

100 PROBLEMAS RESUELTOS DEL DIODO EN GRAN SEÑAL



COLECCIÓN: MONOGRAFÍAS DE LA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

DIRECTOR DE LA COLECCIÓN

Rodríguez Rubio, Francisco. Universidad de Sevilla

CONSEJO DE REDACCIÓN

Arahal Junco, Consuelo. Universidad de Sevilla.

Carballar Rincón, Alejandro. Universidad de Sevilla.

Limón Marruedo, Daniel. Universidad de Sevilla.

Rodríguez Luis, Alejandro José. Universidad de Sevilla.

Rodríguez Rubio, Francisco. Universidad de Sevilla.

Salas Gómez, Francisco. Universidad de Sevilla.

COMITÉ CIENTÍFICO

Aracil Santonja, Javier. Universidad de Sevilla y Universidad de Málaga

Bernelli Zazzera, Franco. Politecnico di Milano

Chinesta, Francisco. École Centrale de Nantes

Félez Mindan, Jesús. Universidad Politécnica de Madrid

Gallego Sevilla, Rafael. Universidad Politécnica de Madrid

García-Lomas Jung, Francisco Javier. Universidad de Sevilla

Giner Maravilla, Eugenio. Universidad Politécnica de Valencia

González Díez, Isabel. Universidad de Sevilla

Montañés García, José Luis. Universidad Politécnica de Madrid

Montes Martos, Juan Manuel. Universidad de Sevilla

Navarro Esteve, Pablo José. Universidad Politécnica de Valencia.

Ollero de Castro, Pedro. Universidad de Sevilla

Verdú, Sergio. Princeton University

Francisco Antonio Perdigones Sánchez

100 PROBLEMAS RESUELTOS DEL DIODO EN GRAN SEÑAL



SEVILLA 2023

Colección: Monografías de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería
de la Universidad de Sevilla

Núm.: 27

COMITÉ EDITORIAL:

Araceli López Serena
(Directora de la Editorial Universidad de Sevilla)
Elena Leal Abad
(Subdirectora)

Concepción Barrero Rodríguez
Rafael Fernández Chacón
María Gracia García Martín
Ana Ilundáin Larrañeta
María del Pópulo Pablo-Romero Gil-Delgado
Manuel Padilla Cruz
Marta Palenque
María Eugenia Petit-Breuilh Sepúlveda
Marina Ramos Serrano
José-Leonardo Ruiz Sánchez
Antonio Tejedor Cabrera

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito de la Editorial Universidad de Sevilla.

Motivo de cubierta: Dibujo de un circuito formado por diodos y resistencias. Sobre el mismo dibujo se pueden ver resistencias y diodos comerciales

© Editorial Universidad de Sevilla 2023
C/ Porvenir, 27 - 41013 Sevilla.
Tlfs.: 954 487 447; 954 487 451; Fax: 954 487 443
Correo electrónico: eus4@us.es
Web: <<https://www.editorial.us.es>>

© Francisco Antonio Perdigones Sánchez 2023

Impreso en papel ecológico
Impreso en España-Printed in Spain

ISBN 978-84-472-2393-0
Depósito Legal: 339-2023

Diseño de interior (LaTeX): F. Javier Payán Somet 2014.
Maquetación de interior (LaTeX): Francisco Antonio Perdigones Sánchez
Diseño de cubierta: Santi García Hernández
Realización de cubierta: referencias.maquetacion@gmail.com
Impresión: Podiprint

A mi familia, amigos, compañeros y alumnos. Especialmente a mi madre, Josefa.

Índice

1	Introducción	1
1.1	Estructura y enfoque	1
1.2	Objetivos y perfil del lector	2
2	El diodo en gran señal	5
2.1	Símbolo, variables y criterios	5
2.2	La unión PN (Breve descripción)	6
2.3	Diodos típicos y valores característicos	7
2.4	El diodo real en gran señal	8
2.4.1	Curva característica real	9
2.5	Modelos aproximados del diodo	12
2.5.1	Diodo rectificador	12
2.5.2	Diodo Zener	14
2.6	Determinación de estados de polarización en diodos	16
3	Problemas de diodos (gran señal)	19
3.1	Introducción	19
3.2	Problemas con un diodo rectificador	22
P. 3.1	Problema 1	22
P. 3.2	Problema 2	26
P. 3.3	Problema 3	28
P. 3.4	Problema 4	32
P. 3.5	Problema 5	35
P. 3.6	Problema 6	39
P. 3.7	Problema 7	42
P. 3.8	Problema 8	46
P. 3.9	Problema 9	49
P. 3.10	Problema 10	52

	P. 3.11 Problema 11	54
	P. 3.12 Problema 12	55
	P. 3.13 Problema 13	57
	P. 3.14 Problema 14	59
	P. 3.15 Problema 15	62
	P. 3.16 Problema 16	65
	P. 3.17 Problema 17	67
	P. 3.18 Problema 18	72
	P. 3.19 Problema 19	74
	P. 3.20 Problema 20	76
3.3	Problemas con un diodo Zener	78
	P. 3.21 Problema 21	78
	P. 3.22 Problema 22	82
	P. 3.23 Problema 23	91
	P. 3.24 Problema 24	98
	P. 3.25 Problema 25	101
	P. 3.26 Problema 26	104
	P. 3.27 Problema 27	107
	P. 3.28 Problema 28	110
	P. 3.29 Problema 29	113
	P. 3.30 Problema 30	115
	P. 3.31 Problema 31	119
	P. 3.32 Problema 32	121
	P. 3.33 Problema 33	124
	P. 3.34 Problema 34	127
	P. 3.35 Problema 35	130
	P. 3.36 Problema 36	133
	P. 3.37 Problema 37	136
	P. 3.38 Problema 38	138
	P. 3.39 Problema 39	141
	P. 3.40 Problema 40	144
3.4	Problemas con 2 diodos	146
	P. 3.41 Problema 41	146
	P. 3.42 Problema 42	148
	P. 3.43 Problema 43	149
	P. 3.44 Problema 44	151
	P. 3.45 Problema 45	153
	P. 3.46 Problema 46	155
	P. 3.47 Problema 47	156
	P. 3.48 Problema 48	158
	P. 3.49 Problema 49	163

P. 3.50	Problema 50	164
P. 3.51	Problema 51	166
P. 3.52	Problema 52	167
P. 3.53	Problema 53	169
P. 3.54	Problema 54	170
P. 3.55	Problema 55	173
P. 3.56	Problema 56	174
P. 3.57	Problema 57	177
P. 3.58	Problema 58	178
P. 3.59	Problema 59	181
P. 3.60	Problema 60	184
P. 3.61	Problema 61	188
P. 3.62	Problema 62	191
P. 3.63	Problema 63	194
P. 3.64	Problema 64	196
P. 3.65	Problema 65	199
P. 3.66	Problema 66	202
P. 3.67	Problema 67	205
P. 3.68	Problema 68	208
P. 3.69	Problema 69	211
P. 3.70	Problema 70	215
P. 3.71	Problema 71	222
3.5	Problemas de circuitos recortadores	226
P. 3.72	Problema 72	226
P. 3.73	Problema 73	234
P. 3.74	Problema 74	236
P. 3.75	Problema 75	239
P. 3.76	Problema 76	242
P. 3.77	Problema 77	244
P. 3.78	Problema 78	247
P. 3.79	Problema 79	250
P. 3.80	Problema 80	253
P. 3.81	Problema 81	256
P. 3.82	Problema 82	259
P. 3.83	Problema 83	263
P. 3.84	Problema 84	268
P. 3.85	Problema 85	273
P. 3.86	Problema 86	279
P. 3.87	Problema 87	283
P. 3.88	Problema 88	285
P. 3.89	Problema 89	288

3.6	Problemas de circuitos rectificadores	291
	P. 3.90 Problema 90	291
	P. 3.91 Problema 91	295
	P. 3.92 Problema 92	299
	P. 3.93 Problema 93	303
3.7	Problemas de puertas lógicas con diodos, y selectores de valores máximos y mínimos	307
	P. 3.94 Problema 94	307
	P. 3.95 Problema 95	316
	P. 3.96 Problema 96	320
3.8	Problemas de diodos con condensadores	324
	P. 3.97 Problema 97	324
	P. 3.98 Problema 98	329
	P. 3.99 Problema 99	335
	P. 3.100 Problema 100	339
	<i>Bibliografía</i>	345

1 Introducción

En este capítulo se comentan aspectos generales del libro como la estructura y el enfoque. Servirá también para presentar los objetivos y perfil de personas al que va dirigido.

1.1 Estructura y enfoque

El estudio del comportamiento de electrones y huecos en el diodo proporciona con una serie de modelos matemáticos complejos. Aunque estos modelos pueden ser usados, desde un punto de vista práctico, un análisis manual usando tales modelos no resulta adecuado. Es por ello que este modelo matemático se simplifica bajo ciertas suposiciones. Estas suposiciones serán comentadas en el Capítulo 2, gracias a las cuales, partiendo de un comportamiento real se obtienen a unos modelos simplificados, pero muy aproximados y muy útiles a la hora de la resolución manual de circuitos. Los diodos que se modelarán serán los rectificadores, y a partir de este modelo, se abordará el Zener, y se comentarán brevemente otros tipos de diodos.

Una vez se conoce el comportamiento del diodo según estos modelos, y qué implicaciones puede tener su inclusión dentro de un circuito electrónico, se hace necesario el estudio del circuito mediante simulaciones numéricas, en cuyo caso, se usan unos modelos más reales que los que se presentan en este libro. Estas simulaciones han sido realizadas para todos los circuitos de los problemas propuestos para confirmar la correcta solución de los mismos. Para ello, se ha usado MicroCap12.

El Capítulo 3 representa la mayor parte del libro. Se trata de problemas resueltos y comentados, que componen una colección de circuitos con diodos rectificadores y Zener, resistencias, y/o condensadores. Las fuentes con las que se suministra la energía a dichos circuitos son fuentes de corriente constante, fuentes de tensión constante, y fuentes de tensión variable de frecuencia fija, como por ejemplo, senoidales y triangulares.

Existen circuitos más complejos en los que intervienen diodos. En ellos pueden aparecer otros componentes electrónicos, como amplificadores operacionales, transistores bipolares o MOSFET, entre otros. En este libro no se analizarán este tipo de circuitos complejos, puesto que es una monografía del diodo en gran señal.

Este libro se enfoca en el comportamiento de los diodos fabricados con materiales semiconductores, como por ejemplo, silicio o germanio, dejando a un lado a otros dispositivos como las válvulas de vacío, debido a su menor uso. Además, el diodo es abordado desde un punto de vista eminentemente práctico y aplicado, es por ello que se desarrollarán los modelos de gran señal a partir de modelos matemáticos más complicados, y se hará uso de ellos para la resolución de problemas.

Este punto de vista prevalece frente al conocimiento del funcionamiento interno del diodo, porque teniendo en cuenta el mercado actual y la ingeniería, un gran porcentaje de los diodos son adquiridos de marcas comerciales, y por tanto, se hace más útil conocer su modelo y manejar su hoja de características, puesto que en caso de deterioro, simplemente se cambia por otro igual, y si no lo hubiera, se buscaría uno con similares características. Sin embargo, es importante comentar que en el campo de diseño de dispositivos semiconductores, como por ejemplo diodos y transistores, es de vital importancia el conocimiento de un funcionamiento interno lo más cercano a la realidad posible.

1.2 Objetivos y perfil del lector

El documento tiene distintos objetivos, en primer lugar se presenta el diodo como componente electrónico de gran señal, para acabar con la resolución de problemas en los que interviene al menos un diodo.

Se trata de que el lector pueda resolver problemas con los modelos aproximados, y que tenga la base necesaria para abordar el diseño de circuitos electrónicos cuando entren en juego otros componentes electrónicos como el transistor y el amplificador operacional. Para ello, mediante cálculos de potencia y conociendo las características de los diodos, se abarca una gran cantidad de aplicaciones.

Para abordar con garantías los procedimientos de resolución de los problemas, se hace necesario el conocimiento de conceptos básicos de teoría de circuitos, como la ley de Ohm (1.1) y las dos leyes de Kirchhoff, (1.2) y (1.3).

$$\text{Ley de Ohm: } \Delta V = RI \quad (1.1)$$

$$\text{Primera ley de Kirchhoff: } \sum_{i=0}^n I_n = 0, \text{ en un nodo o en un corte} \quad (1.2)$$

$$\text{Segunda ley de Kirchhoff: } \sum_{i=0}^n V_n = 0, \text{ en una malla} \quad (1.3)$$

Donde V es la tensión, I es la intensidad o corriente eléctrica, a partir de ahora "corriente", y R es la resistencia. También será necesario conocer el funcionamiento de condensadores, resistencias, y conceptos de potencia y balance de potencia en circuitos electrónicos.

Por todo esto, el libro se dirige a alumnos que cursan alguna asignatura de electrónica. Se trata de un amplio público, puesto que el diodo es uno de los componentes fundamentales

de circuitos electrónicos y se presenta en todas las asignaturas básicas de electrónica, especialmente en ingeniería.

Enfocando el perfil en universidades, y en ingenierías, este libro puede servir como bibliografía recomendada para asignaturas de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales, Grado en Ingeniería en Telecomunicación, Grado en Ingeniería Aeroespacial, Grado en Ingeniería en Electrónica, Robótica y Mecatrónica, entre otros que se imparten.

Por otro lado, este libro puede ser una referencia para profesores de asignaturas básicas de electrónica en los grados anteriormente comentados. Además, la gran variedad de problemas presentados surte a dichos profesores de multitud de ejemplos para la confección de boletines de problemas, y dado el amplio rango de dificultad de los problemas de este libro, también podría ser útil para elaborar posibles problemas de exámenes, dado que las titulaciones pueden requerir distinto nivel de dificultad. De hecho, algunos de los problemas propuestos han sido problemas de examen de la asignatura “Electrónica General” del Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Universidad de Sevilla desde 2016.

Finalmente, el libro presenta problemas de circuitos electrónicos que contienen diodos, que en algunos casos, su única aplicación es que el alumnado adquiera destreza en los métodos de resolución, y gracias a los cuales se vayan entrenando las competencias de la titulación. En otros casos, se presentan circuitos típicos, en cuyo caso, además de afianzar los conocimientos de la asignatura de electrónica en lo que respecta al diodo, también sirve para adquirir conocimientos de electrónica con aplicaciones que pueden aparecer a lo largo de la carrera profesional. Respecto a estos circuitos típicos, se harán breves comentarios sobre su aplicación e importancia.

2 El diodo en gran señal

En este capítulo se presenta el diodo como dispositivo. Se comentará brevemente la estructura interna basado en la unión PN y portadores de carga. Posteriormente, se comentan sus características desde una visión externa, es decir, sin entrar en el movimiento de los portadores. Además, se desarrolla todo el proceso de transformación desde un modelo complejo del diodo en gran señal, a unos modelos más sencillos pero muy útiles a la hora de realizar el análisis. Este proceso se verá en la Sección 2.4. Seguidamente, en la Sección 2.6 se comenta el proceso de resolución genérico para determinar el estado de polarización del dispositivo.

2.1 Símbolo, variables y criterios

El diodo es un dispositivo electrónico de comportamiento no lineal. Su símbolo genérico se recoge en la Figura 2.1, aunque dependiendo del tipo de diodo este símbolo se podrá ver ligeramente modificado.

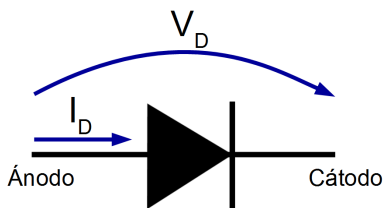


Figura 2.1 Símbolo del diodo y variables.

Como puede verse en la Figura 2.1, este dispositivo se caracteriza por tener 2 terminales, llamados ánodo y cátodo, que marcan la dirección preferente de corriente y de caída de tensión, de ánodo a cátodo.

Las variables que intervienen en el comportamiento del diodo son V_D , que es la tensión que cae en el diodo, e I_D corriente que circula por el diodo. Los valores más característicos

de la tensión V_D son la llamada tensión umbral V_T , es decir, la tensión a partir la cual el diodo conduce corriente positiva, y V_{BR} que se podría definir, con matices, como la tensión a la que el diodo empieza a conducir corriente negativa. Además, para valores de V_D negativos existe una corriente muy pequeña llamada corriente inversa de saturación, que se identificará como I_r . Estos valores varían entre distintos tipos de diodos, incluso entre mismo tipo de diodos pero con diferente modelo. Todas estas variables volverán a ser comentadas y relacionadas en la Sección 2.4.

El criterio de signos usual, y que será usado a lo largo de los capítulos, sobre todo en los problemas, establece que la tensión V_D será positiva si la tensión del ánodo es mayor que la del cátodo. En el caso de la corriente I_D se considerará positiva cuando circule desde el ánodo al cátodo. Este criterio de signos está establecido en la Figura 2.1, de forma que la corriente I_D será positiva si circula en el sentido de la flecha, y en cuanto a V_D , será positiva siempre que siga la flecha curva. Es importante recordar que, en el caso de la tensión, si la flecha parte de un punto A a otro B, la tensión viene definida como $V_A - V_B$. Según esto, $V_D = V_{\text{ánodo}} - V_{\text{cátodo}}$.

La tensión que cae en el diodo se define como $V_D = V_{\text{ánodo}} - V_{\text{cátodo}}$, mientras que la corriente I_D será positiva cuando circule de ánodo a cátodo.

2.2 La unión PN (Breve descripción)

El diodo es un dispositivo electrónico semiconductor que está compuesto, en general, de dos partes de silicio dopado, una tipo P y otra tipo N, que forman una unión, Figura 2.2.



Figura 2.2 Esquema de la estructura interna del diodo, en la que se muestra la unión PN.

El dopado del silicio se basa en la presencia de impurezas, que en el caso del tipo N serán impurezas de elementos de la columna VA (Grupo 15 - nitrogeñoideos) de la tabla periódica [1], como por ejemplo fósforo y arsénico, mientras que en el caso del silicio tipo P serán de la columna IIIA (Grupo 13 - boroideos), como por ejemplo el boro y el galio. Su funcionamiento interno real es complejo, basándose en el movimiento y recombinación de portadores de carga debido a campos eléctricos externos. Estos portadores son electrones en el caso de portadores negativos, y huecos si se trata de portadores positivos. Habrá exceso de electrones en el silicio tipo N, debido que al sustituir un átomo de silicio por uno de fósforo hay un electrón en exceso. Esto se debe a que el fósforo tiene un electrón más

que el silicio en su capa de valencia. En el caso del tipo P, ocurre lo contrario, es decir, hay un defecto de electrón porque el boro tiene un electrón menos que el silicio en la capa de valencia. A este defecto de electrón se le llama hueco. Dependiendo de los valores de corriente y tensión entre los terminales el diodo tendrá diferentes comportamientos. Se recomienda consultar la referencia para obtener más información sobre el funcionamiento interno relativo a portadores de carga y en cuanto a niveles de energía [2].

Aunque el silicio es un material típico en el desarrollo de dispositivos semiconductores como el diodo, el germanio es otro material muy usado y que dota al dispositivo de ciertas características, aunque tienen una corriente típica de saturación inversa mucho mayor, circunstancia que no es deseable [2].

2.3 Diodos típicos y valores característicos

Existen multitud de diodos basados en semiconductores. Se presentan a continuación sólo un ejemplo de los más comunes.

El diodo semiconductor sobre el que versará el capítulo siguiente y los problemas, será fundamentalmente el **diodo rectificador**. Estos diodos no están diseñados para trabajar con corrientes negativas, sólo positivas. El símbolo de este diodo es exactamente el mismo que el de la Figura 2.1. Para presentar algunos valores eléctricos relativos a este tipo de diodo, se usa como ejemplo un modelo típico, el 1N4148. La tensión umbral V_T de este diodo es aproximadamente 0,7 V, mientras que la V_{BR} es mayor de 100 V y una potencia máxima admisible de 500 mW. En cuanto a la corriente inversa de saturación I_r , es 50 μA . Los diodos rectificadores se caracterizan por tener altos valores de V_{BR} . Los valores proporcionados siempre se dan bajo ciertas condiciones de funcionamiento, que pueden ser consultados en las hojas de características.

Otro tipo de diodo, muy usado, es el diodo Shottky, también para corrientes positivas. Este diodo está formado por un semiconductor y un metal. Esto hace que tenga tiempos de conmutación pequeño. Además, se caracteriza por tener tensiones umbrales menores que los rectificadores. El modelo elegido para este diodo es el 1N5817 con una tensión umbral de unos 0,45 V, una V_{BR} de 20 V, una I_r de 500 μA , y una potencia máxima admisible de 1,25 W. Este tipo de diodo se usan para aplicaciones que alta velocidad de conmutación.

El siguiente diodo de características interesantes es el LED, de las siglas en inglés *Light Emitting Diode*. Son diodos que emiten luz cuando lo atraviesa una corriente en sentido positivo. Las tensiones umbrales típicas de estos diodos son altas, unos 2 a 3 V, con un V_{BR} de 5 V, una I_r de 50 μA , y una potencia máxima admisible de 100 mW. Estos diodos tienen como aplicación la indicación luminosa para informar de algún aspecto del sistema electrónico del que forma parte. Además, también se usan como fuente excitadora en sistemas de sensores para medidas, por ejemplo, de absorbancia y fluorescencia.

Finalmente, un tipo muy usado de diodo es el Zener. Estos diodos están diseñados para trabajar con corrientes tanto positivas como negativas. Además pueden soportar tensiones negativas relativamente elevadas, que los dota de propiedades interesantes. Se presenta como ejemplo, el Zener BZX55C10, que tiene una tensión umbral máxima V_T de 1,5 V. Presenta una V_{BR} , que se denominará tensión Zener, V_Z de 9,4 V (negativos), una I_r menor de 0,1 μA , y una potencia máxima admisible de 500 mW. El efecto por los que

este diodo adquiere los valores de $V_{BR} = V_Z$ es diferente al de los diodos rectificadores. Se debe a fenómenos internos dentro de los diodos que dependen de su estructura y nivel de impurezas.

Los diodos Zener tienen como aplicación, entre otras, la regulación de tensión. Este diodo también aparecerá en los problemas resueltos.

Todas estas características se recogen en la Tabla 2.1

Tabla 2.1 Ejemplos de diodos comerciales.

Tipo	Modelo	V_T (V)	V_{BR} (V)	I_r (μA)	P_{max} (mW)	Símbolo
Rectificador	1N4148	0,7	100	50	500	
Shottky	1N5817	0,45	20	500	1250	
LED	L-934SGD	2,2	5	10	100	
Zener	BZX55C10	1,5	9,4	0,1	500	

Para ofrecer una visión más amplia, además de los diodos vistos anteriormente, se recomienda consultar el diodo túnel, el diodo pin, el fotodiodo, el diodo varicap, las válvulas de vacío o diodos de vacío y el diodo gunn, entre otros [3, 2].

2.4 El diodo real en gran señal

Hasta ahora se ha comentado brevemente la estructura del diodo, sus variables y los fenómenos que ocurren dentro del mismo. Parte del comportamiento se puede traducir en un modelo cuya fórmula matemática se denomina *ecuación de Shockley* (2.1).

$$\text{Ecuación de Shockley : } I_D = I_r \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right) \text{ con } V_T = \frac{kT}{q} \quad (2.1)$$

En esta fórmula aparecen las variables I_D , V_D e I_r . Merece la pena recordar que la variable I_D es la corriente que circula por el diodo, que será positiva si circula en el sentido indicado en la Figura 2.1, la variable V_D que es la diferencia de tensiones entre los

terminales, y la variable I_r es definida como corriente inversa de saturación. Además, la variable V_i es la tensión térmica de la unión, donde k es la constante de Boltzmann, T es la temperatura de la unión, y n es el coeficiente de emisión, que depende del proceso y del material con el que está construido el diodo, ya sea silicio o germanio. Finalmente, q es la carga del electrón.

2.4.1 Curva característica real

La curva característica del diodo relaciona la tensión entre ánodo y cátodo, (V_D), con la corriente que circula entre estos dos terminales, (I_D). Dependiendo de la parte de la curva en que se encuentre el punto de funcionamiento del diodo, se definen tres estados de polarización.

Las distintas partes de la curva característica real van a ser descritas usando un circuito muy sencillo, se trata de un diodo con una resistencia en serie, alimentados desde una fuente de tensión cuyo valor de irá variando, Figura 2.3.

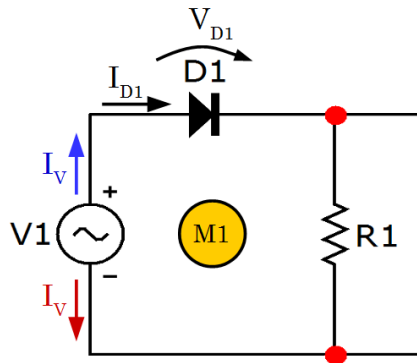


Figura 2.3 Circuito compuesto por una fuente de tensión, un diodo rectificador y una resistencia.

Resolviendo este circuito aplicando las leyes de Kirchoff, se obtiene como resultado la siguiente relación entre las variables del circuito, ecuación (2.2),

$$V_1 = R \cdot I_o \left(e^{\frac{V_D}{nV_i}} - 1 \right) + V_{D1} \quad (2.2)$$

La resolución de este circuito por medios manuales resulta poco adecuada dada la complejidad de la ecuación. Para resolverlo, se debe recurrir a métodos más avanzados para obtener una solución en un tiempo razonable. Es por ello que está justificado el desarrollo de los modelos aproximados del diodo. Dicha reducción permite un mejor

entendimiento del funcionamiento del mismo, sin perder la esencia del comportamiento, ni presentar grandes desviaciones en los resultados del problema.

Como se ha comentado anteriormente, en parte, el comportamiento real del diodo se puede modelar usando la expresión (2.1). En la Figura 2.4 se representa la **curva característica del diodo**, que incluye la ecuación de Shockley y otros comportamientos que se comentarán a continuación. Se recomienda consultar la referencia [4] en la que se representan conjuntamente tres curvas características, para diodos de silicio, germanio y arseniuro de galio.

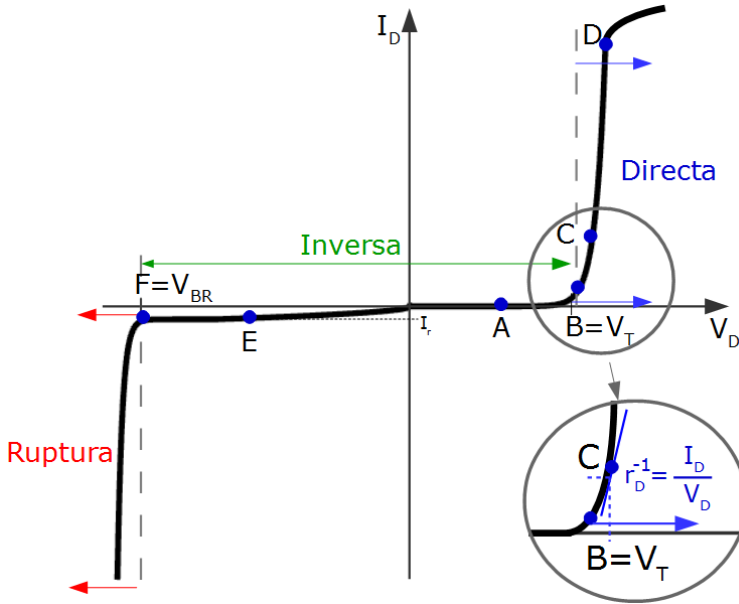


Figura 2.4 Curva caraterística del diodo.

Partiendo desde el origen de la curva característica, punto $(V_D, I_D) = (0V, 0A)$, que equivale a una tensión de alimentación $V_1 = 0V$, Figura (2.3). En el punto origen, por tanto, no existe ninguna corriente circulando por el diodo. Al aumentar la tensión de la fuente V_1 (punto A en la Figura 2.4), la I_D es tan pequeña que se puede seguir considerando que no hay circulación de corriente, aunque la corriente realmente va aumentando lentamente. Este comportamiento ocurre hasta cierto valor de tensión V_T (punto B) llamada tensión umbral del diodo, también conocida como tensión de codo. Desde el origen hasta el punto B, se puede considerar que $V_D = V_1 = V_T$, puesto que no cae tensión en la resistencia, al ser la corriente I_D despreciable, Figura (2.3).

A partir de esta tensión V_T , se considera que el diodo permite la circulación de corriente con un comportamiento exponencial, gobernado por la ecuación de Shockley. Si se sigue aumentando la tensión de la fuente V_1 se producen grandes incrementos en el valor de I_D , mientras que los valores de V_D aumentan ligeramente, punto C. Los incrementos de corrientes y de tensión en el diodo están relacionados por la resistencia interna del mismo,

r_D , que en el punto C de la curva se representa como conductancia (inversa de r_D), y que será variable a lo largo de la curva. Finalmente, terminando con la zona positiva de la gráfica, para muy altos valores de corriente, a partir del punto D, se hace apreciable el efecto de los contactos óhmicos del metal al semiconductor. Esto se traduce en una reducción de la pendiente de la curva. Además, aparece el efecto de alta inyección, relacionado con el nivel de dopado y los portadores introducidos en el diodo. Esta zona no es común en el funcionamiento de los diodos, y por ello, no se entrará en más detalles. Se recomienda consultar la referencia [5] si se pretende profundizar en estos aspectos.

La zona de la curva característica delimitada desde $V_D = V_T$ hacia la derecha, se denomina zona de polarización directa, Figura 2.4.

La zona de la curva característica delimitada desde $V_D = V_T$ hacia la derecha, se denomina zona de polarización directa del diodo. Esta zona de comportamiento presenta una elevada pendiente.

Los valores típicos de la V_T varían en un rango aproximado que va desde 0,3V hasta 4V dependiendo del tipo de diodo. El valor más usado para diodos rectificadores es un valor en torno a 0,7 V.

La parte de la curva característica correspondiente a valores negativos de V_D , se analiza también partiendo desde el punto $(V_D, I_D) = (0V, 0A)$. Cuando se hace negativo el valor de la fuente V_1 el diodo cambia su comportamiento, y aparecen efectos internos que hacen circular corriente en el sentido negativo, es decir desde el cátodo al ánodo. Este valor de corriente I_r , que ya se definió como corriente inversa de saturación, es muy pequeño y con poca pendiente de variación, punto E. Esta tendencia termina en un valor de $V_D = V_{BR}$ (punto F) llamado tensión de ruptura, y normalmente de valor alto. La zona comprendida en el intervalo $V_{BR} < V_D < V_T$ se denomina zona de polarización inversa del diodo, y se caracteriza por la circulación de corriente de valor despreciable, que será negativa si $V_D < 0V$, y positiva entre el origen y V_T , Figura 2.4.

La zona comprendida entre $V_{BR} < V_D < V_T$ se denomina zona de polarización inversa del diodo y se caracteriza por la circulación de corriente de valor despreciable, I_r .

Si se sigue reduciendo el valor de la fuente de alimentación V_1 , el diodo entra en una zona llamada *ruptura*. En esta zona, situada a la izquierda del punto F, se producen grandes incrementos de corriente para pequeñas variaciones de V_D . Además, los valores de esta corriente es negativa, es decir, desde el cátodo al ánodo. El diodo rectificador no puede trabajar en esta zona porque no soporta los valores de potencia, por lo que no será una zona admisible.

La zona comprendida a la izquierda de V_{BR} se denomina zona de polarización de ruptura del diodo, y se caracteriza por la circulación de corrientes negativas I_D elevadas, y una pendiente muy elevada.

2.5 Modelos aproximados del diodo

Los modelos aproximados de gran señal del diodo se definen a partir de las propiedades de la curva característica real comentada anteriormente. En primer lugar, cabe decir que los modelos que se van a desarrollar a continuación tienen que cumplir un requisito principal. Dicho requisito es que las tensiones y corrientes serán instantáneas y de un valor suficientemente alto (**gran señal**) como para cambiar el punto de polarización del diodo. Serán señales continuas (DC) en general. En el caso de pequeñas fluctuaciones AC de las ondas, que no afectan al punto de polarización, se estaría hablando de **pequeña señal**. Además, otro requisito para que los modelos tengan soluciones precisas es que la corriente inversa de saturación debe ser suficientemente pequeña comparada con las corrientes que circulan por el circuito (Ver Problema 17) .

2.5.1 Diodo rectificador

La zona de polarización directa, gobernada por el comportamiento exponencial, tiene unas pendientes muy elevadas. Tanto es así, que se puede considerar como buena aproximación una recta vertical. El origen de esta curva será la tensión umbral del diodo $V_D = V_T$.

Según esta simplificación, se llega a un modelo aproximado del diodo en polarización directa, que consiste en que el diodo mantiene entre sus terminales una tensión constante $V_D = V_T$, y una corriente limitada sólo por la máxima potencia permitida. Además, se considerará que dicha potencia limita la corriente, de forma que el efecto de los contactos óhmicos no tiene lugar. En consecuencia, se puede concluir que el diodo se comporta como una fuente de tensión de valor V_T por la que circula una corriente I_D positiva, es decir, de ánodo a cátodo.

La zona de polarización directa está gobernada por una exponencial de pendiente tan elevada, que puede considerarse una recta vertical con origen en V_T . De forma que en esta zona, el diodo se puede modelar como una fuente de tensión de valor V_T por la que circula una $I_D > 0A$.

Respecto a la zona de polarización inversa, $V_{BR} < V_D < V_T$, se puede simplificar a $V_D < V_T$ puesto que se ha dicho que el diodo rectificador nunca se llevará a trabajar en la zona de ruptura. Además, en esta zona, para $V_D < 0V$ se tiene $I_D = I_o$, es decir, la corriente inversa de saturación, que se trata de una magnitud despreciable en todo caso. Para $0V < V_D < V_T$, la corriente es también despreciable, aunque positiva. Por lo tanto, se puede concluir que en esta zona el diodo se puede sustituir por un circuito abierto, puesto que la corriente que lo atraviesa es tan pequeña que se considera cero, $I_D = 0A$.

En la zona de polarización inversa, la corriente es tan pequeña que se considera $I_D = 0A$. Por lo tanto, el diodo se comporta como un circuito abierto sobre el que caerá una tensión $V_D < V_T$.

El modelo de gran señal que gobierna la ecuación de Shockley se convierte, según las hipótesis anteriores, en un modelo aproximado que puede verse en la Figura 2.5, en forma de gráfica. Se definirá este modelo como **Modelo 1**, donde la línea vertical se corresponde con la zona de directa, mientras que la zona de inversa se representa por la línea horizontal.

El diodo rectificador tiene dos zonas de polarización: directa e inversa.

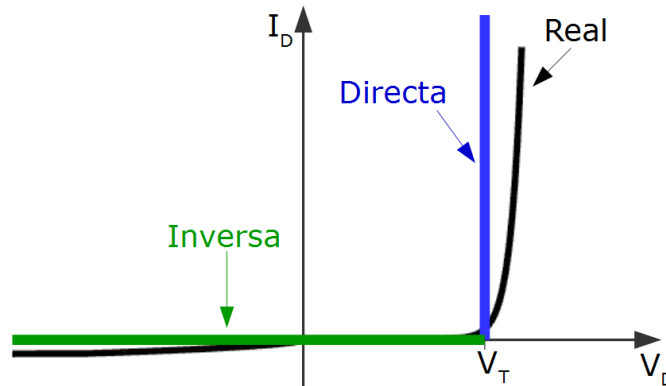


Figura 2.5 Modelo 1: diodo como fuente de tensión en directa, y como circuito abierto en inversa..

El Modelo 1, es el más simplificado posible teniendo en cuenta la tensión umbral $V_D = V_T$. Se podría considerar como aproximación, un modelo más ideal aún, que consiste en imponer que para todo diodo $V_T = 0V$. Este modelo se va a obviar por perderse una información tan importante como la tensión umbral de los diodos. Además, implicaría que la potencia que disipa el diodo, definida por $P_D = V_D \cdot I_D$ sería cero. No se podría por tanto, calcular la potencia que disipa el diodo, que es un aspecto muy importante a la hora de la elección del modelo que se debe usar.

Este Modelo 1 será el que se use en todos los problemas, salvo algún caso particular (Problema 85), en el que será necesario usar otro modelo algo más preciso, pero también menos sencillo se usar.

Este nuevo modelo, **Modelo 2**, consiste en tener en cuenta la exponencial de la ecuación de Shockley, aproximándola por una recta de pendiente positiva constante con origen en $V_D = V_T$. El valor de la pendiente será la inversa de la resistencia interna (la conductancia, g_D) del diodo, en un punto intermedio de funcionamiento en polarización directa. La pendiente de la ecuación de Shockley va aumentando a medida que aumenta la I_D , que hablando en valores de resistencia interna, en general, varía desde unos 150Ω para corrientes bajas a alrededor de 1Ω para valores altos de corriente. Por lo tanto, en el Modelo 2, el diodo sería sustituido por una fuente de tensión de valor $V_D = V_T$, y una resistencia en serie de valor r_D . Este modelo se representa gráficamente en la Figura 2.6, donde la línea inclinada es la zona de polarización directa, y la horizontal la de polarización

inversa. Este último modelo es algo más preciso pero también implica más cálculos. Para profundizar en el análisis de la resistencia del diodo se recomienda consultar [4].

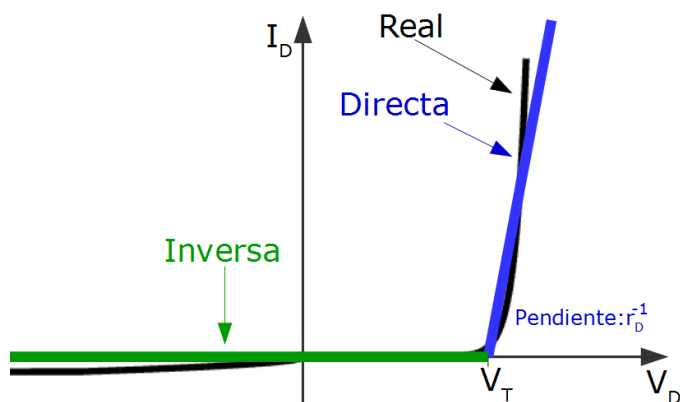


Figura 2.6 Modelo 2: diodo como fuente de tensión y resistencia en serie.

2.5.2 Diodo Zener

En la Sección 2.3, se comentó que el diodo Zener se caracteriza por poder trabajar con corrientes tanto negativas como positivas. De la curva característica real, se deduce que este diodo es atravesado por una corriente negativa cuando $V_D = V_Z$ o menor. Por tanto, se trata de un diodo con tres zonas de polarización, llamadas directa, inversa y ruptura, y que se comentan a continuación.

El diodo Zener tiene tres estados de polarización: directa, inversa y ruptura.

La zona de polarización inversa del diodo Zener sigue las mismas hipótesis que en el diodo rectificador, con la salvedad de que en el diodo Zener esta zona está acotada inferiormente por $V_D = V_Z$. Por lo tanto, el Zener estará en inversa mientras que $V_Z < V_D < V_T$, donde la corriente que lo atraviesa es $I_D = 0A$.

En la zona de polarización inversa del Zener, la corriente es tan pequeña que se considera $I_D=0A$. Por lo tanto, el diodo se comporta como un circuito abierto sobre el que caerá una tensión $V_Z < V_D < V_T$.

La zona de polarización directa sigue el mismo razonamiento que en el caso del diodo rectificador. El diodo Zener estará en directa cuando se supere una cierta tensión umbral $V_D = V_T$. Además, se pueden dar los dos modelos obtenidos para el diodo rectificador, es decir, el Modelo 1 relativo al comportamiento como fuente de tensión, y el Modelo 2 en el que el diodo se puede sustituir por una fuente de tensión con una resistencia en serie.

La zona de polarización directa del diodo Zener tiene los mismos modelos que el diodo rectificador.

En cuanto a la zona de ruptura, la pendiente de la curva que lo define es tan elevada que puede considerarse una recta vertical que se origina en $V_D = V_Z$. En esta zona, la corriente que circula por el diodo es negativa $I_D < 0A$. Por ello, el diodo se puede modelar como una fuente de tensión de valor V_Z a travésada por una corriente negativa $I_D < 0A$.

La zona de polarización en ruptura está gobernada por una exponencial de pendiente tan elevada, que puede considerarse una recta vertical con origen en V_Z . De forma que en esta zona, el diodo se puede modelar como una fuente de tensión de valor V_Z por la que circula una $I_D < 0A$.

Las tres zonas del modelo de gran señal del diodo Zener se representan en la Figura 2.7.

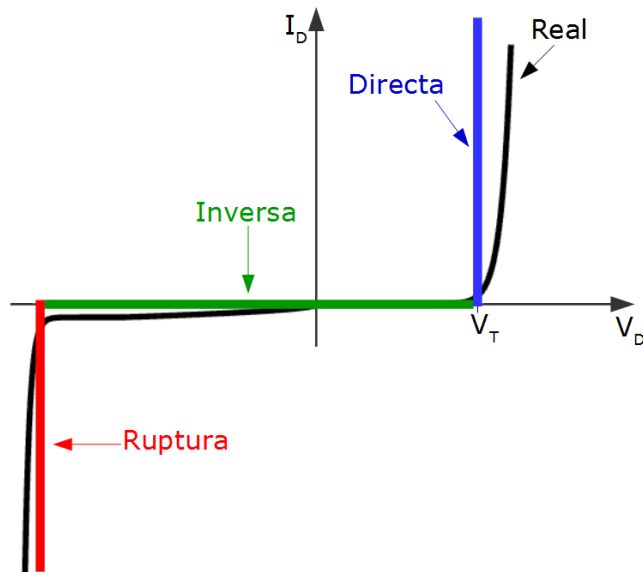


Figura 2.7 Modelo del diodo Zener con las zonas de directa, inversa y ruptura.

Finalmente, los estados de polarización del diodo rectificador y Zener se presentan en forma de una tabla-resumen (Tabla 2.2). Esta tabla será importante a la hora de proceder con la resolución de los problemas.

Tabla 2.2 Resumen de modelos aproximados del diodo rectificador y del Zener.

Polarización \ Tipo de diodo	Rectificador	Zener
Directa: Modelo 1	$V_D = V_T$ $I_D > 0A$	$V_D = V_T$ $I_D > 0A$
Directa: Modelo 2	$V_D = V_T$ con r_d en serie $I_D > 0A$	$V_D = V_T$ con r_d en serie $I_D > 0A$
Inversa	$V_D < V_T$ $I_D = 0A$	$V_Z < V_D < V_T$ $I_D = 0A$
Ruptura	No tiene	$V_D = V_Z$ $I_D < 0A$

2.6 Determinación de estados de polarización en diodos

En esta sección se va a describir, paso a paso, el procedimiento de resolución de circuitos con diodos. En particular, el estado de polarización de los diodos rectificadores, Zener y combinaciones de ambos en un mismo circuito.

Como se puede ver en la Tabla 2.2, cada estado de polarización está definido por una igualdad y una desigualdad, por ejemplo, para el diodo rectificador en *inversa* se tiene como igualdad $I_D = 0A$, y como desigualdad $V_D < V_T$.

El procedimiento para resolver circuitos con un diodo consiste en los pasos que se enumeran a continuación.

Procedimiento para resolver circuitos con un diodo

1. Suponer uno de los estados de polarización.
2. Imponer la igualdad presente en ese estado.
3. Resolver el circuito aplicando la teoría de circuitos.
4. Comprobar si se cumple la desigualdad.
5. Si la desigualdad se cumple, el estado supuesto es la solución del problema.
6. Si la desigualdad no se cumple, hay que suponer un nuevo estado de polarización volviendo al primer paso.

La imposición de la igualdad consiste en sustituir el diodo por el modelo correspondiente, es decir, en *inversa* el diodo se sustituye por un circuito abierto, y en *directa* por una fuente de tensión de valor V_T (Modelo 1).

En el caso de un diodo rectificador, como máximo se tendrán que hacer 2 suposiciones, y 3 para los Zener. Realmente, sería 1 suposición para el rectificador, porque el incumplimiento de una suposición implica el cumplimiento de la otra, y en el caso del Zener

serían 2 por el mismo motivo. No se recomienda hacer esto último, dado que no se pueden depurar errores durante el proceso.

El procedimiento a seguir para determinar los estados de polarización en caso de tener dos diodos, es el siguiente.

Procedimiento para resolver circuitos con dos diodos

1. Suponer dos estados de polarización **simultáneamente**, uno para cada diodo.
2. Imponer las igualdades de los estados supuestos.
3. Resolver el circuito aplicando la teoría de circuitos.
4. Comprobar si se cumplen **ambas desigualdades**.
5. Si se cumplen ambas desigualdades, estamos ante la solución del problema.
6. Si alguna de las desigualdades no se cumple, no se puede asegurar nada de los estados supuestos. Habría que hacer un nuevo conjunto de dos suposiciones.

Para el caso de circuitos con más de dos diodos, el proceso es análogo al comentado anteriormente. Las suposiciones se deben hacer por lotes, según el número de diodos que se tenga. En tal caso, el número de suposiciones posibles dependerá del número y del tipo de diodos presentes en el circuito. Teniendo en cuenta el número de estados posible para cada diodo, en el caso de N diodos rectificadores se podrán hacer hasta 2^N suposiciones; en el caso de tener M diodos Zener, el número de suposiciones posibles es 3^M ; y en el caso de tener una combinación de N diodos rectificadores y M diodos Zener es $2^N \cdot 3^M$.

Resumen de suposiciones en función del tipo y número de diodos

- Para N diodos rectificadores son 2^N suposiciones.
- Para M diodos Zener son 3^M suposiciones.
- Para N diodos rectificadores y M diodos Zener son $2^N \cdot 3^M$ suposiciones.

Los procedimientos para determinar el estado de polarización de los diodos serán puestos en práctica en el Capítulo 3. Serán problemas compuestos por resistencias, diodos y fuentes de tensión y/o corriente. Además, habrá problemas de diseño de resistencias en función de los estados de polarización, problemas numéricos y problemas que dependen de parámetros. Finalmente, se presentarán problemas en los que intervienen resistencias, condensadores y diodos. Toda esta gama de problemas será comentada en detalle en el Capítulo 3.

Analizando el estado de polarización de los diodos desde el punto de vista de la corriente que lo atraviesa, si se trata de un diodo rectificador y recibe una corriente positiva, el estado de polarización será directa, mientras que si la dicha corriente es negativa o cero, será inversa. En el caso de los diodos Zener, si la corriente es positiva, el estado de polarización será directa, si es cero será inversa, y si es negativa, el diodo Zener estará en ruptura.

Este procedimiento de análisis se usará como inicio de planteamiento para los algunos de los problemas que se verán en este libro, en particular, para los circuitos rectificadores y recortadores.