

ÍNDICE

Prólogo	15
<i>Tema 1.</i> INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES	17
1.1. Introducción	19
1.2. Los materiales en la sociedad actual	19
1.3. Propiedades de los materiales	23
1.3.1. Propiedades físicas	24
1.3.2. Propiedades físico-químicas y tecnológicas	26
1.4. Estructura atómica y enlaces químicos	28
1.4.1. Estructura atómica	29
1.4.2. Enlaces químicos	38
1.4.3. Tipos de enlace	43
1.4.3.1. Enlace metálico	45
1.4.3.2. Enlace iónico	48
1.4.3.3. Enlace covalente	51
1.4.3.4. Enlaces secundarios	55
1.4.3.5. Enlaces mixtos	57
1.5. Clasificación de los materiales	58
1.5.1. Materiales metálicos	58
1.5.2. Materiales poliméricos	60
1.5.3. Materiales cerámicos y vidrios	62
1.5.4. Materiales compuestos	65
1.5.5. Otros materiales	67
1.6. Cuestiones y ejercicios	71
<i>Tema 2.</i> ESTRUCTURA INTERNA DE LOS MATERIALES. SISTEMAS CRISTALINOS ...	73
2.1. Introducción	75
2.2. Estado sólido	76
2.2.1. Tipos de sólidos cristalinos	80
2.3. Sistemas cristalinos. Red espacial	83
2.4. Isomorfismo y alotropía	89

2.5.	Índices de Miller	91
2.6.	Redes cristalinas de los metales	106
2.6.1.	Densidad teórica y parámetros de red	107
2.6.2.	Radio atómico y parámetros de red	111
2.6.3.	Índices de coordinación	113
2.6.4.	Factor de empaquetamiento	114
2.6.5.	Densidades atómicas y parámetros de red	118
2.6.6.	Distancia entre planos reticulares y parámetros de red ..	122
2.7.	Intersticios en las redes cristalinas	124
2.8.	Técnicas para caracterizar estructuras internas	128
2.8.1.	Técnicas espectroscópicas	129
2.8.2.	Análisis térmico	131
2.8.3.	Técnicas de difracción	132
2.9.	Cuestiones y ejercicios	139

Tema 3. DEFECTOS EN LA ESTRUCTURA CRISTALINA. SOLIDIFICACIÓN DE ME-

TALES	143
3.1. Introducción	145
3.2. Imperfecciones cristalinas	145
3.3. Defectos de punto	146
3.3.1. Defectos puntuales intrínsecos. Vacantes	147
3.3.2. Defectos puntuales intrínsecos. Intersticiales	148
3.3.3. Defectos puntuales extrínsecos	149
3.4. Difusión en el estado sólido	152
3.4.1. Mecanismos de difusión	152
3.4.2. Leyes de Fick	154
3.4.2.1. Primera ley de Fick. Flujo estacionario	155
3.4.2.2. Segunda ley de Fick. Flujo no estacionario	156
3.4.3. Factores que influyen en la difusión	159
3.5. Defectos de línea. Dislocaciones	163
3.5.1. Tipos de dislocaciones	164
3.5.2. Caracterización de dislocaciones. Vector de Burgers ..	166
3.6. Deformación de cristales	173
3.7. Defectos de superficie	176
3.8. Solidificación y cristalización de metales	178
3.8.1. Proceso de solidificación/cristalización	179
3.8.2. Fronteras de grano	184

3.8.3. Morfología de los granos. Metalografía	187
3.9. Solidificación direccional	193
3.10. Solidificación rápida. Sinterización	195
3.11. Defectos producidos durante la solidificación	197
3.12. Técnicas para la inspección de defectos	199
3.13. Cuestiones y ejercicios	207

<i>Tema 4. CONSTRUCCIÓN DE LAS ALEACIONES METÁLICAS. DIAGRAMA DE FASES. TRANSFORMACIONES</i>	211
4.1. Introducción	213
4.2. Aleaciones metálicas	214
4.3. Soluciones sólidas	216
4.3.1. Soluciones sólidas sustitucionales	216
4.3.2. Soluciones sólidas intersticiales	221
4.4. Compuestos y soluciones intermedias	225
4.5. Soluciones sólidas ordenadas	226
4.6. Insolubilidad	227
4.7. Diagramas de fases	228
4.7.1. Sistemas de aleación binarios	232
4.7.1.1. Dos metales totalmente solubles en los estados líquido y sólido	233
4.7.1.2. Dos metales totalmente solubles en estado líquido y totalmente insolubles en el sólido. Transformación eutéctica	247
4.7.1.3. Dos metales totalmente solubles en estado líquido y parcialmente solubles en el sólido. Transformación eutéctica	255
4.7.1.4. Diagramas de fases con compuestos y fases intermedias. Transformación peritética	266
4.7.1.5. Dos metales parcialmente solubles en estado líquido. Transformación monotética	279
4.7.1.6. Transformaciones en el estado sólido	284
4.7.1.6.1. Alotropía	284
4.7.1.6.2. Transformaciones orden-desorden .	285
4.7.1.6.3. Transformación eutectoide	287
4.7.1.6.4. Transformación peritectoide	293
4.8. Cuestiones y ejercicios	300

Tema 5. PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES METÁLICOS. ENSAYOS	309
5.1. Introducción	311
5.2. Deformación dependiente y no dependiente del tiempo	312
5.3. Deformación no dependiente del tiempo	316
5.3.1. Ensayo de tracción	316
5.3.2. Ensayo de compresión	334
5.3.3. Ensayo de flexión	336
5.3.4. Ensayo de dureza	338
5.3.5. Ensayo de impacto	346
5.3.6. Ensayo de fatiga	349
5.4. Deformación dependiente del tiempo. Fluencia	351
5.5. Deformación de materiales policristalinos	354
5.5.1. Efecto del trabajo en frío	355
5.6. Mecanismos de endurecimiento y reforzamiento	357
5.6.1. Endurecimiento por deformación plástica	358
5.6.2. Reforzamiento por solución sólida	360
5.6.3. Reforzamiento por dispersión de partículas	361
5.7. Fenómenos de restauración	362
5.7.1. Recuperación	363
5.7.2. Recristalización	363
5.7.3. Crecimiento de grano	365
5.8. Cuestiones y ejercicios	368
 Tema 6. ALEACIONES FÉRREAS DE INTERÉS INDUSTRIAL. TRATAMIENTOS Y	
CARACTERÍSTICAS	373
6.1. Introducción	375
6.2. Diagrama hierro - carburo de hierro	376
6.3. Enfriamiento lento del acero. Evolución microestructural ...	382
6.3.1. Aceros hipoeutectoides	382
6.3.2. Acero eutectoide	384
6.3.3. Aceros hipereutectoides	385
6.4. Transformaciones isotérmicas de la austenita	390
6.4.1. Diagramas TTT	392
6.5. Tratamientos térmicos de los aceros	395
6.5.1. Recocido	397
6.5.1.1. De homogeneización	397
6.5.1.2. De regeneración	398
6.5.1.3. De globulización	399

6.5.1.4.	De estabilización	400
6.5.1.5.	Isotérmico	400
6.5.2.	Normalizado	401
6.5.3.	Temple	402
6.5.4.	Revenido	405
6.5.5.	Martempering y austempering	406
6.5.6.	Templabilidad. Ensayo Jominy	407
6.6.	Tratamientos superficiales	409
6.6.1.	Sin alteración de la composición superficial	410
6.6.2.	Con alteración de la composición superficial	411
6.6.2.1.	Tratamientos termoquímicos	411
6.6.2.2.	Implantación iónica	413
6.6.3.	Con formación de una capa diferente	414
6.7.	Conformado de metales	416
6.8.	Aleaciones férricas	420
6.8.1.	Aceros	420
6.8.1.1.	Aceros al carbono	423
6.8.1.2.	Aceros aleados	425
6.8.1.2.1.	Aceros de baja aleación	429
6.8.1.2.2.	Aceros de alta aleación	431
6.8.2.	Fundiciones	434
6.8.2.1.	Clasificación de las fundiciones	437
6.8.2.1.1.	Fundiciones blancas	438
6.8.2.1.2.	Fundiciones grises	440
6.8.2.1.3.	Fundiciones dúctiles	442
6.8.2.1.4.	Fundiciones maleables	444
6.9.	Cuestiones y ejercicios	449

Tema 7. ALEACIONES NO FÉRREAS DE INTERÉS INDUSTRIAL. TRATAMIENTOS

Y CARACTERÍSTICAS	453
7.1. Introducción	455
7.2. Aleaciones no férricas	456
7.2.1. Aleaciones ligeras	457
7.2.1.1. Aleaciones de aluminio	457
7.2.1.1.1. Endurecimiento por precipitación .	460
7.2.1.1.2. Clasificación de las aleaciones de Al .	465
7.2.1.2. Aleaciones de magnesio	469
7.2.1.2.1. Clasificación de las aleaciones de Mg	470

7.2.1.3.	Aleaciones de titanio	472
7.2.1.3.1.	Clasificación de las aleaciones de Ti	476
7.2.1.4.	Aleaciones de berilio	477
7.2.2.	Aleaciones según el componente mayoritario	478
7.2.2.1.	Aleaciones de cobre	479
7.2.2.1.1.	Latones	480
7.2.2.1.2.	Bronces	486
7.2.2.1.3.	Cuproaluminios	488
7.2.2.1.4.	Cuproníqueles	491
7.2.2.1.5.	Alpacas	492
7.2.2.1.6.	Aleaciones endurecibles	493
7.2.2.1.7.	Otras aleaciones	494
7.2.2.2.	Aleaciones de níquel	495
7.2.2.3.	Aleaciones de cobalto	502
7.2.3.	Aleaciones de metales refractarios	504
7.2.4.	Aleaciones de metales blancos	506
7.3.	Cuestiones y ejercicios	512
<i>Tema 8.</i>	MATERIALES POLIMÉRICOS DE INTERÉS INDUSTRIAL	515
8.1.	Introducción	517
8.2.	Moléculas de polímeros	518
8.3.	Estructuras moleculares de polímeros	522
8.4.	Estructuras cristalinas de polímeros	529
8.5.	Clasificación de los polímeros	532
8.6.	Funcionalidad de aditivos en plásticos	537
8.7.	Comportamiento de los plásticos	540
8.7.1.	Comportamiento térmico	541
8.7.2.	Comportamiento mecánico	543
8.8.	Conformado de polímeros	546
8.8.1.	Moldeo	548
8.8.2.	Otros procesos de conformado	552
8.8.3.	Transformación de elastómeros	554
8.9.	Ensayos de polímeros	555
8.9.1.	Ensayos mecánicos	555
8.9.2.	Otros tipos de ensayos	568
8.10.	Termoplásticos de interés industrial	571
8.11.	Termoestables de interés industrial	582
8.12.	Elastómeros de interés industrial	584

8.13. Otras formas de polímeros y sus aplicaciones	586
8.14. Cuestiones y ejercicios	591
<i>Tema 9. MATERIALES CERÁMICOS DE INTERÉS INDUSTRIAL</i>	<i>593</i>
9.1. Introducción	595
9.2. Estructuras de los materiales cerámicos	596
9.2.1. Estructuras cristalinas de cerámicas iónicas	598
9.2.2. Estructuras cristalinas de cerámicas covalentes	605
9.2.2.1. Estructuras del tipo sulfuro de cinc	605
9.2.2.2. Estructuras del carbono	606
9.2.3. Estructuras cristalinas de silicatos	609
9.3. Defectos en cerámicas	613
9.4. Diagramas de fases de cerámicas	614
9.5. Propiedades mecánicas de cerámicas	617
9.6. Propiedades térmicas de cerámicas	621
9.7. Propiedades eléctricas y magnéticas de cerámicas	622
9.8. Conformado de cerámicas	624
9.9. Clasificación de los materiales cerámicos	628
9.9.1. Vidrios	628
9.9.1.1. Estructura y composición de los vidrios	629
9.9.1.2. Temperatura de transición vítrea	631
9.9.1.3. Viscosidad de los vidrios	632
9.9.1.4. Conformado de los vidrios	634
9.9.1.5. Tratamientos de los vidrios	636
9.9.2. Materiales cerámicos tradicionales	638
9.9.3. Materiales cerámicos refractarios	638
9.9.4. Materiales cerámicos abrasivos	639
9.9.5. Cementos	639
9.9.6. Cerámicas vítreas	642
9.9.7. Cerámicas técnicas	642
9.9.8. Otras cerámicas de interés	644
9.10. Cuestiones y ejercicios	647
<i>Tema 10. MATERIALES COMPUESTOS DE INTERÉS INDUSTRIAL</i>	<i>649</i>
10.1. Introducción	651
10.2. Formación de materiales compuestos	652
10.2.1. Matrices	653
10.2.1.1. Tipos de matrices	654

10.2.2. Refuerzos	662
10.2.2.1. Tipos de refuerzos	666
10.2.3. Cargas y aditivos	674
10.3. Consideraciones sobre elección de constituyentes	676
10.4. Materiales compuestos reforzados con fibras	681
10.4.1. Fibras continuas y alineadas	681
10.4.2. Fibras discontinuas	687
10.5. Materiales compuestos reforzados con partículas	690
10.5.1. Hormigón	691
10.6. Procesos de transformación de materiales compuestos de ma- trix polimérica	693
10.6.1. Por contacto a mano	694
10.6.2. Por proyección simultánea	696
10.6.3. Por inyección	698
10.6.4. Por compresión	700
10.6.5. Por centrifugación	702
10.6.6. Por enrollamiento	703
10.6.7. Por pultrusión	705
10.6.8. Procesos de transformación de termoplásticos refor- zados	706
10.7. Otros materiales compuestos	708
10.8. Aplicaciones de los materiales compuestos	714
10.9. Cuestiones y ejercicios	716
BIBLIOGRAFÍA	719

Tema 1

Introducción a la ciencia e ingeniería de materiales

- 1.1. Introducción
- 1.2. Los materiales en la sociedad actual
- 1.3. Propiedades de los materiales
 - 1.3.1. Propiedades físicas
 - 1.3.2. Propiedades físico-químicas y tecnológicas
- 1.4. Estructura atómica y enlaces químicos
 - 1.4.1. Estructura atómica
 - 1.4.2. Enlaces químicos
 - 1.4.3. Tipos de enlace
 - 1.4.3.1. Enlace metálico
 - 1.4.3.2. Enlace iónico
 - 1.4.3.3. Enlace covalente
 - 1.4.3.4. Enlaces secundarios
 - 1.4.3.5. Enlaces mixtos
- 1.5. Clasificación de los materiales
 - 1.5.1. Materiales metálicos
 - 1.5.2. Materiales poliméricos
 - 1.5.3. Materiales cerámicos y vidrios
 - 1.5.4. Materiales compuestos
 - 1.5.5. Otros materiales
- 1.6. Cuestiones y ejercicios

1.1. INTRODUCCIÓN

En este primer tema se trata de introducir al estudiante en el amplio mundo de los materiales, comenzando por una somera visión de su implantación en la sociedad, de la que se deduce el gran interés que presenta para el futuro ingeniero alcanzar un cierto conocimiento de las características más importantes de aquellos materiales con mayor aplicación tecnológica.

Para introducirse en su conocimiento se comienza haciendo un repaso de las propiedades más características que supondrán la base de partida para que, una vez bien conocidas y a medida que se avance en el estudio de los diferentes temas, puedan ser susceptibles de modificarse con la finalidad de conseguir las más adecuadas para cada aplicación.

Dado que las propiedades de los materiales son la consecuencia inmediata de la microestructura¹ que presentan en cada momento, este tema comienza revisando la estructura atómica, para conocer seguidamente los diferentes tipos de enlaces que tienen lugar entre átomos y que son los que caracterizan a los diferentes tipos de materiales existentes. Tanto unos, enlaces, como otros, materiales, se estudian y relacionan entre sí.

1.2. LOS MATERIALES EN LA SOCIEDAD ACTUAL

Todos los productos fabricados por la industria (un pequeño «chip», una botella, un automóvil, un teléfono móvil, un trasbordador espacial, etc.) y que forman parte de la actividad humana en la sociedad actual, están formados por algún tipo de material (madera, vidrio, acero, hormigón, plástico, papel, aluminio, etc.) o en la mayoría de los casos por la utilización simultánea de muchos de ellos.

¹ Microestructura: morfología que presenta un material a escala microscópica en la que se pueden identificar, entre otros, los diferentes granos con sus fronteras y las fases con su distribución.

En la figura 1.1 se presentan algunos de los múltiples ejemplos que se pueden citar cuando se habla de materiales y de su utilización para la fabricación de productos y componentes industriales.

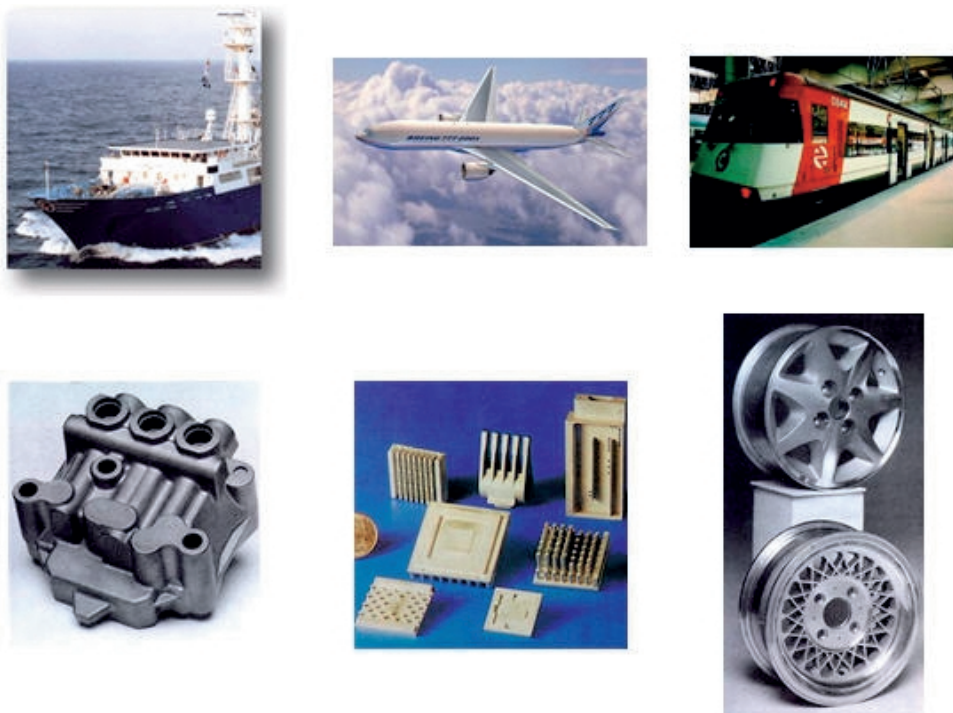


Figura 1.1.

Hoy día la industria de la transformación proporciona una gran variedad de materiales, poniendo al alcance del diseñador grandes posibilidades para la definición de nuevos productos, y todo ello gracias al desarrollo y avance científico-tecnológico que permite conocer cada día más y mejor su estructura interna, sus propiedades y la posibilidad de transformación de los mismos.

La ciencia de materiales se fundamenta en el conocimiento de la estructura interna del material. Conocer la estructura interna de un material permite la deducción de las propiedades más relevantes del mismo y por tanto sus potenciales aplicaciones. La ingeniería de materiales se dirige principalmente a la utilización de los materiales para obtener productos necesi-

rios para la sociedad, basándose en la aplicación de los conocimientos que sobre los mismos existen. El nombre de ciencia e ingeniería de materiales integra ambos conceptos de forma más acorde con la realidad actual, puesto que se deben equilibrar los principios científicos con las aplicaciones ingenieriles a la hora de seleccionar, en cada caso, el material más adecuado.

En la figura 1.2 se presenta un esquema de la integración entre ciencia e ingeniería de materiales, del que se deduce la necesidad de analizar sus microestructuras para conocer sus propiedades, lo que permitirá procesarlos adecuadamente con el fin de obtener un mejor comportamiento en servicio.



Figura 1.2.

La estructura interna de un material involucra tanto a los átomos como a la forma en que estos se asocian para formar moléculas, crecer como cristales, consolidar microestructuras y generar macroestructuras observables a simple vista. Es por ello, que el conocimiento de la estructura interna de los materiales resulta imprescindible en el campo de la ciencia de materiales.

En la figura 1.3 se puede observar la secuencia que los átomos deben seguir hasta que la microestructura del material resultante pueda ser observada mediante la técnica microscópica más adecuada. Es decir, desde el átomo, pasando por las agrupaciones moleculares formadas a través de los distintos tipos de enlaces, hasta dar lugar al material policristalino.

atómica» (uma)¹¹. Tanto el peso atómico de un elemento como el peso molecular de un compuesto se pueden expresar, bien en «umas» por átomo o molécula, o en masa por mol de materia. En un mol hay $6,023 \cdot 10^{23}$ átomos o moléculas, que corresponde al número de Avogadro. De forma que $1 \text{ uma/átomo o molécula} = 1 \text{ g/mol}$. Así por ejemplo, el peso atómico del aluminio Al es 26,98 uma/mol o 26,98 g/mol.

Ejercicio 1.1. Conociendo que la masa atómica del aluminio es 26,98 g/mol. ¿Cuál es la masa de un átomo de Al expresada en gramos? y ¿Qué número de átomos se encuentran en un gramo de Al?

SOLUCIÓN. Dado que en 26,98 g de Al existen $6,023 \cdot 10^{23}$ átomos, el número de gramos en un átomo de Al es:

$$\frac{26,98 \text{ g/mol}}{6,023 \cdot 10^{23} \text{ átomos/mol}} = \frac{X_g}{1 \text{ átomo}}, \text{ obteniéndose } X_g = 4,48 \cdot 10^{-23} \text{ g}$$

En un gramo de Al se encontrarán:

$$\frac{6,023 \cdot 10^{23} \text{ átomos/mol}}{26,98 \text{ g/mol}} = \frac{X_{\text{átomos}}}{1 \text{ g}}, \text{ obteniéndose } X_{\text{átomos}} = 2,6 \cdot 10^{22} \text{ átomos}$$

En general, al técnico le interesa el átomo en su conjunto y fundamentalmente la corteza del átomo, ya que la mayoría de las propiedades y consideraciones técnicas residen en la distribución y comportamiento de los electrones en la misma.

Para encontrar explicaciones del comportamiento de los electrones en los átomos se establecieron a finales del siglo XIX un conjunto de principios y leyes que constituyen la mecánica cuántica, cuya primera consecuencia fue el modelo atómico de Bohr, en el que se supone que los electrones giran alrededor del núcleo atómico en orbitales discretos, definiéndose la posi-

¹¹ Uma: es la unidad de masa atómica y se define como la doceava parte de la masa atómica del isótopo del carbono 12, cuya masa atómica es de 12.

ción particular de cada uno mediante su orbital. Este modelo se representa de forma esquemática en la figura 1.7.

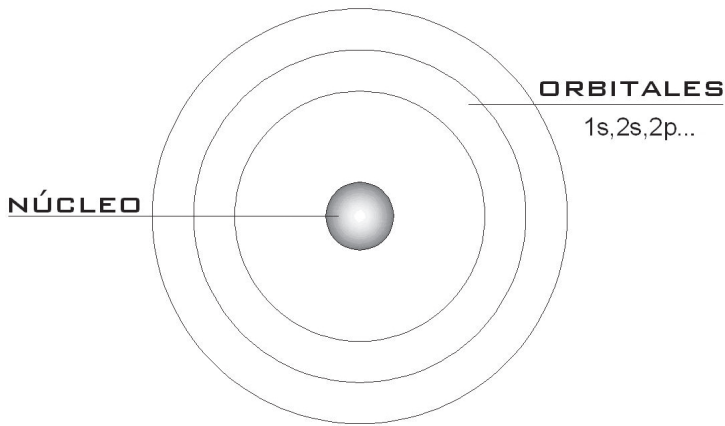


Figura 1.7.

Un principio de la mecánica cuántica determina que las energías de los electrones están cuantizadas, de forma que un electrón puede cambiar de estado energético mediante saltos cuánticos a valores superiores con absorción de energía o a valores inferiores con la consiguiente emisión energética. El modelo de Bohr representa el primer intento de describir la distribución de los electrones en los átomos, determinando tanto su posición mediante los orbitales como su energía a través de los niveles cuánticos.

En el modelo de la mecánica ondulatoria, que es una subdivisión de la cuántica, se considera que el electrón presenta la dualidad onda-corpúsculo, describiéndose su movimiento mediante los principios matemáticos que rigen el de las ondas. Por ello, los electrones no se tratan como partículas que se mueven en orbitales discretos, sino que su posición se considera como la probabilidad de encontrarle en una zona alrededor del núcleo.

Utilizando la mecánica ondulatoria, cada electrón de un átomo se caracteriza por los cuatro números cuánticos n , l , m_l y m_s . Los números cuánticos separan los niveles energéticos de Bohr en subniveles e indican el número de estados en cada subnivel.

El número cuántico principal n determina los niveles energéticos principales para el electrón. Sus valores son números enteros positivos que van

desde 1 a 7. Para identificar los distintos niveles energéticos se sigue la siguiente notación:

$$n = 1 \rightarrow \text{nivel energético } K$$

$$n = 2 \rightarrow \text{nivel energético } L$$

$$n = 3 \rightarrow \text{nivel energético } M$$

$$n = 4 \rightarrow \text{nivel energético } N$$

Cuanto mayor sea el valor de n más alejado del núcleo se encuentra el electrón.

El segundo número cuántico l , denominado secundario, indica el sub-nivel de energía dentro de los límites de los niveles principales, designándose por s , p , d y f . Estos subniveles energéticos también se denominan orbitales. Los valores asignados a l van desde 0 a $n - 1$, teniendo la siguiente correspondencia:

$$n = 1 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} l = 0 \rightarrow \text{Subnivel energético } s \end{array} \right.$$

$$n = 2 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} l = 0 \rightarrow \text{Subnivel energético } s \\ l = 1 \rightarrow \text{Subnivel energético } p \end{array} \right.$$

$$n = 3 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} l = 0 \rightarrow \text{Subnivel energético } s \\ l = 1 \rightarrow \text{Subnivel energético } p \\ l = 2 \rightarrow \text{Subnivel energético } d \end{array} \right.$$

El tercer número cuántico m_l , denominado magnético, determina el número de estados energéticos para cada subnivel, lo que está relacionado directamente con la orientación de cada orbital atómico. En general, hay $2l + 1$ valores permitidos para m_l , de forma que para el orbital s sólo existe un estado energético, mientras que para los p , d y f existen, respectivamente, 3, 5 y 7 estados, tal y como se puede observar en el siguiente ejemplo:

$$n = 1 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} l = 0 \rightarrow \text{Subnivel energético } s \rightarrow \text{n.º de estados} = 1 \end{array} \right.$$

$$n = 2 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} l = 0 \rightarrow \text{Subnivel energético } s \rightarrow \text{n.º de estados} = 1 \\ l = 1 \rightarrow \text{Subnivel energético } p \rightarrow \text{n.º de estados} = 3 \end{array} \right.$$

$$n = 3 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} l = 0 \rightarrow \text{Subnivel energético } s \rightarrow \text{n.º de estados} = 1 \\ l = 1 \rightarrow \text{Subnivel energético } p \rightarrow \text{n.º de estados} = 3 \\ l = 2 \rightarrow \text{Subnivel energético } d \rightarrow \text{n.º de estados} = 5 \end{array} \right.$$

El cuarto número cuántico m_s , denominado espín, representa las dos direcciones de giro del electrón alrededor de su eje y toma los valores de $+1/2$ y $-1/2$.

Para determinar como se llenan los estados electrónicos con electrones se utiliza el «principio de exclusión de Pauli», que establece que cada estado electrónico solo puede estar ocupado por dos electrones que deben tener espines opuestos. Por ello, los subniveles s , p , d y f pueden acomodar un total de 2, 6, 10 y 14 electrones respectivamente. Según este principio no puede existir más de un electrón con los cuatro números cuánticos iguales por lo que al menos deberá variar su espín.

En la tabla 1.3 se presenta el número de estados y de electrones permitido en algunos niveles y subniveles electrónicos.

Tabla 1.3.

n	Nivel	Subnivel (orbital)	N.º de estados	N.º de electrones por subnivel	N.º de electrones por nivel
1	K	s	1	2	2
2	L	s	1	2	8
		p	3	6	
3	M	s	1	2	18
		p	3	6	
		d	5	10	
4	N	s	1	2	32
		p	3	6	
		d	5	10	
		f	7	14	

Las transiciones de electrones entre los diferentes niveles energéticos implican absorción o emisión de energía en forma de radiación electromagnética¹², fotones. El fotón es la partícula elemental de energía luminosa, caracterizada por una longitud de onda λ y una frecuencia ν , relacionadas ambas a través de la expresión: $\lambda\nu = c$, donde c es la velocidad de la luz. Así, toda variación de energía ΔE supondrá una absorción o emisión de fotones de frecuencia ν , según la expresión que contiene la constante de

¹² Radiación electromagnética: corresponde a un tipo de onda en la que los componentes del campo magnético y del eléctrico son perpendiculares entre sí y además perpendiculares a la dirección de propagación.

Planck: $\Delta E = h\nu$, tal y como se puede observar en la representación esquemática de la figura 1.8.

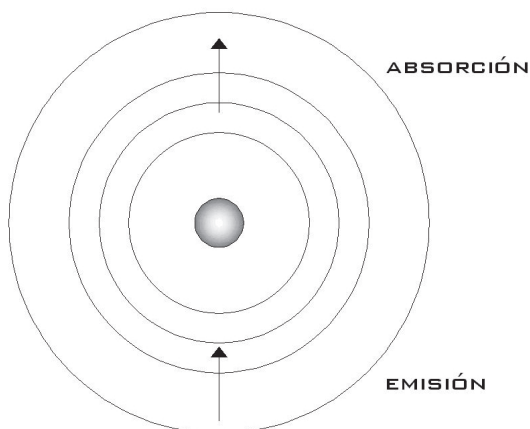


Figura 1.8.

Los electrones de valencia ocupan los niveles más externos, de forma que estos electrones son los más importantes puesto que participan en el enlace entre átomos, derivándose de ello muchas de las propiedades físicas y químicas que presentan los sólidos. Algunos átomos de los elementos que tienen niveles de valencia incompletos adquieren una configuración estable, bien ionizándose (ganando o perdiendo electrones) o bien compartiéndolos con otros átomos. Este es el fundamento de los principales enlaces atómicos de los sólidos.

Configuración electrónica

La configuración electrónica muestra la distribución de los electrones en la corteza del átomo en los diferentes niveles K , L , M , N , y en los orbitales correspondientes mediante la notación convencional que nombra en primer lugar el número cuántico principal, seguido del orbital s , p , d , f con el número de electrones que contienen como superíndice. En la tabla 1.4 se presenta la configuración electrónica de algunos de los elementos más utilizados en aplicaciones tecnológicas.

Tabla 1.4

N.º Atómico	Símbolo	Configuración electrónica
1	H	$1s^1$
2	He	$1s^2$
3	Li	$1s^2 2s^1$
4	Be	$1s^2 2s^2$
5	B	$1s^2 2s^2 2p^1$
6	C	$1s^2 2s^2 2p^2$
7	N	$1s^2 2s^2 2p^3$
8	O	$1s^2 2s^2 2p^4$
9	F	$1s^2 2s^2 2p^5$
10	Ne	$1s^2 2s^2 2p^6$
11	Na	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$
12	Mg	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$
13	Al	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$
18	Ar	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$
19	K	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^1$
20	Ca	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2$
22	Ti	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^2 4s^2$
24	Cr	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5 4s^1$
26	Fe	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2$
28	Ni	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^8 4s^2$
29	Cu	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1$
30	Zn	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2$
31	Ga	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 3p^1$

Por ejemplo, si se elige el C, cuyo número atómico es 6, resulta que los 6 electrones del átomo se distribuyen de la forma $1s^2 2s^2 2p^2$ lo que significa que existen 2 electrones en el subnivel 1s, 2 en el 2s y otros 2 en el 2p. Es decir, hay 2 electrones en el nivel 1, interior, y 4 electrones en el nivel 2, exterior.

Sistema periódico

El sistema periódico de los elementos es la ordenación sistemática de los mismos con arreglo a su configuración electrónica. Las filas o líneas