

UDS

ANTOLOGIA

ELECTRONICA I

INGENIERIA EN SISTEMAS COMPUTACIONALES

5TO CUATRIMESTRE

Marco Estratégico de Referencia

ANTECEDENTES HISTORICOS

Nuestra Universidad tiene sus antecedentes de formación en el año de 1979 con el inicio de actividades de la normal de educadoras “Edgar Robledo Santiago”, que en su momento marcó un nuevo rumbo para la educación de Comitán y del estado de Chiapas. Nuestra escuela fue fundada por el Profesor de Primaria Manuel Albores Salazar con la idea de traer Educación a Comitán, ya que esto representaba una forma de apoyar a muchas familias de la región para que siguieran estudiando.

En el año 1984 inicia actividades el CBTiS Moctezuma Ilhuicamina, que fue el primer bachillerato tecnológico particular del estado de Chiapas, manteniendo con esto la visión en grande de traer Educación a nuestro municipio, esta institución fue creada para que la gente que trabajaba por la mañana tuviera la opción de estudiar por las tarde.

La Maestra Martha Ruth Alcázar Mellanes es la madre de los tres integrantes de la familia Albores Alcázar que se fueron integrando poco a poco a la escuela formada por su padre, el Profesor Manuel Albores Salazar; Víctor Manuel Albores Alcázar en septiembre de 1996 como chofer de transporte escolar, Karla Fabiola Albores Alcázar se integró como Profesora en 1998, Martha Patricia Albores Alcázar en el departamento de finanzas en 1999.

En el año 2002, Víctor Manuel Albores Alcázar formó el Grupo Educativo Albores Alcázar S.C. para darle un nuevo rumbo y sentido empresarial al negocio familiar y en el año 2004 funda la Universidad Del Sureste.

La formación de nuestra Universidad se da principalmente porque en Comitán y en toda la región no existía una verdadera oferta Educativa, por lo que se veía urgente la creación de una institución de Educación superior, pero que estuviera a la altura de las exigencias de los jóvenes que tenían intención de seguir estudiando o de los profesionistas para seguir preparándose a través de estudios de posgrado.

Nuestra Universidad inició sus actividades el 18 de agosto del 2004 en las instalaciones de la 4ª avenida oriente sur no. 24, con la licenciatura en Puericultura, contando con dos grupos de cuarenta alumnos

cada uno. En el año 2005 nos trasladamos a nuestras propias instalaciones en la carretera Comitán – Tzimol km. 57 donde actualmente se encuentra el campus Comitán y el Corporativo UDS, este último, es el encargado de estandarizar y controlar todos los procesos operativos y Educativos de los diferentes Campus, Sedes y Centros de Enlace Educativo, así como de crear los diferentes planes estratégicos de expansión de la marca a nivel nacional e internacional.

Nuestra Universidad inició sus actividades el 18 de agosto del 2004 en las instalaciones de la 4ª avenida oriente sur no. 24, con la licenciatura en Puericultura, contando con dos grupos de cuarenta alumnos cada uno. En el año 2005 nos trasladamos a nuestras propias instalaciones en la carretera Comitán – Tzimol km. 57 donde actualmente se encuentra el campus Comitán y el corporativo UDS, este último, es el encargado de estandarizar y controlar todos los procesos operativos y educativos de los diferentes campus, así como de crear los diferentes planes estratégicos de expansión de la marca.

MISIÓN

Satisfacer la necesidad de Educación que promueva el espíritu emprendedor, aplicando altos estándares de calidad Académica, que propicien el desarrollo de nuestros alumnos, Profesores, colaboradores y la sociedad, a través de la incorporación de tecnologías en el proceso de enseñanza-aprendizaje.

VISIÓN

Ser la mejor oferta académica en cada región de influencia, y a través de nuestra Plataforma Virtual tener una cobertura Global, con un crecimiento sostenible y las ofertas académicas innovadoras con pertinencia para la sociedad.

VALORES

- Disciplina
- Honestidad
- Equidad
- Libertad

ESCUDO

El escudo de la UDS, está constituido por tres líneas curvas que nacen de izquierda a derecha formando los escalones al éxito. En la parte superior está situado un cuadro motivo de la abstracción de la forma de un libro abierto.

ESLOGAN

“Mi Universidad”

ALBORES

Es nuestra mascota, un Jaguar. Su piel es negra y se distingue por ser líder, trabaja en equipo y obtiene lo que desea. El ímpetu, extremo valor y fortaleza son los rasgos que distinguen.

Electrónica I

Objetivo de la materia:

El alumno aprenderá los componentes y dispositivos electrónicos y fotónicos. Circuitos electrónicos analógicos: Amplificadores, fuentes de alimentación Circuitos electrónico digitales: familias lógicas, subsistemas combinacionales y secuenciales, interfaces analógicas-digitales.

INDICE

Unidad I ELECTRONICA ANALOGICA Y SEÑALES ANALOGICAS

- I.1 sistema electrónico
- I.2 Señales de un sistema electrónico: señal de entrada salida
- I.3 Señal analógica: tipos.
- I.4 Sistemas digitales.
- I.5 MODULO - DIRECCION – SENTIDO
- I.6 Señal digital
- I.7 Señales lineales y no lineales
- I.8 Distorsión de sistemas no lineales
- I.9 Conversión digital / analógica (D/A)
- I.10 Variables eléctricas
- I.11 Fuentes de tensión y de corriente

Unidad II SEMICONDUCTORES

- 2.1 Teoría de bandas de energía de los cristales
- 2.2 Dopaje de Semiconductores
- 2.3 Ley de acción de masas
- 2.4 Movilidad y conductividad de carga de un semiconductor extrínseco.
- 2.5 Difusión de portadores en un semiconductor graduado.
- 2.6 La ecuación de continuidad.
- 2.7 Inyección de portadores minoritarios en un semiconductor extrínseco.
- 2.8 Clasificación de la material
- 2.9 Estructuras de los semiconductores
- 2.10 Contactos metálicos
- 2.11 Transporte de cargas en un semiconductor

Unidad III INTRODUCCION A LA ELECTRONICA

- 3.1 Geroge BoolE
- 3.2 Algebra de Boole. Propiedades.

- 3.3 Funciones lógicas elementales.
- 3.4 Representación de una función lógica.
- 3.5 Simplificación de funciones lógicas.
- 3.6 Realización de funciones lógicas.
- 3.7 Representación digital de la información.
- 3.8 Expresiones booleanas
- 3.9 Propiedades de las expresiones booleanas
- 3.10 Optimización de expresiones booleanas
- 3.11 Simplificación de expresiones booleanas usando mapas de Karnaugh
- 3.12 Compuertas lógicas
- 3.13 Aplicaciones del álgebra booleana
- 3.14 Álgebra en la electrónica

Unidad IV CIRCUITOS Y SUBSISTEMAS COMBINACIONALES.

- 4.1 Subsistema combinacional
- 4.2 Multiplexores y Demultiplexores
- 4.3 Demultiplexor
- 4.4 Codificadores
- 4.5 Sumadores
- 4.6 Restadores
- 4.7 Generadores / comprobadores de paridad
- 4.8 Comparadores
- 4.9 Decodificadores
- 4.10 Diferencia entre Codificador y Decodificador
- 4.11 Unidades aritmético-lógicas.

BIBLIOGRAFIA

Contenido

Unidad 1 ELECTRONICA ANALOGICA Y SEÑALES ANALOGICAS 11

1.1 sistema electrónico 11

1.2 Señales de un sistema electrónico: señal de entrada salida 11

1.3 Señal analógica: tipos. 13

1.5 Sistemas digitales. 16

1.6 MODULO - DIRECCION – SENTIDO 17

1.7 Señal digital 18

1.8 Señales lineales y no lineales 19

1.9 Distorsión de sistemas no lineales 23

1.10 Conversión digital / analógica (D/A) 24

1.11 Variables eléctricas 25

1.12 Fuentes de tensión y de corriente 26

Unidad II SEMICONDUCTORES..... 28

2.1 Teoría de bandas de energía de los cristales 28

2.2 Dopaje de Semiconductores 30

2.3 Ley de acción de masas..... 35

2.4 Movilidad y conductividad de carga de un semiconductor extrínseco..... 36

2.5 Difusión de portadores en un semiconductor graduado..... 40

2.6 La ecuación de continuidad. 41

2.7 Inyección de portadores minoritarios en un semiconductor extrínseco..... 43

2.8 Clasificación de la material 44

2.9 Estructuras de los semiconductores..... 45

2.10 Contactos metálicos 49

 2.11 Transporte de cargas en un semiconductor 52

Unidad III INTRODUCCION A LA ELECTRONICA..... 55

3.2 Geroge Boole 55

3.3 Algebra de Boole. Propiedades..... 59

3.4 Funciones lógicas elementales..... 64

3.5 Representación de una función lógica. 65

3.6 Simplificación de funciones lógicas. 66

3.7 Realización de funciones lógicas. 67

3.8 Representación digital de la información..... 68

3.9 Expresiones booleanas 69

3.10 *Propiedades de las expresiones booleanas* 70

3.11 Optimización de expresiones booleanas 72

3.12 Simplificación de expresiones booleanas usando mapas de Karnaugh..... 75

3.13 Compuertas lógicas..... 77

3.14 Aplicaciones del álgebra booleana..... 79

3.15 Algebra en la electrónica 82

Unidad IV CIRCUITOS Y SUBSISTEMAS COMBINACIONALES. 83

4.1 Subsistema combinacional 83

4.2 Multiplexores y Demultiplexores 84

4.3 Demultiplexor..... 87

4.4 Codificadores 88

4.5 Sumadores 90

4.6 Restadores 92

4.7 Generadores / comprobadores de paridad 95

4.8 Comparadores 98

4.9 Decodificadores 98

4.10 Diferencia entre Codificador y Decodificador 100

4.11 Unidades aritmético-lógicas. 101

BIBLIOGRAFIA 103

Unidad 1 ELECTRONICA ANALOGICA Y SEÑALES ANALOGICAS

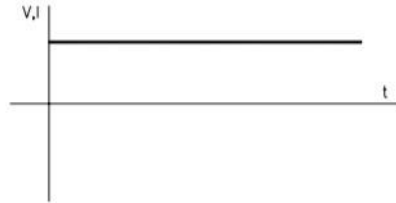
1.1 sistema electrónico

Son circuitos electrónicos cuya misión es controlar automáticamente el funcionamiento de algunas máquinas u operadores. En todo sistema electrónico tendremos dispositivos de estos tres tipos: - Los dispositivos de entrada: generan una señal eléctrica a partir de una señal exterior de otro tipo (por ejemplo la temperatura, la actuación con la mano sobre un pulsador). - Los de proceso: reciben las señales de los dispositivos de entrada y deciden cual es la acción a realizar. - Los dispositivos de salida: tienen como misión ejecutar las acciones que deciden los de proceso. Gráficamente se representan con en la siguiente ilustración.

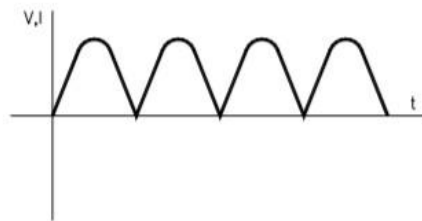


1.2 Señales de un sistema electrónico: señal de entrada salida

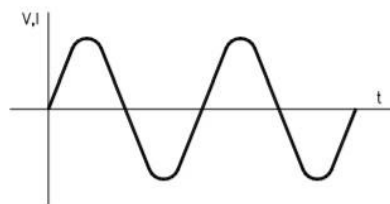
Como sabemos, una corriente eléctrica consiste básicamente en un flujo de electrones que circula a través de un elemento conductor, por ejemplo un cable de cobre. Cuando los electrones se mueven siempre en el mismo sentido, el flujo se denomina corriente continua.



Si los electrones se mueven siempre en el mismo sentido, pero su cantidad o número varía en el tiempo estamos ante una corriente continua pulsante



Finalmente, si los electrones cambian periódicamente de sentido, tendremos una corriente alterna.



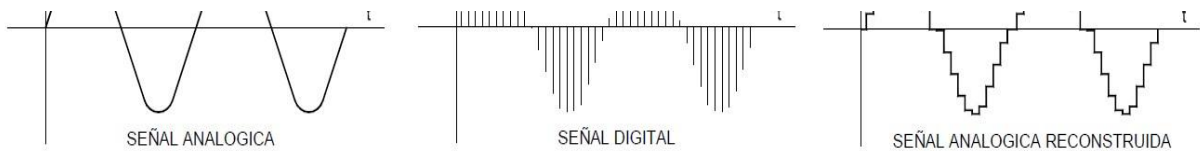
Las variaciones o impulsos de la corriente se pueden codificar para transmitir información. Por lo tanto podemos concretar en que una señal eléctrica es un conjunto codificado de impulsos eléctricos capaz de transmitir información.

I.3 Señal analógica: tipos.

Las señales utilizadas por los sistemas electrónicos pueden ser de dos tipos: analógicas o digitales.

- Una señal analógica es una señal continua, por lo que el número de valores que puede tomar, entre el mínimo y el máximo es infinito
- Una señal digital es una señal discreta, es decir, sólo existe en determinados instantes. Sólo puede tomar valores concretos, transmitidos habitualmente en el sistema de codificación binario (dos bits o estados).

La conversión entre ambos tipos de señales es de vital importancia en los sistemas electrónicos, existiendo

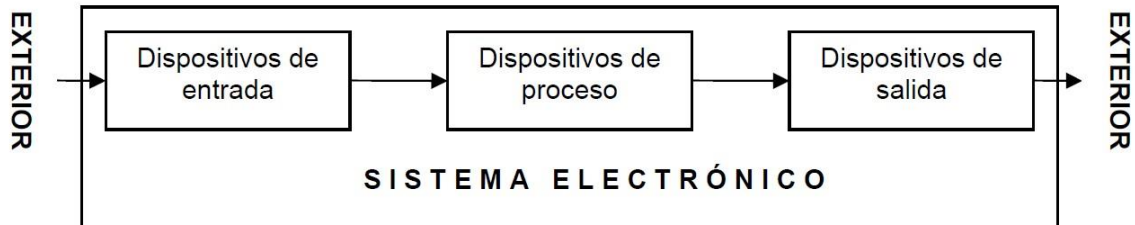


En general, todos los sistemas electrónicos constan de tres bloques funcionales claramente diferenciados:

bloques de entrada, bloques de proceso y bloques de salida.

- Un **bloque de entrada** es aquel a través del cual se introduce la orden o señal, bien a través de un elemento accionador (interruptor, pulsador, pedal, ...) o bien a través de sensores (finales de carrera, células fotoeléctricas, boyas, ...).
- Un **bloque de proceso** es aquel que se ocupa de transformar la señal de entrada en otra (señal de salida) capaz de accionar el módulo de salida. Son los dispositivos que deciden cuál es la acción a realizar.
- Un **bloque de salida** se encarga de realizar la acción correspondiente para la que se diseña, recibiendo la señal de salida del bloque de proceso para actuar (motores, lámparas, timbres, altavoces, ...).

Gráficamente cualquier sistema electrónico se representa con el diagrama de bloques de la siguiente figura.



1.4 Valor eficaz de una señal.

VALOR MEDIO: Es la media aritmética de los valores instantáneos de una señal, durante un intervalo de tiempo $t_2 - t_1$. Si la señal es periódica, el intervalo no es más que el período mismo de dicha señal.

En general:

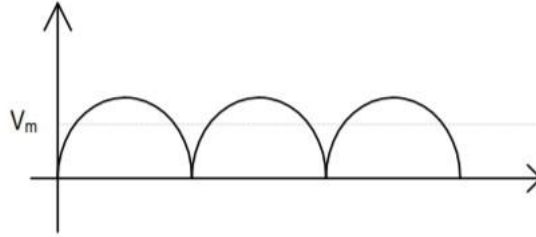
$$V_m = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt$$

Para una señal periódica

$$V_m = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

Por otra parte, si el valor medio de una función periódica es cero, la función es alterna. Es por esto que a los circuitos cuyas corrientes son sinusoidales se les llama circuitos de corriente alterna.

También se puede calcular como el área comprendida bajo la curva para un ciclo. Las señales periódicas en las cuales el valor medio es diferente de cero se denominan señales pulsantes



VALOR EFICAZ (o valor RMS, Root Mean Square): Se define como la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los valores instantáneos alcanzados en un lapso t_2-t_1 :

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (f(t))^2 dt}$$

Este valor es de gran importancia ya que desde el punto de vista de las corrientes industriales es muy utilizado. Se representa con la letra mayúscula del símbolo de la variable de que se trate; por ejemplo ($V=220V$) Eléctricamente, los valores medios y eficaces son muy utilizados. Su interpretación es la siguiente:

Valor Medio: La carga eléctrica transportada por una corriente $i(t)$, en el intervalo t_2-t_1 , se iguala con la que transportaría en el mismo lapso una corriente de valor constante I_M , llamado valor medio de la corriente $i(t)$.

Valor Eficaz: La energía que disipa una corriente $i(t)$ en una resistencia R , durante el lapso t_2-t_1 , se identifica con la que disiparía, en iguales condiciones, una corriente constante de valor I_{RMS} , definido como valor eficaz de la corriente $i(t)$ en el lapso t_2-t_1

Valor máximo: Es el mayor valor positivo o negativo de la onda y se designa por la letra Mayúscula

Max Max PMax E ,I , (Amplitud del valor máximo, o también llamado valor Pico).

Valor pico a pico: Es la diferencia algebraica entre picos positivos(o Negativos).

Valor eficaz de una serie trigonométrica: De acuerdo con la identidad de Parseval, la función:

$$Y_{(t)} = a_0 + (a_1 \cos wt + a_2 \cos 2wt + a_3 \cos 3wt + \dots) + (b_1 \sin wt + b_2 \sin 2wt + b_3 \sin 3wt + \dots)$$

Tiene un valor eficaz de:

$$Y_{rms} = \sqrt{a_0^2 + \frac{1}{2} [a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 \dots] + \frac{1}{2} [b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 \dots]}$$

$$Y_{rms} = \sqrt{a_0^2 + [A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 \dots] + [B_1^2 + B_2^2 + B_3^2 \dots]}$$

Donde A_n es el valor eficaz de $a_n \cos nw$ y B_n es el valor eficaz de $b_n \sin nw$.

1.5 Sistemas digitales.

Un Sistema Digital es aquel que recibe información de tipo discreta, la procesa convenientemente y luego la transmite de acuerdo a lo establecido.



Antes de iniciar la etapa de diseño, realizaremos una serie de definiciones, con el objeto de uniformizar la nomenclatura a utilizar en tal proceso.

- **Variable Digital:** Es todo elemento, que toma solamente valores discretos bien especificados, para diferenciarlo de una variable continua.
- **Variable Binaria:** Es una variable digital que toma solamente 2 valores. Por lo general indicado en sistema de numeración binario, por lo tanto dichos valores son 0 y 1. Las indicaremos con letras minúsculas: a, b, x, y, etc.
- **Función Digital:** Es toda relación algebraica entre variables binarias a través de las operaciones especificadas por el Álgebra de Boole; es decir suma, producto e inversión lógica. La representación gráfica se realiza a través de un diagrama en blocks dónde ingresan por un extremo las variables y por otro se obtienen tales funciones.

Ejemplo: $f(z,y,x) =$ Función del Álgebra de Boole.

$$\alpha (z,y,x) = x \cdot y \cdot [\overline{(x \cdot z + y \cdot z)} + x \cdot y \cdot z]$$

$$\beta (z,y,x) = x \cdot z + [x + \overline{y} + z \cdot x \cdot (\overline{x \cdot y} + z) + x \cdot z]$$

- **Diagrama en Bloks:** Representa al sistema digital por medio de un esquema, en el cual se colocan en el extremo izquierdo las entradas con flechas ingresando al block que representa al circuito propiamente dicho, y luego flechas que salen e indican las salidas



- **Vector Digital:** Se denomina así a un conjunto de variables digitales que cumplen con el mismo propósito. Por ejemplo al conjunto de variables de entrada se lo llama Vector de Entrada. Las variables ó funciones que especifican un Vector determinado pueden ser acertadas ó negadas. Del mismo modo que lo enunciado por la Matemática Vectorial, estos vectores tendrán 3 propiedades:

1.6 MODULO - DIRECCION – SENTIDO

1. MODULO:

Es la cantidad específica de variables ó funciones, que posee un vector determinado. Por ejemplo: $\alpha(z,y,x)$ es un vector formado por 3 variables digitales, entonces se dice que tiene módulo [3] y su notación es $\alpha[3] = [z,y,x]$

2. DIRECCION:

Es el valor específico que toma el vector en un instante definido. Se conoce también con el nombre de nivel del vector. Por ejemplo: $\alpha[3] = [z,y,x] = [001]_2$ t_0 t_0 Por ello se dice que en el instante t_0 la dirección del vector $\alpha(z,y,x)$ es $[001]_2$. En general esta notación se realiza en el sistema de numeración binario; pero en algunos ambientes de trabajo se suele usar octal ó hexadecimal. Por lo tanto debe aclararse que sistema numérico se está usando en cada caso.

3. SENTIDO:

Todo vector digital puede tener dos sentidos, positivo ó negativo. Para la especificación del sentido existen dos convenios: a) Signo y Valor absoluto. b) Signo y Complemento.

1.7 Señal digital

Son variables eléctricas con dos niveles bien diferenciados que se alternan en el tiempo transmitiendo información según un código previamente acordado. Cada nivel eléctrico representa uno de dos símbolos: 0 ó 1, V o F, etc. Los niveles específicos dependen del tipo de dispositivos utilizado. Por ejemplo si se emplean componentes de la familia lógica TTL (transistor-transistor-logic) los niveles son 0 V y 5 V, aunque cualquier valor por debajo de 0,8 V es correctamente interpretado como un 0 y cualquier valor por encima de 2 V es interpretado como un 1 (los niveles de salida están por debajo de 0,4 V y por encima de 2,4 V respectivamente). En el caso de la familia CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor), los valores dependen de la alimentación. Para

alimentación de +5 V, los valores ideales son también 0 V y 5 V, pero se reconoce un 0 hasta 2,25 V y un 1 a partir de 2,75 V.

Estos ejemplos muestran uno de los principales atractivos de las señales digitales: su gran inmunidad al ruido.

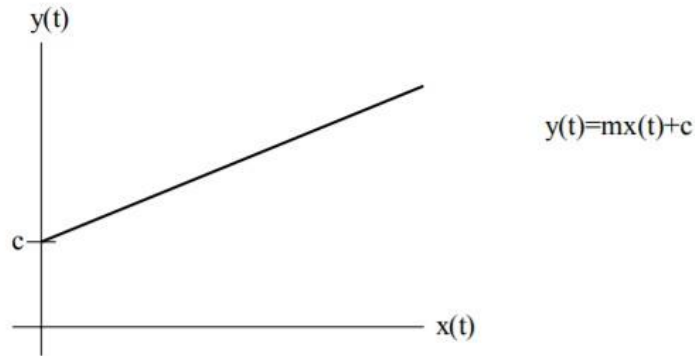
Las señales digitales descritas tienen la particularidad de tener sólo dos estados y por lo tanto permiten representar, transmitir o almacenar información binaria. Para transmitir más información se requiere mayor cantidad de estados, que pueden lograrse combinando varias señales en paralelo (simultáneas), cada una de las cuales transmite una información binaria. Si hay n señales binarias, el resultado es que pueden representarse 2^n estados. El conjunto de n señales constituye una palabra. Otra variante es enviar por una línea única, en forma secuencial, la información. Si se sabe cuándo comienza, y qué longitud tiene una palabra (conjunto ordenado de estados binarios que constituye un estado 2^n -ario), se puede conocer su estado.

El hecho de que una señal digital pueda tener 2^n estados, no nos dice nada respecto a qué significa o cómo se interpreta cada estado. Como veremos a continuación, esta interpretación depende, realmente, del código utilizado.

1.8 Señales lineales y no lineales

Podemos definir un sistema como un grupo o combinación de elementos interrelacionados o inter-actantes que forman una entidad colectiva. En el contexto de los sistemas de comunicación los elementos inter-actantes pueden ser los amplificadores, mezcladores, moduladores, detectores, etc., que son, a su vez, subsistemas formados por resistencias, condensadores, transistores,... Por lo tanto, el conocimiento sobre el comportamiento de esos sistemas y la forma en la que pueden ser descritos es de gran importancia tanto en el análisis como en el diseño de los sistemas de comunicaciones.

Los sistemas lineales constituyen una clase restringida de sistemas. Los equipos de comunicaciones están compuestos principalmente por sistemas lineales interconectados. Es igualmente importante conocer lo que es un sistema lineal como saberlo distinguir de aquellos que no lo son. Supongamos, por ejemplo, un sistema lineal cuya respuesta ante una entrada, $x(t)$, es la salida $y(t)$ de la siguiente forma:



A primera vista podríamos decir que este sistema es lineal, pues la relación entre la entrada y la salida viene dada por una línea recta, sin embargo, es un sistema no lineal, a no ser que la constante c sea cero. Una definición de sistema lineal sería: “Un sistema es lineal si su respuesta ante la suma de dos entradas cualesquiera es la suma de su respuesta a cada una de las entradas por separado”

Esta propiedad se suele denominar principio de superposición pues las respuestas a las componentes de la entrada están superpuestas a la salida. Esto es, si $x_i(t)$, con $n=1,2,\dots$, son las entradas e $y_i(t)$ las correspondientes salidas, entonces la salida del sistema sería $y(t) = \sum y_i(t)$ cuando la entrada es $x(t) = \sum x_i(t)$.

A partir de la característica anterior se puede deducir la propiedad de proporcionalidad de los sistemas lineales: Si la salida del sistema ante una entrada $x_1(t)$ es $y_1(t)$, la salida ante una entrada $x(t) = m x_1(t)$ sería $y(t) = m y_1(t)$, donde m es una constante. Con todo lo visto, el sistema considerado anteriormente solamente sería lineal si $m=0$. Los sistemas que usamos a menudo son lineales en el rango de trabajo. Los que se desvían un poco del comportamiento lineal los podríamos poner en forma de polinomio $y(t) = ax(t) + bx^2(t) + cx^3(t) + \dots$, que para señales pequeñas se comportarían como lineales, $y(t) \approx ax(t)$. Una propiedad muy importante de los sistemas lineales es

que responden a una entrada sinusoidal con una salida sinusoidal de la misma frecuencia. Un ejemplo de este hecho se muestra en la Figura 3.1.

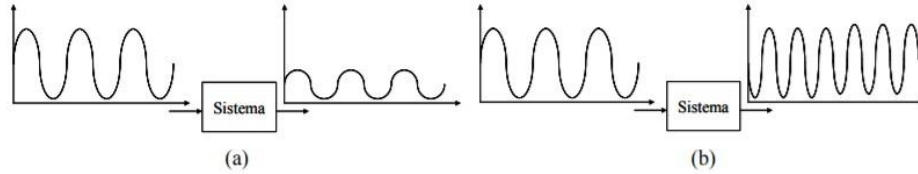


Figura 3.1. Ejemplo de sistema lineal (a) y no lineal (b).

Otra propiedad interesante que suelen poseer los sistemas, lineales o no, es la invarianza temporal. Esto significa que la salida del sistema sólo depende de la entrada y no del instante en el que ésta es aplicada, es decir, si $y(t)$ es la salida del sistema ante la entrada $x(t)$, entonces la salida ante una entrada $x(t)=x_1(t-T)$ sería $y(t)=y_1(t-T)$.

No lineales

Los amplificadores de potencia (PA o HPA) son elementos indispensables de los sistemas de comunicaciones modernos y son componentes inherentemente no lineales. Los PAs se pueden clasificar de acuerdo al grado de no linealidad que presenten, lo cual también dicta su eficiencia. Una alta linealidad del amplificador implica baja eficiencia, lo que significa que la potencia que llega a la carga es reducida. Por otra parte, una alta no linealidad, causa efectos nocivos como recrecimiento espectral y un aumento en la tasa de error de bit. Así pues, la linealización de los PA es a menudo necesaria con el objetivo de mejorar la linealidad manteniendo una buena eficiencia.

La predistorción es un método popular para linealizar un PA para lo cual, el modelado del PA a veces es un importante primer paso. Antes de escoger un método de linealización, se debe decidir si el PA muestra efectos de memoria. Las causas de los efectos de memoria pueden ser eléctricos o electro-térmicos. Amplificadores de alta potencia (HPA) tales como los usados en las estaciones bases de sistemas wireless presentan esos efectos de memoria; las señales de banda ancha también tienden a

inducir efectos de memoria en el PA. En estos casos, una predistorsión sin memoria sería ineficaz. Entonces, una representación de los efectos de memoria de los PA parece crucial para emprender la tarea del diseño de los métodos de linealización.

Denotemos por $x(t)$ la señal de entrada en banda base al PA y por $y(t)$ la salida en banda base. La conversión AM/AM se define como la función que recoge el cambio entre la amplitud de la señal en banda base de entrada, $|x(t)|$, y la amplitud de la señal en banda base de la salida, $|y(t)|$; la conversión AM/PM se define como la función que recoge el cambio entre la amplitud de la señal en banda base de entrada, $|x(t)|$, y la desviación de la fase de la señal en banda base de la salida, $y(t)$

La linealización de dispositivos no lineales que pueden ser completamente caracterizados con las conversiones AM/AM y AM/PM no suele ser demasiado complicada. Por ejemplo, estos predistorsionadores pueden ser implementados con una tabla de correspondencia (look up table, LUT). La LUT crea las funciones de mapeo (AM/AM y AM/PM) para el predistorsionador, con valores que son complementarios a los que genera el PA antes esas mismas entradas.

Consideremos un ejemplo, un modelo en banda base de un PA no lineal de orden $(2K + 1)$:

$$\tilde{y}(t) = \sum_{k=0}^K a_{2k+1} |\tilde{x}(t)|^{2k} \tilde{x}(t) \quad (4.1)$$

donde a_{2k+1} es el coeficiente del término no lineal de orden $(2K + 1)$.

Desde el punto de vista del procesamiento de señal, el sistema (4.1) es sin memoria, ya que la salida $y(t)$ depende sólo de la entrada $x(t)$ en ese mismo instante. Sin embargo, en la literatura de Microondas y RF, si $\{a_{2k+1}\}$ son reales, el modelo de (4.1) se llama sin memoria, si la conversión AM/PM es constante. De otro modo, el sistema (4.1) es considerado cuasi-sin memoria, lo que implica que existen efectos de memoria de corto plazo. Los síntomas de un sistema cuasi-sin memoria es que la conversión AM/PM varía con $|x(t)|$. Así pues, a veces es confuso encontrar la naturaleza exacta de los efectos nocivos en dispositivos no lineales usados en comunicaciones.

Cuando se presentan efectos de memoria de largo plazo, las conversiones AM/AM y AM/PM son insuficientes para caracterizar al PA, y se emplean modelos más elaborados, como por ejemplo los basados en series de Volterra [4.7].

En este apartado examinaremos qué significan los efectos de memoria paso banda y en banda base. A continuación, trataremos de relacionar los modelos de no linealidades en banda base y paso banda. Pasaremos a explicar cuatro sistemas especiales con memoria ampliamente utilizados. Por último, incluiremos un pequeño resumen del apartado.

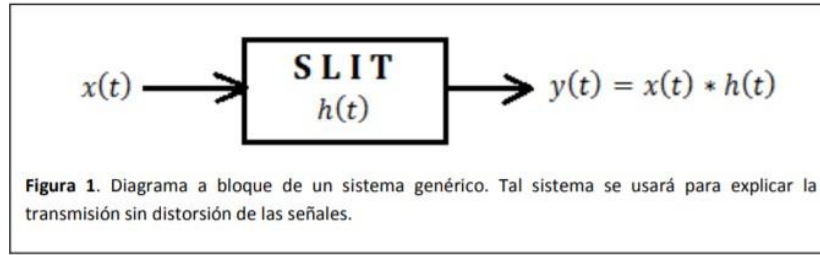
1.9 Distorsión de sistemas no lineales

Definición 1. Distorsión. Es cualquier cambio en una señal que altera su forma de onda básica (en el dominio del tiempo) o bien, altera la relación entre sus componentes espectrales (dominio de la frecuencia). La distorsión puede ser del tipo lineal o del tipo no lineal

Definición 3. Distorsión alineal. Es un tipo de distorsión no lineal y ocurre cuando un sistema, debido a su ganancia no línea, genera nuevas componentes espectrales en frecuencias múltiplo de las frecuencias ya presente (armónicas) o bien, genera nuevas componentes espectrales en frecuencias suma y diferencia de las frecuencias ya presentes en la señal (intermodulación). Auditivamente, se escucha como un ruido intermitente.

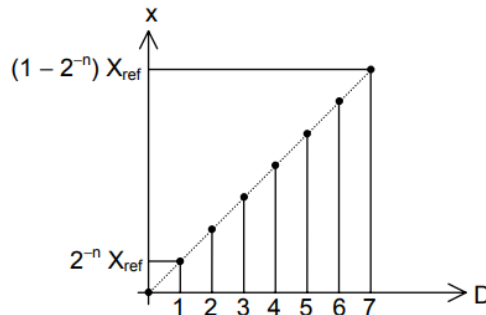
El estudio de un sistema que transmite sin distorsión, una señal, se realiza en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. Para este estudio considere el sistema de la figura 1 en el cual la señal de salida $y(t)$ se calcula como la convolución de la señal de entrada $x(t)$ con la respuesta a impulso del sistema $h(t)$, es decir:

$$y(t) = h(t) * x(t) \tag{1}$$



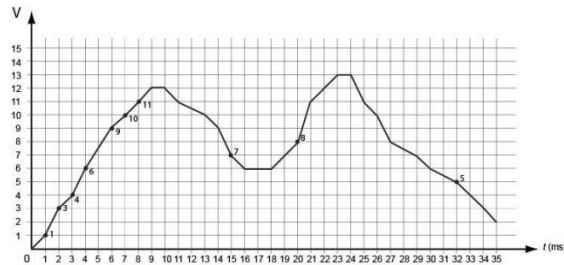
1.10 Conversión digital / analógica (D/A)

Partimos de una señal digital $D = d_n d_{n-1} \dots d_1$ en paralelo que responde a la codificación binaria natural y una referencia X_{ref} (podría ser una tensión o una corriente) y pretendemos obtener una señal analógica x que varíe de a saltos iguales a $X_{ref} / 2^n$ entre 0 y $(2^n - 1) X_{ref} / 2^n = X_{ref} (1 - 2^{-n})$, como se muestra en la figura.



Si los valores concretos de una señal muestreada los tenemos que limitar a un conjunto de valores finito, entonces será una señal cuantificada. Supongamos la señal continua de la Figura 4 muestrea cada 1ms. El valor medido en cada unidad de tiempo debe ajustarse a algún valor entero entre 0 y 15. Si en el instante $t=5ms$ se mide el valor 9,8V puesto que en el conjunto de datos no existe ese valor, habrá que asignarle el valor osible más cercano, en este caso el de 10V. Se puede concluir que, en este caso, está habiendo pérdida de datos respecto de la señal continua. Se podrían perder menos datos si el

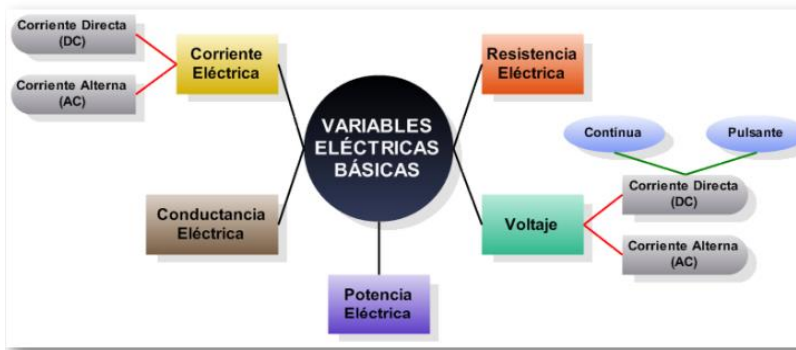
conjunto de valores seleccionado fuese mayor, es decir, en lugar de 15 fuesen 30. En este caso, se podría distinguir 9V-9,5V-y 10V. Es decir, cuanto mayor sea el conjunto de datos, menor pérdida de datos respecto de la señal original.



Si el conjunto de datos muestreados lo codificamos en código binario, entonces se obtiene una señal discreta binaria. El código binario está basado en la utilización de dos únicos dígitos el 1 y el 0. Cada dígito se denomina bit. A partir de la combinación de estos dos dígitos se obtienen los números equivalentes en decimal. Por ejemplo el 12 en binario se escribe 1100. Así pues, siguiendo con el ejemplo de la Figura 4, para codificar en binario números enteros de 0 a 15, se necesitan 4 bits, es decir, con 4 bits podemos formar 16 combinaciones de 1s y 0s diferentes que se asignarán a los números decimales del 0 al 15

1.11 Variables eléctricas

La definición de variable según la Real Academia Española (RAE) es: “magnitud que puede tener un valor cualquiera de los comprendidos en un conjunto”. En la Figura 1 se observa un infograma relacionando las variables eléctricas básicas utilizadas en el área de la electrónica.



Se muestra una analogía entre las variables eléctricas y un sistema hidráulico básico, donde la motobomba representa el voltaje, la llave la resistencia, el flujo de agua la corriente eléctrica, la tubería los conductores y el tanque es un elemento de almacenamiento de energía.

Se habla de carga eléctrica, cuando un átomo gana o pierde electrones (e^-). Experimentalmente, Coulomb encontró que existían dos clases de carga a las que identificó como positivas (átomos que pierden e^-) y negativas (átomos que ganan e^-). La carga se representa con la letra Q y su unidad es el Coulomb (o Columbio) y equivale a tener.

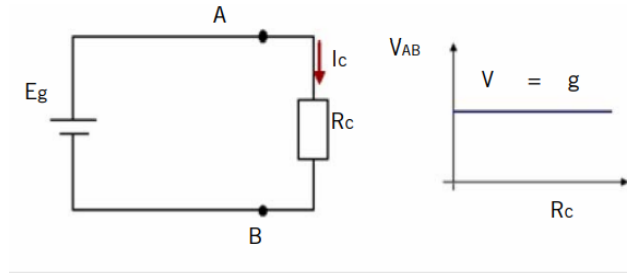
Campo magnético: así como una carga produce en sus vecindades un campo eléctrico, una corriente circulando a través de un conductor produce a su alrededor un campo magnético. Este campo tiene las mismas propiedades del campo magnético producido por un imán y puede ser concentrado enrollando el alambre en forma de bobina. El símbolo para la densidad de flujo de un campo magnético es B y su unidad de medida en el sistema internacional es el Tesla.

La ley fundamental de las cargas, dice que: cargas puntuales del mismo signo se repelen y cargas puntuales de signo contrario se atraen.

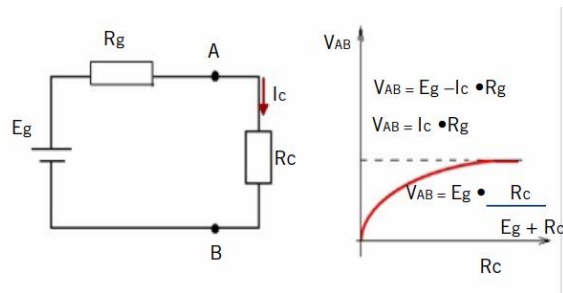
1.12 Fuentes de tensión y de corriente

Los circuitos electrónicos deben poseer para su funcionamiento adecuado, al menos una fuente de energía eléctrica, que debe ser una fuente de tensión o de corriente. Fuente de tensión Veamos como funcionan las fuentes de tensión. Fuente de tensión ideal Es una fuente que produce una tensión de

salida constante, y posee una resistencia interna cero. Toda la tensión va a la carga (R_c). No existe en la realidad.



Son las fuentes de tensión que tenemos en la realidad. Ninguna fuente real de tensión puede producir una corriente infinita, ya que en toda fuente real tiene cierta resistencia



Fuente de corriente En el caso anterior de la fuente de tensión había una resistencia interna muy pequeña. Pero una fuente de corriente es diferente, tiene una resistencia interna muy grande. Así, una fuente de corriente produce una corriente de salida que no depende del valor de la resistencia de carga.
Fuente de corriente ideal Al igual que en el caso anterior, se trata de una fuente de corriente que no posee resistencia interna. Como ya sabemos, todo material tiene resistencia interna.

Unidad II SEMICONDUCTORES

2.1 Teoría de bandas de energía de los cristales

Los semiconductores puros se comportan como aislantes a muy bajas temperaturas, pero al ser sometidos a altas temperaturas o mezclados con impurezas su conductividad puede aumentar de forma considerable y llegar a alcanzar niveles cercanos a la de los metales. De esta forma una de las propiedades interesantes, es su capacidad de comportarse algunas veces como aislantes y otras como conductores. Esto se debe a que podemos modificar la resistividad en un semiconductor de diferentes maneras, por ejemplo mediante la adición de átomos dopantes, además de que los procesos electrónicos se pueden comprender con mayor facilidad y profundidad en los semiconductores que en otros materiales.

Bandas de energía en semiconductores

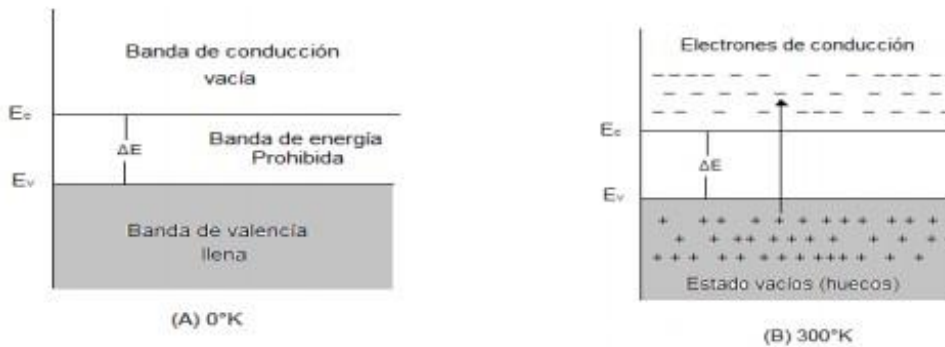
El semiconductor perfecto, es aquella sustancia que tiene una estructura de bandas de energía en la que una banda de estados electrónicos completamente llena (banda de valencia) a la temperatura de 0 K se separa de otra que se encuentra totalmente vacía (banda de conducción) por medio de una región angosta de estados de energía prohibida.

El origen de esta banda de energía, puede ser explicada de la siguiente manera: cuando dos átomos similares se unen como sucede en un sólido, estos tienen que estar uno muy próximo al otro, de tal forma que las funciones de onda de sus electrones empiecen a superponerse, así los estados de todos los pares de spin de los electrones adquieren una energía que difiere ligeramente del valor del átomo aislado, dicho de otra manera el enlace atómico depende del número de electrones de valencia de los átomos formantes del enlace y de la electronegatividad de los mismos.

Los electrones de la capa externa o electrones de valencia son los que determinan y forman los enlaces y los que en su momento pueden determinar el carácter conductivo, a dicho estado se le denomina banda de energía.

A temperaturas del cero absoluto (0°K), el semiconductor es un aislante perfecto, ya que no cuenta con bandas parcialmente llenas. Sin embargo, a temperaturas más altas, algunos de los electrones de la banda de valencia pueden adquirir la suficiente energía térmica y pasar a la banda de conducción que hasta entonces estaba vacía, esta estructura de bandas se ilustra esquemáticamente en la Figura

Los estados vacíos que quedan en la banda inferior o de valencia, pueden contribuir también a la conductividad comportándose como huecos positivamente cargados. El número de electrones de conducción y el número de huecos aumentan al incrementarse la temperatura, esta es una propiedad muy importante de los semiconductores, ya que la conductividad eléctrica aumenta al incrementarse la temperatura [19]



La energía que separa las bandas de conducción y de valencia se denomina energía de banda prohibida, ésta es la diferencia entre el punto más bajo de la banda de conducción y el más alto de la banda de valencia. El punto más bajo de la banda de conducción se llama borde de la banda de conducción, el punto más alto de la banda de valencia se denomina borde de la banda de valencia.

Un semiconductor en el cual los huecos y los electrones se crean mediante una excitación térmica, luminosa o por bombardeo de electrones, y pasan únicamente de la banda de valencia a la banda de conducción a través de la banda prohibida de energía es conocido como semiconductor intrínseco.

Los huecos y los electrones creados de esta manera a menudo se denominan portadores de carga intrínsecos, la conductividad en un semiconductor intrínseco originada por estos portadores de carga se llama conductividad intrínseca, en ésta, las concentraciones de electrones y huecos siempre son las mismas, ya que la excitación térmica de un electrón origina inevitablemente un hueco [19].

Sin embargo un semiconductor no tiene que ser intrínseco para ser útil, introducir cantidades pequeñas de otros materiales o también la falta de algunos átomos dentro de la red del material puede cambiar las características del semiconductor que originalmente se tenía.

2.2 Dopaje de Semiconductores

En un material es posible observar que su red cristalina tiene ausencia de átomos dentro de su red cristalina. Estos átomos perdidos son conocidos como vacancias y dependiendo del material semiconductor estas vacancias pueden variar según el material.

En un semiconductor elemental solo podrán existir vacancias de un solo tipo pero en un semiconductor binario como el CdS pueden existir vacancias de Cd (VCd) o vacancias de S (VS). Para lograr un cambio en un material semiconductor también es viable introducir otros materiales. A los materiales introducidos se les conoce como defectos puntuales o impurezas y existen diferentes tipos de defectos: sustitucionales, intersticiales y de Frenkel. [20] Los defectos sustitucionales son impurezas que son únicamente encontradas en cristales con más de una sub-red y con átomos diferentes en cada una.

Son resultado de una purificación incompleta del material o de una contaminación intencional y son referidos como defectos extrínsecos. Los defectos intersticiales son átomos que se encuentran en los espacios entre la red cristalina. Pueden ser impurezas o matrices de átomos. Los defectos intersticiales pueden presentarse extrínsecos o intrínsecos en los semiconductores.

Dependiendo de la densidad de defectos intersticiales las características del material pueden ser cambiadas por completo. Los defectos de Frenkel son pares de vacancias y defectos intersticiales que son formados por un átomo que deja su sitio en la red cristalina dejando una vacancia y transfiriéndose a una posición dentro de la red.

Estos defectos pueden ser producidos mediante procesos de difusión pero ocurren más comúnmente debido al choque de una partícula muy energética con un átomo que, debido al choque, se desplaza de su posición a una posición intersticial [20]. Una sustancia cuya mayoría de portadores de carga se origina debido a átomos de impurezas, es conocida como semiconductor extrínseco. Las impurezas pueden proporcionar a un semiconductor intrínseco un desequilibrio en el número de electrones y huecos existentes.

Si un semiconductor intrínseco recibe un átomo de impurezas y éste se puede ionizar fácilmente debido a la agitación térmica, de manera que pierda un electrón, es decir, se ioniza de tal forma que ocasiona un número mayor de electrones, se dice entonces que se trata de una impureza donadora, por lo tanto el semiconductor se denomina tipo-n, dado que los portadores de carga que están contribuyendo a la conducción son por lo tanto negativos.

En el caso contrario cuando una impureza ocasiona que en el semiconductor exista un número mayor de huecos que de electrones el semiconductor es denominado tipo-p ya que la impureza es receptora, dado que los portadores de carga que contribuyen a la conducción son positivos. Cuando hablamos de un semiconductor extrínseco, las impurezasceptoras o donadoras generan entre las bandas de valencia y de conducción ciertos niveles de energía.

Estos niveles se encuentran más cercanos al borde de la banda de conducción en el caso de los semiconductores tipo-n; y para el caso de los semiconductores tipo-p los niveles discretos aparecen más cercanos a la banda de valencia [21]. El esquema de los niveles discretos de energía se muestra en la Figura 1.4.

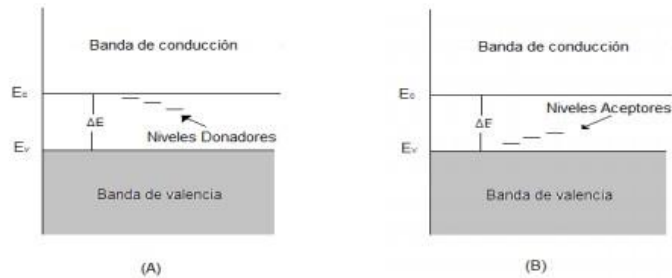


Figura 1.4. Bandas de conducción y de valencia de un semiconductor (A) tipo-n y (B) tipo-p.

2.3

Semiconductores: intrínsecos y extrínsecos

Semiconductor intrínseco

Un semiconductor intrínseco es un semiconductor puro. “Un cristal de silicio es un semiconductor intrínseco si cada átomo del cristal es un átomo de silicio”.¹⁰ A temperatura ambiente, un cristal de silicio se comporta más o menos como un aislante, ya que tiene solamente unos cuantos electrones libres y sus huecos correspondientes producidos por la energía térmica que posee dicho cristal.

La figura 2-9 muestra parte de un cristal de silicio situado entre dos placas metálicas cargadas. Supóngase que la energía térmica ha producido un electrón libre y un hueco. El electrón libre se encuentra en un orbital de mayor energía en el extremo derecho de cristal. Debido a que el electrón está cerca de la placa cargada negativamente, es rechazado por ésta, de forma que se mueve hacia la izquierda de un átomo a otro hasta que alcanza la placa positiva.

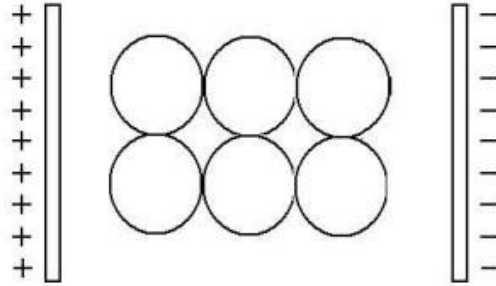


Figura 2-9 Flujo de un hueco a través de un semiconductor.

Semiconductores extrínsecos

Un semiconductor se puede dopar para que tenga un exceso de electrones libres o un exceso de huecos. Debido a ello existen dos tipos de semiconductores dopados:

Semiconductores tipo n

El silicio que ha sido dopado con una impureza pentavalente se denomina semiconductor tipo n, donde n hace referencia a negativo.

En la figura 2-10 se observa un semiconductor tipo n. Como los electrones superan a los huecos en un semiconductor tipo n, reciben el nombre de portadores mayoritarios, mientras que a los huecos se les denomina portadores minoritarios.

Al aplicarse una tensión, los electrones libres dentro del semiconductor se desplazan hacia la izquierda y los huecos lo hacen hacia la derecha. Cuando un hueco llega al extremo derecho del cristal, uno de los electrones del circuito externo entra al semiconductor y se recombina con el hueco.

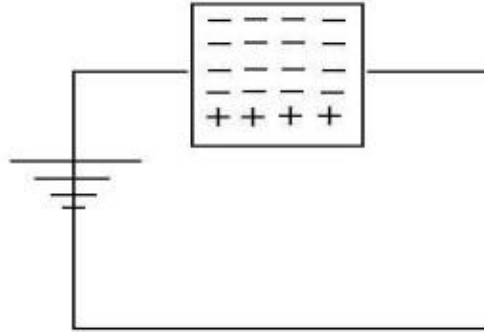


Figura 2-10 El semiconductor tipo *n* tiene muchos electrones libres

Los electrones libres mostrados en la figura 2-10 circulan hacia el extremo izquierdo del cristal, donde entran al conductor para circular hacia la terminal positiva de la batería.

Semiconductor tipo p

El silicio que ha sido dopado con impurezas trivalentes se denomina semiconductor tipo p, donde p hace referencia a lo positivo.

La figura 2-11 muestra un semiconductor tipo p. Como el número de huecos supera al número de electrones libres, son los minoritarios. Al aplicarse una tensión, los electrones libres se desplazan hacia la izquierda y los huecos lo hacen a la derecha. En la figura 2-11, los huecos que llegan al extremo derecho del cristal se recombinan con los electrones libres del circuito externo.

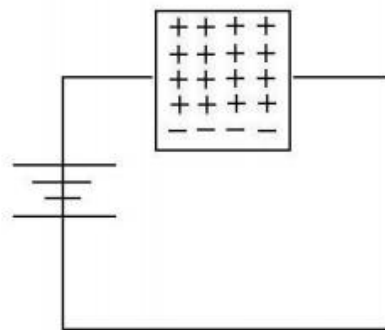


Figura 2-11 El semiconductor tipo p tiene muchos huecos

En el diagrama de la figura 2-11, hay también un flujo de portadores minoritarios. Los electrones libres dentro del semiconductor circulan de derecha a izquierda. Como existen muy pocos portadores minoritarios, por tanto su efecto es casi despreciable en este circuito.

2.3 Ley de acción de masas

Sea una reacción reversible: $aA + bB \rightarrow cC + dD$

$$K_c = \frac{[C]^c \cdot [D]^d}{[A]^a \cdot [B]^b} = \frac{K_d}{K_i}$$

La constante de equilibrio, juega en las reacciones reversibles el mismo papel que el reactivo limitante en las reacciones irreversibles, ya que condiciona la concentración tanto de los reactivos como de los productos en el equilibrio. La constante de equilibrio K_c no tiene unidades y depende de la temperatura. Las concentraciones tanto de productos como de los reactivos se expresan como concentraciones Molares. El valor de la constante de equilibrio nos da una idea de la extensión en que ha tenido lugar la reacción.

- Si $K_c \geq 1$ la mayoría de los reactivos se ha convertido en productos.
- Si $K_c \leq 1$ la mayoría de los reactivos quedan sin reaccionar. Cociente de reacción Es una expresión similar a la constante de equilibrio, que nos informa en cada momento del desarrollo de la reacción. En la expresión del cociente de reacción no se emplean concentraciones de equilibrio de reactivos y productos, sino de las concentraciones instantáneas de la misma.
- Si $Q = K_c$ el sistema se encuentra en equilibrio.
- Si $Q \leq K_c$ se favorecerá la reacción hacia la derecha formando productos.
- Si $Q \geq K_c$ se favorecerá la reacción de descomposición de los productos formados en los reactivos de partida (de derecha a izquierda).

Características del Equilibrio

El equilibrio es una situación de equilibrio dinámico, que se aplican a las reacciones reversibles. Tanto la reacción directa como la inversa, tienen lugar simultáneamente y cuando se alcanza el equilibrio, ocurren a la misma velocidad. En el equilibrio $\Delta G = 0$. Cuando se alcanza el equilibrio no varían ni las concentraciones de los productos ni la de los reactivos, ni sus propiedades macroscópicas como la presión de vapor. La temperatura es una variable fundamental que controla el equilibrio. La constante de equilibrio K_c depende de la temperatura, de la expresión de la reacción y de su ajuste estequiométrico.

2.4 Movilidad y conductividad de carga de un semiconductor extrínseco.

La conductividad es la facilidad que presenta un material para que los electrones de su última órbita sean dislocados sin demasiado esfuerzo. Si se aplica una diferencia de potencial a los extremos de un material semiconductor, ya sea tipo P o tipo N, los portadores libres de carga, los electrones en la banda de conducción y los huecos en la banda de valencia, admitirán una aceleración debido a la fuerza que el campo eléctrico ejerce sobre ellos ganando velocidad hasta que choquen con la red, y se frenen, pero inmediatamente son acelerados hasta el siguiente choque. Este proceso da como

resultado que los portadores se muevan con una velocidad promedio, V_n los electrones y V_p los huecos, tal que se cumple:

$$V_n = \mu_n E \quad \text{y} \quad V_p = \mu_p E \quad (1)$$

Donde μ_n es la movilidad de los electrones y μ_p es la movilidad de los huecos, es decir, su vibración debido a la temperatura. Por tanto, si las concentraciones de portadores libres de carga en el material semiconductor son n electrones por cm^3 y p huecos por cm^3 , la densidad de corriente será:

$$J = qnV_n + qpV_p = q(\mu_n n + \mu_p p) E = \sigma E \quad (2)$$

Donde q es la carga de un electrón y σ es la conductividad del material, s es la inversa de la resistencia r ($s = 1/r$).

La movilidad es independiente del campo eléctrico para valores de éste, menores de 10^3 Vcm^{-1} , varía con el $E^{-1/2}$ para $10^3 \text{ Vcm}^{-1} < E < 10^4 \text{ Vcm}^{-1}$, y para valores de E superiores, empieza a variar inversamente con el campo eléctrico alcanzando los electrones una velocidad máxima de saturación del orden de 10^7 cms^{-1} .

La movilidad lógicamente disminuye con la temperatura, a mayor temperatura mayor vibración en la red y mayor probabilidad de choques, en una relación de T^{-m} donde, para el SI, m vale 2,5 para los electrones y 2,7 para los huecos.

La conductividad en un material semiconductor intrínseco aumenta con la temperatura, ya que el aumento en función de la temperatura (n_i) es mayor que la disminución de las movilidades. Para un semiconductor extrínseco, en un entorno amplio de la temperatura ambiente, como la concentración de portadores mayoritarios no varía apreciablemente, la conductividad disminuye con la movilidad.

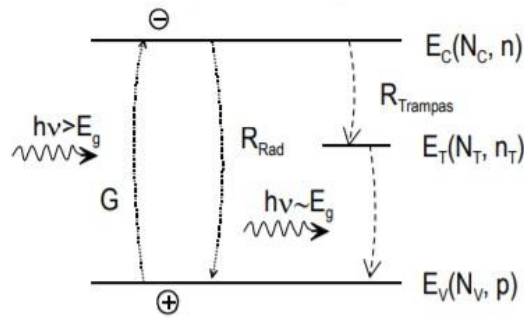
Es muy importante considerar que se producen dos corrientes, una denominada de arrastre, la cual se debe a un campo eléctrico, y otra denominada de difusión, producida por la diferencia de concentración de portadores. De esto se origina una de las propiedades que distingue a los semiconductores: número de portadores como producto de la temperatura.

Este dato permite clasificar a los semiconductores de acuerdo a la cantidad de huecos en la banda de valencia en relación a la cantidad de electrones de la banda de conducción, de este modo, los semiconductores intrínsecos tienen igual número de huecos en la banda de valencia como electrones en la banda de conducción, y en los semiconductores extrínsecos esta relación es diferente, es decir pueden existir más electrones en la banda de conducción que huecos en la banda de valencia.

En resumen, los semiconductores intrínsecos son los cristales puros como el silicio, y los semiconductores extrínsecos son los cristales con impurezas, o también denominados “dopados”.

2.5 Creación y recombinación de pares.

En las lecciones anteriores nos hemos limitado a estudiar las propiedades de los portadores en equilibrio térmico. En esta lección abordaremos el estudio de las propiedades de los portadores fuera de equilibrio, que son de gran importancia para el estudio de los dispositivos electrónicos. Las características, eficiencia y limitaciones de los dispositivos están determinados por las propiedades de los portadores fuera de equilibrio. Veremos que, al contrario de lo que ocurre con las propiedades en equilibrio térmico (determinadas por los portadores mayoritarios: electrones en material de tipo n, huecos en material de tipo p), son los parámetros de los portadores minoritarios los que juegan el papel principal.



Los procesos mediante los cuales se excitan portadores desde los niveles ocupados a los niveles vacíos son los llamados mecanismos de generación de portadores. La generación de portadores libres en un semiconductor puede deberse a causas internas (excitación térmica) o externas (radiación electromagnética, campos intensos, inyección desde otra zona del material, etc). Los portadores libres excitados por estímulos externos no permanecen indefinidamente en ese estado, ya que existen diversos mecanismos que tienden a hacerlos volver al estado inicial. Son los llamados mecanismos de recombinación. La figura representa esquemáticamente varios de esos mecanismos. Entre ellos podemos señalar los siguientes:

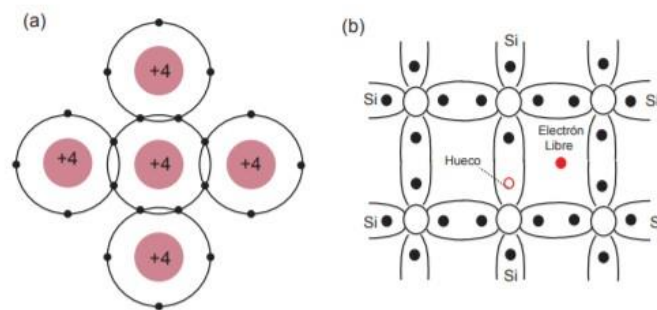
-Recombinación radiativa: encuentro directo entre un electrón y un hueco que se recombinan emitiendo un fotón de energía igual a la banda prohibida (interacción entre dos partículas).- Recombinación Auger: la energía del electrón que se recombina es cedida como energía cinética a otro electrón de la banda de conducción (interacción entre tres partículas).

- Recombinación por trampas: el electrón es capturado por un nivel localizado (trampa), quedando en un estado metaestable y cediendo el exceso de energía a la red, a través de la interacción entre ésta y el estado localizado, interacción que es, en general, intensa debido a que los niveles profundos producen una fuerte deformación de la red en torno a ellos. Posteriormente dicho nivel puede capturar un hueco de la banda de valencia, completándose así la recombinación. Toda la energía en exceso se cede a la red (interacción entre una partícula y un centro).

En el equilibrio térmico, la velocidad de generación es igual a la de recombinación, manteniéndose constante la concentración de portadores.

2.5 Difusión de portadores en un semiconductor graduado.

En ausencia de temperatura y energía externa, los electrones de los átomos de una red cristalina tienden a ocupar los estados energéticos de menor energía, con la configuración electrónica de un gas noble, tal como se ilustra en la Figura 2.3.(a).



Sin embargo, a temperatura ambiente, es bastante probable que los electrones de la banda de valencia adquieran la energía necesaria para acceder a niveles energéticos de la banda de conducción. En dicha banda hay muchos niveles de energía disponibles que pueden ocupar. Cuando esto ocurre, decimos que se forma un par electrón-hueco, tal como se detalla en la Figura 2.3.(b). Un electrón de la banda de valencia 'salta' a la banda de conducción.

En ese momento, tendremos un electrón que puede desplazarse libremente por la red cristalina, y un hueco. Los huecos son niveles energéticos disponibles en la banda de valencia, debido a electrones que han saltado a la banda de conducción. Por tanto, la existencia de un hueco denota la existencia de un átomo cargado positivamente. Hemos de resaltar, que un hueco no es un ente físico como un electrón; simplemente es un estado energético que indica que un átomo tiene estados energéticos disponibles en su capa de valencia y está cargado positivamente. En el caso de que exista

un campo eléctrico, los portadores de carga se desplazarán por la red cristalina, generando una corriente eléctrica. A su vez, los electrones y los huecos se pueden recombinar, volviendo al estado energético inicial. Es importante destacar que los electrones tienden a ocupar los estados energéticos disponibles en la banda de conducción que tienen menor energía. En cambio, los huecos corresponden a los niveles energéticos disponibles en la banda de valencia, que tienen mayor energía. Esto es lógico, puesto que el resto de los electrones del átomo de silicio cargado positivamente, tenderá a ocupar los estados energéticos con menor energía, por debajo del máximo de la banda de valencia.

2.6 La ecuación de continuidad.

Consideremos un volumen de control en un semiconductor que no se encuentra en equilibrio térmico, tal como se ilustra en la Figura 4.6, en el que las concentraciones de portadores $f(x; t)$ dependen de la posición y del tiempo.

Por simplicidad, asumimos que en el plano Y » Z (sección transversal del volumen de control) las concentraciones de portadores son homogéneas. Por tanto, las concentraciones de portadores sólo dependen de las coordenadas (x; t). Las Ecuaciones de Continuidad son un par de ecuaciones diferenciales de segundo orden que permiten conocer las concentraciones de electrones y huecos en función de la posición (eje x) y el tiempo.

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = g - \frac{\Delta n}{\tau} + D_n \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2} - \mu_n E_{an} \frac{\partial \Delta n}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = g - \frac{\Delta p}{\tau} + D_p \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2} - \mu_p E_{ap} \frac{\partial \Delta p}{\partial x}$$

No abordaremos la deducción de dichas ecuaciones en este libro. Su deducción puede encontrarse en los manuales de Pierret [1998] y R. S. Muller [1991].

De forma abreviada, podemos concluir que son un par de ecuaciones diferenciales que permiten determinar las concentraciones y huecos en función de todos los fenómenos que hemos estudiado en semiconductores: generación, flujos de difusión y flujos de arrastre; el tiempo y la posición dentro del semiconductor.

Considerando situaciones más particulares que la anterior, podemos considerar un volumen de control en el que se existe un incremento de portadores cuya concentración depende del tiempo y de la posición en un semiconductor fuertemente extrínseco en el que los flujos de difusión dominan sobre los fenómenos de generación-recombinación y las corrientes de arrastre.

Podemos suponer que los procesos que generan dichos portadores no son uniformes a lo largo del tiempo.

Por ejemplo, imaginemos que existe una fuente de luz cuya intensidad varía en función del tiempo y que ilumina el plano Y Z del volumen de control en la posición $x = 0$. En ese caso, por simetría, las concentraciones de portadores sólo dependerán de la posición en el eje x. Puede demostrarse que las concentraciones del número de portadores en función de las variables (x; t) se rigen por la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2} - \frac{\Delta n}{\tau}$$

En el caso de que las corrientes estacionarias no dependan del tiempo, primera parte de la ecuación = 0, es posible simplificar y resolver la ecuación resultante:

$$\Delta n(x) = \Delta n(0) e^{-\frac{x}{L_p}}$$

$$D_n \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2} - \frac{\Delta n}{\tau} = 0$$

Resolviendo dicha ecuación y suponiendo que conocemos el valor del incremento de portadores en $x = 0$, $\Delta n(0)$, llegamos a que:

Donde $L_p = \sqrt{D_n \tau}$ es la característica de difusión de los electrones. Indica el efecto que tiene un proceso de difusión a lo largo del semiconductor. Mientras mayor sea, mayor será la distancia en la que el exceso de portadores debido a los procesos de difusión tiene un efecto apreciable en la concentración local de portadores.

2.7 Inyección de portadores minoritarios en un semiconductor extrínseco.

Los elementos del grupo V de la tabla periódica tienen cinco electrones en la capa de valencia. Esto hace que cuatro de ellos se enlacen a los átomos de silicio vecinos mediante un enlace covalente, quedando un electrón con un enlace débil que hace que cualquier incremento de energía le permita acceder a la banda de conducción, sin generar un hueco en la banda de valencia, puesto los estados energéticos están completos en ella. Esto puede interpretarse como que existen estados energéticos disponibles por encima de la banda de valencia y por debajo de la banda de conducción, en los cuales hay electrones que, incluso con baja temperatura, pueden pasar a la banda de conducción (Figura 4.5.(a)).

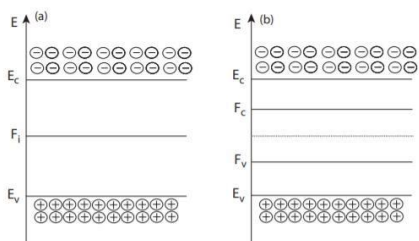


Figura 4.5: a) Nivel de Fermi en un semiconductor intrínseco en equilibrio térmico. (b) Cuasi-niveles de Fermi en un semiconductor intrínseco con exceso de portadores Δn y Δp en desequilibrio térmico.

Ejemplos de impurezas donadoras del grupo V de la Tabla Periódica son: arsénico y el antimonio. Si en lugar de átomos del grupo V, se introducen impurezas con átomos del grupo III de la Tabla Periódica, que sólo tienen tres átomos en su capa de valencia, estos átomos se enlazarán con tres de sus vecinos mediante un enlace covalente, pero el cuarto posible enlace carece de electrón. Ello se interpreta como que existen estados energéticos disponibles justo por encima de la

banda de valencia (Figura 4.5.(b)). Un aporte mínimo de energía hace que electrones de la banda de valencia pasen a estos estados energéticos, creándose un hueco en la banda de valencia. Cuando un semiconductor presenta impurezas de forma controlada se dice que está dopado. En el caso de que se introduzcan átomos del grupo V, impurezas donadoras, decimos que tenemos un semiconductor de tipo N. En el caso de que tengamos impurezasceptoras del grupo III, se dice que tenemos un semiconductor de tipo P. A partir de ahora, nos referiremos a los semiconductores como semiconductores de tipo N o de tipo P, para indicar el dopado que se introduce en ellos. Al referirnos a los semiconductores intrínsecos, nos referimos a semiconductores sin impurezas introducidas intencionadamente durante el proceso de fabricación.

2.8 Clasificación de la material

Desde el punto de vista eléctrico, toda la materia puede ser clasificada en 3 grupos que son conductores, aislantes y semiconductores. Los materiales conductores son aquellos que, como su nombre lo indica, son capaces de conducir muy bien una corriente eléctrica en cualquier dirección. Por lo general en esta categoría se encuentran los metales pero existen otros materiales no metálicos como el grafito, el ITO, los plasmas y algunos polímeros caen en esta categoría. Por el contrario los materiales aislantes son aquellos que se oponen al paso de una corriente eléctrica y esta categoría está formada por la mayoría de los plásticos, el SiO₂ y algunos polímeros pero el vidrio, el papel y el teflón son de los mejores aislantes. Debido a que en este trabajo los semiconductores son el centro de atención. En la mayoría de los libros de estado sólido un semiconductor se define como un material cuya resistencia se encuentra en un rango de entre 10^{-2} - $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$. Otra forma de definirlo es como un material cuyo ancho de banda prohibido (definido más adelante) para la excitación de electrones se encuentra entre 0 y 3 electrón volts (eV). Una definición más coloquial es que son materiales con características que están entre las de un conductor y un aislante; relacionando la anterior definición con los valores de ancho de banda prohibida para un semiconductor, aquellos materiales con 0-eV de ancho de banda son metales o semimetales y aquellos materiales con más de 3 eV son aislantes aunque existen algunas excepciones a esto, como el diamante semiconductor que tiene 6 eV.

El material semiconductor mejor conocido es el silicio. Sin embargo hay muchos semiconductores de diferentes variedades además del silicio. De hecho muchos minerales encontrados en la naturaleza son semiconductores tales como el Sulfuro de Zinc (ZnS), la Cuprita (Cu_2O) y la Galena (PbS), por nombrar algunos y sin mencionar los que están sintetizados en los laboratorios. Los materiales semiconductores son los materiales más versátiles conocidos por el hombre. Los semiconductores se pueden formar en diferentes composiciones químicas y con una gran variedad de distintos cristales. Algunos de ellos son elementales como el silicio (Si). Otros pueden ser binarios o ternarios como el arseniuro de galio ($AsGa$). Muchos compuestos orgánicos, como el poliacetileno $(CH)_n$, son semiconductores. Algunos presentan comportamientos magnéticos o ferroeléctricos como el $SbSI$. Algunos otros se convierten en superconductores cuando son dopados con suficientes portadores ($GeTe$ y $SrTiO_3$). Incluso algunos óxidos como el Cu_2O que se encuentra de manera natural y el ZnO , son semiconductores a pesar de que la mayoría de los óxidos son aislantes. [17] Todos estos materiales mencionados y muchos otros más, se forman en diversas estructuras atómicas o redes que pueden ser estructuras cristalinas, poli cristalinas o amorfas. Incluso existen estructuras completamente diferentes de un mismo semiconductor (CdS con fase cúbica o hexagonal por ejemplo) como se verá un poco más adelante.

2.9 Estructuras de los semiconductores

Como se mencionó los semiconductores pueden formar diversas estructuras o redes y que, dependiendo de dicha estructura reciben diferentes clasificaciones. Aquellos materiales en los que los átomos del mismo esta acomodados en una manera irregular, sin ningún tipo arreglo corto o largo en el acomodo de los átomos, son llamados materiales amorfos. Aquellos materiales cuyos átomos están en un arreglo regular son conocidos como sólidos cristalinos. Sin embargo esta categoría tiene 2 categorías dentro de ella. La primera de ellas es que los átomos estén todos acomodados en el mismo arreglo estructural a lo largo del cristal completo y son llamados simplemente sólidos cristalinos. El otro tipo de sólidos son los poli cristalinos, en estos materiales el arreglo regular de átomos existe, pero solo en regiones pequeñas del cristal que pueden medir unos pocos angstroms a algunos centímetros. Un sólido poli cristalino está formado por muchas de estas pequeñas regiones cristalinas. En los sólidos cristalinos las estructuras se forman de diferentes maneras, sin embargo todas pueden empezar con un bloque básico de construcción (celda unitaria) y es posible construir el cristal completo colocando bloques

iguales a lo largo de las tres direcciones no coplanarias de la red del cristal. Todos los posibles arreglos de estas celdas unitarias en un sólido cristalino pueden ser hechos mediante la red espacial, un concepto introducido por Bravais. Esta red espacial es un arreglo de puntos de la red cristalina, de manera que la colocación de estos puntos en cualquier lugar del espacio descrito, es la misma para todos los puntos de la red. En general la simetría de una red espacial puede ser descrita mediante los vectores no coplanarios b_1 , b_2 y b_3 definida de una manera que cualquier punto de red $r(n_1, n_2, n_3)$ puede ser generado a partir de cualquier otro punto de red $r(0, 0, 0)$. $r(n_1, n_2, n_3) = r(0, 0, 0) + n_1 b_1 + n_2 b_2 + n_3 b_3$ (1.1) Dónde: $r(n_1, n_2, n_3) = n_1 b_1 + n_2 b_2 + n_3 b_3$ (1.2) Es el vector transitorio y n_1 , n_2 y n_3 son enteros arbitrarios. En la figura 1.1 se observa un paralelepípedo unitario definido por los 3 vectores b_1 , b_2 y b_3 y 3 ángulos α , β , y γ . Esto es una celda unitaria convencional para una red de Bravais

Dependiendo del largo de los 3 vectores no coplanarios, los ángulos entre ellos y el número de puntos en la red de una celda unitaria, la red espacial o red cristalina puede ser dividida en siete sistemas de red y catorce redes de Bravais. Cada una de las redes de Bravais es única y no puede ser generada a partir de otra, pero si son generadas mediante cualquier combinación de una red simple, una centrada en la base, una centrada en la cara y una centrada en el cuerpo

Los semiconductores puros se comportan como aislantes a muy bajas temperaturas pero al ser sometidos a altas temperaturas o mezclados con impurezas su conductividad puede aumentar de forma considerable y llegar a alcanzar niveles cercanos a la de los metales. De esta forma una de las propiedades interesantes, es su capacidad de comportarse algunas veces como aislantes y otras como conductores. Esto se debe a que podemos modificar la resistividad en un semiconductor de diferentes maneras, por ejemplo mediante la adición de átomos dopantes, además de que los procesos electrónicos se pueden comprender con mayor facilidad y profundidad en los semiconductores que en otros materiales.

El semiconductor perfecto, es aquella sustancia que tiene una estructura de bandas de energía en la que una banda de estados electrónicos completamente llena (banda de valencia) a la temperatura de 0 K se separa de otra que se encuentra totalmente vacía (banda de conducción) por medio de una región angosta de estados de energía prohibida. El origen de esta banda de energía, puede ser explicada de la siguiente manera: cuando dos átomos similares se unen como sucede en un sólido, estos tienen que estar uno muy próximo al otro, de tal forma que las funciones de onda de sus electrones empiecen a

superponerse, así los estados de todos los pares de spin de los electrones adquieren una energía que difiere ligeramente del valor del átomo aislado, dicho de otra manera el enlace atómico depende del número de electrones de valencia de los átomos formantes del enlace y de la electronegatividad de los mismos. Los electrones de la capa externa o electrones de valencia son los que determinan y forman los enlaces y los que en su momento pueden determinar el carácter conductivo, a dicho estado se le denomina banda de energía. A temperaturas del cero absoluto (0°K), el semiconductor es un aislante perfecto, ya que no cuenta con bandas parcialmente llenas. Sin embargo, a temperaturas más altas, algunos de los electrones de la banda de valencia pueden adquirir la suficiente energía térmica y pasar a la banda de conducción que hasta entonces estaba vacía, esta estructura de bandas se ilustra esquemáticamente en la Figura 1.3. Los estados vacíos que quedan en la banda inferior o de valencia, pueden contribuir también a la conductividad comportándose como huecos positivamente cargados. El número de electrones de conducción y el número de huecos aumentan al incrementarse la temperatura, esta es una propiedad muy importante de los semiconductores, ya que la conductividad eléctrica aumenta al incrementarse la temperatura.

La energía que separa las bandas de conducción y de valencia se denomina energía de banda prohibida, ésta es la diferencia entre el punto más bajo de la banda de conducción y el más alto de la banda de valencia. El punto más bajo de la banda de conducción se llama borde de la banda de conducción, el punto más alto de la banda de valencia se denomina borde de la banda de valencia. Un semiconductor en el cual los huecos y los electrones se crean mediante una excitación térmica, luminosa o por bombardeo de electrones, y pasan únicamente de la banda de valencia a la banda de conducción a través de la banda prohibida de energía es conocido como semiconductor intrínseco. Los huecos y los electrones creados de esta manera a menudo se denominan portadores de carga intrínsecos, la conductividad en un semiconductor intrínseco originada por estos portadores de carga se llama conductividad intrínseca, en ésta, las concentraciones de electrones y huecos siempre son las mismas, ya que la excitación térmica de un electrón origina inevitablemente un hueco [19]. Sin embargo un semiconductor no tiene que ser intrínseco para ser útil, introducir cantidades pequeñas de otros materiales o también la falta de algunos átomos dentro de la red del material puede cambiar las características del semiconductor que originalmente se tenía.

En un material es posible observar que su red cristalina tiene ausencia de átomos dentro de su red cristalina. Estos átomos perdidos son conocidos como vacancias y dependiendo del material semiconductor estas vacancias pueden variar según el material. En un semiconductor elemental solo podrán existir vacancias de un solo tipo pero en un semiconductor binario como el CdS pueden existir vacancias de Cd (VCd) o vacancias de S (VS). Para lograr un cambio en un material semiconductor también es viable introducir otros materiales. A los materiales introducidos se les conoce como defectos puntuales o impurezas y existen diferentes tipos de defectos: sustitucionales, intersticiales y de Frenkel. [20] Los defectos sustitucionales son impurezas que son únicamente encontradas en cristales con más de una sub-red y con átomos diferentes en cada una. Son resultado de una purificación incompleta del material o de una contaminación intencional y son referidos como defectos extrínsecos. Los defectos intersticiales son átomos que se encuentran en los espacios entre la red cristalina. Pueden ser impurezas o matrices de átomos. Los defectos intersticiales pueden presentarse extrínsecos o intrínsecos en los semiconductores. Dependiendo de la densidad de defectos intersticiales las características del material pueden ser cambiadas por completo. Los defectos de Frenkel son pares de vacancias y defectos intersticiales que son formados por un átomo que deja su sitio en la red cristalina dejando una vacancia y transfiriéndose a una posición dentro de la red. Estos defectos pueden ser producidos mediante procesos de difusión pero ocurren más comúnmente debido al choque de una partícula muy energética con un átomo que, debido al choque, se desplaza de su posición a una posición intersticial [20].

Una sustancia cuya mayoría de portadores de carga se origina debido a átomos de impurezas, es conocida como semiconductor extrínseco. Las impurezas pueden proporcionar a un semiconductor intrínseco un desequilibrio en el número de electrones y huecos existentes. Si un semiconductor intrínseco recibe un átomo de impurezas y éste se puede ionizar fácilmente debido a la agitación térmica, de manera que pierda un electrón, es decir, se ioniza de tal forma que ocasiona un número mayor de electrones, se dice entonces que se trata de una impureza donadora, por lo tanto el semiconductor se denomina tipo-n, dado que los portadores de carga que están contribuyendo a la conducción son por lo tanto negativos.

En el caso contrario cuando una impureza ocasiona que en el semiconductor exista un número mayor de huecos que de electrones el semiconductor es denominado tipo-p ya que la impureza es receptora, dado que los portadores de carga que contribuyen a la conducción son positivos. Cuando hablamos de un semiconductor extrínseco, las impurezas aceptoras o donadoras generan entre las bandas de valencia y de conducción ciertos niveles de energía. Estos niveles se encuentran más cercanos al borde de la

banda de conducción en el caso de los semiconductores tipo-n; y para el caso de los semiconductores tipo-p los niveles discretos aparecen más cercanos a la banda de Valencia.

2.10 Contactos metálicos

Cuando existen contactos de metal con un semiconductor para algunos dispositivos como diodos o transistores, no se puede utilizar simplemente cualquier metal. Para definir que metal se usará se debe conocer la función de trabajo. Para definirla es necesario definir otras cosas. Primero se toma un nivel de referencia conveniente para la energía, esto es, la energía de un electrón libre o en el vacío, E_0 . Esta representa la energía que tendría un electrón, si estuviera precisamente libre de la influencia del material dado. La diferencia entre E_0 y la energía de Fermi (E_f) se llama función de trabajo, a la que comúnmente se le da el símbolo de ϕ en unidades de energía, a menudo se da en ϕ , en volts, para materiales particulares. En el caso del semiconductor, la diferencia entre E_0 y E_f es una función de la concentración del contaminante en el semiconductor, dado que E_f cambia de posición dentro de la brecha que separa a E_v y E_c (Ancho de banda prohibida) conforme se hace variar la contaminación. Sin embargo la diferencia entre el nivel en el vacío y el borde de la banda de conducción es una constante del material. Esta cantidad se llama afinidad electrónica y, convencionalmente, se denota como χ , en unidades de energía.

Cuando un metal hace contacto con un semiconductor, se forma una barrera en la interfaz entre estos dos. Esta barrera es responsable del control de la corriente así como el comportamiento de la capacitancia del contacto y es esto lo que define si un contacto es óhmico o rectificador. La altura de esta barrera está definida como: $\phi_b = \phi - \chi$ (1.3) Donde ϕ es la función de trabajo del metal y χ la afinidad electrónica del semiconductor. A esta barrera se le conoce también como barrera Schottky

En un contacto rectificador la barrera de Schottky tiene un efecto en la corriente que es comparable al de un diodo y en el cual la curva de corriente contra voltaje no se comporta como una línea. En un diodo al comenzar a incrementar el voltaje desde cero, la corriente es demasiado pequeña, pero cuando el voltaje es suficientemente alto la corriente se dispara y es entonces cuando se dice que el diodo está encendido. Esta particularidad de los contactos metal-semiconductor es utilizada para fabricar diodos Schottky que no usan la unión p-n como su base de funcionamiento. El contacto rectificador es un contacto en el que no se requiere un comportamiento lineal de la corriente a diferencia del contacto

óhmico. Un contacto óhmico está definido como una unión metal-semiconductor con una resistencia de unión que es despreciable en relación a la del resto del material semiconductor. Un contacto satisfactorio no debe perturbar el desempeño de un dispositivo, debe ser capaz de proveer la corriente necesaria con la caída de voltaje más baja posible en la región activa del material. En semiconductores con un ancho de banda prohibida amplio es difícil hacer buenos contactos óhmicos. No existen metales con funciones de trabajo lo suficientemente bajas para crear una barrera baja. En esos casos se utiliza un material con una superficie altamente dopada o también se puede utilizar un material de un ancho de banda prohibida bajo con un dopaje del mismo tipo del material sobre el cuál se deposita el metal para hacer el contacto óhmico .

La función de trabajo ayuda que metales utilizar en un material dependiendo si se necesita un contacto óhmico o rectificador. Sin embargo no es la única característica de los semiconductores lo que nos ayuda a definir si serán adecuados para un dispositivo o no. En la siguiente tabla se pueden observar algunas características básicas de algunos semiconductores.

Como ya se ha comentado anteriormente, en un metal todos los e^- exteriores (de valencia) se encuentran compartidos por todos los átomos de la red cristalina. Estos e^- constituyen una “nube electrónica” pudiéndose mover libremente a través de todo el cristal.

Estadísticamente, en su movimiento, el número de e^- que se mueven en un sentido será el mismo que los que lo hacen en sentido contrario, es decir, no habrá un movimiento neto de carga y por lo tanto no habrá corriente eléctrica. Si ahora aplicamos un campo eléctrico exterior aparecerá una corriente de desplazamiento.

Un aumento de la temperatura provocará un aumento del número de choques que en su movimiento tienen los e^- , esto se traducirá en una disminución de la velocidad neta de los mismos, con lo cual la intensidad de corriente disminuirá. En un semiconductor, sucederá algo similar. Los e^- libres se moverán como respuesta a la acción del campo aplicado. Sin embargo, en un semiconductor y, a diferencia de los metales, tenemos otro tipo de portadores que son los h^+ , de forma que cuando aplicamos un campo eléctrico tendremos un movimiento de e^- en dirección contraria al campo y un movimiento de h^+ en la misma dirección del campo. Es decir, la corriente de arrastre tendrá dos componentes, una debida al movimiento de los e^- y otra debida al movimiento de los huecos. Por otra parte, si tenemos un semiconductor dopado de forma no uniforme (situación muy habitual en las aplicaciones de semiconductores) tendremos una conducción por difusión. La difusión es un conocido fenómeno de la

cinética de gases de partículas clásicas que tiene su origen en el movimiento aleatorio de agitación térmica que las hace recorrer todo el recinto que las encierra. Después de un choque, cada partícula tiene la misma probabilidad de dirigirse en cualquier dirección, lo que hace que haya un flujo neto de partículas de las regiones más pobladas a las menos pobladas con el fin de homogeneizar su concentración. Es decir, la difusión se produce siempre que existan variaciones espaciales (gradientes) de la concentración de partículas. Si las partículas tienen carga, los flujos por difusión transportan carga eléctrica y constituyen, por tanto, corrientes eléctricas.

Modelos en semiconductores y en física de semiconductores.

El término modelo se refiere a una representación matemática que permite comprender la naturaleza de determinados comportamientos físicos que se dan en el material, pero que además permite avanzar en el conocimiento mediante la realización de descubrimientos importantes. Son cuatro los modelos que permiten analizar y comprender el comportamiento de los semiconductores y de los dispositivos semiconductores. • Modelo de enlace covalente: Es el más simple.

Permite hacerse una idea intuitiva de los procesos de conducción en semiconductores. Ofrece una representación cualitativa del comportamiento interno de los sólidos cristalinos. •

Modelo de bandas de energía: Es el más utilizado. Reúne las características de ser un modelo gráfico y matemático. Permite describir los fenómenos de transporte en semiconductores y dispositivos semiconductores de una forma cuantitativa. • Modelo analítico o matemático: Describe mediante un conjunto de ecuaciones matemáticas los procesos físicos que tienen lugar en el semiconductor o dispositivo. • Modelo circuital o analógico: Describe el comportamiento del dispositivo a nivel macroscópico en función de las magnitudes de tensión y de corriente. Adecuado para el análisis de circuitos en los que intervengan dispositivos semiconductores.

Los materiales semiconductores se encuentran en la naturaleza formando una llamada estructura cristalina. Según esta estructura, los átomos del material semiconductor se encuentran distribuidos espacialmente formando una estructura regular (celosía, enrejado o "lattice"). Sin embargo, los átomos no ocupan en el espacio posiciones fijas, sino que debido a las vibraciones térmicas están situados o localizados alrededor de esta posición. Para un material semiconductor dado, hay una estructura básica llamada celda unidad, a partir de la cual es posible mediante repetición tridimensional construir la

estructura propia del cristal. En la siguiente figura se recogen tres tipos diferentes de celdas unidad en un cristal de tipo cúbico.

2.11 Transporte de cargas en un semiconductor

Los dispositivos de conmutación de potencia se fabrican sobre la base de un semiconductor, el silicio de muy alta pureza. El silicio, como todo semiconductor, tiene una conductividad muy baja (resistividad muy alta). En lo que sigue se presenta una descripción cualitativa del carácter de esta pequeña conductividad y de como puede ser modificada para crear las estructuras de los dispositivos de conmutación de potencia.

Se presenta además los fundamentos del funcionamiento de una juntura pn y de sus aplicaciones elementales, el diodo y el transistor bipolar. El tema puede verse con más detalle en cualquier libro de física de dispositivos semiconductores (Sze 1981). Resúmenes del tema se encuentran en libros tradicionales de electrónica general (Millman & Halkias 1972) o de electrónica de potencia (Kassakian, Schlecht & Verghese 1992). La comprensión del comportamiento eléctrico de estas estructuras constituye la base para el estudio de los dispositivos más complejos que se emplean como llaves de conmutación de potencia

La conducción en un material sólido como el silicio se debe al movimiento de electrones bajo la acción de un campo eléctrico. La conductividad depende de la energía necesaria para liberar un electrón de la red cristalina donde se encuentra formando los enlaces entre los distintos átomos. Los electrones de un átomo aislado pueden tener solamente determinados niveles discretos de energía “permitidos”. Los de mayor energía son los electrones de valencia, responsables de los enlaces. En un cristal como el silicio, los niveles discretos de energía de los electrones se transforman en intervalos o “bandas” de energía. Los niveles están tan juntos que es razonable considerar que la energía de los electrones puede tomar cualquier valor dentro de la banda. Las bandas están separadas por intervalos de energía “prohibidos” a los cuales los electrones no pueden acceder. Utilizando la terminología en inglés, a estos intervalos les llamamos “gaps”.

La banda de energía más alta que contiene los electrones que constituyen el enlace entre los átomos del cristal es la “banda de valencia”. Por encima de esa banda de energía hay un gap (intervalo de energías prohibidas) y luego un intervalo de energías permitidas llamado banda de conducción. Los electrones cuya energía se encuentra en esa banda no están ligados a ningún átomo de la red cristalina en particular, se pueden mover por el cristal (bajo la acción de un campo eléctrico, por ejemplo) y contribuyen a la conductividad eléctrica. A cero grado Kelvin la banda de conducción está vacía, todos los electrones de más energía de los átomos están en sus lugares formando los enlaces covalentes.

A temperaturas mayores o eventualmente por acción de la luz (generación térmica u óptica) crece la probabilidad de que un electrón de la banda de valencia adquiera suficiente energía como para pasar a la banda de conducción, contribuyendo a la conductividad según lo descrito. Cada átomo de silicio tiene cuatro electrones de valencia, por lo tanto tendrá un enlace covalente con otros cuatro átomos compartiendo dos electrones en cada enlace. Si un electrón pasa a la banda de conducción queda un enlace covalente incompleto por la falta de un electrón, lo cual equivale a una carga neta positiva en la banda de valencia, del mismo valor que la carga del electrón. Esa carga positiva se llama hueco. Bajo la acción de un campo eléctrico el hueco puede desplazarse por el cristal cuando un electrón de un átomo vecino toma el lugar libre. La figura 2.2 muestra la estructura cristalina simplificada (en dos dimensiones) del cristal de silicio y el proceso descrito de conducción bajo el campo eléctrico E .

Las concentraciones de dopajes varían entre 10^{18} y 10^{25} m^{-3} . Estos valores están muy por encima de la disponibilidad intrínseca de portadores, por lo cual las propiedades eléctricas del semiconductor cambian drásticamente con el dopaje. Sin embargo, están muy por debajo de la cantidad de átomos/ m^3 por lo cual las demás propiedades del silicio (físicas no eléctricas, químicas, etc.) permanecen inalteradas. Para que un dispositivo semiconductor tenga las propiedades deseadas se utilizan distintos niveles de dopaje en sus distintas partes. Un dopaje de $10^{18} \sim 10^{20}$ átomos por metro cúbico se considera un dopaje bajo, el material tiene alta resistividad y se lo denomina material n o p.

Un dopaje del orden de 10^{22} se considera un dopaje medio, el material así dopado se lo denomina material n o p. Un dopaje de $10^{24} \sim 10^{25}$ es un dopaje alto, el material es muy conductor y se lo denomina material n + o p +. Un material de un tipo puede ser cambiado a otro tipo mediante un

dopaje adicional de concentración un par de órdenes de magnitud mayor. Por ejemplo: un material p – con 10^{19} aceptores/ m^3 puede convertirse en n si se lo dopa con 10^{22} donadores/ m^3 que predominan claramente. A su vez, si a este material se lo dopa con 10^{24} aceptores/ m^3 se lo convierte en un material p +. De esta forma pueden crearse zonas p y n adyacentes en el mismo cristal semiconductor, lo que permite implementar componentes.

El sobredopaje es una forma de cambiar el tipo de silicio que sirve para ilustrar cómo se realiza el cambio. La tecnología real de creación de zonas p y n tiene distintas variantes y puede ser muy compleja.

Unidad III INTRODUCCION A LA ELECTRONICA

3.1 Conducción y difusión

El transporte de cargas por conducción (en inglés se usa la palabra drift) se rige por la ecuación de la densidad de corriente (ley de Ohm) en la que la densidad de corriente se expresa como: $J = \sigma E$ (2.16) con la conductividad σ dada por la ecuación

. La conducción en los términos descritos constituye el transporte de cargas en los metales. 2.8.2. Difusión Además de la conducción o “drift”, en los semiconductores se presenta otro mecanismo de transporte de cargas, la difusión. La existencia de este mecanismo de transporte es la principal diferencia entre metales y semiconductores, y es lo que permite construir con estos últimos dispositivos electrónicos (diodos, transistores, etc.).

En un semiconductor se puede producir y mantener concentraciones no uniformes de portadores libres. Se tiene entonces gradientes de concentración. Esto es posible por la existencia de dos tipos de portadores, huecos y electrones, que pueden tener distribuciones espaciales no uniformes manteniendo neutralidad de carga. En los metales esto no es posible por haber un solo tipo de portadores. Supongamos que se tiene en un semiconductor una distribución de la concentración de portadores.

3.2 George Boole

George Boole fue un matemático considerado uno de los padres de las ciencias computacionales en gran medida por su invención del álgebra booleana; nació el 2 de noviembre de 1815, justamente hace 200 años en Lincoln, Inglaterra.

Los principios lógicos concebidos hace siglo y medio, en la madurez de su carrera como matemático, fueron esenciales para la evolución del apartado teórico de la actual programación informática.

Fue él quien sentó las bases de la computación actual; la “lógica Booleana” indica que todas las variables se definen en dos “estados”: verdadero o falso, o mejor dicho, 1 y 0. El legado de Boole se basa en una teoría matemática que simplifica los enunciados que tenían por respuesta «sí» o «no», usando para ello la aritmética binaria.

Boole creó los cimientos de toda la era informática, es por esto que Google reconoce que seguramente sin Boole no habría Google. Cuando realizamos una búsqueda en Google se desata un mecanismo de búsqueda en el que está presente el ingenio matemático de George Boole.

El doodle (logo de Google adornado según el motivo del homenaje) hace referencia al álgebra booleana colgando de cada letra de Google divisiones binarias: «and», «or» y «not».

En 1841 Boole publicó un artículo que tuvo gran impacto sobre la naciente teoría de invariantes. En 1844 la Royal Society le otorgó la primera medalla de oro concedida a un matemático por su memoria titulada *On A General Method of Analysis*, una contribución a las ecuaciones diferenciales lineales. En junio de 1845 Boole presentó una ponencia en la Conferencia Anual de la British Association for the Advancement of Science, donde conoció al futuro Lord Kelvin.

Consideró matricularse en la Universidad de Cambridge para obtener una graduación, pero su deseo de continuar con su programa de investigación y la limitación de recursos, le hicieron renunciar.

Prácticamente autodidacta, George Boole muy pronto alcanzó gran notoriedad gracias a sus brillantes aportaciones y artículos. En 1847 publicó su 'Análisis matemático de la lógica', que contiene sus primeras observaciones sobre los vínculos entre la lógica y las matemáticas y que muchos consideran como el acta de nacimiento de la lógica matemática. Simplifico el mundo en enunciados básicos que tenían por respuesta Sí o No, utilizando para ello aritmética binaria. "Las interpretaciones respectivas de los símbolos 0 y 1 en el sistema de lógica son Nada y Universo", dijo. Este concepto lo desarrolló siete años más tarde y es lo que está presente en los programas informáticos actuales.

Sus trabajos impresionaron a sus colegas de la época, lo que le ganó en 1849 el puesto de profesor de matemáticas del entonces Queen's College en Cork en Irlanda (en la actualidad, University College Cork), que le fue ofrecido a pesar de que no tenía título universitario.

En 1851 la Universidad de Dublín le concedió un doctorado honorario.

En 1854 publicó "Investigación sobre las leyes del pensamiento", libro que trataba sobre las teorías matemáticas de lógica y probabilidad. Desarrolló un álgebra propia, que aplicó a la lógica, sosteniendo que ésta debería ser una rama de las Matemáticas, en lugar de la Filosofía. Boole redujo la lógica a una álgebra sencilla, naciendo así lo que se conoce como álgebra booleana, que influiría en el desarrollo de la informática.

En 1855 se casó con Mary Everest, sobrina del geógrafo George Everest que había realizado la topografía de la India. También en 1855 Boole fue galardonado con la Keith Medal de la Royal Society of Edinburgh.

En 1857 publicó una aplicación de métodos algebraicos para la resolución de ecuaciones diferenciales en el "Transaction of the Royal Society", que mereció el nombramiento como miembro de la Royal Society. En 1859 fue nombrado miembro honorario de la Cambridge Philosophical Society y en 1859 doctor honoris causa por la Universidad de Oxford. En este último año publicó el "Tratado de las ecuaciones diferenciales" y en 1860 el "Tratado sobre el Cálculo de las Diferencias Finitas".

La modestia que caracterizaba a Boole inspiró a todos sus amigos la estima más profunda. Pese a que recibió una medalla de la Royal Society por sus memorias de 1844, y el título honorífico de doctor honoris causa en Derecho de la Universidad de Dublín, no solicitó ni recibió los beneficios ordinarios a los que sus descubrimientos le darían derecho. Sin embargo sí tenía cierta noción del impacto histórico que su sistema de lógica podría tener. Un día dijo a un amigo que la lógica booleana podría ser "la contribución más valiosa, si no la única, que he hecho o que probablemente haga a la ciencia y el motivo por el que desearía que me recuerden, si es que me van a recordar, póstumamente".

La forma de cálculo desarrollada por George Boole es un sistema mediante el cual ciertos razonamientos lógicos pueden expresarse en términos matemáticos. Los elementos del álgebra de Boole son un conjunto de proposiciones, es decir, de hechos expresados mediante oraciones del lenguaje natural. Tales proposiciones tienen como propiedad ser verdaderas o falsas. Esto significa que pueden expresarse por medio de un sistema binario: verdadero o falso; sí o no; 0 ó 1.

El sistema matemático binario es el sistema numérico más utilizado en los ordenadores. Las operaciones que los microprocesadores pueden llevar a cabo son muy sencillas y algunas de ellas se basan en el álgebra de Boole, pero la combinación de todas estas operaciones a grandísima velocidad permite ejecutar tareas muy complejas.

De este modo, los procedimientos de cálculo lógico del álgebra de Boole han pasado a constituir la "inteligencia" de multitud de objetos cotidianos: cuando los ingenieros diseñan los circuitos para los ordenadores personales, calculadoras de bolsillo, lectores de discos compactos, teléfonos móviles y una gran cantidad de otros tipos de productos electrónicos, no hacen sino capacitarlos para ejecutar operaciones y procesos basados en los principios del álgebra de Boole.

George Boole publicó alrededor de 50 escritos sobre el universo de las matemáticas y en particular sobre el álgebra, pero además su conocimiento de la literatura en general era amplia y profunda. Dante fue su poeta favorito y prefería el Paraíso al Infierno. La metafísica de Aristóteles, la ética de Spinoza, las obras filosóficas de Cicerón y muchas obras afines fueron también temas frecuentes de estudio. Sus reflexiones sobre cuestiones filosóficas y religiosas de carácter científico están orientadas en cuatro direcciones: el genio de sir Isaac Newton; el uso correcto del ocio; las demandas de la Ciencia; y el aspecto social de la cultura intelectual. Estos ensayos se publicaron en diferentes momentos.

En 1864 George Boole enfermó gravemente tras mojarse bajo la lluvia mientras caminaba hasta el aula donde, en un mal entendido cumplimiento de su deber, dio clase con la ropa

mojada. Falleció el 8 de diciembre de 1864 a los 49 años de pleuresía en Ballintemple, Cork (Irlanda)

3.3 Algebra de Boole. Propiedades.

El álgebra de Boole es una herramienta de fundamental importancia en el mundo de la computación. Las propiedades que se verifican en ella sirven de base al diseño y la construcción de las computadoras que trabajan con objetos cuyos valores son discretos, es decir las computadoras digitales, en particular las binarias (en las cuales los objetos básicos tienen solo 2 valores posibles) las que son, en definitiva, la totalidad de las computadoras de uso corriente. Desde ya adelantemos que no se verán aquí detalles formales de la construcción algebraica, ni todas las propiedades que se verifican, así como tampoco todos los métodos de síntesis de funciones booleanas que habitualmente se incluyen en este tema en cursos de lógica y/o diseño lógico. Como toda álgebra, la de Boole parte de un cuerpo axiomático, el cual puede adquirir diversas formas, variando la cantidad y calidad de los axiomas. Aquí en particular tomaremos uno: el propuesto por Huntington en 1904 que tiene la ventaja de ser consistente e independiente.

Axiomas.

1. Existe un conjunto G de objetos, sujetos a una relación de equivalencia, denotada por "=" que satisface el principio de sustitución.

Esto significa que si $a = b$, b puede sustituir a a en cualquier expresión que la contenga, sin alterar la validez de la expresión.

2. (a) Se define una regla de combinación "+" en tal forma que $a + b$ está en G siempre que al menos a o b lo estén.

(b) Se define una regla de combinación "." en tal forma que $a \cdot b$ está en G siempre que tanto a como b lo estén.

3. Neutros.

(a) Existe un elemento 0 en G tal que para cada a de G : $a + 0 = a$ (b) Existe un elemento 1 en G tal que para cada a de G : $a \cdot 1 = a$

4. Conmutativos.

Para todo par de elementos a y b pertenecientes a G se cumple: (a) $a + b = b + a$ (b) $a \cdot b = b \cdot a$

5. Distributivos.

Para toda terna de elementos a, b, c pertenecientes a G se cumple: (a) $a + (b \cdot c) = (a + b) \cdot (a + c)$

(b) $a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c$

6. Complemento.

Para cada elemento a de G existe un elemento \bar{a} tal que: $1 + \bar{a} = 0$ y $a \cdot \bar{a} = 0$

7. Existen por lo menos dos elementos x, y en G tal que $x \neq y$ y Existe similitud de muchos de estos postulados con los del álgebra común. Sin embargo, la primera de las reglas distributivas (sobre la suma) y la existencia del complemento diferencian en forma fundamental esta álgebra de la común.

Modelo aritmético. El ejemplo más simple del álgebra de Boole se compone de un conjunto G de 2 elementos: "0" y "1". Como es natural estos dos elementos deben coincidir con los neutros de las reglas de combinación para satisfacer el axioma 3. Las reglas de combinación debemos definir las de manera de satisfacer los axiomas.

Así de acuerdo al axioma 3 :

de acuerdo al axioma 4

$$0 + 1 = 1 \quad 1 \cdot 0 = 0$$

y teniendo presente el axioma 5 :

$$1 + (1 \cdot 0) = (1 + 1) \cdot (1 + 0) \quad (5a \text{ con } a = 1, b = 1, c = 0)$$

$$1 + 0 = (1 + 1) \cdot 1$$

$$1 = 1 + 1 \quad (\text{por axioma 3})$$

$$0 \cdot (0 + 1) = 0 \cdot 0 + 0 \cdot 1 \quad (5b \text{ con } a = 0, b = 0, c = 1)$$

$$0 \cdot 1 = 0 \cdot 0 + 0$$

$$0 = 0 \cdot 0 \quad (\text{por axioma 3})$$

Por lo tanto las reglas *completas* son:

$$0 + 0 = 0 \quad 0 \cdot 0 = 0$$

$$0 + 1 = 1 \quad 0 \cdot 1 = 0$$

$$1 + 0 = 1 \quad 1 \cdot 0 = 0$$

$$1 + 1 = 1 \quad 1 \cdot 1 = 1$$

Nosotros usaremos esta versión "binaria" del álgebra de Boole.

Propiedades. Dualidad

Si analizamos los postulados veremos que los mismos se presentan de a pares y en tal forma que uno

de la pareja se obtiene de otro cambiando "0" por "1" junto con "+" por "·" (y viceversa). Esto asegura que cada propiedad que se demuestre en esta Álgebra tiene una "dual" que también es cierta (para demostrar la dual bastaría con repetir la demostración realizada sustituyendo cada postulado o propiedad utilizada por su dual).

Asociativa

$$a) a + (b + c) = (a + b) + c \quad b) a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c$$

Si bien las leyes asociativas son muchas veces incluidas dentro del cuerpo axiomático, de hecho son demostrables a partir de los axiomas aquí presentados (demostración que no haremos) por lo cual las presentamos como propiedades.

Idempotencia

Para todo elemento en G se cumple:

$$a + a = a$$

$$a \cdot a = a$$

Demostración:

$$a + a = (a + a) \cdot 1 \quad (3b)$$

$$a + a = (a + a) \cdot (a + \bar{a}) \quad (6)$$

$$a + a = a + (a \cdot \bar{a}) \quad (5a)$$

$$a + a = a + 0 \quad (6)$$

$$\Rightarrow a + a = a$$

$$\Rightarrow a \cdot a = a \quad (\text{Dualidad})$$

Neutros Cruzados

Para todo elemento en G se cumple

$$a + 1 = 1$$

$$a \cdot 0 = 0$$

Demostración:

$$a + 1 = a + (a + \bar{a}) \quad (6)$$

$$a + 1 = (a + a) + \bar{a} \quad (\text{asociativa})$$

$$a + 1 = a + \bar{a} \quad (\text{idempotencia})$$

$$\Rightarrow a + 1 = 1$$

$$\Rightarrow a \cdot 0 = 0 \quad (\text{Dualidad})$$

Entonces los axiomas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 se satisfacen por definición y es fácil verificar que el G (complemento) también es cierto. Construimos por lo tanto un modelo "aritmético" de álgebra de

Boole que podemos denominar "binario" y es en definitiva con la que trabajaremos. Muchas veces las reglas de combinación se presentan como tablas (como las funciones booleanas más generales que veremos más tarde)

En general notaremos $a \cdot b$ como ab , además la operación “ \cdot ” tendrá mayor precedencia que la operación “ $+$ ”.

Complemento de complemento

Para cada elemento de G se cumple : $a = \overline{\overline{a}}$

Para todo par de elementos de G se cumple

$$a + \overline{ab} = a + b$$

$$a(\overline{a} + b) = ab$$

Ley de De Morgan Para todo par de elementos de G se cumple :

$$\overline{(a + b)} = \overline{a} \overline{b}$$

$$\overline{(ab)} = \overline{a} + \overline{b}$$

Estas reglas de De Morgan pueden generarse para cualquier número de variables.

$$\overline{(a_1 + a_2 + \dots + a_n)} = \overline{a_1} \overline{a_2} \dots \overline{a_n}$$

$$\overline{(a_1 a_2 \dots a_n)} = \overline{a_1} + \overline{a_2} + \dots + \overline{a_n}$$

3.4 Funciones lógicas elementales.

Los valores que pueden asignarse a un juicio, desde el punto de vista lógico, son dos: verdadero (V) o falso (F).

Un juicio al cual se le aplica el operador lógico no (negación) forma un nuevo juicio.

Dos juicios pueden combinarse para formar un tercero mediante los operadores lógicos "o" e "y".

Si vinculamos los valores booleanos 0 y 1 con los valores lógicos F y V respectivamente, encontramos que las operaciones del álgebra de Boole "binaria" asigna correctamente los valores lógicos del juicio combinación.

Esto se comprueba observando que: verdadero o verdadero es verdadero, verdadero o falso es verdadero, falso o verdadero es verdadero, falso o falso es falso, verdadero y verdadero es verdadero, verdadero y falso es falso, falso y verdadero es falso, falso y falso es falso.

Por lo cual se puede concluir que el modelo "lógico" es isomorfo con el "aritmético" (binario) realizando la correspondencia.

$$\begin{aligned}
 F &\Leftrightarrow 0 \\
 V &\Leftrightarrow 1 \\
 \cup &\Leftrightarrow + \\
 \cap &\Leftrightarrow \cdot \\
 \neg &\Leftrightarrow -
 \end{aligned}$$

Es posiblemente consecuencia de este isomorfismo que las reglas de combinación "+" y "." del álgebra de Boole reciban los nombres de OR ("o" en inglés) y AND ("y" en inglés) respectivamente.

3.5 Representación de una función lógica.

Una función lógica o booleana es una variable lógica cuyo valor es equivalente al de una expresión algebraica, constituida por otras variables lógicas relacionadas entre sí por medio de las operaciones suma lógica (+), y/ o producto lógico (·) y/o negador (-).

Las tres operaciones mencionadas son las operaciones básicas del álgebra de Boole, que darán lugar a las funciones básicas "OR", "AND" y "NEGACIÓN".

El valor de la expresión algebraica depende de los valores lógicos asignados a las variables que la constituyen, y de la realización de las operaciones indicadas.

Por ejemplo, una suma lógica sería $Z=A+B$, donde Z tomará el valor cero o uno según los valores de A y B . Z tomará el valor cero sólo cuando tanto A como B tengan el valor cero. Recordemos que:

$$0 + 0 = 0$$

$$1 + 0 = 1$$

$$0 + 1 = 1$$

$$1 + 1 = 1$$

Un producto lógico sería $Z = A \cdot B$, donde Z tomará el valor uno sólo cuando tanto A como B tengan el valor uno. Recordemos que:

$$0 \cdot 0 = 0$$

$$1 \cdot 0 = 0$$

$$0 \cdot 1 = 0$$

$$1 \cdot 1 = 1$$

Una negación invierte el valor de las variables. Se representa con la variable (en este caso "A") negada. Así:

$$0 = 1$$

$$1 = 0$$

3.6 Simplificación de funciones lógicas.

La eficiencia de un circuito combinatorio depende del número y organización de las compuertas lógicas que lo comprenden. El diseño de un circuito lógico combinatorio comienza con su especificación mediante una tabla de verdad. A partir de la tabla se pueden utilizar las expansiones de suma-producto para diseñar un conjunto de compuertas lógicas que implementen el circuito. Sin embargo, la expansión de suma-producto puede contener más términos de los realmente necesarios. Los términos que difieren en una sola variable, de tal manera que en un término ocurre la variable y en otro término ocurre su complemento, se pueden combinar. A modo de ejemplo se considera una expansión de suma-producto con las características mencionadas anteriormente, junto con la forma de combinar los términos:

$$\bar{x}.y.z + x.y.z = (\bar{x} + x).(y.z) = 1.(y.z) = y.z$$

La expansión inicial utiliza tres compuertas lógicas y un inversor, mientras que la expansión final utiliza sólo una compuerta. Para reducir el número de términos en una expresión booleana, se pueden utilizar las identidades definidas en la table B1 para encontrar los términos que se puedan combinar. Sin embargo, esta tarea puede complicarse a medida que aumenta el número de variables.

Identidad	Nombre
$\bar{\bar{x}} = x$	Doble complemento
$x + x = x$ $x . x = x$	Idempotencia
$x + 0 = x$ $x . 1 = x$	Identidad
$x + 1 = 1$ $x . 0 = 0$	Dominancia
$x + y = y + x$ $x . y = y . x$	Conmutatividad
$x + (y + z) = (x + y) + z$ $x . (y . z) = (x . y) . z$	Asociatividad
$x + y . z = (x + y) . (x + z)$ $x . (y + z) = x . y + x . z$	Distributividad
$\overline{(x.y)} = \bar{x} + \bar{y}$ $\overline{(x + y)} = \bar{x} . \bar{y}$	DeMorgan

Tabla B.1

3.7 Realización de funciones lógicas.

El álgebra booleana se utiliza para modelar los circuitos electrónicos. Un dispositivo electrónico está constituido por un número de circuitos. Cada circuito puede diseñarse aplicando las reglas del álgebra de Boole. Los elementos básicos de los circuitos se denominan compuertas. Cada tipo de

compuerta representa una operación booleana. En la figura B.1 se muestran los diversos tipos de compuertas. Cada una corresponde a una operación determinada.

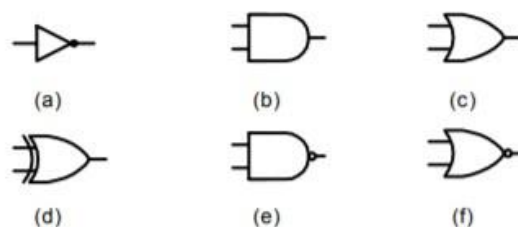


Figura B.1

La compuerta que se observa en la figura B.1 (a) se denomina inversor y representa la operación booleana de negación o NOT, y produce el complemento del valor dado como entrada. En la figura B.1 (b) se presenta la compuerta que representa el producto o AND y en la figura B.1 (c), la compuerta que representa la suma booleana u OR. Las tres últimas compuertas representan las operaciones XOR u OR exclusivo, NAND y NOR. La operación XOR a diferencia del OR, retorna 1 únicamente cuando los valores de entrada son distintos. El funcionamiento de las operaciones NAND (figura B.1 (e)) y NOR (figura B.1 (f)) se explicó en la sección anterior. Las compuertas anteriores, se pueden utilizar para desarrollar circuitos lógicos combinatorios.

3.8 Representación digital de la información.

En los sistemas digitales, no resulta viable dar una representación válida para codificar todos los números; por otra parte, los diversos sistemas empleados dan diferentes tratamientos a números tan usuales como el uno (según se considere como real o como entero). Estudiaremos diversos convenios para diferentes conjuntos de números, así como sus limitaciones. En este apartado, supondremos que disponemos de un espacio de N bits, con lo que es posible representar 2^N enteros distintos.

3.9 Expresiones booleanas

El álgebra booleana trabaja con señales binarias. Al mismo tiempo una gran cantidad de sistemas de control, también conocidos como digitales, usan señales binarias y éstas son un falso o un verdadero que proviene de sensores que mandan la información al circuito de control, mismo que lleva a cabo la evaluación para obtener un valor que indicará si se lleva a cabo o no una determinada actividad, como encender un foco, arrancar un equipo de ventilación en un cine o ejecutar una operación matemática en una computadora.

Los sensores pueden ser “ópticos”, como los que se usan en tiendas departamentales (de proximidad); “magnéticos”, como los que permiten detectar armas en aeropuertos; de “temperatura”, como los que utiliza un sistema de calefacción, los refrigeradores o bien el mismo termostato que controla el sistema de enfriamiento del motor de un vehículo; de “nivel”, ya que un flotador como el que tiene un tinaco o una cisterna para controlar la cantidad de agua, es un sensor que puede mandar información a un circuito de control.

En cada uno de estos grupos de sensores existen tipos, tamaños y modelos, de acuerdo con el uso y funcionamiento, de forma que existen infrarrojos, láser, fotoeléctricos y de ultrasonido, entre otros. Para resolver un problema práctico en el cual se desea automatizar un proceso, es necesario realizar un análisis detallado de lo que se quiere lograr así como de los tipos de sensores necesarios para obtener las señales. Una vez que se conoce esto se plantea el funcionamiento del circuito lógico en una expresión matemática, la cual recibe el nombre de función booleana, y cada una de las variables de que está integrada esta función representa un sensor que provee al circuito de una señal de entrada.

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

La función booleana que equivale a la tabla de verdad anterior es: $F = A'B'C'D + A'B'CD + AB'C'D + AB'CD + AB'CD'$ Esto implica que el refresco será extraído de la banda de transportación en cualquiera de los siguientes casos, ya que para cualquiera de ellos se tiene que

$F = 1$: $A = 0, B = 0, C = 0, D = 1$ $A = 0, B = 0, C = 1, D = 1$ $A = 1, B = 0, C = 0, D = 1$ $A = 1, B = 0, C = 1, D = 1$ $A = 1, B = 0, C = 1, D = 0$

La función booleana indica solamente los casos en donde el refresco será extraído, pero existen varios casos más en donde se dejará pasar porque cumple con los requisitos mínimos de calidad.

Se puede decir que en general una expresión booleana es un sistema de símbolos que incluyen 0, 1, algunas variables y las operaciones lógicas.

3.10 Propiedades de las expresiones booleanas

Las expresiones booleanas poseen las siguientes propiedades:

- Están compuestas de literales (A, B, C, ...) y cada una de ellas representa la señal de un sensor. Un ejemplo es $F = A'BD + AB'CD$.
- El valor de las señales o de la función sólo puede ser 0 o 1, falso o verdadero.

c) Además de literales, en la expresión booleana se puede tener el valor de 0 o 1. Por ejemplo: $F = A'BDI + AB'CD + 0$.

d) Las literales de las expresiones booleanas pueden estar conectadas por medio de los operadores lógicos And (\wedge), Or (\vee) y Not ($'$). El operador And es una multiplicación lógica que se indica por medio de un paréntesis, un punto o simplemente poniendo juntas las variables que se multiplican, por ejemplo el producto de A y B se expresa como $(A)(B) = A \cdot B = AB$; el Or es una suma lógica que se indica con el signo +; y el operador Not es el complemento o negación de una señal que se indica por un apóstrofo ($'$). En la siguiente expresión se muestra la forma en que se representan los operadores: $F = A'BDI + AB'CD + 0 = A' \wedge B \wedge D \wedge I \vee A \wedge B' \wedge C \wedge D \vee 0$ e) Es posible obtener el valor de una expresión booleana sustituyendo en cada una de las literales el valor de 0 o 1, teniendo en cuenta el comportamiento de los operadores lógicos. En las siguientes tablas se muestra la manera en la que se aplica esta propiedad:

A	B	$A \wedge B = AB$
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

A	B	$(A \vee B) = A + B$
1	1	1
1	0	1
0	1	1
0	0	0

A	A'
1	0
0	1

Hay que tener presente que en álgebra booleana:

$$\begin{aligned}
 1 + 1 &= 1 \\
 1 + 1 + 1 &= 1 \\
 0 + 1 &= 1 \\
 0 + 0 &= 0
 \end{aligned}$$

Además de las operaciones básicas, también es posible aplicar la ley de De Morgan de forma semejante a como se aplica en teoría de conjuntos. El siguiente ejemplo muestra la aplicación de esta propiedad:

$$(ABCD)' = A' + B' + C' + D' \quad (A + B + C + D)' = A' B' C' D'$$

3.11 Optimización de expresiones booleanas

Cuando se plantea un problema, en general la expresión booleana obtenida no necesariamente es la óptima, esto es, la más fácil, clara y sencilla de implementar utilizando compuertas lógicas. La expresión que resulta del planteamiento del problema puede ser simplificada empleando para ello teoremas y postulados del álgebra booleana o bien mapas de Karnaugh.

Los teoremas que se van a utilizar se derivan de los postulados del álgebra booleana, y permiten simplificar las expresiones lógicas o transformarlas en otras que son equivalentes. Una expresión simplificada se puede implementar con menos equipo y su circuito es más claro que el que corresponde a la expresión no simplificada. A continuación se presenta una lista de teoremas, cada uno con su “dual”.

Número	Teorema	Dual
1a.	$0A = 0$	$1 + A = 1$
2a.	$1A = A$	$0 + A = A$
3a.	$AA = A$	$A + A = A$
4a.	$AA' = 0$	$A + A' = 1$
5a.	$AB = BA$	$A + B = B + A$
6a.	$ABC = A(BC)$	$A + B + C = A + (B + C)$
7a.	$(AB...Z)' = A' + B' + ... + Z'$	$(A + B + ... + Z)' = A'B'...Z'$
8a.	$AB + AC = A(B + C)$	$(A + B)(A + C) = A + BC$
9a.	$AB + AB' = A$	$(A + B)(A + B') = A$
10a.	$A + AB = A$	$A(A + B) = A$
11a.	$A + A'B = A + B$	$A(A' + B) = AB$
12a.	$CA + CA'B = CA + CB$	$(C + A)(C + A' + B) = (C + A)(C + B)$
13a.	$AB + A'C + BC = AB + A'C$	$(A + B)(A' + C)(B + C) = (A + B)(A' + C)$

En esta tabla A representa no sólo una variable, sino también un término o factor, o bien una expresión. Para obtener el “dual” de un teorema se convierte cada 0 (cero) en 1 (uno) y cada 1 (uno) en 0 (cero), los signos más (+) se convierten en paréntesis, puntos o simplemente no se ponen, y los puntos en signos más (+). Además de esto, las variables no se complementan ya que al hacerlo se obtendría el complemento en lugar del dual. Por otro lado, los teoremas 1 a 4 se aplican en cualquier caso y los teoremas 5 a 9 son propiedades que tiene el álgebra booleana, semejantes a las reglas de conjuntos correspondientes a las propiedades conmutativa, asociativa y de De Morgan. Por lo general los teoremas 11 a 13 se aplican en combinación, dependiendo de la expresión booleana. La aplicación de los teoremas es muy sencilla: simplemente se comparan partes de la expresión con los teoremas que permitan hacer más simple la expresión, y esto se realiza hasta que ya no sea posible simplificar

los teoremas de la tabla 5.1 se aplican de la siguiente manera:

$F = A'B + (ABC)' + C(B' + A)$	
$F = A'B + A' + B' + C' + C(B' + A)$	Después de aplicar 7a.
$F = A'B + A' + B' + C' + CB' + CA$	Por 8a a la inversa
$F = A'B + A' + B' + CB' + C' + CA$	Por 5a.
$F = A'(B + 1) + B'(1 + C) + C' + CA$	Por 8a.
$F = A'1 + B'1 + C' + CA$	Por 1b.
$F = A' + B' + C' + CA$	Por 2a.
$F = A' + B' + C' + A$	Por 11a.
$F = (A + A') + B' + C'$	Por 5a.
$F = (1 + B') + C'$	Por 4b.
$F = 1 + C'$	Por 1b.
$F = 1$	Por 1b.

La expresión booleana en su forma más simple es $F = 1$, y este resultado indica que si se sustituyen las diferentes combinaciones con los valores binarios 0 o 1 de las variables A, B y C en la expresión inicial, entonces el resultado será siempre igual a 1 (lo que se conoce en lógica matemática como tautología).

$$F = Z'X + XY'Z + X'Z'W$$

es la siguiente:

$$F = Z'X + XY'Z + X'Z'W$$

$$F = Z'(X + X'W) + XY'Z$$

Por 8a

$$F = Z'(X + W) + XY'Z$$

Por 11a

$$F = Z'X + Z'W + XY'Z$$

Por 8a, a la inversa

$$F = X(ZY' + Z') + Z'W$$

Por 8a

$$F = X(Z' + Y') + Z'W$$

Por 11a

$$F = XZ' + XY' + Z'W$$

Por 8a, a la inversa

En los ejemplos anteriores se utilizó un teorema a la vez, y esto se hizo para que no haya confusión en la aplicación de los mismos. Obviamente que cuando ya se tiene suficiente práctica, se pueden aplicar varios teoremas a la vez. Tampoco es necesario indicar qué teorema se usa, sin embargo aquí se hace para ilustrar la simplificación. Comprensiblemente las expresiones booleanas a simplificar son el resultado del planteamiento de un problema que se busca resolver, tal y como se ilustró al inicio del capítulo con la función booleana $F = A'B'C'D + A'B'CD + AB'C'D + AB'CD + AB'CD'$

Comúnmente este tipo de expresiones booleanas son factibles de ser simplificadas, como se muestra a continuación:

$$F = A'B'C'D + A'B'CD + AB'C'D + AB'CD + AB'CD'$$

$$F = A'B'D(C' + C) + AB'D(C' + C) + AB'CD'$$

$$F = A'B'D + AB'D + AB'CD'$$

$$F = B'D(A' + A) + AB'CD'$$

$$F = B'D + AB'CD'$$

$$F = B'(D + D'AC)$$

$$F = B'(D + AC)$$

$$F = B'D + AB'C$$

Es conveniente mencionar que con las funciones booleanas se pueden elaborar circuitos equivalentes tanto con la función booleana simplificada como con la que se obtuvo inicialmente, sin embargo el circuito lógico de la función booleana sin simplificar será más grande, complejo y usará más equipo electrónico en su implementación.

3.12 Simplificación de expresiones booleanas usando mapas de Karnaugh

El método del mapa de Karnaugh es un procedimiento simple y directo para minimizar las expresiones booleanas, y fue propuesto por Edward W. Veitch y modificado ligeramente por Maurice Karnaugh. El mapa representa un diagrama visual de todas las formas posibles en que se puede plantear una expresión booleana en forma normalizada. Al reconocer varios patrones se pueden obtener expresiones algebraicas alternas para la misma expresión, y de éstas se puede escoger la más simple, la cual en general es la que tiene el menor número de variables además de que esta expresión posiblemente no sea única.

Las tablas o mapas se dividen en cierto número de casillas, dependiendo de la cantidad de variables que intervengan en la expresión. El número de casillas se puede calcular con la fórmula número de casillas = 2^n en donde n es el número de variables. Así a una expresión de 2 variables le corresponderá un mapa de 4 casillas, a una de 3 variables un mapa de 8 casillas y así sucesivamente.

Un minitérmino es aquel que forma parte de la expresión y que se puede escribir de la manera más simple formando lo que se conoce en álgebra elemental como un monomio. Por ejemplo, la expresión $F = X'Y + XY$ consta de dos minitérminos, $X'Y$ y XY , y como se muestra a continuación en las casillas respectivas de la tabla correspondiente se pone un 1 si el minitérmino se encuentra en la expresión o un 0 si no está:

	Y	
X	0	1
0	0	1
1	0	1

Para simplificar la expresión, en la tabla se agrupan los 1 de casillas adyacentes en bloques cuadrados o rectangulares de 2, 4, 8, 16, ..., 2^n y se descartan las variables cuyo valor, 1 o 0, cambia de una casilla a otra. La regla es agrupar la información con el menor número posible de bloques ya que de cada uno de éstos se obtiene cuando menos una literal, y los bloques deben estar conformados por el mayor número de casillas porque entre más grande sea el número de casillas agrupadas por bloque, más simple será la expresión booleana resultante. En el mapa anterior la variable X no conserva su valor ya que en la primera línea vale 0 y en la segunda 1, por lo tanto se elimina. Sin embargo, Y mantiene el valor de 1 en ambas casillas, ya que en este caso el bloque que agrupa la información se encuentra solamente en la columna de la derecha. De esta forma se obtiene que la expresión simplificada del mapa de Karnaugh es $F = Y$. Como se ve, la simplificación anterior consiste en la aplicación de los postulados del álgebra booleana, pero de manera gráfica. Para simplificar una expresión que incluye tres variables se tiene que el mapa consta de 8 casillas. Hay que observar que la secuencia en que se coloca la expresión en la tabla no es la binaria ascendente, sino una de forma que solamente exista un cambio de 0 a 1 o de 1 a 0 a la vez, esto es, una en la que no debe cambiar más que un bit en cada paso. A esta forma de arreglar los bits se le llama código reflejado.

En general se tiene que cuando el número de variables que integran la expresión booleana es impar, el número de filas del mapa es menor que el número de columnas. También es conveniente ordenar las variables alfabéticamente colocando las primeras variables como filas y las restantes como columnas

	YZ			
X	00	01	11	10
0		1	1	
1		1	1	1

En el caso de esta tabla se tiene que la expresión booleana sin simplificar es:

$$F = X'Y'Z + X'YZ + XY'Z + XYZ + XYZ'$$

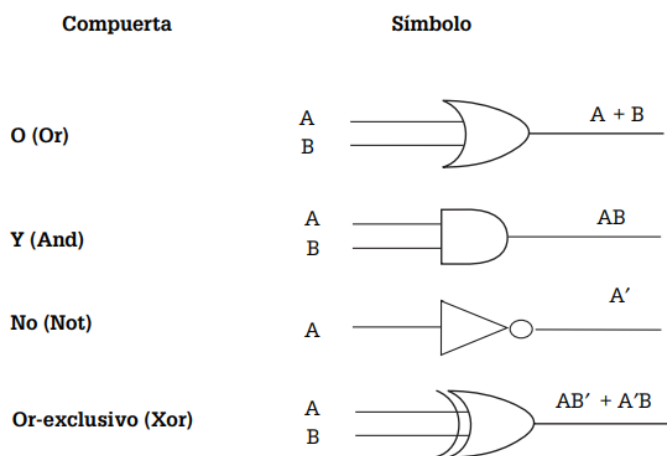
la cual ya simplificada queda como:

$$F = Z + XY$$

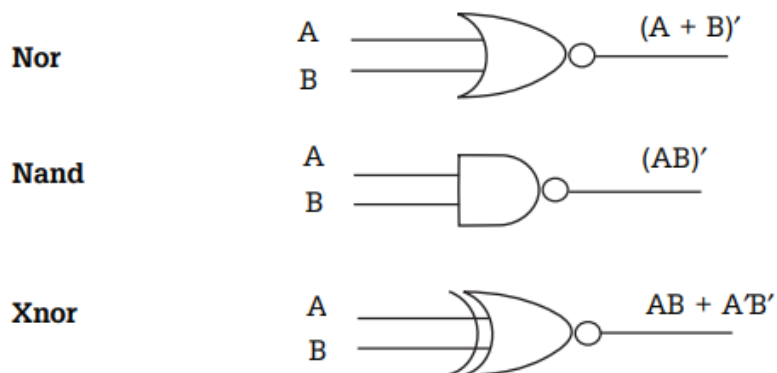
En el ejemplo anterior se formaron dos bloques, y en el mayor se eliminaron las variables X, Y debido a que de una casilla a otra cambian de valor. Además se observa que entre más grande sea el bloque, la expresión resultante es menor. Si en un mapa de Karnaugh se unen los dos extremos, ya sea horizontal o verticalmente, entonces las celdas de las esquinas del mismo quedarán juntas y por lo tanto se considerarán como celdas adyacentes. Esto permite realizar una mejor simplificación

3.13 Compuertas lógicas

Un bloque lógico es una representación simbólica gráfica de una o más variables de entrada a un operador lógico, para obtener una señal determinada o resultado. Los símbolos varían de acuerdo con la rama donde se utilizan, o bien del fabricante. Cada bloque lógico representa un dispositivo que permite manipular la señal según el campo de acción: en mecánica se les llama válvulas (paso del aire o aceite); en electricidad apagadores, contactos (paso de corriente eléctrica); y en electrónica puertas o compuertas (paso de pulsos eléctricos). En este libro sólo se abordarán los símbolos usados en electrónica para la representación de las compuertas, ya que son los que interesan al área de la computación, sin embargo el tratamiento teórico por medio del álgebra booleana es válido para todos ellos independientemente del área.



Las compuertas pueden recibir una o más señales de entrada. En la tabla 5.2, A y B son señales que entran a la compuerta y pueden tener un valor de 1 o 0 dependiendo de si existe o no la señal, la cual procede de un sensor o bien de la salida de una compuerta anterior. Esos valores de entrada generan una sola salida, que a su vez también es 0 o 1 dependiendo de la compuerta de que se trate y de los valores de las señales de entrada. Para representar expresiones booleanas mediante compuertas lógicas es conveniente tener en cuenta las tablas de verdad de las compuertas básicas (operadores lógicos) Or, And y Not vistas en el capítulo de lógica matemática.



$X_{nor} = AB + A'B'$ Generalmente los circuitos digitales se construyen con compuertas Nand y Nor, ya que son más fáciles de encontrar en el mercado, son más comunes desde el punto de vista del hardware y están disponibles en la forma de circuitos integrados. Debido a la preferencia de uso de estas compuertas en el diseño de los circuitos, es importante reconocer la relación que existe entre los circuitos construidos con compuertas And, Or y Not y su diagrama equivalente Nand o Nor. Cuando se simplifica una función el resultado se puede presentar en “sumas de productos” o en “productos de sumas”, y en forma natural la presentación en suma de productos permite una implementación usando compuertas Nand mientras que el producto de sumas se puede representar más fácilmente con compuertas Nor, sin embargo es posible implementar cualquier expresión booleana sólo con compuertas Nand o sólo con compuertas Nor.

3.14 Aplicaciones del álgebra booleana

El álgebra booleana es una extensión de la lógica matemática, ya que utiliza los mismos principios y operadores lógicos (and, or, not, xor, nand, nor) así como los mismos valores, y gracias a esto John Von Neuman pudo crear la computadora de la primera generación.

Los dispositivos con los que se implementan las funciones booleanas se llaman “compuertas”, y al combinarse han permitido inicialmente la creación del “bulbo”, posteriormente la del “transistor” y actualmente la del “chip”, elementos con los cuales se construye todo tipo de aparato electrónico digital. La electrónica digital es una parte de la electrónica que maneja información codificada en dos únicos estados: “falso” y “verdadero”, o más comúnmente 0 y 1. Electrónicamente se asigna a cada uno un voltaje o rango de voltaje determinado.

Esta particularidad permite que, usando el álgebra booleana y con un sistema de numeración binario, se puedan realizar complejas operaciones lógicas o aritméticas sobre señales de entrada. La electrónica digital ha alcanzado una gran importancia debido a que se utiliza en el diseño de sistemas de automatización, robótica, etc., además de que constituye la piedra angular de las computadoras.

Las computadoras llevan a cabo su trabajo por medio de un microprocesador, el cual es un circuito de alta escala de integración (LSI) compuesto por muchos circuitos simples como flip-flops, contadores, decodificadores, comparadores, etc., todos en una misma pastilla de silicio en donde se utilizan compuertas del álgebra booleana para llevar a cabo las operaciones lógicas. Las microoperaciones que lleva a cabo el microprocesador se realizan en lenguaje binario a nivel bit.

Por ejemplo, si $A = 110010$, $B = 011011$ entonces el resultado de llevar a cabo las siguientes operaciones en donde intervienen los operadores lógicos (\wedge , \vee , \oplus , $'$) es:

$$A \wedge B = 110010 \wedge 011011 = 010010$$

$$A \vee B = 110010 \vee 011011 = 111011$$

$$A \oplus B = 110010 \oplus 011011 = 101001$$

$$A' = (110010)' = 001101$$

Basada en el álgebra booleana, la unidad lógica aritmética (ALU: Arithmetic Logic Unit) es la parte del microprocesador que realiza las operaciones aritméticas y lógicas en los datos. Se sabe que toda computadora está integrada por las memorias ROM (Read Only Memory: Memoria de sólo lectura) y RAM (Random Access Memory: Memoria de acceso aleatorio). Cuando arranca una computadora, ésta debe saber qué hacer, lo cual implica que pueda correr un pequeño programa que le indique lo que debe realizar, qué programas debe ejecutar y en qué lugar debe comenzar. Esta información se guarda en un pequeño programa de sólo lectura que recibe el nombre de ROM, el cual está en lenguaje binario y utiliza operadores lógicos del álgebra booleana para la manipulación de la información. La información en este caso se graba eléctricamente y se borra también de la misma manera.

Este tipo de memoria se llama Memoria ROM programable eléctricamente (EEPROM). En las computadoras ésta se encuentra en lo que se llama BIOS, la cual es una memoria donde se guarda información de la “tarjeta madre” de los conectores y dispositivos de la PC. La RAM puede borrarse y grabarse las veces que se desee, la desventaja es que la información grabada en ella sólo se puede utilizar mientras se tenga energía, y se usa como almacenamiento temporal.

Existen dos variantes para la memoria RAM: SRAM y DRAM. La SRAM es conocida como memoria estática y en ella los valores binarios o información que se almacena utilizan compuertas del álgebra booleana, por lo que mientras se tenga energía la información en ella se mantendrá intacta. La DRAM es conocida como memoria dinámica y está hecha con celdas que almacenan los datos como cargas

en condensadores; la presencia o ausencia de carga en el condensador se interpreta como 1 o 0 binarios, manipulados mediante álgebra booleana.

La DRAM es una memoria que requiere refrescarse periódicamente para mantener memorizados los datos, de ahí el nombre de memoria dinámica. Como se puede ver, la computadora está integrada por elementos que utilizan el álgebra booleana para su desarrollo y funcionamiento. Sin embargo, no es para lo único que se utiliza el álgebra booleana, ya que otra de sus aplicaciones que actualmente está teniendo mucho éxito es la relacionada con la construcción de robots. Un robot está integrado por elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos, y el área de conocimiento en este caso es la “mecatrónica”.

El motor eléctrico es un dispositivo que convierte la energía eléctrica en energía mecánica rotacional, que se utiliza para darle movimiento a los medios de locomoción del robot como son ruedas, brazos y tenazas. El motor puede ser de corriente continua o motor de pasos. Los medios de locomoción permiten al robot desplazarse de un lugar a otro por medio de ruedas, barras u orugas. Algunos robots deben sostener o manejar objetos y para ello se utilizan tenazas. Algunas veces el movimiento no se proporciona directamente a los medios de locomoción, sino que es necesaria una interfase de transmisión para aumentar la fuerza, reducir la intensidad de giro o cambiar la naturaleza del movimiento (de circular a lineal) por medio de pistones, engranes, levas o poleas.

El funcionamiento de los distintos elementos del robot depende de la señal que se mande de los distintos sensores. Los sensores permiten al robot manejarse con cierta inteligencia al interactuar con el medio, ya que detectan situaciones en las cuales el robot debe llevar a cabo la actividad programada. Entre los diferentes sensores que se utilizan con frecuencia en robots están los sensores ópticos, magnéticos, de ultrasonido, presión, temperatura, nivel e incluso cámaras de video.

Para que el robot lleve a cabo todas las actividades, es necesario el circuito de control (cerebro del robot) que le permita decidir qué hacer cuando se presente una determinada situación. Por ejemplo, qué debe hacer el robot si a su paso se interpone una barrera (girar 90° a la izquierda y avanzar, girar 180° y avanzar, detenerse, etc.). ¿Qué hacer si detecta temperaturas altas (emitir un sonido, parar)? ¿Qué hacer si encuentra un objeto de cierto color (tomarlo y transportarlo)? En fin, todas esas actividades que puede llevar a cabo el robot y para lo cual fue creado, deben estar programadas en el circuito de control y nuevamente el álgebra booleana es la base para el diseño de dicho circuito, el cual se representa inicialmente por medio de una expresión booleana que se simplifica por medio de teoremas del álgebra booleana o mapas de Karnaugh y se implementa usando las compuertas lógicas.

3.15 Álgebra en la electrónica

El álgebra es un área de las matemáticas que ocupa un lugar privilegiado, sobre todo por la aplicación de la misma a la computación. Por medio del álgebra booleana es posible diseñar hardware que es la parte fundamental de las computadoras, los robots y todos los sistemas de funcionamiento automático. Los robots, computadoras o cualquier sistema de funcionamiento automático requieren del uso de elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos para llevar a cabo alguna actividad. La forma ordenada en que deben trabajar dichos elementos se controla por medio de un circuito implementado a base de compuertas lógicas. Cuando se desea que un sistema trabaje de manera automática, primero se representa el funcionamiento de dicho sistema por medio de una expresión booleana. Esta expresión booleana está integrada por variables y cada una de éstas representa la señal de un sensor, la cual puede ser falso o verdadero. Por lo general la expresión booleana resultante del planteamiento de un problema no es la más simple, sino que tiene variables redundantes que pueden ser eliminadas por medio de: a) Teoremas del álgebra booleana. b) Mapas de Karnaugh. El método para simplificar expresiones booleanas usando teoremas del álgebra booleana consiste en usar éstos para eliminar las variables redundantes hasta obtener una expresión simplificada que realice lo mismo que la expresión inicial que tenía las variables redundantes, pero que al ser más simple el circuito de control es por lo tanto más rápido, económico y eficaz.

El método para simplificar expresiones booleanas mediante mapas de Karnaugh consiste en representar la expresión booleana con n variables diferentes en una tabla de forma cuadrada o rectangular que tiene 2^n celdas y que recibe el nombre de mapa de Karnaugh. La expresión booleana simplificada es el resultado de agrupar la información de celdas adyacentes en bloques rectangulares o cuadrados de 1, 2, 4, 8, ..., 2^n , y después leer la expresión conservando las variables que no cambian de valor de un renglón con respecto a otro o de una columna con relación a otra en cada uno de los bloques en que fue agrupada la información y eliminando las variables que sí sufren un cambio de valor de un renglón con respecto a otro o de una columna con relación a otra. Por último, esta función booleana simplificada, ya sea por teoremas o mapas de Karnaugh, se representa por medio de símbolos gráficos (bloques lógicos) de cada uno de los operadores lógicos and, or, not, xor, nand, nor y xnor, considerando que las compuertas más comunes son las nand y las nor, mismas que al combinarse permiten suplir las demás compuertas.

Unidad IV CIRCUITOS Y SUBSISTEMAS COMBINACIONALES.

4.1 Subsistema combinacional

Subsistema: todo circuito integrado cuya complejidad supere al de una simple puerta lógica se considera como subsistema. • Un subsistema puede verse como una caja negra con múltiples entradas y salidas: • Las líneas de entrada y salida pueden clasificarse en: • de datos: llevan la información original o procesada por el subsistema • de control: indican al subsistema qué operación realizar o permiten al subsistema indicar al usuario el estado resultante de la operación • La característica fundamental de un subsistema es su capacidad de reutilización.

Los subsistemas pueden clasificarse del siguiente modo: • Subsistemas de propósito general: son aquellos que permiten implementar cualquier función lógica • Subsistemas de propósito específico: son aquellos que no pueden, por sí solos, implementar cualquier función lógica

De propósito específico:

- Decodificadores
- Codificadores
- Convertidores de código
- Comparadores de magnitud
- Demultiplexores

De propósito general:

- Multiplexores
- ROMs
- PLDs (PALs y PLAs)

4.2 Multiplexores y Demultiplexores

Un Multiplexor es un circuito combinacional al que entran varios canales de datos, y sólo uno de ellos, el que hallamos seleccionado, es el que aparece por la salida. Es decir, que es un circuito que nos permite SELECCIONAR que datos pasan a través de dicho componente. Vamos a ver un ejemplo NO electrónico. Imaginemos que hay dos tuberías (canales de datos) por el que circulan distintos fluidos (datos). Una transporta agua para regar y la otra agua potable. Estas tuberías llegan a una granja, en la cual hay una única manguera por la que va a salir el agua (bien potable o bien para regar), según lo que seleccione el granjero posicionando la llave de paso en una u otra posición. En la figura 5.1 se muestra un esquema. Las posiciones son la 0 para el agua potable y 1 para el agua de regar.

Moviendo la llave de paso, el granjero puede seleccionar si lo que quiere que salga por la manguera es agua potable, para dar de beber al ganado, o agua para regar los cultivos. Según cómo se posicione esta llave de paso, en la posición 0 ó en la 1, seleccionamos una tubería u otra.

Pero ¿por qué sólo dos tuberías? Porque es un ejemplo. A la granja podrían llegar 4 tuberías. En este caso el granjero tendría una llave de paso con 4 posiciones, como se muestra en la figura 5.2. Esta llave se podría poner en 4 posiciones distintas para dar paso a la tubería 0, 1,

2 ó 3. Obsérvese que sólo pasa una de las tuberías en cada momento, ¡y sólo una!. Hasta que el granjero no vuelva a cambiar la llave de paso no se seleccionará otra tubería.

Con este ejemplo es muy fácil entender la idea de multiplexor. Es como una llave de paso, que sólo conecta uno de los canales de datos de entrada con el canal de datos de salida.

Ahora en vez de en tuberías, podemos pensar en canales de datos, y tener un esquema como el que se muestra en la figura 5.3, en la que hay 4 canales de datos, y sólo uno de ellos es seleccionado por el multiplexor para llegar a la salida. En general, en un multiplexor tenemos dos tipos de entradas:

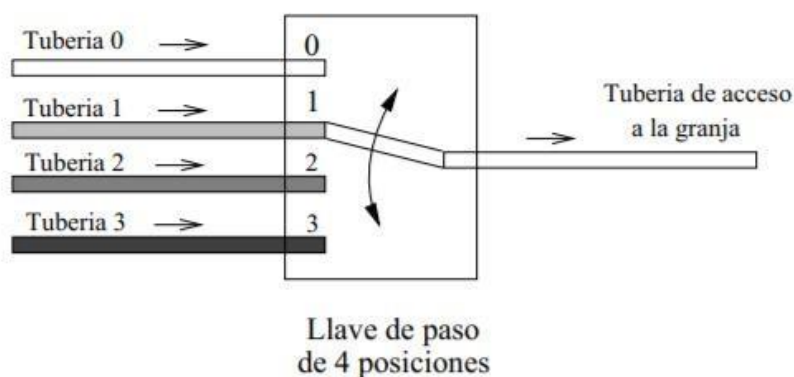


Figura 5.2: Sistema de agua de 4 tuberías

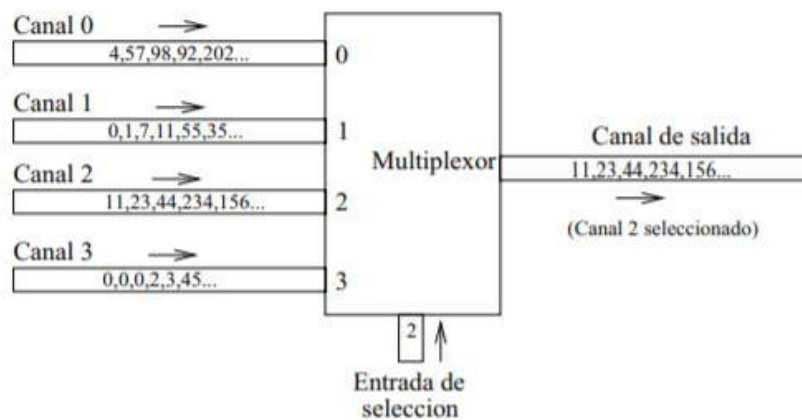


Figura 5.3: Un multiplexor que selecciona entre 4 canales de datos

4.3 Demultiplexor

El concepto de demultiplexor es similar al de multiplexor, viendo las entradas de datos como salidas y la salida como entradas. En un multiplexor hay varias entradas de datos, y sólo una de ellas se saca por el canal de salida. En los demultiplexores hay un único canal de entrada que se saca por una de las múltiples salidas (¡¡¡y sólo por una!!!).

Si utilizamos el símil de la granja y las tuberías, podemos imaginar el siguiente escenario. Supongamos que ahora a la granja le llega una única tubería con agua, pero en el interior de la granja hay varias mangueras, cada una para limpiar una zona del establo o dar de beber a los animales de esa zona. Como sólo hay un granjero, sólo podrá usar una de las mangueras cada vez (¡¡el granjero no podrá usar a la vez dos mangueras, porque están en sitios diferentes!!).

Para seleccionar qué manguera quiere usar en cada momento, hay una llave de paso, de manera que, si la sitúa en una posición, el agua que viene por la entrada saldrá por la manguera 0, mientras que si la sitúa en la otra posición, el agua saldrá por la manguera 1 (ver figura 5.5)

De la misma manera que en los multiplexores puede haber varias entradas, en los demultiplexores puede haber varias salidas. Por ejemplo, en la figura 5.6 se muestra el mismo sistema de tuberías de la granja, pero ahora hay 4 mangueras, para llegar a 4 zonas distintas de la granja. Ahora el granjero tendrá que posicionar la llave de paso en una de las 4 posiciones posibles, para que el agua salga por la manguera seleccionada.

Ya comprendemos cómo funcionan los demultiplexores. Si lo aplicamos al mundo de la electrónica, en vez de tuberías tendremos canales de datos. Habrá un único canal de entrada, por el que llegarán números, que saldrán sólo por uno de los canales de salida, el

que tengamos seleccionado, como se muestra en la figura 5.7. En general en un demultiplexor tendremos:

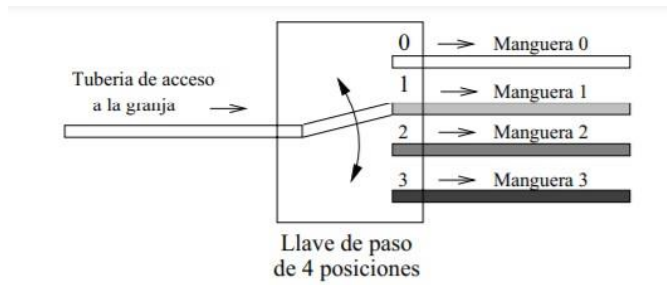


Figura 5.6: Sistema de agua de 4 mangueras

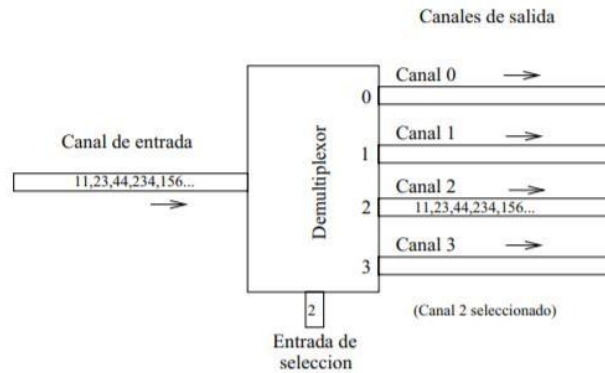


Figura 5.7: Un demultiplexor que selecciona entre 4 canales de datos

4.4 Codificadores

Los sistemas digitales contienen datos o información que está en alguna forma de código binario, los cuales se operan de alguna manera. En este capítulo se examinan circuitos combinatorios cuyas aplicaciones incluyen:

1. Cambio de datos de una forma a otra.
2. Tomar datos y enrutarlos a uno de varios destinos.

3. Decodificación de datos para despliegues visuales.

Muchos de los circuitos lógicos que cumplen estas funciones están ahora como circuitos integrados en la categoría de Mediana Escala de Integración (MSI - Medium Scale Integration).

Por esta razón, no nos concentraremos en el diseño de estos circuitos, sino que investigaremos cómo se usan solos o en combinación, para cumplir varias operaciones sobre datos digitales. Algunas de las operaciones que se discuten son decodificación, codificación, conversión de códigos, multiplexado y demultiplexado.

Los codificadores son circuitos integrados digitales que se utilizan para la codificación. Por codificación, nos referimos a generar un código binario digital para cada entrada. Un codificador generalmente consta de un pin de habilitación que generalmente se establece en alto para indicar el funcionamiento. Consiste en 2^n líneas de entrada y n líneas de salida y cada línea de entrada está representada por un código de ceros y unos que se reflejan en las líneas de salida.

En la comunicación de RF, el codificador también se puede utilizar para convertir datos en paralelo en datos en serie.

Dos Codificadores Populares H12E

Un ejemplo popular de codificador es el codificador Holtek H12E que se utiliza para la conversión de paralelo a serie.

Es un tipo de Circuito Integrado CMOS con 8 pines de dirección y 12 pines de datos. Es un CI de 18 pines. Se utiliza en la comunicación de RF donde convierte los datos paralelos de 12 bits a forma serial. Consiste en un pin de habilitación que es un pin bajo activo y cuando se establece bajo, la transmisión está habilitada. El codificador H12E envía 4 palabras a la vez. En otras palabras, hasta que el pin! TE se establece bajo, el codificador transmite varios ciclos de cada 4 palabras y detiene la transmisión una vez que el pin! TE se establece en alto.

Características de H12E

Funciona con una tensión de alimentación de 2.4 a 12 V.

Está emparejado con la serie H12 de decodificadores

Consta de osciladores incorporados

Se basa en la tecnología CMOS de alta inmunidad al ruido.

Se utiliza para operaciones por control remoto.

HC148

Otro ejemplo popular de codificador CI utilizado como codificador de prioridad es el HC148, que es un codificador de prioridad de 8 a 3 líneas. Por codificador de prioridad nos referimos a codificadores donde se le da una cierta prioridad a cada entrada y en función del nivel de prioridad que se genera el código de salida. También tiene un pin de habilitación que es un pin activo bajo y cuando se establece bajo, habilita la operación del codificador. Funciona dentro del rango de voltaje de funcionamiento de 2 V a 6 V.

4.5 Sumadores

El sumador binario es la célula fundamental de todos los circuitos aritméticos, ya que mediante sumas (y complementos) es posible realizar restas, multiplicaciones y divisiones, en otras palabras, las cuatro operaciones aritméticas fundamentales se pueden realizar usando sumas. Medio sumador y sumador completo Un medio sumador es un sumador capaz de sumar dos datos de un sólo bit y producir un bit de acarreo de salida. La manera como realiza la suma y produce el acarreo el medio sumador se desglosa en la siguiente tabla de verdad.

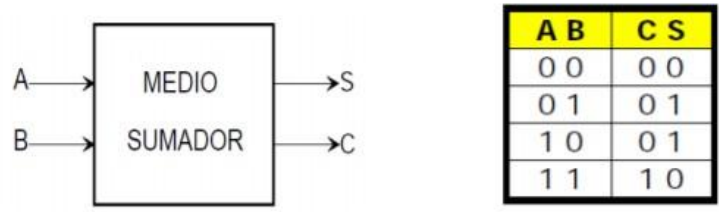


Fig. 1 Diagrama a bloque y tabla de verdad de un medio sumador

Al realizar la minimización de la tabla de verdad se obtiene una compuerta que se llama OR exclusiva, o XOR. El circuito minimizado se puede ver en la siguiente figura:

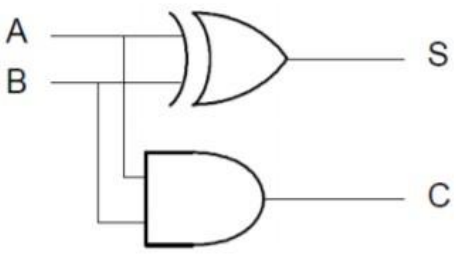


Fig. 2 Circuito del medio sumador

Sin embargo, el medio sumador no puede ser interconectado con otros medios sumadores para formar un sumador más grande, por ello es necesario diseñar un sumador que admita otra entrada aparte de los datos a sumar, es decir, un sumador de 3 datos de 1 bit, éste es denominado sumador completo. En las siguientes figuras se puede ver el diagrama, la tabla de verdad y el circuito equivalente (después de la minimización) de un sumador completo.

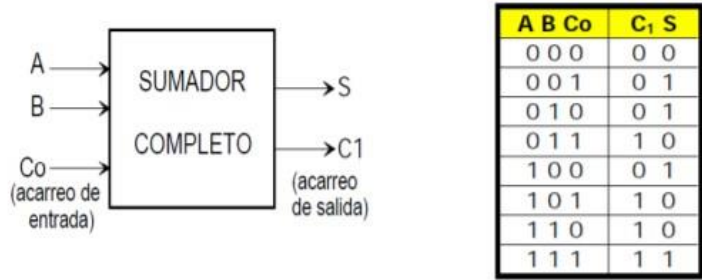


Fig. 3 Diagrama a bloque y tabla de verdad de un sumador completo

4.6 Restadores

La resta o sustracción binaria es otra de las operaciones aritméticas comúnmente realizadas en las computadoras digitales, la cual se basa en las siguientes reglas:

TABLA FUNCIONAL

MINUENDO A	SUBTRAENDO B	RESTA R	PRÉSTAMO P ₀
0	0	0	0
0	1	1	1
1	0	1	0
1	1	0	0

Analizando la tabla funcional de la resta, se observa que la operación resta al igual que la suma, se realiza por medio de la O exclusiva. Si no se considera el préstamo de entrada, entonces se tendrá el semirestador (S-R):

$$R(A,B) = A \oplus B \dots\dots\dots (20)$$

$$P_0 = \bar{A}B \dots\dots\dots (21)$$

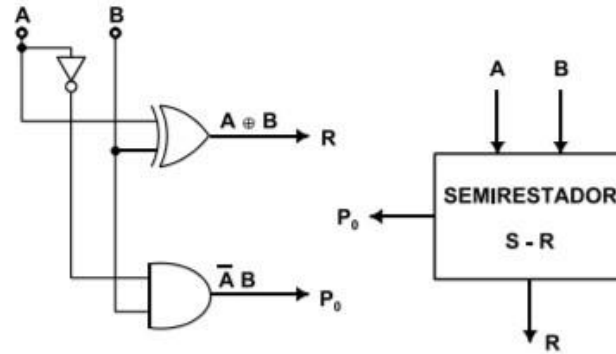


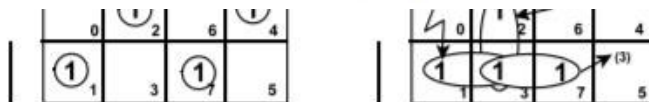
FIGURA 14. LOGIGRAMA DEL SEMIRESTADOR Y SU DIAGRAMA A BLOQUES

La tabla funcional para el restador completo (R. C) es aquella que considera como una tercera entrada al préstamo de entrada:

TABLA FUNCIONAL

DEC	MINUENDO A	SUBTRAENDO B	PRÉSTAMO DE ENTRADA P_e	RESTA R	PRÉSTAMO DE SALIDA P_o
0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	1
2	0	1	0	1	1
3	0	1	1	0	1
4	1	0	0	1	0
5	1	0	1	0	0
6	1	1	0	0	0
7	1	1	1	1	1

Las funciones de conmutación de la **resta** y del **préstamo** de salida son:



$$R(A,B,P_i) = \sum_m(1,2,4,8) \dots\dots\dots (22)$$

$$P_0(A,B,P_i) = \sum_m(1,2,3,7) \dots\dots\dots (23)$$

Reduciendo por mapa de karnaugh: Las funciones reducidas son:

$$R(A,B,P_i) = A \oplus B \oplus P_i \dots\dots\dots (24)$$

$$P_0(A,B,P_i) = \bar{A}B + \bar{A}P_i + BP_i \dots\dots\dots (25)$$

El logigrama de 24 y 25 es:

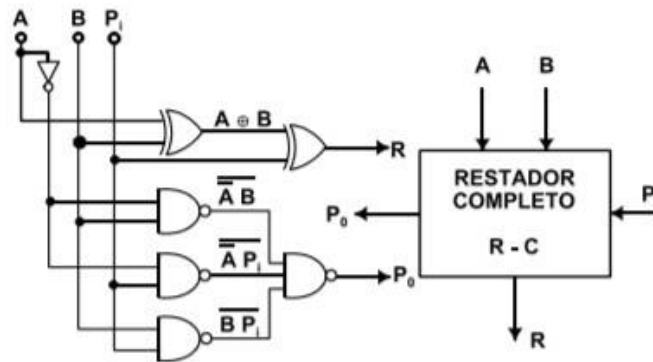


FIGURA 14. LOGIGRAMA DEL RESTADOR COMPLETO Y SU DIAGRAMA A BLOQUES

4.7 Generadores / comprobadores de paridad

En las transferencias de datos digitales (dentro de un sistema digital o en la transmisión de códigos de un sistema a otro), se pueden producir errores. Estos errores se manifiestan a través de cambios indeseados en alguno de los bits que conforman el paquete de información. La probabilidad de que ocurra un error en una transmisión de este tipo es muy pequeña y de que ocurran dos todavía menor. Para la detección de estos errores se utiliza un bit de paridad.

Es un bit que se añade a la izquierda del grupo de bits que forman el paquete de información

a transmitir. El objetivo es conseguir que en todos los paquetes a transmitir, la cantidad de 1s sea par o impar según se establezca con anterioridad.

Acuerdo Paquete de información	Paridad par	Paridad impar
ASCII A = 1000001	01000001	11000001
ASCII T = 1010100	11010100	01010100

Si un sistema trabaja con paridad par, todos los paquetes que recibe el sistema receptor deberán contener un número par de unos. Si no fuese así, en la transmisión habría ocurrido un error.

Puede concluirse que, mediante este sistema, solo se detecta si hay un número impar de errores por paquete de información, es decir, si en la transmisión hubiera 2 errores, el receptor no detectaría dicho error.

Así pues, es necesario diseñar un sistema que genere el bit de paridad a añadir al paquete de información y otro sistema que compruebe la paridad en el receptor.

A este tipo de circuitos se les denomina Generador de paridad y Comprobador de paridad, respectivamente. Generador de paridad Supongamos que se desea transmitir un paquete de información compuesto por dos bits (A_1A_0) y que el acuerdo preestablecido es la utilización de paridad par. En ese caso, la tabla de verdad y el circuito correspondiente son los mostrados en la Figura 125.

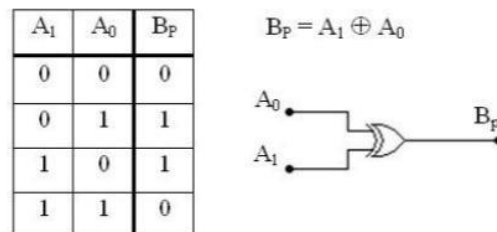


Figura 125

Siguiendo el mismo razonamiento, si el paquete de información a enviar debe contener tres bits (A₂

A₁ A₀), la tabla de verdad para el diseño del circuito sería la desarrollada en la figura 126

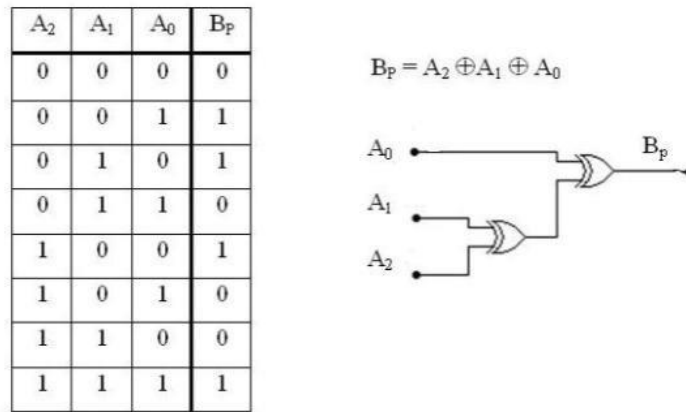
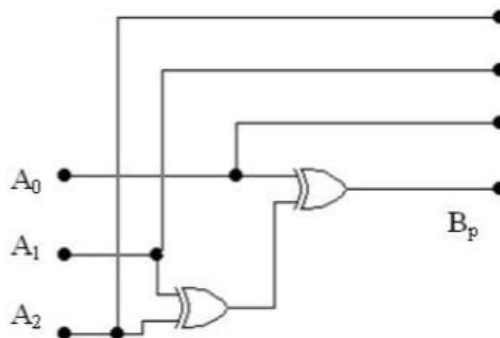


Figura 126

Transmisión

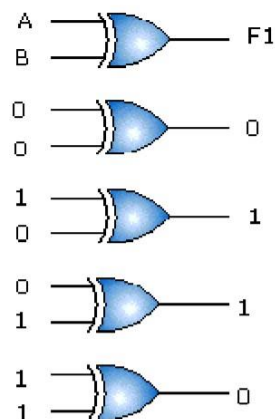
Una vez generado el bit de paridad, se añade al paquete a transmitir tal y como se muestra en la Figura 127.



4.8 Comparadores

Un circuito digital comparador realiza la comparación de dos palabras A y B de N bits tomadas como un número entero sin signo e indica si son iguales o si una es mayor que otra en tres salidas A = B, A > B y A < B. Bajo cualesquiera valores de A y B una y sólo una de las salidas estará a 1, permaneciendo las otras dos salidas a 0.

La comparación de dos bits se puede realizar por medio de una puerta XOR o una XNOR. La salida del circuito es 1 si sus dos bits de entrada son diferentes y 0 si son iguales.



Entradas: A y B		Salida: C
A	B	C
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

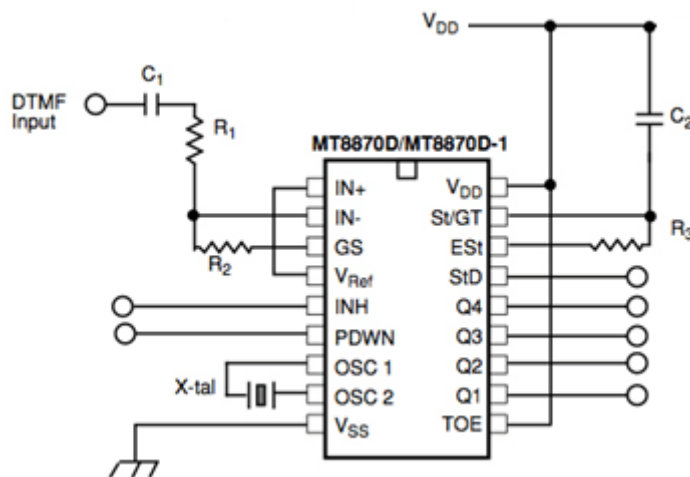
4.9 Decodificadores

Los decodificadores son circuitos integrados digitales que se utilizan para decodificar. En otras palabras, los decodificadores descifran u obtienen los datos reales del código recibido, es decir, convierten la entrada binaria en su entrada a un formulario, que se refleja en su salida. Consta de

n líneas de entrada y 2ⁿ líneas de salida. Se puede usar un decodificador para obtener los datos requeridos del código o también se puede usar para obtener los datos en paralelo de los datos en serie recibidos.

Decodificador DTMF MT8870C/MT8870C-I:

El MT8870C/MT8870C-I es un decodificador DTMF para integrar el filtro de división de banda y las operaciones del decodificador digital. La sección de filtro utiliza técnicas de condensadores conmutados para filtros de grupo alto y bajo; el decodificador utiliza técnicas de conteo digital para detectar y decodificar cada uno de los 16 pares de tonos DTMF en un código de 4 bits. La multifrecuencia de dos tonos es el sonido audible que escuchamos cuando presionamos las teclas de nuestro teléfono. El decodificador DTMF se utiliza para aplicaciones de control remoto.



DTMF es una estrategia para enviar y recibir control de información calificada a través de un canal de comunicaciones. Es probable que el espectador esté familiarizado en general con los tonos DTMF que se escuchan en un teléfono moderno con botones. Cada número en el teclado genera el tono DTMF correspondiente. Cuando se presiona un número en el teclado, se codifica y se transmite a través de un medio. El receptor lo recibe y decodifica el tono DTMF nuevamente en sus dos frecuencias particulares y luego de eso, el circuito de procesamiento actuará apropiadamente.

Funcionamiento del Decodificador DTMF MT8870:

Desde el circuito de aplicación, usa un decodificador DTMF MT8870 que usa un cristal de 3.57 MHz para generar la frecuencia apropiada para comparar los tonos de audio de entrada en su pin2 para generar un código BCD de 4 bits en su salida del pin 11 al 14. Estos datos BCD son pasados a través de inversores HEX CMOS cuya salida está debidamente levantada y conectada al puerto 3 pin 10 a 14 como un búfer entre el DTMF y el microcontrolador.

Mientras que los comandos de tono llegan desde una línea telefónica después de que se establece una llamada, primero llegan al decodificador DTMF MT8870. Por ejemplo, si se presiona el botón 1, la salida se desarrolla 0001 en el pin 11-14 que se invierte y se alimenta a los puertos de entrada del microcontrolador. Para el dígito 2, la salida desarrollada en consecuencia proporciona 0010 y así sucesivamente para el resto de los dígitos. El programa del microcontrolador, mientras se ejecuta, desarrolla una salida específica para cada número.

4.10 Diferencia entre Codificador y Decodificador

El circuito codificador básicamente convierte la señal de información aplicada en un flujo de bits digital codificado.	El decodificador realiza una operación inversa y recupera la señal de información original de los bits codificados.
En el caso del codificador, la señal aplicada es la entrada de señal activa.	El decodificador acepta datos binarios codificados como entrada.
El número de entradas aceptadas por un codificador es $2n$.	El número de entradas aceptadas por el decodificador es solo n entradas.
Las líneas de salida de un codificador son n .	Las líneas de salida de un decodificador son $2n$.
El codificador genera bits de datos codificados como salida.	El decodificador genera una señal de salida activa en respuesta a los bits de datos codificados.

La operación realizada es sencilla.

El circuito codificador está instalado en el extremo de transmisión.

La compuerta OR es el elemento lógico básico que se utiliza en él.

Se utiliza en correo electrónico, codificadores de video, etc.

La operación realizada es compleja.

El circuito decodificador está instalado en el lado receptor.

La compuerta AND junto con la compuerta NOT es el elemento lógico básico que se utiliza en él.

Se utiliza en microprocesadores, chips de memoria, etc.

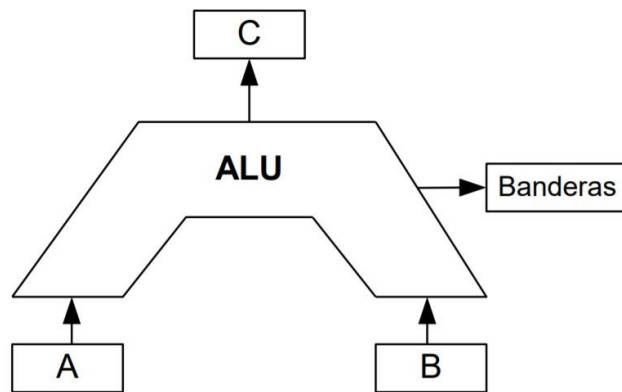
4.11 Unidades aritmético-lógicas.

Una ALU (Unidad Aritmética-Lógica) es un circuito que permite, como su nombre lo indica, realizar operaciones lógicas y aritméticas.

Además de los operadores lógicos y aritméticos, la ALU cuenta con una serie de registros para almacenar los datos, y bits de información sobre los resultados, también llamados banderas.

Las banderas más comunes son: Carry, Auxiliary Carry, Borrow, Overflow, Parity, Zero.

El símbolo de una ALU:



El circuito ALU es simplemente un operador, es decir, sólo realiza operaciones. La ALU no toma decisiones.

Las entradas deben contener tanto la magnitud como el signo que corresponda a la operación.

La ALU requiere de un mecanismo de control que le permita saber el tipo de operación a realizar.

BIBLIOGRAFIA

<https://www.fing.edu.uy/tecnoinf/mvd/cursos/arqcomp/material/teo/arq-teo03.pdf>

<https://www.uv.es/electfis/ef/Lecc5.pdf>

<http://www2.imse-cnm.csic.es/~juanle/Documents/Books/ApuntesElectronica.pdf>

http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/3835/B_-_

[_Funciones_booleanas.pdf?sequence=10&isAllowed=y](#)

<http://www.etitudela.com/profesores/jmng/digital/downloads/icircuitosmsi.pdf>

http://azul2.bnct.ipn.mx/academia/apuntes/decod_mult_rom.pdf

http://digitales.itam.mx/sites/default/files/u452/practica_05_combinacionales_2.pdf

[http://azul2.bnct.ipn.mx/academia/apuntes/sumadores_restadores\(wpd\).pdf](http://azul2.bnct.ipn.mx/academia/apuntes/sumadores_restadores(wpd).pdf)

<https://docplayer.es/51545482-11-generador-comprobador-de-paridad.html>

https://personales.unican.es/manzanom/Planantiguo/EDigital/Comp_G10_08.pdf

<http://homepage.cem.itesm.mx/garcia.andres/PDF201411/Arquitectura%20Computacional.pdf>