



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE GUAYAQUIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE  
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**TEMA**

**“MODELACIÓN Y SIMULACIÓN EN MATLAB DE LA OPERACIÓN DE UN  
DIODO DE UNIÓN PN DE SILICIO BASADA EN TEORÍA DE  
SEMICONDUCTORES.”**

**AUTOR**

**CARLOS JAVIER MORÁN ENCALADA**

**DIRECTOR**

**ING. MÓNICA MIRANDA**

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

**2017**

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA**

Yo, Carlos Javier Morán Encalada con CI 0924716962, por medio del presente documento certifico que he leído las políticas sobre la propiedad intelectual de la Universidad Politécnica Salesiana y estoy en total acuerdo con sus contenidos, motivo por el cual los derechos sobre la propiedad intelectual del presente trabajo investigativo quedan sujetos a las políticas establecidas por la institución.

Del mismo modo, autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana para que realice la digitalización y publicación del presente trabajo de graduación en el repositorio virtual de la universidad, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la ley Orgánica de Educación Superior.

Guayaquil, septiembre del 2017

(f) \_\_\_\_\_

Carlos Javier Morán Encalada

CI: 0924716962

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS**

Yo, Carlos Javier Morán Encalada con número de cédula de ciudadanía 0924716962, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Politécnica Salesiana los derechos sobre el proyecto de titulación consagrados por la ley de propiedad intelectual del Ecuador, en calidad de autor de este proyecto de titulación llamado “Modelación y Simulación en Matlab de la operación de un diodo de unión PN de Silicio basada en teoría de semiconductores”, el cual ha sido desarrollado con el fin de optar por el título de Ingeniero Electrónico en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad con plenos derechos para ejercer las decisiones que crea conveniente

Guayaquil, septiembre del 2017

(f)\_\_\_\_\_

Carlos Javier Morán Encalada

C.I. 0924716962

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

En calidad de tutor del trabajo de titulación “Modelación y Simulación en Matlab de la operación de un diodo de unión PN de Silicio basada en teoría de semiconductores”, realizado por el estudiante Carlos Javier Morán Encalada, declaro y certifico la aprobación del trabajo de titulación, ya que el proyecto cumple con todos los requisitos que solicita la Universidad Politécnica Salesiana.

(f) \_\_\_\_\_

Ing. Mónica Miranda

Directora del trabajo de Titulación

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, me gustaría agradecer el presente trabajo de titulación a Dios por darme las fortalezas para y bendecirme por lograr los objetivos trazados, seguidamente quiero agradecer a mi familia que son mi fuente de motivación para poder lograr todos mis objetivos, a mi tutora Mónica Miranda que me supo guiar en cada momento que le solicite una guía, igualmente les agradezco al ingeniero Teddy Negrete y al máster Bremnen Veliz por su gran ayuda en los momentos en que presentaba vacíos en el proyecto de titulación y me supieron guiar de gran manera para poder comprender y culminar este gran objetivo.

Carlos Javier Morán Encalada

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a Dios y a toda mi familia por todo el consejo, su motivación, amor y apoyo brindado a lo largo de mi vida para permitirme llegar hasta este momento de gran importancia en mi formación personal. Además, a todas las personas que me han brindado sus consejos y apoyo en esta etapa importante de mi vida.

Carlos Javier Morán Encalada

## RESUMEN

<b>Año</b>	<b>Alumno</b>	<b>Director de Proyecto</b>	<b>Tema</b>
2017	Carlos Morán	Mónica Miranda	Modelación y Simulación en Matlab de la operación de un diodo de unión PN de Silicio basado en teoría de semiconductores

Este proyecto se realiza con la intención de que el estudiante pueda comprender el comportamiento y funcionamiento de un diodo semiconductor de Silicio, basado en la teoría de semiconductores.

Este proyecto se basa sobre el comportamiento de un diodo semiconductor de Silicio, si se necesita hablar sobre algún diodo construido con otro material se lo hará conocer en su debido momento de lo contrario se sobreentiende que el proyecto se basa única y exclusivamente en los diodos semiconductores de Silicio.

El marco teórico comprende la recopilación bibliográfica e informativa, se indica como es el comportamiento de estos dispositivos sus características y cuáles son las ventajas que presentan estos dispositivos en su uso. También se indica los requisitos necesarios para su funcionamiento y cuáles son los factores que pueden alterar el mismo.

El capítulo del modelado matemático se lo dedica al estudio y diseño del modelado matemático del diodo, teniendo en cuenta las diversas características que estos presentan para su correcto modelado.

En el capítulo del diseño del software, se va a diseñar dos programas en el software Matlab usando su interfaz gráfica, el primero que permita realizar la simulación de un diodo de Silicio en un circuito y ver el comportamiento del diodo al variar los valores de los parámetros que conforman a un diodo, este resultado gráfico se lo obtiene del modelamiento matemático, por medio de este capítulo se puede obtener una mejor comprensión del comportamiento del diodo al poder tener el resultado gráfico.

El segundo programa que se va a diseñar es el de un circuito en el cual está el diodo formando parte de este y se va a observar cómo se comporta el diodo al variar los valores externos del circuito que influyen en el diodo.

Mediante el empleo de la tarjeta Arduino, el software Visual Studio y los sensores de corriente, voltaje y temperatura se va a realizar una práctica para comprobar que el resultado obtenido en el segundo programa presenta los mismos resultados que los que se obtienen en la práctica del circuito, donde el sensor de corriente va a permitir tomar los valores que va a generar la corriente a través del diodo, el de voltaje permite mostrar el voltaje al cual el circuito funciona y el de temperatura permite mostrar la temperatura a la que el diodo trabaja, la tarjeta Arduino obtendrá esos valores del diodo y los guardará para luego por medio del programa Visual Studio comparar esos valores y mostrarlos en una gráfica.

*Palabras clave:* diodo semiconductor, modelamiento matemático, teoría de semiconductores, Silicio, Arduino, sensores, Matlab, Simulink.



## ABSTRACT

Year	Student	Project manager	Theme
2017	Carlos Morán	Mónica Miranda	Modeling and Simulation in Matlab of the operation of a silicon PN junction diode based on semiconductor theory

This project is carried out with the intention that the student can understand the behavior and operation of a semiconductor diode of Silicon, based on the theory of semiconductors.

This project is based on the behavior of a silicon semiconductor diode, if you need to talk about a diode built with other material will let you know in due course otherwise it is understood that the project is based solely and exclusively on semiconductor diodes Of Silicon.

The theoretical framework includes the bibliographical and informative collection, it indicates as it is the behavior of these devices their characteristics and what are the advantages that these devices present in their use. It also indicates the necessary requirements for its operation and what are the factors that can alter it. The chapter of mathematical modeling is dedicated to the study and design of mathematical modeling of the diode, taking into account the various characteristics that these present for their correct modeling.

In the software design chapter, two programs will be designed in the Matlab software using its graphical interface, the first one that allows the simulation of a silicon diode in a circuit and see the behavior of the diode by varying the values of the parameters Which make up a diode, this graphic result is obtained from mathematical modeling, through this chapter you can get a better understanding of the behavior of the diode to be able to have the graphical result.

The second program to be designed is that of a circuit in which the diode is part of it and it is going to observe how the diode behaves by varying the external values of the circuit that influence the diode.

Using the Arduino card, Visual Studio software and current, voltage and temperature sensors, a practice will be carried out to verify that the result obtained in the second program has the same results as those obtained in the practice of Circuit, where the current sensor will allow to take the values that will generate the current through the diode, the voltage allows to show the voltage at which the circuit works and the temperature allows to show the temperature at which the diode works , The Arduino card will get those values from the diode and save them, then through the Visual Studio program compare those values and display them on a graph.

*Keywords:* semiconductor diode, mathematical modeling, semiconductor theory, silicon, Arduino, sensors, Matlab, Simulink.

## ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD .....	II
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN AFAVOR DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA .....	III
CERTIFICACIÓN .....	IV

AGRADECIMIENTO .....	V
DEDICATORIA .....	VI
RESUMEN .....	VII
ABSTRACT .....	VIII
ÍNDICE GENERAL .....	X
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XIII
INTRODUCCIÓN .....	1
1. EL PROBLEMA.....	3
1.1 Descripción del problema .....	3
1.2 Antecedentes .....	3
1.3 Importancia y alcance.....	3
1.3.1 Importancia .....	3
1.3.2 Alcance .....	4
1.4 Delimitación del problema .....	4
1.4.1 Temporal .....	4
1.4.2 Espacial.....	4
1.4.3 Académica .....	4
1.5 Objetivos .....	5
1.5.1 Objetivo general .....	5
1.5.2 Objetivos específicos .....	5
1.6 MARCO METODOLÓGICO .....	5
1.6.1 Marco deductivo .....	6
1.6.2 Marco inductivo .....	6
1.6.3 Método analítico .....	6

1.6.4	Método empírico .....	6
1.6.5	Técnicas .....	6
1.7	Beneficiarios .....	6
1.8	Impacto .....	6
1.9	Funcionalidad .....	7
2.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	8
2.1	Silicio .....	8
2.2	Electrones de valencia .....	9
2.3	Enlaces covalentes .....	9
2.4	Niveles de energía .....	9
2.5	Bandas de energía .....	10
2.5.1	Bandas de conducción .....	11
2.5.2	Banda prohibida.....	11
2.5.3	Banda de valencia.....	11
2.6	Semiconductores .....	13
2.6.1	Energía térmica .....	15
2.6.2	Semiconductor intrínseco .....	16
2.6.2.1	Concentración intrínseca .....	18
2.6.3	Semiconductor extrínseco .....	18
2.6.3.1	Dopado tipo N .....	19
2.6.3.2	Dopado tipo P .....	21
2.6.3.3	Compensación de impurezas .....	22
2.7	Nivel de Fermi .....	22
2.8	Unión PN .....	24

2.8.1	Unión abrupta .....	26
2.8.2	Regiones neutras.....	26
2.8.3	Región de transición o Zona de carga espacial .....	26
2.8.4	Barrera de potencial .....	28
2.8.5	Polarización de la Unión PN .....	28
2.8.5.1	Polarización directa .....	28
2.8.5.2	Polarización inversa .....	29
2.8.6	Efecto rectificador .....	30
2.8.7	Ruptura de la unión .....	31
2.8.7.1	Efecto avalancha .....	31
2.8.7.2	Efecto Zener .....	32
2.8.8	Ecuación de Shockley .....	32
2.8.9	Características corriente - tensión de la unión PN .....	33
2.8.10	Curva característica del diodo .....	34
3	Modelado matemático .....	38
3.1	Comportamiento de la unión PN en equilibrio térmico .....	38
3.1.1	Barrera de potencial y bandas de energía .....	40
3.1.2	Electrostática en la ZCE .....	40
3.1.3	Constancia del nivel de Fermi .....	43
3.1.4	Potencial de contacto .....	45
3.1.5	Resolución de la ecuación de Poisson en la ZCE .....	47
3.1.6	Unión abrupta .....	48
3.1.7	La unión gradual .....	55
3.2	Función de la corriente a través de la unión PN .....	60

3.2.1	Corriente de la unión PN .....	60
3.2.2	Corrientes minoritarios en las regiones neutras .....	61
3.2.2.1	Distribución de huecos .....	61
3.2.3	Corrientes mayoritarios en las regiones neutras .....	72
3.2.4	Características entre la corriente Vs tensión del diodo .....	73
3.2.4.1	Ecuación del diodo ideal .....	73
3.3	Ley de acción de masas .....	76
3.4	Concentración en función del nivel de Fermi .....	79
3.4.1	La posición del nivel de Fermi .....	81
3.5	Resistencia de la unión PN .....	84
3.5.1	Resistencia estática .....	84
3.5.2	Resistencia dinámica .....	85
4	Diseño de las herramientas para el modelado y desarrollo del circuito en Matlab.....	87
4.1	Uso de la herramienta GUIDE.....	87
4.2	Herramienta para el modelado matemático del diodo .....	92
4.3	Programa para encontrar los valores de la corriente del diodo en un circuito.....	94
4.3.1	Diseño para la solución del circuito de un diodo usando la interfaz Guide.....	94
4.3.2	Diseño para la solución del circuito del diodo usando la interfaz Simulink.....	96
5	Desarrollo de la práctica.....	101
5.1	Conexión de los sensores.....	101
5.2	Conexión sensores y Arduino.....	102
5.3	Programación del proyecto en Arduino .....	102
5.4	Programación del proyecto en Visual Studio.....	103

6	Validación del modelo matemático del diodo de Silicio con respecto a un modelo práctico experimental .....	107
7	Conclusiones y recomendaciones .....	112
7.1	Conclusiones.....	112
7.2	Recomendaciones.....	113
8	Anexos .....	115
8.1	Anexo 1.....	115
8.2	Anexo 2.....	117
8.3	Anexo 3.....	120
8.4	Anexo 4.....	122
9	Glosario.....	154
10	Bibliografía .....	158

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Niveles de energía .....	10
Figura 2: Diagrama de bandas de energía .....	11
Figura 3: Representación bidimensional del cristal de Silicio .....	13
Figura 4: Estructura cristalina del Silicio (diamante) .....	14
Figura 5: Dopado tipo N del Silicio .....	20
Figura 6: Dopado tipo P del Silicio .....	21
Figura 7: Unión entre Silicio tipo P y el tipo N.....	25
Figura 8: Diodo PN - zona de carga espacial.....	27
Figura 9: Conducción diodo de Silicio.....	29
Figura 10: Polarización del diodo.....	30
Figura 11: Curva característica del diodo.....	35
Figura 12: Semiconductores individuales tipo P y N .....	38
Figura 13: Bandas de energía en la unión P-N en equilibrio térmico.....	39
Figura 14: Zona de carga espacial: Sentido del campo eléctrico y potencial de contacto en equilibrio térmico .....	40



Figura 15: Bandas de energía en la ZCE .....	40
Figura 16: a) Unión PN, b) Diagramas de bandas, c) Distribución ZCE, d) Aproximación rectangular de la ZCE.....	43
Figura 17: Representación gráfica del potencial de contacto en las regiones P y N en función de la concentración de impurezas .....	47
Figura 18: Unión gradual .....	48
Figura 19: Unión abrupta .....	48
Figura 20: a) Distribución de carga en la ZCE en equilibrio térmico. b) Distribución de campo eléctrico.....	49
Figura 21: a) Unión abrupta donde $N_A \gg N_D$ . b) Distribución en la ZCE. c) Distribución del campo eléctrico. d) Potencial electrostático.....	54
Figura 22: a) Distribución en la ZCE. b) Distribución del campo eléctrico. c) Potencial electrostático. d) Diagrama de bandas de energía.....	55
Figura 23: Potencial de contacto del semiconductor .....	59
Figura 24: Distribución de la corriente de electrones y huecos .....	60
Figura 25: Relación entre el voltaje y corriente en el diodo .....	73
Figura 26: Modelo de bandas de energía en un semiconductor .....	77
Figura 27. Ecuación probabilística Fermi – Dirac, cuando $T=0K$ .....	79
Figura 28: Resistencia estática y dinámica del diodo .....	84
Figura 29: Diferencia entre la Resistencia estática y dinámica del diodo .....	86
Figura 30: Ventana Guide .....	87
Figura 31: Opción 1 Guide .....	88
Figura 32: Opción 2 Guide .....	88
Figura 33: Opción 3 Guide.....	89
Figura 34: Opción 4 Guide.....	89
Figura 35: Entorno para el diseño GUI .....	89

Figura 36: Herramientas interfaz GUI .....	90
Figura 37: Panel de componentes interfaz Guide .....	90
Figura 38: Componentes Guide .....	90
Figura 39: Opciones interfaz gráfica .....	91
Figura 40: Opción property inspector .....	91
Figura 41: Opción view callback .....	91
Figura 42: Bloques edit text y static text en la interfaz .....	92
Figura 43: Bloques edit text y static text .....	92
Figura 44: Bloques push botton resultados .....	93
Figura 45: Bloques push botton graficar .....	93
Figura 46: Bloques axes .....	93
Figura 47: Interfaz finalizada .....	94
Figura 48: Interfaz en funcionamiento .....	94
Figura 49: Bloques static text .....	95
Figura 50: Bloques edit text .....	95
Figura 51: Bloques push botton .....	95
Figura 52: Bloques axes .....	96
Figura 53: Interfaz completa .....	96
Figura 54: Simulink .....	96
Figura 55: Librería de Simulink .....	97
Figura 56: Barra de herramientas de Simulink .....	97
Figura 57: Pestaña para crear proyecto en Simulink .....	97
Figura 58: Diagrama del circuito en Simulink .....	98
Figura 59: Librería Simulink .....	98

Figura 60: Bloque del diodo en Simulink .....	99
Figura 61: Circuito final Simulink .....	100
Figura 62: Gráfica corriente Vs voltaje del diodo .....	100
Figura 63: Simulación Proteus .....	101
Figura 64: Conexión de los sensores en el circuito .....	102
Figura 65: Conexión final del proyecto .....	102
Figura 66: Programa Arduino .....	103
Figura 67: Solución gráfica Visual Studio .....	103
Figura 68: Ventana de diseño .....	104
Figura 69: Componente serial .....	104
Figura 70: Gráficas de las señales .....	104
Figura 71: TEXTBOX .....	105
Figura 72: Programa finalizado en Visual Studio .....	105
Figura 73: Programación del proyecto en Visual .....	105
Figura 74: Ícono para iniciar el programa .....	106
Figura 75. Interfaz Java y Arduino – fuente autor .....	107
Figura 76. Simulación del circuito práctico-fuente autor .....	109
Figura 77. Configuración de propiedades – fuente – Matlab .....	109
Figura 78. Programa para crear archivo en Excel – fuente autor .....	110
Figura 79. Programa para comparar archivos Excel – fuente autor .....	110
Figura 80. Ventana para ingresar archivos de Excel - fuente autor .....	110
Figura 81. Comparación de las gráficas -fuente autor .....	111
Figura 82: Sensor de corriente .....	115
Figura 83: Sensor de temperatura .....	116

Figura 84: Sensor de voltaje .....	116
Figura 85: Desarrollo del ejercicio usando la herramienta .....	117
Figura 86: Simulación del circuito empleando la interfaz .....	118
Figura 87: Simulación Simulink .....	118
Figura 88: Configuración del bloque Scope.....	119
Figura 89: Gráfica V vs I, rango de valores del circuito .....	119
Figura 90: Herramienta del modelado matemático.....	122
Figura 91: Simulación del circuito .....	143

## INTRODUCCIÓN

El presente proyecto tiene como finalidad la de brindar al estudiante una herramienta que le permita incrementar y fortalecer sus conocimientos sobre los semiconductores.

El empleo de la técnica de modelamiento matemático se lo hace con el fin de poder describir desde la perspectiva matemática un suceso que ocurre en la vida real, su objetivo es el de poder comprender ampliamente este suceso y poder predecir su comportamiento lo más exacto posible en el futuro.

Es de gran importancia mencionar que un modelo matemático no es totalmente fiel al comportamiento que se tiene en la vida real, dado que el modelado se trata de una idealización.

El uso del modelamiento matemático se trata para realizar el estudio de un sistema físico, es primordial elaborar previamente un modelo matemático el cual debe ajustarse lo más posible al sistema real, empleando para este motivo las leyes físicas que rijan el sistema a tratar.

Se debe establecer como primer paso las variables que intervienen en dicho proceso, para poder realizar la correspondiente relación entre estas, a través de las leyes físicas que las regulan.

El estudio de los dispositivos semiconductores ha propiciado un gran avance en la industria tecnológica permitiendo un paso enorme en la era electrónica, estos dispositivos han logrado permitir grandes avances en los dispositivos electrónicos ya que por medio de su estudio se pueden derivar estudios más completos de los dispositivos semiconductores.

Los semiconductores son materiales que poseen características intermedias entre los metales y los aislantes, de acuerdo con la condición de funcionamiento estos dispositivos presentarán conductas como metales o aislantes.

Este estudio se basa en semiconductores de Silicio debido a que este es uno de los elementos más abundantes en la naturaleza y es posee un comportamiento más estable que el de Germanio.

## **1. El Problema**

### **1.1 Descripción del Problema**

El objeto de estudio de este proyecto de titulación es el de poder definir un sistema mediante el cual se pueda realizar el estudio de los dispositivos semiconductores tomando en consideración los parámetros que provoquen un comportamiento distinto de este dispositivo.

Debido al constante avance de la electrónica entre ellas las investigaciones en el campo de los semiconductores, el estudio de estos dispositivos permite abarcar una mayor perspectiva sobre este tema, mediante el empleo del modelamiento matemático se puede hacer una aproximación bastante cercana al comportamiento real del dispositivo semiconductor.

La acción de poder realizar simulaciones sobre estos dispositivos brinda una herramienta básica y fundamental para los estudiantes. El poder juntar las técnicas del modelamiento matemático con las ventajas que trae la simulación, brindará al estudiante las herramientas necesarias para poder tener una mayor comprensión sobre el estudio de estos dispositivos.

### **1.2 Antecedentes**

A nivel de estudios universitarios, el nivel de conocimiento sobre los dispositivos semiconductores no es muy amplio en especial del diodo de Silicio. Estos dispositivos

han jugado un papel muy importante en la evolución tecnológica. Por este motivo, el presente proyecto de titulación se plantea con el objetivo de brindar al lector los medios necesarios para poder tener una idea de cómo se comportan estos dispositivos.

### **1.3 Importancia y Alcance**

#### **1.3.1 Importancia**

La propuesta de este proyecto es dar al lector las herramientas necesarias para el estudio de los dispositivos semiconductores, brindar las explicaciones sobre porqué se ve afectado el comportamiento de estos dispositivos y comprender el funcionamiento de estos dispositivos cuando se presenta algún cambio que influya en su comportamiento.

#### **1.3.2 Alcance**

El proyecto titulado como “Modelación y Simulación en Matlab de la operación de un diodo de unión PN de Silicio basada en teoría de semiconductores”, se basa en demostrar el modelado matemático que presenta un diodo de Silicio ante influencias externas que pueden afectar su comportamiento. Se va a diseñar un circuito al cuál se le aplicará un voltaje y mediante un sensor de corriente podremos obtener el valor real que circula por el diodo empleando la tarjeta Arduino y el software Matlab, para posteriormente comparar este resultado con el que se va a obtener de la simulación que se va a diseñar en Matlab y de esta manera poder corroborar lo expuesto en el proyecto de titulación.

### **1.4 Delimitación del problema**

#### **1.4.1 Temporal**

Este proyecto de titulación tuvo una duración de 12 meses contados desde la fecha de aprobación del tema.

#### **1.4.2 Espacial**

El proyecto se implementó en el área de laboratorio de electrónica analógica.

### **1.4.3 Académica**

El modelado del diodo permite comprender mejor el comportamiento de los dispositivos semiconductores y adquirir nuevos conceptos que juntos a los adquiridos en las aulas de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil en las materias de electrónica analógica, permitirán tener una mejor comprensión sobre estos dispositivos y entender por qué son elementos muy fundamentales en la era electrónica moderna.

El presente proyecto para su implementación se realiza midiendo la corriente que atraviesa el diodo, empleando un sensor de corriente, la tarjeta Arduino y el programa Matlab que será el encargado de realizar la gráfica de corriente Vs voltaje.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo General**

Simular características eléctricas-espaciales de los diodos semiconductores de unión PN de Silicio usando modelos aproximados de teoría y tecnología de semiconductores para demostrar gráficamente su comportamiento físico y generar una herramienta didáctica para la Carrera de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica Salesiana.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- Explicar mediante el uso de modelos aproximados e implementados en Matlab el comportamiento de la unión PN en equilibrio térmico, permitiendo obtener gráficas de las funciones de concentración de portadores, densidad de carga eléctrica, campo eléctrico y voltaje en la región neutra P, región neutra N, región de transición.
- Obtener gráficas de la función de la corriente a través de la unión PN y la dependencia con la tensión, temperatura, concentración intrínseca, dopajes, tiempos de vida y constantes de difusión de huecos y electrones.
- Graficar la concentración de portadores y ley de acción de masas.
- Graficar la concentración en función del nivel de Fermi.
- Simular la densidad de corriente en función de las concentraciones de portadores y calcular la resistencia eléctrica de un semiconductor en una unión PN.



- Obtener mediante una gráfica las características de corriente versus voltaje en una unión PN (ecuación de Shockley).
- Demostrar la caracterización experimental de la curva corriente versus voltaje de un diodo de silicio empleando las tarjetas Arduino.

## **1.6 Marco Metodológico**

Para el desarrollo del presente proyecto se emplean las siguientes técnicas de investigación.

### **1.6.1 Método Deductivo**

Este método permitió conseguir un enfoque general de los temas investigados en el proyecto de titulación, con este método se pudo relacionar los conocimientos adquiridos en el transcurso de la carrera con los investigados para el proyecto.

### **1.6.2 Método Inductivo**

El empleo de los dispositivos semiconductores marcó un paso en el desarrollo del avance tecnológico en la actualidad.

### **1.6.3 Método analítico**

Se realizó los cálculos necesarios para el diseño del modelamiento de las ecuaciones que rigen el comportamiento del diodo y se pudo corroborar estos cálculos con la herramienta didáctica desarrollada en Matlab.

### **1.6.4 Método empírico**

Se realizó una prueba con el diodo para obtener las curvas características de este y poder comparar este resultado con el programa Matlab.

### **1.6.5 Técnicas**

Se analizó el comportamiento del diodo mediante el programa variando varios valores del diodo y de esta manera comprender aún más su comportamiento.

## **1.7 Beneficiarios**

Los beneficiarios de este proyecto de titulación son los estudiantes que cursan las materias de electrónica analógica y personas en general que desean adquirir un conocimiento más amplio sobre estos dispositivos.

### **1.8 Impacto**

El proyecto de titulación que se detalla aquí permite tener al lector un conocimiento más amplio sobre los dispositivos semiconductores, para en posteriores proyectos realizar estudios más amplios teniendo como base el proyecto aquí descrito.

### **1.9 Funcionalidad**

El estudio de los dispositivos semiconductores es un tema muy amplio el cual abarca muchos conceptos que en la carrera universitaria se obvian o no se dan por el nivel de conocimiento previo que se necesita.

Con este proyecto se podrá investigar y estudiar los principios de físicos de funcionamiento de la unión PN con perspectiva de Ingeniería Electrónica, además permitirá desarrollar en Matlab la codificación necesaria para hacer una herramienta didáctica para el estudio de estos dispositivos.

## **2. Fundamento teórico**

### **2.1 Silicio**

El Silicio es un elemento químico metaloide representado por el símbolo Si, en la tabla periódica está ubicado en el grupo 14 o conocido anteriormente como el grupo IV A. Ocupa el segundo lugar dentro de los elementos más abundantes en la corteza terrestre por debajo del oxígeno, en la tabla periódica forma parte de la familia del carbono (C), pero a diferencia de este, el Silicio no se lo encuentra en la naturaleza de manera pura, se lo encuentra en forma de silicatos complejos y en combinación con el oxígeno formando dióxidos de Silicio ( $\text{SiO}_2$ ) [1].

El Silicio se lo puede encontrar de forma amorfa o cristalizada, donde el primero es un polvo de color parduzco, es más activo químicamente que en su forma cristalina.

El Silicio posee el número atómico 14, es decir consta que un átomo de Silicio aislado consta de 14 protones en el núcleo y 14 electrones orbitando cerca del núcleo, de los cuales 10 electrones están estrechamente relacionados con el núcleo y no son de mucha importancia para las uniones con los otros elementos químicos. Los cuatro electrones que sobran son los que definirán como los átomos de Silicio se van a organizar para la formación del Silicio en estado sólido [2].

Para formar un sólido los átomos de Silicio se combinan a través de una formación, estructurada y ordenada que se conoce con el nombre de cristal. Esto se puede lograr por medio de los enlaces covalentes (término que se conocerá más adelante) [1].

El Silicio se encuentra dentro de los elementos llamados metaloides o semimetales. El Silicio presenta propiedades intermedias entre el carbono y el germanio. De acuerdo a su conductividad eléctrica, el tipo de materiales al que pertenece el Silicio es un semiconductor. El Silicio cristalino es muy importante dentro de la industria electrónica llegando a ser considerado como el material base sobre el cual se basa la electrónica, microelectrónica y la fabricación de las celdas solares [1].

La resistividad que presenta el Silicio a la corriente eléctrica a temperatura ambiente varía entre la de los metales y la de los aislantes. Es posible controlar la conductividad del Silicio añadiendo en pequeñas cantidades impurezas llamadas dopantes. La amplia capacidad de poder controlar las propiedades eléctricas del Silicio y su gran abundancia en la corteza terrestre han permitido el gran avance de la electrónica [1].

## **2.2 Electrones de valencia**

Se define como valencia de un elemento al número de electrones que le hacen falta o posee en exceso un átomo para tener completo el último nivel.

Los electrones de valencia están ubicados en la capa más externa del átomo esta capa es la de mayor nivel de energía que presenta un átomo, estos electrones son los encargados de la interacción que tienen los átomos de la misma o distinta especie. Los electrones de valencia tienen la facilidad de crear los enlaces [3].

Los electrones de valencia son los que en la gran mayoría de ocasiones definen la forma en que los átomos se relacionan entre sí para formar los diversos compuestos.

## **2.3 Enlaces covalentes**

Se llama enlaces covalentes a la unión de dos átomos para poder alcanzar el octeto estable, cediendo entre sí electrones de la última capa de valencia (excepto el hidrógeno que necesita de 2 electrones para alcanzar la estabilidad). Los enlaces covalentes se dan entre átomos de un mismo elemento no metálico y entre distintos elementos no metálicos [3].

Cuando se juntan átomos de diferentes elementos no metálicos para formar un enlace covalente, uno de estos resultará más electronegativo que el otro, por lo consiguiente atraerá la nube electrónica hacia su núcleo, lo que generará un dipolo eléctrico. Esta

polarización permite que en un mismo elemento sus moléculas se atraigan entre sí debido a las fuerzas electrostáticas de distinta densidad [2].

Cuando se tratan de átomos de un mismo elemento no metálico se tiene un efecto contrario cuando se unen covalentemente, su diferencia electronegativa es cero y no existen dipolos. Las moléculas de un mismo elemento tienen atracción nula [2].

## 2.4 Niveles de energía

Se define como nivel de energía a los estados energéticos donde se encuentran los electrones en estados estables o no, esto es dependiendo del subnivel energético en que se encuentren ya sea lo más cercano al núcleo o en las últimas capas de este [4].

En un átomo, sus electrones se encuentran orbitando alrededor del núcleo formando los niveles de energía. En cada nivel de energía, la energía que tiene el electrón es diferente. De hecho, en los niveles que están muy cercanos al núcleo, la fuerza de atracción que se presenta entre el núcleo y los electrones es tan fuerte que provoca que los electrones estén estrechamente ligados entre sí [4].

En el caso de las capas que están más alejadas del núcleo ocurre todo lo contrario, debido a este suceso es más fácil realizar los intercambios de electrones en el último nivel de energía. [4]

Existen siete niveles de energía llamados también capas donde se pueden ubicar los electrones, numerados del 1 al 7 siendo el 1 el nivel más interno y el 7 el más externo. Los niveles también se representan con las letras: K, L, M, N, O, P, Q.

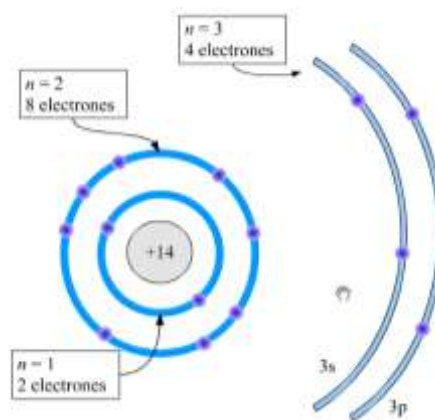


Figura 1: Niveles de energía [5]

Cada nivel de energía tiene distribuidos sus electrones en varios subniveles energéticos, que pueden ser de uno de los siguientes tipos: s, p, d, f.

## **2.5 Bandas de energía**

En el momento en que los átomos forman un cristal, se observa que los niveles energéticos de los electrones que están más próximos al núcleo no son afectados de manera importante por la presencia de átomos vecinos. Pero a diferencia de estos los niveles más externos del átomo varían considerablemente, debido a que estos electrones son requeridos por los distintos átomos que conforman el cristal [5].

Existen tres tipos de bandas de energía, las cuales son:

### **2.5.1 Banda de conducción.**

Está ocupada por los electrones que se encuentran en estado libre, estos son aquellos que se han separados de sus átomos y se pueden mover con facilidad, estos electrones son los encargados de transportar la corriente eléctrica [3].

### **2.5.2 Banda prohibida.**

Se encuentra ubicada entre la banda de conducción y la banda de valencia, esta banda también es conocida con el nombre de gap, es la que separa a las bandas de conducción de la de valencia y en esta banda no pueden localizarse los electrones. [3]

### **2.5.3 Banda de valencia.**

Está ocupada por los electrones de valencia que tienen los átomos, es decir, aquí encontraremos los electrones que se encuentran en la última capa o nivel energético de los átomos. Son los encargados de formar los enlaces atómicos, pero no intervienen en la conducción eléctrica. [3]

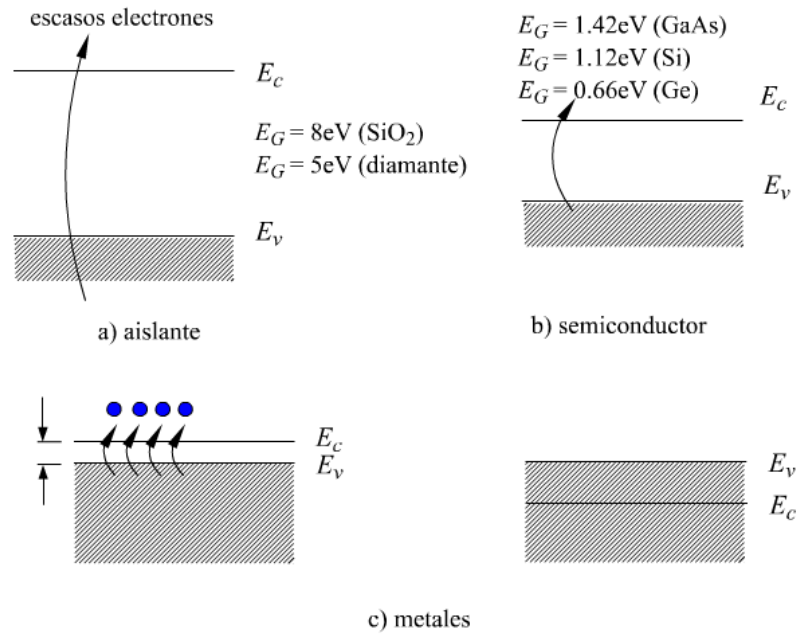


Figura 2: Diagrama de bandas de energía [5]

Dependiendo de la separación entre las bandas, o de acuerdo al número de electrones que presente la banda de valencia, los materiales pueden clasificarse, en aislantes, conductores y semiconductores.

**a) Aislantes.**

Los aislantes son materiales que presentan una resistencia elevada al paso de la corriente eléctrica, presenta una banda prohibida muy elevada alrededor de los 6eV, que divide la banda de valencia que se encuentra llena de la banda de conducción que está vacía. La energía que se alcanzaría proporcionar desde un campo externo es muy pequeña para permitir que la partícula viaje desde la banda de valencia hacia la de conducción. Debido a que el electrón no puede conseguir la energía necesaria, la conducción es imposible. Cuando los materiales aislantes se encuentran funcionando a temperaturas muy altas pueden conducir, es decir que, solo en este caso los aislantes se vuelven conductores. [6]

**b) Conductores.**

A diferencia de los materiales aislantes, los materiales conductores son todos aquellos materiales que permiten el flujo de corriente eléctrica con facilidad, presentan una baja resistencia eléctrica. Su configuración electrónica les permite transportar corriente eléctrica a temperaturas bajas o temperatura ambiente. [6]

La energía que estos materiales presentan en la banda de valencia es superior que la que presentan la banda de conducción. Por este motivo, las bandas de conducción y de valencia se superponen y una gran cantidad de electrones situados en la banda de valencia se ubican sobre los electrones de la banda de conducción con gran facilidad y esto les da la opción de circular por el medio. [6]

**c) *Semiconductor.***

Los materiales semiconductores presentan propiedades intermedias entre conductor y aislante, dependiendo de las condiciones en lo que se los emplee será su comportamiento. Cuando el semiconductor opera a bajas temperaturas su banda de valencia se encuentra llena, mientras la de conducción está vacía, funcionando en este caso como un aislante. Pero a medida que la temperatura empieza a aumentar, algunos electrones que están ubicados en la banda de valencia logran adquirir la energía necesaria para superar la banda prohibida que tiene un valor aproximado de 1eV para el Silicio y 0.66 eV para el Germanio, lo cual les permite moverse a la banda de conducción y en este caso se comportan como materiales conductores. [6]

## **2.6 Semiconductores.**

En el apartado anterior se pudo ver una breve explicación sobre los semiconductores, como se comportan y sus características en este punto se realizará un estudio más específico de lo que es un semiconductor. Esta tesis se basa en los semiconductores de Silicio, por ser uno de los elementos en mayor abundancia en el planeta y ser el más empleado en la industria electrónica, aunque los semiconductores compuestos están tomando un papel cada vez más importante en la industria electrónica sobre todo en aplicaciones de alta velocidad y en aplicaciones de optoelectrónica. Por esta razón, en esta tesis se va a considerar al Silicio como semiconductor principal, si no se indica lo contrario.

Según el nivel de ordenación de los átomos del semiconductor, los sólidos se clasifican en:

- Amorfos: no existe ningún tipo de orden entre sus átomos.
- Monocristalinos: la totalidad de sus átomos se encuentran en un perfecto orden.
- Policristalinos: están formados por la unión de monocristales.



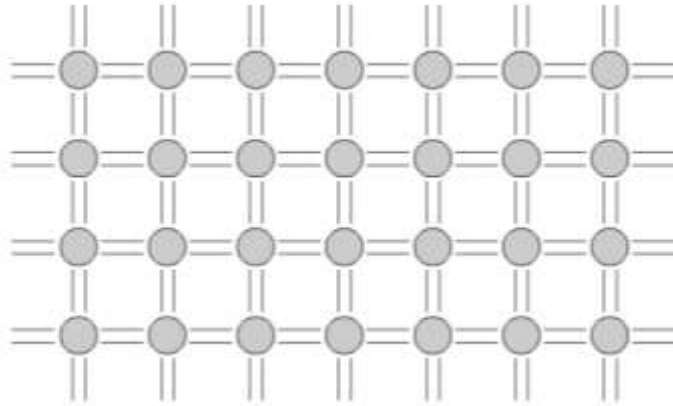


Figura 3: Representación bidimensional del cristal de Silicio [5]

Un dispositivo semiconductor es un material que se comporta como aislante (pocas cantidades de cargas móviles, resistencia muy alta) o como conductor (gran cantidad de cargas móviles, resistencia muy baja) dependiendo de la temperatura de funcionamiento a la que se encuentre el dispositivo. Los semiconductores a la temperatura de cero grados Kelvin suelen presentar un funcionamiento como aislante y a temperatura ambiente se comportan como conductores [7].

El Silicio que se emplea en la fabricación de los dispositivos semiconductores es un monocristal cuya configuración cristalina se conoce como diamante [7].

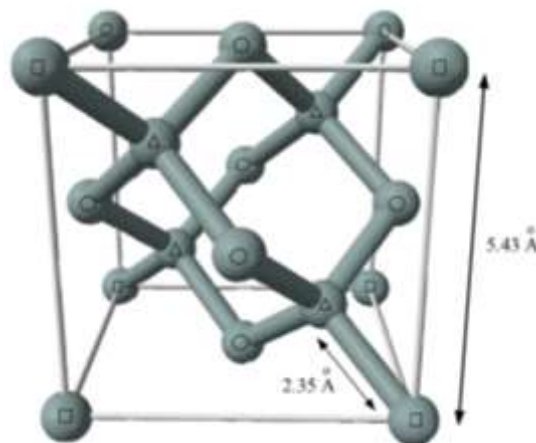


Figura 4: Estructura cristalina del Silicio (diamante) [5]

La capacidad de conducción de corriente se puede controlar introduciendo en el material semiconductor átomos diferentes al del dispositivo semiconductor, denominados impurezas, que posean una estructura atómica similar a la de los átomos del dispositivo semiconductor, pero con la diferencia de que estos átomos extraños tengan un electrón extra. Este átomo se acoplará con mucha facilidad entre sus vecinos

del semiconductor, dando como resultado que el electrón extra se concederá para convertirse en un electrón libre [8].

Cuando un dispositivo semiconductor posee impurezas se dice que está dopado. Dependiendo de la forma en que esté consolidado el sólido, es decir, si tiene átomos extraños o no, se clasificará a los dispositivos semiconductores.

Debido a sus méritos sobre los tubos de vacío, los dispositivos semiconductores (como diodos, transistores, circuitos integrados, etc.) los reemplazaron por completo en todos los campos de la electrónica. Algunas de sus ventajas se enlistan a continuación.

- 1) Como los dispositivos semiconductores no tienen filamentos, por lo tanto, no se necesita energía para calentarlos para causar la emisión de electrones.
- 2) Dado que los dispositivos semiconductores no requieren ningún tipo de calefacción, estos se ponen en funcionamiento tan pronto como el circuito está encendido.
- 3) Durante la operación, los dispositivos semiconductores no producen ningún ruido de zumbido.
- 4) Los dispositivos semiconductores requieren bajos voltajes para su funcionamiento en comparación con los tubos de vacío.
- 5) Debido a su reducido tamaño, los circuitos que emplean dispositivos semiconductores son muy compactos.
- 6) Los dispositivos semiconductores son a prueba de golpe.
- 7) Con relación al precio los dispositivos semiconductores son mucho más baratos que los tubos de vacío.
- 8) Los dispositivos semiconductores tienen vida casi ilimitada.
- 9) Como no se tiene que crear un vacío en los dispositivos semiconductores, no tienen problemas de deterioro por vacío.

Pero no todo es bueno con respecto a los semiconductores, estos también presentan algunas desventajas las cuales conoceremos ahora.

- 1) El nivel de ruido es mayor en los dispositivos semiconductores no pueden manejar la misma potencia que los tubos de vacío
- 2) Los semiconductores no pueden manejar la misma potencia que los tubos de vacío ordinarios pueden hacer.
- 3) En la gama de alta frecuencia tienen una respuesta pobre.

4) Los dispositivos semiconductores son sensibles a la temperatura.

La temperatura máxima que los dispositivos semiconductores pueden soportar es muy baja comparada a los tubos de vacío. Incluso los dispositivos semiconductores pueden tener pequeños daños a causa del sobrecalentamiento, esto debido a que una temperatura elevada, los enlaces covalentes se separan y el material semiconductor que forma el dispositivo se convierte en conductor. [3]

### **2.6.1 Energía térmica.**

La energía térmica o también conocida como energía calorífica es la que tienen los cuerpos debido al movimiento que presentan las partículas que lo conforman, mientras más se mueven las moléculas que lo conforman, mayor será la temperatura que el material registre. A este movimiento se lo conoce también como agitación térmica, la energía térmica es la energía manifestada en forma de calor. [5]

La agitación térmica que tienen las partículas que conforman un cuerpo está estrechamente ligada a la temperatura, es decir que mientras se aumenta la temperatura de un cuerpo también aumentará su energía térmica. La energía térmica está dada por la expresión:

$$U = K_B T \text{ (ecuación 1)}$$

$K_B$  es la constante de Boltzmann y tiene un valor de  $1,38 \times 10^{-23}$  J/K según el sistema internacional” y  $T$  es la temperatura que presenta el cuerpo en grados Kelvin.

Al ponerse dos cuerpos con distintas temperaturas en contacto, el cuerpo que posee mayor temperatura transfiere energía al de menor temperatura, hasta igualar sus temperaturas. En ese momento se deja de transferir energía de un cuerpo hacia el otro y se dice que estos cuerpos están en equilibrio térmico. El proceso de alcanzar el equilibrio térmico se caracteriza por los siguientes motivos [5]:

- 1) La energía que posee el cuerpo con mayor temperatura se transmite al de menor temperatura.
- 2) La energía interna que posee el cuerpo con menor temperatura aumenta y la del cuerpo con mayor temperatura disminuye.
- 3) En el equilibrio térmico los cuerpos poseen la misma temperatura e igual energía cinética entre sus partículas. En este punto finaliza la transmisión de energía de un cuerpo a otro.

Se conoce como calor al medio por el cual se transmite energía de un cuerpo a otro como resultado de la diferencia de temperatura entre ellos.

### **2.6.2 Semiconductor intrínseco.**

Llamamos semiconductor intrínseco a las estructuras cristalinas puras, es decir, que no poseen átomos extraños.

Una característica de los dispositivos semiconductores intrínsecos es que a cero grados Kelvin se comportan como aislantes. Los electrones de valencia de los semiconductores intrínsecos están enlazados al enlace covalente y los electrones de las capas más internas lo están al núcleo [9].

Un electrón que forma parte de un enlace covalente está estrechamente unido a él. Para poder lograr separarlo del enlace y que pueda moverse independientemente por el cristal, se necesita proporcionarle como mínimo una energía  $E_g$  conocida con el nombre de energía de la banda prohibida (en ocasiones es llamada energía del gap, debido a que en inglés la banda prohibida tiene el nombre de gap) [7].

Un semiconductor intrínseco cuando se encuentra a temperatura ambiente adquiere la energía calorífica (térmica) necesaria para que varios electrones de valencia puedan cruzar la banda prohibida hacia la banda de conducción, convirtiéndose de esta manera, en electrones libres conocidos con el nombre de electrones de conducción. Cuando el electrón da el salto de la banda de valencia hacia la de conducción, deja en su camino un espacio vacío en la banda de valencia a este espacio que deja el electrón se lo conoce como hueco [8].

Cada electrón que pasa de la banda de valencia a la de conducción por medio de energía externa deja un hueco en la banda de valencia y esto crea lo que se conoce como par electrón-hueco, cuando ocurre el proceso contrario es decir el electrón pasa de la banda de conducción a un hueco de la banda de valencia por pérdida de energía se lo llama recombinación [3].

Un átomo de un semiconductor intrínseco necesita una energía de ionización del orden de 1.1 eV para agitar al electrón de valencia, esta energía se convierte en energía disponible para el semiconductor incluso a temperatura ambiente. Debido a la agitación térmica de la estructura cristalina, los electrones de un par de enlaces covalentes salen [8].

En los semiconductores intrínsecos la generación de portadores se produce únicamente por la rotura de los enlaces covalentes. Debido a esto, la cantidad de electrones de conducción y de huecos son iguales, dado que ambos se generan por pares. El número de portadores se puede calcular a partir de las densidades de electrones libres  $n$  y de huecos  $p$ , donde  $n$  representa el número de electrones libres por  $\text{cm}^3$  y  $p$  el número de huecos por  $\text{cm}^3$  [7].

Como el cristal es eléctricamente neutro, el número de electrones libres o de conducción son iguales al número de agujeros, al aplicar una diferencia de potencial en el semiconductor, los electrones se moverán hacia el terminal positivo y los agujeros hacia el terminal negativo de la batería [9].

Un semiconductor intrínseco a temperatura ambiente posee electrones y huecos libres, pero este número es muy pequeño por lo que la conductividad ofrecida por el semiconductor intrínseco es muy baja, esto no es suficiente para ser de uso práctico. Para poder corregir esto se emplean los llamados semiconductores extrínsecos sobre los que se podrá aprender en próximos apartados [8].

#### ***2.6.2.1 Concentración intrínseca.***

En los semiconductores intrínsecos se tiene que la cantidad de huecos y electrones son iguales,

$$n = p = n_i$$

Se conoce que  $n$  es el número de electrones,  $p$  es el número de huecos y  $n_i$  es conocido como concentración intrínseca. La concentración intrínseca se basa en dos parámetros que son la temperatura y la energía de la banda prohibida ( $E_g$ ), el producto entre los portadores y los huecos es una constante [8]

$$n \times p = n_i^2 \text{ (ecuación 2)}$$

A esta relación se denomina ley de acción de masas. En un semiconductor la concentración intrínseca depende del tipo de material y la temperatura a la cual se encuentra funcionando el dispositivo:

$$n_i = A \times T^{3/2} \times e^{-(E_g/2) \times K_B \times T} \text{ (ecuación 3)}$$

Donde  $A$  es una constante que varía de un semiconductor a otro muy ligeramente,  $T$  es la temperatura en grados Kelvin,  $E_g$  la energía de la banda prohibida y  $K_B$  es la

constante de Boltzmann. Cuando  $E_g$  toma valores muy altos el valor de  $n_i$  es bajo, dado que se requerirá una cantidad mayor de energía para poder liberar un electrón. De modo diferente ocurre cuando el valor de la temperatura toma valores muy grandes, aquí existirán más cuantos de energía térmica por lo cual más electrones de valencia habrán podido absorber un cuanto para dar el paso a la banda de conducción esto provocará que  $n_i$  aumente [8].

### **2.6.3 Semiconductor extrínseco.**

Un semiconductor extrínseco es un monocristal, el cual está formado por átomos propios del semiconductor y átomos de otros elementos diferentes al semiconductor denominados impurezas. Mediante la adición de impurezas a un semiconductor puro en pequeñas cantidades, este puede mejorar su conductividad notablemente. El proceso de adición de impurezas a un cristal puro con el fin de mejorar su capacidad se lo conoce con el nombre de dopaje [7].

Los átomos de impurezas son de dos tipos:

- 1) Pentavalentes: son átomos que poseen 5 electrones de valencia como el antimonio (Sb), fósforo (Pb) o el arsénico (As). Estos átomos cuando se añaden a un semiconductor puro producen un exceso de electrones libres, es decir, donan electrones al semiconductor. Por este motivo a los átomos de impurezas pentavalentes se denominan átomos de impurezas donantes. El semiconductor producido por esta manera se llama semiconductor extrínseco tipo N o dopado tipo N [9].
- 2) Trivalentes: estos átomos poseen tres electrones de valencia como el indio (In), Boro (B) o el galio (Ga), estos átomos cuando se añaden a un semiconductor puro, en lugar de producir electrones libres, aceptan electrones del semiconductor. Por esta razón, los átomos de impurezas trivalentes se llaman aceptadores de átomos de impureza. El semiconductor así producido se denomina semiconductor extrínseco tipo P o dopado tipo P [9].

#### **2.6.3.1 Dopado tipo N.**

En el dopado tipo N los portadores mayoritarios son los electrones y los minoritarios los huecos. Una manera de modificar la conductividad del semiconductor consiste en incrementar la cantidad de electrones que existen en la banda de conducción,

disminuyendo la cantidad de huecos que hay en la banda de valencia, por medio de la introducción de átomos, que donen electrones.

Para realizar esta función se emplean átomos de impurezas pentavalentes. Los átomos pentavalentes al poseer cinco electrones en su banda de valencia, este átomo donador comparte cuatro de los cinco electrones que posee con un átomo vecino del Silicio y el restante queda con una unión energética muy débil [9].

Así al aumentar la temperatura provoca que este electrón posea la suficiente energía para alcanzar la banda de conducción y pueda desplazarse por la red, esto deja que el átomo este ionizado positivamente. Se debe tener en cuenta que en este proceso no se rompe ningún enlace, por este motivo no se genera ningún hueco [7].

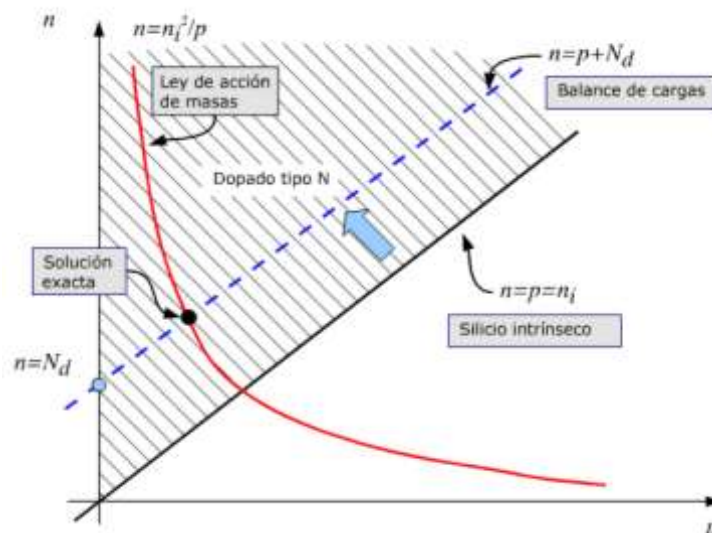


Figura 5: Dopado tipo N del Silicio [5]

El gran número de electrones libres procurará recombinarse con los huecos generados térmicamente, haciendo que el número de agujeros disminuya mucho más que el generado en un semiconductor intrínseco. Según la ley de acción de masas, el producto de la concentración de electrones y el agujero libre permanece constante, independientemente de la densidad de la impureza [8],

$$n_n \times p_n = n_i^2 \text{ (ecuación 3)}$$

Donde  $n_n$  es la concentración de electrones libres en el dopado tipo N y  $p_n$  es la concentración de huecos en el dopado tipo N.

Suponiendo que la concentración de átomos donantes  $N_D$  es mucho mayor que la concentración de electrones libres térmicamente generados tenemos,

$$n_n = N_D$$

De esto se desprende que la concentración de huecos generados por ionización térmica es,

$$p_n = n_i^2 / N_D \text{ (ecuación 4)}$$

Se observa que la concentración de electrones depende principalmente de la concentración del dopaje y apenas depende de la temperatura. Sin embargo, la concentración de agujeros depende tanto de la temperatura y la concentración de dopaje [8].

### 2.6.3.2 Dopado tipo P.

Otra forma de poder aumentar la conductividad en el cristal de Silicio es la de aumentar la cantidad de huecos que existen en la banda de valencia, teniendo una reducción en la cantidad de electrones libres existentes en la banda de conducción, empleando átomos de impurezas que acepten un electrón “trivalentes” [7].

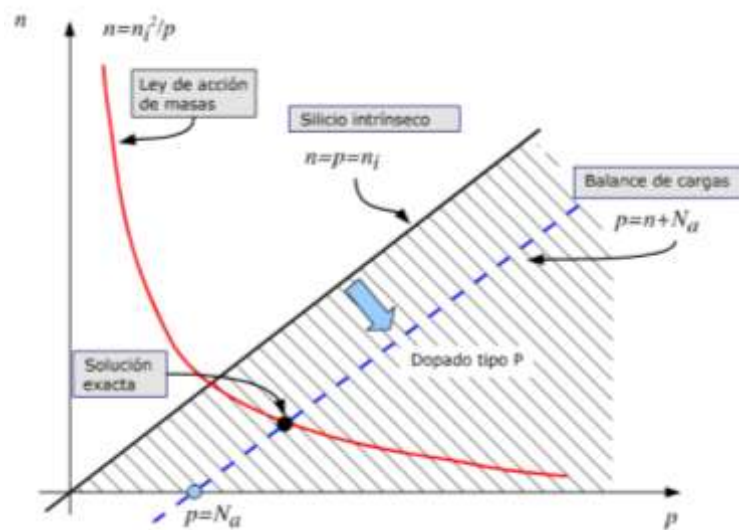


Figura 6: Dopado tipo P del Silicio [5]

El efecto de agregar un átomo trivalente da como resultado la creación de un semiconductor del tipo P, donde los huecos se convierten en los portadores mayoritarios. Bajo condiciones controladas, un átomo trivalente como el Boro puede reemplazar a un átomo de Silicio en la red cristalina, creando un hueco en un enlace



covalente. Se debe señalar que el semiconductor tipo P es eléctricamente neutro, ya que los protones en el núcleo neutralizan perfectamente a los electrones libre y enlazados [9].

El exceso de huecos se recombinará con los pocos electrones libres generados térmicamente, haciendo que el número de electrones libres disminuya aún más. Sin embargo, de acuerdo a la ley de acción de masa, el producto del hueco y la concentración de electrones libres tienden a permanecer constantes independientemente de la concentración de impurezas [8].

$$p_p \times n_p = n_i^2 \text{ (ecuación 5)}$$

Donde  $p_p$  es la concentración de huecos en el dopado tipo P,  $n_p$  es la concentración de electrones en el dopado tipo P.

Como en el apartado del dopado tipo N, se supone que la concentración de los átomos aceptadores  $N_A$  es mayor que los huecos generados térmicamente. Esto provoca que la cantidad de huecos sea aproximadamente la misma que la de los átomos de impurezas [9].

$$p_p \approx N_A$$

$$n_p = n_i^2 / N_A \text{ (ecuación 6)}$$

Como en el caso del dopado tipo N, la concentración de electrones libres depende tanto de la concentración del dopaje y la ionización térmica relacionada con la temperatura [9].

### ***2.6.3.3 Compensación de impurezas.***

Asiduamente los cristales semiconductores poseen impurezas de los dos tipos, este proceso es asiduamente empleado cuando se busca dopar una zona con el tipo de dopado contrario al ya existente en el cristal, o en una región en particular. La compensación radica en imponer al Silicio a un dopado tipo N (o P), seguido por un dopado tipo P (o N) respectivamente. En este caso particular se seguirá cumpliendo la ley de acción de masas [7].

Por lo consecuente el dopaje neto es la diferencia entre las dos concentraciones,  $N_D$  y  $N_A$ , cuando el valor de  $N_D$  sea mayor que el de  $N_A$  el cristal es del tipo N teniendo un

dopaje neto  $N_D^* = N_D - N_A$ , cuando suceda lo contrario, el semiconductor será del tipo P con un dopaje neto  $N_A^* = N_A - N_D$  [8].

La compensación de impurezas juega un papel muy importante en los procesos tecnológicos, debido a que permite convertir la región de un tipo en la del tipo contrario, solo se necesita incorporar al cristal una cantidad de impurezas superior del nuevo tipo para neutralizar y superar las que ya existían previamente [7].

## 2.7 Nivel de Fermi

El nivel de Fermi tiene un papel muy importante en la teoría de los dispositivos semiconductores, dependiendo de su posición en un cristal semiconductor este condicionará sus propiedades de conducción [5].

Para un semiconductor en equilibrio térmico, la ocupación del nivel de energía se describe mediante la función de distribución de Fermi-Dirac.

La probabilidad  $P(E)$  de que un electrón gane la energía térmica suficiente a una temperatura absoluta  $T$  tal que se encuentre ocupando un nivel de energía particular  $E$ , viene dada por la distribución de Fermi-Dirac. La energía de nivel de Fermi ( $E_f$ ) es el nivel de energía por encima del cual la probabilidad de encontrar un electrón a 0°K es 0 [5].

$$P(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_f)/k_B T}} \text{ (ecuación 7)}$$

Es decir, todos los electrones tienen una energía menor que la energía del nivel de Fermi a 0k. Ningún electrón existe sobre el nivel de Fermi a 0 k.

Pero a medida que la temperatura aumenta los electrones se pueden encontrar por encima del nivel de Fermi.

El nivel de Fermi es aquel nivel de energía que se encuentra ubicado en algún lugar entre la banda de conducción y la banda de valencia y su posición entre ambas bandas se decide por el dopado del cristal, es decir, es de tipo p o tipo n [8].

En los semiconductores dopados de tipo N, la energía del nivel de Fermi se encuentra cerca de la banda de conducción y en el semiconductor de tipo P se encuentra cerca de la banda de valencia porque en el tipo N se utilizan los átomos donadores los cuales se encargan de donar electrones al semiconductor y estos electrones se encuentran

muy cercanos a la banda de conducción así que a temperatura ambiente requiere muy poca energía para que todos los electrones donadores vayan a la banda de la conducción. Esto aumenta la energía de la banda de conducción y los semiconductores dopados de tipo P se emplea un método parecido con excepción de que se emplean átomos aceptadores y estos al final aumentan la energía de la banda de la valencia [5].

Para un semiconductor intrínseco, debido a las consideraciones simétricas, la probabilidad de que un electrón se encuentre en el límite inferior de la banda de conducción es aproximadamente igual a la posibilidad de encontrar un agujero en el límite superior de la banda de conducción. Esto quiere decir que en un semiconductor intrínseco el nivel de Fermi se encuentra ubicado en la banda prohibida a mitad del camino entre la banda de conducción y la de valencia [8].

## **2.8 Unión PN**

El diodo de unión PN es el más fundamental de todos los dispositivos semiconductores, tan básica es la teoría de operación que muchos especialistas dicen que entender de manera cualitativa y cuantitativa la unión PN ayuda a comprender el funcionamiento de la mayoría de dispositivos de estado sólido.

No es necesario resaltar que estos dispositivos han revolucionado las tecnologías de la información [5].

Se debe tener en cuenta que cuando se está hablando generalmente de un diodo de unión PN, se habla de una unión en equilibrio termodinámico o conocido simplemente como unión PN en equilibrio, esta unión se da cuando no existe alimentación externa en el dispositivo que permita un flujo de la corriente a través de este, ya sea por medio de una tensión aplicada, o cualquier otro factor que influya en el diodo [9].

Un diodo es un dispositivo semiconductor que consiste en una única unión PN. A diferencia de una resistencia, tiene una característica de corriente-tensión altamente no lineal y se utiliza a menudo como elemento rectificador. Algunos diodos pueden emitir luz (diodos emisores de luz), y otros pueden emitir luz láser (diodos láser). La combinación adecuada de dos uniones PN produce un transistor bipolar, un dispositivo capaz de amplificar señales eléctricas [9].

Gran parte de los dispositivos semiconductores empleados en la electrónica en su formación contienen regiones del tipo P y del tipo N. La unión PN es conocida también como juntura PN.

Cuando un cristal dopado tipo P se coloca en contacto con uno dopado tipo N con la intención de formar una sola pieza, el conjunto que obtenemos de esta unión se llama unión PN, diodo de unión o diodo de cristal. La superficie de contacto de los cristales del tipo P y del tipo N se lo conoce con el nombre de empalme. En la sección P, los huecos son los portadores mayoritarios, mientras que en la sección N los electrones son los portadores mayoritarios [8].

Si las regiones de tipo N y P están hechas del mismo material semiconductor (por ejemplo, silicio de tipo N y silicio de tipo P), la unión es una homojunción. Si los materiales semiconductores son diferentes (por ejemplo, silicio de tipo N y germanio de tipo P), la unión es una heterojunción [7].

Debido a la alta concentración de diferentes tipos de portadores de carga en las dos secciones, los huecos de la región P se difunden en la región N y los electrones de la región N se difunden en la región P. En ambos casos, cuando un electrón se encuentra con un hueco, uno cancela el efecto de la otra y como resultado una capa delgada en la unión se vuelve carente de portadores de carga. A esto denominamos capa o región de agotamiento o zona de carga espacial (Z.C.E) [8].

Al llevarse a cabo la unión de ambos cristales se crea una difusión de los electrones libres que se desplazan desde la zona N hacia la zona P y los huecos van desde la zona P hacia la N para recombinarse entre ellos. En esta zona llamada de difusión desaparecen las cargas móviles de ambos signos [9].

La carga neta de cada lado de la unión es igual, pero de sentido opuesto. Si el dopaje en un lado es menor, como es típicamente el caso, la región de agotamiento se extiende más profundamente en ese lado. La carga total en cada lado permanece igual y opuesta [7].

A medida que van disminuyendo las cargas móviles en la zona próxima a la unión va a presentarse una carga negativa en el cristal tipo P y una positiva en el tipo N. Al alcanzar estas cargas un valor definido se detiene el proceso de recombinación, debido a que la carga de tipo negativa a los electrones móviles del cristal N y la carga positiva

a los huecos del cristal P, esta carga que se manifiesta es una barrera de potencial que tiene un valor aproximado de un voltio [8].

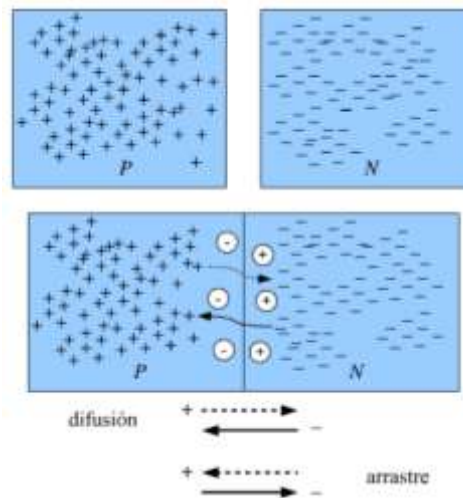


Figura 7: Unión entre Silicio tipo P y el tipo N [5]

La magnitud de la barrera de potencial es diferente para el diodo de unión de Germanio que la del Silicio. Sin embargo el valor de la barrera de potencial depende de la magnitud del dopaje del cristal semiconductor [9].

Se debe señalar que en la unión PN un gran campo eléctrico se establece debido a la diferencia de potencial desarrollado a través de ella.

### 2.8.1 Unión abrupta.

Un caso especial que se da en la juntura de unión PN es la que se obtiene debido a las técnicas de aleación o por las de difusión llamado unión abrupta.

Una unión PN abrupta es aquella en la que el flujo de electrones y huecos van de un semiconductor tipo P hacia otro N y este acoplamiento se realiza en una región que posee un espesor despreciable [9].

En esta unión se tiene el caso de que la concentración de portadores en uno de los lados de la juntura es mayor que la del otro lado.

Se dice que la unión abrupta tiene simetría si se cumple que  $N_D = N_A$  y es asimétrica si  $N_D \neq N_A$ , en este caso se tiene dos opciones si  $N_D \gg N_A$ , en este caso la concentración de impurezas es mayor del lado N, es decir existe una mayor cantidad de electrones, pero si  $N_A \gg N_D$ , aquí la concentración de impurezas es mayor del lado

P. Cuando se dan estos casos asimétricos se dice que la unión es abrupta hacia un lado [8].

### 2.8.2 Regiones neutras.

Existen dos tipos de regiones neutras, una que tiene dopado P y otra que tiene dopado N, en la región neutra con dopado tipo P, no existe campo eléctrico (es nulo), debido a este evento existe neutralidad de cargas y se tiene que en el dopado tipo P la concentración de huecos  $N_A = p$  y donde  $n \ll p$  y en la región neutra con dopado tipo N se tiene que,  $n = N_D$  y  $p \ll n$  [8].

### 2.8.3 Región de transición o Zona de carga espacial.

Al realizar la unión PN se presenta una difusión de cargas libres, se produce un movimiento de electrones que van del cristal N hacia al cristal P, es decir los electrones se mueven hacia donde exista una deficiencia de los mismos, esta difusión se la representa como  $J_e$ . Por medio de esta difusión de cargas se obtiene una zona donde existen iones positivos y negativos fijos que no pueden moverse, debido a que estos iones no poseen la carga que los convertía en neutros y que se ha desplazado hacia los huecos [8].

El efecto que estos iones fijos en la red cristalina es el de crear un campo eléctrico ( $E$ ) que se opone al movimiento de las cargas, es decir cuando el diodo está en equilibrio térmico aparece un campo eléctrico pequeño conocido como zona de carga espacial, región de transición, barrera interna de potencial entre otros nombres con los que se conoce y esta se opone al paso de los electrones [8].

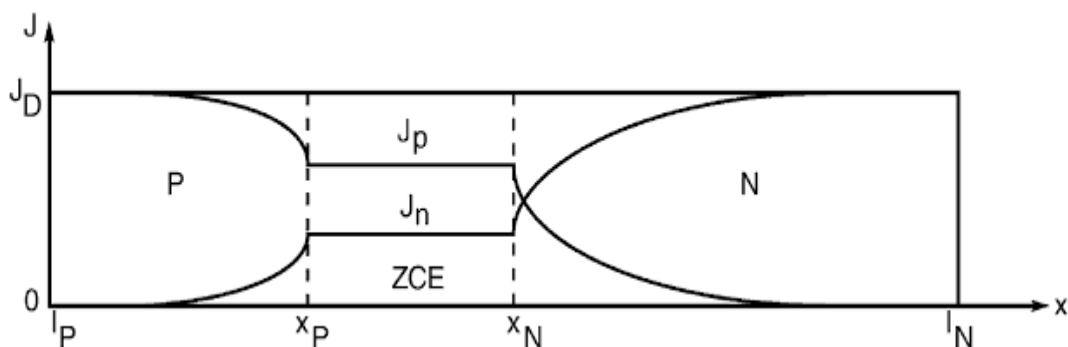


Figura 8: Diodo PN - zona de carga espacial [8]

La región de transición es una zona en donde no existen electrones ni huecos, pero está rodeado de iones positivos de un lado y de iones negativos del otro. Se asume que la zona de carga espacial sólo está formada por átomos ionizados, pero existen en cantidades muy pequeñas portadores móviles que se los puede considerar despreciables en comparación a la cantidad de impurezas [7].

La región de transición presenta dos comportamientos diferentes en el diodo al aplicarse una tensión externa, si esta tiene el mismo sentido que la zona de carga espacial (polarización inversa), esta región aumentará su tamaño imposibilitando la conducción de corriente eléctrica [7].

Pero si la tensión que se aplica es en sentido contrario al de la zona de carga espacial (polarización directa), esta zona disminuirá su tamaño y permitirá el flujo de electrones a través del dispositivo [7].

Estos tipos de polarizaciones se expondrán en mayor detalle más adelante para conocer mejor el comportamiento del diodo en estos casos.

#### **2.8.4 Barrera de potencial.**

La barrera de potencial es una tensión que se encuentra entre los extremos de la zona de carga. Esta tensión es la diferencia de potencial entre los iones de la unión y tiene un valor aproximado de 0,7 V. También es conocida como tensión de umbral o tensión de codo ( $V_Y$ ) [9].

Los dipolos que son parejas de iones positivos y negativos poseen un campo eléctrico entre los iones positivos y negativos, cuando un electrón libre ingresa a la zona de carga espacial, este campo eléctrico intenta retornarlos al cristal N. La intensidad del campo eléctrico aumenta con cada electrón que pasa hasta alcanzar el equilibrio [8].

Cuando la corriente supera la tensión de umbral esta crece de forma exponencial y por debajo de esta tensión es prácticamente nula.

#### **2.8.5 Polarización en la unión PN.**

Se conoce por polarización de la unión al hecho de aplicar una conexión externa al dispositivo. Existen dos tipos de polarizaciones para los cristales de unión PN y estas son:

##### ***2.8.5.1 Polarización directa.***

Esta polarización se da cuando conectamos el diodo a una fuente de, conectando el lado positivo de la fuente al lado P y el negativo al lado N. Cuando se da este caso los huecos positivos que están en la sección P son repelidos por el polo positivo de la batería hacia la unión PN, se tiene un comportamiento similar sobre el lado P, donde los electrones negativos del lado N son repelidos por el polo negativo de la batería hacia la unión PN, todo este proceso transcurre al mismo tiempo en ambos lados [10].

El movimiento de los electrones y los huecos que se da en la unión PN se opone a la tensión de potencial que se desarrolla a través de la unión.

En este suceso se tiene una corriente que puede circular con facilidad, esto se debe a que la fuente fuerza a que los huecos y electrones libres circulen hasta llegar a la unión. Cuando los electrones libres se dirigen hacia la unión, estos originan iones positivos en el lado derecho de la unión lo que aproximará a los electrones hacia el cristal desde la fuente [10].

De esta forma los electrones que se encuentren libres podrán marcharse del terminal negativo de la fuente y circular hacia el otro extremo del cristal. Lo que le ocurre al electrón después de abandonar el terminal negativo de la fuente este ingresa por el extremo derecho del cristal y viaja a través de la zona N como un electrón libre [9].

En la unión del dispositivo este se acopla con un hueco y alcanza el nivel de energía necesario para convertirse en un electrón de valencia. Se mueve a través de la zona P como electrón de valencia. Después de dejar el extremo izquierdo del cristal este circula al terminal positivo de la fuente [10].



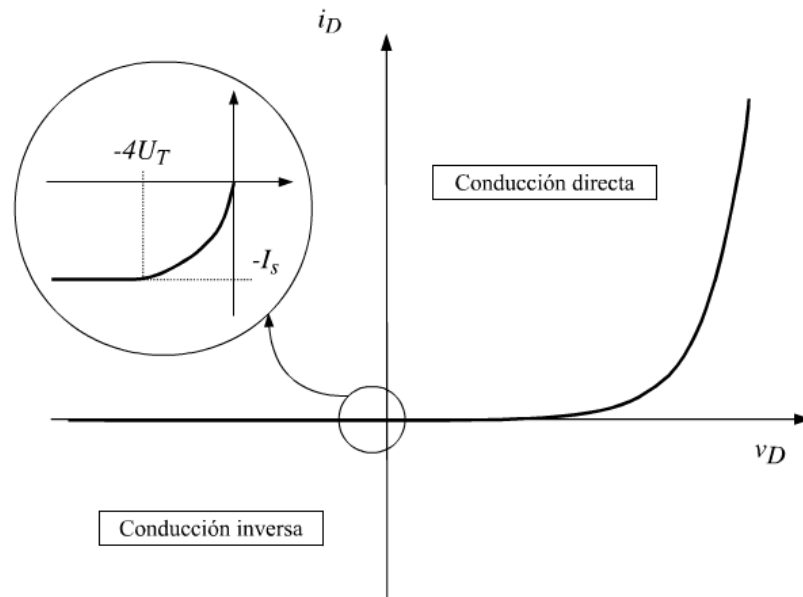


Figura 9: Conducción diodo de Silicio [5]

#### 2.8.5.2 Polarización inversa.

En la polarización inversa se invierte la polaridad de la fuente con respecto a la polarización directa, el terminal negativo de la fuente se conecta al lado P y el positivo al lado N, a este tipo de conexión se la llama polarización inversa [9].

En este tipo de polarización el terminal negativo de la fuente llama a los huecos y el positivo a los electrones libres, en este caso los huecos y electrones se alejan y la zona de carga espacial se agranda.

A mayor tamaño de la zona de carga espacial, mayor es su diferencia de potencial, esta zona deja de aumentar cuando alcanza un valor igual al de la tensión inversa aplicada, solo ahí los electrones y huecos dejan de separarse de la unión [9].

Mientras el valor de la tensión inversa sea más grande mayor será el valor de la zona de carga espacial.

En la polarización inversa se puede encontrar una corriente muy pequeña, dado que la energía térmica crea de forma continuas pares de electrón – hueco, esto provoca que existan pequeñas concentraciones de portadores minoritarios en ambos lados del dispositivo, estas en su gran mayoría se recombinan con los portadores mayoritarios, pero aquellos que se encuentran en la zona de carga espacial pueden vivir lo suficiente para poder cruzar la unión y de esta forma se obtiene una pequeña corriente [10].

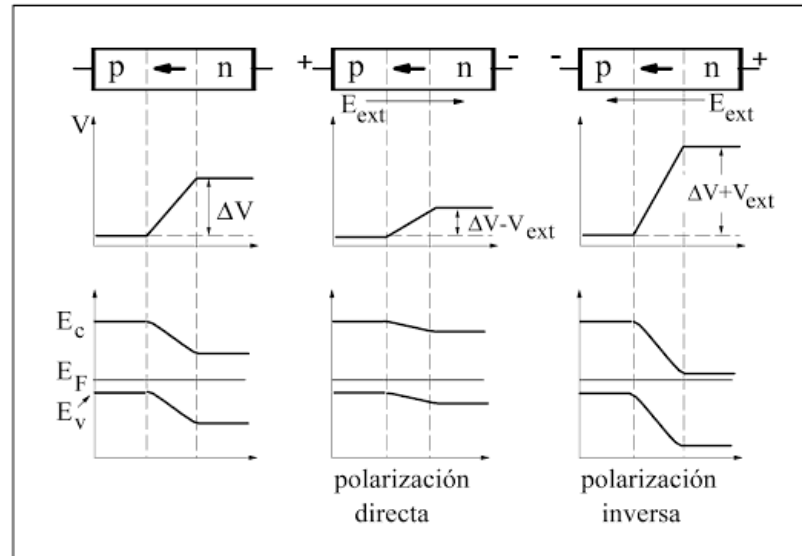


Figura 10: Polarización del diodo [6]

### 2.8.6 Efecto rectificador.

Este efecto de la variación del campo eléctrico (polarización), se basa en la característica de conceder el paso de la corriente en el sentido de P a N e impedir el paso de la corriente en el sentido contrario en este tipo de unión, este efecto se da cuando se polariza directamente al diodo, cuando se polariza inversamente al diodo se dan otros casos que se verán más adelante [8].

Cuando polarizamos directamente al diodo se tiene una disminución en la región de transición provocando el flujo de portadores mayoritarios de cada región hacia la otra región. De acuerdo a la ley de Fermi la distribución energética de los electrones en la banda de conducción disminuye mientras su energía se aleja de  $E_c$  [8].

Del mismo modo sucede con la cantidad de huecos que están en la banda de valencia, la cual disminuye mientras la energía se aleja de  $E_v$ . De este modo se tiene que en el efecto rectificador existe un gran flujo de huecos de P a N y de electrones de N a P [9].

### 2.8.7 Ruptura de la unión.

Otro efecto de la variación del campo eléctrico en los diodos es lo que llamamos ruptura de unión también conocido como tensión de ruptura, este caso se da cuando se polariza inversamente al diodo. Al polarizar inversamente el campo eléctrico adquiere un valor más grande, al alcanzar este campo eléctrico un valor muy grande (crítico),

que se conoce como campo eléctrico de ruptura, se origina un aumento inesperado y muy fuerte de la corriente, a este efecto se conoce como ruptura de la unión [9].

El efecto de la ruptura de la unión puede producirse por dos mecanismos distintos que son la ionización por impacto conocida también como efecto avalancha y por la generación de campo o efecto Zener también llamado efecto túnel [9].

#### ***2.8.7.1 Efecto avalancha.***

Un portador atraído por medio de un campo eléctrico consigue energía cinética durante el recorrido libre de dispersiones. Cuando el campo eléctrico es muy grande, el portador puede contener la suficiente energía necesaria para separar por medio de una colisión un electrón de valencia y transferirle la energía necesaria para convertirse en un electrón de conducción, generando un par electrón-hueco. Este proceso es conocido con el nombre de generación o ionización por impacto [7].

Para que se produzca el efecto avalancha es necesario que la zona de carga espacial sea relativamente ancha, y ello exige dopajes no muy elevados, al menos en una de las regiones [8].

Es necesario que este proceso suceda para poder tener el efecto avalancha. Los portadores que se originan también adquieren los efectos del campo eléctrico, al tenerse las condiciones necesarias para que estos nuevos portadores generen nuevos pares se da lugar a una multiplicación del número de portadores que es conocida con el nombre de multiplicación por impacto. Esto produce un acelerado aumento en la corriente de arrastre, a este efecto producido es lo que se llama efecto avalancha [7].

#### ***2.8.7.2 Efecto Zener.***

Al tener un diodo muy dopado su zona de carga espacial es muy reducida, debido a este evento el campo eléctrico que se presenta en esta zona es muy elevado.

Debido al elevado campo eléctrico que se presenta este es capaz de arrancar los electrones de la capa de valencia. La creación de electrones libres por este método es lo que se conoce como efecto Zener también conocido como efecto túnel o como emisión de campo intenso [8].

Este efecto se diferencia del efecto por avalancha debido a que el de avalancha necesita que los portadores minoritarios obtengan grandes velocidades para poder liberar

electrones de valencia mediante colisiones. Y el efecto Zener solo necesita la intensidad del campo eléctrico [8].

Se debe tener en cuenta que el efecto Zener se da cuando se tienen valores de tensión menores a 4V, el efecto de avalancha sucede para tensiones mayores a 6V. Cuando se trabaja en el rango entre 4 y 6V se pueden dar ambos efectos sin que prevalezca uno sobre otro [8].

### 2.8.8 Ecuación de Shockley.

Esta ecuación permite especificar el funcionamiento del diodo empleando la física de estado sólido. Es empleado como el modelo del diodo real, debido a que esta ecuación ayuda al modelo matemático hacer una aproximación muy satisfactoria del diodo real [11].

Esta ecuación posibilita la aproximación del comportamiento del diodo en la mayoría de las aplicaciones. Es el que se emplea con mayor frecuencia ya sea que se esté trabajando en las regiones de polarización directa o inversa [8].

$$I_D = I_S (e^{V_D/V_T} - 1) \text{ (ecuación 8)}$$

- $I_D$  es la corriente del diodo.
- $I_S$  corriente inversa de saturación.
- $V_D$  tensión del diodo.
- $V_T$  tensión térmica su fórmula está dada por:

$$V_T = \frac{K_B T}{q} \text{ (ecuación 9)}$$

- $K_B$  es la constante de Boltzmann.
- $T$  temperatura de operación del diodo en grados kelvin
- $q$  carga del electrón, tiene el valor de  $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$

La ecuación de Shockley se sabe modificar agregando un factor  $n$  al que se llama factor de idealidad, con un valor que oscila entre 1 y 2 dependiendo del material, siendo 1 para cuando se trata de un diodo de Germanio y 2 para cuando es uno de Silicio. Modificando la ecuación anterior tenemos.

$$I_D = I_S (e^{V_D/nV_T} - 1) \text{ (ecuación 10)}$$

Este factor de idealidad se agrega como una medida para aproximar los resultados al comportamiento de un diodo ideal, de acuerdo a la cual se fabricó el dispositivo [8].

### **2.8.9 Característica corriente – tensión de la unión PN.**

Al polarizar el semiconductor este provee una diferencia de potencial en sus extremos. Cuando la tensión que se aplica a los extremos es positiva en el dopado P y negativa en el dopado N se polariza al diodo de manera directa, en el caso contrario se polariza al diodo en inversa [8].

Estos tipos de polarizaciones ya fueron detallados en anteriores puntos, donde se también se describía que la tensión aplicada en polarización directa se hace para poder disminuir la barrera de potencial o de aumentarla en el caso de polarización inversa. Esta definición es muy exacta cuando se usan corrientes débiles, pero no es muy exacta cuando estas son grandes. La barrera de potencial tiene un valor cercano a  $V_{bi}-V$ . Cuando se trabaja en polarización directa la tensión aplicada  $V$  se toma como positiva, y en inversa como negativa.

Se tiene que, al disminuir la barrera de potencial, el campo eléctrico también disminuye, y si aumenta la barrera el campo eléctrico también lo hará. Debido a esta variación que se da en el campo eléctrico se rompe el equilibrio que se tenía en la unión entre las corrientes de difusión y de arrastre en la zona de carga espacial sin estar polarizada. Cuando disminuye el campo eléctrico, la corriente de arrastre también lo hace y domina la corriente de difusión [8].

En una polarización directa de la unión PN la corriente de difusión domina sobre la de arrastre, esto provoca una gran introducción de huecos desde el dopado P hacia el N, y otra fuerte introducción de electrones desde el dopado N hacia el dopado P. Estas grandes inserciones de portadores desde un dopado donde son mayoritarios dan origen a unas corrientes muy grandes que tienen el sentido de P hacia N [8].

En la polarización inversa de la unión PN el campo eléctrico de la zona de carga espacial aumenta, pero este aumento no produce un aumento en la corriente en el sentido N a P, debido a que en este tipo de polarización no existen portadores para el arrastre, no existen huecos en el dopado N que se puedan llevar a P, ni electrones en el dopado P para ser llevados a N. En este tipo de polarización el campo eléctrico se encarga de impedir la difusión de portadores mayoritarios y la corriente es nula como si estuviera en equilibrio [8].

Una explicación más completa sobre la unión PN indica que la corriente los huecos que introduce el dopado P sobre el N y la corriente de electrones que el dopado N introduce en el P están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$i_p = k_p \frac{n_i^2}{N_D} (e^{V/V_T} - 1) = I_{sp} (e^{V/V_T} - 1) \text{ (ecuación 11)}$$

$$i_n = k_n \frac{n_i^2}{N_A} (e^{V/V_T} - 1) = I_{sn} (e^{V/V_T} - 1) \text{ (ecuación 12)}$$

Aquí se tiene que  $k_p$  y  $k_n$  son valores constantes que dependen del tiempo de vida y de las constantes de difusión de huecos y electrones para los dopados N y P respectivamente en los cuales son minoritarios [8].

La ecuación 10 se obtiene como resultado de sumar las ecuaciones 11 y 12 y así se obtiene la corriente total del diodo

$$i = i_p + i_n = (I_{sp} + I_{sn}) (e^{V/V_T} - 1) = I_s (e^{V/V_T} - 1)$$

Al final se obtiene como respuesta la ecuación de Shockley, las corrientes  $i_p$  e  $i_n$  son inversamente proporcionales al dopado. Al controlar el dopado se puede controlar el valor de cada una de ellas. La zona con menor dopado es quien controla la corriente inversa de saturación en el diodo. La corriente de saturación presenta la misma dependencia de  $n_i^2$  con respecto a la temperatura [8].

#### **2.8.10 Curva característica del diodo.**

La curva característica del diodo es aquella donde se plasma el comportamiento del diodo, ya sea que esté polarizado en directa o en inversa, el comportamiento se lo grafica sobre una curva de tensión–corriente. En esta curva se puede observar que en el primer cuadrante donde se representa el comportamiento del diodo en polarización inversa no fluye una energía considerable por el diodo hasta que esta logre superar el potencial de barrera o tensión de umbral que tiene un valor de 0,7 V [8].

Una vez superado la tensión de umbral, los electrones y huecos se pueden mover a través de la unión en grandes cantidades, logrando así obtener con diminutos incrementos de tensión, grandes aumentos en la intensidad, el único obstáculo que se presenta para el paso de corriente a través del diodo es la baja resistencia que presentan los dopados N y P. Por esta razón conectamos al diodo con una resistencia en serie, la

cual se encarga de restringir los valores de tensión a unos soportables por el diodo para que este no se destruya [8].

Cuando se polariza el diodo en inversa, este se grafica en el tercer cuadrante de la curva y se puede constatar como la intensidad se mantiene constante con valores muy pequeños. Este valor constante pertenece a la corriente de saturación y seguirá así hasta que la tensión inversa alcance valores elevados. Cuando la tensión inversa  $V_i$  alcanza valores elevados como cientos de voltios, en la gran mayoría de diodos se alcanza la tensión de ruptura  $V_z$ , donde la intensidad en inversa adquiere valores considerables. Esto se da porque los portadores minoritarios crean un fenómeno de avalancha lo que provoca la destrucción de la unión y del dispositivo en general [8].

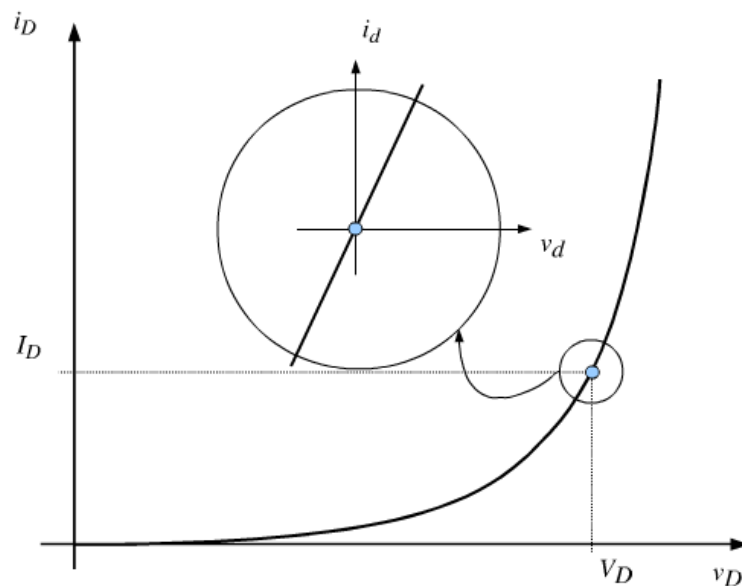


Figura 11: Curva característica del diodo [5]

**a) Corriente máxima ( $I_{\max}$ )**

Es la máxima intensidad de corriente que puede un diodo conducir sin dañarse, debido a que se da en función de la cantidad de calor que puede soportar el diodo depende del diseño del mismo.

**b) Corriente inversa de saturación ( $I_s$ )**

La corriente inversa de saturación aparece cuando se polariza al diodo inversamente por la formación de pares electrón hueco debido al efecto de la temperatura. Esta corriente es muy pequeña.

**c) Tensión de ruptura ( $V_r$ )**

Es la tensión máxima que puede tener un diodo polarizado inversamente antes de que suceda el efecto de avalancha.

**d) Tensión de umbral ( $V_Y$ )**

Como se indicó en apartados anteriores la tensión de umbral o barrera de potencial es la máxima corriente que puede transportar el diodo sin sufrir daños.

**e) Corriente superficial de fugas**

Al igual que la corriente inversa de saturación la corriente de fugas es muy pequeña, es un valor despreciable. Circula por la superficie del diodo en polarización inversa y está ligada en función de la tensión aplicada al diodo, por este motivo cuando se tiene un incremento en la tensión aplicada al diodo, aumenta la corriente superficial de fugas.

**f) Resistencia del diodo**

Se definen dos tipos de resistencia, la estática y la dinámica.

- *Resistencia estática:* está definida como la relación existente entre la tensión y la corriente, esto es  $V/I$ . Tomando un punto cualquiera en la curva característica I-V del diodo, esta resistencia se puede obtener como la inversa de la pendiente de la recta que une este punto tomado al azar con el origen de coordenadas [10].

Debido a que esta resistencia presenta variaciones de forma considerable de acuerdo al punto escogido, no es un parámetro ideal para definir el comportamiento del diodo.

- *Resistencia dinámica:* esta constituye un parámetro muy importante del diodo, esta resistencia se define como la inversa de la pendiente de la curva característica del diodo en el punto de funcionamiento [10].

En el diodo se cumple que la resistencia en polarización directa es pequeña y en polarización inversa es grande.



### **3. Modelado matemático**

#### **3.1 COMPORTAMIENTO DE LA UNIÓN P-N EN EQUILIBRIO TÉRMICO**

Para el estudio de la unión P-N se analiza primero dos semiconductores individuales, uno llamado del tipo P y otro del tipo N.

Estos materiales separados entre sí presentan las siguientes características:

- i) Semiconductor tipo P
  - El nivel de Fermi ( $E_F$ ) se halla en las cercanías de la banda de valencia.

- Posee una concentración de huecos mucho mayor que la de electrones.
- ii) Semiconductor tipo N
- El nivel de Fermi ( $E_F$ ) se encuentra en las cercanías de la banda de conducción.
  - Posee una concentración de electrones mucho mayor que la de huecos.

Tal como se muestra en la imagen a continuación.

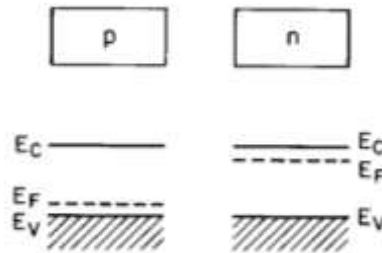


Figura 12. Semiconductores individuales tipo P y N -fuente [12]

Para la formación de una unión P-N es necesario estos dos materiales bajo las premisas antes mencionadas. Una vez que se conectan uno con otro se forma la unión. La distancia que se genera en la región de transición es extremadamente pequeña, por lo que existe un cambio brusco en el dopaje que se dirige desde la región P hasta N. esta aproximación pone en manifiesto las características de funcionamiento y de tensión – corriente de la unión P-N [12].

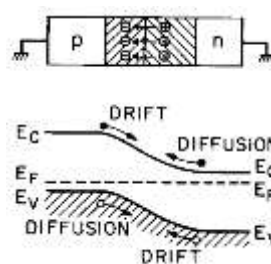


Figura 13. Bandas de energía en la unión P-N en equilibrio térmico [14]

Al unir estas dos regiones se estimula a la aparición de un elevado gradiente de concentración en las cercanías de la unión, es decir, se generan corrientes de difusión de huecos desde la región P hacia N, en cambio desde la región N se genera corrientes de difusión de electrones hacia la región P [12].

Estos movimientos de portadores entre las regiones P y N producen la aparición de iones aceptadores negativos  $N_A^-$  en la región P y además en la región N iones dadores

positivos  $N_D^+$ ; esta zona producida por efectos inherentes a la unión de estos materiales se la conoce como la “Zona de Carga Espacial (ZCE)”. En esta región no se encuentran huecos ni electrones; pero contiene átomos ionizados positivamente en un lado y átomos ionizados negativamente del otro lado [12].

Por lo tanto, se genera la formación de un campo eléctrico con líneas de campo dirigidas desde la región N hacia P debido a que la cara P de la unión cuenta con una zona con cargas fijas negativas, y cara N de la unión una zona con cargas fijas positivas. Es importante tener en cuenta de que la orientación del campo eléctrico generado es siempre en contra de la corriente de difusión del portador de carga considerado [12].

En base a la imagen que se muestra a continuación, es importante tomar en cuenta los intervalos de frontera que mantienen las regiones P y N

- La región tipo N, se extiende desde  $x = 0$  hasta  $x = x_n$
- La región tipo P, se extiende desde  $x = 0$  hasta  $x = -x_p$

Estas dos regiones se encuentran separadas en  $x = 0$ , lo cual corresponde a la unión metalúrgica entre los materiales P y N.

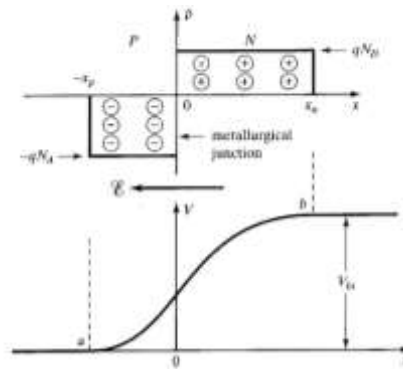


Figura 14. Zona de carga espacial: Sentido del campo eléctrico y potencial de contacto en equilibrio térmico [14]

### 3.1.1 Barrera de Potencial y bandas de Energía

El campo eléctrico formado en la ZCE debido a la presencia de cargas eléctricas da lugar a la formación de una diferencia de potencial eléctrico en dicha zona, el cual es llamado “Potencial de Contacto ( $V_{bi}$ )” [12].

En base a la imagen mostrada se puede identificar que un electrón ubicado en  $x > x_n$  posee menos energía potencial que uno ubicado en  $x < x_p$ , es decir, que los niveles energéticos que se encuentran en la región N es menores que los niveles de la región P en un valor proporcional a  $q V_{bi}$ .

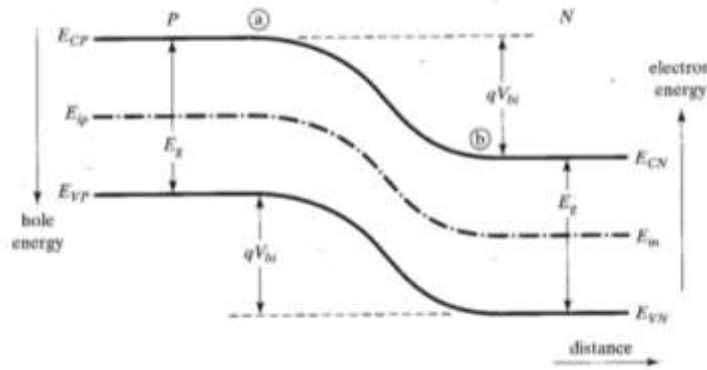


Figura 15. Bandas de energía en la ZCE [14]

### 3.1.2 Electrostática en la ZCE

En este punto se define el concepto de campo eléctrico como la fuerza ejercida sobre unidad de carga positiva o a su vez como el valor negativo del gradiente de la energía potencial.

$F = -q \varepsilon = -(\text{gradiente de la energía potencial del electrón})$  (ecuación 13)

Siendo  $E_i$  la magnitud de la energía potencial en la unión P-N para el caso unidimensional.

$$-q \varepsilon = -\frac{dE_i}{dx} \quad (\text{ecuación 14})$$

Entonces

$$\varepsilon = \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx} \quad (\text{ecuación 15})$$

Lo cual representa el campo eléctrico de un semiconductor sujeto a una diferencia de potencial constante [12].

Ahora se define al “Potencial Electrostático ( $\psi$ )” como aquella magnitud cuyo gradiente negativo iguala al campo eléctrico, es decir:

$$\varepsilon = -\frac{d\psi}{dx}$$

$$\psi = - \int \varepsilon dx \text{ (ecuación 16)}$$

Donde

$$\psi = - \int \left( \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx} \right) dx$$

$$\psi = - \frac{E_i}{q} \text{ (ecuación 17)}$$

Con el uso de la ecuación de Poisson para el caso unidimensional se puede relacionar:

- Potencial electrostático
- Energía potencial
- Campo eléctrico

$$\frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{\rho_s}{\epsilon_s} \Rightarrow \begin{cases} \frac{d^2\psi}{dx^2} = - \frac{\rho_s}{\epsilon_s} \\ \frac{d^2E_i}{dx^2} = q \frac{\rho_s}{\epsilon_s} \end{cases}$$

Entre la zona de carga espacial y las regiones neutras existe una zona denominada “Región de Transición”, la cual es una región de poco espesor donde la carga aportada por los iones de las impurezas es parcialmente compensada con la carga de los portadores móviles [12].

En esta región de transición la ZCE es:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = - \frac{d\varepsilon}{dx} = - \frac{\rho_s}{\epsilon_s} = - \frac{q}{\epsilon_s} (N_D - N_A + p - n) \text{ (ecuación 18)}$$

Siendo:

- i) Semiconductor tipo N,  $N_D \gg N_A \rightarrow N_A \approx 0$
- ii) Semiconductor tipo P,  $N_A \gg N_D \rightarrow N_D \approx 0$
- iii) Portadores móviles  $p = n = 0$

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = - \frac{\rho_s}{\epsilon_s} = \frac{q}{\epsilon_s} N_A \quad -x_p \leq x \leq 0 \text{ (ecuación 19)}$$

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = - \frac{\rho_s}{\epsilon_s} = - \frac{q}{\epsilon_s} N_D \quad 0 \leq x \leq x_n \text{ (ecuación 20)}$$

En las zonas neutras, la neutralidad de carga y densidad de las regiones P y N se mantiene igual a cero, es decir:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = 0 \text{ (ecuación 21)}$$

Entonces

$$N_D - N_A + p - n = 0 \text{ (ecuación 22)}$$

Por lo tanto

- Zona neutra tipo P, si  $N_D = 0$  y  $p \gg n \rightarrow p = N_A$
- Zona neutra tipo N, si  $N_A = 0$  y  $n \gg p \rightarrow n = N_D$

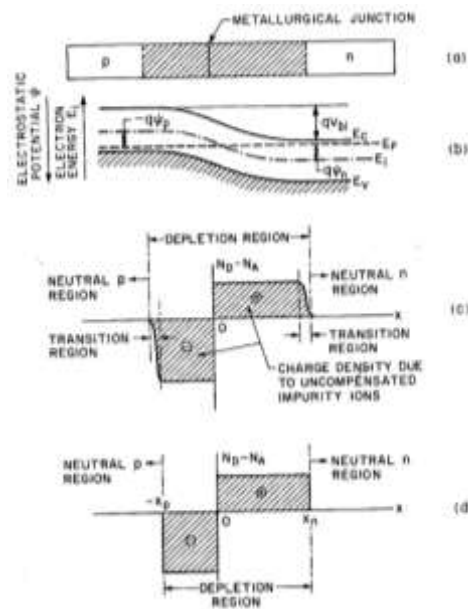


Figura 16. a) Unión PN. b) Diagramas de bandas. c) Distribución ZCE. d) Aproximación rectangular de la ZCE [14]

### 3.1.3 Constancia del nivel de Fermi

Para la densidad de corriente de huecos en el caso unidimensional se deberá satisfacer la siguiente ecuación.

$$J_p = J_p(\text{arraastre}) + J_p(\text{difusión}) = 0$$

Donde

$$J_p(\text{arraastre}) = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot \epsilon$$

$$J_p(\text{difusión}) = -q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx}$$

Entonces

$$J_p = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot \varepsilon - q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx}$$

Siendo

$$D_p = \frac{K \cdot T}{q} \mu_p \quad y \quad \varepsilon = \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx}$$

Entonces

$$J_p = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot \left[ \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx} \right] - q \cdot \left[ \frac{K \cdot T}{q} \mu_p \right] \cdot \frac{dp}{dx}$$

$$J_p = \mu_p \cdot p \cdot \frac{dE_i}{dx} - K \cdot T \cdot \mu_p \cdot \frac{dp}{dx} = 0$$

Siendo

$$p = n_i \cdot e^{(E_i - E_F)/K \cdot T}$$

$$p = n_i \cdot e^{\left( \frac{E_i}{K \cdot T} - \frac{E_F}{K \cdot T} \right)}$$

$$p = n_i \cdot e^{E_i/K \cdot T} \cdot e^{-E_F/K \cdot T}$$

$$\frac{dp}{dx} = n_i \cdot \frac{d}{dx} (e^{E_i/K \cdot T} \cdot e^{-E_F/K \cdot T})$$

$$\frac{dp}{dx} = n_i \cdot \left( \frac{1}{K \cdot T} e^{E_i/K \cdot T} \frac{dE_i}{dx} \cdot e^{-E_F/K \cdot T} - \frac{1}{K \cdot T} e^{-E_F/K \cdot T} \frac{dE_F}{dx} \cdot e^{E_i/K \cdot T} \right)$$

$$\frac{dp}{dx} = \frac{1}{K \cdot T} \cdot n_i \left( e^{E_i/K \cdot T} \cdot e^{-E_F/K \cdot T} \frac{dE_i}{dx} - e^{-E_F/K \cdot T} \cdot e^{E_i/K \cdot T} \frac{dE_F}{dx} \right)$$

$$\frac{dp}{dx} = \frac{1}{K \cdot T} \cdot n_i \left( e^{(E_i - E_F)/K \cdot T} \frac{dE_i}{dx} - e^{(E_i - E_F)/K \cdot T} \frac{dE_F}{dx} \right)$$

$$\frac{dp}{dx} = \frac{1}{K \cdot T} \cdot n_i e^{(E_i - E_F)/K \cdot T} \left( \frac{dE_i}{dx} - \frac{dE_F}{dx} \right)$$

$$\frac{dp}{dx} = \frac{p}{K \cdot T} \cdot \left( \frac{dE_i}{dx} - \frac{dE_F}{dx} \right) \text{ (ecuación 23)}$$

Entonces

$$J_p = \mu_p \cdot p \cdot \frac{dE_i}{dx} - K \cdot T \cdot \mu_p \cdot \left[ \frac{p}{K \cdot T} \cdot \left( \frac{dE_i}{dx} - \frac{dE_F}{dx} \right) \right] = 0$$

$$J_p = \mu_p \cdot p \cdot \frac{dE_i}{dx} - \mu_p \cdot p \cdot \left( \frac{dE_i}{dx} - \frac{dE_F}{dx} \right) = 0$$

$$J_p = \mu_p \cdot p \cdot \frac{dE_i}{dx} - \mu_p \cdot p \cdot \frac{dE_i}{dx} + \mu_p \cdot p \cdot \frac{dE_F}{dx} = 0$$

$$J_p = \mu_p \cdot p \cdot \frac{dE_F}{dx} = 0 \text{ (ecuación 24)}$$

$$\Rightarrow \frac{dE_F}{dx} = 0$$

Y de forma análoga con la densidad de corriente de electrones se tiene

$$J_n = J_n(\text{arrastre}) + J_n(\text{difusión}) = 0$$

$$J_n = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot \varepsilon - q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx}$$

$$J_n = \mu_n \cdot n \cdot \frac{dE_F}{dx} = 0 \text{ (ecuación 25)}$$

$$\Rightarrow \frac{dE_F}{dx} = 0$$

Por lo tanto, se concluye que a través de la unión PN el nivel de Fermi será constante independientemente de la posición x.

### 3.1.4 Potencial de Contacto

En este inciso se analiza la diferencia de potencial existente en la unión PN, en la cual se presenta un nivel de Fermi constante, tal como se lo demostró en el apartado anterior.

Como se lo menciono anteriormente esta diferencial de potencial se debe gracias a la existencia de iones positivos ( $N_D^+$ ) y negativos ( $N_A^-$ ) presentes en las regiones N y P respectivamente.

Debido a que los valores correspondientes al nivel de Fermi ( $E_i$ ) en las regiones P y N son distintos, mientras que en la ZCE el nivel de Fermi ( $E_F$ ) es constante [13], entonces los potenciales electrostáticos en las regiones P y N se definen de la siguiente manera:



$$\psi_p = -\frac{1}{q}(E_i - E_F)|_{x \ll -x_p} \quad (\text{Zona P}) \text{ (ecuación 26)}$$

$$\psi_n = -\frac{1}{q}(E_i - E_F)|_{x \gg x_n} \quad (\text{Zona N}) \text{ (ecuación 27)}$$

Siendo

- Región P,  $E_i > E_F \rightarrow \psi_p < 0$
- Región N,  $E_F > E_i \rightarrow \psi_n > 0$

Para la región neutra tipo P se tiene:

$$p = n_i \cdot e^{(E_i - E_F)/K \cdot T}$$

$$\ln\left(\frac{p}{n_i}\right) = \ln(e^{(E_i - E_F)/K \cdot T})$$

$$\ln\left(\frac{p}{n_i}\right) = \frac{(E_i - E_F)}{K \cdot T}$$

$$(E_i - E_F) = K \cdot T \cdot \ln\left(\frac{p}{n_i}\right) \text{ (ecuación 28)}$$

Donde

$$p = N_A$$

Entonces

$$(E_i - E_F) = K \cdot T \cdot \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

Por lo tanto

$$\psi_p = -\frac{K \cdot T}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \text{ (ecuación 29)}$$

De manera análoga para la región tipo N se puede encontrar el potencial electrostático con respecto al nivel de Fermi.

$$\psi_n = \frac{K \cdot T}{q} \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) \text{ (ecuación 30)}$$

Por tanto, el valor correspondiente al potencial de contacto es determinado bajo la sumatoria de  $\psi_n + |\psi_p|$

$$V_{bi} = \psi_n + |\psi_p|$$

$$V_{bi} = \left[ \frac{K \cdot T}{q} \ln \left( \frac{N_D}{n_i} \right) \right] + \left| - \frac{K \cdot T}{q} \ln \left( \frac{N_A}{n_i} \right) \right|$$

$$V_{bi} = \frac{K \cdot T}{q} \ln \left( \frac{N_D}{n_i} \right) + \frac{K \cdot T}{q} \ln \left( \frac{N_A}{n_i} \right)$$

$$V_{bi} = \frac{K \cdot T}{q} \left[ \ln \left( \frac{N_D}{n_i} \right) + \ln \left( \frac{N_A}{n_i} \right) \right]$$

$$V_{bi} = \frac{K \cdot T}{q} \left[ \ln \left( \frac{N_D}{n_i} \cdot \frac{N_A}{n_i} \right) \right]$$

$$V_{bi} = \frac{K \cdot T}{q} \ln \left( \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right) \text{ (ecuación 31)}$$

En la imagen a continuación se muestra una representación gráfica de la variación del potencial de contacto ( $V_{bi}$ ) en función de las concentraciones de impurezas ( $N_A$  o  $N_D$ ) para semiconductores comunes como **Si** y **GaAs**.

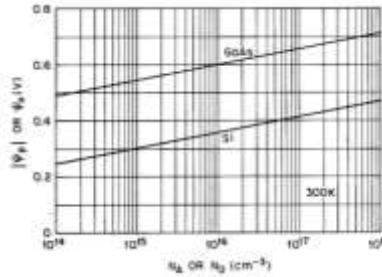


Figura 17. Representación gráfica del potencial de contacto en las regiones P y N en función de la concentración de impurezas [8]

### 3.1.5 Resolución de la ecuación de Poisson en la ZCE

En este inciso se estudia el problema electrostático en la ZCE situada a ambos lados de la unión PN. La ecuación que se utiliza para esto es:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon_s} (N_D - N_A) = \frac{q}{\epsilon_s} (N_A - N_D) \text{ (ecuación 32)}$$

Con lo cual se analiza la distribución neta de las impurezas (huecos y electrones)  $N_D - N_A$ . Asumiendo que en la región P la cantidad de iones positivos son cero  $N_D = 0$  y que en la región N la cantidad de iones negativos son cero  $N_A = 0$  [13], entonces se tiene.

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{q}{\epsilon_s} N_A \quad -x_p \leq x \leq 0 \text{ (Zona P)} \text{ (ecuación 33)}$$

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon_s} N_D \quad 0 \leq x \leq x_n \text{ (Zona N)} \text{ (ecuación 34)}$$

Para la resolución de estas ecuaciones se consideran dos casos.

- Unión abrupta, La cual es una unión PN que se forma por difusión poco profunda o implantación de iones de baja densidad [13].
- Unión gradual, Esta unión es representada por una concentración de impurezas en la ZCE que varía de forma lineal a lo largo de la unión [13].

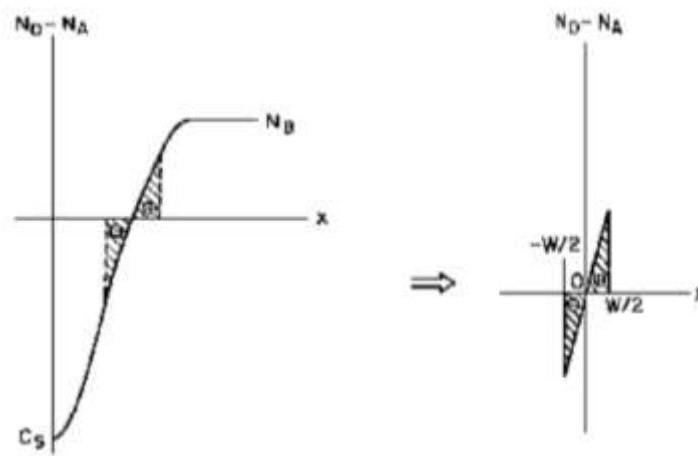


Figura 18. Unión gradual [11]

### 3.1.6 Unión Abrupta

En este tipo de unión se puede encontrar diferentes casos de concentración de impurezas, es decir:

- Si  $N_D = N_A$  se dice que la unión es simétrica.
- Si  $N_D \neq N_A$  se dice que la unión es asimétrica.

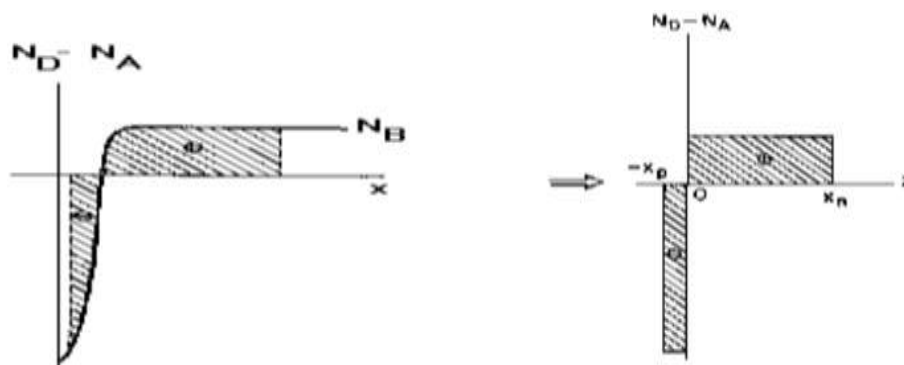


Figura 19. Unión abrupta [8]

En este segundo caso se tiene que:

- Si  $N_D \gg N_A$  se dice que la unión es del tipo  $p - n^+$
- Si  $N_A \gg N_D$  se dice que la unión es del tipo  $p^+ - n$

Cuando ocurre esto se denomina que la unión es “abrupta a un lado de la unión”.

Finalmente, para caracterizar la unión PN es necesario especificar:

- Potencial de contacto ( $V_{bi}$ )
- La anchura de la ZCE ( $W$ )
- Máximo valor del campo eléctrico interno ( $\mathcal{E}_{max}$ )
- Densidad de carga eléctrica ( $Q$ )

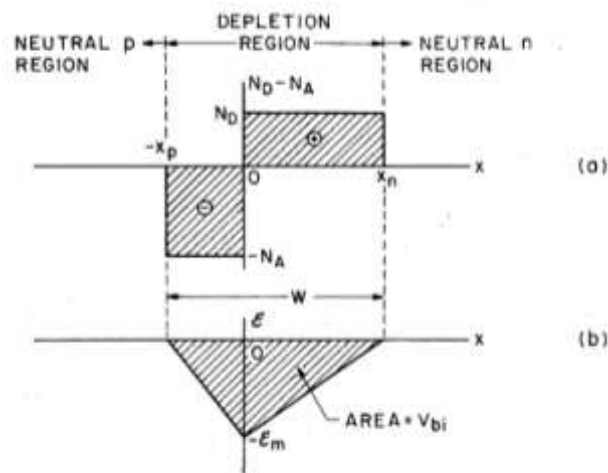


Figura 20. a) Distribución de carga en la ZCE en equilibrio térmico. b) Distribución de campo eléctrico [14]

Para que se cumpla la condición de neutralidad en la ZCE, utilizando la imagen anterior, es necesario que las cargas encerradas en esta región satisfagan la ecuación.

$$N_A \cdot x_p = N_D \cdot x_n \text{ (ecuación 35)}$$

Donde

$$W = x_p + x_n$$

En cambio, para el cálculo del campo eléctrico se utiliza la definición del potencial electrostático aplicado para las zonas P y N de forma individual.

*Región P, donde  $-x_p \leq x \leq 0$*

$$\varepsilon = -\frac{d\psi}{dx} \text{ (ecuación 36)}$$

Donde

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{q}{\epsilon_s} N_A$$

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{d\psi}{dx} \right) = \frac{q}{\epsilon_s} N_A$$

$$\int d \left( \frac{d\psi}{dx} \right) = \int_{-x_p}^x \frac{q}{\epsilon_s} N_A dx + cte$$

$$\frac{d\psi}{dx} = \int_{-x_p}^x \frac{q}{\epsilon_s} N_A dx + cte$$

$$\frac{d\psi}{dx} = \frac{q}{\epsilon_s} N_A x \Big|_{-x_p}^x + cte$$

$$\frac{d\psi}{dx} = \frac{q N_A (x + x_p)}{\epsilon_s} + cte$$

Entonces

$$\varepsilon = -\frac{q N_A (x + x_p)}{\epsilon_s} + cte$$

Aplicando la condición de frontera

$$\varepsilon(-x_p) = 0$$

Entonces

$$\varepsilon(-x_p) = -\frac{q N_A (-x_p + x_p)}{\epsilon_s} + cte = 0$$

$$cte = 0$$

Por lo tanto

$$\varepsilon(x) = -\frac{q N_A (x+x_p)}{\epsilon_s}; \quad -x_p \leq x \leq 0 \text{ (Zona P)} \text{ (ecuación 37)}$$

Región N, donde  $0 \leq x \leq x_n$

Empleando la ecuación 36 se puede definir

$$\begin{aligned} \frac{d^2\psi}{dx^2} &= -\frac{q}{\epsilon_s} N_D \\ \frac{d}{dx} \left( \frac{d\psi}{dx} \right) &= -\frac{q}{\epsilon_s} N_D \\ \int d \left( \frac{d\psi}{dx} \right) &= \int_{x_n}^x -\frac{q}{\epsilon_s} N_D dx + cte \\ \frac{d\psi}{dx} &= \int_{x_n}^x -\frac{q}{\epsilon_s} N_D dx + cte \\ \frac{d\psi}{dx} &= -\frac{q}{\epsilon_s} N_D x \Big|_{x_n}^x + cte \\ \frac{d\psi}{dx} &= -\frac{q N_D (x - x_n)}{\epsilon_s} + cte \end{aligned}$$

Entonces

$$\varepsilon = \frac{q N_D (x - x_n)}{\epsilon_s} + cte$$

Aplicando la condición de frontera

$$\varepsilon(x_n) = 0$$

Entonces

$$\begin{aligned} \varepsilon(x_n) &= \frac{q N_D (x_n - x_n)}{\epsilon_s} + cte = 0 \\ cte &= 0 \end{aligned}$$

Por lo tanto

$$\varepsilon(x) = \frac{q N_D (x-x_n)}{\epsilon_s}; \quad 0 \leq x \leq x_n \text{ (Zona N) (ecuación 38)}$$

Este campo eléctrico presenta un valor máximo  $\varepsilon_m$  cuando  $x = 0$ , por lo que

$$\text{Región P: } \varepsilon(0) = -\frac{q N_A (0+x_p)}{\epsilon_s} = -\frac{q N_A x_p}{\epsilon_s} \text{ (ecuación 39)}$$

$$\text{Región P: } \varepsilon(0) = \frac{q N_D (0-x_n)}{\epsilon_s} = -\frac{q N_D x_n}{\epsilon_s} \text{ (ecuación 40)}$$

Entonces

$$\varepsilon_m = \frac{q N_A x_p}{\epsilon_s} = \frac{q N_D x_n}{\epsilon_s} \text{ (ecuación 41)}$$

Haciendo uso de las ecuaciones 38, 39, 40 y 41 se puede reescribir la ecuación que rige el campo eléctrico en la región N como:

$$\varepsilon(x) = (-)\varepsilon_m + \frac{q N_D x}{\epsilon_s}; \quad 0 \leq x \leq x_n \text{ (Zona N) (ecuación 42)}$$

De manera análoga a la ecuación 42 se puede reescribir la ecuación de campo eléctrico para la región P, como:

$$\varepsilon(x) = (-)\varepsilon_m - \frac{q N_A x}{\epsilon_s}; \quad -x_p \leq x \leq 0 \text{ (Zona P) (ecuación 43)}$$

Para hallar el valor del potencial de contacto existente entre estas regiones de la ZCE, se debe integrar el campo eléctrico entre las fronteras de la anchura de la ZCE entre  $[-x_p, x_n]$  [13], por lo que:

$$V_{bi} = (-) \int_{-x_p}^{x_n} \varepsilon(x) dx \text{ (ecuación 44)}$$

$$V_{bi} = - \int_{-x_p}^0 \varepsilon(x) dx - \int_0^{x_n} \varepsilon(x) dx \text{ (ecuación 45)}$$

$$V_{bi} = - \int_{-x_p}^0 \left[ -\frac{q N_A (x+x_p)}{\epsilon_s} \right] dx - \int_0^{x_n} \left[ \frac{q N_D (x-x_n)}{\epsilon_s} \right] dx$$

$$V_{bi} = \frac{q N_A}{\epsilon_s} \int_{-x_p}^0 (x+x_p) dx - \frac{q N_D}{\epsilon_s} \int_0^{x_n} (x-x_n) dx$$

$$V_{bi} = \frac{q N_A}{\epsilon_s} \left( \frac{1}{2} x^2 + x_p \cdot x \right) \Big|_{-x_p}^0 - \frac{q N_D}{\epsilon_s} \left( \frac{1}{2} x^2 - x_n \cdot x \right) \Big|_0^{x_n}$$

$$V_{bi} = \frac{q N_A}{\epsilon_s} \left[ -\frac{1}{2} (-x_p)^2 - x_p \cdot (-x_p) \right] - \frac{q N_D}{\epsilon_s} \left[ \frac{1}{2} (x_n)^2 - x_n \cdot (x_n) \right]$$

$$V_{bi} = \frac{q N_A}{\epsilon_s} \left( -\frac{1}{2} x_p^2 + x_p^2 \right) - \frac{q N_D}{\epsilon_s} \left( \frac{1}{2} x_n^2 - x_n^2 \right)$$

$$V_{bi} = \frac{q N_A}{\epsilon_s} \left( \frac{1}{2} x_p^2 \right) - \frac{q N_D}{\epsilon_s} \left( -\frac{1}{2} x_n^2 \right)$$

$$V_{bi} = \frac{q N_A x_p}{\epsilon_s} \left( \frac{1}{2} x_p \right) + \frac{q N_D x_n}{\epsilon_s} \left( \frac{1}{2} x_n \right)$$

$$V_{bi} = \frac{1}{2} \epsilon_m (x_p) + \frac{1}{2} \epsilon_m (x_n)$$

$$V_{bi} = \frac{1}{2} \epsilon_m (x_p + x_n)$$

$$V_{bi} = \frac{1}{2} \epsilon_m W \text{ (ecuación 46)}$$

Lo cual implica que el valor del potencial de contacto es igual al área bajo la curva que encierra al campo eléctrico.

La anchura de la ZCE se la puede encontrar utilizando las expresiones de neutralidad y del potencial de contacto, por lo que se tiene.

$$V_{bi} = \frac{q N_A}{2\epsilon_s} x_p^2 + \frac{q N_D}{2\epsilon_s} x_n^2 \text{ (ecuación 47)}$$

$$V_{bi} = \frac{q}{2\epsilon_s} (N_A \cdot x_p \cdot x_p + N_D \cdot x_n \cdot x_n)$$

Siendo

$$N_A \cdot x_p = N_D \cdot x_n$$

Entonces

$$V_{bi} = \frac{q}{2\epsilon_s} (N_A \cdot x_p \cdot x_p + N_A \cdot x_p \cdot x_n)$$

$$V_{bi} = \frac{q}{2\epsilon_s} N_A \cdot x_p (x_p + x_n)$$

$$V_{bi} = \frac{q}{2\epsilon_s} N_A \cdot x_p (x_p + x_n) \cdot \frac{(x_p + x_n)}{(x_p + x_n)}$$



$$V_{bi} = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} (x_p + x_n)^2 \cdot \frac{x_p}{(x_p + x_n)}$$

$$V_{bi} = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} W^2 \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{x_n}{x_p}\right)}$$

Donde

$$\frac{N_A}{N_D} = \frac{x_n}{x_p}$$

Entonces

$$V_{bi} = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} W^2 \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{N_A}{N_D}\right)}$$

$$V_{bi} = \frac{q}{2\epsilon_s} W^2 \cdot \frac{N_A N_D}{(N_D + N_A)}$$

Despejando la anchura W

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left[ \frac{N_D + N_A}{N_A N_D} \right] V_{bi}}$$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left[ \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right] V_{bi}} \text{ (ecuación 48)}$$

Entonces queda demostrado que el ancho de la ZCE depende de las sustancias dopante  $N_A$ ,  $N_D$  y disminuyen al aumentar sus concentraciones.

En la imagen a continuación se muestra una distribución de carga para una unión del tipo  $p^+ - n$  (unión abrupta a un lado) en la que  $N_A \gg N_D$ .

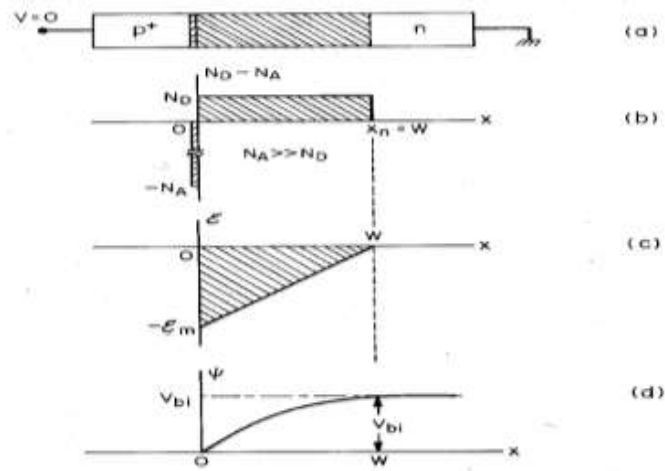


Figura 21. a) Unión abrupta donde  $N_A \gg N_D$ . b) Distribución en la ZCE. c) Distribución del campo eléctrico. d) Potencial electrostático [8]

### 3.1.7 La unión gradual

En este tipo de unión, la distribución de impurezas es lineal, tal como se muestra en la imagen a continuación.

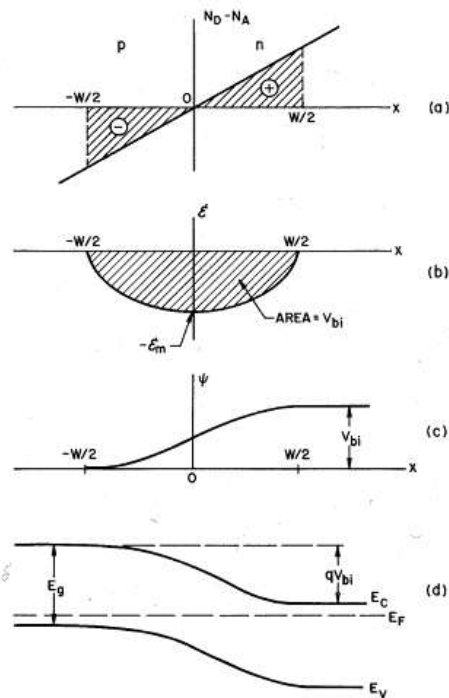


Figura 22. a) Distribución en la ZCE. b) Distribución del campo eléctrico. c) Potencial electrostático. d) Diagrama de bandas de energía [11]

La variación que presenta las concentraciones de impurezas es del tipo lineal, es decir:

$$N_D - N_A = a \cdot x \text{ (ecuación 49)}$$

Donde

$$a = \text{Gradiente de impurezas} = \frac{d(N_D - N_A)}{dx} [cm^4]$$

Al multiplicar la ecuación lineal de la concentración de impurezas por la carga del electrón, se tiene:

$$\rho_s = q(N_D - N_A) = q \cdot a \cdot x \quad \text{entre} \left[ -\frac{W}{2} \leq x \leq \frac{W}{2} \right]$$

Donde

$$x > 0 \quad \Rightarrow \quad \rho_s < 0$$

$$x < 0 \quad \Rightarrow \quad \rho_s > 0$$

La condición de neutralidad requiere que la anchura de la ZCE este dividida en dos partes iguales entre la región N y P, de modo que  $x_n = \frac{W}{2}$  y  $-x_p = -\frac{W}{2}$  [14].

La ecuación de Poisson que denota esta distribución de impurezas es:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = (-) \frac{d\varepsilon}{dx} = (-) \frac{\rho_s}{\epsilon_s} = (-) \frac{q}{\epsilon_s} a \cdot x \quad \text{entre} \left[ -\frac{W}{2} \leq x \leq \frac{W}{2} \right]$$

Integrando el campo eléctrico, se obtiene

$$(-) \frac{d\varepsilon}{dx} = (-) \frac{q}{\epsilon_s} a \cdot x$$

$$d\varepsilon = \frac{q}{\epsilon_s} a \cdot x dx$$

$$\int d\varepsilon = \int_{-\frac{W}{2}}^x \frac{q}{\epsilon_s} a \cdot x dx + cte$$

$$\varepsilon(x) = \frac{q}{\epsilon_s} a \left[ \frac{x^2}{2} \right] \Big|_{-\frac{W}{2}}^x + cte$$

$$\varepsilon(x) = \frac{q}{\epsilon_s} a \left[ \frac{x^2}{2} - \frac{\left(-\frac{W}{2}\right)^2}{2} \right] + cte$$

$$\varepsilon(x) = -\frac{q}{\epsilon_s} a \left[ \frac{\left(\frac{W}{2}\right)^2 - x^2}{2} \right] + cte \quad \text{entre } \left[ -\frac{W}{2} \leq x \leq \frac{W}{2} \right]$$

Siendo la condición de frontera que  $\varepsilon\left(-\frac{W}{2}\right) = \varepsilon\left(\frac{W}{2}\right) = 0$ , entonces

$$\varepsilon\left(\frac{W}{2}\right) = -\frac{q}{\epsilon_s} a \left[ \frac{\left(\frac{W}{2}\right)^2 - \left(\frac{W}{2}\right)^2}{2} \right] + cte = 0$$

$$cte = 0$$

Por lo tanto

$$\varepsilon(x) = -\frac{q}{\epsilon_s} a \left[ \frac{\left(\frac{W}{2}\right)^2 - x^2}{2} \right] \quad \text{entre } \left[ -\frac{W}{2} \leq x \leq \frac{W}{2} \right]$$

Donde el valor máximo para el campo eléctrico se encuentra en  $x = 0$ , entonces

$$\varepsilon_{max} = \frac{q \cdot a \cdot W^2}{8 \cdot \epsilon_s} \text{ (ecuación 50)}$$

Para obtener la expresión de la distribución de carga electrostática se deberá integrar nuevamente el campo eléctrico, por lo tanto

$$\frac{d\psi}{dx} = (-)\varepsilon(x)$$

$$\int d\psi = - \int_{-\frac{W}{2}}^x \varepsilon(x) dx + cte$$

$$\int d\psi = - \int_{-\frac{W}{2}}^x -\frac{q}{\epsilon_s} a \left[ \frac{\left(\frac{W}{2}\right)^2 - x^2}{2} \right] dx + cte$$

$$\psi(x) = \frac{q \cdot a}{2 \cdot \epsilon_s} \int_{-\frac{W}{2}}^x \left[ \left( \frac{W}{2} \right)^2 - x^2 \right] dx + cte$$

$$\psi(x) = \frac{q \cdot a}{2 \cdot \epsilon_s} \left[ \left( \frac{W}{2} \right)^2 x - \frac{x^3}{3} \right] \Big|_{-\frac{W}{2}}^x + cte$$

$$\psi(x) = \frac{q \cdot a}{2 \cdot \epsilon_s} \left[ \left( \frac{W}{2} \right)^2 x - \frac{x^3}{3} - \left( \frac{W}{2} \right)^2 \left( -\frac{W}{2} \right) + \frac{\left( -\frac{W}{2} \right)^3}{3} \right] + cte$$

$$\psi(x) = \frac{q \cdot a}{2 \cdot \epsilon_s} \left[ \left( \frac{W}{2} \right)^2 x - \frac{x^3}{3} + \left( \frac{W}{2} \right)^3 - \frac{1}{3} \left( \frac{W}{2} \right)^3 \right] + cte$$

$$\psi(x) = \frac{q \cdot a}{2 \cdot \epsilon_s} \left[ \left( \frac{W}{2} \right)^2 x - \frac{x^3}{3} + \frac{2}{3} \left( \frac{W}{2} \right)^3 \right] + cte \text{ (ecuación 51)}$$

Donde la condición de frontera establece que  $\psi \left( -\frac{W}{2} \right) = 0$ , entonces

$$\psi \left( -\frac{W}{2} \right) = \frac{q \cdot a}{2 \cdot \epsilon_s} \left[ \left( \frac{W}{2} \right)^2 \left( -\frac{W}{2} \right) - \frac{\left( -\frac{W}{2} \right)^3}{3} + \frac{2}{3} \left( \frac{W}{2} \right)^3 \right] + cte = 0$$

$$\frac{q \cdot a}{2 \cdot \epsilon_s} \left[ -\left( \frac{W}{2} \right)^3 + \frac{1}{3} \left( \frac{W}{2} \right)^3 + \frac{2}{3} \left( \frac{W}{2} \right)^3 \right] + cte = 0$$

$$\frac{q \cdot a}{2 \cdot \epsilon_s} \left[ -\frac{2}{3} \left( \frac{W}{2} \right)^3 + \frac{2}{3} \left( \frac{W}{2} \right)^3 \right] + cte = 0$$

$$cte = 0$$

Por lo tanto, la ecuación de la distribución de carga electrostática es

$$\psi(x) = \frac{q \cdot a}{2 \cdot \epsilon_s} \left[ \left( \frac{W}{2} \right)^2 x - \frac{x^3}{3} + \frac{2}{3} \left( \frac{W}{2} \right)^3 \right] \text{ (ecuación 52)}$$

De igual manera se calcula el potencial de contacto integrando el campo eléctrico entre

$$\left[ -\frac{W}{2}, \frac{W}{2} \right]$$

$$V_{bi} = - \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} \varepsilon(x) dx$$

$$V_{bi} = - \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} - \frac{q}{\epsilon_s} a \left[ \frac{\left(\frac{W}{2}\right)^2 - x^2}{2} \right] dx$$

$$V_{bi} = \frac{q \cdot a}{2 \cdot \epsilon_s} \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} \left[ \left(\frac{W}{2}\right)^2 - x^2 \right] dx$$

$$V_{bi} = \frac{q \cdot a}{2 \cdot \epsilon_s} \left[ \left(\frac{W}{2}\right)^2 x - \frac{x^3}{3} \right] \Big|_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}}$$

$$V_{bi} = \frac{q \cdot a}{2 \cdot \epsilon_s} \left[ \left(\frac{W}{2}\right)^2 \left(\frac{W}{2}\right) - \frac{\left(\frac{W}{2}\right)^3}{3} - \left(\frac{W}{2}\right)^2 \left(-\frac{W}{2}\right) + \frac{\left(-\frac{W}{2}\right)^3}{3} \right]$$

$$V_{bi} = \frac{q \cdot a}{2 \cdot \epsilon_s} \left[ \left(\frac{W}{2}\right)^3 - \frac{1}{3} \left(\frac{W}{2}\right)^3 + \left(\frac{W}{2}\right)^3 - \frac{1}{3} \left(\frac{W}{2}\right)^3 \right]$$

$$V_{bi} = \frac{q \cdot a \cdot W^3}{2 \cdot \epsilon_s} \left[ \frac{1}{8} - \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{8} + \frac{1}{8} - \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{8} \right]$$

$$V_{bi} = \frac{q \cdot a \cdot W^3}{2 \cdot \epsilon_s} \left[ \frac{3 - 1 + 3 - 1}{3 \cdot 8} \right]$$

$$V_{bi} = \frac{q \cdot a \cdot W^3}{2 \cdot \epsilon_s} \left[ \frac{4}{3 \cdot 8} \right]$$

$$V_{bi} = \frac{q \cdot a \cdot W^3}{12 \cdot \epsilon_s}$$

Finalmente, la anchura de la ZCE es:

$$W = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot \epsilon_s \cdot V_{bi}}{q \cdot a}} \text{(ecuación 53)}$$

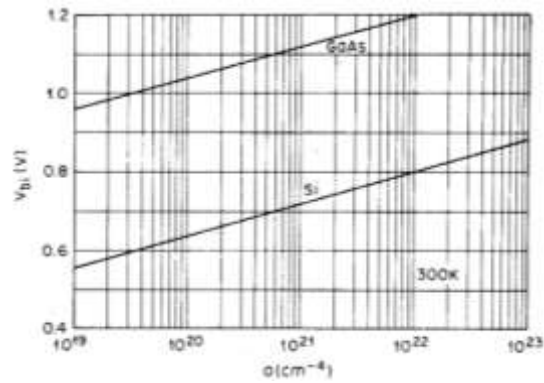


Figura 23. Potencial de contacto del semiconductor [8]

## 3.2 FUNCIÓN DE LA CORRIENTE A TRAVÉS DE LA UNIÓN PN

### 3.2.1 Corriente en la unión PN

En el cálculo de la corriente existente en la unión PN en un semiconductor que se encuentre ya sea en régimen estacionario o permanente, se debe considerar el uso de la ley de continuidad de la corriente eléctrica que dice “La corriente total debe ser la misma en todas las secciones de la unión” [15].

En el estudio de las corrientes del diodo se puede suponer insignificantes los efectos que presentan la generación y la recombinación de portadores en la zona de carga espacial (ZCE). Esto quiere decir que, que la cantidad de huecos que atraviesan la zona de carga espacial por unidad de tiempo debe ser igual a la cantidad de huecos que la abandonan, y este mismo proceso ocurre con los electrones que penetran la ZCE [15].

En la imagen a continuación se muestra la distribución de la corriente eléctrica a lo largo de la unión PN. La relación existente que se encuentra entre la corriente vs tensión, empleando las hipótesis anteriores, la ecuación que se obtiene es la denominada “Ecuación del diodo Ideal” o también llamada la “Ecuación de Shockley”.

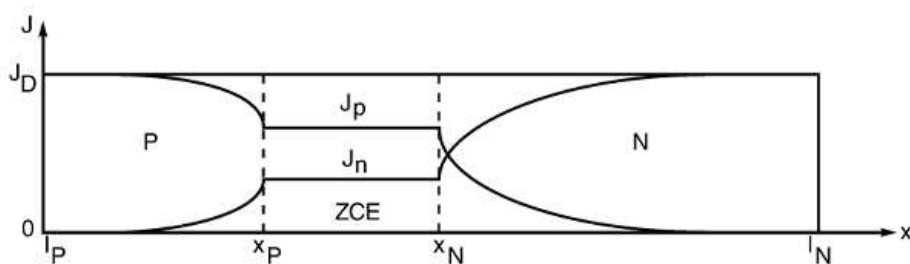


Figura 24. Distribución de la corriente de electrones y huecos [8]

Por lo tanto, la corriente del diodo es:

$$J_D = (J_p + J_n)|_{ZCE} = J_p(x_N) + J_n(x_p) \text{ (ecuación 54)}$$

Para obtener la corriente  $J_p(x_N)$ , se necesita la corriente de huecos existente en la zona N que se encuentra en la frontera de la zona de carga espacial. De manera similar ocurre con la corriente  $J_n(x_p)$ , para obtenerla es necesaria la corriente de electrones que circulan en la zona neutra P que se encuentra en la frontera de la zona de carga espacial [16].

Se puede decir que la corriente que gobierna al diodo se encuentra determinada por portadores minoritarios debido a que las corrientes  $J_p(x_N)$  y  $J_n(x_p)$  son denominadas como portadores minoritarios [16].

### 3.2.2 Corrientes minoritarias en las regiones neutras

Para el cálculo de estas corrientes es indispensable conocer previamente la expresión matemática que gobierna la distribución de huecos.

#### 3.2.2.1 Distribución de huecos

Al polarizarse de forma directa la unión PN, ocurre que la región P envía huecos hacia la región neutra N debido a que en la zona de carga espacial la difusión domina sobre el arrastre. Ya que en esta región N no existe presencia de campo eléctrico, los huecos se alejan de la región de transición por difusión; y una vez dentro de esta región N, los huecos van desapareciendo debido a que ocurre un proceso de recombinación con los electrones presentes [17].

Para encontrar la expresión matemática que gobierne la distribución de huecos en la región neutra N, se toma la ecuación de continuidad y se la resuelve bajo la premisa de que los huecos se mueven exclusivamente por difusión dentro de la región PN [17].

Por lo tanto, la ecuación de continuidad indica

$$\frac{dp}{dt} = g_{ext} - U - \frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} \text{ (ecuación 55)}$$

Donde:

$g_{ext}$ : Generación externa de portadores.



**$U$** : Recombinación neta

Asumiendo que:

$$\text{i)} \quad \frac{dp}{dt} = 0$$

$$\text{ii)} \quad g_{ext} = 0$$

$$\text{iii)} \quad U = \frac{\Delta p}{\tau_p}$$

$$\text{iv)} \quad J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

Siendo:

**$\Delta p$** : Variación de huecos.

**$\tau_p$** : Tiempo de vida media de los huecos.

**$J_p$** : Corriente de difusión.

Entonces la ecuación de continuidad queda

$$0 = -\frac{\Delta p}{\tau_p} - \frac{1}{q} \frac{d}{dx} \left( -qD_p \frac{dp}{dx} \right)$$

$$0 = -\frac{\Delta p}{\tau_p} + D_p \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} \text{(ecuación 56)}$$

Las condiciones de frontera para esta ecuación diferencial ordinaria de segundo orden son las siguientes

$$\text{i)} \quad \Delta p(x_N) = p_{N0} e^{V_D/V_t} - p_{N0}$$

$$\text{ii)} \quad \Delta p(l_N) = 0$$

Con lo antes expuesto la resolución de la ecuación diferencial se la presenta a continuación

$$D_p \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} - \frac{\Delta p}{\tau_p} = 0$$

Aplicando cambio de variable

$$z = \frac{d\Delta p}{dx}$$

$$\frac{dz}{d\Delta p} * \frac{d\Delta p}{dx} = \frac{d^2 \Delta p}{dx^2}$$

$$z \frac{dz}{d\Delta p} = \frac{d^2 \Delta p}{dx^2}$$

Entonces

$$D_p \left( z \frac{dz}{d\Delta p} \right) - \frac{\Delta p}{\tau_p} = 0$$

$$\tau_p D_p (z dz) = \Delta p d\Delta p$$

$$\int \tau_p D_p (z dz) = \int \Delta p d\Delta p + C_1$$

$$\frac{1}{2} \tau_p D_p z^2 = \frac{1}{2} \Delta p^2 + C_1$$

$$\tau_p D_p z^2 = \Delta p^2 + 2C_1$$

$$z^2 = \frac{\Delta p^2 + 2C_1}{\tau_p D_p}$$

$$\left( \frac{d\Delta p}{dx} \right)^2 = \frac{\Delta p^2 + 2C_1}{\tau_p D_p}$$

$$\sqrt{\left( \frac{d\Delta p}{dx} \right)^2} = \sqrt{\frac{\Delta p^2 + 2C_1}{\tau_p D_p}}$$

$$\frac{d\Delta p}{dx} = \frac{\sqrt{\Delta p^2 + 2C_1}}{\sqrt{\tau_p D_p}}$$

Donde  $L_p = \sqrt{\tau_p D_p}$

$$\frac{d\Delta p}{dx} = \frac{\sqrt{\Delta p^2 + 2C_1}}{L_p}$$

$$\frac{d\Delta p}{\sqrt{\Delta p^2 + 2C_1}} = \frac{1}{L_p} dx$$

$$\int \frac{d\Delta p}{\sqrt{\Delta p^2 + 2C_1}} = \int \frac{1}{L_p} dx + C_2$$

Aplicando sustitución

$$\Delta p = \sqrt{2C_1} \tan t$$

$$d\Delta p = \sqrt{2C_1} \sec^2 t \, dt$$

Entonces

$$\int \frac{\sqrt{2C_1} \sec^2 t \, dt}{\sqrt{(\sqrt{2C_1} \tan t)^2 + 2C_1}} = \int \frac{1}{L_p} dx + C_2$$

$$\int \frac{\sqrt{2C_1} \sec^2 t \, dt}{\sqrt{2C_1 \tan^2 t + 2C_1}} = \int \frac{1}{L_p} dx + C_2$$

$$\int \frac{\sqrt{2C_1} \sec^2 t \, dt}{\sqrt{2C_1(\tan^2 t + 1)}} = \int \frac{1}{L_p} dx + C_2$$

$$\int \frac{\sqrt{2C_1} \sec^2 t \, dt}{\sqrt{2C_1} * \sqrt{(\tan^2 t + 1)}} = \int \frac{1}{L_p} dx + C_2$$

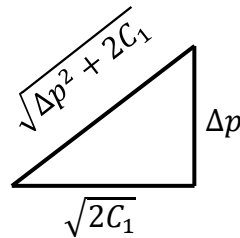
$$\int \frac{\sec^2 t \, dt}{\sqrt{\sec^2 t}} = \int \frac{1}{L_p} dx + C_2$$

$$\int \frac{\sec^2 t \, dt}{\sec t} = \int \frac{1}{L_p} dx + C_2$$

$$\int \sec t \, dt = \int \frac{1}{L_p} dx + C_2$$

$$\ln|\sec t + \tan t| = \frac{1}{L_p} x + C_2$$

Donde



$$\ln \left| \frac{\sqrt{\Delta p^2 + 2C_1}}{\sqrt{2C_1}} + \frac{\Delta p}{\sqrt{2C_1}} \right| = \frac{1}{L_p} x + C_2$$

$$\ln \left| \frac{\sqrt{\Delta p^2 + 2C_1} + \Delta p}{\sqrt{2C_1}} \right| = \frac{1}{L_p} x + C_2$$

Aplicando la condición de frontera  $\Delta p(l_N) = 0$

$$\ln \left| \frac{\sqrt{0 + 2C_1} + 0}{\sqrt{2C_1}} \right| = \frac{1}{L_p} l_N + C_2$$

$$\ln \left| \frac{\sqrt{2C_1}}{\sqrt{2C_1}} \right| = \frac{1}{L_p} l_N + C_2$$

$$\ln|1| = \frac{1}{L_p} l_N + C_2$$

$$0 = \frac{1}{L_p} l_N + C_2$$

$$C_2 = -\frac{l_N}{L_p}$$

Por lo tanto

$$\ln \left| \frac{\sqrt{\Delta p^2 + 2C_1} + \Delta p}{\sqrt{2C_1}} \right| = \frac{1}{L_p} x - \frac{l_N}{L_p}$$

$$\ln \left| \frac{\sqrt{\Delta p^2 + 2C_1} + \Delta p}{\sqrt{2C_1}} \right| = \frac{x - l_N}{L_p}$$

$$e^{\ln \left| \frac{\sqrt{\Delta p^2 + 2C_1} + \Delta p}{\sqrt{2C_1}} \right|} = e^{\frac{x - l_N}{L_p}}$$

$$\frac{\sqrt{\Delta p^2 + 2C_1} + \Delta p}{\sqrt{2C_1}} = e^{\frac{x - l_N}{L_p}}$$

$$\sqrt{\Delta p^2 + 2C_1} + \Delta p = \sqrt{2C_1} e^{\frac{x - l_N}{L_p}}$$

Realizando un cambio de variable,  $\Delta p = \sqrt{2C_1} w \rightarrow w = \frac{\Delta p}{\sqrt{2C_1}}$

$$\sqrt{(\sqrt{2C_1} w)^2 + 2C_1} + \sqrt{2C_1} w = \sqrt{2C_1} e^{\frac{x - l_N}{L_p}}$$

$$\sqrt{2\mathcal{C}_1\mathbf{w}^2 + 2\mathcal{C}_1} + \sqrt{2\mathcal{C}_1}\mathbf{w} = \sqrt{2\mathcal{C}_1}e^{\frac{x-l_N}{L_p}}$$

$$\sqrt{2\mathcal{C}_1}\sqrt{\mathbf{w}^2 + 1} + \sqrt{2\mathcal{C}_1}\mathbf{w} = \sqrt{2\mathcal{C}_1}e^{\frac{x-l_N}{L_p}}$$

$$\sqrt{2\mathcal{C}_1}(\sqrt{\mathbf{w}^2 + 1} + \mathbf{w}) = \sqrt{2\mathcal{C}_1}e^{\frac{x-l_N}{L_p}}$$

$$\sqrt{\mathbf{w}^2 + 1} + \mathbf{w} = e^{\frac{x-l_N}{L_p}}$$

$$(\sqrt{\mathbf{w}^2 + 1})^2 = \left(e^{\frac{x-l_N}{L_p}} - \mathbf{w}\right)^2$$

$$\mathbf{w}^2 + 1 = e^{2\left(\frac{x-l_N}{L_p}\right)} - 2\mathbf{w}e^{\frac{x-l_N}{L_p}} + \mathbf{w}^2$$

$$1 = e^{2\left(\frac{x-l_N}{L_p}\right)} - 2\mathbf{w}e^{\frac{x-l_N}{L_p}}$$

$$2\mathbf{w}e^{\frac{x-l_N}{L_p}} = e^{2\left(\frac{x-l_N}{L_p}\right)} - 1$$

$$\mathbf{w} = \frac{e^{2\left(\frac{x-l_N}{L_p}\right)} - 1}{2e^{\frac{x-l_N}{L_p}}}$$

$$\mathbf{w} = \frac{1}{2}\left(e^{\frac{x-l_N}{L_p}} - e^{-\frac{x-l_N}{L_p}}\right)$$

$$\frac{\Delta p}{\sqrt{2\mathcal{C}_1}} = \frac{1}{2}\left(e^{\frac{x-l_N}{L_p}} - e^{-\frac{x-l_N}{L_p}}\right)$$

$$\Delta p(x) = \frac{1}{2}\sqrt{2\mathcal{C}_1}\left(e^{\frac{x-l_N}{L_p}} - e^{-\frac{x-l_N}{L_p}}\right)$$

Aplicando la segunda condición de frontera  $\Delta p(x_N) = p_{N0} e^{V_D/V_t} - p_{N0}$

$$\Delta p(x_N) = \frac{1}{2}\sqrt{2\mathcal{C}_1}\left(e^{\frac{x_N-l_N}{L_p}} - e^{-\frac{x_N-l_N}{L_p}}\right)$$

$$\sqrt{2\mathcal{C}_1} = \frac{\Delta p(x_N)}{\frac{1}{2}\left(e^{\frac{x_N-l_N}{L_p}} - e^{-\frac{x_N-l_N}{L_p}}\right)}$$

Donde  $w_N = l_N - x_N$

$$\sqrt{2C_1} = \frac{\Delta p(x_N)}{\frac{1}{2} \left( e^{-\frac{w_N}{L_p}} - e^{\frac{w_N}{L_p}} \right)}$$

Entonces

$$\Delta p(x) = \left[ \frac{\Delta p(x_N)}{\frac{1}{2} \left( e^{-\frac{w_N}{L_p}} - e^{\frac{w_N}{L_p}} \right)} \right] \left[ \frac{1}{2} \left( e^{\frac{x-l_N}{L_p}} - e^{-\frac{x-l_N}{L_p}} \right) \right]$$

Sumando y restando  $x_N$

$$\Delta p(x) = \Delta p(x_N) \left[ \frac{1}{\frac{1}{2} \left( e^{-\frac{w_N}{L_p}} - e^{\frac{w_N}{L_p}} \right)} \right] \left[ \frac{1}{2} \left( e^{\frac{x-x_N+x_N-l_N}{L_p}} - e^{-\frac{x-x_N+x_N-l_N}{L_p}} \right) \right]$$

Donde  $z = x - x_N$

$$\Delta p(x - x_N) = \Delta p(x_N) \left[ \frac{1}{\frac{1}{2} \left( e^{-\frac{w_N}{L_p}} - e^{\frac{w_N}{L_p}} \right)} \right] \left[ \frac{1}{2} \left( e^{\frac{(x-x_N)-(l_N-x_N)}{L_p}} - e^{-\frac{(x-x_N)-(l_N-x_N)}{L_p}} \right) \right]$$

$$\Delta p(z) = \Delta p(x_N) \left[ \frac{1}{\frac{1}{2} \left( e^{-\frac{w_N}{L_p}} - e^{\frac{w_N}{L_p}} \right)} \right] \left[ \frac{1}{2} \left( e^{\frac{z-w_N}{L_p}} - e^{-\frac{z-w_N}{L_p}} \right) \right]$$

$$\Delta p(z) = \Delta p(x_N) \left[ \frac{1}{-\sinh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)} \right] \left[ \sinh\left(\frac{z-w_N}{L_p}\right) \right]$$

$$\Delta p(z) = \Delta p(x_N) \left[ \frac{1}{-\sinh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)} \right] \left[ \sinh\left(\frac{z}{L_p} - \frac{w_N}{L_p}\right) \right]$$

$$\begin{aligned}
\Delta p(z) &= \Delta p(x_N) \left[ \frac{1}{-\sinh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)} \right] \left[ \sinh\left(\frac{z}{L_p}\right) \cosh\left(\frac{w_N}{L_p}\right) \right. \\
&\quad \left. - \cosh\left(\frac{z}{L_p}\right) \sinh\left(\frac{w_N}{L_p}\right) \right] \\
\Delta p(z) &= \Delta p(x_N) \left[ \frac{\sinh\left(\frac{z}{L_p}\right) \cosh\left(\frac{w_N}{L_p}\right) - \cosh\left(\frac{z}{L_p}\right) \sinh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)}{-\sinh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)} \right] \\
\Delta p(z) &= \Delta p(x_N) \left[ \frac{\sinh\left(\frac{z}{L_p}\right) \cosh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)}{-\sinh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)} - \frac{\cosh\left(\frac{z}{L_p}\right) \sinh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)}{-\sinh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)} \right] \\
\Delta p(z) &= \Delta p(x_N) \left[ -\frac{\sinh\left(\frac{z}{L_p}\right) \cosh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)}{\sinh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)} + \cosh\left(\frac{z}{L_p}\right) \right] \\
\Delta p(z) &= \Delta p(x_N) \left[ \cosh\left(\frac{z}{L_p}\right) - \frac{1}{\frac{\sinh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)}{\cosh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)}} * \sinh\left(\frac{z}{L_p}\right) \right]
\end{aligned}$$

Por lo tanto, la ecuación que modela la distribución de huecos en la zona neutra N es:

$$\Delta p(z) = \Delta p(x_N) \left[ \cosh\left(\frac{z}{L_p}\right) - \frac{1}{\tanh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)} * \sinh\left(\frac{z}{L_p}\right) \right] \text{(ecuación 57)}$$

Siendo:

$z$ : Distancia medida a partir del punto  $x_N$ .

$w_N$ : Es la anchura total de la zona neutra.

$L_p$ : Longitud de difusión.

Si  $w_N \gg L_p$ , entonces ninguno de los huecos logra alcanzar el contacto óhmico debido a que a que todos los huecos se recombinan con los electrones cuando atraviesan la región N [16], por lo que la expresión queda de la siguiente manera.

$$\tanh\left(\frac{w_N}{L_p}\right) \approx 1$$

Entonces

$$\Delta p(z) = \Delta p(x_N) \left[ \cosh\left(\frac{z}{L_p}\right) - \sinh\left(\frac{z}{L_p}\right) \right]$$

$$\Delta p(z) = \Delta p(x_N) \left[ \frac{1}{2} e^{\frac{z}{L_p}} + \frac{1}{2} e^{-\frac{z}{L_p}} - \frac{1}{2} e^{\frac{z}{L_p}} + \frac{1}{2} e^{-\frac{z}{L_p}} \right]$$

$$\Delta p(z) = \Delta p(x_N) \left[ \frac{1}{2} e^{-\frac{z}{L_p}} + \frac{1}{2} e^{-\frac{z}{L_p}} \right]$$

$$\Delta p(z) = \Delta p(x_N) e^{-\frac{z}{L_p}} \text{ (ecuación 58)}$$

En cambio, cuando se tiene una región corta, es decir,  $w_N \ll L_p$  la expresión se aproxima a

$$\tanh\left(\frac{w_N}{L_p}\right) \approx \frac{w_N}{L_p}$$

$$\cosh\left(\frac{z}{L_p}\right) \approx 1$$

$$\sinh\left(\frac{z}{L_p}\right) \approx \frac{z}{L_p}$$

$$\Delta p(z) = \Delta p(x_N) \left[ 1 - \frac{1}{\frac{w_N}{L_p}} * \frac{z}{L_p} \right]$$

$$\Delta p(z) = \Delta p(x_N) \left[ 1 - \frac{L_p}{w_N} * \frac{z}{L_p} \right]$$

$$\Delta p(z) = \Delta p(x_N) \left[ 1 - \frac{1}{w_N} * z \right]$$



$$\Delta p(z) = \Delta p(x_N) \left( \frac{w_N - z}{w_N} \right) \text{ (ecuación 59)}$$

Una vez determinada la distribución de huecos en la región N, entonces la corriente de difusión debido a  $J_{dp}(z)$  es:

$$J_{dp}(z) = -qD_p \frac{d\Delta p(z)}{dz} \text{ (ecuación 60)}$$

Existen dos casos posibles que se pueden dar:

- 1) Región larga, La corriente disminuye exponencialmente llegando a un valor de cero (Aproximadamente) antes de alcanzar el contacto óhmico, es decir, que todos los portadores minoritarios se han recombinado [17].
- 2) Región corta, Significa que la corriente de difusión J es una constante debido a que el perfil de  $\Delta p(z)$  es una recta, lo cual implica que todos los huecos que alcanzan la zona neutra la vuelven a abandonar sin alterar las recombinaciones [17].

Por lo tanto, la corriente de huecos presente en el punto  $x = x_N$  es:

$$J_{dp}(x_N) = J_{dp}|_{z=0}$$

$$J_{dp}(x_N) = -qD_p \frac{d}{dz} \left\{ \Delta p(x_N) \left[ \cosh\left(\frac{z}{L_p}\right) - \frac{1}{\tanh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)} * \sinh\left(\frac{z}{L_p}\right) \right] \right\} \Bigg|_{z=0}$$

$$J_{dp}(x_N) = -qD_p \Delta p(x_N) \left[ \frac{d}{dz} \Big|_{z=0} \cosh\left(\frac{z}{L_p}\right) - \frac{1}{\tanh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)} * \frac{d}{dz} \Big|_{z=0} \sinh\left(\frac{z}{L_p}\right) \right]$$

$$J_{dp}(x_N) = -qD_p \Delta p(x_N) \left[ \frac{1}{L_p} \sinh\left(\frac{z}{L_p}\right) \Big|_{z=0} - \frac{1}{\tanh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)} * \frac{1}{L_p} \cosh\left(\frac{z}{L_p}\right) \Big|_{z=0} \right]$$

$$J_{dp}(x_N) = -\frac{qD_p \Delta p(x_N)}{L_p} \left[ -\frac{1}{\tanh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)} \right]$$

$$J_{dp}(x_N) = \frac{qD_p \Delta p(x_N)}{L_p \tanh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)}$$

$$J_{dp}(x_N) = q \frac{D_p}{L_p} \frac{1}{\tanh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)} p_{N0} (e^{V_D/V_t} - 1)$$

$$J_{dp}(x_N) = J_{sp} (e^{V_D/V_t} - 1)$$

Donde:

$$J_{sp} = q \frac{D_p}{L_p} \frac{1}{\tanh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)} p_{N0} \text{ (ecuación 61)}$$

Se obtiene una expresión similar para la distribución de los electrones en la región P, para lo cual se tiene la corriente de difusión  $J_{dn}(z)$ :

$$J_{dn}(z') = q D_n \frac{d\Delta n(z')}{dz'}$$

$$J_{dn}(z') = J_{dn}|_{z'=0}$$

Donde:

$$\Delta n(z') = \Delta n(x_p) \left[ \cosh\left(\frac{z'}{L_n}\right) - \frac{1}{\tanh\left(\frac{w_p}{L_n}\right)} * \sinh\left(\frac{z'}{L_n}\right) \right] \text{ (ecuación 62)}$$

Siendo  $z' = x_p - x$ , la cual representa a la distancia desde la zona de carga espacial.

Por lo tanto, la expresión para la corriente de electrones es la siguiente:

$$J_{dn}(x_p) = q \frac{D_n}{L_n} \frac{1}{\tanh\left(\frac{w_p}{L_n}\right)} n_{p0} (e^{V_D/V_t} - 1)$$

$$J_{dn}(x_p) = J_{sn} (e^{V_D/V_t} - 1)$$

Donde:

$$J_{sn} = q \frac{D_n}{L_n} \frac{1}{\tanh\left(\frac{w_p}{L_n}\right)} n_{p0} \text{ (ecuación 63)}$$

### 3.2.3 Corrientes de mayoritarios en las regiones neutras

La corriente  $J_D$  viene dada por las corrientes determinadas con los portadores minoritarios, debido a que la corriente total en el diodo es constante, entonces se puede interpretar que la corriente que es generada por los portadores mayoritarios se adapta

en cada punto a la generada por los portadores minoritarios. Por lo que a lo largo de la región neutra el punto  $x$  se lo determina de la siguiente manera [16].

$$J_D = J_p(x) + J_n(x) \text{ (ecuación 64)}$$

$$J_n(x) = J_D - J_p(x) \text{ (ecuación 65)}$$

Para cumplir la condición de neutralidad es necesario que se cumpla con la premisa de que debe existir en estas regiones una corriente de difusión de portadores mayoritarios [16].

Por ejemplo, en la región neutra N, la condición de neutralidad exige que  $\Delta n(x) = \Delta p(x)$ , es decir:

$$J_{dn} = qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_{dn} = qD_n \frac{d\Delta n}{dx}$$

Donde  $\Delta n = \Delta p$ , entonces:

$$J_{dn} = qD_n \frac{d\Delta p}{dx}$$

$$J_{dn} = qD_n \frac{d\Delta p}{dx} * \frac{-D_p}{-D_p}$$

$$J_{dn} = -\frac{D_n}{D_p} \left( -qD_p \frac{d\Delta p}{dx} \right)$$

Siendo

$$J_{dp} = -qD_p \frac{d\Delta p}{dx}$$

Por lo tanto

$$J_{dn} = -\frac{D_n}{D_p} J_{dp} \text{ (ecuación 66)}$$

Esta expresión indica que la corriente de difusión de los electrones mayoritarios tiene el sentido opuesto a la dirección en la que circulan los huecos minoritarios.

### 3.2.4 Características entre la corriente vs tensión en el diodo

Una vez analizadas y realizadas las deducciones matemáticas antes expuestas, se procede a calcular la corriente que circula a través del diodo en un régimen permanente y baja inyección.

Teniendo en cuenta las siguientes suposiciones:

- i) No existe recombinaciones netas en la ZCE
- ii) Tampoco generaciones netas en la ZCE

Por lo tanto, este caso de estudio es acerca de un diodo ideal y se hallara la ecuación que lo gobierna, en una relación entre la corriente y tensión que circulan a través del mismo.

#### **3.2.4.1 Ecuación del diodo Ideal**

En base a las ecuaciones obtenidas, se recuerda la ecuación de la densidad de corriente del diodo que se establece en la ecuación 54:

Donde  $J = \frac{I}{A} \rightarrow I = A J$ , entonces reemplazando en la ecuación anterior

$$I_D = (I_p + I_n)|_{ZCE}$$

Siendo

$$I_D = A J_D$$

$$I_p = A J_p$$

$$I_n = A J_n$$

Por lo tanto

$$I_D = A J_p(x_N) + A J_n(x_p)$$

$$I_D = A (J_p(x_N) + J_n(x_p))$$

Donde

$$J_p(x_N) = J_{sp} (e^{V_D/V_t} - 1)$$

$$J_n(x_p) = J_{sn} (e^{V_D/V_t} - 1)$$

Entonces

$$I_D = A[J_{sp}(e^{V_D/V_t} - 1) + J_{sn}(e^{V_D/V_t} - 1)]$$

$$I_D = A[J_{sp} + J_{sn}](e^{V_D/V_t} - 1)$$

Siendo

$$I_s = A[J_{sp} + J_{sn}] \text{ (ecuación 67)}$$

Obteniendo así la ecuación del diodo ideal o Ecuación de Shockley establecida en la ecuación 8

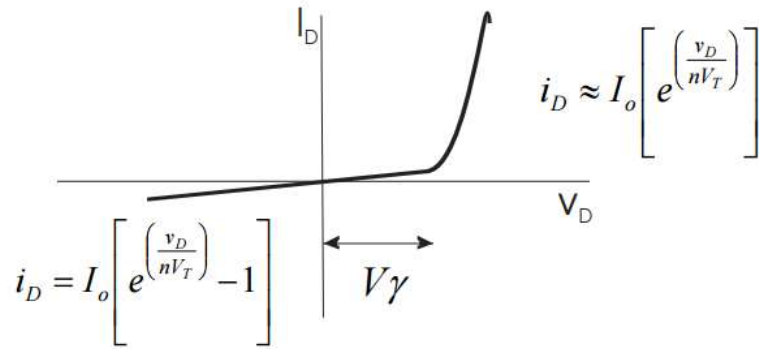


Figura 25. Relación entre el voltaje y corriente en el diodo [14]

Dónde:

$I_D$ : Corriente total del diodo

$I_s$ : Corriente inversa de saturación del diodo

$V_D$ : Diferencia de potencial a través del diodo

$V_t$ : Se lo obtiene de la ecuación  $V_t = \frac{nK_B T}{q}$  (ecuación 68)

Esta ecuación indica que al existir polarización directa la corriente que fluye a través del diodo crece de forma exponencial con la tensión aplicada  $V_D$ , debido a que la expresión  $e^{V_D/V_t} \gg 1$ .

En cambio, si la tensión  $V_D$  es negativa, quiere decir,  $e^{-V_D/V_t} \approx 0$  por lo que la corriente  $I_D \cong -I_s$ , es decir, que la corriente inversa se satura al valor de  $I_s$  [18].

Para obtener el valor de la corriente inversa de saturación  $I_s$  se hacen uso de las ecuaciones 61 y 63.

Se reemplazan en la expresión

$$I_s = A[J_{sp} + J_{sn}]$$

Se obtiene

$$I_s = A \left\{ \left[ q \frac{D_p}{L_p} \frac{1}{\tanh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)} p_{N0} \right] + \left[ q \frac{D_n}{L_n} \frac{1}{\tanh\left(\frac{w_p}{L_n}\right)} n_{p0} \right] \right\}$$

$$I_s = qA \left[ \frac{D_p}{L_p} \frac{1}{\tanh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)} p_{N0} + \frac{D_n}{L_n} \frac{1}{\tanh\left(\frac{w_p}{L_n}\right)} n_{p0} \right]$$

Siendo

$$p_{N0} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

$$n_{p0} = \frac{n_i^2}{N_A}$$

Entonces

$$I_s = qA \left[ \frac{D_p}{L_p} \frac{1}{\tanh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)} \frac{n_i^2}{N_D} + \frac{D_n}{L_n} \frac{1}{\tanh\left(\frac{w_p}{L_n}\right)} \frac{n_i^2}{N_A} \right]$$

$$I_s = qA \left[ \frac{D_p}{L_p} \frac{1}{\tanh\left(\frac{w_N}{L_p}\right)} \frac{1}{N_D} + \frac{D_n}{L_n} \frac{1}{\tanh\left(\frac{w_p}{L_n}\right)} \frac{1}{N_A} \right] n_i^2 \text{ (ecuación 69)}$$

Con esta expresión matemática se conoce la relación que existe entre la corriente de saturación  $I_s$  con:

- Dopajes  $N_D$  y  $N_A$ .
- Geometría  $w/L$  y los parámetros físicos  $D/L$ .
- Naturaleza del material a través de  $n_i$ .
- La corriente  $I_s$  al ser proporcional a  $n_i^2$ , implica que también lo es para la expresión

$$e^{-\frac{E_g}{k_B T}}.$$

Un semiconductor al poseer la banda prohibida más ancha permite que existan uniones PN con corrientes inversas de saturación menores. Además, al inyectar dopajes más elevados implican valores de  $I_s$  menores, es decir, si los factores de dopaje  $\frac{1}{N_D}$  y  $\frac{1}{N_A}$  son aproximadamente iguales, el menor entre ambos dopajes determinará el valor de la corriente  $I_s$  [18].

### 3.3 LEY DE ACCIÓN DE MASAS

En el momento en el que el nivel de Fermi  $E_f$  se encuentra en la banda prohibida, es decir, lo suficientemente alejada de las bandas de conducción ( $E_c$ ) y la banda de valencia ( $E_v$ ); entonces al multiplicar las concentraciones en equilibrio térmico de electrones ( $n_0$ ) y de huecos ( $p_0$ ) entre sí, se obtiene el siguiente resultado que demuestra la ley de acción de masas [16].

Sea

$$n_0 = N_c e^{-\frac{E_c - E_f}{K_B T}} \wedge p_0 = N_v e^{-\frac{E_f - E_v}{K_B T}}$$

Y conociendo que:

$$N_c = 2 \left[ \frac{2\pi m_n K_B T}{h^2} \right]^{3/2} \wedge N_v = 2 \left[ \frac{2\pi m_p K_B T}{h^2} \right]^{3/2}$$

Dónde:

$N_c$ : Densidad de estados de la banda de conducción.

$N_v$ : Densidad de estados de la banda de valencia.

$m_n$ : Masa efectiva de densidad de estados de electrones.

$m_p$ : Masa efectiva de densidad de estados de huecos.

$h$ : Constante de Planck

Entonces:

$$n_0 p_0 = \left[ N_c e^{-\frac{E_c - E_f}{K_B T}} \right] \left[ N_v e^{-\frac{E_f - E_v}{K_B T}} \right]$$

$$n_0 p_0 = [N_c N_v] \left[ e^{-\frac{E_c - E_f}{K_B T}} e^{-\frac{E_f - E_v}{K_B T}} \right]$$

$$n_0 p_0 = [N_c N_V] \left[ e^{-\frac{E_c - E_f}{K_B T} - \frac{E_f - E_V}{K_B T}} \right]$$

$$n_0 p_0 = [N_c N_V] \left[ e^{\frac{1}{K_B T}(-E_c + E_f - E_f + E_V)} \right]$$

$$n_0 p_0 = [N_c N_V] \left[ e^{\frac{1}{K_B T}[-(E_c - E_V)]} \right]$$

Dónde:

$$E_g = E_c - E_V \text{ (Banda Prohibida)}$$

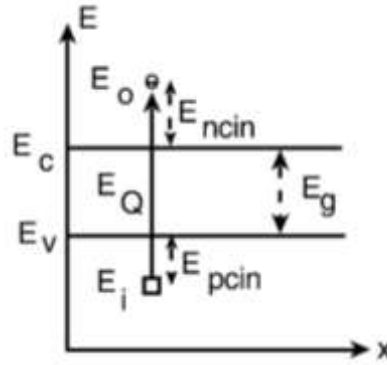


Figura 26. Modelo de bandas de energía en un semiconductor [14]

Entonces:

$$n_0 p_0 = [N_c N_V] \left[ e^{-\frac{E_g}{K_B T}} \right] \text{ (ecuación 70)}$$

Ahora se analiza el producto entre  $N_c N_V$

$$N_c N_V = \left\{ 2 \left[ \frac{2\pi m_n K_B T}{h^2} \right]^{3/2} \right\} \left\{ 2 \left[ \frac{2\pi m_p K_B T}{h^2} \right]^{3/2} \right\}$$

$$N_c N_V = 4 \left\{ \left[ \frac{2\pi m_n K_B}{h^2} \right]^{3/2} \right\} \left\{ \left[ \frac{2\pi m_p K_B}{h^2} \right]^{3/2} \right\} T^{3/2} * T^{3/2}$$

$$N_c N_V = \left\{ 4 \left[ \frac{2\pi K_B}{h^2} \right]^3 [m_n m_p]^{3/2} \right\} T^3$$



Dónde

$$A = 4 \left[ \frac{2\pi K_B}{h^2} \right]^3 [m_n m_p]^{3/2} = \text{constante}$$

Entonces

$$N_c N_v = A T^3$$

Por lo tanto

$$\therefore n_0 p_0 = A T^3 e^{-\frac{E_g}{K_B T}} \text{ (ecuación 71)}$$

Finalmente, el resultado anterior presenta que el producto entre las concentraciones en equilibrio térmico entre  $n_0$  y  $p_0$  es independiente del nivel de Fermi  $E_f$  y solo depende de:

- Material ( $m_n$  y  $m_p$ )
- De la banda prohibida de dicho material ( $E_g$ )
- De la temperatura ( $T$ )

Por lo tanto, se obtiene que, para un valor determinado de temperatura para un material, el producto entre  $n_0 p_0$  se mantiene constante. Para un semiconductor intrínseco, donde  $n_0 = p_0 = n_i$ , entonces  $n_0 p_0 = n_i^2 = \text{constante}$ .

### 3.4 CONCENTRACIÓN EN FUNCIÓN DEL NIVEL DE FERMI

En este punto del trabajo de graduación se analizará la Ley de Fermi-Dirac, la cual establece la probabilidad  $F(E)$  de que un electrón ocupe un nivel de energía  $E$  cuando el semiconductor se encuentra en equilibrio térmico [16], es decir:

$$F(E) = \frac{1}{1 + e^{\left(\frac{E - E_f}{K_B T}\right)}} \text{ (ecuación 72)}$$

Dónde:

**$F(E)$ : Probabilidad de que un electrón ocupe un nivel de energía  $E$**

**$E$ : Energía de estado**

**$E_f$ : Nivel de energía constante denominada "Nivel de Fermi"**

**$k_B$ : Constante de Boltzmann**

**$T$ : Temperatura [K]**

Cabe recalcar que cada material cuenta con un valor propio característico de energía del nivel de fermi, y dependiendo del valor de la temperatura absoluta  $T$  en que se halle el sistema cuántico, se determina la probabilidad de ocupación de un estado dinámico en función de su energía  $E$ .

Al analizar la temperatura como parámetro de estudio en  $T = 0\text{ K}$ , se obtiene dos valores distintos de la función  $F(E)$ , que dependerá de las siguientes condiciones:

1. Si  $E - E_f > 0$

$$F(E) = \frac{1}{1 + e^{\left(\frac{E-E_f}{k_B T}\right)}} = \frac{1}{1 + e^{\left(\frac{E-E_f}{0}\right)}} = \frac{1}{1 + e^{\infty}} = \frac{1}{1 + \infty} = 0$$

$$F(E) = 0$$

2. Si  $E - E_f < 0$

$$F(E) = \frac{1}{1 + e^{\left(\frac{E-E_f}{k_B T}\right)}} = \frac{1}{1 + e^{\left(\frac{E-E_f}{0}\right)}} = \frac{1}{1 + e^{-\infty}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{e^{\infty}}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\infty}} = \frac{1}{1 + 0} = 1$$

$$F(E) = 1$$

Lo cual se representa a continuación a través de una gráfica  $F(E)$  vs  $E$ , para  $T = 0\text{ K}$ :

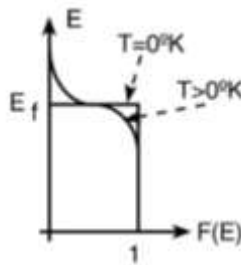


Figura 27. Ecuación probabilística Fermi – Dirac, cuando  $T=0\text{K}$  [8]

La gráfica antes expuesta es la representación de la función probabilística  $F(E)$  en el momento en el que  $T=0\text{ K}$ ; en esta se puede observar que [14]:

$$F(E) = \begin{cases} E - E_f > 0, & 0 \\ E - E_f < 0, & 1 \end{cases}$$

Estos resultados implican dos condiciones:

- i) Todos los estados dinámicos del sistema cuántico cuyo valor de la energía sea mayor a  $E_f$  se hallan vacíos.
- ii) Todos los estados dinámicos del sistema cuántico cuyo valor de la energía sea menor a  $E_f$  se hallan ocupados.

Con todo lo antes expuesto se entiende que, en los semiconductores, el nivel de Fermi ( $E_f$ ) es el nivel de energía en el cero absoluto, que se encuentra previsiblemente dentro de la banda prohibida, debido a que separa los niveles llenos de electrones en la banda de valencia (forman parte de los enlaces covalentes), mientras que no se encuentra ningún electrón libre en la banda de conducción (está totalmente vacía) [13].

### 3.4.1 La posición del nivel de FERMI

Al conocerse las concentraciones en el equilibrio  $n_0$  y  $p_0$  y las aproximaciones de Boltzmann son válidas, la posición del nivel de fermi se lo halla de la siguiente forma:

i) Sea  $n_0 = N_c e^{-\frac{E_c - E_f}{K_B T}}$

$$\ln \left( e^{\frac{E_c - E_f}{K_B T}} \right) = \ln \left( \frac{N_c}{n_0} \right)$$

$$\frac{E_c - E_f}{K_B T} = \ln \left( \frac{N_c}{n_0} \right)$$

$$E_c - E_f = K_B T \ln \left( \frac{N_c}{n_0} \right)$$

$$E_f = E_c - K_B T \ln \left( \frac{N_c}{n_0} \right) \text{ (ecuación 73)}$$

ii) Sea  $p_0 = N_v e^{-\frac{E_f - E_v}{K_B T}}$

$$\ln \left( e^{\frac{E_f - E_v}{K_B T}} \right) = \ln \left( \frac{N_v}{p_0} \right)$$

$$\frac{E_f - E_v}{K_B T} = \ln\left(\frac{N_v}{p_0}\right)$$

$$E_f - E_v = K_B T \ln\left(\frac{N_v}{p_0}\right)$$

$$E_f = E_v + K_B T \ln\left(\frac{N_v}{p_0}\right) \text{ (ecuación 74)}$$

Por lo tanto, el nivel de fermi se lo puede calcular haciendo uso de las ecuaciones 73 y 74 descritas anteriormente.

Como caso especial de estudio, se encuentra el semiconductor intrínseco, donde  $n_0 = p_0 = n_i$ , su nivel de fermi es denominado  $E_{fi}$  y se lo calcula de la siguiente manera:

$$\begin{cases} E_f = E_c - K_B T \ln\left(\frac{N_c}{n_0}\right) \\ E_f = E_v + K_B T \ln\left(\frac{N_v}{p_0}\right) \end{cases} \wedge n_0 = p_0 = n_i \wedge E_f = E_{fi}$$

Sumando estas dos expresiones

$$2E_{fi} = E_c + E_v - K_B T \ln\left(\frac{N_c}{n_0}\right) + K_B T \ln\left(\frac{N_v}{p_0}\right)$$

$$2E_{fi} = (E_c + E_v) + K_B T \left[ \ln\left(\frac{N_v}{p_0}\right) - \ln\left(\frac{N_c}{n_0}\right) \right]$$

$$2E_{fi} = (E_c + E_v) + K_B T \left[ \ln\left(\frac{\frac{N_v}{n_i}}{\frac{N_c}{n_i}}\right) \right]$$

$$E_{fi} = \frac{(E_c + E_v)}{2} + \frac{K_B T}{2} \ln\left(\frac{N_v}{N_c}\right) \text{ (ecuación 75)}$$

Esta solución indica que el nivel de energía de Fermi en un semiconductor intrínseco se encuentra aproximadamente en la mitad de la banda prohibida, debido a que los coeficientes  $N_c$  y  $N_v$  presentan valores muy parecidos, el logaritmo de su cociente tiende a cero [17], es decir:

$$N_c \approx N_v \rightarrow \ln\left(\frac{N_v}{N_c}\right) = \ln(1) = 0$$

$$\therefore E_{fi} = \frac{(E_c + E_v)}{2}$$

Además, con los cálculos antes expuestos se puede determinar las concentraciones de equilibrio en función de  $E_f - E_{fi}$  y  $n_i$

i) Sea  $E_f = E_c - K_B T \ln \left( \frac{N_c}{n_0} \right)$ , donde para un semiconductor intrínseco  $E_f = E_{fi}$  y  $n_o = n_i$ , entonces:

$$E_f = E_c - K_B T \ln \left( \frac{N_c}{n_0} \right)$$

$$-\frac{E_{fi} - E_c}{K_B T} = \ln \left( \frac{N_c}{n_i} \right)$$

$$e^{-\frac{E_{fi} - E_c}{K_B T}} = e^{\ln \left( \frac{N_c}{n_i} \right)}$$

$$e^{-\frac{E_{fi} - E_c}{K_B T}} = \frac{N_c}{n_i}$$

$$N_c = n_i e^{-\frac{E_{fi} - E_c}{K_B T}}$$

Entonces si

$$n_0 = N_c e^{-\frac{E_c - E_f}{K_B T}}$$

$$n_0 = \left[ n_i e^{-\frac{E_{fi} - E_c}{K_B T}} \right] \left[ e^{-\frac{E_c - E_f}{K_B T}} \right]$$

$$n_0 = n_i e^{\left( -\frac{E_{fi} - E_c}{K_B T} - \frac{E_c - E_f}{K_B T} \right)}$$

$$n_0 = n_i e^{\frac{1}{K_B T} (-E_{fi} + E_c - E_c + E_f)}$$

$$n_0 = n_i e^{\left( \frac{E_f - E_{fi}}{K_B T} \right)} \text{ (ecuación 76)}$$

ii) Sea  $E_f = E_v + K_B T \ln \left( \frac{N_v}{p_0} \right)$ , donde para un semiconductor intrínseco  $E_f = E_{fi}$  y  $p_o = n_i$ , entonces:

$$E_f = E_v + K_B T \ln \left( \frac{N_v}{p_0} \right)$$

$$\frac{E_{fi} - E_v}{K_B T} = \ln \left( \frac{N_v}{n_i} \right)$$

$$e^{\frac{E_{fi}-E_V}{K_B T}} = e^{\ln\left(\frac{N_V}{n_i}\right)}$$

$$e^{\frac{E_{fi}-E_V}{K_B T}} = \frac{N_V}{n_i}$$

$$N_V = n_i e^{\frac{E_{fi}-E_V}{K_B T}}$$

Entonces, si:

$$p_0 = N_V e^{-\frac{E_f-E_v}{K_B T}}$$

$$p_0 = \left[ n_i e^{\frac{E_{fi}-E_V}{K_B T}} \right] \left[ e^{-\frac{E_f-E_V}{K_B T}} \right]$$

$$p_0 = n_i e^{\left(\frac{E_{fi}-E_V}{K_B T} - \frac{E_f-E_V}{K_B T}\right)}$$

$$p_0 = n_i e^{\frac{1}{K_B T}(E_{fi}-E_V-E_f+E_V)}$$

$$p_0 = n_i e^{-\left(\frac{E_f-E_{fi}}{K_B T}\right)} \text{ (ecuación 77)}$$

Por lo tanto, las ecuaciones de las concentraciones en equilibrio térmico son:

$$\begin{cases} n_0 = n_i e^{\left(\frac{E_f-E_{fi}}{K_B T}\right)} \\ p_0 = n_i e^{-\left(\frac{E_f-E_{fi}}{K_B T}\right)} \end{cases}$$

En el caso de que un semiconductor se encuentre fuera de las condiciones de equilibrio, se usan los denominados cuasi niveles de fermi, es decir,  $E_{fn}$  y  $E_{fp}$ , los cuales permiten mantener el formulismo de las ecuaciones antes descritas. [16]

$$\begin{cases} n = n_i e^{\left(\frac{E_{fn}-E_{fi}}{K_B T}\right)} \\ p = n_i e^{-\left(\frac{E_{fp}-E_{fi}}{K_B T}\right)} \end{cases}$$

### 3.5 RESISTENCIA DE LA UNIÓN PN

En la unión PN, se analizan dos tipos de resistencia:

- Resistencia Estática

- Resistencia Dinámica

### 3.5.1 Resistencia Estática

La relación existente entre el voltaje y la corriente ( $V/I$ ), es lo que se define como resistencia estática ( $R$ ) de un diodo. De la gráfica a continuación se visualiza dos regiones claramente separadas, de donde se podrá diferenciar la resistencia estática directa ( $R_F$ ) y la resistencia estática inversa ( $R_R$ ) [14], tal como se muestra en las siguientes expresiones:

$$R_F = \frac{V_Q}{I_Q} \text{ (Resistencia estática directa) (ecuación 78)}$$

$$R_R = \frac{V_P}{I_P} \text{ (Resistencia estática inversa) (ecuación 79)}$$

Debido a que la resistencia estática varía ampliamente dependiendo del punto seleccionado en la gráfica, este no representa un parámetro apropiado para definir el comportamiento del diodo.

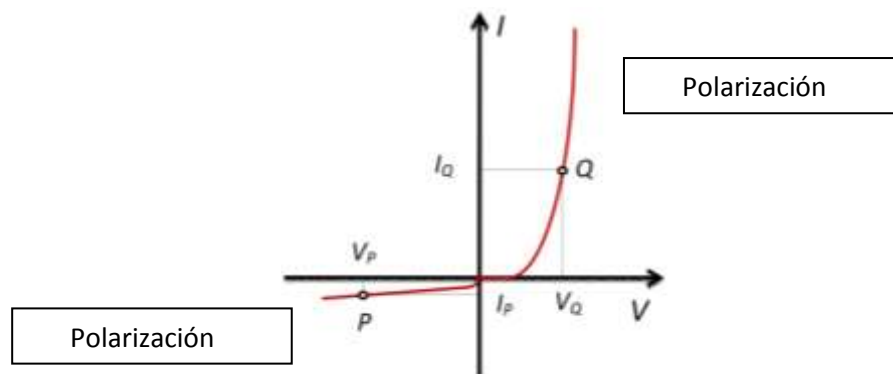


Figura 28. Resistencia estática y dinámica del diodo [16]

### 3.5.2 Resistencia Dinámica

Este tipo de resistencia también es conocido como *resistencia incremental*, y compone un parámetro importante en el comportamiento del diodo.

Matemáticamente se lo define como la inversa de la pendiente de la función,  $I = f(V)$  evaluada en el punto de funcionamiento del diodo [14], es decir:

$$R_{dinámica} = \left( \frac{\Delta V}{\Delta I} \right)_{\Delta I \rightarrow 0} = \frac{dV}{dI} \text{ (ecuación 80)}$$

Para la resistencia con polarización directa evaluada en el punto Q en la ecuación 80, se tiene que la resistencia dinámica será:

$$R_f = \left( \frac{dV}{dI} \right)_{I=I_Q} \quad (\text{Resistencia dinámica directa}) \quad (\text{ecuación 81})$$

Para la resistencia con polarización inversa evaluada en el punto P en la ecuación 80, se tiene que la resistencia dinámica será:

$$R_r = \left( \frac{dV}{dI} \right)_{I=I_P} \quad (\text{Resistencia dinámica inversa}) \quad (\text{ecuación 82})$$

Luego de analizar estas ecuaciones antes descritas y con ayuda de la figura 31, se puede identificar que la resistencia dinámica en inversa es grande; en cambio la resistencia en directa es pequeña para el diodo.

Posteriormente se debe recordar que la corriente del diodo se la puede modelar matemáticamente haciendo uso de la ecuación 8:

Donde:

$$I = I_0 * e^{\frac{V}{\eta V_T}} - I_0$$

$$I + I_0 = I_0 * e^{\frac{V}{\eta V_T}}$$

Derivando la ecuación de la corriente del diodo con respecto al voltaje se tiene:

$$\frac{dI}{dV} = \frac{d}{dV} \left[ I_0 \left( e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1 \right) \right] = \frac{I_0}{\eta V_T} * e^{\frac{V}{\eta V_T}} = \left( \frac{1}{\eta V_T} \right) * \left( I_0 * e^{\frac{V}{\eta V_T}} \right)$$

$$\frac{dI}{dV} = \left( \frac{1}{\eta V_T} \right) * (I + I_0)$$

$$\frac{dI}{dV} = \frac{I + I_0}{\eta V_T}$$

De donde:

$$R_{dinámica} = \frac{dV}{dI} = \frac{\eta V_T}{I + I_0} \quad (\text{ecuación 83})$$

Por lo tanto, se demuestra que la resistencia dinámica del diodo es directamente proporcional a:



- Coeficiente de emisión ( $\eta$ )
- Tensión térmica o tensión equivalente de temperatura ( $V_T$ )

E inversamente proporcional a:

- Corriente del diodo en un punto ( $I$ )
- Corriente del diodo en equilibrio térmico ( $I_0$ )

Además, se debe tomar en cuenta que si se analiza la gráfica en el punto Q (Resistencia dinámica en directa) y se cumple que  $I_Q \gg I_0$ , entonces la resistencia dinámica será:

$$R_{dinámica} = \frac{\eta V_T}{I_Q} \text{ (ecuación 84)}$$

Finalmente, en el siguiente grafico se muestra la diferencia de trabajar con el cálculo de la resistencia estática y dinámica. [15]

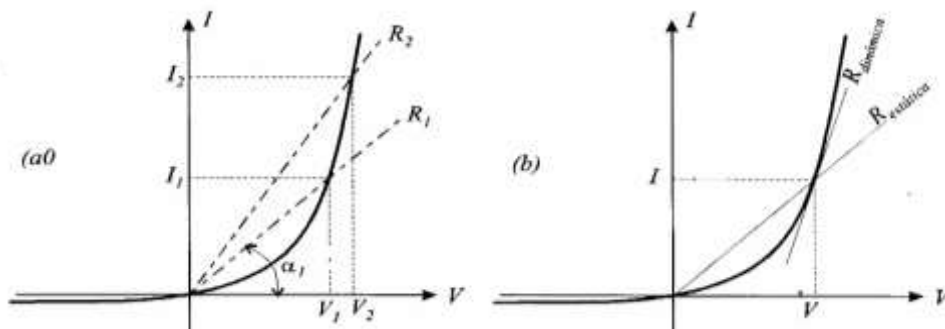


Figura 29. Diferencia entre la Resistencia estática y dinámica del [14]

#### **4. Diseño de las herramientas para el modelado y desarrollo del circuito en Matlab.**

En este punto las herramientas para el estudio del diodo semiconductor se dividirán en dos, una para el estudio del modelado matemático del diodo y la otra herramienta será para el estudio del funcionamiento del diodo semiconductor en un circuito básico. Para estos dos casos se emplea la herramienta de programación Matlab, se emplea el uso de la interfaz gráfica para ambas herramientas y en el caso del desarrollo de la herramienta del diodo en un circuito básico también se va a emplear el entorno de programación visual Simulink el cual es un entorno de diagramas de bloques para la simulación.

Se debe mencionar que en este capítulo para el diseño de la interfaz Guide en Matlab solo se toma en cuenta la colocación de los bloques para su armado la programación de cada uno de los bloques se las podrá encontrar en el apartado de anexos.

##### **4.1 Uso de la herramienta GUIDE.**

Esta herramienta que se diseña nos permite comprender de una mejor manera el estudio del modelamiento matemático del diodo, para el desarrollo de este programa se emplea una GUI (interfaz gráfica de usuario, por sus siglas en inglés) mediante el entorno de programación visual llamado Guide que presenta el programa Matlab. Este entorno de programación permite realizar y ejecutar programas que requieran incorporar datos de manera continua [19].

El entorno de Guide presenta las particularidades básicas que tienen todos los programas visuales entre ellos Visual Basic o Visual C++.

Para abrir el entorno Guide de Matlab primero abrimos el programa de Matlab una vez abierto el programa de Matlab en la ventana de comandos se escribe la palabra guide, para que aparezca la ventana del entorno Guide.

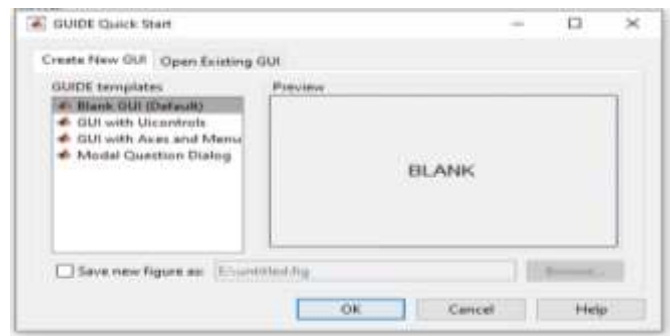


Figura 30. Ventana GUIDE [19]

En esta pantalla que aparece nos da dos opciones la una es la de crear nuestro propio GUI y la otra la de abrir un GUI ya existente, en la opción de crear un nuevo GUI aparecen cuatro opciones las cuales son:

**a) Blank GUI (Default)**

Se presenta un formulario en blanco en el cual podremos diseñar un programa desde cero.

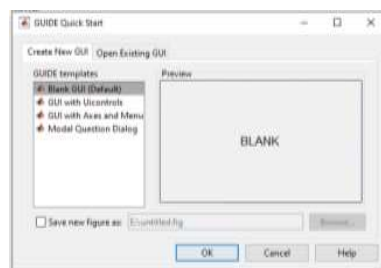


Figura 31. Opción 1 GUIDE [19]

**b) GUI with Uicontrols**

En esta opción se presenta un ejemplo que permite calcular la masa, dado los valores de la densidad y el volumen en cualquiera de los dos sistemas de unidades. Se puede ejecutar este ejemplo para ver los resultados y el funcionamiento de la interfaz.

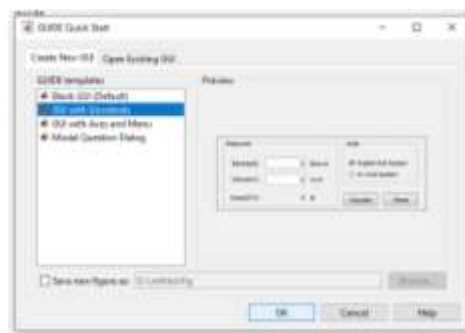


Figura 32. Opción 2 GUIDE [19]

### c) GUI with Axes and Menu

En esta opción se presenta otro ejemplo formado por un Popup menú, un push botton y un objeto Axes, al ejecutar el programa se puede escoger entre varias opciones que aparecen en el menú desplegable y al hacer clic el botón que se encuentra en el lado derecho se mostrará una gráfica en el recuadro.



Figura 33. opción 3 GUIDE [19]

### d) Modal Question Dialog

En esta opción en la pantalla aparece un cuadro de diálogo, el cual está formado por un recuadro, una etiqueta y dos botones con las palabras Yes y No, dependiendo cuál de las dos opciones se presione, el GUI regresa el texto seleccionado.



Figura 34. Opción 4 GUIDE [19]

Una vez que se conocen las cuatro opciones que presenta el cuadro GUIDE escogemos la primera opción Blank GUI (Default) para comenzar a realizar la herramienta para el modelado matemático. Al escoger esta opción aparece la siguiente ventana:



Figura 35. Entorno para el diseño GUI [19]

En la interfaz gráfica se tienen entre otras herramientas:

	Alinear objetos.
	Editor de menú.
	Editor de orden de etiqueta.
	Editor del M-file.
	Propiedades de objetos.
	Navegador de objetos.
	Grabar y ejecutar (ctrl. + T).

Figura 36. Herramientas interfaz GUI [19]

La interfaz también dispone de varios componentes que permiten el desarrollo de la GUI, estos componentes son:

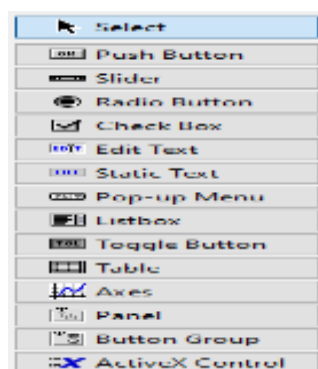


Figura 37. Panel de componentes interfaz Guide [19]

A continuación, se tiene una breve descripción de varios de estos componentes:

CONTROL	DESCRIPCIÓN
Push Button	Genera una acción
Slider	Representa un rango de valores
Radio Button	Representa una opción
Check Box	Indica el estado de una opción
Edit Text	Para editar texto
Static text	Muestra un string de texto
Pop up Menu	Provee una lista de opciones
Listbox	Lista deslizable
Toggle Button	Genera una acción on, off
Area	Para graficar
Panel	Visualiza grupo de controles
Buttons Group	Es un panel exclusivo para todos buttons y toggle buttons
Activex Control	Visualiza controles Activex en C++

Figura 38. Componentes Guide [19]

Cada uno de los elementos que conforman una interfaz gráfica, poseen varias opciones las cuales se pueden acceder presionando el clic derecho del mouse.

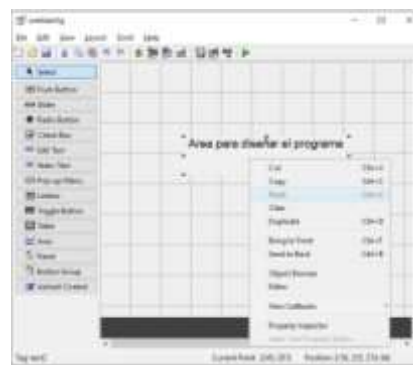


Figura 39. Opciones interfaz gráfica [19]

La opción de property inspector permite personalizar cada elemento



Figura 40. Opción property inspector [19]

Otra opción que se encuentra al dar clic derecho en el mouse es “view callbacks” esta opción es considerada como la más importante, dado que esta opción al ser ejecutada abre el archivo en formato .m que está asociado al diseño y esta opción nos ubica

justamente en la parte del programa a la que corresponde la subrutina que se ejecuta cuando se realice alguna acción específica sobre el elemento que se edita [19].

De esta manera cada componente de la interfaz se puede modificar ingresando al view callbacks correspondiente a cada uno.

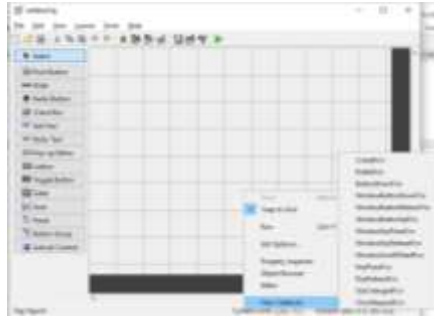


Figura 41. Opción view callback [19]

Las aplicaciones que se desarrollan con el GUIDE tienen dos archivos, el uno es un archivo .m y el otro es un archivo .fig. En el archivo .m se encuentra el código relacionado a cada uno de los botones de la interfaz y el archivo .fig contiene los elementos gráficos [19].

En cada ocasión que se agregue un nuevo elemento a la interfaz gráfica, de manera automática se generará código en el archivo .m para ese nuevo elemento.

#### **4.2 Herramienta para el modelado matemático del diodo.**

Una vez conocido los pasos que se debe tener para poder realizar un diseño empleando la interfaz Guide de Matlab, se procede a diseñar la herramienta.

Como se pudo observar anteriormente procedemos a abrir una Guide en blanco (default) para ir ingresando todas las herramientas necesarias para el estudio del modelado matemático, agregamos los componentes de static text y edit text, en el bloque static text se agrega un nombre a cada bloque ingresando al property inspector de cada uno, entre estos nombres agregamos el de características del diodo, tipo de semiconductor, silicio, germanio, voltaje, entre otros. Los bloques de edit text nos ayudará a poder asignarle un valor, el bloque static text permite agregar un nombre específico que se puede relacionar al edit text.

CARACTERÍSTICAS DEL DIODO	
Tipo de semiconductor (1) Silicio (2) Germanio	<input type="text"/>
Voltaje [V]	<input type="text"/>
Temperatura [k]	<input type="text"/>
Area [cm <sup>2</sup> ]	<input type="text"/>
Ni [cm <sup>-3</sup> ]	<input type="text"/>

Figura 42. Bloques edit text y static text en la interfaz – fuente autor

REGION TIPO N	
Nd [cm <sup>-3</sup> ]	<input type="text"/>
up [cm <sup>2</sup> /Vs]	<input type="text"/>
tp [ms]	<input type="text"/>
wn [um]	<input type="text"/>
REGION TIPO P	
Na [cm <sup>-3</sup> ]	<input type="text"/>
un [cm <sup>2</sup> /Vs]	<input type="text"/>
tn [ms]	<input type="text"/>
wp [um]	<input type="text"/>

Figura 43. Bloques edit text y static text – fuente autor

El siguiente paso es el de agregar los bloques de push botton, que se encargan de ejecutar la función establecida para cada uno estas funciones se encuentran en los apartados de resultados y graficar, después de ingresar los valores de cada componente al presionar en los push botton estos mostrarán el valor de cada uno de los valores o gráficas programadas en cada botón.

V t [mV]
I s [mA]
I d [mA]
Nivel de Fermi

Figura 44. Bloques push botton resultados – fuente autor

Graficar Concentracion Intrinseca	Graficar Id vs V	Graficar Nivel de Fermi
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Figura 45. Bloques push botton graficar – fuente autor

Por último, se agregan los bloques de axes para poder observar las gráficas que se obtienen una vez ingresados todos los valores y después de presionar el push botton relacionado con cada gráfica de axes.



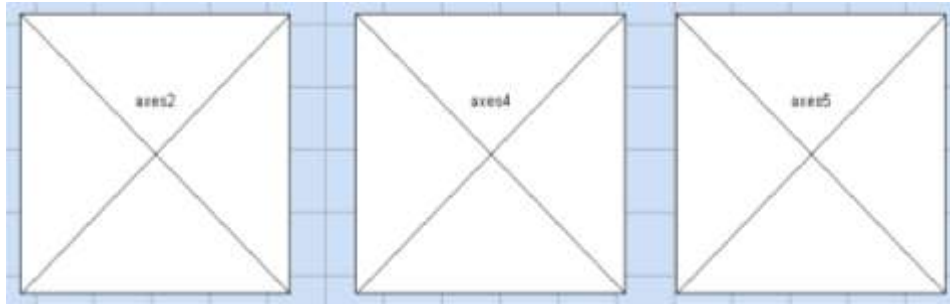


Figura 46. Bloques axes – fuente autor

Para poder diferenciar los bloques del static text entre ellos se decidió cambiarle el color a los bloques que presentan las características internas del diodo, resultados, región tipo n, región tipo p y graficar. Se hizo esto con la finalidad de indicar como se divide la interfaz de Matlab y a los otros bloques del static text representan los valores que están ligados internamente a la estructura del diodo semiconductor.

En la siguiente gráfica se puede observar cómo queda la interfaz GUI una vez finalizado la colocación de cada uno de los bloques para su armado.

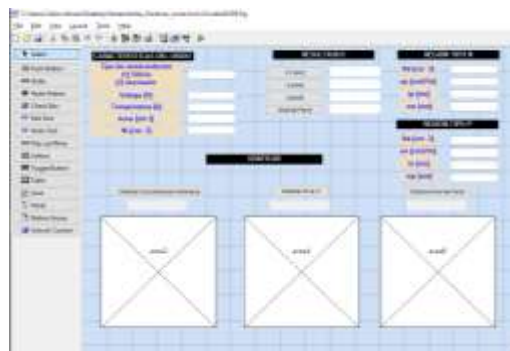


Figura 47. Interfaz finalizada – fuente autor

En la siguiente figura se puede observar la simulación de la interfaz una vez que se presiona el botón de correr la simulación.

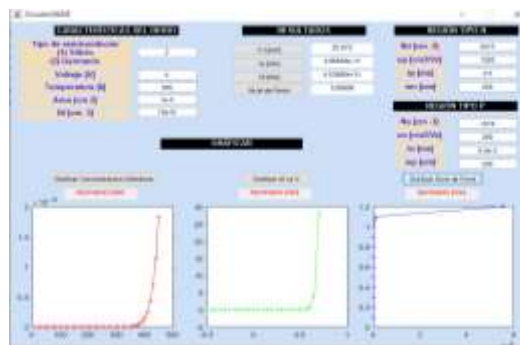


Figura 48. Interfaz en funcionamiento – fuente autor

### 4.3 Programa para encontrar los valores de la corriente del diodo en un circuito

En este apartado se realiza dos programas uno basado en la interfaz GUI y otro en Simulink, ambas herramientas son usadas por el programa Matlab. Primero se realiza el programa basado en la interfaz GUI.

#### 4.3.1 Diseño para la solución del circuito del diodo usando la interfaz Guide.

Ya se conoce el funcionamiento de cada bloque para poder crear una GUI en Matlab, como en el caso anterior los primeros pasos serán agregar los bloques de text, luego los bloques de push button, luego los bloques de axes y por último se agrega un bloque que va a presentar el diagrama del circuito.

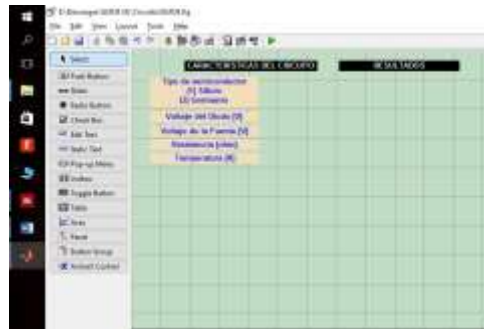


Figura 49. Bloques static text – fuente autor

El siguiente paso es agregar los bloques de edit text junto a los bloques de static text, estos bloques tienen como función el de poder ingresar los valores una vez que el programa esté en funcionamiento.

Un bloque de edit text va a mostrar la palabra silicio o germanio, dependiendo del tipo de semiconductor que se ha escogido para el funcionamiento del circuito.

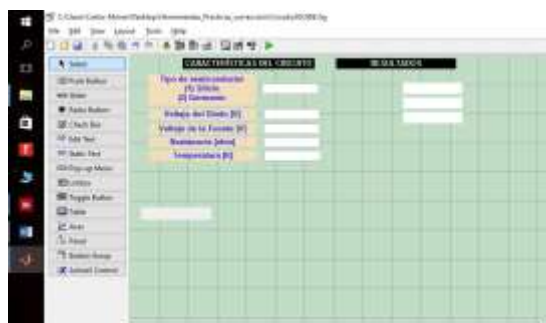


Figura 50. Bloques edit text – fuente autor

El siguiente paso es agregar los bloques push button que se encargan de realizar la función establecida para ese tipo de bloque.



Figura 51. Bloques push button- fuente autor

El último paso es agregar los botones axes que son los responsables de mostrar la gráfica Voltaje Vs Corriente del diodo y la gráfica del circuito empleado.



Figura 52. Bloques axes – fuente autor

Ya establecidos todos los bloques de la interfaz al presionar el botón de correr se muestra el diseño de la interfaz en funcionamiento.

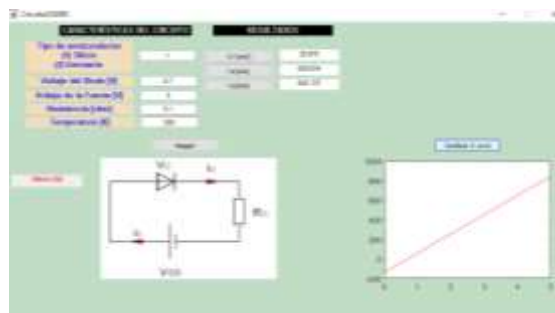


Figura 53. Interfaz completa – fuente autor

#### 4.3.2 *Diseño para la solución del circuito del diodo usando la interfaz Simulink.*

Se toma como base el mismo circuito representado en la interfaz Guide, pero en esta ocasión se lo va a resolver haciendo uso de Simulink.

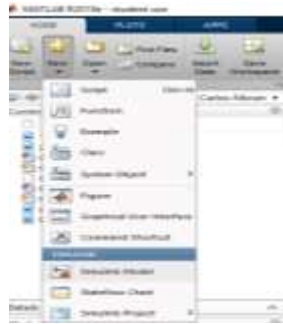


Figura 54. Simulink [19]

En el programa Matlab escogemos la opción que dice new, ahí se despliegan varias opciones se escoge la opción que dice Simulink model.

Otra opción de abrir Simulink es la de escribir en la línea de comando de Matlab la palabra Simulink.

Una vez abierto Simulink aparece la librería de esta herramienta

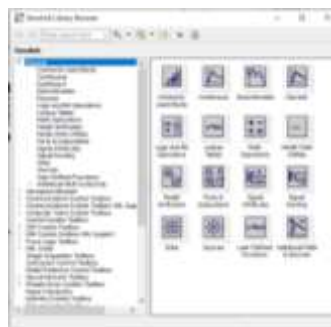


Figura 55. Librería de Simulink [19]

En esta librería se puede observar la extensa lista de bloques con los que se puede interactuar en esta herramienta, se puede observar que en la barra de herramientas existen varias opciones, entre esta tenemos un buscador donde se puede escribir directamente el nombre de bloques que se desee emplear y este muestra las opciones existentes de las diferentes librerías que presenta Simulink, junto a este aparece la opción para crear un nuevo modelo de Simulink, también se encuentra la opción para abrir algún proyecto ya existente, junto a este aparece un ícono para fijar la librería de Simulink y por ultimo aparece la opción de ayuda que nos brinda consejos y explicaciones sobre los bloques de la extensa librería de Simulink.

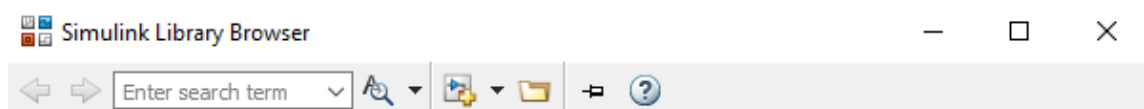


Figura 56. Barra de herramientas Simulink [19]

Se crea un nuevo proyecto de Simulink para proceder con el diseño, la ventana que aparece es la que se muestra a continuación.

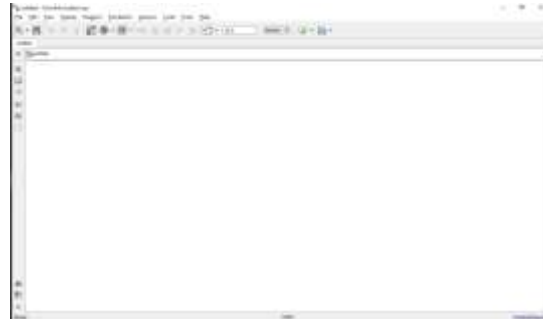


Figura 57. Pestaña para crear proyecto en Simulink [19]

En esta página al igual que la de la interfaz Guide se selecciona el bloque y se lo arrastra hasta la página, con diferencia que los bloques de Simulink ya están programados previamente, solo se necesita arrastrar los bloques con los que se desea trabajar y unirlos para que estos funcionen.

Se crea el siguiente circuito empleando las librerías de Simulink.



Figura 58. Diagrama del circuito en Simulink – fuente autor

Para crear el circuito visto en la figura anterior en las librerías de Simulink se busca cada uno de los elementos y una vez encontrados estos se los mueve hacia la pantalla de Simulink. Los elementos que se emplean en la figura anterior son el de una fuente de voltaje DC, un resistor y el de un diodo.

Para simplificar la búsqueda Simulink dispone de una barra donde se puede escribir el nombre del bloque y este nos da los resultados de todos los bloques asociados a ese nombre y se escoge el que se va a emplear en el circuito arrastrándolo desde la ventana de la librería hacia la pantalla de Simulink.



Figura 59. Librería Simulink [19]

Se debe tener en cuenta al diseñar el circuito que se deben emplear los elementos de la misma librería para no tener problemas al poner el circuito a funcionar, debido a que algunas librerías de Simulink presentan los mismos elementos que otras librerías, pero estos no funcionan en ocasiones entre sí por eso es aconsejable emplear bloques de un mismo tipo librerías, los elementos del resistor, el diodo y la fuente de voltaje que se emplean en el circuito pertenecen a la librería de Simscape.

El diodo empleado en el circuito es uno que permite editar los valores de la constante  $n$ , la temperatura y el voltaje del diodo, este se lo encuentra de manera más fácil al escribir en el buscador de Simulink la palabra diode, con esta acción aparecen varios bloques relacionados con los diodos, en especial aparecen cuatro bloques de diodo pero el que se va a usar es el segundo bloque de diodo que se encuentra, debido a que los otros bloques solo hacen referencia al valor del voltaje del diodo y no emplean la temperatura ni el coeficiente  $n$  como este bloque si lo hace.

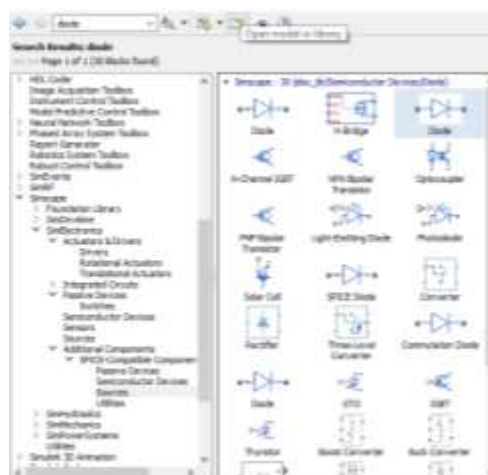


Figura 60. Bloque del diodo en Simulink [19]

Los bloques que se emplean para la simulación del circuito son:

- Solver configuration: define los parámetros a emplear en la simulación.
- Current sensor: obtiene el valor de la corriente.
- Electrical Reference: símbolo para representar la conexión a tierra
- PS -Simulink converter: permite convertir una señal de entrada en una señal física o viceversa.
- Display: muestra el resultado numérico del circuito.
- Scope: muestra el resultado del circuito a través de una gráfica.

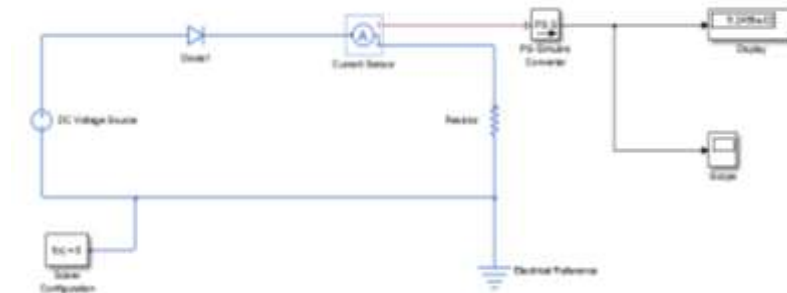


Figura 61. Circuito final Simulink – fuente autor

El bloque scope muestra la siguiente gráfica sobre la corriente del diodo versus el voltaje

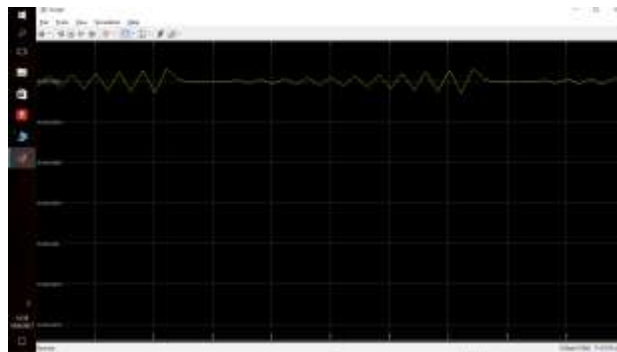


Figura 62. Gráfica corriente Vs voltaje del diodo – fuente autor

## 5. Desarrollo de la práctica

En este básico circuito se puede medir el voltaje del circuito y la corriente del mismo por medio de sensores, esta simulación fue hecha en el programa Proteus, esta simulación tiene el mismo funcionamiento que la que se realizó en Simulink.

Para medir el voltaje se emplea el sensor de voltaje SHT-166, el cual puede medir hasta 25 VDC, este sensor posee salida analógica. El sensor posee un divisor de tensión que nos da una relación de  $/5$ , esto quiere decir que el valor de entrada del voltaje puede ser hasta 5 veces más pequeño.

Para medir la corriente del diodo se hace uso del sensor de corriente ACS712 de 20 A, este sensor al igual que el de voltaje posee también una salida analógica, el ACS712 permite tener valores máximos de corriente de 20 A y posee una resolución de 100 mV por cada 1 A.

Para medir la temperatura se emplea el sensor LM35, al igual que los sensores anteriores este tiene salida analógica, el sensor puede medir 150 °C como máximo y entrega 10 mV por cada grado centígrado.

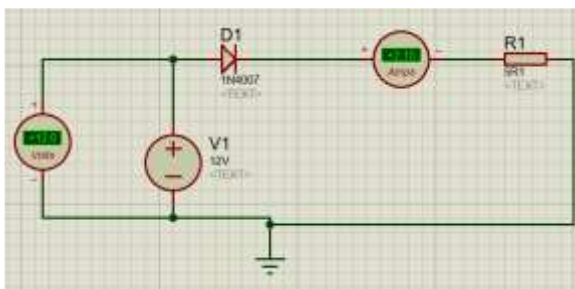


Figura 63. Simulación Proteus – fuente autor

### 5.1 Conexión de los sensores. –



En la siguiente figura se encuentra la misma conexión que la imagen anterior, pero en estas se incluyen los sensores de corriente, voltaje y temperatura.

Los conectores J1 y J2 son para poder probar diferentes diodos, los conectores J5 y J6 son para poner diferentes tipos de resistencias.

El sensor ACS712 mide la corriente en serie, el sensor de voltaje mide el voltaje en paralelo y el LM35 mide la temperatura por contacto.

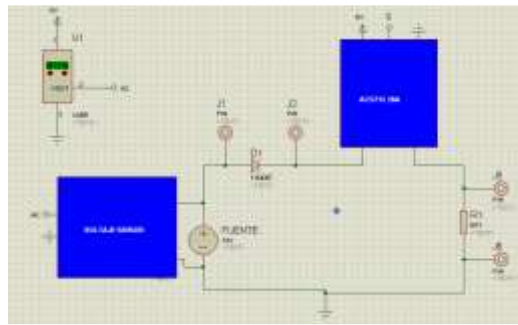


Figura 64. Conexión de los sensores en el circuito – fuente autor

## 5.2 Conexión sensores y Arduino. –

En esta imagen se puede observar la conexión completa del proyecto práctico, el sensor ACS712 al igual que el sensor LM35 y el sensor de voltaje necesitan de 5 V y GND para su funcionamiento, los cuales se obtienen de los pines de la tarjeta Arduino, para ello se conecta el pin de 5 V y el pin de GND como se detalla en la siguiente figura.

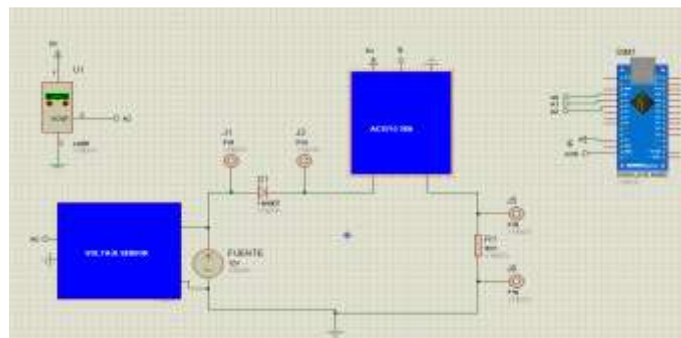


Figura 65. Conexión final del proyecto - fuente autor

## 5.3 Programación del proyecto en Arduino. –

Para poder realizar las lecturas desde la tarjeta Arduino se debe leer los canales analógicos, la conexión de los pines analógicos del Arduino es el siguiente:

A0 pin designado para el sensor de voltaje.

A1 pin designado para el sensor de corriente.

A2 pin designado para el sensor de temperatura.

La versión del programa de Arduino es la 1.8, aunque no se ha hecho implementación de librerías externas, el programa funciona con cualquier versión de Arduino descargada.

En la siguiente figura se puede observar la programación en el programa Arduino



Figura 66. Programa Arduino – fuente autor

Los datos que envía la Arduino están definidos de la siguiente manera, el primer dato corresponde al voltaje, el segundo dato corresponde a la corriente y el tercer dato corresponde a la temperatura. Todos los datos están expresados en la escala de mili, esto es mili voltios, mili amperios y mili °C, cada valor se encuentra separado por /, este separador permite tener los valores más ordenados y el signo / al final de los valores indica el fin de la instrucción.

#### 5.4 Programación del proyecto en Visual Studio. –

Se abre la solución gráfica 3Vs, en el lado derecho se obtiene el explorador de soluciones.



Figura 67. Solución gráfica Visual Studio – fuente autor

Se da doble clic sobre el archivo Form1.vb y este presenta la ventana de diseño como se puede observar en la siguiente imagen, esta es la ventana de diseño donde se puede ir agregando los componentes para la solución. En el lado derecho se encuentran las propiedades, de donde se pueden cambiar los colores, tamaños de letras y los colores del fondo.



Figura 68. Ventana de diseño – fuente autor

Lo primero que se debe tener en cuenta es que la solución posea comunicación serial para poder establecer la conexión con la tarjeta Arduino.

Para esto en el proyecto se agrega el componente serial port1, el cual permite leer los datos que envía la tarjeta Arduino.

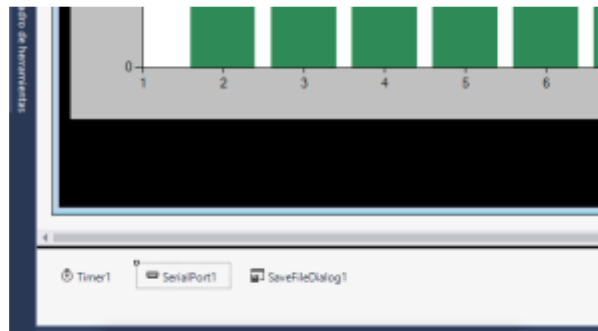


Figura 69. Componente serial -fuente autor

También se incluye un Timer en el programa, el cual se encarga de cada 200ms leer los datos del serial port1.

El componente que sirve para graficar las señales que provienen del serial port1 se llama chart1, siendo series 0= voltaje, series1 = corriente, series2 = temperatura.

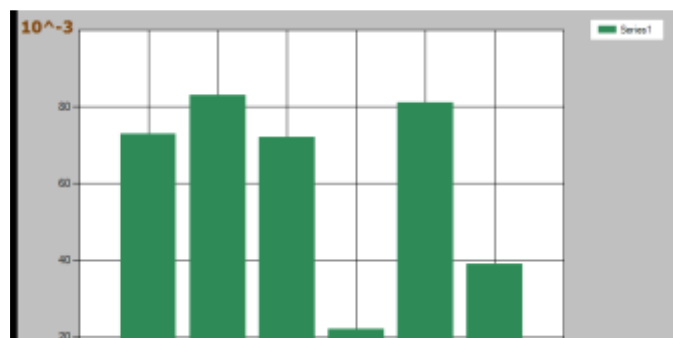


Figura 70. Gráficas de las señales – fuente autor

En el lado derecho del programa se tienen los botones de conectar, guardar imagen, borrar pantalla y cerrar aplicación.

**Conectar:** conecta el puerto COM en el cual está conectado la tarjeta Arduino en la PC, este botón sirve para abrir o cerrar el puerto.

**Guardar imagen:** guarda la imagen de la gráfica en el PC.

**Borrar pantalla:** limpia la pantalla de graficación (chart1).

**Cerrar aplicación:** cierra la aplicación de Visual Studio.

En el lado derecho también aparecen tres “TEXTBOX” donde se puede visualizar los valores de voltaje corriente y temperatura medidos desde Arduino.

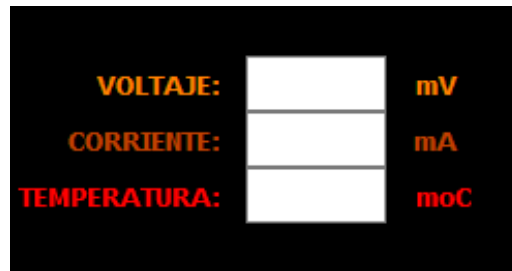


Figura 71. TEXTBOX -fuente autor



Figura 72. Programa finalizado en Visual Studio – fuente autor

Dando doble clic sobre cada botón se puede observar la ventana de programación del proyecto como se puede observar en la siguiente figura.

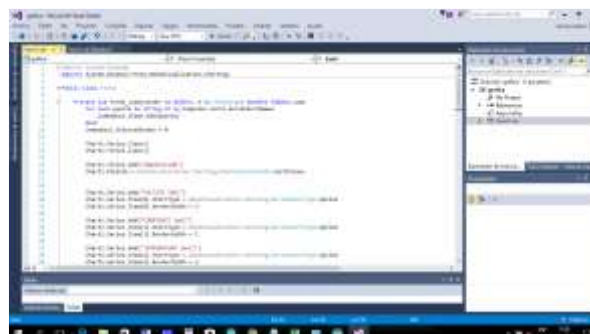


Figura 73. Programación del proyecto en Visual – fuente autor

El funcionamiento del programa es el siguiente:

- 1) El programa empieza por el form1\_load, esto es lo primero que se ejecuta al presionar el botón

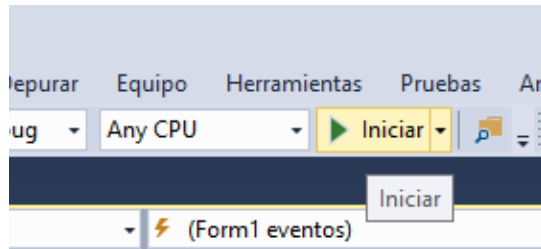


Figura 74. Ícono para iniciar programa – fuente autor

Al presionar el botón se carga el formulario o ventana de solución, en esta parte se inicia el chart1 y configura la velocidad de lectura al timer1 a 200ms.

- 2) Se ejecuta la programación correspondiente al botón 2 que es el botón de conectar, en este ciclo se va abrir o cerrar el puerto COM en el cual está conectado el Arduino y también se habilita o deshabilita el timer1.
- 3) Una vez que se presiona el botón conectar se habilita el timer1 y empieza a correr la programación del timer1 en este ciclo lo que se hace es leer el serial port1, o sea se leen los datos que provienen de la tarjeta Arduino con la instrucción SERIALREAD. Los datos que llegan al serial port1 son los mismos que se obtuvieron en el programa Arduino voltaje (mV), corriente (mA), temperatura (m °C).

## 6. Validación del modelo matemático del diodo de Silicio con respecto a un modelo práctico experimental

Para el desarrollo de la validación se hizo uso del lenguaje de programación Java y la interacción que presenta este lenguaje de programación con Arduino, como en los capítulos anteriores en Java también se diseñó un programa que permita mostrar los datos obtenidos por la tarjeta Arduino a través de los sensores conectados a esta y mostrarlos en la interfaz que se diseñó en Java, como primer paso se descargaron las últimas versiones de Java y Netbeans, luego de instalar estos programas se procede a abrir el directorio local y buscar donde se instaló el programa de Java, se abre la carpeta y buscamos la carpeta Java\_home, la abrimos y abrimos la carpeta jre, buscamos la carpeta bin y la abrimos, luego de abrir esta carpeta copiamos los archivos cp rxtxSerial.dll y cp rxtxParallel.dll en esta, estos archivos permiten realizar la comunicación entre el programa Java y la tarjeta Arduino, si no se realizan primero estos pasos cuando se quiera realizar la comunicación entre la tarjeta Arduino y Java se presentarán errores al tratar de querer compilar el programa.

Como se realizó anteriormente en los programas Matlab Y Visual Studio, en NetBeans también se va a crear una interfaz gráfica para tener una mejor visualización de los datos que se obtienen de los sensores con la tarjeta Arduino, se crea la interfaz que se muestra a continuación:

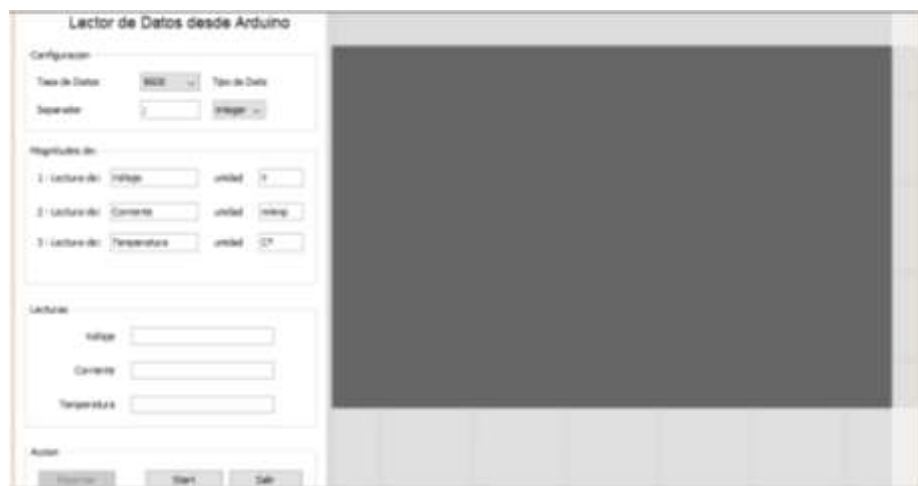


Figura 75. Interfaz Java y Arduino – fuente autor

En este programa se tienen varias divisiones en la parte de configuración se tienen la tasa de datos donde se coloca la tasa de baudios con la que lee la tarjeta, esta tasa de baudios debe de ser igual a la que se coloca en el programa de Arduino el cual se subió

a la tarjeta de no ser así se tendrá problemas con la velocidad a la que se adquieren los datos , otro bloque que se coloca es el del separador el cual al igual que el bloque anterior debe ser el mismo separador con el que se subió el programa a la tarjeta, este separador permite mostrar cada valor que se obtienen de la tarjeta Arduino en el apartado de lectura, las opciones que se presentan al lado del separador son integer double y string, en el apartado de magnitudes tres tipos de lectura las cuales son voltaje, corriente y temperatura junto a su respectiva unidad las cuales pueden ser modificadas para dejarlas expresadas como mV, mAmp y m°C que son los valores que arroja la tarjeta Arduino, el orden de estos bloques corresponde al orden de cómo están conectados los sensores a la tarjeta, siendo el sensor de voltaje que está colocado en el pin A0, el sensor de corriente se encuentra en el pin A1 y el de temperatura en el pin A2.

En la parte de acción se presentan tres botones los cuales son exportar, start y salir, la función de cada uno radica en que una vez conectado la tarjeta Arduino a la computadora al presionar el botón de start este procederá a entrar en funcionamiento y mostrará los valores de cada sensor en la casilla de lecturas en su orden correspondiente, el botón de exportar permite crear un archivo en formato xls para poder realizar una comparación entre el valor que muestra la tarjeta y el realizado mediante una simulación creada en Matlab con la herramienta Simulink y el botón de salir permite cerrar la aplicación. En el lado derecho del programa se puede visualizar una interfaz que al igual que la creada en Visual Studio permite mostrar una gráfica en tiempo real, la cual muestra el comportamiento de una onda senoidal cuando se alimenta la tarjeta Arduino con esta, esta onda va hacer suministrada por un generador de funciones el cual va a permitir ver el funcionamiento de la onda a través de los sensores de la tarjeta.

Esto respecto a la parte práctica para la parte de simulación en el programa de Matlab haciendo uso de la herramienta Simulink se va a crear un circuito que tenga todos los valores que se tienen en el circuito real para poder graficarlo, hacer una exportación a Excel de estos datos y posteriormente hacer la comparación de estos con los de la práctica y poder observar las diferencias que puedan presentar uno con el otro.

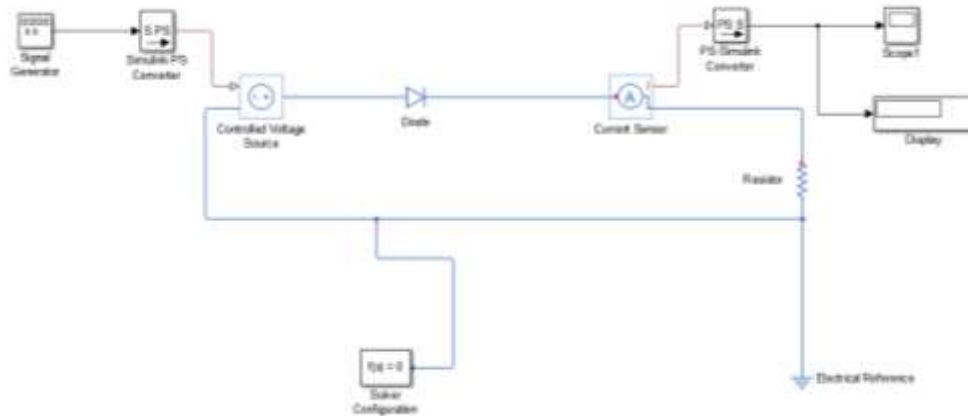


Figura 76. Simulación del circuito práctico-fuente autor

Al igual que la simulación realizada anteriormente en Simulink esta debe llevar un bloque de solver configuration caso contrario el circuito no va a funcionar, a diferencia del circuito que se realizó en capítulos anteriores en este se cambia la fuente DC por un generador de señal que va a permitir tener un comportamiento similar al que presenta el circuito práctico, para poder exportar los valores del circuito a Excel, se necesita primero modificar la ventana del scope que tiene el circuito, una vez abierto el scope, nos dirigimos a la parte de configuración de propiedades, cuando se abra la ventana se debe dirigir a la opción que dice logging y activamos la opción que dice log data to work space, en la opción de nombre de variable se la cambia por Y en el tipo de formato se pone en structure with time, como se puede ver a continuación:

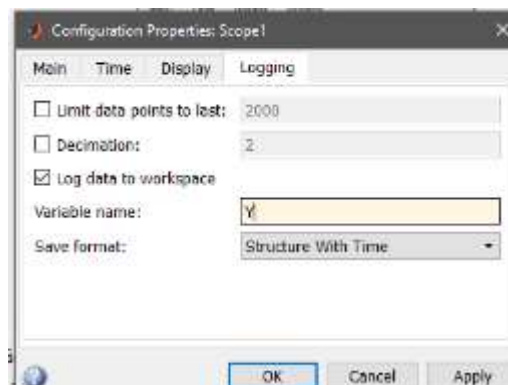


Figura 77. Configuración de propiedades – fuente – Matlab

Una vez realizado todos estos ajustes, se coloca un tiempo de 10 segundos y verificando que los datos del circuito que se va a simular son los mismos que del circuito original se procede hacer correr el programa de Simulink, una vez que se detenga de manera automática el programa de Simulink en la ventana de Matlab se



podrá observar que aparece un archivo con el nombre Y, este archivo es necesario para poder hacer la exportación de los datos a Excel, cuando se tenga este archivo se hace correr el programa llamado Crear\_excel. Este programa se encarga de llevar los datos obtenidos del programa de Simulink a un archivo de Excel.

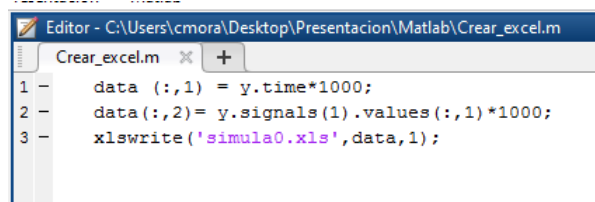


Figura 78. Programa para crear archivo en Excel – fuente autor

Al obtener este archivo de Excel junto con el que se creó en la práctica se puede realizar la comparación de estos archivos con el programa llamado ComparacionDatosCorriente al dar clic en ejecutar este crea la siguiente ventana

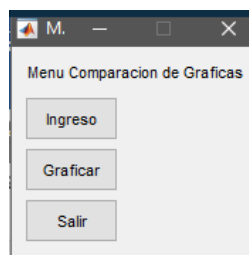


Figura 79. Programa para comparar archivos Excel – fuente autor

Este programa presenta tres opciones ingreso, graficar y salir. La opción de ingreso nos lleva a otras opciones las cuales piden ingresar el archivo de Excel de la simulación el de la práctica y el botón de aceptar cuando ya se ingresaron los archivos ya mencionados.



Figura 80. Ventana para ingresar archivos de Excel - fuente autor

Una vez ingresado los valores se procede a presionar el botón graficar y este se encarga de mostrar la gráfica de los archivos por separado y la comparación de estos, es decir monta una gráfica sobre otra para poder observar donde existe algún tipo de variación entre estas.

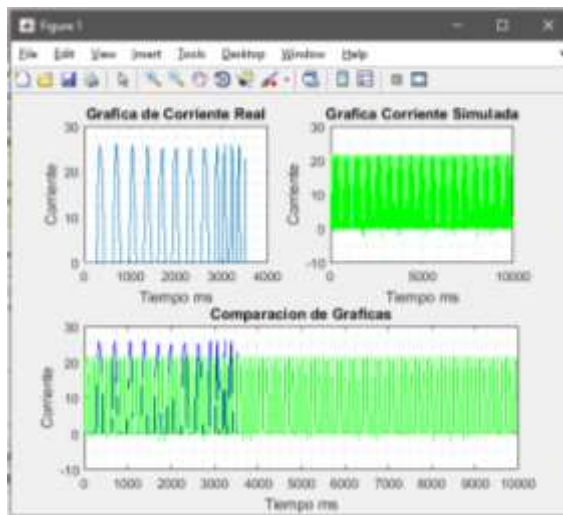


Figura 81. Comparación de las gráficas -fuente autor

## **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **7.1 Conclusiones**

- Para poder comprender el funcionamiento de un dispositivo semiconductor es necesario obtener una clara representación de los procesos físicos y eléctricos implicados. También es necesario desarrollar una especificación de los procesos que no se pueden observar de manera directa. Esto se lo consigue por medio de la implementación de algún tipo de relación que sigue el comportamiento del dispositivo lo más cercano posible dentro de la limitación del entorno de operación definido. La técnica que permite realizar estos procesos es a lo que se llama modelado.
- Este estudio sobre el modelamiento matemático del diodo semiconductor permite comprender de una mejor forma su funcionamiento, sobre todo comprender como ha ido evolucionando y ganando mucha importancia en la electrónica moderna, todo esto debido al gran avance tecnológico.
- Para la demostración del modelado del diodo se decidió optar por el programa Matlab debido a la gran capacidad que presenta para poder realizar operaciones de este tipo, siendo un programa ampliamente utilizado en el mundo de la ingeniería.
- Con el empleo de los comandos adecuados en Matlab se puede aprender a realizar modelados matemáticos de una manera sencilla, clara y muy eficiente.
- Para los cálculos del circuito se decidió por el programa Matlab y su herramienta Simulink, por las extensas librerías que presentan y la sencillez que brindan estos programas para realizar estas operaciones matemáticas.
- De las simulaciones que se crearon se puede llegar a concluir que tanto Matlab como Simulink presentan una gran opción para el análisis y simulación de los dispositivos semiconductores debido a la facilidad con la que se pueden encontrar los resultados, visualizarlos, por presentar una amplia variedad de aplicaciones y por la sencillez a la hora de realizar los programas.
- Dado la importancia que tiene el uso de los dispositivos semiconductores en la actualidad, es importante comprender el modelado matemático del diodo que se puede considerar como una base para el estudio de otros dispositivos semiconductores más complejos por ejemplo el transistor. También se puede ver la importancia que tiene la temperatura respecto a la corriente de saturación del diodo.
- El modelado cumple un papel muy importante en el diseño, desarrollo y comprensión de los dispositivos semiconductores. Tradicionalmente para el desarrollo

de un dispositivo de estado sólido en gran parte se lo hacía de manera empírica, requiriendo muchas repeticiones en la etapa de fabricación para poder obtener la especificación deseada. La técnica del modelado matemático permite reducir fundamentalmente el tiempo y los costos requeridos para desarrollar un dispositivo determinado, permitiendo al diseñador encontrar los valores adecuados antes de la etapa de fabricación.

## **7.2 Recomendaciones**

- Observar los componentes que conforman el circuito electrónico, antes de iniciar la implementación, sean estas fuentes de voltajes, tarjetas Arduino, sensores, diodos, o resistencias, para evitar la mala utilización y deterioro de alguno de estos dispositivos.
- Tener cuidado con las conexiones de la tarjeta Arduino, debido a que si hace una conexión equivocada de los dispositivos al comenzar aumentar el voltaje de la fuente esta tarjeta podría averiarse.
- Tener cerca todos los dispositivos para poder facilitar la ejecución y simulación del programa.
- Realizar el procedimiento siguiendo las instrucciones previamente establecidas para la práctica, para evitar cualquier error en la conexión de algún circuito.
- Verificar que las conexiones estén realizadas de manera correcta con la finalidad de evitar algún cortocircuito que pueda afectar los dispositivos.
- Para realizar mediciones de corrientes mayores a 1 A, se recomienda emplear resistencia de 10 W, que estas son capaces de resistir corrientes altas, por ese motivo en el proyecto no se emplean potenciómetros porque estos pueden resistir 500 mA y al querer trabajar con corrientes mayores se pueden quemar, dado este inconveniente para cuando se deseen realizar mediciones de corriente de más de 1 amperio se van a emplear resistencias de 5.1 ohmios a 10 Watts,
- Para el estudio del modelado matemático del diodo se recomienda tener como base un buen nivel tanto de matemática como de física, ya que muchos de los cálculos para resolver el modelado se basan en estos dos.
- Para el estudio de dispositivos semiconductores más avanzados se recomienda tener un conocimiento previo sobre el semiconductor PN, dado que este es considerado como la base para el estudio de los demás dispositivos.

Se recomienda para poder correr el programa que hace funcionar el proyecto práctico primero tener conectado todo el circuito y la tarjeta Arduino a la PC, caso contrario cuando se corra el programa saldrá un mensaje de error porque no se encuentra el puerto COM de la tarjeta Arduino.

## 8. ANEXOS

### 8.1 Anexo 1

#### Sensor de corriente. –

Este sensor de corriente diseñado por la compañía Allegro Microsystems, proporciona una solución económica y específica en las mediciones de corriente AC o DC. El funcionamiento de este sensor se basa en el efecto de campo Hall el cual funciona convirtiendo el campo magnético que se genera debido al paso de la corriente a través de un conductor de cobre que está dentro del sensor a un voltaje variable. Esto indica que mientras mayor sea el valor de la corriente, más alto será el valor de voltaje que se tendrá sobre el pin.

Este sensor se lo puede encontrar en 3 modelos diferentes, tenemos el sensor ACS712ELCTR-05B-T este sensor permite mediciones de hasta 5 Amp, el ACS712ELCTR-20A-T permite valores de hasta 20 Amp y el ACS712ELCTR-30A-T que permite valores máximos de 30 Amp. Estos tres modelos presentan la misma variación de voltaje en su pin de salida, esto quiere decir que en cualquier sensor su salida analógica va a variar entre 0 y 5V, debido a que se trabajará con corrientes superiores a los 5A y menores a los 20A se empleará el sensor ACS712 de 20A el cual presenta una sensibilidad de 100 mV/A.



Figura 82. Sensor de corriente

Presenta tres pines Vcc que es donde se conecta la alimentación (5V) proveniente de la tarjeta Arduino, GND va conectado al pin GND de la tarjeta Arduino y OUT es el pin que lleva la señal hacia el pin analógico definido en la tarjeta Arduino.

### **Sensor de temperatura. –**

Para la medición de la temperatura del diodo semiconductor se va hacer uso del sensor de temperatura analógico LM35, presenta un rango de operación que va desde -55°C hasta 150°C, presenta una precisión de  $\pm 1.4^{\circ}\text{C}$  cuando está a temperatura ambiente. Este es un sensor lineal, es decir que no se realizan conversiones para encontrar la respuesta, dado que otros sensores arrojan la respuesta en grados Kelvin.

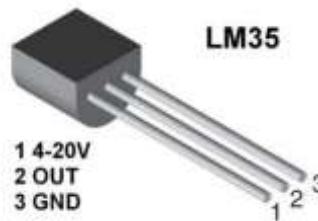


Figura 83. Sensor de temperatura

Al igual que el sensor de corriente este sensor también posee tres terminales, el pin 1 es el de alimentación este se conecta al pin de alimentación (5V) del Arduino, el pin 3 es el pin de tierra (GND), este pin se conecta con el pin GND proveniente de la tarjeta Arduino y el pin 2 es el pin OUT es el encargado de llevar la señal hacia la tarjeta Arduino, este pin se conecta al pin establecido previamente para este sensor.

### **Sensor de voltaje. —**

Para la medición del voltaje se emplea el sensor SHT166, el cual viene incluido con un divisor de tensión resistivo, puede hacer que el valor del voltaje de entrada sea hasta 5 veces más pequeño



Figura 84. Sensor de voltaje

Al igual que los sensores anteriores este también dispone de 3 pines y se conectan de la misma forma como los sensores anteriores con la tarjeta Arduino.





## Ejercicio 2

Se toma como valores del diodo de silicio el voltaje del diodo 0,7 V, valor del resistor 10 ohmios, valor de la fuente 10 voltios y el valor de la temperatura 23 °C.

Se procede primero a ingresar los valores en el programa diseñado en Matlab empleando la interfaz Guide.

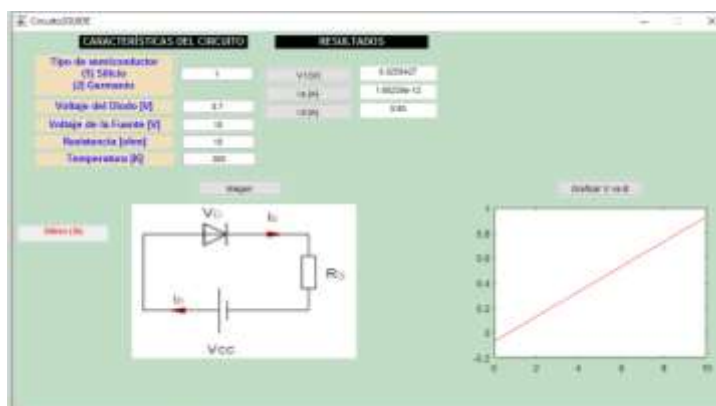


Figura 86. Simulación del circuito empleando la interfaz Guide – fuente autor.

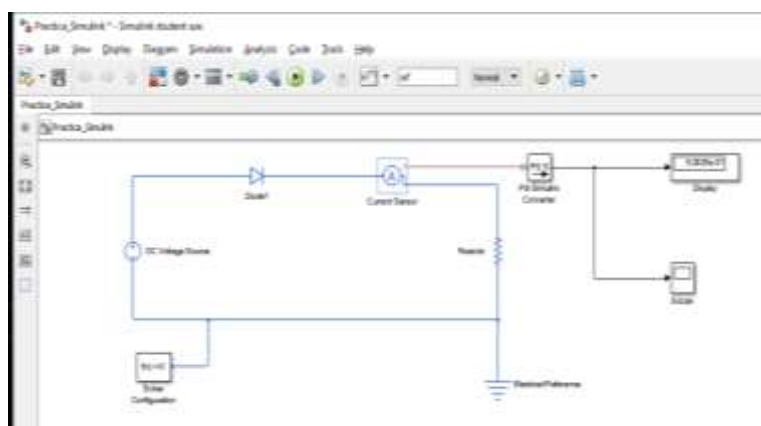


Figura 87. Simulación Simulink – fuente autor

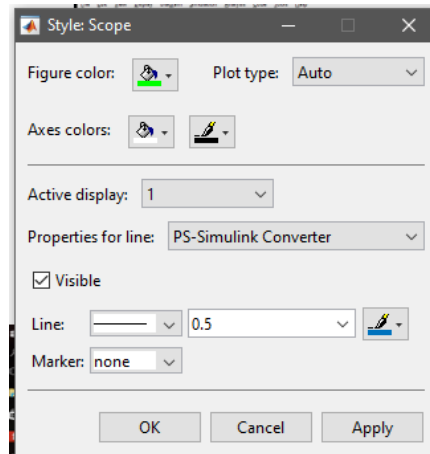


Figura 88. Configuración del bloque Scope – fuente Matlab

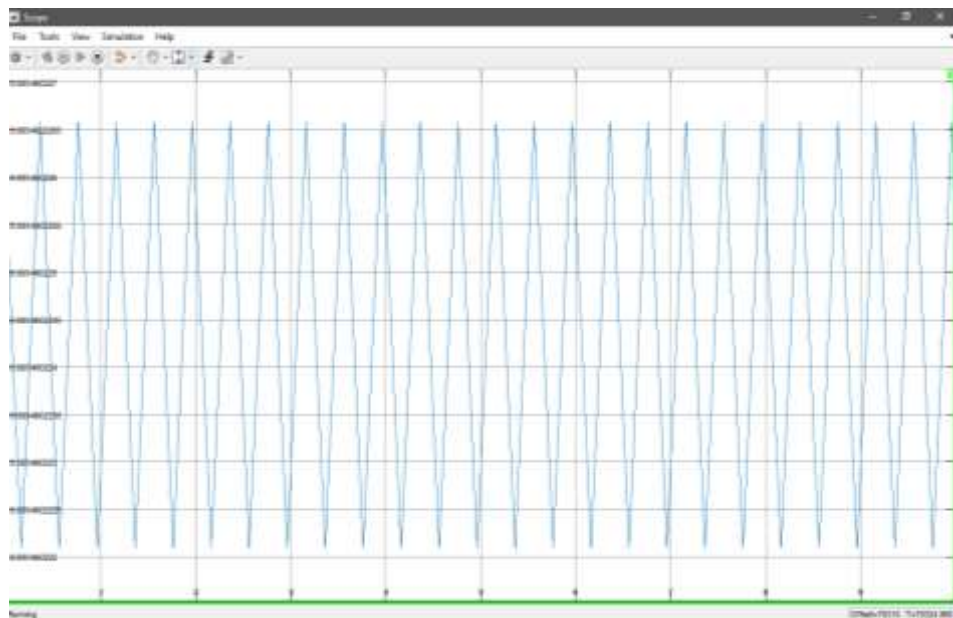


Figura 89. Gráfica V vs I, rango de valores del circuito -fuente autor

### 8.3 Anexo 3

#### Programa en la tarjeta Arduino

```
int x,y,z;//DECLARACION DE VARIABLES

float v,t;//DECLARACION DE VARIABLES

int ACSPin = A1;

const float ampFactor = (50.76053976653696 / 1024.0);//FACTOR PARA HACER
CALCULOS

void setup() {

    Serial.begin(9600);//INICIA LA COMUNICACION SERIAL ENTRE EL
    ARDUINO Y LA PC

}

void loop() { //PROGRAMA PRINCIPAL BUCLE INFINITO

    x=analogRead(A0);//LEO EL PUERTO ANALOGO A0 CORRESPONDIENTE
    AL SENSOR DE VOLTAJE

    y=analogRead(A1);//LEO EL PUERTO ANALOGO A1 CORRESPONDIENTE
    AL SENSOR DE CORRIENTE

    t=0;

    for(int u=0;u<5;u++){//repita 5 veces

        z=analogRead(A2);//LEO EL PUERTO ANALOGO A2 CORRESPONDIENTE AL
        SENSOR DE TEMPERATURA

        //REVISAR COMO SE REALIZA LA CONVERSION ANALOGO A DIGITAL
        DE 10 BITS.

        t=t+(z/2.05);//FACTOR DE CONVERSION PARA A PARTIR DE LO QUE LEE
        EL ARDUINO EN EL ADC CONVERTIRLO A MILIgradoscentigrados

        delay(1);

    }
```

```

t=(t/5)*1000;

v=25*x;//FACTOR DE CONVERSION Y AJUSTE PARA A PARTIR DE LO QUE
LEE EL ARDUINO ADC CONVERTIR A MILIVOLTS

float i= (analogRead(A1) - 511);//LEO EL SENSOR DE CORRIENTE Y RESTO
EL VALOR DC OFFSET DE 2.5V,

i=(i*ampFactor)*1000;//FACTOR DE CONVERSION PARA CONVERTIR EN
MILIAMPERS

Serial.print(v,0);//ENVIO A LA PC EL VALOR DEL VOLTAJE

Serial.print("/");//ENVIO A LA PC UN SEPARADOR

Serial.print(i,0);//ENVIO A LA PC EL VALOR DE CORRIENTE Y NINGUN
NUMERO PUNTO DECIMAL

Serial.print("/");//ENVIO A LA PC UN SEPARADOR

Serial.print(t,0);//ENVIO A LA PC EL VALOR DE LA TEMPERATURA

Serial.println("/");//ENVIO A LA PC UN SEPARADOR

delay(500);//TIEMPO DE MUESTREO, CADA 200ms VA A REALIZAR UNA
NUEVA LECTURA

} //FIN DEL CICLO DE LECTURA Y REPITE EL PROGRAMA INFINITAMENTE

```

## 8.4 Anexo 4

### 8.4.1 Programa en Matlab para el diseño de la herramienta del modelado matemático



Figura 90. Herramienta del modelado matemático – fuente autor

```
function varargout = CircuitoGUIDE(varargin)
```

```
% CIRCUITOGUIDE M-file for CircuitoGUIDE.fig
```

```
%    CIRCUITOGUIDE, by itself, creates a new CIRCUITOGUIDE or raises the  
existing
```

```
%    singleton*.
```

```
%
```

```
%    H = CIRCUITOGUIDE returns the handle to a new CIRCUITOGUIDE or the  
handle to
```

```
%    the existing singleton*.
```

```
%
```

```
%    CIRCUITOGUIDE('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local  
function named CALLBACK in CIRCUITOGUIDE.M with the given input  
arguments.
```

```
%
```

```
%    CIRCUITOGUIDE('Property','Value',...) creates a new CIRCUITOGUIDE or  
raises the
```

```

%     existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%
%     applied to the GUI before CircuitoGUIDE_OpeningFcn gets called. An
%
%     unrecognized property name or invalid value makes property application
%
%     stop. All inputs are passed to CircuitoGUIDE_OpeningFcn via varargin.
%
%
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%
%     instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
%
% Edit the above text to modify the response to help CircuitoGUIDE
%
% Last Modified by GUIDE v2.5 27-Jan-2017 00:32:36
%
% Begin initialization code - DO NOT EDIT

gui_Singleton = 1;

gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @CircuitoGUIDE_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @CircuitoGUIDE_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [] , ...
                  'gui_Callback', []);

if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});

```

```

else

    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});

end

% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before CircuitoGUIDE is made visible.

function CircuitoGUIDE_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

% This function has no output args, see OutputFcn.

% hObject    handle to figure

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% varargin   command line arguments to CircuitoGUIDE (see VARARGIN)

% Choose default command line output for CircuitoGUIDE

handles.output = hObject;

% Update handles structure

guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes CircuitoGUIDE wait for user response (see UIRESUME)

% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.

function varargout = CircuitoGUIDE_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);

% hObject    handle to figure

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure

```

```

varargout{1} = handles.output;

function Tsemi_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to Tsemi (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global Tsemi;

global n;

global Ef;

global Eg;

global mn;

global mp;

global A;

Tsemi=str2double(get(hObject,'String'));

mo=9.1e-31;          % [kg]

Kb=0.0000861;       % [eV/K]

h=4.1356e-15;       % [eV/s]

if Tsemi==1         % Silicio

    n=1;

    Ef=0.55;         % [eV]

    Eg=1.1;          % [eV] Si

    mn=1.18*mo;

    mp=0.81*mo;

    tx='Silicio (Si)';

    set(handles.text29,'String',tx);

```



```

    set(handles.text30,'String',tx);

    set(handles.text31,'String',tx);

else

    n=2;           % Germanio

    Ef=0.68;       % [eV]

    Eg=0.68;       % [eV] Ge

    mn=0.55*mo;

    mp=0.36*mo;

    tx='Germanio (Ge)';

    set(handles.text29,'String',tx);

    set(handles.text30,'String',tx);

    set(handles.text31,'String',tx);

end

A=4*((2*pi*Kb)/h^2)^3*(mn*mp)^(3/2);

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Tsemi as text

%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Tsemi as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function Tsemi_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to Tsemi (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%      See ISPC and COMPUTER.

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),

```

```

get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

set(hObject,'BackgroundColor','white');

end

function Vdiodo_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to Vdiodo (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

global Vdiodo;

Vdiodo=str2double(get(hObject,'String'));

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Vdiodo as text

%    str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Vdiodo as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function Vdiodo_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to Vdiodo (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%    See ISPC and COMPUTER.

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Temp_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to Temp (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

global Temp;

Temp=str2double(get(hObject,'String'));

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Temp as text

% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Temp as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function Temp_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject handle to Temp (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

% See ISPC and COMPUTER.

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Vfuelle_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject handle to Vfuelle (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

global Vfuelle;

Vfuelle=str2double(get(hObject,'String'));

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Vfuelle as text

```

```

%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Vfuelle as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function Vfuelle_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to Vfuelle (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%      See ISPC and COMPUTER.

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Resist_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to Resist (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

global Resist;

Resist=str2double(get(hObject,'String'));

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Resist as text

%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Resist as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function Resist_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to Resist (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%    See ISPC and COMPUTER.

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in Vt.

function Vt_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to Vt (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global Temp;

global Vt;

Kb=1.38e-23;      %[eV/K]

q=1.6e-19;       %[C]

Vt=(Kb*Temp*1000)/q;

set(handles.text10,'String',Vt);

% --- Executes on button press in pushbutton2.

function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global Vt;

```

```

global up;

global un;

global tp;

global tn;

global Area;

global wn;

global wp;

global Nd;

global Na;

global ni;

global Is;

% Datos

Kb=1.38e-23;      %[eV/K]

q=1.6e-19;        %[C]

% Calculos

Dp=up*Vt/10000;

Dn=un*Vt/10000;

Lp=sqrt(tp*1e-3*Dp);

Ln=sqrt(tn*1e-3*Dn);

% Ecuación de la corriente de saturación

Is=q*(Area/1e4)*((Dp/Lp)*(1/tanh((wn*1e-
6)/Lp))*(1/(Nd*1e6)))+(Dn/Ln)*(1/tanh((wp*1e-6)/Ln))*(1/(Na*1e6)))*(ni*1e6)^2;

set(handles.text11,'String',Is);

% --- Executes on button press in pushbutton4.

function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to pushbutton4 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global Is;

global Vdiodo;

global Vt;

global n;

Id=Is*(exp((Vdiodo*1000)/(Vt*n))-1);

set(handles.text13,'String',Id);

% --- Executes on button press in pushbutton5.

function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to pushbutton5 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global Ef;

global Temp;

Kb=1.38e-23;      %[eV/K]

E=0.5;           %[eV]

F=1/(1+exp((E-Ef)/(Kb*Temp)));

set(handles.text14,'String',F);

% --- Executes on button press in pushbutton6.

function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to pushbutton6 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global A;

global Temp;

global Eg;

Kb=1.38e-23;      %[eV/K]

ni=(A*Temp^3)*exp(-Eg/(Kb*Temp));

set(handles.text15,'String',ni);

% --- Executes on button press in pushbutton7.

function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to pushbutton7 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global Ef;

global Temp;

Kb=1.38e-23;      %[eV/K]

E=[0.1:0.1:1.2];    %[eV], en el libro de dispositivos semiconductores se establece
el rango de funcionamiento

F=1/(1+exp((E-Ef)/(Kb*Temp)));

handles.g1=plot(handles.axes5,F,E,'b-+');

% --- Executes on button press in pushbutton8.

function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to pushbutton8 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global A;

```



```

global Eg;

Kb=1.38e-23;      %[eV/K]

T=[10:10:450];    %[k], se pone esta temperatura porque es el rango de uso mas
frecuente del diodo

Tinv=T.^(-1);

ni=(A*T.^3).*exp(-Eg*Tinv/Kb);

handles.g2=plot(handles.axes2,T,ni,'r-+');

% --- Executes on button press in pushbutton9.

function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to pushbutton9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global Vt;

global Is;

% Datos

Vd=[-0.5:0.05:0.7]; %[V]

% Ecuación de Shockley

Id=Is*(exp(Vd/(Vt/1000))-1);

% Graficar

handles.g3=plot(handles.axes4,Vd,Id,'g-+');

function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global Nd;

```

```

Nd=str2double(get(hObject,'String'))

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit6 as text

%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit6 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit6 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%      See ISPC and COMPUTER.

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit7 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global up;

up=str2double(get(hObject,'String'));

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit7 as text

%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit7 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to edit7 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%    See ISPC and COMPUTER.

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit8 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global tp;

tp=str2double(get(hObject,'String'));

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit8 as text

%    str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit8 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit8 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%    See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

set(hObject,'BackgroundColor','white');

end

function edit9_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit9 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

global wn;

wn=str2double(get(hObject,'String'));

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit9 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit9 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit9 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%        See ISPC and COMPUTER.

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

    set(hObject,'BackgroundColor','white');

end

function edit10_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to edit10 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global Na;

Na=str2double(get(hObject,'String'));

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit10 as text

%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit10 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit10_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit10 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%         See ISPC and COMPUTER.

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit11_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit11 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global un;

un=str2double(get(hObject,'String'));

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit11 as text

%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit11 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit11 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%      See ISPC and COMPUTER.

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit12_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit12 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global tn;

tn=str2double(get(hObject,'String'));

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit12 as text

%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit12 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit12_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit12 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

% See ISPC and COMPUTER.

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit13_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject handle to edit13 (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

global wp;

wp=str2double(get(hObject,'String'));

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit13 as text

% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit13 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit13_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject handle to edit13 (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

% See ISPC and COMPUTER.

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),

```

```

get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

set(hObject,'BackgroundColor','white');

end

function edit14_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit14 (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global Area

Area=str2double(get(hObject,'String'));

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit14 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit14 as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit14_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit14 (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%        See ISPC and COMPUTER.

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit15_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit15 (see GCBO)

```



```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

global ni;

ni=str2double(get(hObject,'String'));

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit15 as text

% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit15 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit15_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject handle to edit15 (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

% See ISPC and COMPUTER.

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function axes3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject handle to axes3 (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes3

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```

```

function text3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to text3 (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% --- Executes on button press in pushbutton10.

function pushbutton10_Callback(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to pushbutton10 (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

#### 8.4.2 Programa Matlab para la simulación del circuito

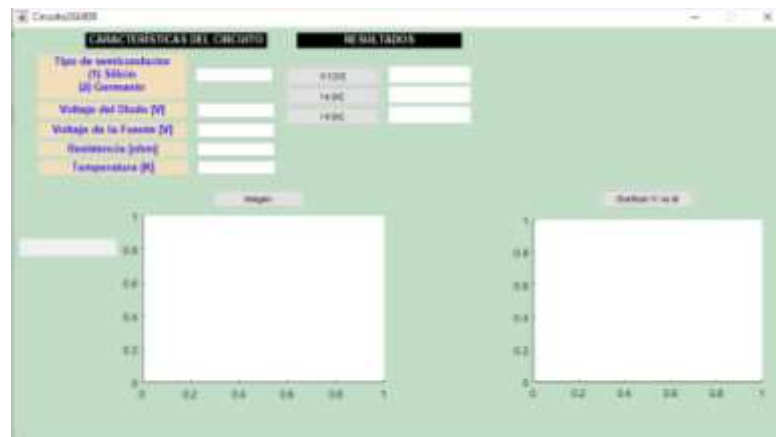


Figura 91. Simulación del circuito – fuente autor.

```

function varargout = Circuito2GUIDE(varargin)

% CIRCUITO2GUIDE M-file for Circuito2GUIDE.fig

%    CIRCUITO2GUIDE, by itself, creates a new CIRCUITO2GUIDE or raises the
existing

%    singleton*.

%

%    H = CIRCUITO2GUIDE returns the handle to a new CIRCUITO2GUIDE or the
handle to

```

```

% the existing singleton*.

%

% CIRCUIOTO2GUIDE('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the
local

% function named CALLBACK in CIRCUIOTO2GUIDE.M with the given input
arguments.

%

% CIRCUIOTO2GUIDE('Property','Value',...) creates a new CIRCUIOTO2GUIDE or
raises the

% existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are

% applied to the GUI before Circuito2GUIDE_OpeningFcn gets called. An

% unrecognized property name or invalid value makes property application

% stop. All inputs are passed to Circuito2GUIDE_OpeningFcn via varargin.

%

% *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one

% instance to run (singleton)".

%

% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Circuito2GUIDE

% Last Modified by GUIDE v2.5 12-Apr-2017 12:13:39

% Begin initialization code - DO NOT EDIT

gui_Singleton = 1;

gui_State = struct('gui_Name', mfilename, ...

    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...

    'gui_OpeningFcn', @Circuito2GUIDE_OpeningFcn, ...

```

```

        'gui_OutputFcn', @Circuito2GUIDE_OutputFcn, ...

        'gui_LayoutFcn', [] , ...

        'gui_Callback', []);

if nargin && ischar(varargin{1})

    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});

end

if nargin

    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});

else

    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});

end

% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Circuito2GUIDE is made visible.

function Circuito2GUIDE_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

% This function has no output args, see OutputFcn.

% hObject    handle to figure

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% varargin   command line arguments to Circuito2GUIDE (see VARARGIN)

% Choose default command line output for Circuito2GUIDE

handles.output = hObject;

% Update handles structure

guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Circuito2GUIDE wait for user response (see UIRESUME)

```

```

% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.

function varargout = Circuito2GUIDE_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);

% hObject handle to figure

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure

varargout{1} = handles.output;

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)

global V;

V=str2double(get(hObject,'String'));

% hObject handle to edit1 (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1 as text

% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit1 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject handle to edit1 (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

% See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)

global R;

R=str2double(get(hObject,'String'));

% hObject    handle to edit2 (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit2 (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%         See ISPC and COMPUTER.

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton1.

```

```

function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

a=imread('2.jpg');

set(handles.text5,'String','RESULTADOS');

axes(handles.axes1);

image(a)

axis off

% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Vd;

Vd=str2double(get(hObject,'String'));

% hObject    handle to edit3 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3 as text

%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit3 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit3 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%         See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton2.

function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Temp;

global Vt;

Kb=1.380e-23;      % [J/K]

q=1.602e-19;      % [C]

Vt=(Kb*Temp)/q;

set(handles.text6,'String',Vt);

% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on button press in pushbutton3.

function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)

global V

global Vd

global n

global R

global Vt

global Is

Is=(V-Vd)/(R*exp(Vd/(n*Vt))-1);

```



```

set(handles.text7,'String',Is);

% hObject    handle to pushbutton3 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on button press in pushbutton4.

function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Vt

global Vd

global Id

global Is

global n

Id = Is*(exp(Vd/(n*Vt))-1);

set(handles.text8,'String',Id);

% hObject    handle to pushbutton4 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Temp

Temp=str2double(get(hObject,'String'));

% hObject    handle to edit4 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit4 as text

%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit4 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit4 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%       See ISPC and COMPUTER.

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Tsemi;

global n;

Tsemi=str2double(get(hObject,'String'));

if Tsemi==1           % Silicio
    n=1;

    tx='Silicio (Si)';

    set(handles.text11,'String',tx);

else

    n=2;              % Germanio

    tx='Germanio (Ge)';

    set(handles.text11,'String',tx);

end

```

```

% hObject    handle to edit5 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit5 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% hObject    handle to edit5 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton5.

function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)

global V;

global Vd;

global R;

Vg=[0:0.1:V];

Idg=(Vg-Vd)/R;

handles.g1=plot(handles.axes2,Vg,Idg,'r'),xlabel('V [V]'),ylabel('Id [mA]');

```

```
% hObject    handle to pushbutton5 (see GCBO)

% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

## 9. Glosario

$E_F$  nivel de Fermi

ZCE: Zona de Carga Espacial

$V_{bi}$ : Potencial de Contacto

$E_i$ : magnitud de la energía potencial en la unión P-N

$\psi$ : Potencial Electrostático

$N_D^+$ : iones positivos

$N_A^-$ : iones negativos

$E_i$  nivel de Fermi intrínseco

$W$ : La anchura de la ZCE

$\epsilon_{max}$ : Máximo valor del campo eléctrico interno

$Q$ : Densidad de carga eléctrica

$a$ : gradiente de impurezas

$g_{ext}$ : Generación externa de portadores.

$U$ : Recombinación neta

$\Delta p$ : Variación de huecos

$\tau_p$ : Tiempo de vida media de los huecos

$\tau_n$ : Tiempo de vida media de los electrones

$J_p$ : Corriente de difusión

$J_n$ : Corriente de arrastre

$z$ : Distancia medida a partir del punto  $x_N$

$w_N$ : Es la anchura total de la zona neutra

$L_p$ : Longitud de difusión huecos

$L_n$ : Longitud de difusión electrones

$J_{dn}$ : corriente de difusión de electrones mayoritarios  
 $J_{dp}$ : corriente de difusión de huecos minoritarios  
 $J_D$ : densidad de corriente del diodo  
 $I_D$ : Corriente total del diodo  
 $I_S$ : Corriente inversa de saturación del diodo  
 $V_D$ : Diferencia de potencial a través del diodo  
 $E_c$ : bandas de conducción  
 $E_v$ : banda de valencia  
 $n_0$ : concentraciones en equilibrio térmico de electrones  
 $p_0$ : concentraciones en equilibrio térmico de huecos  
 $N_c$ : Densidad de estados de la banda de conducción.  
 $N_v$ : Densidad de estados de la banda de valencia.  
 $m_n$ : Masa efectiva de densidad de estados de electrones.  
 $m_p$ : Masa efectiva de densidad de estados de huecos.  
 $h$ : Constante de Planck  
 $F(E)$ : Probabilidad de que un electrón ocupe un nivel de energía  $E$   
 $E$ : Energía de estado  
 $E_f$ : Nivel de energía constante denominada "Nivel de Fermi"  
 $k_B$ : Constante de Boltzmann  
 $T$ : Temperatura [K]  
 $R$ : resistencia estática de un diodo  
 $R_F$ : resistencia estática directa  
 $R_R$ : resistencia estática inversa  
 $R_f$ : resistencia dinámica directa

$R_r$ : resistencia dinámica inversa  
 $\eta$ : Coeficiente de emisión  
 $V_T$ : Tensión térmica o tensión equivalente de temperatura  
 $I$ : Corriente del diodo en un punto  
 $I_0$ : Corriente del diodo en equilibrio térmico  
 $n$ : número de electrones  
 $p$ : número de huecos  
 $n_i$ : concentración intrínseca  
 $E_g$ : energía de la banda prohibida  
 $n_n$ : concentración de electrones libres en el dopado tipo N  
 $p_n$ : concentración de huecos en el dopado tipo N  
 $N_D$ : concentración de átomos donantes  
 $p_p$ : concentración de huecos en el dopado tipo P  
 $n_p$ : concentración de electrones en el dopado tipo P  
 $N_A$ : concentración de los átomos aceptadores  
 $N_D^*$ : dopaje neto  
 $P(E)$ : probabilidad del nivel de Fermi  
 $V_Y$ : tensión de umbral o tensión de codo  
 $E_C$ : banda de conducción  
 $E_V$ : banda de valencia  
 $q$ : carga del electrón  
 $I_{max}$ : corriente máxima del diodo  
 $V_r$ : Tensión de ruptura  
 $\mu_p$ : movilidad de los huecos

$\mu_n$ : movilidad de los electrones



## 10. Bibliografía

- [1] M. M. Bogado, «Silicio,» *Materiales y materias primas*, vol. 4, nº 11, p. 33, 2011.
- [2] M. González, «La Guía de Química,» 18 Agosto 2010. [En línea]. Available: <http://quimica.laguia2000.com/>.
- [3] JOHNPITA, «FISICA DE SEMICONDUCTORES,» 24 octubre 2010. [En línea]. Available: <http://jpfisicaselectronicos.blogspot.com/2010/10/teoria-de-bandas-y-huecos.html>.
- [4] M. J. López, «042-QUIMICA,» 03 10 2011. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/042quimica/system/app/pages/recentChanges>.
- [5] L. M. S. Miguel, *Fundamentos físicos de la informática y las comunicaciones*, Madrid: Thomson, 2005.
- [6] EMPIRE, «aislantesconductoressemiconductores,» febrero 2014. [En línea]. Available: <http://aislantesconductoressemiconductores.blogspot.com/>.
- [7] P. Julián, *Dispositivos semiconductores principios y modelos*, Buenos Aires: Alfaomega, 2013.
- [8] L. P. Viñas y J. C. Cardona, *Dispositivos electrónicos y fotónicos. Fundamentos*, Barcelona: Ediciones Gráficas Rey, 2003.
- [9] L. P. Viñas, *Circuitos y dispositivos electrónicos. Fundamentos*, Barcelona: UPC, 1999.
- [10] P. H. Young, *Electronics and Communication Technology*, Prentice Hall, 2014.
- [11] M. L. González, *Dispositivos Electrónicos*, Buenos Aires: Universidad de la Plata, 2015.
- [12] L. Prat Viñas y J. Calderer Cardona, «Dispositivos Electrónicos y Fotónicos. Fundamentos,» de *Dispositivos Electrónicos y Fotónicos. Fundamentos*, Barcelona, Ediciones Gráficas Rey, 2006, pp. 31-33.
- [13] L. Prat Viñas y J. Calderer Cardona, «Dispositivos electrónicos y fotónicos. Fundamentos,» de *Dispositivos electrónicos y fotónicos. Fundamentos*, Barcelona, Ediciones gráficas Rey, 2006, p. 30.

- [14] R. N. Selva, «Dispositivos Electrónicos,» de *Dispositivos Electrónicos*, Nueva Libreria, 2008, pp. 93-94.
- [15] R. N. Selva, «Dispositivos Electrónicos,» de *Dispositivos Electrónicos*, Nueva Libreria, 2008, pp. 160-163.
- [16] L. Prat Viñas y J. Calderer Cardona, «Dispositivos Electrónicos y Fotónicos. Fundamentos,» de *Dispositivos Electrónicos y Fotónicos. Fundamentos*, Barcelona, Ediciones gráficas Rey, 2006, pp. 34-35.
- [17] J. Leck, Theory of Semiconductor Junction Devices, Nueva york: Pergamon Press, 1967.
- [18] S. Khan, Semiconductor Devices and Technology, Bangladesh: Dhaka, 2012.
- [19] P. M. & O. T. Holland, Graphics and GUIs with MATLAB, Florida: CHAPMAN & HALL/CRC, 2003.