

**INVESTIGACIÓN PARA LA PRODUCCIÓN NANOTECNOLOGICA DE  
CELDA DELGADAS FOTOVOLTACICAS CIGS A PARTIR DE COBRE,  
INDIO, GALIO Y DISELENIO**

**MARCO TEORICO**

**CARMEN PATRICIA CAÑIZARES LINARES**

**HUMBERTO CASADIEGO QUINTERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUIMICA  
BUCARAMANGA**

**2009**

**INVESTIGACIÓN PARA LA PRODUCCIÓN NANOTECNOLOGICA DE  
CELDAS DELGADAS FOTOVOLTATICAS CIGS A PARTIR DE COBRE,  
INDIO, GALIO Y DISELENIO**

**MARCO TEORICO**

**CARMEN PATRICIA CAÑIZARES LINARES**

**HUMBERTO CASADIEGO QUINTERO**

**Monografía para Optar al Título de  
Especialista en Ingeniería Ambiental**

**Director:**

**ING. MARIO ÁLVAREZ CIFUENTES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2009**

# TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCION	1
1. ESTADO ACTUAL	3
1.1. SILICIO VS CIGS	3
2. NANOTECNOLGIA Y CELDAS CIGS	8
2.1. LA INDUSTRIA DE LA NANOTECNOLOGÍA	11
3. MEDIO AMBIENTE Y CELDAS CIGS	15
4. MARCO TEORICO	18
4.1. ELECTROMAGNETISMO	18
4.1.1. Ecuaciones de Maxwell	23
4.1.2. Longitud de Onda de De Broglie	29
4.2. CONTEXTO HISTÓRICO	32
4.3. MODELO ONDULATORIO DE SCHRODINGER	33
4.3.1. Ecuación de Onda de Schrodinger	36
5. NATURALEZA DE LA LUZ	38
5.1. HISTORIA	38
5.2. MODELO CORPUSCULAR	40
5.3. FOTÓN	45
5.4. PROPIEDADES FÍSICAS	49
5.4.1. Teoría de la relatividad especial	49
5.4.2. Emisión	50
5.4.3. Absorción	50
5.4.4. Energía y movimiento	50
5.4.5. Desarrollo histórico del concepto	51
5.4.6. Dualidad onda-corpúsculo y principio de incertidumbre	55
5.4.7. Fotones y materia	55
5.4.8. Aplicaciones Tecnológicas	56
6. EFECTO FOTOELÉCTRICO	57
6.1. HISTORIA	60

6.1.1. Heinrich Hertz	60
6.1.2. J.J. Thomson	60
6.1.3. Von Lenard	61
6.1.4. Cuantos de luz de Einstein	61
6.1.5. Dualidad onda-corpúsculo	62
6.1.6. Efecto fotoeléctrico en la actualidad	62
6.1.7. Explicación	82
6.1.8. Formulación matemática	83
6.1.9. Corrientes Inducidas	84
6.2. TEORIA ATÓMICA Y ATOMOS CIGS	87
6.2.1. Teoría Atómica	87
6.2.1.1. Atomismo filosófico	88
6.2.1.2. Teoría atómica moderna	89
6.2.1.2.1. Nacimiento de la teoría atómica moderna	89
6.2.1.2.2. Descubrimiento de las partículas subatómicas	91
6.2.1.2.3. Descubrimiento del núcleo	92
6.2.1.2.4. Descubrimiento de los isótopos	93
6.2.1.2.5. Descubrimiento del neutrón	94
6.2.1.3. Modelos cuánticos del átomo	94
6.2.1.4. Importancia	97
6.3. ATOMOS CIGS	97
6.3.1. COBRE	97
6.3.2. INDIO	99
6.3.2.1. Características principales	101
6.3.2.2. Aplicaciones	101
6.3.2.3. Historia	102
6.3.2.4. Abundancia y obtención	102
6.3.2.5. Precauciones	103
6.3.3. GALIO	103
6.3.3.1. Características principales	105
6.3.3.2. Aplicaciones	105
6.3.3.3. Historia	106

6.3.3.4. Abundancia y obtención	107
6.3.3.5. Isótopos	107
6.3.3.6. Precauciones	107
6.3.4. ARSENIURO DE GALIO	108
6.3.4.1. GaAs en tecnologías de altas frecuencias	109
6.3.4.2. Materiales relacionados	110
6.3.5. SELENIO	110
6.3.5.1. Características principales	112
6.3.5.2. Aplicaciones	113
6.3.5.3. Papel biológico	113
6.3.5.4. Historia	114
6.3.5.5. Abundancia y obtención	115
6.3.5.6. Isótopos	116
6.3.5.7. Precauciones	116
7. ALCANCES	117
8. LIMITACIONES	118
9. METODOLOGIA	119
10. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	120
11. PRESUPUESTO	121
BIBLIOGRAFIA	122

## LISTADO DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura No.1</b> Celda CIGS a escala microscópica	8
<b>Figura No.2</b> Celda Solares delgadas CIGS	16
<b>Figura No.3</b> Espectro Electromagnético	26
<b>Figura No.4</b> Representación de una onda	27
<b>Figura No.5</b> Diagrama de Feynman	49
<b>Figura No.6</b> Doble Rendija	51
<b>Figura No.7</b> Onda de Luz	52
<b>Figura No.8</b> Espectro Electromagnético	58
<b>Figura No.9</b> Una antena de varilla	65
<b>Figura No.10</b> Esquema de los circuitos Emisor y Receptor utilizados Por Marconi	68
<b>Figura No.11</b> La ionosfera permite que las ondas de radio puedan Llegar de un lugar a otro sobre la tierra	70
<b>Figura No.12</b> Al interferir una onda de baja frecuencia (audio) con Una de alta frecuencia (radio) se obtiene una onda Modulada en su amplitud	71
<b>Figura No.13</b> Diagrama de bloque de un Emisor de Amplitud Modulada	72
<b>Figura No.14</b> Diagrama de bloques de un Receptor de Amplitud Modulada	73
<b>Figura No.15</b> La Señal Modula la Frecuencia de la Onda de Radiofrecuencia	75
<b>Figura No.16</b> Diagrama del Efecto Fotoeléctrico	79
<b>Figura No.17</b> Célula Fotoeléctrica donde “1” es la fuente lumínica, “2” es el cátodo y “3”, el ánodo.	80
<b>Figura No.18</b> Modelo Atómico de Thompson	91
<b>Figura No.19</b> Modelo Atómico de Rutherford	92
<b>Figura No.20</b> Modelo Cuántico del Atómico	95
<b>Figura No.21</b> Orbitales Atómicos de un átomo de Neón	96
<b>Figura No.22</b> Lingote de Indio.	101

## LISTADO DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla No. 1.</b> Ecuaciones de Maxwell	24
<b>Tabla No. 2</b> Ecuaciones de Velocidad de la luz, Permitividad y Permeabilidad	25
<b>Tabla No. 3</b> Datos del Fotón ( $\gamma$ )	45
<b>Tabla No. 4</b> Datos Estadísticos del Cobre	98
<b>Tabla No. 5</b> Datos Estadísticos del Indio	100
<b>Tabla No. 6</b> Datos Estadísticos del Galio	104
<b>Tabla No. 7</b> Datos Estadísticos del Arseniuro de Galio	108
<b>Tabla No. 8</b> Datos Estadísticos del Selenio	112

**TITULO: INVESTIGACIÓN PARA LA PRODUCCIÓN NANOTECNOLOGICA DE CELDAS DELGADAS FOTOVOLTATICAS CIGS A PARTIR DE COBRE, INDIO, GALIO Y DISELENIO - MARCO TEORICO -**

**AUTOR: CARMEN PATRICIA CAÑIZARES LINARES  
HUMBERTO CASADIEGO QUINTERO**

**PALABRAS CLAVES: NANO TECNOLOGÍA, COBRE, INDIO, GALIO Y DISELENIO**

El presente trabajo tiene por objeto dar a conocer los fundamentos básicos sobre investigación para la producción nanotecnológica de celdas delgadas fotovoltaicas CIGS a partir de cobre, indio, galio y diselenio. Las celdas fotovoltaicas son el motor de cualquier sistema solar, es que sin ellas no podríamos contar actualmente con paneles solares o cualquier otro dispositivo que funcione a base de esta energía.

Hoy por hoy los sistemas fotovoltaicos generadores de energía eléctrica a partir de luz solar a base de silicio son muy costosos, de difícil instalación y duración bastante limitada por las condiciones medio ambientales. La nueva generación de celdas fotovoltaicas producidas a partir de cobre, indio, galio y diselenio producen energía a un costo muy bajo.

El inconveniente radica en saber en qué proporciones y en qué orden se deben mezclar los anteriores elementos para que las celdas CIGS produzcan energía eléctrica.

Varias empresas han logrado descubrir la fórmula exacta para producir celdas fotovoltaicas, y ya en algunos países de la Unión Europea, ha comenzado su uso masivo. Esta investigación pretende mostrar los lineamientos, los profesionales requeridos, establecer las bases, para iniciar las futuras investigaciones en el campo de generación de energía amigable con el medio ambiente, económica, con acceso a las clases menos favorecidas y de fácil instalación y mantenimiento, así como los fundamentos teóricos a partir de los cuales se puedan fabricar celdas fotovoltaicas.

**TITULE: INVESTIGATION FOR THE PRODUCTION NANOTECNOLOGICA OF THIN CELLS  
FOTOVOLTACICAS CIGS from COPPER, INDIAN, RENNET AND DISELENIO -  
THEORETICAL FRAME-**

**AUTHOR: CARMEN PATRICIA CAÑIZARES LINARES  
HUMBERTO CASADIEGO QUINTERO**

**KEY WORDS:** NANOTECHNOLOGY, CUPPER, INDIE, GALLIUM AN DISELENIUM.

The present study have the objective of show basic topics of nanotechnology investigation to produce thick photovoltaic cells of cupper, indie, gallium, an diselenium. The photovoltaic cells are the engine of any solar system, without it, we can`t built solar panels or any other utilities that work with these energy. The function of any photovoltaic cell is convert solar light captured, in atomic level.

At the present day, the photovoltaic systems cells, of solar light from sillisium, are very expensive, difficult installation, and have a short time of utility for the environment. The new generation of photovoltaic systems cells, made from cupper, indie, gallium, and diselenio, can produce energy at very low cost.

The proportions and order to mix, those elements for the CIGS cells, produce electrical energy, is the problem to know about it.

Some companies in the world have achieved these goals, to produce photovoltaic cells, and some countries of European Union, star to use the CIGS in massive terms. These investigations want to show the principles, the professionals that require, give the bases for future investigations in production of friendly energy with environment, cheap, with access to poor people, easy installation and support, and theoretical basics to produce photovoltaic cells of nanotechnology.

# **OBJETIVOS**

## **OBJETIVO GENERAL**

Encontrar una solución a la escases actual de Energía en el mundo afectado durante el presente Siglo a contaminación ambiental progresiva por el uso inadecuado de combustibles fósiles. Ello se ha traducido en la masificación de investigaciones en el campo de la Energía Solar. Las celdas fotovoltaicas de película delgada muestran un creciente desarrollo tecnológico, dado su bajo costo, traduciéndose como una solución a corto y mediano plazo a las necesidades de energía del mundo moderno. Por ser ambientalmente libres de contaminación con un combustible abundante y gratuito hacen que su aceptación sea sustentable. El desarrollo de esta tecnología será la Revolución Tecnológica del Siglo XXI.

## **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

Lograr el conocimiento dentro del marco teórico sobre Celdas Fotovoltaicas de una manera suficiente para iniciar la investigación buscando con ello la producción en Colombia de dichas Celdas. Ello se traducirá en la autosuficiencia Energética en el Campo de la Energía Solar, dejando la dependencia tecnológica de otras naciones.

## INTRODUCCION

Dadas las últimas investigaciones sobre la producción de películas delgadas fotovoltaicas (años 2002-2008), se hace necesario empezar hoy las investigaciones para lograr en Colombia el desarrollo de ésta tecnología.

Para ello debemos conocer la actualidad en la producción de celdas fotovoltaicas delgadas CIGS frente a las celdas tradicionales a base de silicio, con grandes características pero cuyo costo y dificultades en producción las ha hecho que se mantengan en unos niveles de producción bajos, generando que el costo en US\$ sea de unos U.S \$4.00/vatio, amén de los costos adicionales en equipos de almacenamiento de energía, sistemas controladores e inversores de corriente. Todo ello ha generado que la energía eléctrica generada con equipos fotovoltaicos sean los más costosos de todos los sistemas generadores de electricidad, muy por encima de las costosas centrales termonucleares.

Desde el año 2002 se empezaron a desarrollar nuevas tecnologías en este campo, todas ellas orientadas a abaratar el costo de las instalaciones fotovoltaicas. Todo indica que el objetivo se ha cumplido con la irrupción de la tecnología CIGS, cuyos costos en términos de US\$ vatios es del orden de 0.90 centavos de dólar americano. Con ello se igualó al costo de la generación por térmicas en términos de equipos pero con la indiscutible ventaja que no requieren de combustibles fósiles, su energía es limpia y además gratuita.

Ello ha generado grandes expectativas en muchos investigadores, incluso en nosotros por considerar que ésta tecnología será la revolución tecnológica del siglo XXI. Tener energía gratuita hará posible en gran escala el automóvil eléctrico ya sea con el sistema tradicional de banco de baterías ó el impulsado con hidrogeno con el componente de celdas de combustibles que evitará el cargar con las incómodas y pesada baterías. Con ello se masificará el uso del

automóvil de hidrogeno porque frente a un combustible gratuito como lo es la energía radiante del sol, el producir hidrogeno será igualmente económico. Todo lo anterior se traducirá en un mejoramiento medio ambiental, al evitarse el uso de combustibles fósiles, cuya presencia para ese futuro cercano, será escaso y costoso. El sector industrial, comercial, de transporte y nuestros hogares contará con un suministro de energía eléctrica en forma abundante y cuyo costo será muy económico que el suministro actual de electricidad.

Por todo lo anterior es importante acometer la investigación de producción de celdas fotovoltaicas CIGS en tres etapas:

4. Crear el **Marco Teórico** relacionado con todo el conocimiento de esa fuente de energía eléctrica como lo es el fenómeno fotovoltaico; conocimientos teóricos de la Naturaleza de la Luz; los principios del efecto fotoeléctrico; Fundamentos de Electromagnetismo; Teoría Atómica, Física de Partículas Atómicas y por último el estudio de los átomos que constituyen la tinta CIGS con la que se producirán las celdas fotovoltaicas: Cobre, indio, galio, di selenio (CIGS).

2. Desarrollar la investigación a través de alianzas con empresas privadas dedicadas a la producción y comercialización energía solar, Universidades locales en la ciudad de Bucaramanga que apoyen la presente iniciativa y con fondos provenientes de capitales de riesgo de entidades públicas y privadas.

3. Allegar los fondos de inversión para la creación de una empresa que produzca a escala industrial celdas fotovoltaicas económicas que surtan los mercados latinoamericanos. Lo anterior es nuestra motivación en la presente Monografía que estará dirigida a esa primera etapa que es el desarrollo del **Marco Teórico**.

# 1. ESTADO ACTUAL

Las Naciones desarrolladas en sus Centros de Investigación invierten cada día más recursos para el desarrollo de las Celdas Fotovoltaicas de película delgada. Aunque su irrupción en el mercado mundial aun no es un hecho, es una realidad que para el año 2009, empezará la comercialización masiva de éstos productos. Existen a nivel mundial varias empresas que están en la etapa de producción inicial de las Celdas de película delgada: Nanosolar (USA); GlobalSolar (USA); Fisom (Suiza), Heliovolt (USA).

## 1.1. SILICIO VS CIGS

El auge de la industria solar se encuentra en medio de una argumentación de cual material se convertirá en dominante en el futuro para la recogida de la luz solar y convertirla en electricidad. Paneles solares hechos de silicio cristalino actualmente representan más del 90 por ciento de la infraestructura solar de hoy.

Lamentablemente, los paneles de silicio se mantienen con problemas de fabricación. Su tecnología es complicada y los sobrecostos energéticos en su producción son altos. Ello se traduce en costos de inversión en equipos sean los más caros en términos de Kilovatio de generación, siendo éstos hasta cinco veces más altos que la generación con térmicas que funcionan con combustibles fósiles.

Aun con los subsidios que existen en la Unión Europea para éste tipo de generación sigue siendo más barato obtener electricidad de la red. Hace dos años la escasez de silicio semiconductor (2006-2007), a frenado la oferta de células fotovoltaicas de silicio, limitando severamente el crecimiento y las ventas.

Shell Corporation ha vendido sus fábricas en el mundo para la producción de Celdas fotovoltaicas a base de Silicio y se han dedicado a la investigación para la producción de CIGS. Grupos de expertos en la producción de energía con CIGS (cobre, indio, galio, selenio) predicen que se hará con costos muchos menores, lo que se traducirá en su masificación. El material puede ser rociado en papel de aluminio, plástico o vidrio o incorporados en el cemento y otros materiales de construcción. Inconcebible pero, todo el exterior de una casa o edificio, puede convertirse en un generador solar.

Una ventaja tecnológica es que CIGS no se degrada con la luz del sol al igual que otras tecnologías de película delgada. Resultando ello en una ventaja igual a las células de Silicio.

"Los más inteligentes inversionistas le apuestan a la tecnología CIGS, dejando huérfanas las inversiones en celdas de silicio", dijo Martin Roscheisen, director general de Nanosolar, una empresa que ha recibido 100 millones de dólares en fondos de capital riesgo. Construyeron en el año 2007 una planta en San José, California, capaz de producir 430 megavatios en paneles de CIGS.

"El semiconductor es 100 veces más delgados. Su bajo costo combinado con materiales de bajos costos hace de los procesos atractivos a la inversión de riesgo, frente a los gastos en silicio que son muy altas."

Un gran voto de confianza en CIGS llegó a principios del año 2008, cuando Shell, una de las mayores compañías de energía solar en el mundo, vendió su negocio de silicio solar para centrarse en el desarrollo de CIGS.

Por lo tanto, si CIGS es tan bueno, ¿por qué no está allí más de lo que hay? Tal vez la respuesta se encuentre en el desconocimiento de la tecnología para la producción de células CIGS. Ellas aun no han entrado al mercado y solo hasta el mes de Abril del año 2008 fue despachado por Nanosolar el primer

Megavatio para Alemania para allí ser ensamblados los paneles solares. El mercado europeo es ávido de estos generadores eléctricos.

El silicio se ha convertido en uno de los más estudiados materiales descubiertos, y, los avances en la reducción del tiempo de procesamiento y manufactura que fueron descubiertas en el mundo de semiconductores repercuten directamente en los fabricantes de células de silicio. Existen otras alternativas: la energía solar térmica, fotovoltaica con tintes, superando a las celdas de silicio en funcionalidad y costo.

"El silicio tiene un registro de confiabilidad que es inigualable por cualquier otro material", dijo T.J. Rodgers, director general de Cypress Semiconductor, que es el principal accionista en el rápido crecimiento de silicio grupo fabricante de SunPower.

"Ellos pueden cambiar el nombre de la empresa NanoDollar, porque eso es todo lo que van a ser con la izquierda después de que se hacen patear su trasero", dice Rodgers refiriéndose a Nanosolar. De lo anterior se puede deducir que la competencia entre la antigua tecnología de silicio y la nueva tecnología de películas delgadas es bien intensa.

"El más inteligente inversionista se aparta de la tecnología del silicio acogiendo a largo plazo la tecnología de película delgada, especialmente CIGS."

- Martin Roscheisen, director general de Nanosolar. Él tiene un punto de partida a comienzos del año 1990, cuando la tecnología del silicio estaba impuesta. Pero CIGS está surgiendo como una alternativa al silicio, con una considerable disminución del precio, lo que se traducirá en la desaparición de la tecnología de las celdas de silicio.

"Los tres materiales más estudiados en la historia son acero, cemento y silicio, así que tienen una pierna hasta en nosotros", reconoció B.J. Stanberry, director e investigador en CIGS, y desarrollador de HelioVolt." "Yo diría que eres un

tonto si le predijo la muerte inminente de silicio. Sin embargo, su incapacidad para ofrecerla a bajo costo, está creando una oportunidad para la película, y, CIGS tendrá una importante porción del mercado dentro de 10 años, sino su totalidad."

Con la demanda actual se tendrá a un máximo histórico para ambas tecnologías solares. Los dos tipos de paneles es probable que co-existirán por algunos años, sobre todo teniendo en cuenta el papel minúsculo que la energía solar juega ahora en la generación de electricidad. Pero, según diversas estimaciones, la demanda y producción de celdas fotovoltaicas se duplicarán para el año 2025 y su participación en el mercado energético será cada vez más significativo.

Actualmente la Energía Solar representa menos del 0,10 por ciento del total actual de generación eléctrica. Sin embargo, cada vez más el impulso de la nueva tecnología, creará entre los investigadores, fabricantes de equipos y, en última instancia, los clientes allanaran el camino para convertirse en una tecnología dominante sobre las otras tecnologías de generación eléctrica. Sin embargo podrán coexistir con las generadoras económicas (hidroeléctricas), por cuanto las otras desaparecerán.

Que le depara el futuro al silicón?: Sus hits iniciales se mantendrá solo por algún tiempo, pero al final perderá la partida. Incluso sus partidarios admiten que no es el ideal. En teoría, el silicio es capaz de convertir el 29 por ciento de la luz solar en generación eléctrica, de acuerdo con Dick Swanson, un ex profesor de Stanford que fundó SunPower.

"Ello significa que es una célula casi perfecta de todas las maneras posibles. Eso sería sin ningún tipo de pérdidas de energía o fugas distintos de los exigidos por la física de silicio", dice Swanson. "El límite práctico, la mayoría dicen que es alrededor del 25 por ciento al 26 por ciento."

SunPower ya vende paneles que convierten un promedio de 20 por ciento de la luz solar en electricidad y salió a finales del año (2008) con paneles con rendimientos del 22%. El alto rendimiento se debe a la concepción de la empresa de paneles SunPower pone los contactos eléctricos en la parte posterior (o inferior) del grupo para aumentar la superficie de exposición al sol. El silicio también se sienta encima de una capa reflectante: Fotones que de otro modo, pasan por el grupo son totalmente recuperado en él y efectivamente reciclado.

Junto a todo lo anterior, existe a nivel mundial investigaciones para la producción de celdas fotovoltaicas de película delgada (CFPD) basado en elementos fotoeléctricos diferentes al silicio tales como el CIGS, Clorofila Sintética; Teluro de Cadmio y Oxido de Titanio. Este último por su abundancia y bajo costo ofrece grandes posibilidades de desarrollo tecnológico.

## 2. NANOTECNOLGIA Y CELDAS CIGS

Las celdas CIGS por su escala microscópica se puede decir que corresponder a estructuras nano tecnológicas por cuanto el espesor de la película de tinta CIGS no supera los 200 nanómetros ( $200 \times 10^{-9}$ ).

Ella hace parte de las nuevas tecnologías que buscan optimizar el uso de las materias primas lográndose una mayor eficiencia y miniaturización del equipamiento.

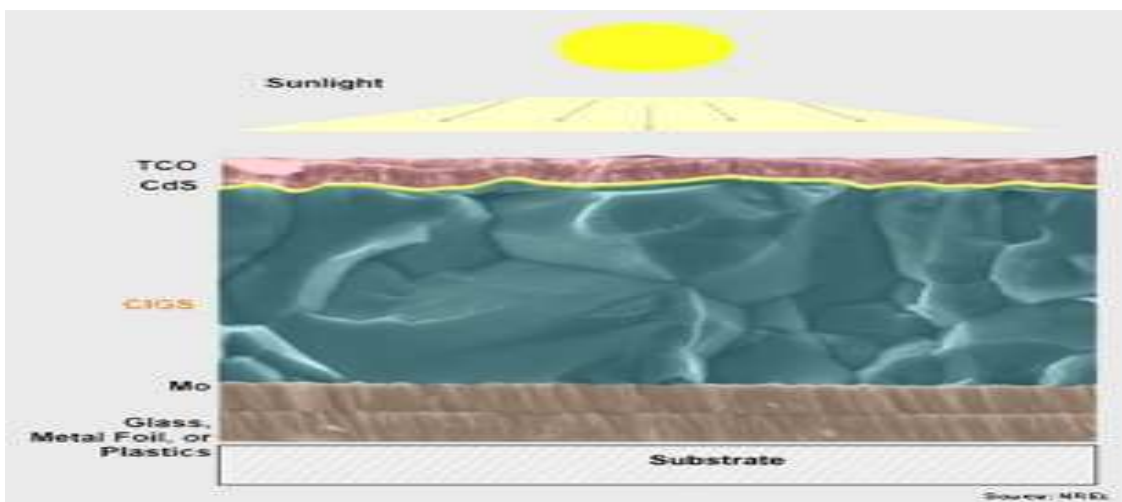
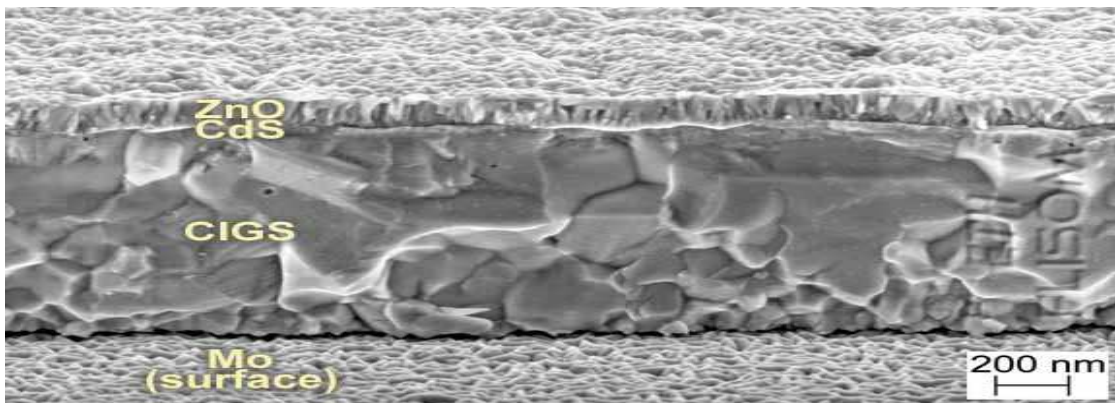


Figura No.1 Celda CIGS a escala microscópica.

La nanotecnología es un campo de las ciencias aplicadas dedicado al control y manipulación de la materia a una escala menor que un micrómetro, es decir, a nivel de átomos y moléculas (nano materiales). Lo más habitual es que tal manipulación se produzca en un rango de entre uno y cien nanómetros. Se tiene una idea de lo pequeño que puede ser un nanobot sabiendo que un nanobot de unos 50 nm tiene el tamaño de 5 capas de moléculas o átomos - depende de qué esté hecho el nanobot-..Nano- es un prefijo griego que indica una medida, no un objeto, de manera que la nanotecnología se caracteriza por ser un campo esencialmente multidisciplinar, y cohesionado exclusivamente por la escala de la materia con la que trabaja.

Si les pedimos a un amplio grupo de científicos, ingenieros, tecnólogos, inversionistas, industriales y al público, en general, que definan el concepto de nanotecnología, recibiremos un rango de respuestas tan amplio como la misma nanotecnología. Para la mayoría de los científicos, ésta no es algo sorprendentemente nuevo, debido a que ya se ha trabajado en la nano escala por varios decenios con herramientas de laboratorio como microscopía de electrones, microscopía de barrido, microscopía de fuerza atómica, para crecer y caracterizar películas delgadas y otros nano materiales. Pero para otros grupos, la nanotecnología significa algo mucho más ambicioso, dispositivos miniaturizados para monitoreo de procesos biológicos y dosificación de fármacos, mini motores y maquinarias construidas por átomos y asistidas por piezos, nanotubos de carbono para una infinidad de aplicaciones, y un sinnúmero de posibilidades que llevan a muchos a creer.

Es menester un estándar al cual podamos relacionar la nano escala. Imaginarnos una millonésima o billonésima de algo no es tarea fácil, pero si pensamos en átomos será posible una idea más aproximada de un nanómetro en la imaginación. Generalmente, las personas del común no tienen claro el tamaño de un átomo; pero al definir un nanómetro como diez átomos de hidrógeno o cinco átomos de silicio en línea, nos acercamos a un concepto útil para la mente humana. Así que podemos decir que la nanotecnología tiene que

ver con las partes más pequeñas de la materia que en la actualidad podemos manipular.

Muchas personas siguen creyendo que la nanotecnología es algo del futuro, con aplicaciones fuera de nuestro alcance. Esta creencia está lejos de la realidad. Ya se han otorgado unos doce premios Nobel en nanotecnología, desde los descubrimientos de magneto resistencia gigante y estructuras de fullereno, hasta los desarrollos en la microscopía de sonda de barrido, superconductores y otros avances tecnológicos. Más de seiscientas empresas en el mundo hacen uso de la nanotecnología, desde empresas pequeñas hasta corporaciones gigantescas como IBM, Samsung, BMW, General Motors, Panasonic, LG, entre muchas. La Unión Europea (Programa marco para la investigación, desarrollo e innovación), los EEUU (mediante sus políticas de Estado para apoyar ID&I), Brasil (Ley de Innovación) y otros países desarrollados, han realizado grandes esfuerzos para adelantar conocimientos en nanotecnología. Casi todas las universidades de alguna importancia en el mundo están desarrollando estudios e investigación en este campo. Muchas ya reciben amplia financiación para su trabajo en nanotecnología.

Lo más significativo es que ya estamos viendo la aplicación desde el sector productivo de un número de productos accesibles al consumidor, incluidos: partes para automóviles, prendas de vestir, electrodomésticos, pinturas, juguetes, materiales de construcción. La nanotecnología entró a nuestros hogares y sitios de trabajo, sólo hay que saber identificarla.

Pero muchos emprendedores y empresas aún no saben cómo identificar esta nueva tendencia. Para muchos, tecnología está ligada a computadores, software, informática y comunicaciones (Internet, telefonía celular). Gran parte de las aplicaciones iniciales de la nanotecnología se expresan en los materiales como aditivos para plásticos, partículas de nano carbono para mejorar el acero, recubrimientos duros para herramientas industriales y catalizadores para la industria petroquímica. Hay grandes aplicaciones en un

espectro amplio de industrias que tienen buena parte del mercado mundial. Hoy en día se ha iniciado en campo de la energía solar fotovoltaica con las celdas CIGS, ultra delgada.

## **2.1. LA INDUSTRIA DE LA NANOTECNOLOGÍA**

En la cotidianidad, muchos ya hacen referencia a la industria de la nanotecnología, de la misma manera que discuten un nuevo software o los avances de los videojuegos Wii de Nintendo, pero ¿se logrará dicha industria de la nanotecnología? Lo que ahora hacen muchas de las empresas que trabajan con nanotecnología es simplemente aplicar el conocimiento adquirido sobre la nano escala a la industria existente.

La utiliza la industria farmacéutica en mecanismos para dosificación de medicamentos, la industria de la construcción con nano partículas para mejorar el desempeño de materiales cementantes o la industria metalmecánica con recubrimientos duros para prolongar la vida útil de herramientas de corte y partes de maquinarias, en condiciones de ambiente agresivo o por fricción. De hecho, la nanotecnología se ha convertido en un elemento de apoyo, y no una industria como tal. Y aunque nunca diríamos que Microsoft o Intel son parte de la industria eléctrica, todos sabemos que sin la energía eléctrica estas empresas de software no existirían.

La nanotecnología es la comprensión fundamental de cómo funciona la naturaleza a escala atómica. Aparecerán nuevas industrias como resultado de este nuevo conocimiento, así como el conocimiento del plasma llevó a la creación de nuevos televisores, y de cómo se pueden mover electrones en un conductor, al aplicar una diferencia potencial, nos trajo la industria de la luz eléctrica, la telefonía, los computadores y el Internet, entre tantas industrias sin las cuales el mundo moderno no podría funcionar.

Si sólo pensamos que la nanotecnología sirve, exclusivamente, para hacer cosas más pequeñas, nos estamos perdiendo gran parte de la película. Se ha demostrado que podemos manipular la materia en escalas inferiores al micrón, pero el enfoque principal de la nanotecnología tiene que ver con la habilidad de construir y crear nuevos materiales y dispositivos desde abajo hacia arriba (bottom up). Es obvio que, simplemente, hacer las cosas más pequeñas no es toda la solución, y muchas veces no son ayuda. En algunos casos, tratar de crear todo nano sólo incrementaría los costos de producción sin beneficios importantes (como puede ser el caso en ciertas aplicaciones electrónicas) con apenas algunas mejoras marginales sobre las tecnologías actuales.

Desde hace cientos y miles de años, los romanos y las culturas del Lejano Oriente han utilizado nano partículas. Los vitrales de los templos de la antigüedad muestran técnicas de nano capas de oro para aumentar el brillo en ciertos colores. Cuando encendemos un fósforo, producimos fullerenos. El negro de carbono, la sustancia que se usa en la fabricación de llantas y que le brinda mayor durabilidad al caucho, se ha producido desde hace unos noventa años. En estos casos no se sabía que estaban utilizando nanotecnología, debido a que no había un control directo sobre el tamaño de las partículas, y sin conocimiento de la nano escala, no estaban utilizando la nanotecnología tal como hoy la definimos.

La nanotecnología, como otras ramas de la ciencia, procura comprender cómo funciona la naturaleza. Nuestros esfuerzos para producir dispositivos y manipular la materia siguen en una etapa primitiva frente a la naturaleza. La naturaleza tiene la capacidad para diseñar sistemas de energía altamente eficientes que operan de manera precisa sin desperdicios, reparan sólo lo que necesita ser reparado, hacen sólo lo que tiene que hacerse y nada más. Nosotros no tenemos esta capacidad. Creemos que algún día nuestro conocimiento de los fenómenos de la nano escala nos permitiría replicar en parte algo de lo que la naturaleza logra fácilmente.

La nanotecnología acoge un amplio grupo interdisciplinario. Nuestra nueva habilidad para observar, caracterizar y manipular a escala atómica hace que la nanotecnología sea sumamente atractiva desde los puntos de vista político, empresarial y científico. La nanotecnología se encuentra en una etapa temprana en nuestra misión para comprender el mundo que nos rodea. Este conocimiento brindará inspiración y estímulo para muchas generaciones de científicos.

Los empresarios tratarán la nanotecnología como a cualquier otra tecnología: la juzgarán por su capacidad de aumentar ingresos. Esto se verá en la manera que reduzca costos de producción en el desarrollo de nuevos productos (ventanas inteligentes, prendas libres de manchas) o la creación de nuevos mercados, así como el conocimiento de los polímeros abrió oportunidades multimillonarias para la industria de los plásticos.

En el frente político, se puede argumentar que la motivación principal es el temor. Países desarrollados, como EEUU, han liderado en crecimiento económico como resultado del desarrollo y adopción de las tecnologías de la información y comunicación. La nanotecnología promete mayores cambios económicos, militares y culturales que el Internet. Con el rápido avance de la tecnología, y los muy cortos ciclos de desarrollo y adopción, mantenerse a la par no será una opción para las naciones que no han iniciado claros y ejecutables planes de acción.

Recientemente, Colombia atendió el llamado con la creación del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS, se espera que el estado comprenda que las naciones ricas invierten grande en la investigación y desarrollo, no por ser ricas, sino que son ricas, porque entienden la necesidad de esta gran inversión.

Quizás el mayor beneficio de la nanotecnología a corto plazo radica en reunir áreas de conocimiento como la física y la biología, que debido a los sistemas

de educación no han logrado una estrecha relación. Esto nos llevará a la unificación de las disciplinas científicas. Como resultado, al enfrentarnos a un problema, podremos utilizar recursos de toda la ciencia, y no sólo de una disciplina.

### 3. MEDIO AMBIENTE Y CELDAS CIGS

Muchos se preguntarán cual es la relación entre las celdas fotovoltaicas CIGS y el medio ambiente. Pues bien el día que la humanidad tenga energía suficiente y en grandes cantidades, pero energía limpia y sin afectación del medio ambiente, ese día diremos que hemos logrado superar todos los obstáculos de contaminación de nuestra querida Tierra por parte de los combustibles fósiles y de materiales radiactivos. Y, ello hubiera sido posible de haberlo logrado desde que se conoce el fenómeno fotoeléctrico desde el año de 1897.

Pero curiosamente para tal fecha (finales del siglo IXX) irrumpía en el mercado de las energías un elemento abundante para ese entonces y además muy económico con alto contenido energético: EL PETRÓLEO. De tiempo atrás unos combustibles fósiles que se venían consumiendo por parte de la humanidad eran el carbón y el gas natural. Pero la llegada del petróleo cambio el panorama económico. Nacieron grandes empresas industriales alrededor de ella, y, la humanidad se olvidó del fenómeno fotoeléctrico. Sólo fue hasta los inicios de la era espacial cuando la necesidad de proveer de energía los satélites se hizo necesario retomar la idea de iniciar la producción industrial de celdas fotovoltaicas de silicio (difíciles de producir y costosas). Pero la industria espacial no escatimó recursos económicos y fue que en el año de 1956 cuando se lanzó por primera vez el satélite Vanguard provisto de células fotovoltaicas de silicio.

Con la escases de petróleo; costos elevados del mismo; y, mayor conciencia ambiental sobre el cuidado del medio ambiente, se han volcado los centros de investigación en la búsqueda de materiales de menor valor, facilidad en la producción para la obtención de Celdas Fotovoltaicas delgadas. Con el ello en el año 2002 se iniciaron en Stanford University estudios de nuevos materiales fotoeléctricos. De allí nacen las Celdas fotovoltaicas CIGS, que proveerán de electricidad a la humanidad en los años venideros, cuando logre derrumbarse

la industria del petróleo por la inercia de la falta de los mismos y altos costos. Hoy la energía fotovoltaica no representa ni el 0.01% de la generación eléctrica a nivel mundial. Las térmicas, incluidas las Centrales Termonucleares proveen a la humanidad del 80% de la generación eléctrica.

Ellas obviamente son altamente contaminantes para el medio ambiente. Se llegará a un cercano futuro donde las celdas CIGS ó celdas ultra delgadas cubrirán en un altísimo porcentaje la generación de energía eléctrica que humanidad necesite. Es energía limpia y barata. Ella igualmente hará posible el uso masivo del vehículo eléctrico porque la producción de hidrogeno será igualmente económica. Se liberan para entonces de los combustibles generadores de CO<sub>2</sub>, CO y otros con efecto invernadero.

Por otra parte las nuevas tendencias de los centros de investigación y los gobiernos de la Unión Europea y hoy en día en los Estados Unidos propenden por el lograr la producción masiva y de bajo costo de Celdas Solares delgadas CIGS, centrado sus ponencias en las nuevas tecnologías solar de bajo costo.



**Figura No.2** Celda Solares delgadasCIGS.

Un kilogramo de material semiconductor CIGS produce la misma electricidad que cinco kilogramos de Uranio, según reportes dados por la multinacional NANOSOLAR. Los beneficios de ésta energía limpia serán inmediatos. Se eliminará la necesidad de utilizar combustibles fósiles y materiales radiactivos como el uranio.

Otra consideración final es que el costo energético en la producción de celdas CIGS se recuperará en solo unas semanas con su propia producción de energía. La producción de silicio solar necesita altas temperaturas que solo se consiguen con un alto consumo de energía. La fabricación de estas nuevas placas se produce a baja temperatura con consumos energéticos mucho más bajos, lo que repercute positivamente tanto en su coste como en el medio ambiente. Además el equipamiento para la generación de electricidad estará aun por dejado de las térmicas (US\$1.2 por watio), pero con el gran aliciente que el combustible suministrado será gratuito, con cero contaminaciones y naturalmente puro: EL SOL.

## **4. MARCO TEORICO**

### **4.1. ELECTROMAGNETISMO**

Entender la naturaleza de la Luz y el fenómeno fotoeléctrico implica tener conocimientos de electromagnetismo porque ella es de naturaleza electromagnética. Por lo tanto iniciaremos el estudio del Presente Marco Teórico con el estudio de la Teoría Electromagnética. Ella sin embargo aun se encuentra en una etapa de “teoría” por cuanto su misma naturaleza aun no se ha dilucidado con claridad. Sin embargo ha estado con nosotros desde los inicios de la era de formación de los planetas, soles y galaxias, por ser ella misma la materia prima de la formación de ellos.

El electromagnetismo hace parte de una de las 4 fuerzas de la naturaleza, como lo son la gravedad, las fuerzas nucleares fuertes y débiles y el mismo electromagnetismo. Sin embargo todas ellas confluyen con una fuerza primaria que al parecer es el electromagnetismo. Por ello podemos concluir que en la naturaleza el elemento primario es el electromagnetismo como elemento constitutivo de todas las demás fuerzas de la naturaleza y la condensación de la misma daría formación a la masa. El estudio de las Fuerzas de la Naturaleza no será motivo de estudio en la presente Monografía. Solo estudiaremos el Electromagnetismo.

Después que Oersted descubrió que una corriente eléctrica genera un campo magnético, surgió la pregunta: Puede un campo magnético generar una corriente eléctrica? Recordemos que para la fecha la única fuente de electricidad era la pila de volta. Además los usos de la electricidad estaba confinada a los laboratorios de física y su aplicación práctica no era aun conocida como la conocernos hoy en día, donde su uso tiene infinidad de aplicaciones. No sé si los investigadores de la época previeron que el nacimiento del uso de la electricidad tendría las repercusiones industriales,

económicas y sociales que se dieron en la posteridad. Ella cambió y desarrolló a la humanidad en 108 años lo que no había avanzado en 10.000 años de civilización. Y, todo a la electricidad, no sin desconocer otros inventos y desarrollo tecnológicos que a posteriori se dieron.

Como nuestra monografía se basa fundamentalmente en el desarrollo del **marco teórico** de todo aquello que gira alrededor del fenómeno FOTOELÉCTRICO, fundamento de la generación de la electricidad por medio de la luz solar, y siendo que ésta es una onda electromagnética ó corpúsculo sin masa, debemos profundizar en el conocimiento del electromagnetismo y conocer sus elementos teóricos y prácticos. Conociendo el espectro electromagnético podemos conocer esa pequeña franja de la luz visible por nuestro sentido.

Ella se encuentra en una pequeña franja por encima del infrarrojo de “baja energía” y por debajo del ultravioleta de alta energía. Sin embargo el interés es que dicha franja lleva suficiente energía para ser aprovechada en la producción de energía eléctrica en cantidades suficientes que obliguen al cambio de la actitud humana a usar energía limpia y barata. Es la premonición de lo que será el futuro en la producción y consumo de energía eléctrica toda ella producida por la energía de la luz solar. Ello hará posible el uso masivo del automóvil eléctrico al tener producción de hidrogeno igualmente económico.

La teoría del Electromagnetismo es uno de los capítulos más importantes del estudio de la naturaleza de la luz. Hoy se trata de designar como Luz todo el espacio electromagnético incluyendo la pequeña franja electromagnética de la luz visible. Ella ha contribuido al conocimiento actual de lo que es ella (la Luz).

El electromagnetismo analizado en las postrimerías del siglo IXX es tal vez una de las mayores contribuciones al desarrollo tecnológico que hemos visto en siglo XX. Ella permitió el desarrollo de las telecomunicaciones, Televisión, telefonía celular y actualmente el desarrollo del internet. Fue James Clark

Maxwell uno de los físicos teóricos del siglo XIX (1831-1879). Este físico inglés dio en 1865 a los descubrimientos, que anteriormente había realizado el genial autodidacta Michael Faraday (el que dio origen al electromagnetismo como una suma de asociaciones entre electricidad y magnetismo), el andamiaje matemático y logró reunir los fenómenos ópticos y electromagnéticos hasta entonces identificados dentro del marco de una teoría de reconocida hermosura y de acabada estructura.

Hay que reconocer que para entonces el electromagnetismo se encontraba aun dentro de un marco teórico, pues las ondas electromagnéticas aun no se conocían (dentro del conocimiento científico), las cuales son descubiertas 20 años más tarde por Heinrich Hertz (1857-1894 ), quien comprueba que las ondas que posteriormente se llamaron Hertzianas en su honor, y, cuyo origen electromagnético tenían las mismas propiedades que las ondas luminosas, estableciéndose con ello la identidad física entre ambos fenómenos. En la descripción que hace de su propuesta, Maxwell propugna que cada cambio del campo eléctrico engendra en su proximidad un campo magnético, e inversamente cada variación del campo magnético origina uno eléctrico.

Dado que las acciones eléctricas se propagan con velocidad finita de punto a punto, se podrán concebir los cambios periódicos - cambios en dirección e intensidad - de un campo eléctrico como una propagación de ondas. Tales ondas eléctricas están necesariamente acompañadas por ondas magnéticas indisolublemente ligadas a ellas.

Los dos campos, eléctrico y magnético, periódicamente variables, están constantemente perpendiculares entre sí y a la dirección común de su propagación. Son, pues, ondas transversales semejantes a las de la luz.

Por otra parte, las ondas electromagnéticas se transmiten, como se puede deducir de las investigaciones de Weber y Kohlrausch, con la misma velocidad que la luz. De esta doble analogía, y haciendo gala de una espectacular volada

especulativa Maxwell termina concluyendo que la luz consiste en una perturbación electromagnética que se propaga en el éter (posteriormente se comprobó la inexistencia del éter). Se concluye en algo importante para el desarrollo de la física cuántica: Ondas eléctricas y ondas luminosas son fenómenos fuertemente correlacionados.

Sin embargo las ondas eléctricas en general necesitan un medio físico para sus propagación, ó pueden viajar en vacio pero frente a una diferencia de potencial alto y en distancias cortas, un ejemplo de ello son los rayos catódicos los rayos de las tormentas eléctricas. Recordemos que para la fecha no se habían descubierto las ondas hertzianas y el uso de la electricidad estaba en una fase de inicio en sus aplicaciones. Aclaremos que la luz como tal ha existido y por lo tanto su identificación como ondas electromagnéticas no se había dilucidado como tales por el desconocimiento e identificación como ondas electromagnéticas.

Hertz, en 1888, logró producir ondas por medios exclusivamente eléctricos y, a su vez, demostrar que estas ondas poseen todas las características de la luz visible, con la única diferencia de que las longitudes de sus ondas son manifiestamente mayores. Ello, deja en evidencia que las ondas electromagnéticas se dejan refractar, reflejar y polarizar, y que su velocidad de propagación es igual a la de la luz. La propuesta de Maxwell quedaba confirmada: ¡la existencia de las ondas electromagnéticas era una realidad inequívoca! Establecido lo anterior, sobre la factibilidad de transmitir oscilaciones eléctricas en sistemas inalámbricos, se abrían las compuertas para que se produjera el desarrollo de una multiplicidad de inventivas que han jugado un rol significativo en la evolución de la naturaleza humana contemporánea. Recordemos que si bien electricidad y electromagnetismo están íntimamente correlacionados, no son lo mismo.

La electricidad puede convertirse en onda electromagnética que viaja por el espacio y a su vez las ondas electromagnéticas pueden convertirse en

corrientes eléctricas cuando tocan un metal ó sustancia química por el fenómeno que estudiaremos más adelante y que conocemos como fenómeno **fotoeléctrico**. Un ejemplo de lo anterior es una antena de radio con su centro de emisión y lo contrario es una antena receptora de ondas como en nuestros receptores de teléfonos celulares.

Pero las investigaciones de Maxwell y Hertz no sólo se limitaron al ámbito de las utilidades prácticas, sino que también trajeron con ellas importantes consecuencias teóricas. Todas las radiaciones se revelaron de la misma índole física, diferenciándose solamente en la longitud de onda en la cual se producen. Su escala comienza con las largas ondas hertzianas y, pasando por la luz visible, se llegan a la de los rayos ultravioletas, los rayos X, los radiactivos, y los rayos cósmicos.

Con ello se confirma que Luz no es solo lo visible sino lo invisible en un sentido estricto del espectro, y que lo visible es solo una pequeña franja de ese amplio espectro electromagnético. Igualmente podemos concluir que las ondas electromagnéticas tienen energías diferentes siendo menores las de ondas largas y frecuencias pequeñas (a frecuencias altas ondas más pequeñas).

Continuando con nuestra historia, la teoría electromagnética de Maxwell, pese a su belleza, comporta debilidades, ya que deja sin explicación fenómenos tan evidentes como la absorción o emisión de ondas; el fotoeléctrico, y la emisión de luz por cuerpos incandescentes. En consecuencia, pasado el entusiasmo inicial, fue necesario para los físicos, como lo hizo Planck en 1900, retomar la teoría corpuscular. Pero la salida al dilema que presentaban las diferentes teorías sobre la naturaleza de la luz, empezó a tomar forma en 1895 en la mente de un estudiante de dieciséis años, Albert Einstein, que en el año 1905, en un ensayo publicado en el prestigioso periódico alemán Anales de la física, abre el camino para eliminar la dicotomía que existía sobre las consideraciones que se hacían sobre la luz al introducir el principio que más tarde se haría famoso como relatividad.

El efecto fotoeléctrico fue descubierto por Max Karl Ernest Ludwig Plank en 1887 y consiste en la emisión de electrones que es incidido por la franja de luz visible, electrones cuya energía de salida depende de la longitud de onda de la radiación electromagnética incidente.

Por ello dentro del conocimiento actual la radiación violeta y ultravioleta con longitudes de onda pequeña es más susceptible de liberar electrones con mayor energía que los que inciden con menor longitud de onda, como el rojo e infrarrojo. Aclaremos que todo el espectro electromagnético es susceptible de liberar electrones, solo que la energía en ellos contenida es menor en la franja por debajo del infrarrojo y mayor en las ondas por encima del ultravioleta. Un ejemplo de ello son las microondas de los hoy populares hornos de microondas.

Por lo tanto podemos deducir en el conocimiento actual que también las radiaciones por debajo del infrarrojo con longitudes de onda grandes también pueden liberar electrones pero con baja energía cuyo magnificación da origen a los transductores de las ondas de radio en todo el sistema de telecomunicaciones en audio y video. El efecto fotoeléctrico dentro del umbral visible es el que nos interesa por ser el aprovechable en la generación de energía eléctrica en nuestra futura investigación para la producción de celdas fotoeléctricas ó fotovoltaicas. Indudablemente el efecto fotoeléctrico incluiría ondas electromagnéticas no visibles.

#### **4.1.1. Ecuaciones de Maxwell**

Las ecuaciones de Maxwell como ahora las conocemos son las cuatro citadas anteriormente y a manera de resumen se pueden encontrar en la siguiente tabla:

Nombre	Forma diferencial	Forma integral
Ley de Gauss:	$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{q}{\epsilon_0}$
Ley de Gauss para el campo magnético:	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$
Ley de Faraday:	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$
Ley de Ampère generalizada:	$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$	$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{j} \cdot d\vec{s} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{s}$

Tabla No. 1. Ecuaciones de Maxwell

Estas cuatro ecuaciones junto con la [fuerza de Lorentz](#) son las que explican cualquier tipo de fenómeno electromagnético. Una fortaleza de las ecuaciones de Maxwell es que permanecen invariantes en cualquier sistema de unidades, salvo de pequeñas excepciones, y que son compatibles con la [relatividad](#)

[especial](#) y [general](#). Además Maxwell descubrió que la cantidad  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$  era simplemente la [velocidad de la luz](#) en el vacío, por lo que la luz es una forma de [radiación electromagnética](#). Los valores aceptados actualmente para la velocidad de la luz, la permitividad y la permeabilidad magnética se resumen en la siguiente tabla:

Símbolo	Nombre	Valor numérico	Unidad de medida SI	Tipo
$c$	Velocidad de la luz en el vacío	$2.998 \times 10^8$	metros por segundo	definido
$\epsilon_0$	Permitividad	$8.854 \times 10^{-12}$	faradios por metro	derivado
$\mu_0$	Permeabilidad magnética	$4\pi \times 10^{-7}$	henrios por metro	definido

**Tabla No. 2** Ecuaciones de Velocidad de la luz, Permitividad y Permeabilidad

De todo lo anterior y de acuerdo al conocimiento actual la luz es, una onda, más precisamente una oscilación electromagnética, que se propaga en el vacío o en un medio transparente, cuya longitud de onda es muy pequeña, unos 6.500 Å para la luz roja y unos 4.500 Å para la luz azul. (1Å = un Angstrom, corresponde a una décima de milimicra, esto es, una diez millonésima de milímetro).

Por otra parte, la luz es una parte insignificante del espectro electromagnético. Más allá del rojo está la radiación infrarroja; con longitudes de ondas aún más largas la zona del infrarrojo lejano, las microondas de radio, y luego toda la gama de las ondas de radio, desde las ondas centimétricas, métricas, decamétricas, hasta las ondas largas de radiocomunicación, con longitudes de cientos de metros y más. Por ejemplo, el dial de amplitud modulada, la llamada onda media, va desde 550 y 1.600 kilociclos por segundo, que corresponde a una longitud de onda de 545 a 188 metros, respectivamente.

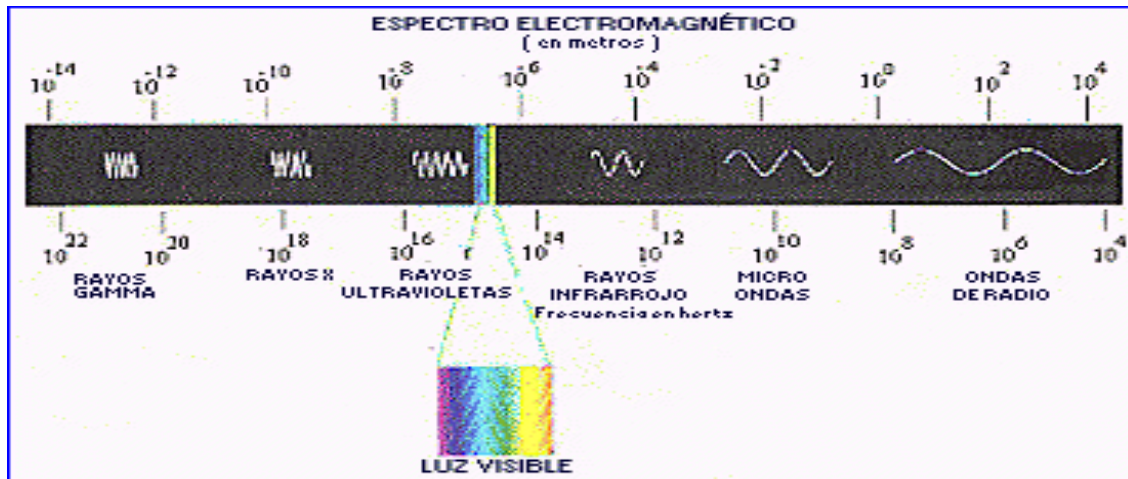


Figura No.3 Espectro Electromagnético.

Espectro electromagnético.- La región correspondiente a la luz es una diminuta ventana en todo el espectro. La atmósfera terrestre sólo es transparente en la región óptica y de ondas de radio. El infrarrojo se puede observar desde gran altura con globos o satélites, al igual que los rayos  $\gamma$ , rayos X, y la radiación ultravioleta. El espectro electromagnético que viaja a nuestro planeta desde el sol es mucho más amplio de lo percibido por nuestro órgano visual.

El incluye ondas calóricas en el infrarrojo y ondas de alta energía culpables de quemaduras de la piel como lo es la radiación ultravioleta. Estas ondas son la esencia misma de la vida, porque las plantas productoras del alimento de todos los seres vivos, se valen de ellas para su crecimiento, reproducción y producción de frutos a través del fenómeno fotoeléctrico ó mejor llamado fenómeno fotosintético que no es algo diferente al fenómeno fotoeléctrico.

En física, se identifica a las ondas por lo que se llama longitud de onda, distancia entre dos máximos ó dos mínimos; amplitud que es la altura misma de la onda y por su frecuencia, número de oscilaciones por segundo, que se cuenta en un punto, y se mide en ciclos por segundo (oscilaciones por segundo). El producto de ambas cantidades es igual a la velocidad de propagación de la onda.

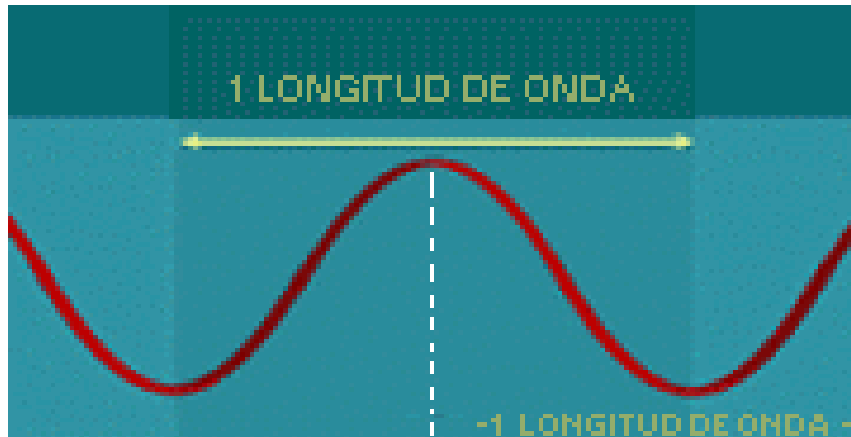


Figura No.4 Representación de una onda.

Representación de una onda. Se llama longitud de onda a la distancia entre dos "valles" o dos "montes".

En el otro extremos del espectro electromagnético se encuentra la radiación ultravioleta (convencionalmente a la derecha del espectro electromagnético), luego los rayos X y a longitudes de onda muy diminutas los rayos gamma.

La atmósfera terrestre es transparente sólo en la región óptica, algo en el infrarrojo y en la zona de ondas de radio. Por ello, es que la mayor información que hemos obtenido sobre el universo ha sido a través de la ventana óptica, aunque en las últimas décadas la radioastronomía ha venido jugando un rol sustancial en la entrega de conocimientos sobre el cosmos, proporcionando datos cruciales. Observaciones en el ultravioleta, rayos X y gamma, como así también de parte del infrarrojo, hay que efectuarlas con instrumentos ubicados fuera de la atmósfera de la Tierra.

Sin embargo, es posible también obtener resultados en el infrarrojo con instrumentación alojada en observatorios terrestres empotrados a gran altura sobre el nivel del mar o con tecnología puesta en aviones o globos que se eleven por sobre la baja atmósfera, que contiene la mayor parte del vapor de agua, que es la principal causa de la absorción atmosférica en el infrarrojo.

Para finales del siglo XIX el efecto fotoeléctrico y la emisión de luz por metales incandescentes no se podía explicar por la teoría ondulatoria por lo que se hizo necesario retomar la teoría corpuscular. Los trabajos sobre el proceso de absorción y emisión de energía por parte de la materia sólo se podían explicar si uno asumía que la luz se componía de partículas. Entonces la ciencia llegó a un punto muy complicado e incomodo: se conocían muchos efectos de la luz, sin embargo, unos sólo se podían explicar si se consideraba que la luz era una onda, y otros sólo se podían explicar si la luz era una partícula. Sin embargo ésta partícula no era considerada como un elemento material sino como una “partícula de energía” empaquetada.

El intento de explicar esta dualidad onda-partícula, impulsó el desarrollo de la física cuántica durante el siglo XX pero fue Max Planck quien descubrió que ciertas características de la forma en que la luz es emitida y absorbida por un cuerpo, solo se podrían explicar si la radiación producida por el cuerpo emisor ocurriera en paquetes de cierto tamaño fijo, a los que él denominó cuantos de luz.

Ella dio origen a la física cuántica que explica dentro de una formulación matemática todos los fenómenos que ocurrían dentro de ese microcosmos, como lo es el átomo. El primer científico en emitir en concepto de partícula para explicar el fenómeno fotoeléctrico fue Max Plank. Su teoría en un primer momento fue considerada como un artificio matemático, pero que en realidad la luz era una onda, ni siquiera Planck consideraba que la misma tuviera algún significado real, era algo así como cerrar los números. El primero en tener en cuenta esta idea de la luz como partícula fue Einstein aunque aún era muy joven y no tenido en cuenta por la comunidad científica. El utilizó este concepto para explicar un fenómeno conocido como Efecto Fotoeléctrico, en una revista escrito en 1905.

Pasaron muchos años, incluso con científicos intentando demostrar que este concepto era erróneo (Robert Millikan), para que finalmente fuera aceptado como válido y así Einstein recibió por su trabajo el premio Nobel en 1921. El

concepto actual es que si bien el fotón es una partícula ella no puede ser definida como un elemento de masa, sino que es la condensación de energía con comportamiento físico de masa.

Definimos que el único elemento presente en la naturaleza es la ENERGÍA con la condensación de la misma que viene a constituir la masa. Por ello la energía contenida en la estructura atómica es tan alta por que la condensación de ella implica que sus valores sean muy altos. De una manera práctica lo vemos en el fenómeno de fisión atómica en la cual es liberada una gran cantidad de energía sin que ello implique la liberación de la energía contenida en los elementos constitutivos de los átomos (neutrones, protones, electrones).

#### **4.1.2. Longitud de Onda de De Broglie**

En 1924, Louis de Broglie, plantea la posibilidad de asociar una función de onda a las partículas. El razonamiento lo hace por criterios de simetría con respecto a la necesidad de asignar propiedades corpusculares a la radiación electromagnética, cuya conveniencia es el resultado de analizar experiencias como por ejemplo los efectos fotoeléctricos y Compton (cambio de la longitud de onda cuando una onda de rayos X choca con un electrón, liberando parte de su energía y cambiando su longitud de onda a una mayor por consiguiente una de menor energía).

La hipótesis de Broglie adquiere fuerza con los resultados del experimento de Davisson y Germer, entre otros, en los que un haz de electrones acelerados produce un patrón de interferencia, resultado típicamente ondulatorio, al ser dispersado por un cristal de Níquel. Obviamente era necesario confirmar experimentalmente la existencia de las ondas de De-Broglie. A Davisson y Germer, quienes estudiaban las superficies pulidas de níquel con la ayuda de un haz de electrones, les ocurrió un "afortunado" accidente cuando se les rompió uno de los recipientes de equipo de vacío. En el suceso el níquel se

cristalizo de tal manera que conformó un dispositivo de difracción adecuado para las ondas de De-Broglie. Estos dos físicos norteamericanos publicaron sus resultados sin modificar y quienes estaban al tanto de la existencia de las ondas de De-Broglie pudieron identificarlas en los resultados de Davisson y Germer. Posteriormente G. P. Thomson, hijo de J. J. Thomson en la Universidad de Cambridge realizó un experimento con el fin específico de comprobar experimentalmente el comportamiento ondulatorio de los electrones. También en el Japón el físico Kikuchi realizó comprobaciones experimentales similares. No resulta pues sorprendente, que las firmas japonesas hayan dominado durante el siglo pasado el mercado de los microscopios electrónicos, cuyo fundamento físico esta precisamente en el comportamiento ondulatorio de los electrones.

Las conclusiones de los experimentos de difracción de haces de partículas, y de interpretación del efecto Compton, así como otras experiencias con radiación electromagnética, hacen que nos cuestionemos sobre la "verdadera" naturaleza de la materia y de las radiaciones, ¿son ondas o partículas?. El principio de Complementariedad de Niels Bohr, nos indica la dualidad de ondas y partículas, siendo el experimento planteado el que determine el modelo a utilizar.

En vista de la necesidad de asociar una función de onda a las partículas, nos induce a plantear la posible interpretación física de la misma. Los conocimientos previos de campos electromagnéticos, unidos a la interpretación corpuscular de la radiación electromagnética, indujeron a Albert Einstein a interpretar el cuadrado de la amplitud del campo eléctrico como una medida de la densidad de fotones de un haz, por tanto, la densidad de partículas de un haz podría asociarse al cuadrado de la amplitud de la función de onda de materia. Sin embargo, el significado de la función de ondas de una única partícula no queda claro. Max Born, sugiere que en ese caso la interpretación es la de una densidad de probabilidad de presencia de la partícula entorno a

una posición determinada del espacio y en un instante de tiempo. Queda de esta forma asociada la función de onda a una probabilidad, concepto contrapuesto, en cierta medida, al determinismo asociado a la "posición espacial" de la física clásica.

Haciendo uso, una vez más, de los conocimientos del electromagnetismo intentaremos representar las partículas por medio de ondas armónicas, u ondas planas. Sin embargo la interpretación de Born conduce a una total "deslocalización" espacial para éstas partículas, tendremos por tanto, que introducir paquetes de ondas, es decir superposición de ondas planas, para poder limitar la deslocalización de la partícula a una zona de dimensiones finitas. Ahora bien, matemáticamente, para construir un paquete de ondas de dimensiones espaciales finitas, necesitamos un rango de vectores de ondas distintos. Si el paquete es una representación de la onda de materia concluiremos que cuanto más localizada esté una partícula, más amplio será el espectro de vectores de ondas, es decir de cantidades de movimiento, necesario. Este es el concepto básico contenido en el Principio de Indeterminación de Heisemberg. Éste principio destruye por completo el determinismo clásico ya que impide la definición, con absoluta precisión, de las condiciones iniciales de un sistema físico, premisa en que se basa la supuesta posibilidad de predecir, de nuevo con absoluta precisión según la física clásica, la evolución futura del sistema.

Luis de Broglie fue quien señaló que las partículas poseían no sólo características de tales sino también de ondas, lo que llevó al señalamiento jocoso de que los electrones se comportaban como partículas los lunes, miércoles y viernes y como ondas los martes y jueves. Ya se conocía, gracias a Einstein, que el fotón podía ser descrito por su masa en reposo y por su frecuencia lo que llevó a relacionar el momento del fotón (característica de partícula) con la frecuencia (característica de onda), y a de Broglie a proponer que esta asociación era característica de todas las partículas, no sólo del fotón.

De esta asociación entre partículas y ondas es que surge luego la teoría ondulatoria de Schrödinger, cuyo objeto no será tema de la presente monografía.

## 4.2. CONTEXTO HISTÓRICO

Al comienzo del siglo XX se había comprobado que la luz presentaba una dualidad onda corpúsculo, es decir, la luz se podía manifestar según las circunstancias como partícula (fotón en el efecto fotoeléctrico), o como onda electromagnética en la interferencia luminosa.

En 1923 Louis-Victor de Broglie propuso generalizar esta dualidad a todas las partículas conocidas. Propuso la hipótesis, paradójica en su momento, de que a toda partícula clásica microscópica se le puede asignar una onda, lo cual se comprobó experimentalmente en 1927 cuando se observó la difracción de electrones. Por analogía con los fotones, De Broglie asocia a cada partícula libre con energía  $E$  y cantidad de movimiento  $p$  una frecuencia  $\nu$  y una longitud de onda  $\lambda$ :

$$\begin{cases} E = h\nu \\ p = h/\lambda \end{cases}$$

La comprobación experimental hecha por Clinton Davisson y Lester Germer mostró que la longitud de onda asociada a los electrones medida en la difracción según la fórmula de Bragg se correspondía con la longitud de onda predicha por la fórmula de De Broglie. Obviamente era necesario confirmar experimentalmente la existencia de las ondas de De-Broglie.

A Davisson y Germer, quienes estudiaban las superficies pulidas de níquel con la ayuda de un haz de electrones, les ocurrió un "afortunado" accidente cuando se les rompió uno de los recipientes de equipo de vacío. En el suceso el níquel se cristalizó de tal manera que conformó un dispositivo de difracción adecuado para las ondas de De-Broglie. Estos dos físicos norteamericanos publicaron

sus resultados sin modificar y quienes estaban al tanto de la existencia de las ondas de De-Broglie pudieron identificarlas en los resultados de Davisson y Germer. Posteriormente G. P. Thompson, hijo de J. J. Thompson en la Universidad de Cambridge realizó un experimento con el fin específico de comprobar experimentalmente el comportamiento ondulatorio de los electrones. También en el Japón el físico Kikuchi realizó comprobaciones experimentales similares. No resulta pues sorprendente, que las firmas japonesas hayan dominado durante el siglo pasado el mercado de los microscopios electrónicos, cuyo fundamento físico esta precisamente en el comportamiento ondulatorio de los electrones.

Esa predicción llevó a Schrödinger a tratar de escribir una ecuación para la onda asociada de De Broglie que para escalas macroscópicas se redujera a la ecuación de la mecánica clásica de la partícula. De esta asociación entre partículas y ondas es que surge luego la teoría ondulatoria de Schrödinger, cuyo objeto no será tema de la presente monografía.

### **4.3. MODELO ONDULATORIO DE SCHRODINGER**

En 1925, el físico alemán Erwin Schrodinger sorprendió al mundo científico con la publicación de su teoría de la mecánica ondulatoria, en la que el modelo del átomo era resuelto como una onda. Schrödinger, convencido de la necesidad de un nuevo modelo del átomo, consideró la propuesta de Louis de Broglie de asociar una onda al electrón. Él estaba familiarizado con los experimentos e información disponible acerca del átomo. Los espectros copistas habían publicado sus trabajos mostrando que distintas líneas espectrales que caracterizaban a los átomos. Bohr y otros enfatizaron que cualquier modelo del átomo debería de incorporar las ideas cuánticas de Planck, es decir, niveles de energía discretos (cuantizados).

Bohr, Sommerfeld y Zeeman habían mostrado como este requisito podía ser resuelto introduciendo ARBITRARIAMENTE una serie de enteros, llamados

números cuánticos. Schrödinger reflexionó sobre estos hechos y comprendió que las ondas estacionarias asociadas con objetos vibrantes, tales como la cuerda de una guitarra o un tambor, podían ser expresados matemáticamente por ecuaciones en las que una serie de enteros aparecía de una manera natural y necesaria. Solo se necesitaba encontrar un buen objeto vibrante como modelo, las ondas estacionarias para este modelo deberían de tener ecuaciones que contendrían una serie de enteros, que de alguna manera representarían a los electrones.

Asombrosamente, encontró el modelo requerido en los trabajos matemáticos de William Hamilton, el genio matemático del siglo XIX. El objeto vibrante era un planeta inundado –un océano de profundidad uniforme que cubría completamente un planeta esférico-Evidentemente, Hamilton trató de explicar matemáticamente la forma como la luna perturba las mareas de los océanos en forma periódica e idealizó el problema para escribir la solución matemática completa de las vibraciones.

Schrödinger reconoció inmediatamente que la ecuación de onda para este modelo eran las ecuaciones que podían describir el comportamiento de los electrones en el átomo.

Para apreciar la forma en que surgen estos enteros en un tratamiento matemático de las ondas, alguna familiaridad con los aspectos más elementales del movimiento ondulatorio es requerida, así el vibrar de una cuerda de guitarra puede describirse usando la trigonometría:

$$Y = A \text{ sen } n (x/l)$$

Donde Y representa la altura o amplitud, x la posición a un punto, l la longitud de la cuerda, A es una constante que describe el modo fundamental de vibración, finalmente n es un número entero que tiene el valor de n = 1 para el primer sobre tono; n = 2 para el segundo sobre tono; n = 3 para el tercer sobre tono, etc.

Claramente esta consideración elemental de una cuerda vibrando nos revela una situación impactante, la aparición de una serie de enteros;  $n= 1, 2, 3, \dots$ , en la ecuación anterior. Schrödinger, un físico competente, estaba completamente familiarizado con los aspectos matemáticos de los cuerpos vibrantes, sabía que una serie similar de enteros debería surgir del tratamiento matemático del planeta inundado. Reconocía que eran las condiciones de frontera las que generaban la serie de enteros. Para una cuerda, la ecuación de movimiento es:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

Donde  $u$  es la velocidad de onda de la cuerda y  $t$  el tiempo. Cuando consideramos la vibración de un objeto más complicado como es el caso de un tambor o de un planeta inundado, encontramos que la teoría acústica proporciona una ecuación de onda similar que aquella descrita para una cuerda. Entonces en cada caso la geometría real del objeto vibrante llevará a describir ondas estacionarias y sus sobre tonos. Estas ecuaciones están relacionadas a través de números enteros.

Estableciendo las ecuaciones de onda para un átomo, Schrödinger primero escribió la ecuación general para el movimiento tridimensional:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}$$

En esta ecuación la letra griega,  $\Psi$  (psi) es usada para representar la amplitud de la onda,  $u$  la velocidad de la onda a través del espacio  $x, y, z$ , que son las coordenadas cartesianas. Alternativamente se podría emplear coordenadas esféricas. Resolviendo la ecuación únicamente en su parte espacial independiente del tiempo toma la forma: (Ver las ecuaciones)

Esta ecuación describe el movimiento de los electrones en el átomo y representa su energía potencial electrostática en el campo producido por el

núcleo. La solución de esta ecuación corresponde a las vibraciones fundamentales del átomo, donde el electrón tiene una longitud de onda,  $\lambda$ . Schrödinger reconoció que la solución de su ecuación de onda,  $\Psi$ , en tres dimensiones (x, y, z) exigía la presencia de tres números cuánticos (n, l, m) y estos resultados de las condiciones de frontera y de la propia geometría del átomo.

#### **4.3.1. Ecuación de Onda de Schrodinger**

La ecuación de onda de Schrödinger desarrollada en 1926, tiene como finalidad describir todos los procesos que ocurren a nivel molecular, atómico o nuclear. En especial nos puede dar información sobre los siguientes casos:

- a) Estados energéticos tanto atómicos como moleculares.
  - b). Distribución de los electrones alrededor del núcleo.
  - c) Orientación de los electrones en un campo magnético.
  - d) Posibles transiciones energéticas de los electrones.
  - e) Espectros de emisión atómica.
  - f) Espectros de absorción (U.V., Visible, I.R.)
  - g) Movimientos vibracionales y rotacionales de átomos y moléculas.
- También nos ayuda a describir ciertos fenómenos atómicos como:

- La superfluidez.
- La conductividad y superconductividad.
- Las propiedades ferro magnéticas.
- Los calores específicos.
- La formación del enlace químico.

Y lo que es más valioso aún, proporciona la capacidad de predicción que en una teoría y en toda la Ciencia es lo más importante. Es así como la tecnología

actual se ha desarrollado gracias al poder de predicción de distintas teorías en la cual la mecánica cuántica ocupa un lugar especial.

La ecuación de Schrödinger como cualquier ecuación matemática está sujeta a restricciones y entre otras cosas debe cumplir con los requisitos para ser consistente:

- La solución de la ecuación de onda  $\Psi$  debe ser finita para todos los valores de las coordenadas.
- Dichas soluciones de  $\Psi$  deben poseer valores únicos para cada serie de coordenadas.
- La función de onda  $\Psi$  debe ser continua y disminuir rápidamente a cero cuando  $r$  tiende a infinito.
- La posibilidad de encontrar al electrón en todo el espacio debe ser igual a uno.

Quizás el punto 4 sea lo que diferencia a la teoría de Schrödinger con la de Bohr. Según Bohr, un electrón en el estado fundamental del hidrógeno debe ocupar una órbita circular de radio,  $r = 0.529\text{Å}$  y en ningún otro punto del espacio. Para Schrödinger  $r = 0.529\text{Å}$  solo es un conjunto de puntos en el espacio donde la probabilidad de encontrar al electrón es máxima, pero nada impide que se encuentre a otra distancia del núcleo.

Por otro lado la teoría de Bohr se hallaba en seria contradicción con los principios de los cuales partía y era incapaz de explicar muchos hechos experimentales; en contraste, en la teoría de Schrödinger todos los resultados podían ser derivados de suposiciones fundamentales de la nueva física.

## 5. NATURALEZA DE LA LUZ

"El estudio de la luz ha derivado en logros de la intuición, la imaginación y el ingenio que no tienen parangón en ningún campo de la actividad mental; también ilustra mejor que ninguna otra rama de la física las vicisitudes de las teorías." *Sir J. J. Thomson, 1925.*

Creando nuestro propio marco teórico para entender en fenómeno fotovoltaico que nos lleve a conceptos claros sobre la naturaleza de la luz, sus propiedades ópticas y físicas, tenemos que empezar por entender con la suficiente claridad todo lo concerniente a ella. Siempre que se estudia una ciencia es importante conocer el desenvolvimiento de la misma a través del tiempo, ubicándonos en cada periodo, sin ser críticos, porque los periodos del conocimiento siempre han sido, son y serán diferentes.

La luz en su definición clásica es todo aquello que se puede ver con nuestro órgano visual, la vista, de los seres vivos que lo posean. En un concepto moderno Luz es la pequeña franja del espectro electromagnético que puede impresionar nuestro órgano visual. Sin embargo de una manera más generalizada, se puede concebir por la naturaleza misma del espectro electromagnético, que son aquellos fotones con longitudes de onda, frecuencia y energía capaces de producir la sensación visual en nuestro órgano visual. Dadas las características comunes del espectro electromagnético se puede afirmar que LUZ es todo él, siendo esa pequeña franja de la luz visible la que desde la antigüedad hasta el presente entendemos como LUZ.

### 5.1. HISTORIA

A través de los tiempos la naturaleza de la luz ha tenido diversas interpretaciones que se han ido desarrollando hasta llegar a la actual y moderna interpretación. Las primeras aportaciones conocidas son las de Lepucio (450 A.c.) perteneciente a la escuela atomista, que consideraban que

los cuerpos eran focos que desprendían imágenes, algo así como halos oscuros, que eran captados por los ojos y de éstos pasaban al alma, que los interpretaba. Concepto antiguo pero cercano al conocimiento actual, pero con ello se analizaba el fenómeno sin entrar en la fundamentación del cómo y porque.

Los partidarios de la escuela pitagórica afirmaban justamente lo contrario: no eran los objetos los focos emisores, sino los ojos. Su máximo representante fue Apuleyo (400 a.C.); haciendo un símil con el sentido del tacto, suponían que el ojo palpaba los objetos mediante una fuerza invisible a modo de tentáculo, y al explorar los objetos determinaba sus dimensiones y color. Ello sin embargo estaba muy lejos de la realidad, pudiéndose refutar de una manera fácil que el fenómeno visual venía de una energía externa al ojo y no interna, por la inexistencia del fenómeno en la oscuridad, en ausencia de una fuente luminosa.

Dentro de la misma escuela, Euclides (300 a.C.) introdujo el concepto de rayo de luz emitido por el ojo, que se propagaba en línea recta hasta alcanzar el objeto.

Después de este periodo no aparecen más relatos sobre la naturaleza de la luz, hasta después de trece siglos en que el árabe Ajasen Basora (965-1039) opinara que la luz era un proyectil que provenía del Sol ó de una fuente luminosa diferente, rebotaba en los objetos y de éstos al ojo. Este concepto sigue siendo válido en nuestros tiempos, pero la naturaleza misma de fenómeno aun no se había dilucidado para entonces.

De esta manera los griegos y los egipcios se abocaron a la solución de estos problemas sin encontrar respuestas adecuadas. Para el inicio de los siglos XV al XVII, con los avances realizados por la ciencia y la técnica, surgieron muchos matemáticos y filósofos que produjeron importantes trabajos sobre la luz y los fenómenos luminosos.

Para finales del siglo XVI empezaban a conocerse en el campo de la ciencia los fenómenos físicos de la luz como la refracción. Posteriormente es Isaac Newton quien ya dentro del campo de la ciencia emite la primera hipótesis científica de la naturaleza de la luz, naciendo con ella el primero modelo de la teoría corpuscular.

## **5.2. MODELO CORPUSCULAR.**

Se la conoce como teoría corpuscular o de la emisión. A finales del siglo XVI, con el uso de lentes e instrumentos ópticos, empezaron a experimentar por parte del holandés Willebrord Snell, quién en 1620 descubrió experimentalmente la ley de la refracción, aunque no fue conocida hasta que, en 1638, René Descartes (1596-1650) publicó su tratado: Óptica. Descartes fue el primer gran defensor de la teoría corpuscular, diciendo que la luz se comportaba como un proyectil que se propulsaba a velocidad infinita, sin especificar absolutamente nada sobre su naturaleza, pero rechazando que cierta materia fuera de los objetos al ojo.

Como vemos en este periodo del tiempo, se consideraba que la velocidad de la luz era no solo instantánea sino infinita, pero dada alguna claridad que lo que impactaba en el ojo no era materia sino algo inmaterial. La reflexión de la luz junto a la refracción fue estudiada por Isaac Newton (1642-17 del calendario Gregoriano). Sus consideraciones apuntaban dentro de la mecánica clásica, creada por él, a que la luz se comportaba como materia en forma de corpúsculo, siendo éstos muy livianos y se definía que su trayectoria era rectilínea.

Para la época su teoría fue aceptada en el mundo científico dada las explicaciones que se correspondían con la mecánica clásica. La refracción de la luz la explicaba como un corpúsculo que viajaba a una velocidad determinada y que al cambiar de un medio a otro más denso su velocidad

aumentaba, siendo influenciada por la gravedad por lo tanto el Angulo de refracción era menor que el ángulo de incidencia.

En este concepto hubo un error por cuanto la velocidad de la luz es menor en un medio de mayor densidad, como posteriormente fue descubierto lo que conllevó a la no aceptación de la teoría de Newton.

Como toda teoría física es válida en tanto y en cuanto pueda explicar los fenómenos conocidos hasta el momento, en forma satisfactoria Newton explicó que la variación de intensidad de la fuente luminosa es proporcional a la cantidad de corpúsculos que emite en determinado tiempo.

Newton explicaba la reflexión de la luz consiste en la incidencia de dichos corpúsculos en forma oblicua en una superficie espejada, de manera que al llegar a ella varía de dirección pero siempre en el mismo medio.

La igualdad del ángulo de incidencia con el de reflexión se debe a la circunstancia de que tanto antes como después de la reflexión los corpúsculos conservan la misma velocidad (debido a que permanece en el mismo medio).

El fenómeno de la birrefringencia del espato de Islandia descubierto por el danés Bartholinus en 1669, quiso ser justificado por Newton suponiendo que los corpúsculos del rayo podían ser rectangulares y sus propiedades variar según su orientación respecto a la dirección de la propagación.

Según lo expresado por Newton, la velocidad de la luz aumentaría en los medios de mayor densidad, lo cual contradice los resultados de los experimentos realizados años después.

Esta explicación, contradictoria con los resultados experimentales sobre la velocidad de la luz en medios más densos que el vacío, obligó al abandono de la teoría corpuscular. Sin embargo la teoría corpuscular de Newton estuvo

presente hasta mediados del siglo XIX dada el prestigio científico de Newton y porque el conocimiento no había evolucionado para entonces. Obviamente no se conocía de los efectos físicos del electromagnetismo. Para entonces fue abandonada la Teoría Corpuscular y aceptada la Teoría Ondulatoria a pasar que para el mismo periodo de Newton ya se conocía y había sido emitidas por Christian Huygens (14 de abril de 1629 - 8 de julio de 1695) fue un astrónomo, físico y matemático holandés, nacido en La Haya) En el año 1678, describe y explica lo que hoy se considera como leyes de reflexión y refracción. Define a la luz como un movimiento ondulatorio semejante al que se produce con el sonido.

Ahora, como los físicos de la época consideraban que todas las ondas requerían de algún medio físico que las transportaran en el vacío, para las ondas lumínicas se postula como medio a una materia insustancial. Lo anterior es entendible para la época por cuanto así como el sonido necesita del aire para su transmisión, se pensaba que la luz requería igualmente de un medio físico para su transporte. Se habló de una sustancia, el éter, que nadie pudo identificar por lo que esta teoría empezó a ser cuestionada.

La teoría de Huygens no fue muy considerada, fundamentalmente, y tal como ya lo mencionamos, dado al prestigio que alcanzó Newton. Pasó más de un siglo para que fuera tomada en cuenta la Teoría Ondulatoria de la luz. Los experimentos del médico inglés Thomas Young (13 de junio de 1773 – 10 de mayo, 1829) fue un científico inglés que estudió sobre los fenómenos de interferencias luminosas, y los del físico francés Auguste Jean Fresnel (10 de mayo de 1788 – 14 de julio de 1827) fue un físico francés que contribuyó significativamente a la teoría de óptica ondulatoria.

Trabajos sobre la difracción fueron decisivos para que ello ocurriera y se colocara en la tabla de estudios de los físicos sobre la luz, la propuesta realizada en el siglo XVII por Huygens. Young demostró experimentalmente el hecho paradójico que se daba en la teoría corpuscular de que la suma de dos

fuentes luminosas puede producir menos luminosidad que por separado. En una pantalla negra practica dos minúsculos agujeros muy próximos entre sí: al acercar la pantalla al ojo, la luz de un pequeño y distante foco aparece en forma de anillos alternativamente brillantes y oscuros. ¿Cómo explicar el efecto de ambos agujeros que por separado darían un campo iluminado, y combinados producen sombra en ciertas zonas? Young logra explicar que la alternancia de las franjas por la imagen de las ondas acuáticas pero que de todas maneras requieren de un medio físico para su propagación, abordándose la idea que la luz tenía un estado vibratorio apareciendo nuevamente esa materia insustancial e invisible, el éter.

De esta manera se resucita el antiguo concepto de éter. Si las ondas suman sus crestas hallándose en concordancia de fase, la vibración resultante será intensa. Por el contrario, si la cresta de una onda coincide con el valle de la otra, la vibración resultante será nula. Deducción simple imputada a una interferencia y se embriona la idea de la luz como estado vibratorio de una materia insustancial e invisible, el éter, al cual se le resucita.

Ahora bien, la colaboración de Auguste Fresnel para el rescate de la teoría ondulatoria de la luz estuvo dada por el aporte matemático que le dio rigor a las ideas propuestas por Young y la explicación que presentó sobre el fenómeno de la polarización al transformar el movimiento ondulatorio longitudinal, supuesto por Huygens y ratificado por Young, quien creía que las vibraciones luminosas se efectuaban en dirección paralela a la propagación de la onda luminosa, en transversales.

Pero aquí, y pese a las sagaces explicaciones que incluso rayan en las adivinanzas dadas por Fresnel, inmediatamente queda presentada una gran contradicción a esta doctrina, ya que no es posible que se pueda propagar en el éter la luz por medio de ondas transversales, debido a que éstas sólo se propagan en medios sólidos.

En su trabajo, Fresnel explica una multiplicidad de fenómenos manifestados por la luz polarizada. Observa que dos rayos polarizados ubicados en un mismo plano se interfieren, pero no lo hacen si están polarizados entre sí cuando se encuentran perpendicularmente. Este descubrimiento lo invita a pensar que en un rayo polarizado debe ocurrir algo perpendicularmente en dirección a la propagación y establece que ese algo no puede ser más que la propia vibración luminosa. La conclusión se impone: las vibraciones en la luz no pueden ser longitudinales, como Young lo propusiera, sino perpendiculares a la dirección de propagación, ES DECIR TRANSVERSALES.

Las distintas investigaciones y estudios que se realizaron sobre la naturaleza de la luz, en la época en que nos encontramos de lo que va transcurrido del relato, engendraron aspiraciones de mayores conocimientos sobre la luz. Entre ellas, se encuentra la de lograr medir la velocidad de la luz con mayor exactitud que la permitida por las observaciones astronómicas.

Hippolyte Fizeau (1819- 1896) concretó el proyecto en 1849 con un clásico experimento. Al hacer pasar la luz reflejada por dos espejos entre los intersticios de una rueda girando rápidamente, determinó la velocidad que podría tener la luz en su trayectoria, que estimó aproximadamente en 300.000 km./s. Después de Fizeau, lo siguió León Foucault (1819 – 1868) al medir la velocidad de propagación de la luz a través del agua.

Ello fue de gran interés, ya que iba a servir de criterio entre la teoría corpuscular y la ondulatoria. La primera, como señalamos, requería que la velocidad fuese mayor en el agua que en el aire; lo contrario exigía, pues, la segunda. En sus experimentos, Foucault logró comprobar, en 1851, que la velocidad de la luz cuando transcurre por el agua es inferior a la que desarrolla cuando transita por el aire. Con ello, la teoría ondulatoria adquiere cierta preeminencia sobre la corpuscular, y pavimenta el camino hacia la gran síntesis realizada por Maxwell.

### 5.3. FOTÓN

Fotón ( $\gamma$ )	
Fotones emitidos en un rayo coherente por un láser	
Clasificación	
Partícula elemental	
Bosón de gauge	
Electromagnetismo	
Propiedades	
Masa:	Nula
Carga eléctrica:	Neutra
Carga de color:	Neutra
Spin:	$1\hbar$
Vida media:	Estable
Antipartícula:	Ella misma
Interacciona con:	la Gravedad

Tabla No. 3 Datos del Fotón ( $\gamma$ )

Aunque la física moderna define al fotón como una partícula, ella no representa una partícula de masa. Es una “partícula” de energía y debemos definirla como el elemento energético componente de las ondas electromagnéticas. No es ni partícula ni onda, pero su comportamiento es dual, es decir se comporta como partícula y como onda.

Es la responsable de las manifestaciones cuánticas y por tanto del fenómeno electromagnético. Aunque en el inicio del conocimiento a principios del siglo XX, asociada al fenómeno de la luz, hoy sabemos que ella es la partícula portadora de todas las formas de radiación electromagnética, incluyendo a los rayos gamma, los rayos X, la luz ultravioleta, la luz visible, la luz infrarroja, las microondas, y las ondas de radio, es decir ella es el componente fundamental de todo el espectro electromagnético.

El fotón tiene una masa invariante cero,<sup>1</sup> y viaja en el vacío con una velocidad constante  $c$  (velocidad de la luz). Como todos los cuantos, el fotón presenta tanto propiedades corpusculares como ondulatorias ("dualidad onda-corpúsculo"). Se comporta como una onda en fenómenos como la refracción y difracción que tiene lugar en una lente, y en dos pequeñas hendiduras. Sin embargo, se comporta como una partícula cuando interacciona con la materia para transferir una cantidad fija de energía, que viene dada por la expresión

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

Donde  $h$  es la constante de Planck,  $c$  es la velocidad de la luz, y  $\lambda$  es la longitud de onda. Esto difiere de lo que ocurre con las ondas clásicas, que pueden ganar o perder cantidades arbitrarias de energía. Recordemos que las ondas típicas y que nos son familiares necesitan de un medio físico para su propagación como las ondas sonoras y las ondas de un estanque que se ha estimulado. Para la luz visible, la energía portada por un fotón es de alrededor de  $4 \times 10^{-19}$  julios; esta energía es suficiente para excitar un ojo, y además es la que se aprovecha en el fenómeno fotovoltaico para la producción de energía eléctrica.

Además de energía, los fotones llevan también asociada una cantidad de movimiento o momento lineal, y tienen una polarización. Siguen las leyes de la mecánica cuántica, lo que significa que a menudo estas propiedades no tienen un valor bien definido para un fotón dado. En su lugar se habla de las probabilidades de que tenga una cierta polarización, posición, o cantidad de movimiento. Por ejemplo, aunque un fotón puede excitar a una molécula, a menudo es imposible predecir cuál será la molécula excitada. Ello en realidad se encuentra hoy en día dentro del campo especulativo y no corresponde a una realidad científica.

La discusión sobre la naturaleza de la luz se remonta hasta la antigüedad. En el siglo XVII, Newton se inclinó por una interpretación corpuscular de la luz, mientras que sus contemporáneos Huygens y Hooke apoyaron la hipótesis de

la luz como onda. Aclaramos que en este periodo de la historia no existía ningún conocimiento de las ondas electromagnéticas que solo fueron descubiertas a finales del siglo XIX. Experimentos de interferencia, como el realizado por Young a principios del siglo XIX, confirmaron el modelo ondulatorio de la luz.

Esta teoría ondulatoria obedecía a la preexistencia de un medio físico que denominaron los físicos de ese periodo “éter”, el cual nunca fue descubierto hasta que se comprobó propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío, sin necesidad de un medio físico como aire, agua o “éter”. El modelo ondulatorio tal como lo conocemos corresponde a la transmisión de la energía por un medio físico y en el caso de las ondas electromagnéticas aunque corresponde a las características de una onda debemos suponer que el comportamiento no es exactamente igual a la de una onda física. Ello es verdad por cuanto la luz no se transmite en un medio físico.

La idea de la luz como partícula retornó con el concepto moderno de fotón, que fue desarrollado gradualmente entre 1905 y 1917 por Albert Einstein apoyándose en trabajos anteriores de Planck, en los cuales se introdujo el concepto de cuanto (se refiere a un paquete de energía, imposible de dividir expresándose siempre en unidades enteras). Con el modelo de fotón podían explicarse observaciones experimentales que no encajaban con el modelo ondulatorio clásico de la luz.

En particular, explicaba cómo la energía de la luz dependía de la frecuencia (dependencia observada en el efecto fotoeléctrico) y la capacidad de la materia y la radiación electromagnética para permanecer en equilibrio térmico. Hoy en día conocemos que las ondas electromagnéticas son portadoras de energía en múltiplos ó submúltiplos, siendo mayores portadores de energía las ondas electromagnéticas de la luz visible y valores ascendentes de frecuencia, como por ejemplo las ondas de rayos X. Sin embargo éstas últimas deben producirse con equipos especiales a diferencia de las ondas de luz del espectro visible

que nos llegan de una fuente natural como el sol y en caso de ser artificiales son producidas por medios físicos como una bombilla eléctrica.

El concepto de fotón ha llevado a avances muy importantes en física teórica y experimental y en el desarrollo de tecnologías para filtrar diferentes ondas con producción de paquetes de ondas en umbrales pequeños de bandas como el láser y en la creación de elementos fotovoltaicos para la producción de energía eléctrica.

Los fotones se aplican a muchas áreas, como la fotoquímica, el microscopio fotónico y la medición de distancias moleculares. Incluso se los ha estudiado como componentes de computadoras cuánticas y en aplicaciones sofisticadas de comunicación óptica como por ejemplo en criptografía cuántica. Además de éstas aplicaciones tenemos aplicaciones comunes como las ondas de frecuencia altas y bajas con ondas largas, cortas y muy cortas, todas ellas usadas en procesos de transmisión de datos, voz e imágenes. Igualmente las microondas de nuestros hornos son utensilios usados en nuestros hogares con ondas de frecuencias de altas contenido energético.

El fotón fue llamado originalmente por Albert Einstein<sup>3</sup> "cuanto de luz" (en alemán: *das Lichtquant*). El nombre moderno "fotón" proviene de la palabra griega  $\phi\acute{\omega}\varsigma$  (que se transcribe como *phôs*), que significa luz, y fue acuñado en 1926 por el físico Gilbert N. Lewis, quien publicó una teoría especulativa en la que los fotones no se podían "crear ni destruir". Ello indudablemente no corresponde a una realidad porque los fotones corresponden a la transformación de la energía.

Ellos se forman y en un periodo de tiempo entregan su energía ó siguen viajando por el espacio infinito formando el magma descrito por científicos como la presencia de energía en el espacio. Aunque la teoría de Lewis nunca fue aceptada —siendo contradicho en muchos experimentos— el nuevo nombre "*fotón*" fue adoptado enseguida por la mayoría de los científicos.

En física, el fotón se representa normalmente con el símbolo  $\gamma$  (la letra griega gamma). Este símbolo proviene posiblemente de los rayos gamma, descubiertos y bautizados con ese nombre en 1900 por Villard<sup>8</sup> y que resultaron ser una forma de radiación electromagnética según demostraron Rutherford y Andrade en 1914. En química e ingeniería óptica, los fotones se simbolizan habitualmente por  $h\nu$ , que representa también la energía asociada a un fotón, donde  $h$  es la constante de Planck y la letra griega  $\nu$  es la frecuencia de la partícula u onda. Con mucha menor asiduidad, el fotón también se representa por  $hf$ , siendo  $f$ , en este caso, la frecuencia.

## 5.4. PROPIEDADES FÍSICAS

### 5.4.1. Teoría de la relatividad especial

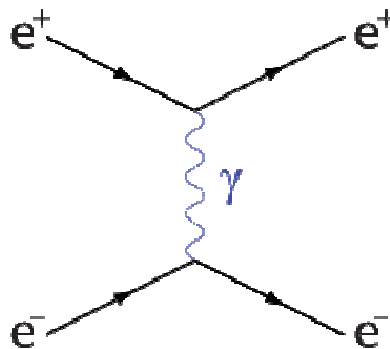


Figura No. 5 Diagrama de Feynman.

Diagrama de Feynman mostrando el intercambio de un fotón virtual (simbolizado por una línea ondulada y  $\gamma$ ) entre un positrón (electrón de signo positivo) y un electrón. Ella nos da una demostración de la emisión de energía por parte de un electrón y la recepción de ella por igualmente un electrón.

El fotón no tiene masa, tampoco posee carga eléctrica y no se desintegra espontáneamente en el vacío. Diría que es una forma de energía que viaja por el espacio y solamente por el espacio. El fotón tiene dos estados posibles de polarización que pueden describirse mediante tres parámetros continuos: las

componentes de su vector de onda, que determinan su longitud de onda  $\lambda$  y su dirección de propagación. El fotón es una forma de energía entregada por los electrones quienes la forman y a su vez la reciben. Se afirma que es la forma primaria de energía.

**5.4.2. Emisión:** Los fotones se emiten en muchos procesos naturales, por ejemplo, cuando se acelera una partícula con carga eléctrica, durante una transición molecular, atómica o nuclear a un nivel de energía más bajo, o cuando se aniquila una partícula con su antipartícula.

**5.4.3. Absorción:** Los fotones se absorben en los procesos de reversión temporal que se corresponden con los ya mencionados: por ejemplo, en la producción de pares partícula-antipartícula o en las transiciones moleculares, atómicas o nucleares a un nivel de energía más alto. Solo los electrones son capaces de formar y recibir fotones.

**5.4.4. Energía y movimiento:** En el espacio vacío, los fotones se mueven a la velocidad de la luz  $c$ , y su energía  $E$  y momento lineal  $p$  están relacionados mediante la expresión  $E = cp$ , donde  $p$  es el módulo del momento lineal. En comparación, la ecuación correspondiente a partículas con una masa  $m$  es  $E^2 = c^2p^2 + m^2c^4$ , como se demuestra en la relatividad especial.

La energía y el momento lineal de un fotón dependen únicamente de su frecuencia  $\nu$ , lo que es equivalente, de su longitud de onda  $\lambda$ .

$$E = \hbar\omega = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$
$$p = \hbar k$$

Y en consecuencia el módulo del momento lineal es:

$$p = \hbar k = \frac{h}{\lambda} = \frac{h\nu}{c}$$

Donde  $\hbar = h/2\pi$  (conocida como constante de Dirac o constante reducida de Planck);  $k$  es el vector de onda (de módulo  $k = 2\pi/\lambda$ ) y  $\omega = 2\pi\nu$  es la frecuencia angular. Debe tenerse en cuenta que  $k$  apunta en la dirección de propagación del fotón. Este tiene además momento angular de espín que no depende de la frecuencia.

Las fórmulas clásicas para la energía y el momento lineal de la radiación electromagnética pueden ser expresadas también en términos de eventos fotónicos. Por ejemplo, la presión de radiación electromagnética sobre un objeto es debida a la transferencia de momento lineal de los fotones por unidad de tiempo y unidad de superficie del objeto, ya que la presión es fuerza por unidad de superficie y la fuerza, a su vez, es la variación del momento lineal por unidad de tiempo.

#### 5.4.5. Desarrollo histórico del concepto



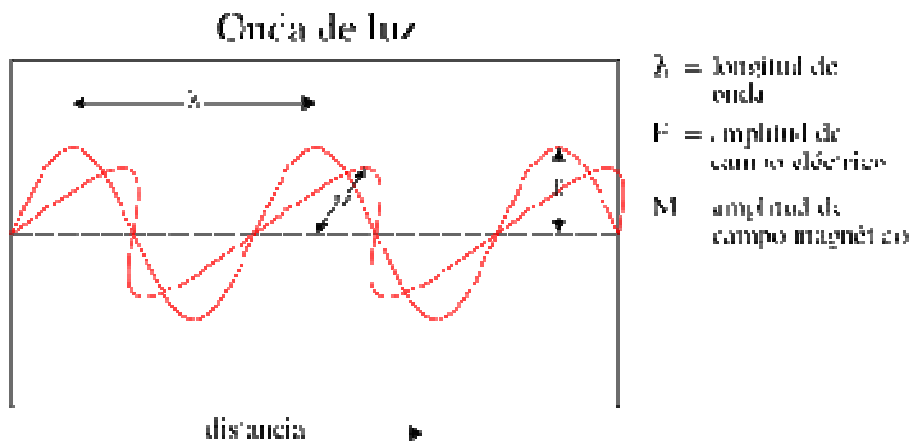
Figura No.6 Doble Rendija.

El experimento de la doble rendija de Thomas Young en 1805 demostró que la luz se comportaba como una onda, lo que ayudó a rechazar las anteriores teorías corpusculares.

En la mayoría de las teorías hasta el siglo XVIII, la luz se consideraba formada por partículas. El hecho de que los modelos de partículas no pudieran explicar fenómenos como la difracción, la refracción o la birrefringencia de la luz, hizo

que René Descartes en 1637, Robert Hooke en 1665, y Christian Huygens en 1678, propusieran teorías ondulatorias para la luz; sin embargo, los modelos de partículas permanecieron vigentes, principalmente debido a la influencia de Isaac Newton.

A principios del siglo XIX Thomas Young y August Fresnel demostraron con claridad que los fenómenos de interferencia y difracción se daban también para la luz, y para 1850 los modelos ondulatorios habían sido generalmente aceptados. En 1865, las predicciones de Maxwell sobre la naturaleza de la luz como onda Electromagnética, que serían posteriormente confirmadas experimentalmente por Heinrich Hertz en 1888, parecieron significar el final del modelo de partículas.



**Figura No.7** Onda de Luz.

En 1900, el modelo teórico de la luz de Maxwell, como dos campos oscilatorios (uno eléctrico y otro magnético) pareció completo. Sin embargo, diversas observaciones no podían explicarse según los modelos de radiación electromagnética, lo que llevó a la conclusión de que la energía lumínica estaba empaquetada en *cuantos* descritos por  $E = h\nu$ . Experimentos posteriores mostraron que estos cuantos de luz también poseían momento lineal y en consecuencia podían ser considerados partículas. Nacía así el

concepto de fotón, que llevaría a un conocimiento más profundo de los campos eléctricos y magnéticos.

Sin embargo, la teoría ondulatoria de Maxwell no explicaba todas las propiedades de la luz. Predecía que la energía de una onda luminosa dependía solamente de su intensidad, no de los átomos dependía sólo de su frecuencia, y no de su intensidad. Por ejemplo, algunas reacciones químicas eran provocadas únicamente por luz con una frecuencia mayor que un valor determinado; si la frecuencia no alcanzaba dicho valor, la reacción no se producía, independientemente de la intensidad que tuviera la luz. De forma similar, se podían extraer electrones de una placa metálica iluminándola con radiación de una frecuencia suficientemente alta (Efecto fotoeléctrico), y la energía con la que los electrones abandonaban la placa era función únicamente de la frecuencia de la luz incidente, y no de su intensidad.

La intensidad corresponde a un número alto ó bajo de emisión de fotones y ello dependerá de la energía que se le suministren a los átomos que están en un estado de reposo, pasando de éste estado a uno de mayor energía, llevando a los electrones a emisión de fotones en menor ó mayor cantidad.

Al mismo tiempo, las investigaciones realizadas a lo largo de cuatro décadas (1860-1900) por varios investigadores sobre la radiación de un cuerpo negro (estado ideal de no emisión de fotones), culminaron con la hipótesis de Max Planck, que proponía que la energía de cualquier sistema que absorbe o emite radiación electromagnética de frecuencia  $\nu$ , era un número entero de veces la energía de un cuanto:  $E = h\nu$ .

$p = h / \lambda$ , con lo que los convertía en partículas en todo el sentido de la palabra.

El momento lineal de los fotones fue observado experimentalmente por Arthur Compton, quien por este descubrimiento recibió el Premio Nobel en 1927. Él pudo comprobar que al incidir un fotón con determinada longitud de onda

(Rayos X en los experimento de Compton), los electrones que recibían ésta energía emitían fotones con longitudes de onda mayores y por lo tanto de menor energía al ser su frecuencia menor. Ello se conoció como Efecto Compton. La pregunta fundamental entonces pasó a ser: ¿cómo unificar la teoría ondulatoria de Maxwell con la naturaleza corpuscular observada experimentalmente? La respuesta a esta pregunta mantuvo ocupado a Einstein el resto de su vida, y fue resuelta dentro de la electrodinámica cuántica y de su sucesor, el modelo estándar de la física de partículas. Hoy es aceptada el modelo onda-corpúsculo.

Las predicciones de Einstein de 1905 fueron verificadas experimentalmente de varias formas dentro de las dos primeras décadas del siglo XX, como reseñó Robert Millikan en su conferencia por la obtención del Premio Nobel. Sin embargo, antes de que los experimentos de Compton mostraran que los fotones poseían un momento lineal proporcional a su frecuencia (1922), la mayoría de los físicos eran reacios a creer que la radiación electromagnética pudiera estar formada por partículas. Estas reticencias eran comprensibles dado el éxito y verosimilitud del modelo ondulatorio de Maxwell.

Únicamente el experimento de Compton sobre la dispersión de fotones por un electrón *libre* (el cual no podía tener niveles de energía, al no tener una estructura interna) fue capaz de convencer a la mayoría de los investigadores sobre el hecho de que la propia luz estuviera cuantizada. El momento lineal encontrado en el efecto Compton inclinó la balanza hacia la aceptación del modelo particular. Pero recordemos que es una partícula empaquetada de energía y no de masa, ya que el foton no tiene masa.

Unos cuantos de físicos persistieron en el desarrollo de modelos semiclásicos, en los cuales la radiación electromagnética no estaba cuantizada, aunque la materia obedecía las leyes de la mecánica cuántica. Aunque la evidencia de los fotones, a partir de los experimentos físicos y químicos, era aplastante hacia 1970, esta evidencia no podía considerarse *absolutamente* definitiva;

puesto que recaía en la interacción de la luz con la materia, una teoría de la materia suficientemente complicada podía explicar la evidencia. Sin embargo, *todas* las teorías semiclásicas fueron refutadas definitivamente en los años 70 y 80 del siglo XX por elegantes experimentos de correlación de fotones. Con ellos, se consideró probada la hipótesis de Einstein que indicaba que la cuantización era una propiedad intrínseca de la luz.

#### **5.4.6. Dualidad onda-corpúsculo y principio de incertidumbre**

Los fotones, como todos los objetos cuánticos, presentan tanto propiedades ondulatorias como corpusculares. Su naturaleza dual onda-partícula puede ser difícil de visualizar. El fotón muestra sus propiedades ondulatorias en fenómenos como la difracción y las interferencias. Por ejemplo, en un experimento de la doble rejilla, un fotón individual pasando a través de éstas incidiría en la pantalla con una distribución de probabilidad dada por sus patrones de interferencia determinados por las ecuaciones de Maxwell. Sin embargo, los experimentos confirman que el fotón *no* es un corto pulso de radiación electromagnética; no se dispersa al propagarse, ni se divide al encontrarse con un divisor de haz. La no dispersión es contraria a la teoría ondulatoria, ya que ella tiene una merma en energía al dispersarse, lo que no ocurre con los fotones que viajan a través del espacio, manteniendo su energía, demostrándose con ello la teoría corpuscular.

#### **5.4.7. Fotones y materia**

La luz que viaja a través de materia transparente, lo hace a una velocidad menor que  $c$ , la velocidad de la luz en el vacío. Por ejemplo, los fotones en su viaje desde el centro del Sol sufren tantas colisiones, que la energía radiante tarda aproximadamente un millón de años en llegar a la superficie; sin embargo, una vez en el espacio abierto, un fotón tarda únicamente 8.3 minutos en llegar a la Tierra. El factor por el cual disminuye la velocidad se conoce como índice de refracción del material. Desde la óptica clásica, la reducción de

velocidad puede explicarse a partir de la polarización eléctrica que produce la luz en la materia: la materia polarizada radia nueva luz que interfiere con la luz original para formar una onda retardada. Las diferentes frecuencias de la luz pueden viajar a través de la materia con distintas velocidades; esto se conoce como dispersión.

Los fotones pueden también ser absorbidos por núcleos, átomos o moléculas, provocando transiciones entre sus niveles de energía. Un ejemplo clásico es la transición molecular del retinal ( $C_{20}H_{28}O$ ), que es responsable de la visión, como descubrieron el premio Nobel George Wald y sus colaboradores en 1958. Como se muestra aquí, la absorción provoca una isomerización cis-trans que, en combinación con otras transiciones, dan lugar a impulsos nerviosos. La absorción de fotones puede incluso romper enlaces químicos, como en la fotólisis del cloro; éste es un tema de fotoquímica.

#### **5.4.8. Aplicaciones Tecnológicas**

Los fotones tienen muchas aplicaciones en tecnología. Se han elegido ejemplos que ilustran las aplicaciones de los fotones *per se*, y no otros dispositivos ópticos como lentes, etc. cuyo funcionamiento puede explicarse bajo una teoría clásica de la luz. El láser es una aplicación extremadamente importante. Otra de las aplicaciones es en radiofrecuencias con sus múltiples aplicaciones.

## 6. EFECTO FOTOELÉCTRICO

El Efecto Fotoeléctrico es tal vez el elemento de estudio que tiene más connotación en el presente estudio monográfico. Es un tema apasionante y entenderlo no lleva a conclusiones fáciles de lo que es el espectro electromagnético y sus interrelaciones. Todo el desarrollo tecnológico del siglo XX de una u otra forma tienen relación con él. La llegada de ondas-corpúsculos a un conductor, semiconductor, ó sustancia fotoquímica inicia en ellos una serie de cambios energéticos que definen a través de transductores fenómenos como el sonido, video, señales, y todo aquello que con nuestros sentidos si podemos interpretar.

El efecto fotoeléctrico y la inducción magnética deben de tener una íntima correlación. El espectro electromagnético cuando está confinado en alambres ó semiconductores tienen un significado, pero a su vez el mismo cuando está fuera de ellos igualmente tienen un sentido cuando sus ondas son captadas por los receptores-antenas con transductores que hacen posible su interpretación.

Antes de iniciar el estudio del efecto fotoeléctrico debemos entender con suficiente claridad el espectro electromagnético. El va desde ondas largas de varios kilómetros con frecuencias muy bajas ondas infinitamente pequeñas y obviamente con frecuencias muy pero muy altas. Un ejemplo de ello es el siguiente esquema:

En el vemos la correlación física del tamaño de la longitud de onda con respecto a elementos físicos de la naturaleza y su frecuencia. Observemos que la frecuencia se asocia siempre con la longitud de onda. Si ella es grande la frecuencia es muy pequeña e inversamente si la frecuencia es muy alta la longitud de onda es muy pequeña, del orden de nanómetros. Recordemos 1 Angstrom es diezmilmillonésima parte de un metro ( $10^{-10}$  a la menos 10) y ó sea una diezmilmillonésima parte de un milímetro y un nanómetro es la milmillonésima

parte de un metro ó sea la millonésima parte de de un milímetro. Simplificando 1 angstrom es igual a 10 nanómetros.

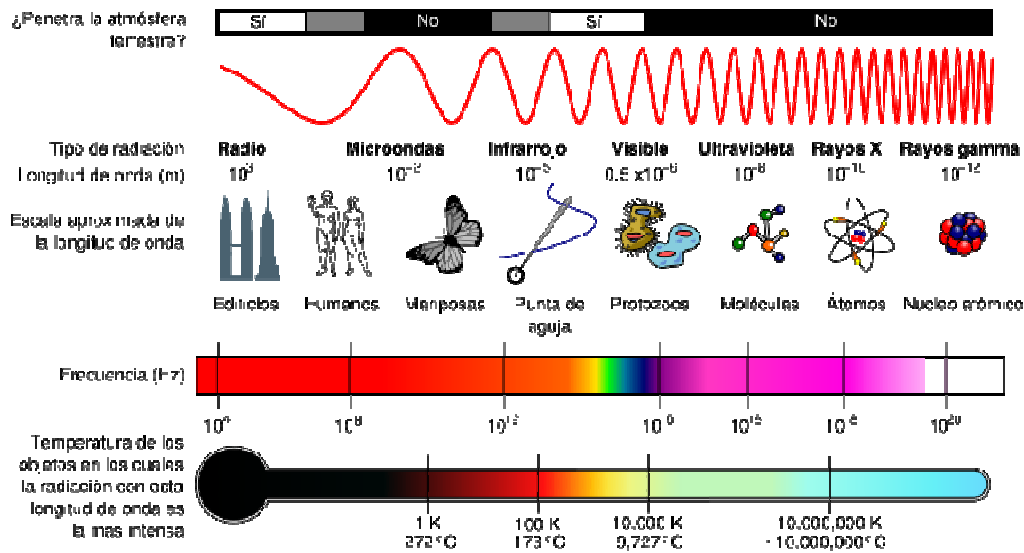


Figura No.8 Espectro Electromagnético

Submúltiplos del metro:

- decímetro (dm):  $10^{-1}$  metros.
- centímetro (cm):  $10^{-2}$  metros.
- milímetro (mm):  $10^{-3}$  metros.
- micrómetro ( $\mu\text{m}$ ):  $10^{-6}$  metros.
- nanómetro (nm):  $10^{-9}$  metros.
- angstrom ( $\text{Å}$ ):  $10^{-10}$  metros.
- picómetro (pm):  $10^{-12}$  metros.
- femtómetro o fermi (fm):  $10^{-15}$  metros.
- attómetro (am):  $10^{-18}$  metros.
- zeptómetro (zm):  $10^{-21}$  metros.
- yoctómetro (ym):  $10^{-24}$  metros.

De todo lo anterior podemos concluir que a cada frecuencia se le correlaciona una longitud de onda siendo ello una constante. Además afirmamos que las frecuencias mayores tienen mayor energía que las frecuencias menores. A mayor frecuencia mayor energía y a menor frecuencia menor energía. Vemos que dentro del espectro electromagnético todas ellas tienen importancia.

La luz visible que es la que impresiona nuestro sentido visual tiene un rango de frecuencias que van de 4.500 angstrom a 6500 angstrom. Y las ondas por debajo del infrarrojo igualmente tienen frecuencias muy altas y longitudes de onda igualmente muy pequeñas. El efecto fotoeléctrico se da en todo el umbral del espectro. Lo anterior lo afirmamos que las longitudes de onda de radiofrecuencias crean en las antenas (metales) una inducción electromagnética que por su magnitud tan pequeña necesitan ser amplificadas con métodos indirectos como son los transistores solo de esta forma se pueden detectar.

Cuando hablamos de ondas electromagnéticas siempre pensamos que ellas viajan por el espacio y no por conductores. Pero la generación de ondas electromagnéticas tiene lugar en sistemas electrónicos que captan los fenómenos físicos, los transforman en ondas eléctricas y por último cuando es necesario emitirlos, los emite en ondas de radiofrecuencias que viajan por el espacio. Un ejemplo de lo anterior son las ondas de radio: El sonido que sale de un locutor es captado por un micrófono, esa onda sonora es transformada en una onda eléctrica y se modula su onda o su frecuencia (amplitud modulada AM o su frecuencia modulada: FM) y a través de un emisor o transmisor se emite al espacio. Ella viaja por él y es captada por una antena receptora, reiniciándose el proceso inverso.

Como vemos las ondas electromagnéticas inducen en el receptor una corriente con frecuencia y longitud de onda predeterminada y ella al ser amplificada y transducida se puede escuchar la voz del locutor en un parlante que no es otra cosa que un equipo electromagnético.

Para entender todo lo anterior debemos hacer un poco de historia del como evolucionó la tecnología de las ondas electromagnéticas.

## **6.1. HISTORIA**

### **6.1.1. Heinrich Hertz**

Las primeras observaciones del efecto fotoeléctrico fueron llevadas a cabo por Heinrich Hertz en 1887 en sus experimentos sobre la producción y recepción de ondas electromagnéticas. Su receptor consistía en una bobina en la que se podía producir una chispa como producto de la recepción de ondas electromagnéticas. Para observar mejor la chispa Hertz encerró su receptor en una caja negra. Sin embargo la longitud máxima de la chispa se reducía en este caso comparada con las observaciones de chispas anteriores. En efecto la absorción de luz ultravioleta facilitaba el salto de los electrones y la intensidad de la chispa eléctrica producida en el receptor. Hertz publicó un artículo con sus resultados sin intentar explicar el fenómeno observado.

### **6.1.2. J.J. Thomson**

En 1889, el físico británico Joseph John Thomson investigaba los rayos catódicos. Influenciado por los trabajos de James Clerk Maxwell, Thomson dedujo que los rayos catódicos consistían de un flujo de partículas cargadas negativamente a los que llamó corpúsculos y ahora conocemos como electrones.

Thomson utilizaba una placa metálica encerrada en un tubo de vacío como cátodo exponiendo este a luz de diferente longitud de onda. Thomson pensaba que el campo electromagnético de frecuencia variable producía resonancias con el campo eléctrico atómico y que si estas alcanzaban una amplitud suficiente podía

Producirse la emisión de un "corpúsculo" subatómico de carga eléctrica y por lo tanto el paso de la corriente eléctrica.

La intensidad de esta corriente eléctrica variaba con la intensidad de la luz. Incrementos mayores de la intensidad de la luz producían incrementos mayores de la corriente. La radiación de mayor frecuencia producía la emisión de partículas con mayor energía cinética.

### **6.1.3. Von Lenard**

En 1902 Philipp von Lenard realizó observaciones del efecto fotoeléctrico en las que se ponía de manifiesto la variación de energía de los electrones con la frecuencia de la luz incidente.

La energía cinética de los electrones podía medirse a partir de la diferencia de potencial necesaria para frenarlos en un tubo de rayos catódicos. La radiación ultravioleta requería por ejemplo potenciales de frenado mayores que la radiación de mayor longitud de onda. Los experimentos de Lenard arrojaban datos únicamente cualitativos dadas las dificultades del equipo instrumental con el cual trabajaba.

### **6.1.4. Cuantos de luz de Einstein**

En 1905 Albert Einstein propuso una descripción matemática de este fenómeno que parecía funcionar correctamente y en la que la emisión de electrones era producida por la absorción de cuantos de luz que más tarde serían llamados fotones. En un artículo titulado "Un punto de vista heurístico sobre la producción y transformación de la luz" mostró como la idea de partículas discretas de luz podía explicar el efecto fotoeléctrico y la presencia de una frecuencia característica para cada material por debajo de la cual no se

producía ningún efecto. Por esta explicación del efecto fotoeléctrico Einstein recibiría el Premio Nobel de Física en 1921.

El trabajo de Einstein predecía que la energía con la que los electrones escapaban del material aumentaba linealmente con la frecuencia de la luz incidente. Sorprendentemente este aspecto no había sido observado en experiencias anteriores sobre el efecto fotoeléctrico. La demostración experimental de este aspecto fue llevada a cabo en 1915 por el físico estadounidense Robert Andrews Millikan.

#### **6.1.5. Dualidad onda-corpúsculo**

El efecto fotoeléctrico fue uno de los primeros efectos físicos que puso de manifiesto la dualidad onda-corpúsculo característica de la mecánica cuántica. La luz se comporta como ondas pudiendo producir interferencias y difracción como en el experimento de la doble rendija de Thomas Young, pero intercambia energía de forma discreta en paquetes de energía, fotones, cuya energía depende de la frecuencia de la radiación electromagnética. Las ideas clásicas sobre la absorción de radiación electromagnética por un electrón sugerían que la energía es absorbida de manera continua. Este tipo de explicaciones se encontraban en libros clásicos como el libro de Millikan sobre los Electrones o el escrito por Compton y Allison sobre la teoría y experimentación con rayos X. Estas ideas fueron rápidamente reemplazadas tras la explicación cuántica de Albert Einstein.

#### **6.1.6. Efecto fotoeléctrico en la actualidad**

El efecto fotoeléctrico es la base de la producción de energía eléctrica por radiación solar y del aprovechamiento energético de la energía solar. El efecto fotoeléctrico se utiliza también para la fabricación de células utilizadas en los detectores de llama de las calderas de las grandes centrales termoeléctricas. También se utiliza en diodos fotosensibles tales como los que se utilizan en las

células fotovoltaicas y en electroscopios o electrómetros. En la actualidad los materiales fotosensibles más utilizados son, aparte de los derivados del cobre (ahora en menor uso), el silicio, que produce corrientes eléctricas mayores.

El efecto fotoeléctrico también se manifiesta en cuerpos expuestos a la luz solar de forma prolongada. Por ejemplo, las partículas de polvo de la superficie lunar adquieren carga positiva debido al impacto de fotones. Las partículas cargadas se repelen mutuamente elevándose de la superficie y formando una tenue atmósfera. Los satélites espaciales también adquieren carga eléctrica positiva en sus superficies iluminadas y negativa en las regiones oscurecidas, por lo que es necesario tener en cuenta estos efectos de acumulación de carga en su diseño.

Una vez que Maxwell predijo la existencia de ondas electromagnéticas se presentó la importante cuestión de cómo generarlas. Hertz fue el primero que estudió este problema y lo resolvió. Para ello desarrolló un formalismo matemático con el cual pudo encontrar las características de estas ondas a partir de las ecuaciones de Maxwell. De este trabajo se desprendió la predicción de que si una partícula eléctricamente cargada se mueve en forma acelerada, entonces emite ondas electromagnéticas. Así, por ejemplo, en el experimento de Hertz la chispa que salta de una esfera a la otra; está compuesta de electrones acelerados que emiten ondas electromagnéticas.

Cuando una corriente eléctrica se establece a lo largo de un cable se están moviendo partículas cargadas. Sin embargo, no siempre ocurre que estas partículas se aceleren; por ejemplo, si la corriente es de valor constante como la corriente directa que se establece cuando la fuente es una batería conectada a un foco de una linterna, entonces las partículas que dan lugar a la corriente eléctrica se mueven con velocidad constante y por tanto no se están acelerando. Una partícula experimenta una aceleración cuando su velocidad cambia al transcurrir el tiempo.

En consecuencia, solamente en una corriente eléctrica que varía al transcurrir el tiempo, las partículas se aceleran. Esto sucede, por ejemplo, con la corriente alterna.

Supóngase que una varilla metálica se conecta a una fuente de corriente alterna. Los electrones que circulan por la varilla llegarán a su extremo y se regresarán; por consiguiente, su velocidad cambia y hace que se aceleren, y en consecuencia emiten ondas electromagnéticas. Esta onda así emitida tendrá la misma frecuencia de los electrones que oscilan en la varilla.

El elemento que produce las ondas se llama antena emisora. En el caso anterior la antena es la varilla. Además de varillas las antenas pueden tener otras configuraciones. Las características que tengan las ondas emitidas dependerán de la forma geométrica y de la longitud de la antena. Así, en el caso de una varilla, las ondas emitidas tienen la misma frecuencia que la corriente que las induce. A esta frecuencia  $f$  le corresponde un longitud de onda  $\lambda$  dada por  $(v / f)$ , siendo  $v$  la velocidad de la luz (ecuación antes mencionada).

Por otro lado, la potencia de la onda emitida depende tanto de la longitud de onda  $\lambda$  como de la longitud  $L$  de la varilla. La potencia que emite adquiere un valor máximo cuando la longitud de la varilla es igual a la mitad de la longitud de onda. En consecuencia, conviene construir la antena con esta longitud. Este hecho es una manifestación del fenómeno de resonancia.

La antena no emite la misma potencia en todas las direcciones; a lo largo de la antena (Figura) no hay emisión. En una dirección perpendicular a la varilla se alcanza la potencia máxima; de hecho, alrededor de la dirección perpendicular se forma un cono dentro del cual la emisión es apreciable; en direcciones fuera del cono prácticamente no hay radiación. A este tipo de antenas se les llama direccionales.

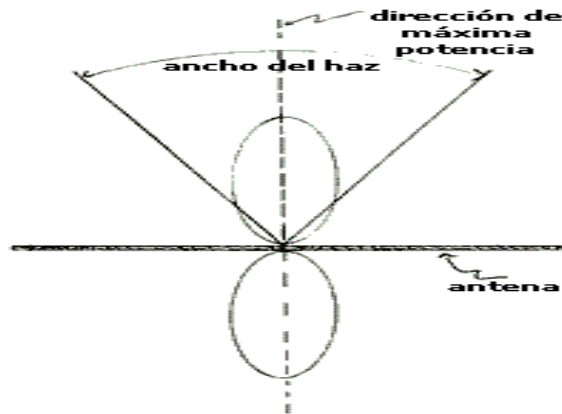


Figura No.9 Una antena de varilla

En la figura 9 se observa una antena de varilla emite ondas electromagnéticas direccionalmente; la máxima potencia se envía en dirección perpendicular a la varilla.

Supongamos que, por ejemplo, se quiere emitir (o recibir) una onda de televisión que corresponde al canal 2. Ésta tiene una frecuencia de 57 MHz y le corresponde, según la ecuación mencionada arriba, una longitud de onda de 5.26 m. Por tanto, la antena tiene que tener una longitud de  $5.26 \text{ m}/2 = 2.63 \text{ m}$  para obtener una potencia máxima de emisión.

La anchura del cono es una medida del ancho del haz que se emite. Mientras más pequeño sea el haz, más direccional será la emisión de la antena. El ancho del haz depende de la frecuencia de la onda: mientras menor sea ésta, menor será el ancho del haz.

Cuando a una varilla le llega una onda electromagnética, ésta induce en la varilla una corriente eléctrica que tiene la misma frecuencia que la de la onda incidente. Cualquier dispositivo, como la varilla, que transforma una onda electromagnética en una corriente eléctrica se llama antena receptora.

Las antenas, ya sean receptoras o emisoras, funcionan con las mismas características. Así, las propiedades direccionales de la recepción en una antena receptora son las mismas que si funcionara como emisora. Además,

una antena receptora absorbe la máxima potencia cuando su longitud es igual a la mitad de la longitud de onda que tiene la onda incidente.

El tipo de antena que se use, ya sea para emisión o recepción, depende de la aplicación que se quiera hacer. Por ejemplo, en el caso de una estación de radio o de televisión se requiere que pueda llegar a receptores situados en todas las direcciones con respecto a la antena; además, la señal emitida debe llegar lo más lejos posible. En consecuencia, una antena emisora de una estación debe poder manejar potencias altas y radiarlas en todas direcciones.

En contraste, la antena receptora maneja potencias muy pequeñas, ya que está relativamente lejos de la emisión. Además, la antena receptora debe ser muy direccional, pues debe captar la señal de la emisión que viene de una dirección determinada. Por esto, las antenas emisoras tienen formas geométricas diferentes de las antenas receptoras.

Una vez que Hertz demostró que en la naturaleza existen realmente las ondas electromagnéticas que Maxwell había anticipado, se inició una serie de estudios teóricos y experimentales para encontrar sus diversas propiedades. En la parte teórica fue necesario desarrollar una serie de métodos matemáticos para poder extraer las propiedades de las ecuaciones de Maxwell. Las predicciones teóricas que se obtuvieron de esta manera fueron consistentemente verificadas en el laboratorio.

En Estados Unidos Nikola Tesla logró hacer varias demostraciones usando descargas de alto voltaje y de alta frecuencia, para lo cual inventó una Bobina, llamada bobina de Tesla, que posteriormente fue de utilidad para las comunicaciones inalámbricas.

En 1892 William Crookes publicó un trabajo en la revista inglesa *Fortnightly Review*, en el que proponía las bases para utilizar ondas electromagnéticas

como medio para transmitir señales telegráficas a través del espacio, es decir, telegrafía sin hilos o inalámbrica.

Fue en 1894 cuando el físico inglés Oliver Lodge, basándose en el trabajo de Crookes, desarrolló el primer sistema de comunicación inalámbrica. Con los aparatos que construyó demostró la recepción de una señal a través de una distancia aproximada de 100 m, para lo cual usó un circuito sintonizador. Avances posteriores le permitieron ampliar la distancia a un kilómetro.

En 1894 el ingeniero italiano Guglielmo Marconi (1874-1937) leyó la biografía de Hertz e inmediatamente empezó a trabajar en la idea de usar las ondas electromagnéticas para transmitir señales. Construyó los aparatos descritos por Hertz, a los cuales les añadió un cohesor, que es un tubo de vidrio que contiene limaduras de hierro, y conectó tanto el transmisor como el receptor a una antena. Una señal eléctrica que pase por el cohesor hace que las limaduras se unan durante el intervalo que dura la señal; de esta manera este dispositivo detecta ondas electromagnéticas. En 1895 Marconi probó sus aparatos, con los cuales logró enviar señales hasta distancias de un par de kilómetros.

Marconi ofreció sus inventos al gobierno italiano, pero como la respuesta tardó en llegar decidió ir a Inglaterra, donde en 1896 obtuvo la primera de sus muchas patentes. Marconi afirmaba que sería posible enviar señales a distancias de 150 km. Sin embargo, muchos científicos rechazaron su pretensión con el argumento de que, si las señales se propagaban en línea recta, entonces se perderían en el espacio antes de poder seguir la curvatura de la Tierra.

Marconi realizó muchos experimentos, y fue aumentando poco a poco la distancia de la transmisión. Descubrió que si conectaba a tierra uno de los extremos del transmisor, y el otro extremo a una varilla larga, entonces las ondas parecían ser guiadas alrededor de la superficie terrestre; de esta

manera logró transmisiones a través de distancias increíbles para su época. En 1898 transmitió señales a través del Canal de la Mancha y en 1901 logró una transmisión a través del Océano Atlántico: de Polhu en Cornualles, Inglaterra, hasta San Juan de Terranova, Canadá.

El transmisor utilizado por Marconi fue muy sencillo, pues consistía en un transformador con un extremo de su secundario conectado a una varilla o antena y el otro a tierra. En la figura 8 vemos un esquema del circuito usado. El primario del transformador forma parte del circuito. Al cerrar el Interruptor la corriente que circula por él varía con el tiempo, por lo que el primario del transformador induce en el secundario una corriente.

La relación de vueltas en el transformador es tal que en el secundario se genera un alto voltaje, dando lugar a que la antena radie ondas electromagnéticas. Al llegar estas ondas al receptor (Figura 10) son captadas por la antena, por lo que circula una corriente variable por el primario del transformador del receptor, que a su vez induce una corriente en el secundario. Pero este secundario forma parte de un circuito que contiene una bocina que transforma la corriente en una señal sonora. Así se pueden transmitir señales codificadas, por ejemplo por medio de la convención de Morse, que fue lo que hizo Marconi.

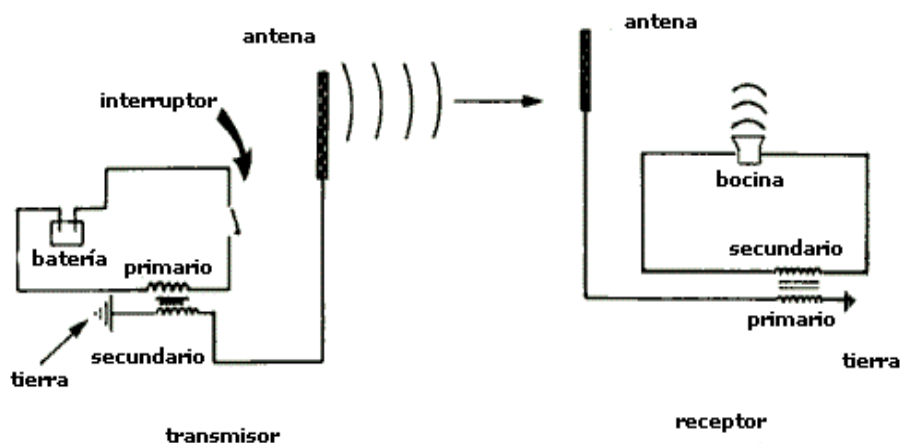


Figura No.10 Esquema de los circuitos Emisor y Receptor utilizados por Marconi.

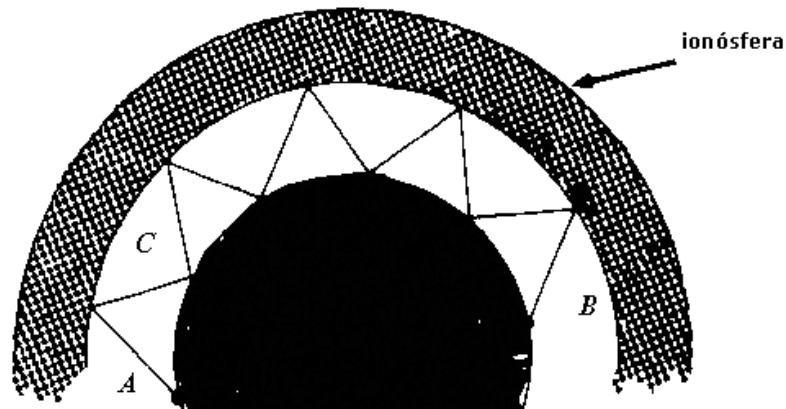
Una vez que Marconi logró transmitir una señal trasatlántica, formó de inmediato una compañía con el fin de explotar su invento. El 2 de enero de 1909 se hundió el barco inglés *República* afortunadamente contaba con un aparato de Marconi, por lo que pudo solicitar auxilio, y se salvó casi toda la tripulación. En los años sucesivos los barcos, en particular los de guerra, fueron provistos de aparatos de radiotelegrafía. Así durante sus travesías los barcos podían recibir noticias de tierra, y en 1904, por ejemplo, los trasatlánticos imprimían periódicos a bordo con noticias recibidas de tierra firme.

El éxito obtenido por Marconi en sus transmisiones a larga distancia hizo que varios investigadores se pusieran a pensar cuál era el motivo de que las ondas electromagnéticas siguieran la curvatura de la Tierra. Fueron A. E. Kennedy y nuestro conocido Heaviside quienes, en forma independiente, desarrollaron una teoría en la que proponían que en la atmósfera había una capa formada por partículas eléctricamente cargadas que reflejaba las ondas electromagnéticas.

Al enviar una señal de  $A$  (Figura 11) la onda se reflejaba y regresaba a la superficie en el punto  $U$ ; la Tierra reflejaba nuevamente esta señal a la ionósfera y se volvía a repetir esta sucesión hasta que la señal llegaba a su destino en  $R$ . Hemos de mencionar que ya en 1882 Balfour Stewart, en un contexto completamente distinto había propuesto la existencia de la ionósfera para poder explicar los cambios sistemáticos que ocurrían en el campo magnético terrestre.

Fue hasta 1925 cuando se empezaron a medir directamente las características de la ionósfera. Se encontró que esta capa está situada entre 80 y 300 km de altura sobre la superficie terrestre y la componen electrones. La ionósfera controla las comunicaciones por medio de ondas electromagnéticas, y establece los límites, tanto superior como inferior, al valor de las frecuencias que se pueden usar; las ondas deben tener longitudes de onda relativamente

pequeñas (entre 1 y 10 m). Estas comunicaciones ocurren en la llamada banda de onda corta.



**Figura No.11** La ionosfera permite que las ondas de radio puedan llegar de un lugar a otro sobre la tierra.

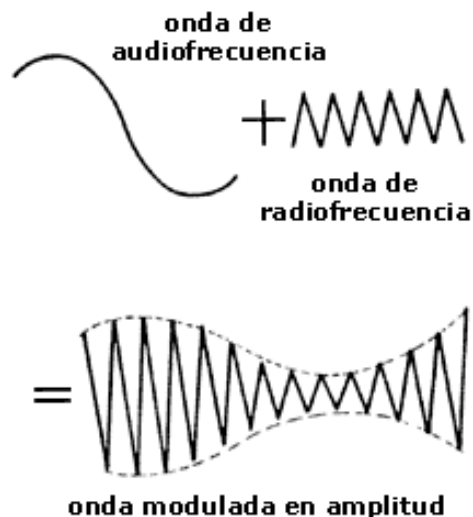
La ionósfera no es una capa estática, tiene variaciones debido a que la densidad de los electrones que hay en ella varía. Estas variaciones dependen de diversas circunstancias: del lugar, el momento del día, la actividad solar, etc., lo que en ocasiones causa que haya malas comunicaciones.

A pesar de lo maravilloso que resultó esta aplicación del electromagnetismo, lo único que se podía transmitir era una serie de zumbidos de duración variable; es decir, telegrafía. No era posible enviar palabras o música, o sea que no era todavía telefonía ó radio. Para lograr esto último hubo que esperar al inventó de los bulbos o válvulas termiónicas.

Marconi obtuvo el Premio Nobel de Física en 1909 y murió en 1937, después de haber recibido muchos honores. Un hecho de crucial importancia es reconocer que las ondas acústicas que creamos cuando hablamos tienen frecuencias relativamente bajas: nuestro oído es sensible a ondas acústicas cuyas frecuencias están comprendidas entre 20 y 20 000 Hz. Estas frecuencias son pequeñas si las comparamos con las frecuencias de la luz visible, por ejemplo, que son del orden de  $10^{14}$  Hz (un uno seguido de catorce ceros).

Supongamos que se hacen interferir dos ondas, una de baja y otra de alta frecuencia (Figura 12). Si la diferencia de frecuencias es muy grande, entonces la onda resultante tiene la misma frecuencia que la onda de alta frecuencia, pero su amplitud va cambiando con la misma frecuencia que la onda de baja frecuencia. Se dice que la onda resultante está modulada en amplitud. Por tanto, si la señal es una onda de baja frecuencia, es posible incorporarla en una onda de alta frecuencia haciéndolas interferir.

Con base en lo anterior se diseñó un aparato transmisor que se muestra esquemáticamente en la figura 13. En primer lugar, un oscilador produce una corriente eléctrica de muy alta frecuencia, llamada radiofrecuencia, cuyos valores están entre 30 000 y 300 000 000 Hz. En segundo lugar, esta corriente se amplifica y se alimenta a un modulador. Una señal con frecuencias acústicas como las de una voz o las de la música, se transforma por medio de un micrófono en una corriente eléctrica. Ésta tiene frecuencias de valor muy pequeño, comparada con la radiofrecuencia generada por el oscilador. Después de amplificar la señal que sale del micrófono, se alimenta al modulador.



**Figura No.12** Al interferir una onda de baja frecuencia (audio) con una de alta frecuencia (radio) se obtiene una onda modulada en su amplitud.

Éste hace interferir las dos corrientes con baja y alta frecuencia, produciendo una corriente de alta frecuencia modulada en su amplitud; esta corriente lleva incorporadas las características de la señal acústica. La corriente se hace pasar por la antena que emite ondas electromagnéticas con la misma frecuencia y amplitud que tiene la corriente que la alimentó: en particular, la amplitud de las ondas emitidas va cambiando con la misma frecuencia de la señal de baja frecuencia. De esta forma, el aparato emite ondas electromagnéticas en las que va incorporada la señal de la voz. La frecuencia de la estación de radio que emite de esta manera es precisamente la frecuencia que produce el oscilador. De hecho, los gobiernos asignan a cada estación una frecuencia de emisión, que es la frecuencia de la onda portadora de la señal.

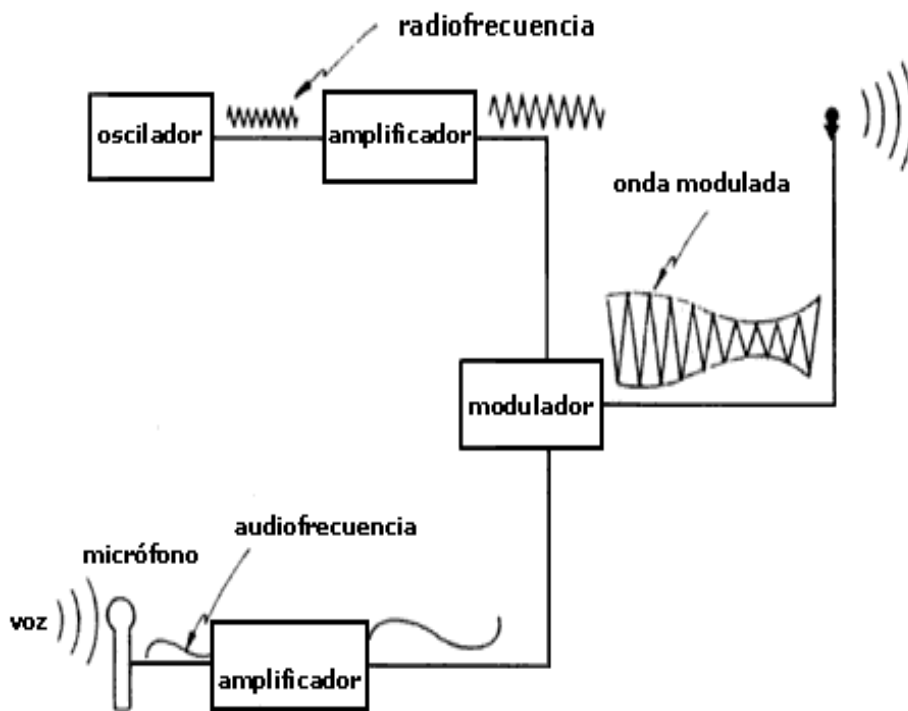


Figura No.13 Diagrama de bloque de un Emisor de Amplitud Modulada.

En la figura 14 se muestra un esquema de un receptor. Las ondas electromagnéticas que emite el transmisor se propagan en todas direcciones y se pueden captar por medio de una antena. Estas ondas inducen en la antena una corriente eléctrica que tiene las mismas características de frecuencia y

amplitud de las ondas y así la corriente inducida en la antena lleva la señal. Si solamente hubiese una sola transmisión en el área geográfica en que está ubicado el receptor, entonces la señal recibida sería precisamente la que envió el transmisor.

Sin embargo esto no sucede así, pues en muchas localidades hay más de una emisión. Pero como cada emisión se hace con diferente frecuencia, la antena capta todas las emisiones que se hacen en la región en ese instante y la corriente que se induce en ella está compuesta de todas estas frecuencias. Por este motivo, se hace pasar la corriente de la antena por un aparato llamado sintonizador, formado por circuitos eléctricos, que selecciona la frecuencia en que uno está interesado.

Ahora bien, la onda que recibe la antena tiene muy poca intensidad, por lo que produce una corriente muy débil que es necesario amplificar. Así, se hace pasar la corriente por otro aparato, el filtro, que elimina la componente de alta frecuencia, es decir, es un circuito que solamente deja pasar la onda de baja frecuencia, que es precisamente la señal. Una vez amplificada la corriente resultante se hace pasar a una bocina que la transforma en una onda de sonido. De esta manera, el receptor transforma la señal eléctrica en auditiva y se puede oír el mensaje que se transmitió.

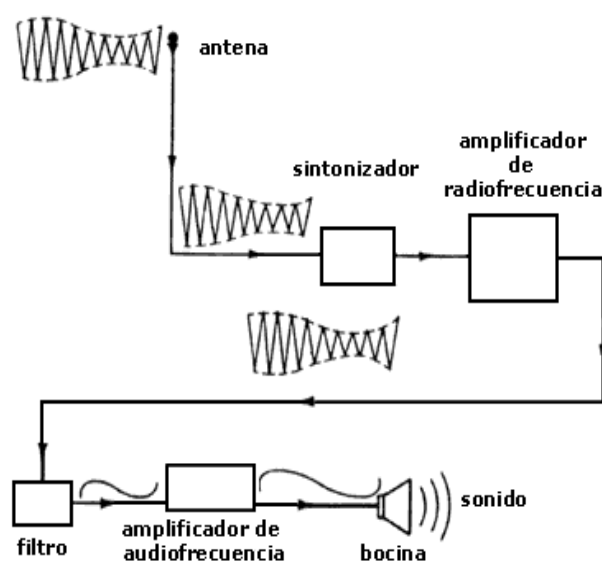


Figura No.14 Diagrama de bloques de un Receptor de Amplitud Modulada.

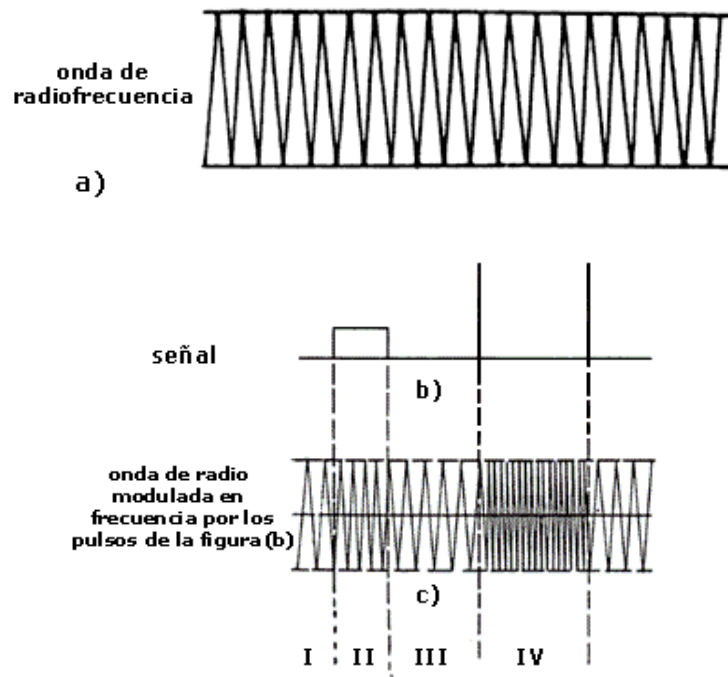
Un elemento crucial para el desarrollo de la radio fue el oscilador. Este circuito fue inventado en 1913 por el físico estadounidense Edwin Howard Armstrong (1890-1954). Su fundamento es un circuito basado en un tríodo, de cuya salida se toma una parte de la corriente que se vuelve a alimentar a la entrada del tríodo, formando así un circuito de retroalimentación. En ciertas condiciones bien determinadas, la corriente que circula en este circuito oscila. Conectando entre la salida y la entrada de los tríodos condensadores y bobinas de valores adecuados se puede lograr que la corriente oscile con la frecuencia que uno desee.

De cuya salida se toma una parte de la corriente que se vuelve a alimentar a la entrada del tríodo, formando así un circuito de retroalimentación. En ciertas condiciones bien determinadas, la corriente que circula en este circuito oscila. Conectando entre la salida y la entrada de los tríodos condensadores y bobinas de valores adecuados se puede lograr que la corriente oscile con la frecuencia que uno desee.

Este tipo de transmisión y recepción se dio hacia la tercera década del presente siglo. La radiotelefonía resultó ser muy útil para conversaciones privadas. El primer programa público de radio fue emitido en Inglaterra el 23 de febrero de 1920. Así nació una nueva industria que ha tenido un explosivo crecimiento aun hasta nuestros días.

En 1933 Armstrong inventó otro tipo de emisión de señales de radio: el de frecuencia modulada (FM). En este sistema la frecuencia emitida por el oscilador se cambia de acuerdo con el valor de la amplitud de la onda sonora que se desea transmitir. Mientras más intensa sea la onda acústica, mayor será el valor de la frecuencia de la onda emitida. En la figura 15(a) se muestra la onda producida por el oscilador; en la figura 15(b) vemos dos pulsos que se quieren transmitir; nótese que los pulsos tienen amplitudes diferentes. En la figura 15(c) vemos la onda modulada en frecuencia: de izquierda a derecha están, sucesivamente, en I la onda del oscilador, en II la onda modulada en

frecuencia por el primer pulso, en III otra vez la onda del oscilador, ya que en este intervalo no hay señal, en IV la onda modulada en frecuencia por el segundo pulso, etc. Nótese que la frecuencia de la región II es menor que la de la región IV, ya que la longitud del primer pulso es menor que la del segundo; además, la amplitud de la onda en la figura 15(c) es siempre la misma.



**Figura No.15** La Señal Modula la Frecuencia de la Onda de Radiofrecuencia.

En un receptor de FM hay un circuito que separa la señal a partir de los cambios de frecuencia, es decir, un circuito que es sensible a los cambios de frecuencia de la corriente entrante con respecto a la frecuencia de la onda del oscilador.

La transmisión por FM, iniciada comercialmente en Estados Unidos en febrero de 1941, comparada con la forma arriba descrita de amplitud modulada (AM), tiene la ventaja de que sus transmisiones no se alteran con las perturbaciones, ya sean atmosféricas o producidas por el hombre, que afectan la amplitud de la onda pero no su frecuencia. En el sistema de FM no se presenta el llamado

fenómeno de "estática", que es un ruido sistemático que se oye en emisiones de AM.

La radio como la conocemos en la actualidad fue la creación de tres hombres de genio, visión, determinación y de gran complejidad: Lee de Forest, autoproclamado "padre de la radio", cuya invención del triodo hizo posible el nacimiento de la electrónica moderna; Edwin Howard Armstrong, inventor del circuito retroalimentador (y del oscilador) así como de la frecuencia modulada, que forman la base de la transmisión y recepción de los sistemas actuales de radio (y de televisión); finalmente, David Sarnoff, quien encabezó la Radio Corporation of America (RCA), sucesora de la filial estadounidense

De la compañía establecida por Marconi, a quien se le debe que las invenciones mencionadas fueran llevadas a sus fases tanto industrial como comercial.

Los creadores de la radio experimentaron derrotas pasmosas así como victorias extraordinarias. Desafortunadamente la historia de las relaciones entre estas tres personas fue muy trágica. De Forest hizo y perdió tres veces fortuna, vio quebrar a la mayoría de sus compañías y casi fue a la cárcel por acusaciones de fraude. Armstrong demandó a Forest por los derechos del circuito retroalimentador. A pesar de que Armstrong lo inventó, perdió en 1934 el juicio que duró más de 20 años y que llegó a la Suprema Corte de Justicia de Estados Unidos. Armstrong, que durante varios años fue el más grande accionista de la RCA, perdió casi toda su fortuna demandando, a partir de 1948, a la compañía por los derechos de la FM. En este otro juicio fue víctima de las maquinaciones de la corporación encabezada por Sarnoff. En 1954, acosado y empobrecido, Armstrong se suicidó.

Sin embargo, su viuda logró, a fines de 1954, que la RCA llegara a un acuerdo fuera del juicio y recibió 1 050 000 dólares por derechos. Asimismo logró por medio de acuerdos fuera de la corte que casi todas las demás compañías

electrónicas que usaban el sistema de FM le pagaran los derechos correspondientes. La única que se negó y fue llevada a juicio fue la Motorola, que finalmente perdió por una decisión dada en 1967 por la Suprema Corte de Justicia de Estados Unidos. Así, después de 53 años los litigios judiciales sobre los inventos de Armstrong, finalmente terminaron 13 años después de su muerte, con su reivindicación.

Comprendiendo lo anterior expuesto llegamos a la conclusión que el espectro electromagnético tiene un comportamiento similar indiferente de sus longitudes de onda y de su frecuencia. La inducción electromagnética existe dentro de los conductores y en el espacio cuando las ondas llegan a un receptor llamado antena. Las ondas por lo tanto se pueden generar y a su vez se pueden recepcionar. La evolución tecnológica de la electrónica ha hecho posible que estos hechos se sucedan con alta calidad de definición.

Ondas electromagnéticas y corrientes eléctricas tienen en común amplitud de onda, longitud de onda y frecuencia.

En la presente monografía el efecto fotoeléctrico que nos interesa es la inducción electromagnética para producir corrientes eléctricas continuas y por lo tanto sin frecuencia ni amplitud definida pero si con altitud.

El rango del espectro electromagnético que nos interesa es el de la luz visible, cuyo componente energético es significativo para la generación de corrientes eléctricas aprovechables en usos diferentes y con potencias significativas. Dejamos las ondas de radio por debajo del infrarrojo para los usos conocidos e igualmente por encima del ultravioleta donde se encuentran los Rx, cuyos usos todos conocemos.

El rango de luz visible y por lo visto anteriormente, generará corriente eléctrica en nuestras celdas solares en intensidades promedio para toda la gama de ondas de luz visible. Por debajo de dicho espectro visible también se generará

corrientes eléctricas pero su potencia es de tal magnitud que tiene significación para aplicaciones en gran escala. Igualmente las ondas por encima del ultravioleta aunque produce corrientes significativas la intensidad de las ondas son tan escasas que igualmente no tienen significado en términos de potencia. Entendido lo anterior podemos afirmar que inducción electromagnética y efecto fotoeléctrico tienen mucho en común siendo el fenómeno igual.

Entendido lo anterior definiremos el fenómeno fotoeléctrico en términos como los físicos lo definen hoy en día, aunque hacemos salvedad si es la impactación del fotón sobre el electrón lo que produce el fenómeno fotoeléctrico ó si es el campo magnético del fotón el que induce una corriente eléctrica en el conductor? Basamos la anterior conclusión en el hecho que siempre que una onda electromagnética indiferente de su frecuencia y longitud de onda y amplitud incide sobre un elemento metálico ó químico produce corriente eléctrica de magnitudes diferentes que en el caso de las ondas de radiofrecuencia son muy bajas solo detectables con sistemas de amplificación especiales.

Ello contraría los conceptos de que solo los fotones de determinadas frecuencias y por lo tanto de determinada energía son capaces de liberar electrones. Pero la pregunta salta ante la evidencia: y las ondas de radiofrecuencia que son de baja energía no producen corriente en los receptores-antenas?

Obviamente la aplicación práctica para efectos de producción de corrientes eléctricas de potencia significativas, motivo de las investigaciones futuras en nuestro caso, tendrán importancia cuando ella se produzcan en cantidades fácilmente detectables. Es efecto fotoeléctrico ó es inducción electromagnética?. Recordemos que la luz solar tiene una cantidad de energía significativa por su frecuencia e intensidad y por lo tanto aprovechable.

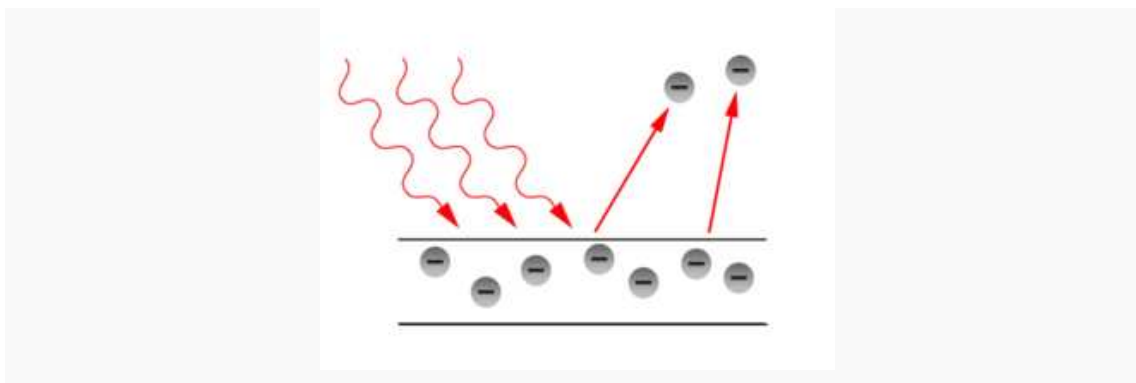


Figura No.16 Diagrama del Efecto Fotoeléctrico

Los fotones incidentes son absorbidos por los electrones del medio dotándoles de energía suficiente para escapar de este. El efecto fotoeléctrico tiene otras connotaciones: 1. Puede producir corriente eléctrica; 2. Mejora la conductividad eléctrica de metales, fenómeno difícil de apreciar por la capacidad de los metales de ser buenos conductores y por lo tanto una pequeña diferencia de conductividad no es fácilmente detectable; 3. En semiconductores la iluminación de los mismos modifican de una manera significativa la facilidad de conducción eléctrica, y siendo ello aplicado en los fototransistores; 4. Otro fenómeno fotoeléctrico puede ocurrir con sustancias químicas cuya iluminación facilitan ó hacen posible el que ocurran reacciones químicas (fotoquímica).

De todo lo anterior el fenómeno que nos interesa es el conocido como fenómeno fotovoltaico que es generador de corriente eléctrica. Ello ocurre principalmente en sustancias semiconductores con una altísima sensibilidad fotoeléctrica, y con significancia en la generación de corrientes eléctricas.

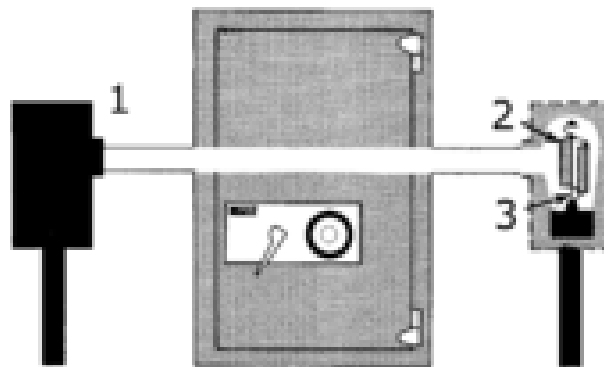
Diagrama del efecto fotoeléctrico. Los fotones incidentes son absorbidos por los electrones del medio dotándoles de energía suficiente para escapar de éste.

El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por un material cuando se le ilumina con radiación electromagnética (luz visible o ultravioleta, en general).

A veces se incluye en el término otros tipos de interacción entre la luz y la materia:

- ✓ Fotoconductividad: es el aumento de la conductividad eléctrica de la materia o en diodos provocada por la luz. Descubierta por Willoughby Smith en el selenio hacia la mitad del siglo XIX.
- ✓ Efecto fotovoltaico: transformación parcial de la energía luminosa en energía eléctrica. La primera célula solar fue fabricada por Charles Fritts en 1884. Estaba formada por selenio recubierto de una fina capa de oro.

El efecto fotoeléctrico fue descubierto y descrito por Heinrich Hertz en 1887. La explicación teórica solo fue hecha por Albert Einstein en 1905 quien basó su formulación de la fotoelectricidad en una extensión del trabajo sobre los cuantos de Max Planck. Más tarde Robert Andrews Millikan pasó diez años experimentando para demostrar que la teoría de Einstein no era correcta... y demostró que sí lo era. Eso permitió que Einstein y Millikan compartiesen el premio Nobel en 1921 y 1923 respectivamente.



**Figura No.17** Célula Fotoeléctrica donde "1" es la fuente lumínica, "2" es el cátodo y "3", el ánodo.

Los fotones tienen una energía característica determinada por la longitud de onda de la luz. Si un electrón absorbe energía de un fotón y tiene mayor energía que la necesaria para salir del material y su velocidad está bien dirigida hacia la superficie, entonces el electrón puede ser extraído del material.

Si la energía del fotón es demasiado pequeña, el electrón es incapaz de escapar de la superficie del material. Los cambios en la intensidad de la luz no cambian la energía de sus fotones, tan sólo el número de electrones que pueden escapar de dicha superficie y por lo tanto la energía de los electrones emitidos no depende de la intensidad de la luz incidente, sino de la frecuencia de la radiación que le llega. Si el fotón es absorbido parte de la energía se utiliza para liberarlo del átomo y el resto contribuye a dotar de energía cinética a la partícula libre.

En principio, todos los electrones son susceptibles de ser emitidos por efecto fotoeléctrico. En realidad los que más salen son los que necesitan menos energía para salir y, de ellos, los más numerosos.

En un aislante (dieléctrico), los electrones más energéticos se encuentran en la banda de valencia. En un metal, los electrones más energéticos están en la banda de conducción. En un semiconductor de tipo N, son los electrones de la banda de conducción que son los más energéticos. En un semiconductor de tipo P también, pero hay muy pocos en la banda de conducción. Así que en ese tipo de semiconductor hay que ir a buscar los electrones de la banda de valencia.

A la temperatura ambiente, los electrones más energéticos se encuentran cerca del nivel de Fermi (salvo en los semiconductores intrínsecos en los cuales no hay electrones cerca del nivel de Fermi). La energía que hay que dar a un electrón para llevarlo desde el nivel de Fermi hasta el exterior del material se llama función trabajo, y la frecuencia mínima necesaria para que un electrón escape del metal recibe el nombre de frecuencia umbral. El valor de esa energía es muy variable y depende del material, estado cristalino y, sobre todo de las últimas capas atómicas que recubren la superficie del material. Los metales alcalinos (sodio, calcio, cesio, etc.) presentan las más bajas funciones de trabajo. Aun es necesario que las superficies estén limpias al nivel atómico.

Una de la más grandes dificultades de las experiencias de Millikan era que había que fabricar las superficies de metal en el vacío.

### **6.1.7. Explicación**

Los fotones del haz de luz tienen una energía característica determinada por la frecuencia de la luz. En el proceso de fotoemisión, si un electrón absorbe la energía de un fotón y éste último tiene más energía que la función trabajo, el electrón es arrancado del material. Si la energía del fotón es demasiado baja, el electrón no puede escapar de la superficie del material. Aumentar la intensidad del haz no cambia la energía de los fotones constituyentes, solo cambia el número de fotones. En consecuencia, la energía de los fotones emitidos no depende de la intensidad de la luz, sino de la energía de los fotones individuales.

Los electrones pueden absorber energía de los fotones cuando son irradiados, pero siguiendo un principio de "todo o nada". Toda la energía de un fotón debe ser absorbida y utilizada para liberar un electrón de un enlace atómico, o sino la energía es re-emitada. Si la energía del fotón es absorbida, una parte libera al electrón del átomo y el resto contribuye a la energía cinética del electrón como una partícula libre.

Einstein no se proponía estudiar las causas del efecto, en el que los electrones de ciertos metales, a causa de una radiación luminosa, podían abandonar el metal con energía cinética. Intentaba explicar el comportamiento de la radiación, que obedecía a la intensidad de la radiación incidente, al conocerse la cantidad de electrones que abandonaba el metal, y a la frecuencia de la misma, que era proporcional a la energía que impulsaba a dichas partículas.

Leyes de la emisión fotoeléctrica

1. Para un metal y una frecuencia de radiación incidentes dados, la cantidad de fotoelectrones emitidos es directamente proporcional a la intensidad de luz incidente.
2. Para cada metal dado, existe una cierta frecuencia mínima de radiación incidente debajo de la cual ningún fotoelectrón puede ser emitido. Esta frecuencia se llama frecuencia de corte.
3. Por encima de la frecuencia de corte, la energía cinética máxima del fotoelectrón emitido es independiente de la intensidad de la luz incidente, pero depende de la frecuencia de la luz incidente.
4. El tiempo de retraso entre la incidencia de la radiación y la emisión del fotoelectrón es muy pequeña, menos que  $10^{-9}$  segundos.

#### 6.1.8. Formulación matemática

Para analizar el efecto fotoeléctrico cuantitativamente utilizando el método derivado por Einstein es necesario plantear las siguientes ecuaciones:

Energía de un fotón absorbido = Energía necesaria para liberar 1 electrón + energía cinética del electrón emitido.

Algebraicamente:

$$hf = hf_0 + \frac{1}{2}mv_m^2,$$

Que puede también escribirse como

$$hf = \phi + E_k.$$

donde  $h$  es la constante de Planck,  $f_0$  es la frecuencia de corte o frecuencia mínima de los fotones para que tenga lugar el efecto fotoeléctrico,  $\Phi$  es la

función trabajo, o mínima energía necesaria para llevar un electrón del nivel de Fermi al exterior del material y  $E_k$  es la máxima energía cinética de los electrones que se observa experimentalmente.

- *Nota:* Si la energía del fotón ( $hf$ ) no es mayor que la función de trabajo ( $\Phi$ ), ningún electrón será emitido.

En algunos materiales esta ecuación describe el comportamiento del efecto fotoeléctrico de manera tan sólo aproximada. Esto es así porque el estado de las superficies no es perfecto (contaminación no uniforme de la superficie externa).

Resumiendo el efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por un material cuando se le ilumina con radiación electromagnética (luz visible o ultravioleta, en general). A veces se incluye en el término otros tipos de interacción entre la luz y la materia:

Fotoconductividad es el aumento de la conductividad eléctrica de la materia y/o en diodos provocada por la luz, descubierta por Willoughby Smith en el selenio hacia la mitad del siglo XIX.

Efecto fotovoltaico: Es la transformación parcial de la energía luminosa en energía eléctrica. La primera célula solar fue fabricada por Charles Fritts en 1884; la cual estaba formada por selenio recubierto de una fina capa de oro.

#### **6.1.9. Corrientes Inducidas**

En las primeras investigaciones hechas por Michael Farady, encontró que al colocar una bobina dentro de un campo magnético, fuera este un imán permanente ó una bobina electrizada, no había formación de corriente en la bobina que llamaremos secundaria. Ello tenía un fundamento: Toda carga que

no experimente movimiento y se encuentre en reposo, sobre ella no se experimenta fuerza alguna. Sin embargo si la carga se mueve e independiente de la fuerza magnética, se ejercerá sobre ella una fuerza que será proporcional a la velocidad de la carga (en el caso nuestro la bobina).

Luego si tenemos un alambre o bobina que se mueve dentro de un campo magnético se producirá corriente eléctrica. Fácil en el día de hoy, pero fueron años de investigación para llegar a estas conclusiones. Podemos preguntarnos que indujo la corriente eléctrica? Y la conclusión definitiva sería el MOVIMIENTO de las espiras dentro del campo magnético. Ello es lógico de suponer.

En el caso que se produjera corriente eléctrica sin ningún movimiento generaríamos energía de la nada. Ya conocernos las leyes de la termodinámica nos indica que la energía no se crea de la nada. Ella se transforma, se conserva, y no se destruye.

Así la corriente inducida por el movimiento será directamente proporcional a la velocidad del movimiento de la bobina y su dirección igualmente dependerá de la dirección de giro de la bobina. Se moverá a la derecha u izquierda dependiendo del sentido del giro. Pero cabe otra observación. Si movemos simultáneamente el imán y con ello el campo magnético y las espiras en un movimiento uniforme, aparece un fenómeno contrario a nuestra lógica: no se produce corriente eléctrica.

Pero si movemos cualquiera de los elementos y solo uno, las espiras ó el imán siempre se producirá corriente independientemente de quien fue el que se movió.

Ello no parece ser interesante, pero es lo que llevó a Eisten a la teoría de la relatividad por no importar el marco de referencia.

Flujo Magnético: Otro fenómeno curioso es que si tenemos unas espiras en movimiento pero dentro de un campo magnético uniforme, es decir nuestras espiras, están muy dentro del campo, por ejemplo espiras muy pequeñas, tampoco se producirá corriente eléctrica. Ello nos indica que el campo magnético deben cambiar en su intensidad, y en un sentido relativo deben dar la sensación de moverse para que haya variación del campo magnético dentro de las espiras.

Ello fácilmente se logra moviendo las espiras dentro del campo magnético, cambiando de esta forma su área. De allí se desprende una variable conocida como flujo magnético que no es otra cosa que el producto del área atravesada de las espiras en un instante, multiplicada por la intensidad del campo magnético. Ese producto cambia de una manera intermitente con el movimiento de uno de los elementos constitutivos del circuito electromagnético.

El área es variable con el movimiento, siendo máximo cuando son perpendiculares el área y el flujo magnético y mínimos cuando son paralelos. Podemos concluir que cualquiera de los dos elementos deberá moverse para que exista variación tanto en el área con el campo magnético. De esta manera se inducirá una corriente eléctrica. Ello es el principio fundamental del generador eléctrico, y fue Michael Faraday el que definió estos conceptos como la inducción magnética y el flujo magnético.

$$O=B.A.$$

Pero podemos hacernos una pregunta: es la corriente eléctrica una onda electromagnética, generalmente confinada a un conductor?, que son las ondas electromagnéticas que viajan por el espacio?, como se producen y como las sacamos de los conductores?, como las podemos volver a captar?, el la luz una onda electromagnética?, como la podemos producir y como la recibimos del sol?

## 6.2. TEORIA ATÓMICA Y ATOMOS CIGS

El estudio del átomo es un campo de la ciencia con grandes avances en el siglo XX. Ello permitió conocer su naturaleza y composición y su alto contenido en energía que hizo posible el disponer de energía nuclear por el fenómeno de fisión atómica con fines pacíficos y humanitarios y con fines destructivos como lo son las bombas de uranio e hidrogeno.

Conocer la naturaleza del átomo es importante para el desenvolvimiento tecnológico del como es su comportamiento para la producción de celdas fotovoltaicas. Existen propiedades evidentes en algunos átomos como lo es el efecto fotoeléctrico ya estudiado en capítulos anteriores. Entraremos pues a estudiar la teoría atómica y por último los átomos constitutivos de las celdas fotovoltaicas CIGS (cobre, indio, galio y selenio).

### 6.2.1. Teoría Atómica

En física y química, la **teoría atómica** es una teoría de la naturaleza de la materia, que afirma que está compuesta por pequeñas partículas llamadas átomos, en contraposición a la creencia antigua de que la materia se podía dividir en cualquier cantidad arbitrariamente pequeña pero en un nivel muy pequeño e indivisible.

La teoría atómica comenzó hace miles de años como un concepto filosófico, y fue en el siglo XIX cuando logró una extensa aceptación científica gracias a los descubrimientos en el campo de la estequiometría. Los químicos de la época creían que las unidades básicas de los elementos también eran las partículas fundamentales de la naturaleza y las llamaron átomos (de la palabra griega *átomos*, que significa "indivisible"). Sin embargo, a finales de aquel siglo, y mediante diversos experimentos con el electromagnetismo y la radiactividad,

los físicos descubrieron que el denominado "átomo indivisible" era realmente un conglomerado de diversas partículas subatómicas (principalmente electrones, protones y neutrones), que pueden existir de manera separada. De hecho, en ciertos ambientes, como en las estrellas de neutrones, la temperatura extrema y la elevada presión impide a los átomos existir como tales. El campo de la ciencia que estudia las partículas fundamentales de la materia se denomina físico de partículas.

- 6.2.1.1 Atomismo filosófico
- 6.2.1.2. Teoría atómica moderna
  - 6.2.1.2.1. Nacimiento de la teoría atómica moderna
  - 6.2.1.2.2. Descubrimiento de las partículas subatómicas
  - 6.2.1.2.3. Descubrimiento del núcleo.
  - 6.2.1.2.4. Descubrimiento de los isótopos.
  - 6.2.1.2.5. Descubrimiento del neutrón.
- 6.2.1.3. Modelos cuánticos del átomo
- 6.2.1.4. Importancia

#### **6.2.1.1. Atomismo filosófico**

Hasta comienzos del siglo XIX, la teoría atómica era principalmente filosófica y no estaba fundada en la experimentación científica. Las primeras teorías conocidas se desarrollaron en la Antigua India en el siglo VI a. C. por filósofos hindúes y budistas. El primer filósofo que formuló ideas sobre el átomo de una manera sistemática fue Kanada. Otro filósofo indio, Pakudha Katyayana, que también vivió en el siglo VI a. C.

Demócrito y Leucipo, dos griegos del siglo VI a. C. Los griegos creían que todos los átomos estaban hechos del mismo material pero tenían diferentes formas y tamaños, que eran los factores que determinaban las propiedades físicas del material. Por ejemplo, ellos creían que los átomos de un líquido eran lisos, lo que les permitiría deslizarse uno sobre otro. Según esta línea de

pensamiento, el grafito y el diamante estarían compuestos por dos tipos diferentes de átomos, si bien hoy sabemos que son dos isómeros del carbono.

Durante el siglo XII (en plena Edad de Oro Islámica), los atomistas islámicos desarrollaron teorías atómicas que eran una síntesis del atomismo griego y el indio. Desarrollaron y profundizaron en las antiguas ideas griegas e indias y aportaron otras nuevas, como la posibilidad de que existiesen partículas más pequeñas que un átomo.

Al mismo tiempo que la influencia islámica empezaba a extenderse por Europa, las ideas atómicas islámicas, junto con las griegas e indias, comenzaron a difundirse por toda Europa a finales de la Edad Media. Estas teorías sin embargo tenían un factor común que era la indivisibilidad del átomo.

## **6.2.1.2. Teoría atómica moderna**

### **6.2.1.2.1. Nacimiento de la teoría atómica moderna**

#### *Modelo atómico de John Dalton*

En los primeros años del siglo XIX, John Dalton desarrolló su modelo atómico, en la que proponía que cada elemento químico estaba compuesto por átomos iguales y exclusivos, y que aunque eran indivisibles e indestructibles, se podían asociar para formar estructuras más complejas (los compuestos químicos). Esta teoría tuvo diversos precedentes.

El primero fue la ley de conservación de la masa, formulada por Antoine Lavoisier en 1789, que afirma que la masa total en una reacción química permanece constante. Esta ley le sugirió a Dalton la idea de que la materia era indestructible.

El segundo fue la ley de las proporciones definidas. Enunciada por el químico francés Joseph Louis Proust en 1799, afirma que, en un compuesto, los elementos que lo conforman se combinan en proporciones de masa definidas y características del compuesto.

Dalton estudió y amplió el trabajo de Proust para desarrollar la ley de las proporciones múltiples: cuando dos elementos se combinan para originar diferentes compuestos, dada una cantidad fija de uno de ellos, las diferentes cantidades del otro se combinan con dicha cantidad fija para dar como producto los compuestos, están en relación de números enteros sencillos.

En 1803, Dalton publicó su primera lista de pesos atómicos relativos para cierta cantidad de sustancias. Esto, unido a su rudimentario material, hizo que su tabla fuese muy poco precisa. Por ejemplo, creía que los átomos de oxígeno eran 5,5 veces más pesados que los átomos de hidrógeno, porque en el agua midió 5,5 gramos de oxígeno por cada gramo de hidrógeno y creía que la fórmula del agua era HO (en realidad, un átomo de oxígeno es 16 veces más pesado que un átomo de hidrógeno).

La ley de Avogadro le permitió deducir la naturaleza diatómica de numerosos gases, estudiando los volúmenes en los que reaccionaban. Por ejemplo: el hecho de que dos litros de hidrógeno reaccionasen con un litro de oxígeno para producir dos litros de vapor de agua (a presión y temperatura constantes), significaba que una única molécula de oxígeno se divide en dos para formar dos partículas de agua. De esta forma, Avogadro podía calcular estimaciones más exactas de la masa atómica del oxígeno y de otros elementos, y estableció la distinción entre moléculas y átomos.

En 1784, el botánico británico Robert Brown, observó que las partículas de polvo que flotaban en el agua se movían al azar sin ninguna razón aparente. En 1905, Albert Einstein tenía la teoría de que este movimiento browniano lo

causaban las moléculas de agua que "bombardeaban" constantemente las partículas, y desarrolló un modelo matemático hipotético para describirlo. El físico francés Jean Perrin demostró experimentalmente este modelo en 1911, proporcionando además la validación a la teoría de partículas (y por extensión, a la teoría atómica).

#### 6.2.1.2.2. Descubrimiento de las partículas subatómicas

\* *Modelo atómico de Thompson*

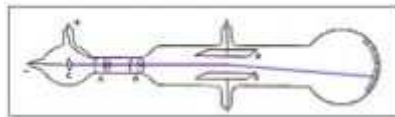


Figura No.18 Modelo Atómico de Thompson

El tubo de rayos catódicos de Thompson, en el que observó la desviación de los rayos catódicos por un campo eléctrico.

Hasta 1897, se creía que los átomos eran la división más pequeña de la materia, cuando J.J. Thompson descubrió el electrón mediante su experimento con el tubo de rayos catódicos. El tubo de rayos catódicos que usó Thompson era un recipiente cerrado de vidrio, en el cual los dos electrodos estaban separados por un vacío. Cuando se aplica una diferencia de tensión a los electrodos, se generan rayos catódicos, que crean un resplandor fosforescente cuando chocan con el extremo opuesto del tubo de cristal.

Mediante la experimentación, Thompson descubrió que los rayos se desviaban al aplicar un campo eléctrico (además de desviarse con los campos magnéticos, cosa que ya se sabía). Afirmó que estos rayos, más que ondas, estaban compuestos por partículas cargadas negativamente a las que llamó "corpúsculos" (más tarde, otros científicos las rebautizarían como *electrones*).

Thompson creía que los corpúsculos surgían de los átomos del electrodo. De esta forma, estipuló que los átomos eran divisibles, y que los corpúsculos eran sus componentes. Para explicar la carga neutra del átomo, propuso que los corpúsculos se distribuían en estructuras anilladas dentro de una nube positiva uniforme; éste era el modelo atómico de Thompson o "modelo del plum cake".

Ya que se vio que los átomos eran realmente divisibles, los físicos inventaron más tarde el término "partículas elementales" para designar a las partículas indivisibles.

#### 6.2.1.2.3. Descubrimiento del núcleo

\* *Modelo atómico de Rutherford*

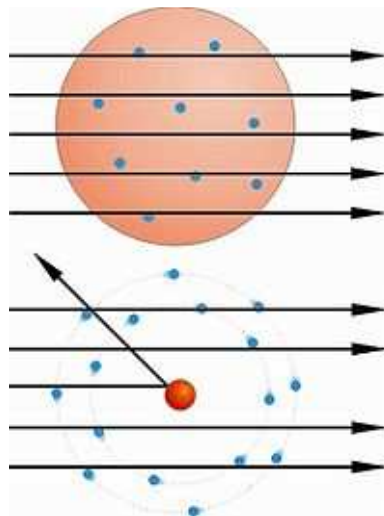


Figura No.19 Modelo Atómico de Rutherford

#### Experimento de la lámina de oro

*Arriba:* Resultados esperados: las partículas alfa pasan sin problemas por el modelo atómico de Thompson.

*Abajo:* Resultados observados: una pequeña parte de las partículas se desvía,

lo que revela la existencia de un lugar en el átomo donde se concentra la carga positiva.

El modelo atómico de Thompson fue refutado en 1909 por uno de sus estudiantes, Ernest Rutherford, que descubrió que la mayor parte de la masa y de la carga positiva de un átomo estaba concentrada en una fracción muy pequeña de su volumen, que suponía que estaba en el mismo centro.

En su experimento, Hans Geiger y Ernest Marsden bombardearon partículas alfa a través de una fina lámina de oro (que chocarían con una pantalla fluorescente que habían colocado rodeando la lámina). Dada la mínima como masa de los electrones, la elevada masa y momento de las partículas alfa y la distribución uniforme de la carga positiva del modelo de Thompson, estos científicos esperaban que todas las partículas alfa atravesasen la lámina de oro sin desviarse, o por el contrario, que fuesen absorbidas. Para su asombro, una pequeña fracción de las partículas alfa sufrió una fuerte desviación. Esto indujo a Rutherford a proponer el modelo planetario del átomo, en el que los electrones orbitaban en el espacio alrededor de un gran núcleo compacto, a semejanza de los planetas y el Sol.

#### **6.2.1.2.4. Descubrimiento de los isótopos**

En 1913, Thompson canalizó una corriente de iones de neón a través de campos magnéticos y eléctricos, hasta chocar con una placa fotográfica que había colocado al otro lado. Observó dos zonas incandescentes en la placa, que revelaban dos trayectorias de desviación diferentes.

Thompson concluyó que esto era porque algunos de los iones de neón tenían diferentes masas; así fue como descubrió la existencia de los isótopos (diferente número de neutrones, pero igualdad de protones y electrones)

#### **6.2.1.2.5. Descubrimiento del neutrón**

En 1918, Rutherford logró partir el núcleo del átomo al bombardear gas nitrógeno con partículas alfa, y observó que el gas emitía núcleos de hidrógeno. Rutherford concluyó que los núcleos de hidrógeno procedían de los núcleos de los mismos átomos de nitrógeno. Más tarde descubrió que la carga positiva de cualquier átomo equivalía siempre a un número entero de núcleos de hidrógeno.

Esto, junto con el hecho de que el hidrógeno —el elemento más ligero— tenía una masa atómica de 1, le llevó a afirmar que los núcleos de hidrógeno eran partículas singulares, constituyentes básicos de todos los núcleos atómicos: se había descubierto el protón. Un experimento posterior de Rutherford mostró que la masa nuclear de la mayoría de los átomos superaba a la de los protones que tenía. Por tanto, postuló la existencia de partículas sin carga, hasta entonces desconocidas más tarde llamadas neutrones, de donde provendría este exceso de masa.

En 1928, Walther Bothe observó que el berilio emitía una radiación eléctricamente neutra cuando se le bombardeaba con partículas alfa. En 1932, James Chadwick expuso diversos elementos a esta radiación y dedujo que ésta estaba compuesta por partículas eléctricamente neutras con una masa similar al de un protón. Chadwick llamó a estas partículas "neutrones".

#### **6.2.1.3. Modelos cuánticos del átomo**

Modelo atómico de Schrödinger, Modelo atómico de Bohr y Modelo atómico de Sommerfeld

El modelo planetario del átomo tenía sus defectos. En primer lugar, según la fórmula de Larmor del electromagnetismo clásico, una carga eléctrica en

aceleración emite ondas electromagnéticas, y una carga en órbita iría perdiendo energía y describiría una espiral hasta acabar cayendo en el núcleo. Otro fenómeno que el modelo no explicaba era por qué los átomos excitados sólo emiten luz con ciertos espectros discretos.

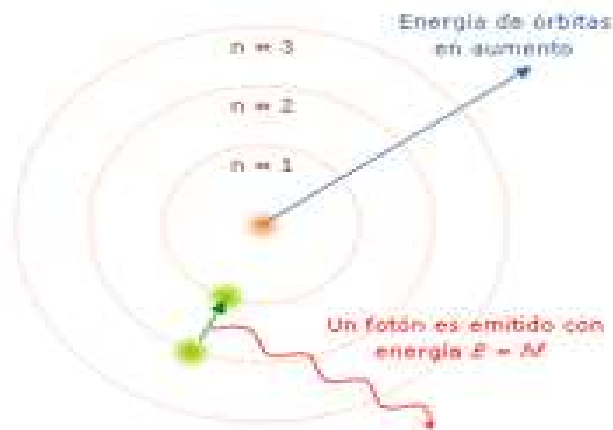


Figura No.20 Modelo Cuántico del Atómico

- **El modelo de Bohr**

La teoría cuántica revolucionó la física de comienzos del siglo XX, cuando Max Planck y Albert Einstein postularon que se emite o absorbe una leve cantidad de energía en cantidades fijas llamadas cuantos. En 1913, Niels Bohr incorporó esta idea a su modelo atómico, en el que los electrones sólo podrían orbitar alrededor del núcleo en órbitas circulares determinadas, con una energía y un momento angular fijos, y siendo proporcionales las distancias del núcleo a los respectivos niveles de energía.

Según este modelo, los átomos no podrían describir espirales hacia el núcleo porque no podrían perder energía de manera continua; en cambio, sólo podrían realizar "saltos cuánticos" instantáneos entre los niveles fijos de energía. Cuando esto ocurre, el átomo absorbe o emite luz a una frecuencia proporcional a la diferencia de energía (y de ahí la absorción y emisión de luz en los espectros discretos). Arnold Sommerfeld amplió el átomo de Bohr en 1916 para incluir órbitas elípticas, utilizando una cuantificación de momento

generalizado. El modelo de Bohr-Sommerfeld *ad hoc* era muy difícil de utilizar, pero a cambio hacía increíbles predicciones de acuerdo con ciertas propiedades espectrales. Sin embargo, era incapaz de explicar los átomos multielectrónicos, predecir la tasa de transición o describir las estructuras finas e hiperfinas.

En 1924, Louis de Broglie propuso que todos los objetos —particularmente las partículas subatómicas, como los electrones— podían tener propiedades de ondas. Erwin Schrödinger, fascinado por esta idea, investigó si el movimiento de un electrón en un átomo se podría explicar mejor como onda que como partícula. La ecuación de Schrödinger, publicada en 1926, describe al electrón como una función de onda en lugar de como una partícula, y predijo muchos de los fenómenos espectrales que el modelo de Bohr no podía explicar. Aunque este concepto era matemáticamente correcto, era difícil de visualizar, y tuvo sus detractores. Uno de sus críticos, Max Born, dijo que la función de onda de Schrödinger no describía el electrón, pero sí a muchos de sus posibles estados, y de esta forma se podría usar para calcular la probabilidad de encontrar un electrón en cualquier posición dada alrededor del núcleo.

En 1927, Werner Heisenberg indicó que, puesto que una función de onda está determinada por el tiempo y la posición, es imposible obtener simultáneamente valores precisos tanto para la posición como para el momento de la partícula para cualquier punto dado en el tiempo. Este principio fue conocido como principio de incertidumbre de Heisenberg.



Figura No.21 Orbitales Atómicos de un átomo de Neón

Los cinco orbitales atómicos de un átomo de neón, separados y ordenados en orden creciente de energía. En cada orbital caben como máximo dos electrones, que están la mayor parte del tiempo en las zonas delimitadas por las "burbujas".

Este nuevo enfoque invalidaba por completo el modelo de Bohr, con sus órbitas circulares claramente definidas. El modelo moderno del átomo describe las posiciones de los electrones en un átomo en términos de probabilidades. Un electrón se puede encontrar potencialmente a cualquier distancia del núcleo, pero —dependiendo de su nivel de energía— tiende a estar con más frecuencia en ciertas regiones alrededor del núcleo que en otras; estas zonas son conocidas como orbitales atómicos.

#### **6.2.1.4. Importancia**

La importancia de esta teoría no puede ser exagerada. Se ha dicho (por ejemplo el premio Nobel Richard Feynman) que la teoría atómica es la teoría más importante en la historia de la ciencia. Esto se debe a las implicaciones que ha tenido, tanto para la ciencia básica como por las aplicaciones que se han derivado de ella.

Toda la química y bioquímica modernas se basan en la teoría de que la materia está compuesta de átomos de diferentes elementos, que no pueden transmutarse por métodos químicos. Por su parte, la química ha permitido el desarrollo de la industria farmacéutica, petroquímica, de abonos, el desarrollo de nuevos materiales, incluidos los semiconductores, y otros avances.

### **6.3. ATOMOS CIGS**

#### **6.3.1. COBRE**

El metal cobre como tal, pensamos, no se use en la producción de celdas fotovoltaicas CIGS. Es el estado de oxidación el que tiene valor práctico: El óxido cuproso  $\text{Cu}_2\text{O}$  es el que al parecer tiene importancia. Por ello no nos vamos a referir al cobre como constitutivo de las celdas CIGS.

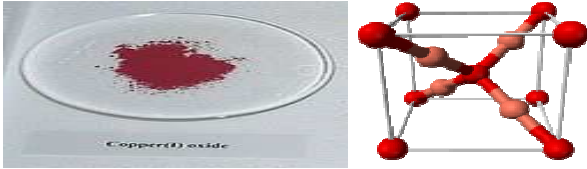
<b>Óxido de cobre (I)</b>	
	
<b>General</b>	
Nombre (IUPAC) sistemático	Óxido de cobre (I)
Otros nombres	Óxido cuproso Cuprita (mineral) Óxido de cobre rojo
Fórmula	$\text{Cu}_2\text{O}$
Masa molecular	143.09 g/mol
Aspecto	Sólido marrón-rojizo
número CAS	[1317-39-1]
<b>Propiedades</b>	
Densidad y fase	6.0 g/cm <sup>3</sup> , sólido
Solubilidad en agua	Insoluble
Etanol Solución acuosa amoniacal	Insoluble Soluble (forma complejos)
Temperatura de fusión	1235 °C (1508 K)
Descomposición a Cu + O <sub>2</sub>	1800 °C (2070 K)
Band gap	2.0 eV
<b>Estructura</b>	
Estructura cristalina	cúbica
<b>Peligros</b>	
Ficha de seguridad química	[1]
NFPA 704	
R/S	R: 22 S: 22
Número RTECS	GL8050000

Tabla No. 4 Datos Estadísticos del Cobre

### 6.3.2. INDIO

Es igualmente probable que el indio como metal no se utilice en la fabricación de celdas CIGS sino sus estados oxidados. Sin embargo estudiamos al el indio como tal.

General	
Nombre, símbolo, número	Indio, In, 49
Serie química	Metal del bloque <i>p</i>
Grupo, periodo, bloque	13, 5 , p
Densidad, dureza Mohs	7310 kg/m <sup>3</sup> , 1,2
Apariencia	Lustroso plateado grisáceo 
Propiedades atómicas	
Masa atómica	114,818 u
Radio medio <sup>†</sup>	155 pm
Radio atómico calculado	156 pm
Radio covalente	144 pm
Radio de Van der Waals	193 pm
Configuración electrónica	[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>1</sup>
Estados de oxidación (óxido)	3 (anfótero)
Estructura cristalina	Tetragonal
Propiedades físicas	
Estado de la materia	Sólido
Punto de fusión	429,75 K
Punto de ebullición	2345 K

Entalpía de vaporización	231,5 kJ/mol				
Entalpía de fusión	3,263 kJ/mol				
Presión de vapor	$1,42 \times 10^{-17}$ Pa a 429 K				
Velocidad del sonido	1215 m/s a 293,15 K				
Información diversa					
Electronegatividad	1,78 (Pauling)				
Calor específico	233 J/(kg·K)				
Conductividad eléctrica	$11,6 \times 10^6$ m <sup>-1</sup> ·Ω <sup>-1</sup>				
Conductividad térmica	81,6 W/(m·K)				
1 <sup>er</sup> potencial de ionización	558,3 kJ/mol				
2 <sup>o</sup> potencial de ionización	1820,7 kJ/mol				
3 <sup>er</sup> potencial de ionización	2704 kJ/mol				
4 <sup>o</sup> potencial de ionización	5210 kJ/mol				
Isótopos más estables					
iso.	AN	Periodo de semidesintegración	MD	ED MeV	PD
<sup>113</sup> In	4,3%	In es estable con 64 neutrones			
<sup>115</sup> In	<b>95,7%</b>	$4,41 \times 10^{14}$ a	β <sup>-</sup>	0,495	<sup>115</sup> Sn
<p>Valores en el SI y en condiciones normales (0 °C y 1 atm), salvo que se indique lo contrario. †Calculado a partir de distintas longitudes de enlace covalente, metálico o iónico.</p>					

Tabla No. 5 Datos Estadísticos del Indio

El **indio** es un elemento químico de número atómico 49 situado en el grupo 13 de la tabla periódica de los elementos. Su símbolo es **In**. Es un metal poco abundante, maleable, fácilmente fundible, químicamente similar al aluminio y al galio, pero más parecido al zinc (de hecho, la principal fuente de obtención de este metal es a partir de las minas de zinc).

Entre otras aplicaciones, se emplea para formar películas delgadas que sirven como películas lubricantes.

### 6.3.2.1. Características principales



Figura No.22 Lingote de Indio.

El indio es un metal blanco plateado, muy blando, que presenta un lustre brillante. Cuando se dobla el metal emite un sonido característico.

Su estado de oxidación más característico es el +3, aunque también presenta el +2 en algunos compuestos.

### 6.3.2.2. Aplicaciones

Se empleó principalmente durante la Segunda Guerra Mundial como recubrimiento en motores de alto rendimiento de aviones. Después de esto se ha destinado a nuevas aplicaciones en aleaciones, en soldadura y en la industria electrónica.

A mediados y finales de los años 1980 despertó interés el uso de fosfuros de indio semiconductores y películas delgadas de óxidos de indio y estaño para el desarrollo de pantallas de cristal líquido (LCD). Esto es debido a que el uso del indio permitió la obtención del color azul en diodos LED, que se había resistido durante años.

Otras aplicaciones:

- En la fabricación de aleaciones de bajo punto de fusión. Una aleación con un 24% de indio y un 76% de galio es líquida a temperatura ambiente.

- Para hacer fotoconductores, transistores de germanio, rectificadores y termistores.
- Se puede depositar sobre otros metales y evaporarse sobre un vidrio formando un espejo tan bueno como los hechos con plata, pero más resistente a la corrosión.
- Su óxido se emplea en la fabricación de paneles electroluminiscentes.

### **6.3.2.3. Historia**

El indio (nombre procedente de la línea de color índigo de su espectro atómico) fue descubierto por Ferdinand Reich y Theodor Richter en 1863 cuando estaban buscando talio en unas minas de cinc mediante un espectrógrafo. Fue aislado por Ritcher en 1867.

### **6.3.2.4. Abundancia y obtención**

Se produce principalmente a partir de los residuos generados durante el procesado de minas de Zinc. También se encuentra en minas de hierro, plomo y cobre. Se obtiene mediante la electrólisis de sus sales.

La cantidad de indio consumido está muy relacionada con la producción mundial de pantallas de cristal líquido (LCD). El aumento de la eficiencia de producción y reciclado (especialmente en Japón) mantiene el equilibrio entre la demanda y el suministro. El precio medio del indio en el 2000 fue de 188 dólares por kilogramo.



Hasta 1924 sólo había un gramo aislado del elemento en el mundo. Se estima que en la corteza terrestre hay unos 0,1 ppm de indio (aproximadamente tan abundante como la plata). El principal productor de indio es Canadá, que produjo 31.100 kg en 1997.

### 6.3.2.5. Precauciones

Hay ciertas evidencias no confirmadas que sugieren que el indio presenta una toxicidad baja. Sin embargo, en la industria de semiconductores y de soldadura, en donde las exposiciones son relativamente altas, no ha habido noticias de efectos colaterales.

### 6.3.3. GALIO

Igual que los otros elementos nos es indicativo que el galio no es utilizado en la fabricación de celdas CIGS, sino el arseniuro de galio. Estudiaremos en la presente monografía ambos elementos.

<p>Zinc - Galio - Germanio</p> <p>Al</p> <p><b>Ga</b></p> <p>In</p>  <p>Tabla completa</p>	
General	
Nombre, símbolo, número	Galio, Ga, 31
Serie química	Metales del bloque <i>p</i>
Grupo, periodo, bloque	13, 4 , <i>p</i>
Densidad, dureza Mohs	5904 kg/m <sup>3</sup> , 1,5
Apariencia	blanco plateado 
Propiedades atómicas	
Masa atómica	69,723 u
Radio medio <sup>†</sup>	130 pm
Radio atómico calculado	136 pm

Radio covalente	126 pm				
Radio de Van der Waals	187 pm				
Configuración electrónica	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup>				
Estados de oxidación (Óxido)	3 (anfótero)				
Estructura cristalina	Ortorrómico				
Propiedades físicas					
Estado de la materia	Sólido				
Punto de fusión	302,91 K				
Punto de ebullición	2477 K				
Entalpía de vaporización	258,7 Kg/mol				
Entalpía de fusión	5,59 Kg/mol				
Presión de vapor	9,31 × 10 <sup>-36</sup> Pa a 302,9 K				
Velocidad del sonido	2740 m/s a 293,15 K				
Información diversa					
Electronegatividad	1,81 (Pauling)				
Calor específico	370 J/(kg*K)				
Conductividad eléctrica	6,78 10 <sup>6</sup> m <sup>-1</sup> ·Ω <sup>-1</sup>				
Conductividad térmica	40,6 W/(m*K)				
1 <sup>er</sup> potencial de ionización	578.8 Kg/mol				
2 <sup>o</sup> potencial de ionización	1979.3 Kg/mol				
3 <sup>er</sup> potencial de ionización	2963 Kg/mol				
4 <sup>o</sup> potencial de ionización	6180 Kg/mol				
Isótopos más estables					
ISO.	AN	periodo de semidesintegración	MD	ED MeV	PD
<sup>69</sup> Ga	60,1%	Ga es estable con 38 neutrones			
<sup>71</sup> Ga	39,9%	Ga es estable con 39 neutrones			
<p>Valores en el <b>SI</b> y en condiciones normales (0 <b>°C</b> y 1 <b>atm</b>), salvo que se indique lo contrario.</p> <p>†Calculado a partir de distintas longitudes de enlace covalente, metálico o iónico.</p>					

Tabla No. 6 Datos Estadísticos del Galio.

El **galio** es un elemento químico de la tabla periódica de número atómico 31 y símbolo **Ga**.

### **6.3.3.1. Características principales**

El galio es un metal blando, grisáceo en estado líquido y plateado brillante al solidificar, sólido deleznable a bajas temperaturas que funde a temperaturas cercanas a la de la ambiente (como cesio, mercurio y rubidio) e incluso cuando se lo agarra con la mano por su bajo punto de fusión (28,56 °C). El rango de temperatura en el que permanece líquido es uno de los más altos de los metales (2174 °C separan sus punto de fusión y ebullición) y la presión de vapor es baja incluso a altas temperaturas. El metal se expande un 3,1% al solidificar y flota en el líquido al igual que el hielo en el agua.

Presenta una acusada tendencia a subenfriarse por debajo del punto de fusión (permaneciendo aún en estado líquido) por lo que es necesaria una semilla (un pequeño sólido añadido al líquido) para solidificar el líquido. La cristalización no se produce en ninguna de las estructuras simples; la fase estable en condiciones normales es ortorrómbica, con 8 átomos en cada celda unitaria en la que cada átomo sólo tiene otro en su vecindad más próxima a una distancia de 2,44 Å y estando los otros seis a 2,83 Å. En esta estructura el enlace químico formado entre los átomos más cercanos es covalente siendo la molécula Ga<sub>2</sub> la que realmente forma el entramado cristalino.

A otra presión y temperatura se han encontrado numerosas fases estables y meta estables distintas. El galio corroe otros metales al difundirse en sus redes cristalinas.

### **6.3.3.2. Aplicaciones**

La principal aplicación del galio (arseniuro de galio) es la construcción de circuitos integrados y dispositivos optoelectrónicos como diodos láser y LED.

- Se emplea para dopar materiales semiconductores y construir dispositivos diversos como transistores.
- En termómetros de alta temperatura por su bajo punto de fusión.
- El galio se alea con facilidad con la mayoría de los metales y se usa en aleaciones de bajo punto de fusión.
- El isótopo Ga-67 se usa en medicina nuclear.
- *Se ha descubierto recientemente que aleaciones galio-aluminio en contacto con agua produce una reacción química dando como resultado hidrógeno. Este método para la obtención de hidrógeno no es rentable, ni ecológico, ya que requiere la doble fundición del aluminio, con el consiguiente gasto energético.*

#### **6.3.3.3. Historia**

El galio (del latín *Gallia*, Francia), fue descubierto mediante espectroscopia por Lecoq de Boisbaudran en 1875 por su característico espectro (dos líneas ultravioletas) al examinar una blenda de zinc procedente de los Pirineos.

Ese mismo año lo aisló por electrólisis del hidróxido en una solución de hidróxido potásico (KOH) y le dio el nombre de su país natal *Gallia*, y el suyo propio por un juego de palabras de los que gustaban a los científicos de finales del siglo XIX ya que *gallus* significa gallo, *coq* en francés como su nombre Lecoq.

Antes de su descubrimiento la mayoría de sus propiedades fueron predichas y descritas por Mendeleev —que lo llamó *eka-aluminio*— basándose en la posición que debía ocupar el elemento en la tabla periódica.

#### **6.3.3.4. Abundancia y obtención**

Se hallan trazas del metal en minerales como la bauxita, carbón, diásporo, germanita y esfalerita y es subproducto en los procesos de obtención de varios metales.

#### **6.3.3.5. Isótopos**

En medicina nuclear se emplea el galio como elemento trazador (escáner de galio) para el diagnóstico de enfermedades inflamatorias o infecciosas activas, tumores y abscesos ya que se acumula en los tejidos que sufren dichas patologías.

El isótopo Ga-67 se inyecta en el torrente sanguíneo a través de una vena del brazo en la forma de citrato de galio realizándose el escáner 2 o tres días después para dar tiempo a que éste se acumule en los tejidos afectados. Posteriormente se elimina principalmente en la orina y las heces. La exposición a la radiación es inferior a la debida a otros procedimientos como los rayos X o TAC.

#### **6.3.3.6. Precauciones**

Debido a la expansión al solidificar el líquido no debe almacenarse en recipientes rígidos (metálicos o de vidrio) ni llenarse el recipiente totalmente con galio líquido.

### 6.3.4. ARSENIURO DE GALIO

Arseniuro de galio	
<b>General</b>	
Nombre	Arseniuro de galio
Fórmula química	GaAs
Masa molar	144.645 g/mol
Apariencia	Cristales cúbicos grises
Número CAS	Plantilla: CASREF
<b>Propiedades</b>	
Densidad y estado	5.3176 g/cm <sup>3</sup> , sólido.
Solubilidad en agua	< 0.1 g/100 ml (20°C)
Punto de fusión	1238°C (1511 K)
Punto de ebullición	?°C (? K)
<b>Propiedades electrónicas</b>	
Ancho de banda prohibida a 300 K	1.424 eV
Masa efectiva del electrón	0.067 m <sub>e</sub>
Masa efectiva Light hole	0.082 m <sub>e</sub>
Masa efectiva Heavy hole	0.45 m <sub>e</sub>
Movilidad del electrón a 300 K	9200 cm <sup>2</sup> /(V·s)
Movilidad del hueco a 300 K	400 cm <sup>2</sup> /(V·s)
<b>Estructura</b>	
Estructura cristalina	Cúbica (Zinc Blenda)
A no ser que se diga lo contrario, estos datos son para materiales en condiciones normales (a 25°C, 100 kPa)	

Tabla No. 7 Datos Estadísticos del Arseniuro de Galio.

El **Arseniuro de galio** (GaAs) es un compuesto de galio y arsénico. Es un importante semiconductor y se usa para fabricar dispositivos como circuitos integrados a frecuencias de microondas, diodos de emisión infrarroja, diodos láser y células fotovoltaicas.

#### Contenido

- 4.1 GaAs en tecnologías de altas frecuencias
  - 1.1 GaAs vs. Si y Ge
- 4.2 Materiales relacionados

#### **6.3.4.1. GaAs en tecnologías de altas frecuencias**

La masa efectiva de la carga eléctrica del GaAs tipo n dopado es menor que en el silicio del mismo tipo, por lo que los electrones en GaAs se aceleran a mayores velocidades, tardando menos en cruzar el canal del transistor. Esto es muy útil en altas frecuencias, ya que se alcanzará una frecuencia máxima de operación mayor.

Esta posibilidad y necesidad de trabajar con circuitos que permitan actuar a mayores frecuencias tiene su origen en las industrias de defensa y espacial., en el uso de radares, comunicaciones seguras y sensores. Tras el desarrollo por parte de programas federales, pronto el GaAs se extendió a los nuevos mercados comerciales, como redes de área local inalámbricas (WLAN), sistemas de comunicación personal (PCS), transmisión en directo por satélite (DBS), transmisión y recepción por el consumidor, sistemas de posicionamiento global (GPS) y comunicaciones móviles. Todos estos mercados requerían trabajar a frecuencias altas y poco ocupadas que no podían alcanzarse con silicio ni germanio.

Además, esto ha afectado a la filosofía de fabricación de semiconductores, empleándose ahora métodos estadísticos para controlar la uniformidad y asegurar la mejor calidad posible sin afectar gravemente al coste. Todo esto posibilitó también la creación de nuevas técnicas de transmisión digital a mayor potencia de radiofrecuencia y amplificadores de baja tensión/bajo voltaje para maximizar el tiempo de operación y de espera en dispositivos alimentados por baterías.

#### **GaAs vs. Si y Ge**

Las propiedades físicas y químicas del GaAs complican su uso en la fabricación de transistores al ser un compuesto binario con una conductividad térmica menor y un mayor coeficiente de expansión térmica (CET o CTE),

mientras que el silicio y el germanio son semiconductores elementales. Además, los fallos en dispositivos basados en GaAs son más difíciles de entender que aquellos en el silicio y pueden resultar más caros, al ser su uso mucho más reciente.

Pero comparando la relación calidad y precio, el valor añadido del GaAs compensa los costes de fabricación, además de que los mercados indicados están en continuo crecimiento, que demandan esta tecnología que permita mayores frecuencias, lo que ayudará a abaratar costes.


#### 6.3.4.2. Materiales relacionados

- Arseniuro de aluminio (Alas)
- Arseniuro de indio (Unas)
- Antimoniuro de galio (Gas)
- Fosfato de galio (Gap)
- Arseniuro de galio y aluminio (Algas)
- Arseniuro de indio y galio (Ganas)
- Fosfuro de galio y arsénico (Gas)

Nitrato de galio (Gana)

#### 6.3.5. SELENIO

General	
Nombre, símbolo, número	Selenio, Se, 34
Serie química	No metal
Grupo, periodo, bloque	16, 4, p

Densidad, dureza Mohs	4790 kg/m <sup>3</sup> (300K), 2				
Apariencia	gris metálico 				
<b>Propiedades atómicas</b>					
Masa atómica	78,96 u				
Radio medio <sup>†</sup>	115 pm				
Radio atómico calculado	103 pm				
Radio covalente	116 pm				
Radio de Van der Waals	190 pm				
Configuración electrónica	[Ar]3d <sup>10</sup> 4p <sup>4</sup> 4s <sup>2</sup>				
Estados de oxidación (óxido)	±2, <b>4</b> ,6 (ácido fuerte)				
Estructura cristalina	Hexagonal				
<b>Propiedades físicas</b>					
Estado de la materia	sólido (—)				
Punto de fusión	494 K				
Punto de ebullición	957,8 K				
Entalpía de vaporización	26,3 KJ/mol				
Entalpía de fusión	6,694 KJ/mol				
Presión de vapor	0,695 Pa a 494 K				
Velocidad del sonido	3350 m/s a 293,15 K				
<b>Información diversa</b>					
Electronegatividad	2,48 (Pauling)				
Calor específico	320 J/(kg*K)				
Conductividad eléctrica	1,0 × 10 <sup>-10</sup> x 10 <sup>6</sup> m <sup>-1</sup> ·Ω <sup>-1</sup>				
Conductividad térmica	2,04 W/(m*K)				
1 <sup>er</sup> potencial de ionización	941 KJ/mol				
2 <sup>o</sup> potencial de ionización	2045 KJ/mol				
3 <sup>er</sup> potencial de ionización	2973,7 KJ/mol				
4 <sup>o</sup> potencial de ionización	4144 KJ/mol				
<b>Isótopos más estables</b>					
ISO.	AN	periodo de semidesintegración	MD	ED MeV	PD
<sup>72</sup> Se	Sintético	8,4 d	ε	0,335	<sup>72</sup> As
<sup>74</sup> Se	0,87%	Se es estable con 40 neutrones			
<sup>75</sup> Se	Sintético	119,779 d	ε	0,864	<sup>75</sup> As

<sup>76</sup> Se	9,36%	Se es estable con 42 neutrones			
<sup>77</sup> Se	7,63%	Se es estable con 43 neutrones			
<sup>78</sup> Se	23,78%	Se es estable con 44 neutrones			
<sup>79</sup> Se	Sintético	1,13 × 10 <sup>6</sup> a	β	0,151	<sup>79</sup> Br
<sup>80</sup> Se	<b>49,61%</b>	Se es estable con 46 neutrones			
<sup>82</sup> Se	8,73%	1,08 × 10 <sup>20</sup> y	β	2,995	<sup>82</sup> Kr

**Valores en el SI y en condiciones normales (0 °C y 1 atm), salvo que se indique lo contrario.  
†Calculado a partir de distintas longitudes de enlace covalente, metálico o iónico.**

**Tabla No. 8** Datos Estadísticos del Selenio.

El **selenio** es un elemento químico de la tabla periódica cuyo símbolo es **Se** y su número atómico es 34.

#### 6.3.5.1. Características principales

El selenio se puede encontrar en varias formas alotrópicas. El selenio amorfo existe en dos formas, la vítrea, **negra**, obtenida al enfriar rápidamente el selenio líquido, funde a 180 °C y tiene una densidad de 4,28 g/cm<sup>3</sup>, la roja, coloidal, se obtiene en reacciones de reducción; el selenio gris cristalino de estructura hexagonal, la forma más común, funde a 220,5 °C y tiene una densidad de 4,81 g/cm<sup>3</sup>; y la forma roja, de estructura monoclinica, funde a 221 °C y tiene una densidad de 4,39 g/cm<sup>3</sup>.

Es insoluble en agua y alcohol, ligeramente soluble en disulfuro de carbono y soluble en éter.

Exhibe el efecto fotoeléctrico, convirtiendo la luz en electricidad, y, además, su conductividad eléctrica aumenta al exponerlo a la luz. Por debajo de su punto

de fusión es un material semiconductor tipo p. y se encuentra en su forma natural.

#### **6.3.5.2. Aplicaciones**

El selenio se usa en varias aplicaciones eléctricas y electrónicas, entre otras células solares y rectificadores. En fotografía se emplea para intensificar e incrementar el rango de tonos de las fotografías en blanco y negro y la durabilidad de las imágenes, así como en xerografía. Se añade a los aceros inoxidable y se utiliza como catalizador en reacciones de deshidrogenación.

- El seleniato de sodio se usa como insecticida, en medicina para el control de enfermedades animales y, al igual que el arsénico, en la fabricación de vidrio para eliminar el color verde causado por las impurezas de hierro.
- El selenito de sodio también se emplea en la industria del vidrio y como aditivo para suelos pobres en selenio y el selenito de amonio en la fabricación de vidrio y esmalte rojos.
- Los sulfuros se usan en medicina veterinaria y champús anticaspa.
- El dióxido de selenio es un catalizador adecuado para la oxidación, hidrogenación y deshidrogenación de compuestos orgánicos.
- La adición de selenio mejora la resistencia al desgaste del caucho vulcanizado.
- Según un artículo de octubre de 2008<sup>1</sup> el selenio podría ayudar a reducir la expresión del VIH, mejorando el estado de los pacientes con SIDA.

#### **6.3.5.3. Papel biológico**

El selenio es un micronutriente para todas las formas de vida conocidas que se encuentra en el pan, los cereales, el pescado, las carnes y los huevos. Es antioxidante, ayuda a neutralizar los radicales libres, induce la apoptosis,

estimula el sistema inmunológico e interviene en el funcionamiento de la glándula tiroides. Está presente en el aminoácido selenocisteína y también se puede encontrar como selenometionina reemplazando al azufre de la metionina. Las investigaciones realizadas han mostrado la existencia de una correlación entre el consumo de suplementos de selenio y la prevención del cáncer en humanos.

Aún es tema de investigación, pero se sabe que la forma química en la que se encuentra el selenio (selenito, selenato o selenoaminoácidos) afecta a su absorción y a su posible toxicidad. Los datos actuales apuntan a que la forma orgánica (formando parte de proteínas como selenoaminoácidos) es la más beneficiosa para los animales. Además potencia el buen humor.

La deficiencia de selenio es relativamente rara, pero puede darse en pacientes con disfunciones intestinales severas o con nutrición exclusivamente parenteral, así como en poblaciones que dependan de alimentos cultivados en suelos pobres en selenio. La ingesta diaria recomendada para adultos es de 55-70 µg; más de 400 µg puede provocar efectos tóxicos (selenosis).

#### **6.3.5.4. Historia**

El selenio (del griego σελήνιον, resplandor de la Luna) fue descubierto en 1817 por Jöns Jacob Berzelius. Al visitar la fábrica de ácido sulfúrico de Gripsholm observó un líquido pardo rojizo que calentado al soplete desprendía un olor fétido que se consideraba entonces característico y exclusivo del telurio —de hecho su nombre deriva de su relación con este elemento ya que telurio proviene del latín Tellus, la Tierra— resultando de sus investigaciones el descubrimiento del selenio. Más tarde, el perfeccionamiento de las técnicas de análisis permitió detectar su presencia en distintos minerales pero siempre en cantidades extraordinariamente pequeñas.

### 6.3.5.5. Abundancia y obtención

El selenio se encuentra muy distribuido en la corteza terrestre en la mayoría de las rocas y suelos se halla en concentraciones entre 0,1 y 2,0 ppm. Raramente se encuentra en estado nativo obteniéndose principalmente como subproducto en el refinado del cobre ya que aparece en los lodos de electrólisis junto al telurio (5-25% Se, 2-10% Te). La producción comercial se realiza por tostación con cenizas de sosa o ácido sulfúrico de los lodos.

Primeramente se añade un aglomerante de cenizas de sosa y agua a los lodos para formar una pasta dura que se extruye o corta en pastillas para proceder a su secado. La pasta se tuesta a 530-650 °C y se sumerge en agua resultando selenio hexavalente que se disuelve como selenato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SeO}_4$ ). Este se reduce a seleniuro de sodio calentándolo de forma controlada obteniendo una solución de un vivo color rojo. Inyectando aire en la solución el seleniuro se oxida rápidamente obteniéndose el selenio. La reducción del selenio hexavalente también puede hacerse empleando ácido clorhídrico concentrado, o sales ferrosas y iones cloro como catalizadores.

El segundo método consiste en mezclar los lodos de cobre con ácido sulfúrico tostando la pasta resultante a 500-600 °C para obtener dióxido de selenio que rápidamente se volatiliza a la temperatura del proceso. Este se reduce a selenio elemental durante el proceso de lavado con dióxido de azufre y agua, pudiendo refinarse posteriormente hasta alcanzar purezas de 99,5-99,7% de selenio.

Los recursos de selenio asociados a los depósitos de cobre identificados rondan las 170.000 toneladas y se estima que existen alrededor de 425.000 toneladas más en depósitos de cobre y otros metales aún no explotados. El carbón suele contener entre 0,5 y 12 ppm de selenio, es decir, unas 80 o 90

veces el promedio que se encuentra en las menas de cobre, sin embargo su recuperación no se prevé que pueda realizarse en un futuro próximo.

#### **6.3.5.6. Isótopos**

El selenio-75 se emplea en radiodiagnóstico como trazador en la visualización de tumores malignos.

#### **6.3.5.7. Precauciones**

El selenio está considerado un elemento peligroso para el medio ambiente por lo que sus compuestos deben almacenarse en áreas secas evitando filtraciones que contaminen las aguas. Los residuos de selenio se tratan en solución ácida con sulfito de sodio, calentándolo después para obtener el selenio elemental que presenta una menor biodisponibilidad.

## **7. ALCANCES**

Se tiene proyectado iniciar el estudio y las investigaciones para lograr la tecnología de Celdas Fotovoltaicas CIGS de película delgada dentro de un período de tiempo de 3 años. El logro de éste objetivo se hará posible dependiendo del apoyo que nos pueda ofrecer la Universidad Industrial de Santander, Gobierno Nacional y Empresas Privadas.

Igualmente Universidades locales como la Universidad Pontificia Bolivariana y la Universidad Autónoma de Bucaramanga, han manifestado su interés en éste tipo de investigaciones. ECOPETROL en su Plan de Negocios a largo plazo contempla la posibilidad de participación en éste tipo de investigaciones.

## 8. LIMITACIONES

Fundamentalmente las limitaciones pueden resumirse en dos:

1. En la creación de un equipo humano multidisciplinario que tenga la motivación suficiente para lograr los objetivos. Este estaría conformado por:

- ✓ Químico puro.
- ✓ Ingeniero Químico.
- ✓ Ingeniero eléctrico.
- ✓ Ingeniero electrónico.
- ✓ Físico Puro.
- ✓ Matemático.
- ✓ Ingeniero Mecánico.
- ✓ Ingeniero Metalúrgico.
- ✓ Ingeniero Ambiental.
- ✓ Personal de Soporte Administrativo.

2. Este punto se refiere a las limitantes de tipo financiero. Sin embargo existe en el mundo actual la suficiente motivación para financiar proyectos que con lleven a un mejoramiento del medio ambiente, que sean sustentable y ambientalmente limpias. El sector energético por ser prioridad mundial debe contar con los recursos económicos para el desenvolvimiento de las nuevas tecnologías.

## **9. METODOLOGIA**

Como se está en una etapa previa al desarrollo del proceso de investigación la metodología a seguir sería la adquisición del conocimiento teórico asociada a prácticas de laboratorio que definan con claridad suficiente el fenómeno fotovoltaico.

Conocer a fondo la física atómica y Teorías Electromagnéticas de cada uno de los elementos que participan en la creación de la celda CIGS.

## **10. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES**

Una vez aprobado el presente proyecto se pasaría a la sustentación. Más adelante se buscaría el apoyo por parte de la Universidad Industrial de Santander (UIS), u otras Universidades, así como de entes privados para lograr la aprobación y puesta en marcha de un grupo de Investigación dentro del Alma Mater de la Universidad, ó Universidades, conformándose primariamente el grupo de trabajo. Para ello se necesitarían de 6 a 10 meses.

Una vez logrado el anterior punto se pasaría a desarrollar la Tecnología para la Producción de Células CIGS. Una vez logrado ello, en un término de 3 años, se pasaría a buscar los Inversionistas para entrar en la etapa de producción y comercialización de las Celdas Fotovoltaicas CIGS.

## **11. PRESUPUESTO**

Hasta la definición de la creación por parte de la Universidad, Universidades ó Grupos de Inversionistas Privados del grupo de investigación, los recursos serian los propios de los gestores de la idea, hasta tanto se ponga en marcha la creación del grupo de investigadores.

Una vez creado el grupo de investigación se pasaría a practicar un análisis financiero y de desarrollo de la matriz tecnológica para el cumplimiento de la Investigación que conlleve la producción de células CIGS.

## BIBLIOGRAFIA

1. Waldner, Jean-Baptiste (2008). Nanocomputers and Swarm Intelligence. ISTE John Wiley & Sons, p172.
2. Engine of creation – Drexler K.E. (1986) New York Doubleday.
3. Unbounding the Futura – Drexler K.E 1991) New York William Morrow.
4. Nanosystems – Drexler K.E. (1991) New York Wiley & Sons.
5. Nanotechnology Research and Perspectives – Crandall (1992) Cambridge: M.I.T. Press.
7. Empresa Editora el Comercio - Lima, Perú Páginas 151 – 152.
8. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN FACULTAD DE MEDICINA Trabajo de referencia bibliográfica: La Nanotecnología.
9. Revista PCWORLD N°274, pag. 14, 2002.
10. Nanotecnología: Ciencia de lo diminuto. Mario I. Molina Abril 2002.
11. <http://www.el-planeta.com/futur/nano0700.htm> Pagina en donde se encuentra el artículo: “Introducción a la Nanotecnología”
12. <http://www.tercera.cl/diario/2000/02/06/t-06.24.3a.CYS.FUTURISTAS.html> Pagina en donde se encuentra el articulo: “Las futuristas promesas de la nanotecnología” Noemí Miranda.
13. <http://www.fsp.csic.es/elmundo/elmundo.htm> Pagina en donde se encuentra el artículo: “Ciencia y tecnología: La Nanotecnología “ Nicolas García García y Heinrich Rohrer .
14. <http://quantum.ucting.udg.mx/~nda67662/pag1.html> NANOROBOTICA.

15. [http://www.diariored.com/analisis/2002\\_01\\_28\\_12\\_50\\_48.html](http://www.diariored.com/analisis/2002_01_28_12_50_48.html) Pagina en donde se encuentra el artículo: "Nanotecnología, un sueño al alcance del futuro" Antonio Alonso.
16. <http://www.elpais.es/suplementos/futuro/20010509/33nano.html> Pagina en donde se encuentra el artículo: "La nanotecnología cobra vida propia" Malen Ruiz de Elvira.
17. <http://www.cienciadigital.net/enero2001/nano.html> Pagina en donde se encuentra el artículo: "Nanotecnología: camino hacia el microcosmos" Elvira Fernández.
18. <http://salud.discoveryespanol.com/vertical/a154/dsea15403.asp> Hombre Biónico.