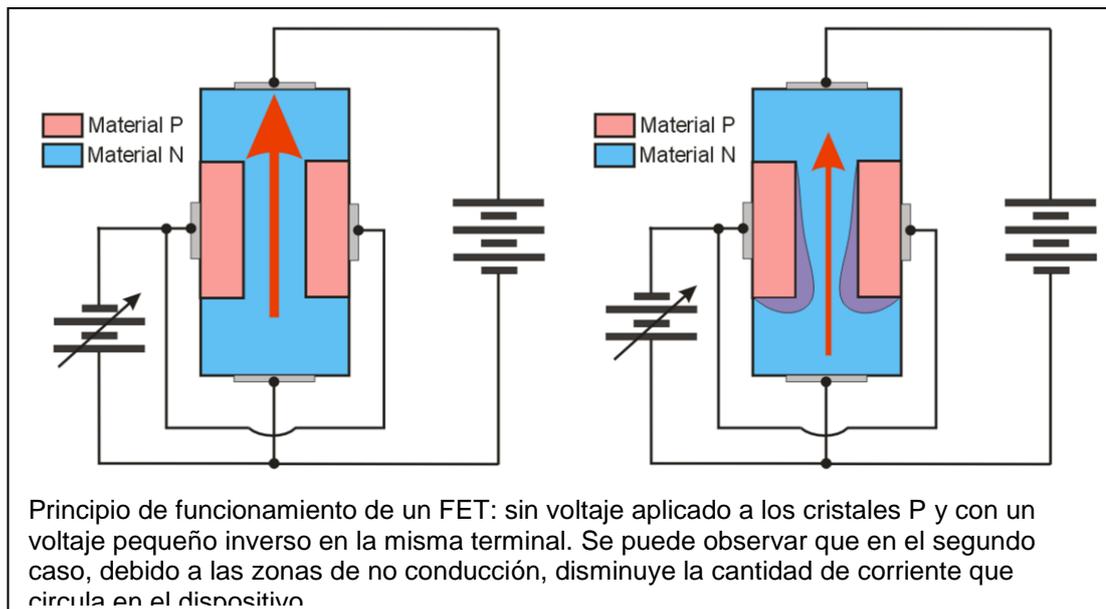
¿Cómo se transforma un voltaje variable en una resistencia variable? Para averiguarlo, se debe explorar la construcción tan particular que tienen estos componentes. En la figura anexa se muestra un diagrama simplificado de la estructura típica de un transistor tipo FET; se puede observar que se trata de una barra de material semiconductor tipo N, con terminales de conexión en sus extremos superior e inferior; y en la parte media de la barra se encuentran un par de cristales tipo P, los cuales están unidos eléctricamente entre sí, y forman una nueva terminal. Entonces, un transistor de efecto de campo típico es un dispositivo de tres terminales, dos por donde circula la corriente, y uno que servirá para controlar el flujo de esa corriente.

¿Cómo se lleva a cabo ese control? En la figura anexa se presenta el FET conectado a dos fuentes externas, una entre sus terminales superior e inferior, y una fuente variable negativa conectada a la terminal del centro (la de control). Para efectos didácticos, se supondrá que en un inicio la fuente variable tiene un valor de cero voltios, y poco a poco empieza a subir su tensión inversa de salida; mientras que por el otro lado, la fuente entre la terminal



superior y la inferior del dispositivo permanece constante.

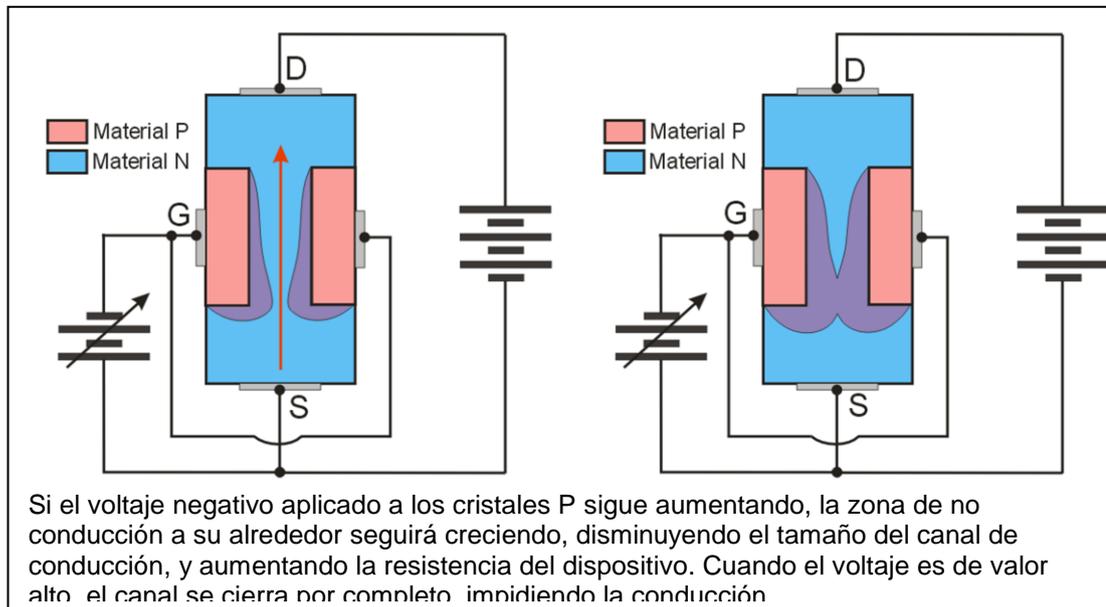
Cuando el voltaje en la terminal de control es cero, la corriente puede fluir en el canal central del dispositivo, ya que los portadores del mismo (electrones), son repelidos por la tensión negativa de la fuente (terminal inferior), mientras que son atraídos por la tensión positiva (terminal superior); esto significa que en condición de reposo, este FET se comporta prácticamente como un conductor, y por tanto se dice que está en modo de saturación.



Si el voltaje aplicado a la terminal de control comienza a subir, aparece un fenómeno que ya se explicó en la unidad correspondiente al comportamiento de los semiconductores: cuando se aplica un voltaje inverso a una unión P-N, los portadores de ambos cristales son atraídos hacia los extremos del dispositivo, creando una zona de no conducción (aislante) en la unión. Esto es lo que comienza a suceder en el FET, creándose una región de no conducción alrededor de los cristales P, y eso reduce el tamaño del canal conductor central, incrementando la resistencia del dispositivo y disminuyendo la cantidad de corriente que puede circular por él.

Si continúa el aumento de voltaje inverso en la terminal de control, la zona de no conducción seguirá creciendo, hasta llegar a un voltaje en el cual estas zonas han crecido tanto que “cierran” por completo el canal de conducción, impidiendo la circulación de corriente dentro del dispositivo.

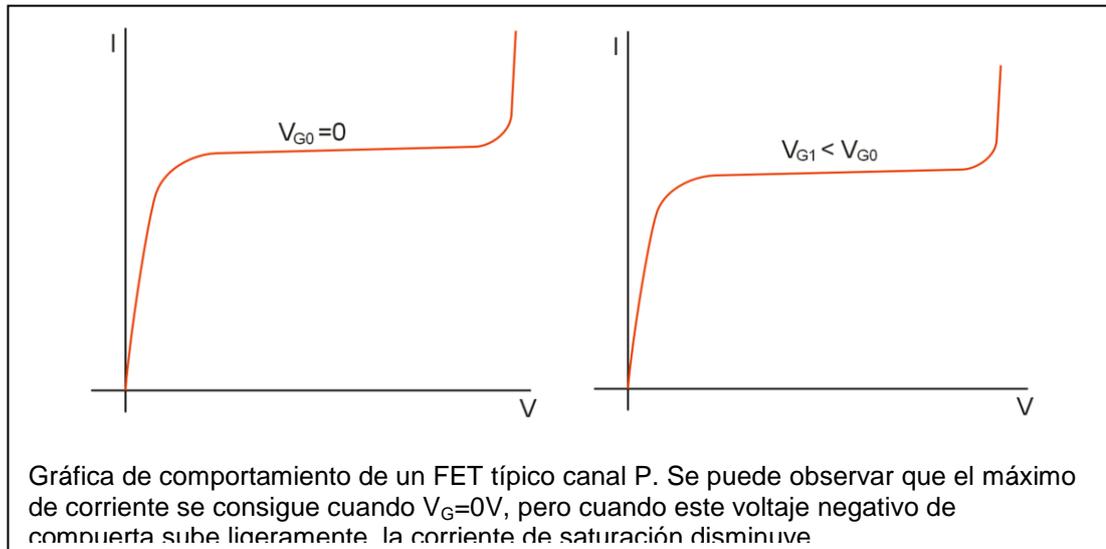
Esto significa que, para fines prácticos, el dispositivo se está portando como una resistencia variable, cuyo valor depende del voltaje aplicado en la terminal de control.



Este es el comportamiento particular que hace especial a un FET: su capacidad de regular la cantidad de corriente que puede circular a través del dispositivo dependiendo del voltaje aplicado a una terminal de control. Para identificar sus terminales, se decidió que el extremo del cristal conductor por donde entran los portadores de electricidad se denominaría “Fuente” (*Source*), el extremo por donde salen sería el “Drenaje” o “Drenador” (*Drain*) y la terminal de control sería una “Compuerta” (*Gate*). Entonces, se puede decir que un FET es un dispositivo en el cual la corriente que circula entre D-S varía dependiendo del voltaje en G.

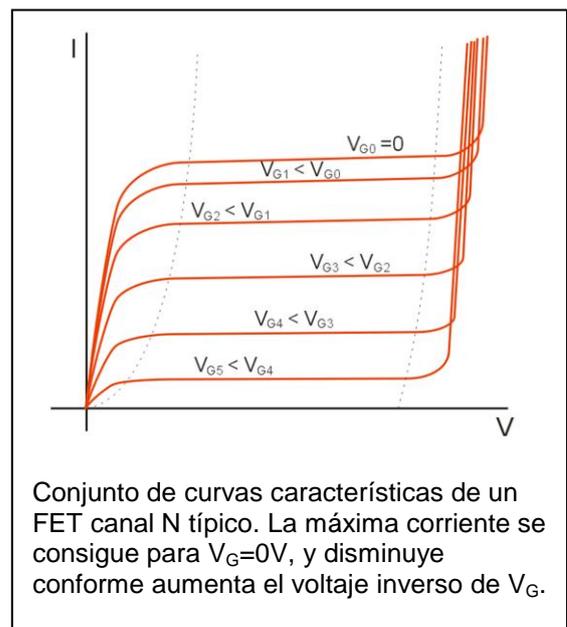
Este comportamiento se puede graficar en una serie de curvas que representen la cantidad de corriente que fluye a través del dispositivo dependiendo del voltaje aplicado a los extremos del cristal N, para distintos valores de voltaje en P. En la figura anexa se presenta la gráfica en el caso de que no se aplique ningún voltaje a la compuerta; se puede observar que la corriente en el dispositivo crece rápidamente desde cero hasta llegar a un valor de saturación, y cuando se alcanza este punto, se puede seguir aumentando el voltaje entre D y S sin que ello afecte demasiado la cantidad de corriente en el cristal; sin embargo, cuando se llega a un voltaje de

ruptura, el dispositivo entra en conducción, lo que normalmente trae consigo su destrucción.



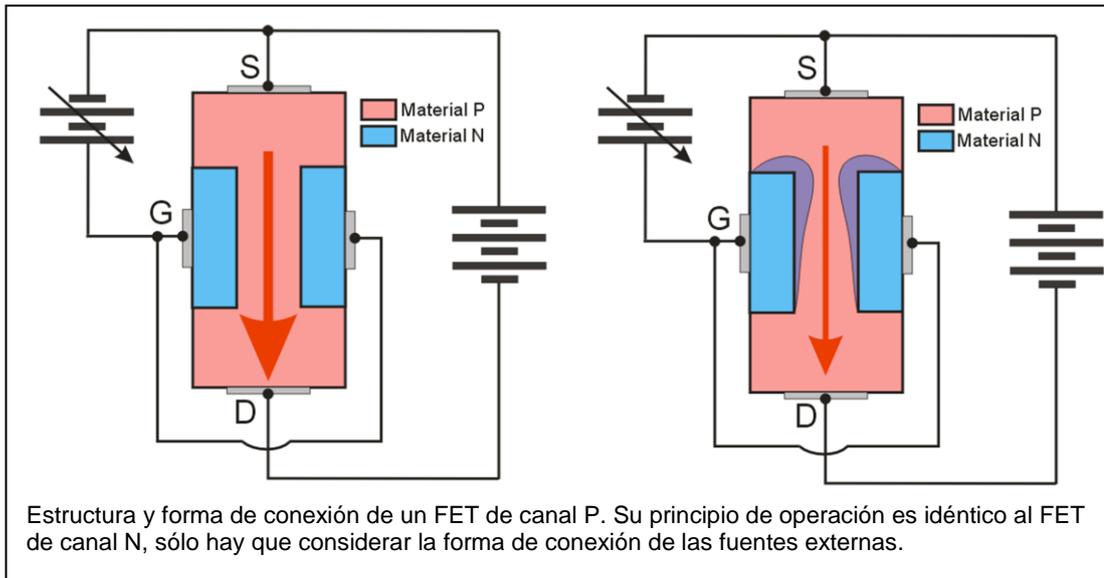
Si ahora se aplica un voltaje inverso pequeño en la compuerta, la

curva resultante será casi igual a la anterior, pero en este caso, la corriente de saturación será menor que en la gráfica anterior, además de que el voltaje de ruptura también será un poco menor. Si se aumenta gradualmente el voltaje negativo de compuerta, este comportamiento se repite poco a poco, hasta que al alcanzar el voltaje donde se cierra completamente el canal de conducción, se tendrá un valor cero



de corriente. En la gráfica anexa se muestran una serie de curvas características de un FET canal N típico.

Todo lo que se ha explicado también puede aplicarse para un dispositivo que tenga un canal hecho con cristal tipo P y con las compuertas con cristal tipo N; la única consideración es que se deben cambiar ligeramente los voltajes aplicados, y como ahora los portadores mayoritarios son los huecos y no los electrones, en este tipo de FET se considera que la corriente circula desde el extremo positivo de la fuente hacia el negativo.



En la figura anexa se muestra una representación de cómo es la estructura interna de un FET canal P, su conexión y la forma como se va cerrando el canal de conducción cuando comienza a aumentar el voltaje aplicado a la compuerta. Es obvio que el comportamiento de este FET es muy similar al de un canal N, sólo considerando los cambios en la polaridad de los voltajes aplicados.

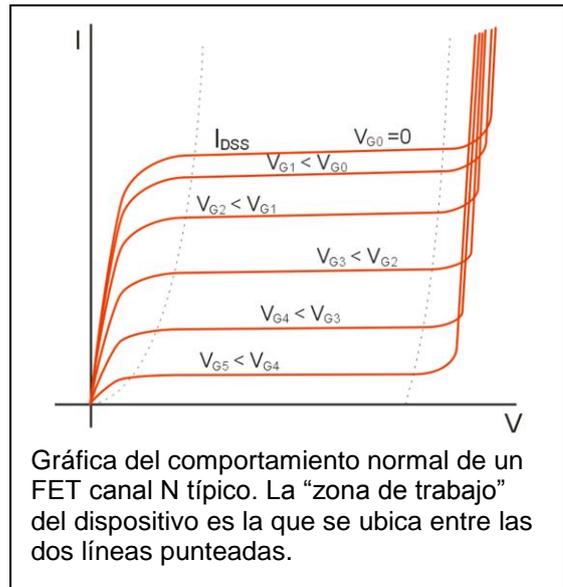
#### ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 4A

- ¿Qué significa el término “transistor”?
- ¿Cuál es la estructura básica de un FET típico?
- ¿Por qué se necesita una fuente inversa para hacer funcionar al FET?
- ¿Cómo se denominan las tres terminales de un FET?
- ¿Para qué voltaje de compuerta se tiene el máximo de corriente entre D y S?
- ¿Qué sucede cuando el voltaje inverso de compuerta se incrementa?

#### 4.2 MODELOS Y POLARIZACIÓN

Con la explicación anterior, se puede decir que un transistor de efecto de campo funciona como un dispositivo que deja pasar cierta cantidad de corriente entre sus terminales D-S, y esa cantidad está regulada por el voltaje que se aplique en su terminal G. Conviene recordar la gráfica donde se muestran las curvas características de un FET canal N, para precisar un par de detalles interesantes:

Se puede observar que en la gráfica se han incluido un par de líneas punteadas, una en el extremo izquierdo y otra al extremo derecho de las curvas. Estas líneas marcan el inicio y el final de la zona de corriente constante para cada valor de  $V_G$ , y la región entre ambas líneas punteadas representa precisamente la zona de trabajo de un FET. Se considera que la curva con la máxima corriente que maneja el dispositivo es la correspondiente a un voltaje de compuerta igual a cero voltios, y se le denomina “corriente de saturación entre drenaje y fuente”, y se le asignan las siglas  $I_{DSS}$ .



De la misma manera, al voltaje necesario para que el dispositivo deje de conducir se le ha dado el nombre de “voltaje de estrangulamiento”, y se

$$I_{DS} = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

$I_{DS}$  = Corriente dentro del FET  
 $I_{DSS}$  = Corriente de saturación  
 $V_{GS}$  = Voltaje de compuerta  
 $V_P$  = Voltaje de estrangulamiento

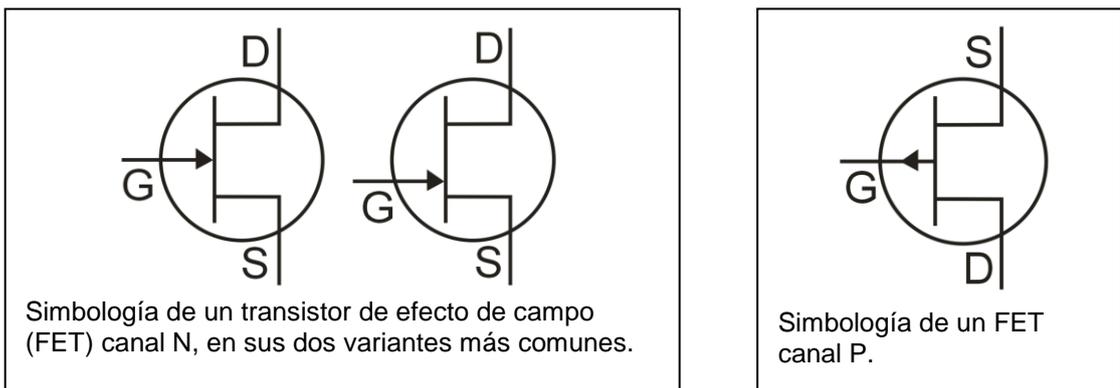
identifica con las siglas  $V_P$ . Con estos datos, si se desea saber qué corriente estará circulando a través del dispositivo para un cierto voltaje en su compuerta, el modelo matemático que representa el comportamiento de un FET se muestra en

el recuadro anexo. Se observa que la corriente que circula dentro del dispositivo ( $I_{DS}$ ) será igual a la corriente de saturación  $I_{DSS}$  multiplicada por un factor que se calcula por medio del voltaje aplicado en la compuerta y el voltaje de estrangulamiento del FET. Es importante señalar que esta fórmula sólo se cumple en la zona lineal de la gráfica, esto es, la región entre las dos líneas punteadas marcadas en la figura anterior; además de que no se considera válido un valor de  $V_{GS}$  mayor al de  $V_P$ .

De lo anterior se desprende que, mientras se obligue al dispositivo a operar en su “zona de trabajo”, su comportamiento es muy predecible, y se puede aprovechar para múltiples aplicaciones dentro de la electrónica. Pero ¿cómo se garantiza que un FET sólo funcione dentro de su zona de trabajo?

Aquí se involucra la correcta polarización del dispositivo, lo cual se describirá enseguida.

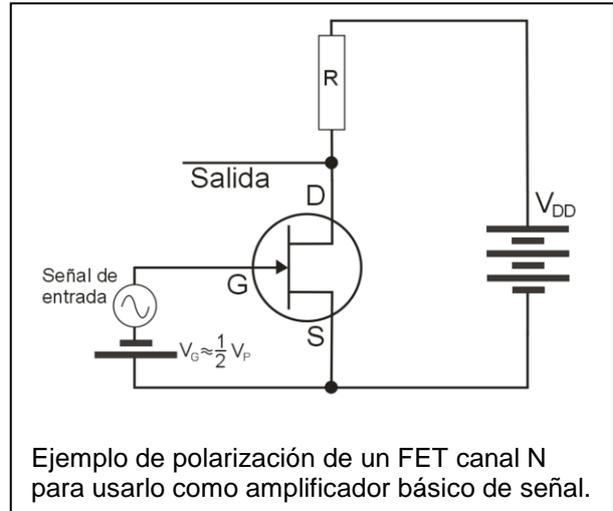
Para aprovechar las propiedades tan especiales de un FET dentro de un circuito electrónico, es necesario obligarlo a trabajar en ciertas condiciones que fuercen al componente a funcionar como un amplificador, que transforme pequeñas variaciones en el voltaje de entrada en grandes variaciones en su corriente de salida. Para hacer esto, es necesario polarizar al FET de modo adecuado, a continuación se detallará precisamente ello.



Pero antes de comenzar con el tema de la polarización, se debe mencionar un punto importante: recordando que para representar de forma gráfica un circuito electrónico se utiliza una simbología especial, resulta obvio que los FET también poseen un símbolo que los identifica fácil y rápidamente. En la figura anexa se muestra esta simbología para un transistor de efecto de campo canal N. Si bien el símbolo más común es el mostrado en el extremo izquierdo, algunos autores y empresas utilizan el que se muestra a la derecha, y se hace esto para identificar a primera vista cuál de las terminales es el drenador y cuál la fuente. Por supuesto que los FET canal P también poseen su símbolo específico, el cual se muestra en la figura anexa. Se puede observar que la diferencia entre ambos es la dirección de la punta de flecha en su compuerta, y precisamente lo que indica es el sentido de la unión P-N resultante. Conviene recordar este detalle, ya que se usa constantemente en la simbología de diversos componentes electrónicos.

Regresando al tema de la polaridad de un transistor, si se desea utilizar este dispositivo como un amplificador, es necesario forzarlo a trabajar en un punto intermedio de su curva característica; esto es, si se trata de un

transistor canal N, conectarlo de tal forma que su voltaje de compuerta caiga aproximadamente en la parte media de su zona de trabajo, de modo que el canal de conducción dentro del FET esté parcialmente cerrado y la corriente que circule por él sea de aproximadamente la mitad de su corriente de saturación. Esta situación se ilustra en la figura anexa, donde se ha colocado un FET como amplificador: se puede observar que el FET posee una fuente de poder conectada entre D y S, pero con una resistencia en su terminal D; por otra parte, en la compuerta se aplica un voltaje negativo de alrededor de  $1/2 V_P$ , esto es, la mitad del voltaje de estrangulamiento del dispositivo; finalmente, la señal que se desea amplificar se conecta de tal modo que se suma a ese voltaje de polarización en la compuerta.



D y S, pero con una resistencia en su terminal D; por otra parte, en la compuerta se aplica un voltaje negativo de alrededor de  $1/2 V_P$ , esto es, la mitad del voltaje de estrangulamiento del dispositivo; finalmente, la señal que se desea amplificar se conecta de tal modo que se suma a ese voltaje de polarización en la compuerta.

La manera en la que trabaja este circuito es la siguiente: cuando la señal de entrada es igual a cero, al estar polarizada la compuerta del FET con un voltaje de aproximadamente la mitad de su valor de estrangulamiento, la corriente D-S dentro del dispositivo será de aproximadamente la mitad de su corriente de saturación; esto significa que en la terminal D (de donde se está tomando la salida de señal) se tendrá el valor de la batería  $V_{DD}$  menos la caída de voltaje que la corriente circulando provoque en la resistencia R. Si ahora la señal de entrada toma un valor positivo pequeño, este valor se resta al del voltaje de polarización de G, haciendo que el FET conduzca un poco más, provocando más caída en la resistencia, y presentando en D un voltaje más bajo. Por el contrario, si la señal de entrada toma un valor negativo, este se suma al voltaje de polarización de G, reduce aún más el canal de conducción interno y hace disminuir la corriente circulando, por lo que la caída de voltaje en R es menor, y el voltaje en D aumenta.

Resulta obvio de la explicación anterior, que calculando cuidadosamente los valores de  $V_G$ ,  $V_{DD}$  y R, se puede conseguir un circuito

que tome una señal muy pequeña de entrada en G y la expida amplificada e invertida en su terminal D. Precisamente, el cálculo de los valores anteriores es el aspecto más importante para conseguir una buena polarización de un transistor.

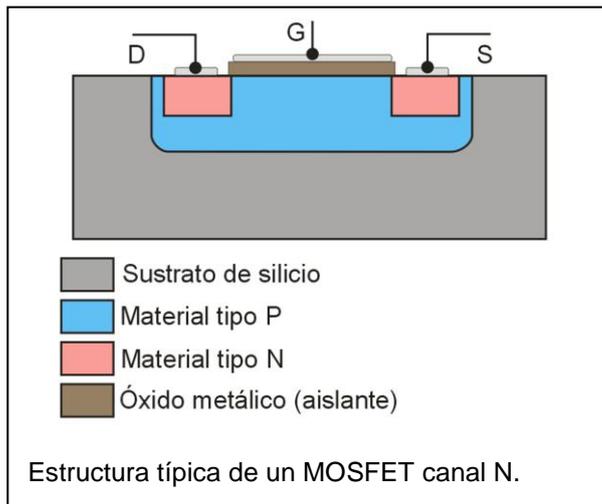
## ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE 4B

- a) ¿Dónde se encuentra la zona de trabajo de un FET?
- b) ¿Cómo se identifica a la corriente de saturación?
- c) ¿Cómo se denomina al voltaje aplicado a compuerta cuando el FET deja de conducir?
- d) Escribe la fórmula para el modelo matemático de un FET típico:
- e) ¿Qué se entiende por “polarización” de un FET?
- f) ¿Cuál es la manera más directa de polarizar un FET canal N?
- g) ¿De dónde sale la señal amplificada?

### 4.3 EL MOSFET COMO ELEMENTO DE CONMUTACIÓN

Si bien el FET común funciona adecuadamente como amplificador de señal, presenta un defecto importante para su aplicación en diversos circuitos electrónicos, como la necesidad de un voltaje de polarización de compuerta negativo, lo que lo hace poco recomendable para circuitos que sólo tengan una fuente de poder sencilla. Este es el caso de los circuitos digitales, donde los dispositivos funcionan sólo entre dos niveles: “bajo” y “alto”, o lo que es lo mismo, un voltaje cercano a cero voltios para “bajo” y un voltaje cercano a  $V_{DD}$  para “alto”. En este caso, sería mucho mejor si existiera alguna forma de utilizar un FET de modo que necesitara voltajes con una polaridad única, y el desarrollo de tal dispositivo se convirtió en un reto para los investigadores de las empresas electrónicas. El resultado de estas investigaciones es el transistor tipo MOSFET, siglas en inglés de “transistor de efecto de campo semiconductor con óxido metálico”, el cual tiene una estructura muy particular y un principio de funcionamiento ligeramente distinto al del FET común.

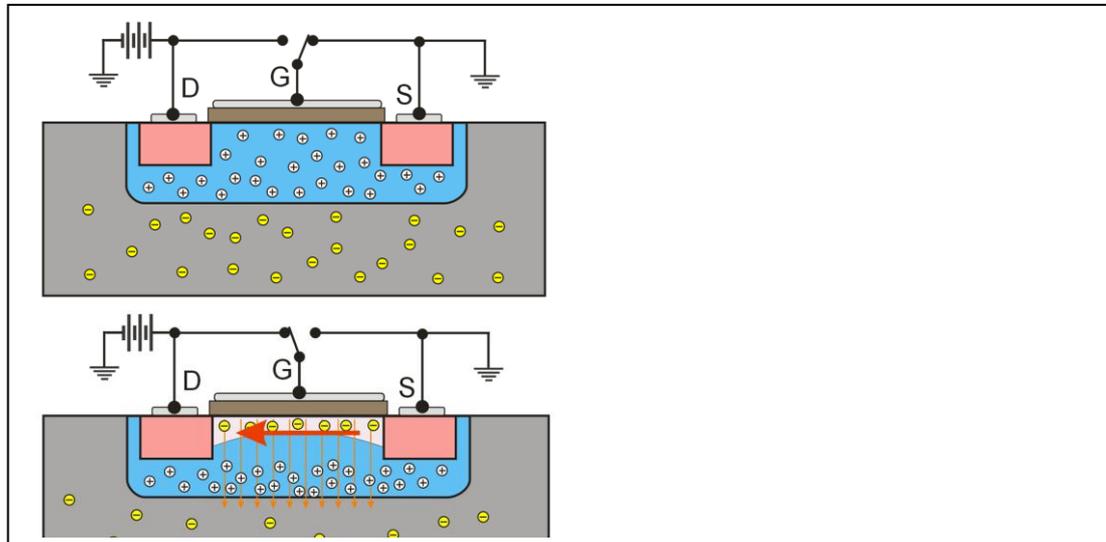
En la figura anexa se muestra una representación de cómo está construido un MOSFET canal N típico; se puede observar que se trata de



una capa de material P y dentro de ella se han incrustado un par de regiones tipo N, a las cuales están adosadas las terminales D y S respectivamente; sin embargo, entre ambas zonas N se ha depositado una delgada laminilla de material aislante formada normalmente por algún óxido metálico, y sobre esa laminilla se

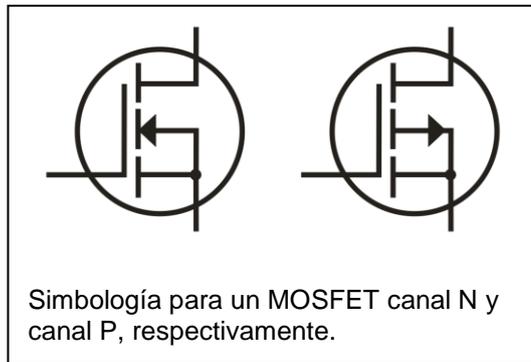
coloca una placa de conexión que hará las veces de compuerta.

¿Cómo funciona este dispositivo? Si se aplica un voltaje positivo entre D y S, y se hace que el voltaje de la compuerta sea igual a cero, la estructura está en condiciones de reposo, se tiene una región P separando las regiones N polarizadas, y debido a las características de la unión P-N, no circula corriente a través de estas terminales; en tal caso, el dispositivo está en corte, y no hay circulación de portadores.



Cuando comienza a aplicarse un voltaje positivo a la terminal G, aparece un fenómeno curioso: los huecos del material P son repelidos por este campo eléctrico, y los pocos electrones libres que se encuentran en el sustrato metálico del dispositivo, comienzan a ser atraídos por ese campo. Con esto, se empieza a formar un canal entre ambas regiones N, donde debido a la presencia de los electrones atraídos, puede circular corriente

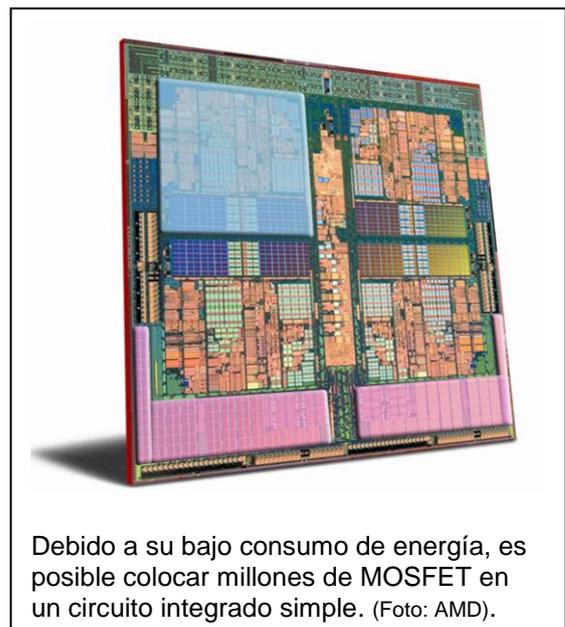
entre D y S. Si el voltaje aplicado a la compuerta es del valor suficiente, el canal N se forma por completo, permitiendo la circulación de electrones, y colocando al dispositivo en modo de saturación. Esta situación también ocurre en el caso de los transistores MOSFET canal P, lo único que hay que tener en consideración es la polaridad de la fuente externa aplicada.



Este es el principio de operación de los transistores tipo MOSFET, que son los más utilizados para la construcción de circuitos de proceso digital de señal. En la figura anexa se muestra su simbología, tanto para transistores canal N como para canal P.

Si bien estos dispositivos pueden funcionar también como amplificadores si se polarizan de manera adecuada, en realidad su comportamiento en la zona de trabajo no es muy regular, así que las aplicaciones analógicas de estos dispositivos son en realidad muy escasas. Es en la electrónica digital, en la que estos componentes sólo tienen que trabajar en sus modos de corte o saturación, donde brillan con luz propia, ya que sus características operativas los hacen ideales para este tipo de aplicaciones.

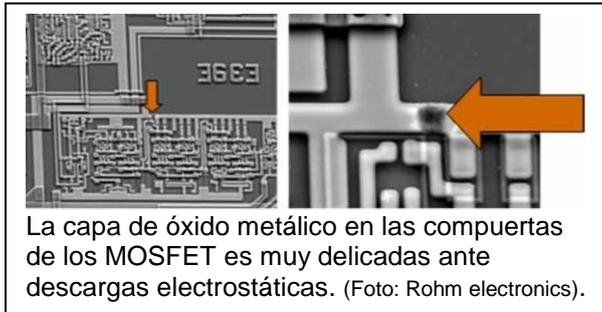
Por ejemplo, la existencia de la capa aislante entre la compuerta y el dispositivo en sí, hace que estos elementos se disparen con la presencia de voltaje, y que prácticamente no requieran de flujo de corriente para funcionar (al menos en la compuerta). Esto hace que la fuente de disparo pueda ser un voltaje con muy poca potencia de salida, y aun así, el MOSFET lo captará y reaccionará de modo



adecuado. Esto también es importante cuando se comienzan a combinar

varios miles de transistores en un circuito integrado individual, ya que al no necesitar circulación de corriente para el disparo del componente, se reduce el consumo energético, logrando chips más rápidos y eficientes.

Sin embargo, no todas son ventajas para los MOSFET; también poseen algunos inconvenientes que se deben tomar en cuenta cuando se



La capa de óxido metálico en las compuertas de los MOSFET es muy delicadas ante descargas electrostáticas. (Foto: Rohm electronics).

trabaja con ellos. El más importante es que la laminilla aislante de la compuerta es muy delicada, y fácilmente puede dañarse por descargas electrostáticas, lo que significa

que al manipular estos componentes, hay que tomar algunas precauciones adicionales. Otro punto que se debe considerar es que entre la compuerta y el cuerpo del transistor, se forma una pequeña capacitancia parásita, lo que significa que, cuando hay algún cambio de voltaje en la compuerta, ésta no reacciona de manera instantánea, sino que hay un tiempo de retraso mientras el capacitor de entrada se carga o se descarga. Esto puede aprovecharse para ciertas aplicaciones, como son los circuitos de memoria (los módulos de RAM dinámica utilizan precisamente la capacitancia de estos transistores para guardar la información binaria en sus chips); pero tiene como inconveniente que los transistores MOSFET son más lentos en reaccionar que otras tecnologías. Este factor se ha podido minimizar a lo largo de los años, consiguiendo en la actualidad dispositivos de proceso de señal que trabajan por encima de los mil megahertz de frecuencia (como los microprocesadores en computadoras personales); sin embargo, es un factor que hay que contemplar en diseños que trabajarán a muy alta velocidad.

Una ventaja adicional de los MOSFET es que su estructura básica puede escalarse hacia abajo y hacia arriba; esto significa que no sólo se pueden miniaturizar los



Los MOSFET de potencia se han convertido en los principales componentes de las fuentes conmutadas, las más utilizadas en la actualidad. (Foto: Fairchild).

transistores, sino que también pueden hacerse más grandes, y por tanto, capaces de manejar grandes voltajes y corrientes. En la actualidad, los MOSFET se usan ampliamente en aplicaciones de conversión de energía, como fuentes de poder, y no es raro encontrar transistores que trabajen habitualmente a decenas o cientos de voltios, y que permitan la circulación de decenas o cientos de amperios, algo muy difícil de lograr con otro tipo de transistores.

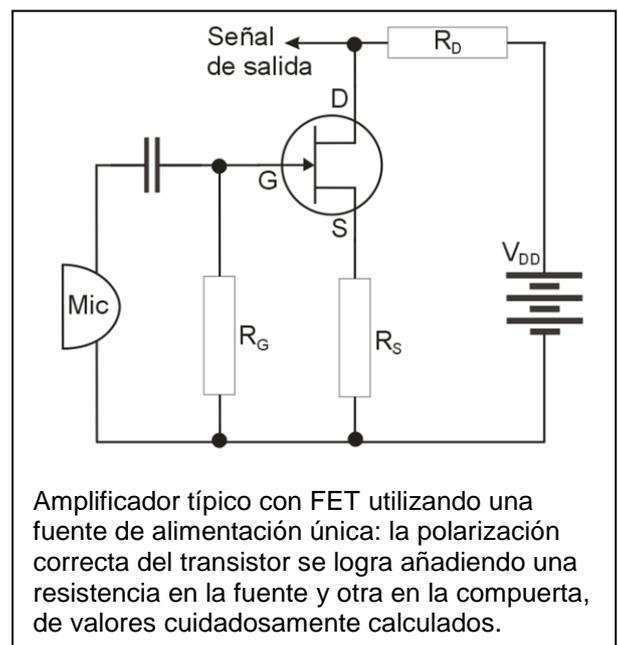
### ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 4C

- ¿Cuál es el principal inconveniente del FET común?
- ¿Qué significan las siglas MOSFET?
- ¿Cómo se forma el canal de conducción dentro de un MOSFET?
- ¿Cuál es la principal aplicación de los MOSFET?
- ¿Por qué se debe tener cuidado al manipular estos dispositivos?
- ¿Qué tipo de transistores se usan en las fuentes conmutadas?

#### 4.4 EL AMPLIFICADOR BÁSICO

Aunque ya se mencionó una configuración amplificadora básica con anterioridad en esta unidad, también ya se había señalado que este modo de polarización tiene un inconveniente muy serio: la necesidad de una fuente inversa que polarice la compuerta del transistor. Tener que utilizar más de una fuente de poder resulta algo problemático para los diseñadores de circuitos electrónicos, así que se buscaron formas para poder conseguir una amplificación sin necesidad de utilizar la fuente negativa en la compuerta.

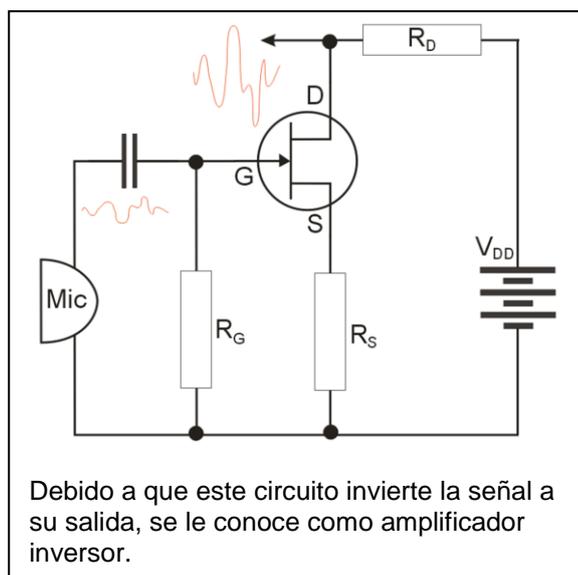
La solución a la que se llegó resulta muy ingeniosa: en la figura anexa se muestra el diagrama de un amplificador con FET canal N típico; se aprecia que la única diferencia en



comparación al que se mostró anteriormente, es la adición de una resistencia en la terminal de fuente ( $R_S$ ), y una más entre el voltaje negativo de la fuente y la compuerta ( $R_G$ ), además de la que va desde el positivo de la fuente hacia el drenador ( $R_D$ ). También en este caso se ha colocado como fuente de señal un micrófono, pero podría ser cualquier otro transductor que convierta algún fenómeno físico en una señal eléctrica.

Para conocer cómo estos simples elementos pueden polarizar de manera adecuada a un FET, hay que considerar lo siguiente: cuando se colocan las resistencias  $R_S$  y  $R_G$ , debido a que prácticamente no hay caída de voltaje en la resistencia  $R_G$ , se puede indicar que el mismo voltaje negativo de la fuente se tiene como voltaje de compuerta, y como se recordará, en esa condición es cuando el FET entra en modo de saturación, lo que significa que por medio de sus terminales trata de circular una corriente muy alta; sin embargo, esta corriente está limitada por el valor de la fuente de alimentación y de las resistencias  $R_D$  y  $R_S$ .

Ahora bien, cuando circula una corriente a través de una resistencia, aparece entre sus terminales un voltaje  $V=RI$ , o lo que es lo mismo, el valor de la resistencia multiplicado por la corriente circulando. Esto significa que, poniendo atención a la terminal S, la tensión en los extremos de  $R_S$  provoca que esa terminal esté a un voltaje mayor que el del extremo negativo de la fuente; pero como por  $R_G$  no está circulando prácticamente nada de corriente, entonces en G se sigue teniendo un voltaje casi idéntico al del extremo negativo de la fuente, y por tanto, en G hay una tensión negativa en



comparación al voltaje de S. Este voltaje negativo limita la corriente que puede circular por el transistor, cerrando el canal interno, hasta llegar a una situación de equilibrio, en la cual por las resistencias de drenaje y fuente está circulando la corriente necesaria para mantener a la terminal G a la

tensión negativa suficiente como para que la corriente fluya.

Una vez que se alcanza esta situación de equilibrio, se dice que el transistor está en su estado de reposo, y si en ese instante el micrófono comienza a inyectar una señal a la compuerta a través del capacitor, entonces la corriente en el interior del FET comenzará a variar siguiendo a la señal de entrada, lo que se refleja en la caída de voltaje en  $R_D$ , de donde finalmente se toma la señal de salida, la cual será idéntica a la de entrada, pero de mayor nivel e invertida en polaridad.

Entonces, para construir un amplificador simple por medio de un FET, lo único que se necesita es un transistor de efecto de campo, unas cuantas resistencias, una fuente de voltaje única y una fuente externa de señal. Calculando cuidadosamente los valores de  $R_D$ ,  $R_S$  y  $R_G$  se puede lograr que el FET amplifique tanto como sea necesario la señal de entrada (dentro de sus parámetros operativos), con la ventaja adicional de que, como el FET tiene una impedancia muy alta en su compuerta, prácticamente no le exigirá energía al transductor conectado, logrando una amplificación lo más fiel posible.

El cálculo de las resistencias de polarización es un factor muy importante al diseñar un amplificador con FET, y esto está estrechamente relacionado con las características operativas del dispositivo, las cuales se pueden consultar en las hojas de datos correspondientes. Este tema se tratará enseguida.

## ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 4D

- a) ¿Cómo se polariza un FET usando una fuente única?
- b) ¿Cuánta corriente circula a través de la resistencia de compuerta?
- c) ¿Por dónde sale la señal amplificada?
- d) ¿Cuáles elementos hay que calcular para obtener un buen amplificador con FET?

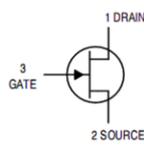
### 4.5 ESPECIFICACIONES DEL FABRICANTE

Cuando se diseña un circuito electrónico, es necesario conocer los detalles operativos de los componentes que se utilizarán en el proyecto, sin

embargo, tratar de determinar los parámetros funcionales de un dispositivo individual requiere de muchas pruebas y de equipo altamente especializado, el cual por lo general no está al alcance del público en general.

**ON Semiconductor™**

**JFET Switching**  
N-Channel — Depletion





**2N5555**

**MAXIMUM RATINGS**

Rating	Symbol	Value	Unit
Drain-Source Voltage	$V_{DS}$	25	Vdc
Drain-Gate Voltage	$V_{DG}$	25	Vdc
Gate-Source Voltage	$V_{GS}$	25	Vdc
Forward Gate Current	$I_{GF}$	10	mAdc
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	350 2.8	mW mW/°C
Junction Temperature Range	$T_J$	-65 to +150	°C
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-65 to +150	°C



CASE 29-11, STYLE 5  
TO-92 (TO-226AA)

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
<b>OFF CHARACTERISTICS</b>				
Gate-Source Breakdown Voltage ( $I_G = 10 \mu\text{Adc}$ , $V_{DS} = 0$ )	$V_{(BR)GSS}$	25	—	Vdc
Gate Reverse Current ( $V_{GS} = 15 \text{ Vdc}$ , $V_{DS} = 0$ )	$I_{GSS}$	—	1.0	nAdc
Drain Cutoff Current ( $V_{DS} = 12 \text{ Vdc}$ , $V_{GS} = -10 \text{ V}$ ) ( $V_{DS} = 12 \text{ Vdc}$ , $V_{GS} = -10 \text{ V}$ , $T_A = 100^\circ\text{C}$ )	$I_{D(off)}$	—	10 2.0	nAdc $\mu\text{Adc}$
<b>ON CHARACTERISTICS</b>				
Zero-Gate-Voltage Drain Current <sup>(1)</sup> ( $V_{DS} = 15 \text{ Vdc}$ , $V_{GS} = 0$ )	$I_{DSS}$	15	—	mAdc
Gate-Source Forward Voltage ( $I_{D(f)} = 1.0 \text{ mAdc}$ , $V_{DS} = 0$ )	$V_{GS(f)}$	—	1.0	Vdc
Drain-Source On-Voltage ( $I_D = 7.0 \text{ mAdc}$ , $V_{GS} = 0$ )	$V_{DS(on)}$	—	1.5	Vdc
Static Drain-Source On Resistance ( $I_D = 0.1 \text{ mAdc}$ , $V_{GS} = 0$ )	$r_{DS(on)}$	—	150	Ohms

1. Pulse Test: Pulse Width < 300  $\mu\text{s}$ , Duty Cycle < 3.0%.

**SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS**

Small-Signal Drain-Source "ON" Resistance ( $V_{GS} = 0$ , $I_D = 0$ , $f = 1.0 \text{ kHz}$ )	$r_{ds(on)}$	—	150	Ohms
Input Capacitance ( $V_{DS} = 15 \text{ Vdc}$ , $V_{GS} = 0$ , $f = 1.0 \text{ MHz}$ )	$C_{iss}$	—	5.0	pF
Reverse Transfer Capacitance ( $V_{DS} = 0$ , $V_{GS} = 10 \text{ Vdc}$ , $f = 1.0 \text{ MHz}$ )	$C_{rss}$	—	1.2	pF

**SWITCHING CHARACTERISTICS**

Turn-On Delay Time	( $V_{DD} = 10 \text{ Vdc}$ , $I_{D(on)} = 7.0 \text{ mAdc}$ , $V_{GS(on)} = 0$ , $V_{GS(off)} = -10 \text{ Vdc}$ ) (See Figure 1)	$t_{d(on)}$	—	5.0	ns
Rise Time		$t_r$	—	5.0	ns
Turn-Off Delay Time	( $V_{DD} = 10 \text{ Vdc}$ , $I_{D(on)} = 7.0 \text{ mAdc}$ , $V_{GS(on)} = 0$ , $V_{GS(off)} = -10 \text{ Vdc}$ ) (See Figure 1)	$t_{d(off)}$	—	15	ns
Fall Time		$t_f$	—	10	ns

© Semiconductor Components Industries, LLC, 2001  
November, 2001 – Rev. 3

1

Publication Order Number:  
2N5555/D

Aspecto típico de la primera página de las hojas de datos de un transistor de efecto de campo canal N, en este caso, el 2N5555. Aquí se pueden consultar los principales parámetros operativos del componente en cuestión. (Cortesía: ON Semiconductor).

Para suplir ese aspecto, los fabricantes de dispositivos electrónicos ponen al alcance de los diseñadores una serie de “hojas de datos” de sus componentes, en las cuales están consignados precisamente todos los datos que se podrían llegar a necesitar al construir un circuito usando alguno de estos dispositivos. En estas hojas de datos (*datasheets*) se pueden

93

consultar los principales parámetros operativos de un dispositivo, y así determinar si es el correcto para la aplicación requerida, o si mejor se busca otro más adecuado para la función deseada.

En la figura superior se muestra una hoja de datos típica de un transistor FET canal N de pequeña señal, en este caso, el 2N555 fabricado por ON Semiconductor, y de esta hoja se pueden deducir los principales datos que se necesitan para el diseño de cualquier circuito:

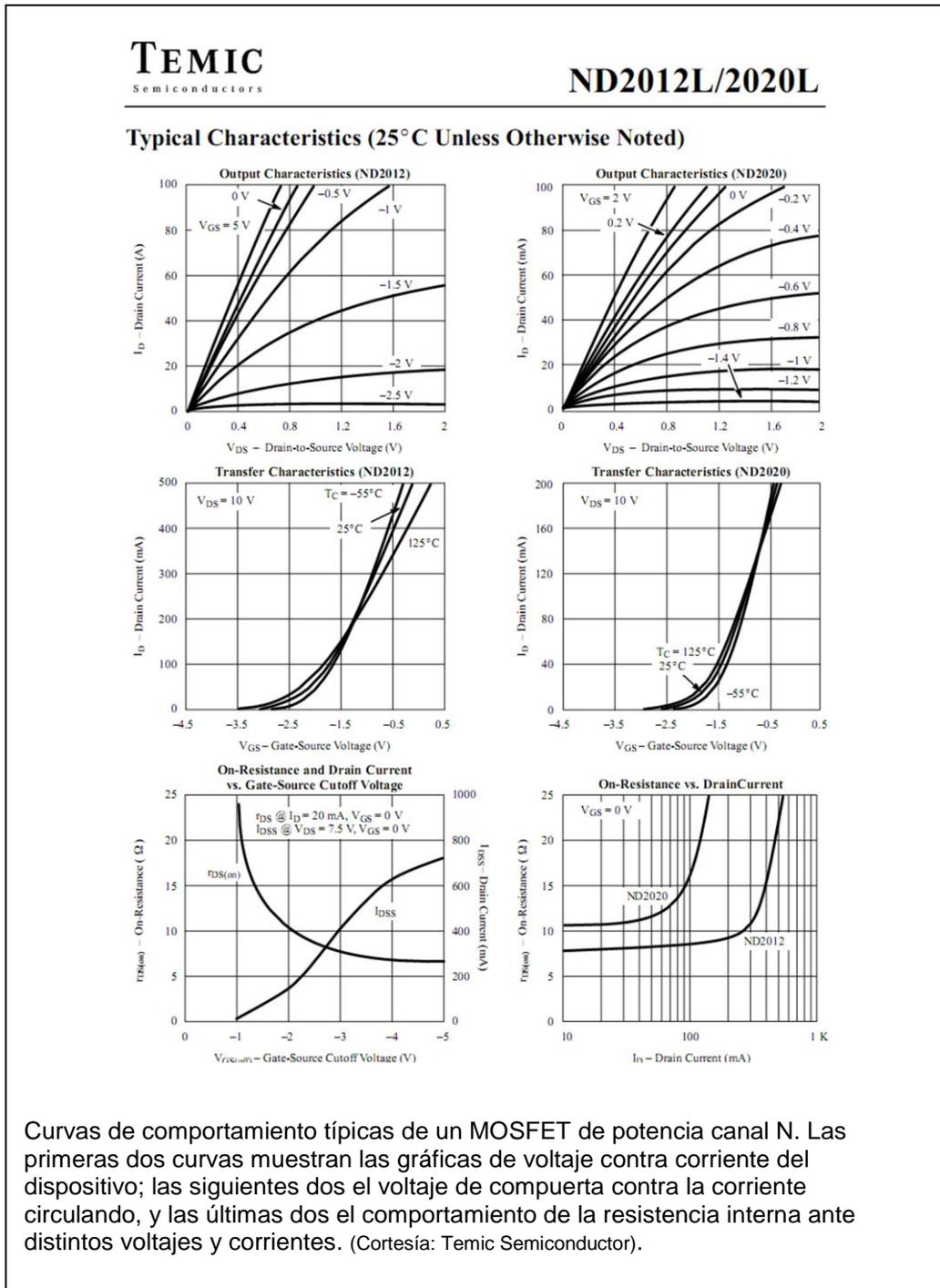
- Qué tipo de transistor es: FET, MOSFET, bipolar, UJT, etcétera.
- En el caso de los FET, si es de canal N o de canal P.
- Cuál es el voltaje máximo que se puede aplicar al FET ( $V_{DS}$ ).
- Corriente de saturación del FET ( $I_{DSS}$ ).
- Potencia máxima que puede disipar el FET ( $P_D$ ).
- Tipo de encapsulado y disposición de terminales.
- Resistencia entre D y S en modo encendido ( $r_{DS(on)}$ ).
- Tiempos de encendido y apagado ( $t_{d(on)}$  y  $t_{d(off)}$ ).

Y muchos otros datos más, que para aplicaciones especializadas o de alta frecuencia, resultan fundamentales para saber si el dispositivo cumplirá con las expectativas.

Estas hojas de datos se pueden consultar o descargar desde Internet, sólo se debe escribir en cualquier buscador: “(matrícula del dispositivo) datasheet”, y de inmediato se mostrarán diversas opciones para conseguir esa información. Por ejemplo, si se estuvieran buscando datos sobre un dispositivo 2SK3707, simplemente hay que poner en el buscador “2SK3707 datasheet” (sin comillas) y en unos segundos se podrá consultar o descargar la información detallada sobre ese componente.

En las hojas de datos también se incluyen una serie de gráficos que muestran el comportamiento del dispositivo ante diversas condiciones de polarización o de frecuencia. Estas curvas de comportamiento permiten al diseñador calcular de manera precisa la forma como reaccionará el dispositivo ante distintas condiciones de operación, y saber si el dispositivo cumplirá sus funciones tal cual o necesitará de elementos auxiliares (como podría ser un disipador de calor externo, redes de filtrado, protecciones

contra sobrevoltaje o corriente, etcétera). En caso de que se deba diseñar algún circuito de muy alta frecuencia o que maneje voltajes o corrientes muy elevados, es conveniente considerar estas curvas de comportamiento; así se pueden evitar sorpresas desagradables.



Otro uso común de las hojas de datos es la búsqueda de dispositivos alternativos en caso de que se necesite reemplazar algún componente en un circuito, pero la pieza original ya no se produzca o sea muy difícil de

conseguir. En estos casos, hay que descargar las hojas de datos del dispositivo original, consultar sus características fundamentales y, con ellas, entrar a los catálogos de componentes de los diversos fabricantes, hasta localizar alguno que sí pueda conseguirse y que funcione sin problemas como sustituto del original. Esta situación es muy común, sobre todo cuando se da servicio a equipo electrónico con más de cinco años de haber sido fabricado, algo muy frecuente en la industria.

Por todo lo anterior, es muy conveniente tener a la mano las hojas de datos de los dispositivos más usuales, ya sean diodos, transistores de efecto de campo, o cualquier otro tipo de componente electrónico con el que se tenga que lidiar con cierta frecuencia. También es bueno tener toda esta información descargada en alguna computadora, ya que se puede presentar el caso de tener que consultar algún dato y no tener acceso a Internet en ese momento.

#### ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE 4E

- a) ¿Quién proporciona al diseñador electrónico toda la información sobre sus dispositivos?
- b) ¿Cómo se le llama a esta información?
- c) Menciona cuatro parámetros típicos que se pueden consultar sobre los FET:
- d) ¿Para qué sirven las curvas de comportamiento?
- e) ¿En dónde se puede conseguir esta información?
- f) ¿Qué otro uso común tiene esta información?

## AUTOEVALUACIÓN

1. ¿De qué tipo era el primer transistor construido por Brattain, Bardeen y Shockley?
2. ¿Por qué le llamaron transistor?
3. ¿Cuál es la estructura básica de un transistor de efecto de campo?
4. ¿Cómo se controla el flujo de corriente dentro del dispositivo?
5. ¿Por qué se necesita un voltaje inverso en la compuerta?
6. ¿Cómo se le denomina al cálculo de los voltajes y resistencias necesarias para que un FET funcione como amplificador?
7. ¿Por qué es posible reunir miles o millones de MOSFET en un chip sencillo?
8. ¿Cómo se le llama a la configuración básica de un FET como amplificador y por qué?
9. ¿Por qué es importante contar con las hojas de datos de los fabricantes?

## RESPUESTAS

1. Era un transistor de efecto de campo de contacto, construido a base de germanio.
2. Porque transformaba un voltaje en una resistencia variable; transform-resistor.
3. Una barra de material semiconductor de un tipo, con un par de zonas de cristal del tipo opuesto formando un canal de conducción entre ellas.
4. Al aplicar un voltaje inverso a la unión P-N entre compuerta y fuente del FET, se forman zonas de no conducción, que van limitando la corriente que circula dentro del dispositivo.
5. Para crear las zonas de no conducción al polarizar en inversa la unión P-N.
6. Polarización del transistor.
7. Porque tienen muy bajo consumo de energía.
8. Amplificador inversor, porque la señal de entrada sale con mayor amplitud, pero invertida.
9. Para conocer los parámetros operativos del dispositivo en cuestión, y saber de antemano si es el adecuado para la aplicación que se desee.

## RESPUESTAS A LAS ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE

### *Actividad de aprendizaje 4A:*

- a) Transformador de resistencia; transform-resistor.
- b) Una barra de cristal semiconductor tipo N con dos regiones tipo P en su parte media, formando un canal de conducción.
- c) Porque se aprovecha el fenómeno de creación de una zona de no conducción en una unión P-N conectada en inversa.
- d) Fuente (Source), Drenador (Drain) y Compuerta (Gate).
- e) Para un voltaje de compuerta igual a cero voltios.
- f) Comienza a circular cada vez menos corriente entre D y S, hasta que el flujo se detiene por completo.

### *Actividad de aprendizaje 4B:*

- a) En la zona de comportamiento lineal de las curvas I-V, cuando el dispositivo ya entró en conducción pero antes de la zona de avalancha.
- b) Es la máxima corriente que puede circular entre D y S en un FET.
- c) Voltaje de estrangulamiento.
- d) (fórmula)
- e) Conectarlo de tal forma que pueda ser aprovechado como amplificador de señal.
- f) Conectando en su compuerta un voltaje inverso de aproximadamente  $\frac{1}{2}$  del valor del voltaje de estrangulamiento.
- g) Del punto de unión entre el drenador del transistor y su resistencia asociada.

### *Actividad de aprendizaje 4C:*

- a) La necesidad de utilizar dos fuentes de poder de polaridades inversas para que trabaje adecuadamente.
- b) Transistor de efecto de campo semiconductor con óxido metálico.
- c) Por expulsión de los portadores del cristal del canal, y atracción de portadores minoritarios del estrato de silicio.

- d) En circuitos digitales como elementos de conmutación.
- e) Porque el aislante en su compuerta es muy susceptible a daños por descargas electrostáticas.
- f) Los transistores MOSFET de potencia.

*Actividad de aprendizaje 4D:*

- a) Agregando un par de resistencias, una en la terminal de fuente y la otra en la terminal de compuerta.
- b) Prácticamente nada, ya que el FET sólo necesita voltaje y no corriente.
- c) De la terminal drenador del FET.
- d) El valor de las resistencias  $R_D$ ,  $R_S$  y  $R_G$ .

*Actividad de aprendizaje 4E:*

- a) Los fabricantes de los dispositivos electrónicos.
- b) Hojas de datos o datasheets.
- c) Qué tipo de transistor es, si es canal N o P, voltaje de operación, corriente de saturación, potencia máxima disipada, encapsulado y disposición de terminales, tiempo de respuesta, etc.
- d) Para conocer las características de operación del dispositivo ante altas frecuencias, voltajes o corrientes.
- e) Los fabricantes las ponen a disposición del público por medio de Internet.
- f) Para localizar componentes sustitutos en caso de que se necesite reemplazar algún dispositivo dañado y no se consiga fácilmente.

## UNIDAD 5

### EL TRANSISTOR BIPOLAR DE JUNTURA (TBJ)

#### OBJETIVO

El estudiante comprenderá el principio de funcionamiento y los detalles operativos de los transistores bipolares de juntura, que son los más utilizados en electrónica analógica, y son pieza fundamental para el manejo de señales eléctricas; conocerá su construcción, la teoría detrás de su comportamiento, sus curvas de operación, sus aplicaciones más comunes, así como sus ventajas y desventajas, para tener un conocimiento adecuado de esta tecnología y de su influencia en la electrónica moderna.

#### TEMARIO

5.1 ESTRUCTURA, FUNCIONAMIENTO Y CURVAS CARACTERÍSTICAS

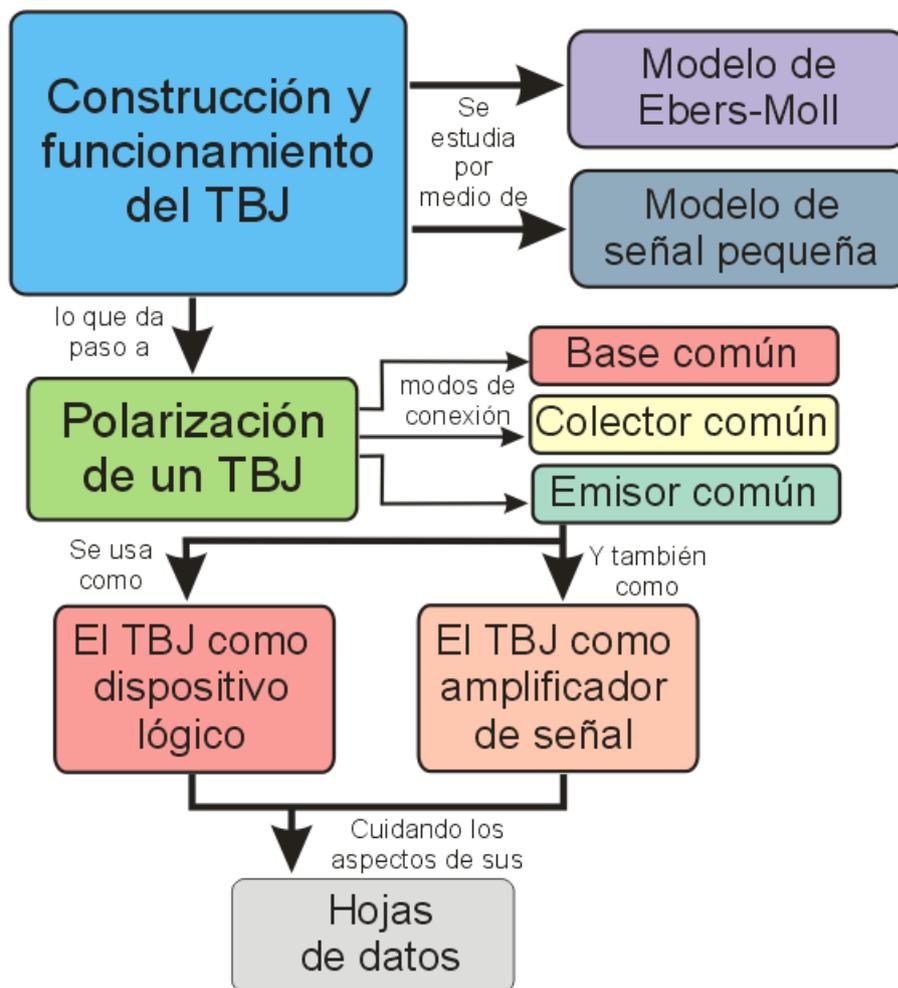
5.2 MODELOS Y POLARIZACIÓN

5.3 EL TBJ COMO INVERSOR Y COMPUERTAS LÓGICAS

5.4 EL AMPLIFICADOR BÁSICO

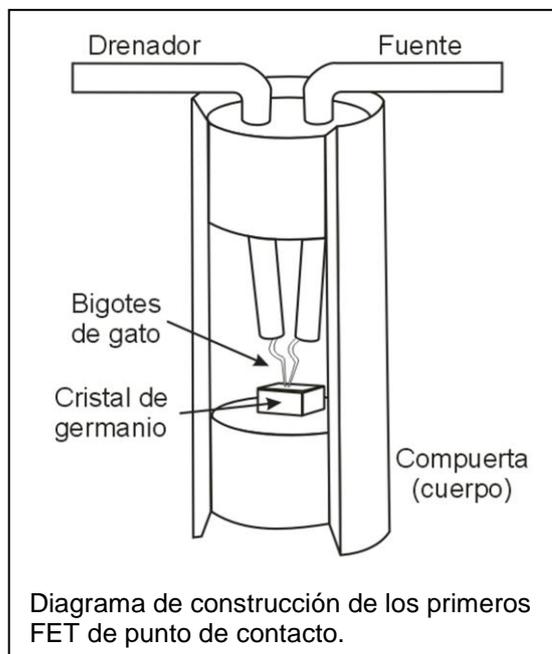
5.5 ESPECIFICACIONES DEL FABRICANTE

## MAPA CONCEPTUAL

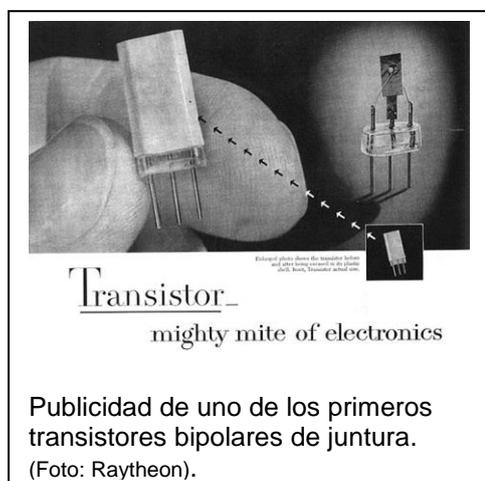


## INTRODUCCIÓN

Prácticamente desde que aparecieron los primeros transistores de efecto de campo de punto de contacto, muchos investigadores detectaron algunos inconvenientes que podrían afectar el desempeño regular de éstos; por ejemplo, cuando salieron los primeros transistores comerciales, estaban contruidos de forma muy similar al primer transistor descubierto en los laboratorios Bell; esto es, un bloque de germanio P-N con dos contactos metálicos adosados por medio de un resorte. Claro que cuando los FET se comenzaron a producir de forma masiva, se tuvieron que buscar



alternativas para lograr este contacto, optando por utilizar unos alambres con forma de “bigote de gato” (en la figura anexa se muestra un diagrama de cómo estaban contruidos estos primeros transistores); sin embargo, este método de construcción tenía el inconveniente de que, si el dispositivo sufría un golpe fuerte, los contactos podían moverse de lugar, afectando seriamente las condiciones operativas del dispositivo o arruinándolo completamente.



El mismo William Shockley, uno de los investigadores que desarrollaron el primer transistor, fue de los principales críticos de esta situación, e intentó desarrollar un modelo alternativo que permitiera la construcción masiva de dispositivos electrónicos que no tuvieran estos inconvenientes. Como resultado de sus investigaciones, en 1951

presentó el transistor bipolar de juntura o TBJ, un dispositivo que podía construirse de forma sólida y sin puntos que pudieran salirse de lugar, y que además resultaba fácil de fabricar para los procesos industriales de la época. El TBJ tenía la ventaja de que su funcionamiento no estaba supeditado a la posición de unos puntos de contacto “flotantes”, sino que trabajaba con base en cristales semiconductores sólidamente unidos entre sí. Esto le dio a los TBJ una confiabilidad y un desempeño uniforme, algo fundamental en el desarrollo de nuevos circuitos electrónicos.

Casi de inmediato, los TBJ desplazaron a los FET como los principales componentes en estos primeros pasos de la industria electrónica moderna, y hasta la fecha siguen siendo de los más usados, sobre todo en aplicaciones donde se manipulan señales de forma analógica.

¿Cómo funciona un TBJ y qué lo hace diferente a los transistores de efecto de campo? Esto se describirá en la presente unidad.