

# SEMICONDUCTORES. Conceptos y aplicaciones. Una revisión bibliográfica.

*SEMICONDUCTORS. Concepts and applications. A bibliographic review.*

Ing. Juan Carlos Rocha Hoyos <sup>1\*</sup>, Ing. Edilberto Antonio Llanes Cedeño <sup>2</sup>

1\* Magister en Sistemas Automotrices. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Email: [juan.rocha@epoch.edu.ec](mailto:juan.rocha@epoch.edu.ec) Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0660-7199>

2. Doctor Dentro del Programa de Doctorado en Ingeniería Rural. Universidad Internacional SEK, Ecuador.

Email: [antonio.llanes@uisek.edu.ec](mailto:antonio.llanes@uisek.edu.ec) Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6739-7661>

Correspondencia: [juan.rocha@epoch.edu.ec](mailto:juan.rocha@epoch.edu.ec)

Recibido: 20/Abril/2020

Aceptado: 19/Mayo/2020

Publicado: 30/Junio/2020

**Resumen:** El objetivo general de esta investigación se basa en el estudio de las propiedades de los materiales semiconductores y sus aplicaciones en el desarrollo técnico de dispositivos electrónicos. La metodología utilizada se basa en un diseño bibliográfico de tipo documental. Como conclusión se pudo determinar que un semiconductor es un material en el que ancho de banda prohibida es menor que 1eV. Las impurezas en un semiconductor intrínseco además de aumentar la conductividad pueden producir un conductor donde predominan portadores de electricidad denominados huecos o electrones. En los semiconductores extrínsecos, la magnitud de la conductividad, depende de la concentración de impurezas. La corriente en un semiconductor se produce como el efecto combinado de los dos tipos de flujo: el de los electrones libres en un sentido y el de los huecos en sentido opuesto. Dada la especial estructura de los semiconductores, en su interior pueden darse dos tipos de corrientes: corriente por arrastre de campo y corriente por difusión de portadores. Los semiconductores son componentes electrónicos fundamentales para la realización de la tecnología permitiendo regular la energía eléctrica de forma inteligente. Las aplicaciones prácticas de los semiconductores son innumerables.

**Palabras Clave:** Banda de energía, semiconductores, electrones.

**Abstract:** The general objective of this research is based on the study of the properties of semiconductor materials and their applications in the technical development of electronic devices. The methodology used is based on a documentary-type bibliographic design. In conclusion, it was possible to determine that a semiconductor is a material in which forbidden bandwidth is less than 1eV. Impurities in an intrinsic semiconductor In addition to increasing conductivity can produce a conductor where electricity carriers called holes or electrons predominate. In extrinsic semiconductors, the magnitude of conductivity depends on the concentration of impurities. The current in a semiconductor is produced as the combined effect of the two types of flow: that of free electrons in a sense and that of the holes in the opposite direction. Given the special structure of the semiconductors, two types of currents can occur: Current by field drag and current by diffusion of carriers. The semiconductors are fundamental electronic components for the realization of the technology allowing the electric power to regulate intelligently. The practical applications of semiconductors are innumerable.

**Keywords:** Energy band, semiconductors, electrons.

## INTRODUCCIÓN

**E**n la actualidad se observa que la palabra electrónica acompaña a la mayoría de los textos que tratan sobre avances tecnológicos. Por tanto se hace necesario definir a la electrónica como una rama de la física que estudia el movimiento del flujo de electrones o de partículas cargadas eléctricamente Peña (2017), la cual tiene aplicaciones en áreas tales como las telecomunicaciones, el procesamiento de datos, el control de procesos industriales, entre otros.

En la electrónica, el estudio de los materiales semiconductores es de gran importancia, ya que es la base en la construcción de los diferentes tipos de dispositivos utilizados en los equipos electrónicos, dispositivos que, dependiendo de las condiciones de operación a las que se sometan, tienen un comportamiento u otro (Leñero, Fundamentos de la electrónica y los semiconductores, 2018), es decir que pueden estar en estado de conducción eléctrica o pueden no conducir flujo de electrones. Estos materiales semiconductores poseen características muy específicas. En la naturaleza se pueden conseguir semiconductores elementales como el silicio y el germanio, también se tienen semiconductores compuestos como el arseniuro de galio.

Además, de los semiconductores elementales, llamados intrínsecos o puros, existen los semiconductores extrínsecos que son aquellos semiconductores intrínsecos a los cuales se les ha agregado una porción de impureza para permitir que el semiconductor sea más eficiente en la elaboración de los dispositivos electrónicos.

En este artículo se presenta una revisión bibliográfica sobre las características de los diferentes tipos de semiconductores: intrínseco y extrínsecos, además se elabora un cuadro comparativo de los elementos semiconductores para la elaboración de los dispositivos electrónicos.

## METODOLOGÍA

Según la revisión bibliográfica (Azuelo, 2019) define la metodología de la investigación como una serie de herramientas teórico-prácticas para la solución de problemas mediante el método científico. Por otro lado, la claridad en el enfoque y estructura metodológica es condición obligada para asegurar la validez de la investigación (Behar, 2008).

La investigación se basó en un diseño bibliográfico de tipo documental. El diseño se fundamenta en la revisión sistemática, rigurosa y profunda de material documental de cualquier clase, donde se efectúa un proceso de abstracción científica, generalizando sobre la base de lo fundamental, partiendo de forma ordenada y con objetivos precisos como lo indica (Palella y Martins, 2015). Para este fin se han considerado la revisión de documentos

y artículos científicos con información sobre el tema disponible en la web. El instrumento para la recolección de la información es la lectura de los documentos.

En la presente investigación se realiza una comparación entre los distintos tipos de materiales semiconductores que existen en la naturaleza. La forma de evaluar las características de los elementos es a través de la investigación de los conceptos necesarios que comprenden el área de los semiconductores y sus propiedades.

## RESULTADO

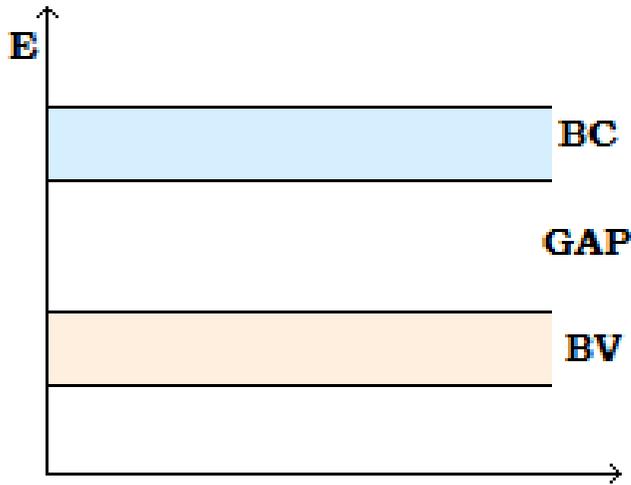
### Semiconductores

Las sustancias sólidas que encontramos en la naturaleza pueden clasificarse según el patrón de regularidad que forman los átomos que los constituyen. Si los átomos forman un patrón regular que se repite de forma constante a lo largo del espacio, decimos que tenemos un sólido cristalino o cristal (Leñero, 2018). De esta forma están constituidos los elementos semiconductores

Los semiconductores son elementos que se encuentran en la naturaleza cuya característica principal es la de tener un comportamiento de aislante bajo ciertas condiciones ambientales, a temperaturas menores a los 25°C, pero al ir aumentándolos valores de la temperatura su comportamiento es el de un conductor eléctrico. Se define en (Mercado et al. 2016) a los semiconductores como materiales cuya conductividad eléctrica está intermedia entre los conductores (metales) o aisladores (materiales cerámicos).

Una característica de los semiconductores es la propiedad de transmitir electrones a través de sí mismos. Esta propiedad puede ser explicada por medio de las bandas de energía. Las bandas son agrupaciones de niveles de energía que se encuentran en una estructura cristalina, Ver figura 1, tomada de (Leñero, 2018). En un átomo libre los niveles de energía electrónicos están cuantizados y son muy estrechos, sin embargo, cuando se enlazan los átomos para formar sólidos cristalinos, los niveles de energía se ensanchan dando lugar a bandas permitidas separadas por regiones prohibidas o gaps. Para poder visualizar la estructura detallada de las bandas de un cristal es necesario representar las energías en el espacio recíproco (Gutiérrez, 2016).

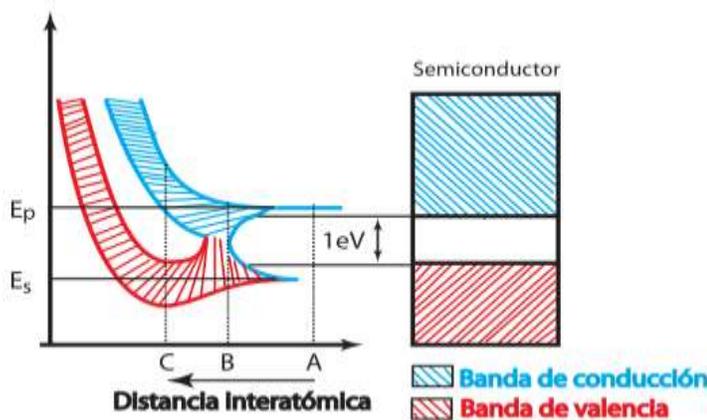
**Figura 1**  
*Bandas de Energía:*



Fuente: (Leñero, 2018)

La figura 2, ilustra los estados energéticos cuando se varía la distancia entre átomos y cómo se distribuyen los estados energéticos disponibles en los semiconductores (Leñero, 2018)

**Figura 2**  
*Bandas de Energía de un Semiconductor:*



Fuente: (Leñero, 2018)

En un semiconductor a temperatura ambiente o a mayor temperatura, algún electrón puede conseguir suficiente energía como para pasar a la Banda de Conducción, dejando así un hueco en la Banda de Valencia. La energía que se necesita para mover un electrón se conoce como electrón-voltio.

En la tabla 1, se muestran datos expresados por Neamen (2012), donde indica una clasificación de semiconductores en elementales y compuestos.

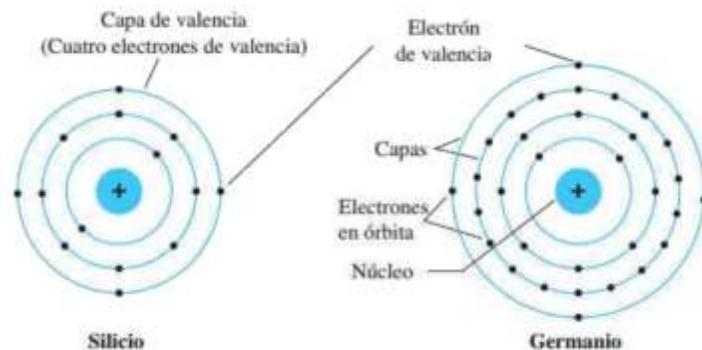
**Tabla 1.**  
*Tipos de Semiconductores.*

Semiconductores Elementales	Semiconductores Compuestos
Silicio (Si)	Arseniuro de Galio (GaAs)
Germanio (Ge)	Fosfuro de Galio (GaP)
	Fosfuro de Aluminio (AlP)
	Arseniuro de Aluminio (AlAs)
	Fosfuro de Ind -io (InP)

Fuente: (Neamen., 2012)

Los elementos semiconductores más comunes, ya que se encuentran en la naturaleza, son el silicio (Si), el Germanio (Ge) En la figura 3, el autor (Farandato, 2017), detalla una representación de un átomo de silicio y uno de germanio.

**Figura 3**  
*Átomos de Silicio y de Germanio:*



Fuente: (Farandato, 2017)

Por otro lado se puede obtener un tipo de semiconductor al mezclar arsénico y galio de las siguientes maneras: Se puede obtener haciendo pasar una mezcla gaseosa de hidrógeno (H<sub>2</sub>) y arsénico sobre óxido de galio (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a 600 °C, también se puede preparar mediante la reacción entre cloruro de galio (GaCl<sub>3</sub>) y óxido de arsénico (As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a 800 °C Stea (2020), de esta manera se obtiene arseniuro de galio (GaAs),.

En la tabla 2, recopilada de (Millman y Belza, 1991) presenta las propiedades atómicas de los elementos semiconductores silicio y germanio pertenecientes al grupo III de la tabla periódica.

**Tabla 2.**

*Propiedades del Silicio y Germanio.*

Propiedades	Silicio (Si)	Germanio (Ge)
Numero atómico	14	32
Peso atómico	28,086	72,59
E <sub>GO</sub> : Energía cinética, EV a 0°K	1,21	0.785
E <sub>G</sub> : Energía cinética, EV a 300°K	1,1	0.72

Fuente: (Millman y Belza, 1991)

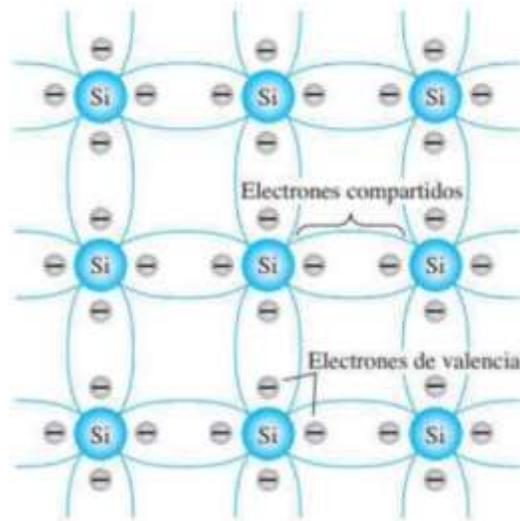
**Semiconductores Intrínsecos**

Los semiconductores intrínsecos están formados por un solo tipo de átomos que se caracterizan por formar moléculas tetraédricas (forma de diamante) unidas por enlaces covalentes los cuales no permiten el movimiento libre de los electrones. El proceso de conductividad ocurre al aumentar la temperatura, los electrones toman parte de la energía disponible y saltan, esto trae como consecuencia que se formen espacios libres que se traduce como una carga positiva que a su vez atrae nuevos electrones, este proceso se llama recombinación. (Arena y García, 2016)

En la figura 4 descrita por Farandato (2017) se observa una molécula de un material semiconductor intrínseco de silicio. Tienen una estructura cristalina y poseen cuatro electrones de valencia. La estructura cristalina hace que los átomos estén ligados compartiendo sus electrones de valencia. Las fuerzas internas provocadas por la tendencia de los átomos para completar su órbita externa con ocho electrones son muy grandes. Mucho mayor que las fuerzas eléctricas de atracción o repulsión. Como cada átomo tiene cuatro electrones, los átomos vecinos comparten sus electrones de modo que todos tengan ocho.

**Figura 4**

*Molécula pura de Silicio:*



Fuente: (Farandato, 2017)

El caso de la molécula de germanio es análogo al de la molécula de silicio, ya que cada átomo presenta 4 electrones en la capa de valencia y se unen por enlaces covalentes.

### **Conductividad en un Semiconductor Intrínseco.**

En un semiconductor intrínseco, la concentración de electrones libres es igual a la de huecos (Peula et al. 2014).

### **Semiconductores Extrínsecos**

Para que un cristal intrínseco se convierta en un semiconductor extrínseco es necesario agregarle impurezas a dicho cristal esto es aplicar pequeñas cantidades de otros minerales. Al proceso de agregar impurezas se le conoce como dopaje. Existen dos tipos de impurezas usadas para contaminar o dopar al semiconductor puro y se les denominan trivalentes y pentavalentes, definido así por (Valero Conzuelo, 2016). Las impurezas trivalentes o aceptores (p): Crean abundancia de huecos, menos electrones (portadores minoritarios). Las impurezas pentavalentes o donadoras (n): Generan más electrones (portadores mayoritarios), como se indica en (Ignacio-Martínez et al. 2021).

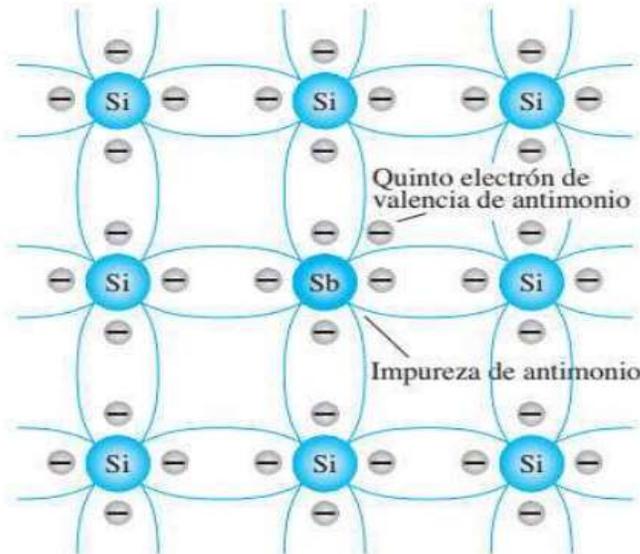
### **Impurezas Donadoras**

Agregar impurezas donadoras es una forma de agregar electrones libres, o de conducción. El arsénico, el fósforo y el antimonio son elementos pentavalentes, llamados también impurezas donadoras. En la figura 5 se representa una estructura cristalina con una impureza donadora. Se trata de un átomo de antimonio que ha sustituido a uno de silicio (o

puede ser de germanio) en la estructura. Estructuralmente el átomo de impureza es muy parecido al de silicio y completa los cuatro enlaces normales de valencia del cristal. Pero el antimonio tiene cinco electrones de valencia. Un electrón queda sin completar enlace alguno. Este quinto electrón tiene la suficiente energía para romper el vínculo con su átomo y quedar libre, lo que genera un átomo cargado positivamente, ion positivo (anión) (Farandato, 2017).

**Figura 5**

*Molécula de Silicio con impureza donadora:*



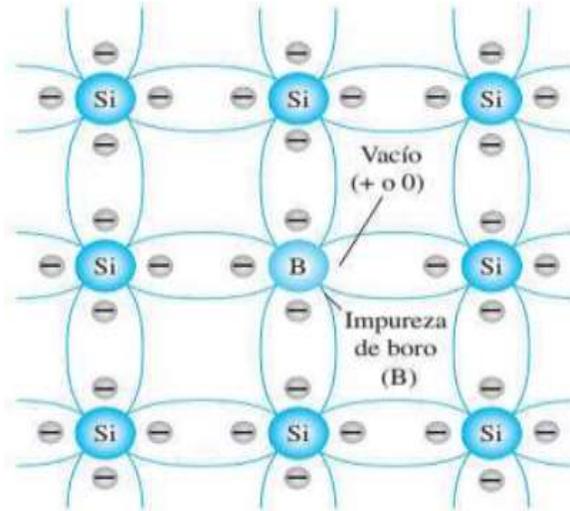
Fuente: (Farandato, 2017)

### Impurezas Aceptoras

Agregar impurezas aceptoras es una forma de agregar huecos. El aluminio, el indio, el galio y el boro son elementos trivalentes, llamados también impurezas aceptoras. En la figura 6 se representa la zona del cristal con una impureza aceptoras. Es un átomo de boro que ha sustituido a uno de silicio (o germanio) en la estructura cristalina. Estructuralmente el átomo de boro es muy parecido al del cristal, pero solo puede completar tres de los cuatro enlaces de valencia. Queda un enlace libre que tiene una gran afinidad hacia los electrones vecinos. Es evidente que el átomo completará ese enlace, determinando el nacimiento de un ion negativo (anión), cada átomo de impureza provoca el nacimiento de un hueco (Farandato, 2017).

**Figura 6**

*Molécula de Silicio con impureza aceptora:*



Fuente: (Farandato, 2017)

### **Conductividad en un Semiconductor Extrínseco.**

En un semiconductor extrínseco la concentración de portadores mayoritarios es muy superior a la de portadores minoritarios (Peula et al. 2014).

### **Aplicaciones de los Semiconductores.**

Los semiconductores son componentes electrónicos fundamentales para la realización de la tecnología que conocemos hoy en día, permitiendo regular la energía eléctrica de forma inteligente. El dispositivo semiconductor más simple es el diodo, sus aplicaciones más evidentes son: la conversión de corriente alterna en continua, conversión de energía luminosa a eléctrica y la emisión de luz ; por otro lado, el dispositivo semiconductor más relevante visto desde el punto tecnológico es el transistor, el cual es utilizado para producir una señal de salida como respuesta a una señal de entrada, dispositivo que se puede encontrar en los televisores, equipos de música, relojes y celulares (Mercado et al. 2016).

### **Características del Silicio.**

El silicio es un metaloide cuya forma es un sólido cristalino, duro y quebradizo de color azul grisáceo. Como se observa en la tabla 2 su símbolo es Si, el número atómico es 14 y de peso atómico 28.086. El silicio es el elemento electropositivo más abundante de la corteza terrestre (Lenntech B.V, 2021). Es el segundo elemento que más se encuentra en la corteza terrestre después del oxígeno (4,95 x 10<sup>5</sup> p.p.m.). Este material compone alrededor del 20% de la corteza terrestre (Martínez, 2011).

El silicio es el material semiconductor más común en la fabricación de dispositivos electrónicos de tipo analógico e integrado y también se usa para la fabricación de celdas fotovoltaicas de alto rendimiento y alto costo.

### **Características del Germanio**

Entre las características del germanio se tienen que es un metal quebradizo de color gris plata, cuyo número atómico es 32, peso atómico 72,59 y su símbolo es el Ge (Ver tabla 2). Se encuentra muy distribuido en la corteza terrestre con una abundancia de 6.7 partes por millón (ppm). Este elemento es apariencia es parecido al silicio. Las propiedades del germanio son tales que este elemento tiene varias aplicaciones importantes, especialmente en la industria de los semiconductores (Lenntech B.V, 2021).

El germanio tiene aplicaciones importantes en la industria de los semiconductores, se utilizó por primera vez en los años 1960's como material semiconductor en unidades de radar y en los primeros transistores, también es usado en instalaciones fotovoltaicas terrestres como capas muy finas pulidas que permitieron un incremento en la eficiencia en comparación con el silicio cristalino (Valverde, 2019). Los principales usos finales del germanio que incluyen: sistemas de fibra óptica (30%), óptica infrarroja (25%), catalizadores de polimerización (25%), aplicaciones de electrónica y electricidad solar (15%), y otros usos (ej. quimioterapia, metalurgia y fósforos, 5% (Shanks III et al. 2017).

### **Características del Arseniuro de Galio**

El arseniuro de galio es un compuesto inorgánico formado por un átomo de galio (Ga) y un átomo de arsénico (As). Su fórmula química es GaAs. Es un sólido gris oscuro que puede presentar un brillo metálico azul verdoso o polvo gris. Sus cristales son cúbicos. Posee un peso molecular de 144,64 g/mol. Tiene un ancho de brecha energética de 1,424 eV (PubChem, 2019)

El Arseniuro de Galio (GaAs) convierte la electricidad directamente en luz láser, lo que permite la construcción de dispositivos optoelectrónicos (diodos laser, led), magnetoresistencia, termistores, condensadores y la producción de circuitos integrados usados para aplicaciones de defensa, computadoras de alto rendimiento transmisión fotoelectrónica de datos por fibra óptica, microondas, circuitos integrados usados en dispositivos para comunicaciones satelitales, sistemas de radar, teléfonos inteligentes (tecnología 4G) y tablets (Elinoff, 2019)

De las características obtenidas en las investigaciones bibliográficas previas se elabora el cuadro comparativo que se observa en la tabla 3.

**Tabla 3**

*Cuadro Comparativo:*

Elemento	Costo de Producción	Uso
<b>Silicio</b>	Bajo	Dispositivos electrónicos de uso cotidiano: Diodos, transistores, Leds, Circuitos integrados de baja y media frecuencia. Celdas solares
<b>Germanio</b>	Alto	Dispositivos electrónicos de uso cotidiano: Diodos, transistores, Leds, de amplia gama. Celdas fotovoltaicas, fibra óptica, leds infrarrojos.
<b>Arseniuro de Galio</b>	Muy alto	Dispositivos optoelectrónicas (diodos laser, led), magneto resistencia, termistores, condensadores y la producción de circuitos integrados.

Fuente: Elaboración Propia

Este cuadro indica que los elementos semiconductores se utilizan para elaborar dispositivos electrónicos que pueden ser usados en diferentes áreas tecnológicas, que dependiendo del semiconductor estos dispositivos son de baja o alta gama y los costos de o dispositivos y equipos electrónicos serán más bajos si el material usado es silicio y más costoso si es arseniuro de galio.

Una información importante que se desprende de la investigación bibliográfica realizada es que el silicio es el semiconductor más empleado en la fabricación de los dispositivos de uso electrónico debido al bajo costo como materia prima debido a su gran abundancia en la naturaleza.

Además del análisis de la información investigada se ha inferido que los semiconductores y sus aplicaciones han representado una de las revoluciones tecnológicas de gran impacto a la sociedad, generando cambios en el modo de vida de personas a nivel mundial.

Por otro lado, las bandas de energía el valor de la banda prohibida indica si el elemento es un material conductor, aislante o semiconductor.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Como resultado de la revisión bibliográfica realizada se tienen las siguientes conclusiones:

Semiconductor es un material en el que ancho de banda prohibida es menor que 1eV. Asimismo se determina que las impurezas en un semiconductor intrínseco además de aumentar la conductividad pueden producir un conductor donde predominan portadores de electricidad denominados huecos o electrones.

En los semiconductores extrínsecos, la magnitud de la conductividad, depende de la concentración de impurezas. La corriente en un semiconductor se produce como el efecto combinado de los dos tipos de flujo: el de los electrones libres en un sentido y el de los huecos en sentido opuesto.

Dada la especial estructura de los semiconductores, en su interior pueden darse dos tipos de corrientes: corriente por arrastre de campo y corriente por difusión de portadores. Los semiconductores son componentes electrónicos fundamentales para la realización de la tecnología permitiendo regular la energía eléctrica de forma inteligente. Las aplicaciones prácticas de los semiconductores son innumerables.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arena, M., & García, J. (2016). Diseño y Síntesis de Semiconductores Orgánicos con Capacidad de Organización, Alta Movilidad de Portadores de Carga y Bajo Band Gap. Madrid, España: Trabajo de grado de la Universidad Politécnica de Madrid.
- Azuero, Á. (2019). Significatividad del marco metodológico en el desarrollo de proyectos de investigación. (R. A. Koinonía, Ed.) Revista arbitrada interdisciplinaria Koinonía 4(8), 110-127.
- Behar, D. (2008). Metodología de la Investigación. (B. Shalom, Editor) Recuperado el 06 de 09 de 2021, de <https://universoabierto.org/2019/07/17/introduccion-a-la-metodologia-de-la-investigacion/>
- Elinoff, G. (23 de Agosto de 2019). Gallium Arsenide: Another Player in Semiconductor Technology. Recuperado el 10 de Septiembre de 2021, de <https://www.allaboutcircuits.com/news/gallium-arsenide-another-player-in-semiconductor-technology/>
- Farandato, F. (2017). Materiales semiconductores y diodos. Impurezas en el sólido cristalino, Niveles de energía juntura P-N. Recuperado el 15 de Septiembre de 2021, de [https://www.academia.edu/33576894/Materiales\\_semiconductores\\_y\\_diodos\\_pdf?bulkDownload=thisPaper-topRelated-sameAuthor-citingThis-citedByThis-secondOrderCitations&from=cover\\_page](https://www.academia.edu/33576894/Materiales_semiconductores_y_diodos_pdf?bulkDownload=thisPaper-topRelated-sameAuthor-citingThis-citedByThis-secondOrderCitations&from=cover_page)
- Gutiérrez, M. (2016). Estudio de la Naturaleza de las Bandas de Valencia y Conducción de los Sólidos Cristalinos. Trabajo especial de grado de la Universidad de Cantabria para optar al grado en Física.
- Ignacio-Martínez, M., Vázquez-Flores, S., & Cruz-Castellanos, D. (05 de 01 de 2021). Tipos de materiales. TEPEXI Boletín Científico De La Escuela Superior Tepeji Del Río, 8(15), 35-39.
- Lenntech B.V. (2021). Germanio. Propiedades químicas del Germanio. Recuperado el 10 de 09 de 2021, de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/ge.htm#ixzz764GMdeEK>
- Lenntech B.V. (2021). Silicio. Propiedades químicas del Silicio. Recuperado el 15 de Septiembre de 2021, de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/si.htm#ixzz764K5m2wY>

- Leñero, J. (2018). Fundamentos de la electrónica y los semiconductores. Cádiz, España: Editorial UCA.
- Martínez, M. (2011). Materiales y Materias Primas. Silicio. Recuperado el 11 de Septiembre de 2021, de <https://www.virtualpro.co/biblioteca/materiales-y-materias-primas-silicio>
- Mercado, A., Martínez, M., Favila, F., & García, A. (06 de 2016). Historia y evolución de la industria de semiconductores y la integración de México en el sector universidad autónoma de Ciudad Juárez. (E. S. edition, Ed.) European Scientific Journal 2 (18) , 65-78.
- Millman, J., & Belza, E. (1991). Microelectrónica. 6. ed. Editorial Hispano Europea, S.A.
- Neamen., D. (2012). Dispositivos y Circuitos Electrónicos. México: McGraw-Hill.
- Parella, S., & Martins, F. (2015). Metodología de la investigación cuantitativa. 3ra Edición. Recuperado el 16 de Septiembre de 2021, de <https://es.calameo.com/read/000628576f51732890350>
- Peña, J. (2017). Arduino-De Cero a Experto: Proyectos Prácticos-Electrónica, hardware y programación. (RedUsers., Ed.) Recuperado el 06 de Septiembre de 2021, de [https://books.google.es/books?hl=es&lr=lang\\_es&id=08h\\_3J6BOH8C&oi=fnd&pg=PA1&dq=concepto+de+electronica&ots](https://books.google.es/books?hl=es&lr=lang_es&id=08h_3J6BOH8C&oi=fnd&pg=PA1&dq=concepto+de+electronica&ots)
- Peula, J., Alados, I., Liger, E., & Vargas, J. (2014). Fundamentos Físicos de la Informática. España: Guía de física de semiconductores de la Universidad de Málaga.
- PubChem. (2019). Gallium arsenide. Recuperado el 08 de 09 de 2021, de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Gallium-arsenide>
- Shanks III, P., Kimball, B., Tolcin, A., & Guberman, D. (2017). Germanium and indium. Professional Paper 1802-I. U.S Department of the interior and U.S Geological Survey.
- Stea, M. (21 de Abril de 2020). Arseniuro de galio: estructura, propiedades, usos, riesgos. Recuperado el 15 de Septiembre de 2021, de <https://www.lifeder.com/arseniuro-de-galio/>
- Valero Conzuelo, L. L. (2016). Polímeros Conductores. Universidad Autónoma de México. Recuperado el 08 de 09 de 2021, de <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/64291/secme-11858.pdf?sequence=1>

Valverde, P. (2019). Distribución de metales de alta tecnología (In, Ge y Ga) en los Andes Centrales y propuesta de estudio en el distrito de Morococha, Perú. Lima: Trabajo especial de grado de la Pontificia Universidad Católica del Perú para optar al título de Bachiller en Ciencias con mención en Ingeniería Geológica.