



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Mecánica-Eléctrica

**ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DEL RADAR LÁSER (LIDAR)
PARA EL MONITOREO DEL LÍMITE DE VELOCIDAD EHCULAR
EN TRAMOS PELIGROSOS SOBRE CARRETERAS EN
GUATEMALA.**

Robin Sickwal Ruiz Manuel

Asesorado por Inga. Ingrid Salome Rodríguez de Loukota

Guatemala, Agosto de 2005.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DEL RADAR LÁSER (LIDAR)
PARA EL MONITOREO DEL LÍMITE DE VELOCIDAD VEHICULAR
EN TRAMOS PELIGROSOS SOBRE CARRETERAS EN
GUATEMALA.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ROBIN SICKWAL RUIZ MANUEL

ASESORADO POR

INGA. INGRID SALOME RODRIGUEZ DE LOUKOTA

AI CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, AGOSTO DE 2005.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Alvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Duran Cordova
EXAMINADOR	Ing. Fernando Waldemar de León Contreras
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DEL RADAR LÁSER (LIDAR)
PARA EL MONITOREO DEL LÍMITE DE VELOCIDAD VEHICULAR
EN TRAMOS PELIGROSOS SOBRE CARRETERAS EN
GUATEMALA.**

Tema que fuera asignado por la dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica- Eléctrica con fecha de 9 de febrero de 2005.

Robin Sickwal Ruiz Manuel

AGRADECIMIENTO A:

La vida.

MIS PADRES

Felipa Manuel Quisque y Mariano Ruiz Xitumul.
Por el incansable sacrificio, cariño y apoyo.

MIS HERMANOS

Por el apoyo incondicional que siempre me han
brindado.

Griselda González.
Por su apoyo permanente.

MIS AMIGOS

Gracias por su cariño y amistad.

MIS CATEDRÁTICOS

Especialmente a Inga. Ingrid Rodríguez de Loukota.
Por su asesoría y apoyo en la elaboración del
trabajo de graduación.

La Universidad de San Carlos de Guatemala, y a la
Facultad de Ingeniería.

FEP Maya.
Por el apoyo recibido durante la carrera universitaria.

Usted especialmente.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO.....	X
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVI
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1 LA CINEMÁTICA DE LOS AUTOMOTORES	1
1.1 Cinemática.....	1
1.1.1 Partícula.....	2
1.1.2 Trayectoria.....	2
1.1.3 Posición.....	3
1.1.4 Desplazamiento.....	3
1.1.5 Velocidad.....	6
1.1.5.1 Velocidad media.....	7
1.1.5.2 Velocidad Instantánea.....	8
1.1.6 Aceleración.....	10
1.1.6.1 Aceleración media.....	11
1.1.6.2 Aceleración Instantánea.....	11
1.1.6.3 Componentes intrínsecos.....	12
1.2 Impacto del exceso de velocidad.....	14
1.2.1 La velocidad de operación.....	14
1.2.2 La velocidad de diseño.....	14
1.2.3 Exceso de velocidad.....	15
1.2.4 Consecuencia del exceso de velocidad.....	15
2 ANÁLISIS REALIZADO POR INGENIERÍA DE TRÁNSITO PARA IDENTIFICAR LAS RUTAS Y TRAMOS DE ALTO RIESGO EN GUATEMALA.	19
2.1 Identificación de los puntos de alto riesgo sobre la carretera CA-9 Norte.....	23

3	PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DEL RADAR LÁSER	25
3.1	Principios sobre la naturaleza de la luz.....	26
3.1.1	Teoría corpuscular.....	26
3.1.2	Teoría ondulatoria.....	28
3.1.3	Teoría electromagnética.....	34
3.1.4	Teoría cuántica.....	39
3.1.5	Dualidad de la luz (onda-partícula).....	45
3.2	Espectro electromagnético.....	50
3.3	Principios de la luz láser.....	52
3.3.1	Funcionamiento del láser.....	55
3.3.1.1	Absorción y emisión espontánea.....	55
3.3.1.2	Emisión estimulada.....	57
3.3.2	Componentes del láser.....	58
3.3.2.1	Medio activo.....	59
3.3.2.2	Fuente de energía.....	59
3.3.2.3	Cavidad resonante.....	60
3.3.3	Tipos de láser.....	61
3.3.3.1	Láser de estado sólido.....	61
3.3.3.2	Láser de gas.....	62
3.3.3.3	Láser de colorante	62
3.3.3.4	Láser semiconductor.....	63
3.4	Principios físicos de la refracción y reflexión de la luz.....	64
3.4.1	La Reflexión de la luz.....	64
3.4.2	La Refracción de la luz.....	65
3.4.3	Reflexión interna total.....	66
3.5	Principios sobre sistemas ópticos.....	67
3.5.1	Lentes.....	68
3.5.1.1	Lentes planos.....	69
3.5.1.2	Lentes convergentes.....	70
3.5.1.3	Lentes divergentes.....	71
3.5.2	Espejos.....	72
3.5.2.1	Espejo plano.....	72
3.5.2.2	Espejo cóncavo.....	73
3.5.2.3	Espejo convexo.....	74
3.5.3	Ecuación del espejo y lente.....	75
3.5.3.1	Ecuación del espejo.....	75
3.5.3.2	La ecuación de una lente.....	77
3.5.4	Aberraciones en los lentes ópticos.....	79
3.5.4.1	Aberración esférica.....	80
3.5.4.2	Aberración cromática.....	81

4	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL RADAR LÁSER (LIDAR) Y SUS BLOQUES COMPONENTES	83
4.1	Descripción general del Lidar.....	83
4.1.1	Ecuación del Lidar.....	86
4.2	Componentes por bloques del radar láser.....	89
4.2.1	Sistema transmisor.....	90
4.2.1.1	Subsistema de emisión del pulso láser....	90
4.2.1.1.1	Descripción del diodo láser.....	90
4.2.1.1.2	Circuito generador de pulsos..	99
4.2.1.2	Sistema óptico para la emisión láser.....	100
4.2.2	Sistema receptor.....	104
4.2.2.1	Receptor óptico.....	104
4.2.2.2	Detector coherente heterodino.....	105
4.2.2.2.1	Foto-detector.....	109
4.2.2.2.1.1	Descripción del diodo PIN.....	110
4.2.2.3	Procesamiento de la señal eléctrica.....	116
4.2.2.4	Comparación con el límite de velocidad y su visualización.....	118
5	CRITERIOS Y NORMAS APLICABLES AL LIDAR DE CONFORMIDAD CON EL “MANUAL CENTROAMERICANO DE DISPOSITIVOS UNIFORMES PARA EL CONTROL DEL TRÁNSITO”	123
5.1	El objetivo de una reglamentación de la señalización.....	124
5.2	Criterios técnicos que debe cumplir un dispositivo de control.....	125
5.2.1	Diseño.....	126
5.2.2	Localización.....	127
5.2.3	Uniformidad.....	127
5.2.4	Operación.....	128
5.2.5	Mantenimiento.....	129
5.3	Normas que debe de cumplir el Lidar como resultado de la aplicación del manual.....	129
5.3.1	Estudio de ingeniería requerido.....	129
5.3.1.1	Ubicación.....	130
5.3.1.2	Visibilidad.....	130
5.3.2	Diseño del montaje del Lidar.....	131
5.3.2.1	Poste.....	131
5.3.2.2	Ángulo de colocación.....	133
5.3.3	Diseño de la luz intermitente.....	133
5.3.3.1	Cabeza.....	134

5.3.3.2	Soportes.....	134
5.3.3.3	Cara.....	134
5.3.3.4	Lente.....	135
5.3.3.4.1	Visibilidad e iluminación de los lentes.....	135
5.3.3.5	Visera.....	136
5.3.4	Mantenimiento del semáforo del Lidar.....	136
6	ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DEL LIDAR EN LA MEDICIÓN DEL LÍMITE DE LA VELOCIDAD VEHICULAR EN TRAMOS PELIGROSOS SOBRE CARRETERAS EN GUATEMALA	139
6.1	Localización del Lidar sobre carreteras en Guatemala.....	140
6.2	Operabilidad del Lidar.....	142
6.3	Errores técnicos y operarios de Lidar.....	146
6.3.1	Los errores operacionales.....	146
6.3.2	Los errores técnicos.....	148
6.3.2.1	Efecto coseno.....	148
6.3.2.2	Error de barrido.....	150
6.3.2.3	Error de la reflexión.....	151
6.3.2.4	Error fantasma.....	152
6.4	Ventaja y desventajas del Lidar.....	152
6.4.1	Ventajas.....	152
6.4.2	Desventajas.....	154
	CONCLUSIONES	155
	RECOMENDACIONES.	157
	BIBLIOGRAFÍA	159

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Gráfica de trayectorias	2
2	Grafica de la componentes vectoriales de posición	3
3	Gráfico de desplazamiento	4
4	Gráfico de diferentes trayectorias	4
5	Gráfico de la longitud recorrida	5
6	Representación grafica de la velocidad media	7
7	Gráfico del proceso para determinar la velocidad instantánea	9
8	Gráfico de la velocidad instantánea	10
9	Gráfico que representa las componentes intrínsecas de la aceleración	13
10	Mapa de la red vial asfaltada de Guatemala	22
11	Ampliación de la carretera CA-9 Norte para identificar los tramos Peligrosos	24
12	Grafico sobre la teoría corpuscular	28
13	propagación de una onda plana por Huygens	30
14	grafica sobre el patrón de interferencia	31
15	difracción de las ondas luminosas según la teoría corpuscular	31
16	Difracción producida por una rendija	32
17	Aparato de Fizeau para medir la velocidad de la luz	34
18	Grafica de una onda electromagnética	38
19	Dispositivo simplificado para estudiar el efecto fotoeléctrico	41
20	Grafico onda-corpuscular	42
21	Arreglo experimental para observar el Efecto Compton	43
22	grafico de difracción e interferencia	46
23	Dos rendijas producen interferencia para el electrón	47
24	Diagrama de flujo para establecer la dualidad de la luz	50
25	Espectro electromagnético	51
26	Grafico de la luz monocromática respecto a una luz policromática	52
27	La coherencia de la luz láser respecto a la luz natural	53
28	Patrón de radiación de la luz blanca respecto al láser	54
29	Grafica del punto focal de la luz láser respecto a la luz convencional	54
30	Interacción de la materia y la radiación, en el proceso de absorción	56
31	La emisión espontánea	56
32	La emisión estimulada	57

33	Emisión estimulada en cascada	58
34	Componentes de un láser	59
35	Láser semiconductor con medio activo de Arseniuro de Galio	63
36	Representación de la incidencia, reflexión y refracción	65
37	Ángulo crítico de incidencia	67
38	Terminología usada por la geometría óptica	69
39	Desplazamiento lateral de la luz al pasar por vidrio	70
40	Lentes convergentes	71
41	Lentes divergentes	72
42	Imagen virtual en un espejo plano	72
43	La imagen en el punto focal de un espejo cóncavo	74
44	Punto focal de un espejo convexo	74
45	Grafico para la deducción de la ecuación del espejo	75
46	Grafico para la deducción de la ecuación de las lentes	79
47	Aberración en un espejo cóncavo	80
48	Aberración cromática	81
49	Configuración del Lidar.	85
50	Esquema del Lidar	89
51	Unión p-n del diodo láser	91
52	Bandas de energía de una unión p-n con polarización directa	92
53	Estructura heterogénea doble del diodo láser	94
54	Características ópticas del diodo láser de estructura heterogénea doble	96
55	El diodo láser es altamente direccional en Comparación del LED.	97
56	Comparación de la intensidad de luz en función de la longitud de onda del láser respecto al LED.	97
57	Generador de pulsos de luz láser	100
58	El diodo láser del generador de pulsos	100
59	Fenómeno de astigmatismo del diodo láser	101
60	Dos tamaños de la faceta emisor del diodo láser	102
61	Eliminación del astigmatismo por fibra óptica	103
62	Telescopio catadióptricos SCHMIDT-NEWTON	105
63	Detección coherente	106
64	Diagrama de bloques del receptor óptico detección heterodino	107
65	Fotodiodo PIN	112
66	Respuesta espectral	113
67	Un diagrama de bloques representa el procesamiento de la señal para obtener la velocidad del vehículo	117
68	Diagrama de bloques de la comparación de la velocidad y su visualización	119
69	Representación del modulo visualizador del Lidar	120
70	Detalle de colocación para el sistema Lidar	132
71	Vista lateral de la posición del Lidar	142

72	Representación de la reflexión que ocurre sobre la superficie de los vehículos	144
73	Representación del efecto coseno en la medición de la velocidad.	148
74	Comparación de la radiación del Lidar con respecto al radar	153

TABLAS

I	Datos estadísticos de los accidentes de tránsito	16
II	Tramos peligrosos de la carretera CA-9 Norte	23
III	División del espectro electromagnético por su frecuencia	51
IV	Índice de refracción para la luz amarilla ($\lambda = 589nm$).	66
V	Cuadro comparativo entre la bombilla y LED.	125
VI	Resultado de la velocidad con diversos ángulos.	150

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Longitud de onda
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
Amp.	Amperios
AlGaAs	Aluminio de Arsenuro de Galio
CA	Carretera Centro americana
E	nivel de energía atómica
e	Electrón
F	Longitud focal
GaAs	Arsenuro de Galio
i	Corriente eléctrica
Km.	Kilómetros
m	Metros
mm	Milímetros
LED	Diodo Emisor de Luz
LDR	Transductor que varia su resistencia con la luz
V	Voltaje directa

GLOSARIO

Absorción de la luz

Absorción de la energía luminosa que da lugar a una disminución en su intensidad, dependiendo de la frecuencia y del camino recorrido dentro del medio.

Análisis dimensional

Análisis de las dimensiones de las magnitudes físicas.

CA -9

Nomenclatura del sistema vial Guatemalteco, que identifica una carretera como de uso Centroamericano, en la carretera al Atlántico.

Choque elástico

Choque en el que se conserva la energía cinética de traslación. Cuando se verifica entre dos cuerpos macroscópicos, éstos recuperan después del choque su forma y su volumen primitivos.

Choque inelástico

Choque en el que no se conserva la energía cinética de traslación.

Constante de Planck	Constante igual al valor mínimo posible de la magnitud dinámica de acción. Se simboliza por “h” y vale aproximadamente $(6.625 \times 10^{-34} \text{ [J / HZ]})$.
Convergente	Cuando los rayos luminosos se dirigen hacia un mismo punto.
Cuanto	Cantidad mínima con que interviene en los fenómenos físicos una magnitud cuantizada.
Cuantizar	Restringir a un conjunto discreto los valores posibles de una magnitud.
Difusión luminosa	Alteración de las direcciones de los rayos de un haz luminoso paralelo después de incidir sobre una superficie.
Dispersión	Alteración de la distribución espacial o angular de la radiación producida por la reflexión.
Divergente	Cuando los rayos luminosos durante su propagación se aparten una de otra.

Dualidad onda-corpúsculo	Hipótesis según la cual a cada partícula le corresponde una onda asociada, así como a un fotón le corresponde una onda luminosa.
Efecto Doppler	Variación de la frecuencia de una onda cuando hay un movimiento relativo entre la fuente y un objeto móvil.
Emisión de radiación	Proceso de interacción de la radiación electromagnética con la materia por el que los átomos o moléculas pasan de un nivel de energía inicial a otro nivel inferior emitiendo un fotón.
Espectro Electromagnético	Distribución de la intensidad de una radiación en función de la longitud de onda, la energía y la frecuencia.
Espectro visible	Parte del espectro electromagnético que logra detectar el sentido de la vista, comprendido entre el rango de 400 y 700 nm., o sea que, entre los colores violeta y rojo..
Éter	Medio hipotético que, se suponía, penetraba toda la materia existente y era la sede de los fenómenos ópticos y electromagnéticos.

Fotón.	Cantidad indivisible de energía luminosa que interviene en los procesos de emisión y de absorción de la radiación electromagnética. Para cada frecuencia viene dada por el producto de ésta por la constante de Planck.
Frecuencia	Número de ciclos por unidad de tiempo. La unidad más usual es el Hertz (Hz) o ciclos por segundo.
Índice de refracción	Razón entre las velocidades de propagación de la luz en el vacío y para un determinado medio. Es función de la longitud de onda de la radiación incidente.
Interferencia	Ocurre cuando se superponen dos o más movimientos ondulatorios de la misma frecuencia o amplitud.
Luz monocromática	Luz que contiene solamente la radiación que corresponde a una longitud de onda
Oblicuamente	Cuando un rayo luminoso se sesga o se inclina.

Onda electromagnética	Onda de propagación de los campos eléctricos y magnéticos producidos por las cargas eléctricas en movimiento.
Onda transversal	Onda en la que la magnitud física característica de la misma se encuentra perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda.
Onda transversal electromagnética	Su componente eléctrica y magnética en la dirección de propagación de la onda, es nula.
Polarización	Estado que se presenta cuando el módulo y la dirección del vector eléctrico varían periódicamente. Los casos de polarización son <i>elíptica</i> , <i>circular</i> o <i>lineal (plana)</i>
Radiación	Energía o partículas materiales que se propagan a través del espacio, y que provienen de una fuente que las genera, ya sea, de forma natural o artificial.

RESUMEN

El factor común en los accidentes vehiculares se debe a la negligencia de los pilotos en el uso del exceso de velocidad que se le permite al conductor en los vehículos, siendo la parametrización de la misma el elemento primordial de la seguridad vial. Para garantizar un tráfico ordenado y disciplinado se debe recurrir a dispositivos de control de velocidad electrónicos, entre otras medidas tomadas por el Departamento de Tránsito.

Los accidentes vehiculares son muy aleatorios en su ocurrencia sobre las carreteras, pero se identifican con ciertos tramos peligrosos debido a la orografía y geometría de la carretera, estos generalmente provienen de un mal diseño. La carretera CA-9 Norte es muy peligrosa para su tránsito y por tanto, es allí donde necesita regularse la velocidad por su demanda.

El Lidar es un dispositivo opto-electrónico que monitorea la velocidad con que se conducen los vehículos y por medio de su uso puede regular la velocidad indicando su exceso, conjuntamente con reglas y normas para su ubicación proporciona uniformidad para estos dispositivos de control en la región centroamericana para su operación, el análisis del Lidar ayuda a determinar su exactitud en una aplicación real.

OBJETIVOS

• GENERAL

Realizar un análisis del funcionamiento del radar láser en la medición del límite de la velocidad vehicular en tramos peligrosos sobre carreteras, donde el sistema que realiza el monitoreo del límite de la velocidad activa una luz indicando su sobrepaso.

• ESPECÍFICOS

- 1) Definir el concepto de la velocidad de los automotores en la carretera.
- 2) Analizar los informes de Ingeniería de Tránsito de Guatemala identificando los tramos de alto riesgo sobre carreteras.
- 3) Explicar los principios fundamentales que hacen posible el funcionamiento del radar láser.
- 4) Describir el radar láser (LIDAR) en forma general y los bloques que lo constituyen.
- 5) Considerar las normas del “Manual centroamericano de dispositivos uniformes para el control del tránsito” en el funcionamiento del radar láser.
- 6) Realizar un análisis de la aplicación del radar láser en la medición del límite de la velocidad vehicular en tramos peligrosos sobre carreteras en Guatemala

INTRODUCCIÓN

El factor determinante en cualquier tipo de transporte es la velocidad; porque tiene implicaciones tanto económicas, como de seguridad y de comodidad. Ante la negligencia de algunos pilotos se presenta una alta tasa de accidentes mortales. Esto se debe a la excesiva velocidad con que manejan los pilotos, sin considerar la precaución que requiere la orografía de la carretera. En Guatemala no se ha contemplado políticas adecuadas para manejar el tema de seguridad vial, prueba de ello es la falta de implementación en la aplicación de dispositivos que regulen la velocidad en las distintas carreteras del País.

El presente trabajo presenta un análisis sobre la aplicación del Lidar, este es un dispositivo que monitorea electrónicamente la velocidad vehicular; esto con el fin de evitar accidentes fatales de tránsito sobre las principales carreteras del país.

Se contempla una descripción de la velocidad y las consecuencias cuando es en exceso, también la descripción del informe del Departamento de Tránsito que realizó sobre el análisis de los tramos críticos para determinar que carretera es la más peligrosa del sistema vial del país. Para su aplicación real del Lidar se fundamenta con las normas que rige el “Manual centroamericano de dispositivos uniformes para el control del tránsito”, este es un tratado internacional, al final un análisis teórico en base a sus ventajas y desventajas de su aplicación sobre el sistema vial del país.

La regulación de la velocidad ha sido utilizado en países primer mundistas, y con ello se ha logrado modernizar y evolucionar el control del sistema de tránsito.

1. CINEMÁTICA DE LOS AUTOMOTORES

Un automotor en términos generales es un aparato que ejecuta movimientos lineales sobre una carretera, mediante un motor que para este caso es de combustión; pudiéndose clasificar por su capacidad de transporte en vehículo individual, colectivo o pesado, estos movimientos que realiza el automotor sirven al humano para desplazarse de un lugar a otro. Su movimiento se analiza mediante las relaciones matemáticas que proporciona la cinemática y ayuda a determinar las causas que producen movimientos incontrolados o erráticos que provoca situaciones de peligro para el humano que se conducen sobre carreteras.

1.1 CINEMÁTICA

La cinemática es la parte de la física que estudia la descripción matemática de la trayectoria del movimiento de los cuerpos, aunque sin interesarse por las causas que originan dicho movimiento.

El movimiento es un cambio de lugar o posición que sufre un cuerpo; el cuerpo se representa por una partícula al cual se le denomina móvil. Todo móvil sigue un camino, es decir, describe una trayectoria cuando se desplaza; esta puede ser aleatoria, parabólica, rectilínea o circular, partiendo de una posición previa. El movimiento, dependiendo de su velocidad, puede ser uniforme o acelerado, éste a su vez puede ser absoluto o relativo.

1.1.1 PARTÍCULA

La partícula es la representación teórica de un cuerpo móvil en un punto; despreciando sus dimensiones geométricas y estructura interna. Para este caso, un vehículo se presenta como un punto para analizar las variables cinemáticas mediante relaciones matemáticas, obteniendo su análisis en forma teórica de su comportamiento real.

1.1.2 TRAYECTORIA

Es la línea imaginaria que describe la partícula en su movimiento. En la figura 1 se ilustran ejemplos de varias trayectorias.

FIGURA 1. **Representación gráfica de trayectorias.**

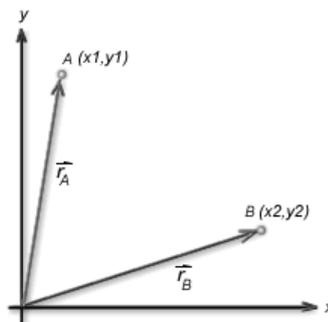


Se acostumbra clasificar los movimientos de acuerdo a la trayectoria seguida por la partícula: si la trayectoria es rectilínea se le denomina movimiento rectilíneo, si es circular, movimiento circular.

1.1.3 POSICIÓN

Es el lugar en que se encuentra el móvil en un cierto instante de tiempo (t), suele representarse con el vector de posición \vec{x} en una dirección. Dada la dependencia de este vector con el tiempo, es decir $\vec{x}(t)$, tenemos toda la información necesaria para los cálculos cinemáticos. En un sistema de coordenadas donde la posición no está en dependencia de una sola dirección, a cada posición de la partícula le corresponde una coordenada y solamente una. Así cuando la partícula está en la posición "A" le corresponde la coordenada (x1,y1) y cuando está en la posición "B" le corresponde la coordenada (x2,y2), ver figura 2.

FIGURA 2. Representación gráfica de los componentes vectoriales de posición.

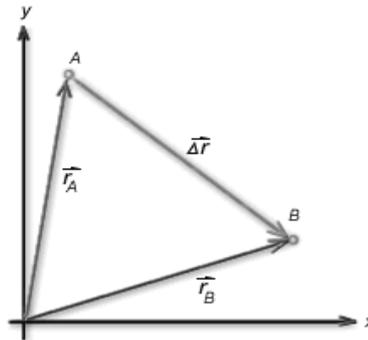


1.1.4 DESPLAZAMIENTO

Al cambio de la posición de la partícula se le denomina desplazamiento, $\Delta\vec{r}$. Es decir, el desplazamiento es la resta vectorial entre el vector posición final y el vector posición inicial como se observa en la figura 3, y se representa de la siguiente manera:

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_B - \vec{r}_A \quad (1.1)$$

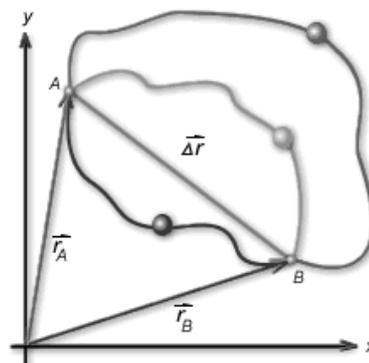
FIGURA 3. **Gráfica de desplazamiento.**



De la definición de desplazamiento se puede concluir que éste no depende de la trayectoria seguida por la partícula, sino que sólo depende del punto de partida y del punto de llegada.

En la figura 4, se logra demostrar tres partículas que tienen el mismo desplazamiento aunque hayan seguido trayectorias diferentes hacia un punto final.

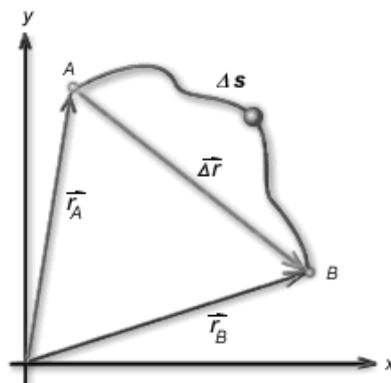
Figura 4. **Gráfica de diferentes trayectorias.**



Tanto el vector de posición \vec{r} como el vector de desplazamiento $\Delta\vec{r}$ tienen una ecuación dimensional de longitud. Es decir, esas dos magnitudes se miden en unidades de longitud, específicamente en el Sistema Internacional se miden en metros [m].

La longitud recorrida es la medida de la longitud de la trayectoria seguida por la partícula. En la figura 5 se ilustra cómo la partícula al desplazarse desde la posición A hasta la posición B, recorre una longitud equivalente a Δs (en este caso es la longitud "AB").

FIGURA 5. Gráfica de la longitud recorrida.



En la misma figura se puede observar que el desplazamiento no es igual que la longitud recorrida.

$$|\Delta\vec{r}| \neq \Delta s \quad (1.2)$$

1.1.5 VELOCIDAD

Es la distancia que recorre un móvil en un tiempo determinado. Se puede decir que la velocidad es directamente proporcional a la distancia, porque a mayor velocidad mayor distancia recorrida e inversamente proporcional al tiempo, porque a mayor velocidad es menor el tiempo requerido para recorrer una distancia determinada.

En la siguiente ecuación se expresa la relación de la velocidad:

$$\vec{v} = \frac{\vec{x}}{t} ; t * \vec{v} = \vec{x} ; t = \frac{\vec{x}}{\vec{v}} \quad (1.3)$$

Donde:

\vec{x} = desplazamiento

t = tiempo

\vec{v} = velocidad

Su ecuación dimensional es Longitud * Tiempo⁻¹, para la representación de la dimensional en el Sistema Internacional se indica como metros sobre segundo [m/s].

La velocidad (\vec{v}) proporciona la magnitud de rapidez, dirección y sentido con que se está moviendo el vehículo. En otras palabras, la velocidad es una magnitud vectorial.

Es **velocidad absoluta** cuando el móvil se desplaza con respecto a un punto en reposo; **velocidad relativa**, cuando un cuerpo se mueve con respecto a otro también en movimiento.

1.1.5.1 VELOCIDAD MEDIA, $\langle \vec{v}_m \rangle$

La velocidad media de un objeto móvil se calcula aplicando el promedio aritmético de dos cantidades, en este caso la velocidad inicial con la velocidad final, es muy difícil encontrar un movimiento con velocidad constante. La naturaleza de la velocidad es que cambie a lo largo de la trayectoria, como resultado de los semáforos, los baches en la carretera, el tráfico pesado de vehículos, etc.. estos impiden mantener una rapidez uniforme.

Se define la velocidad media como el desplazamiento $\Delta \vec{x}$ de la partícula dividido por el valor del intervalo de tiempo Δt , ver figura 6.

La siguiente ecuación representa la velocidad media:

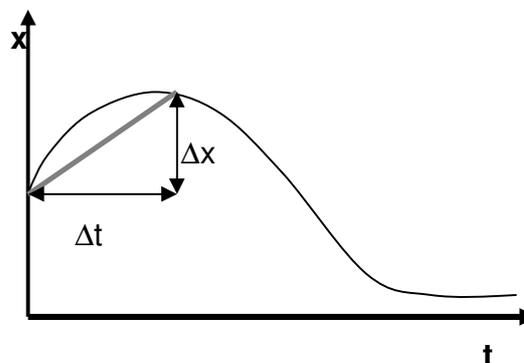
$$\langle \vec{v}_m \rangle = \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} = \frac{\vec{x}_2 - \vec{x}_1}{t_2 - t_1} \quad (1.4)$$

Donde:

x_1 es la posición del móvil en el instante t_1 .

x_2 es la posición del móvil en el instante t_2 .

FIGURA 6. Representación grafica de la velocidad media.



La velocidad promedio también puede interpretarse geoméricamente, como muestra la figura 6. Donde puede observarse que $\Delta x / \Delta t$ es la pendiente de la recta (llamada secante) que une las posiciones iniciales y finales.

La velocidad media tiene la misma dirección y sentido que el desplazamiento. No obstante, aunque la velocidad media es una magnitud útil, hay que destacar que en su cálculo se deja mucha información sin precisar.

1.1.5.2 VELOCIDAD INSTANTÁNEA, $\Delta \vec{v}_i$

Los automóviles no siempre pueden viajar con velocidad constante durante largo períodos de tiempo, estos cambian respecto al tiempo, por tanto existe una velocidad inicial y una final. Para ir de un punto inicial a otro final es probable que necesite frenar o acelerar por las condiciones de la carretera, por ello es útil hablar de velocidad instantánea.

La velocidad media no nos permite conocer la velocidad del móvil para cada valor de t , es decir no podemos determinar el valor de la velocidad instantánea.

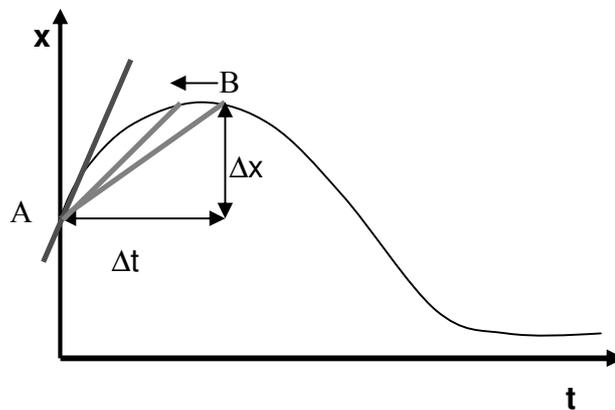
En la figura 7, se muestra el resultado de dibujar las líneas que representan la velocidad promedio (mediante el valor de la pendiente), para distintas posiciones finales, cada una mas próxima a la posición inicial. El valor de Δt es cada vez menor, o expresado en términos matemáticos, $\Delta t \rightarrow 0$, y la recta "AB" se transforma en la recta tangente en "A".

En otras palabras, la velocidad instantánea $\Delta \vec{v}_i$ es igual al valor del límite del cociente $\Delta x / \Delta t$ cuando $\Delta t \rightarrow 0$.

La velocidad instantánea se define como:

$$\Delta \vec{v}_i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} \quad (1.5)$$

FIGURA 7. Gráfica del proceso para determinar la velocidad instantánea.

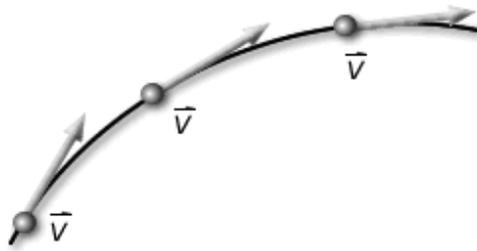


La velocidad instantánea es la velocidad que se proporciona en un determinado instante y se calcula con la velocidad media haciendo los intervalos de tiempo tan pequeños, y con la ecuación se obtiene la velocidad con que se desplaza el móvil en cada instante.

Cuando el intervalo de tiempo Δt , tiende a cero, se observa que el vector desplazamiento se acerca a la tangente de la trayectoria y por tanto coincide con la definición de la derivada respecto al tiempo (figura 8), y se define como:

$$\vec{v}_i = \frac{d \vec{r}}{dt} \quad (1.6)$$

FIGURA 8. Gráfica de la velocidad instantánea.



En cuanto al significado geométrico, la velocidad instantánea es el valor de la pendiente de la recta tangente a la curva en el punto que nos interese.

1.1.6 ACELERACIÓN

Aceleración es la variación de la velocidad en la unidad de tiempo. Cuando la velocidad de una partícula varía con el tiempo, decimos que la partícula está acelerada. Por ejemplo, la velocidad de un móvil aumenta cuando se “pisa el acelerador” y disminuye si se “frena”.

La aceleración es:

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{t} \quad (1.7)$$

Por lo tanto la aceleración es una medida de la rapidez con la que varía la velocidad. Su ecuación dimensional es longitud * tiempo⁻², en el sistema internacional las dimensionales se describe metros sobre segundos al cuadrado [m*s⁻²].

La aceleración es una cantidad vectorial y por tanto depende de los cambios de dirección tanto como en cambios de magnitud. Si la dirección del movimiento es en línea recta, solo la rapidez de objeto está cambiando.

Si sigue una trayectoria curva, ocurren cambios tanto direccionales como de magnitud de la velocidad y por tanto la aceleración no tiene la misma dirección del movimiento.

1.1.6.1 ACELERACIÓN MEDIA, \vec{a}_m

Se define la aceleración media como el cambio en la velocidad $\Delta \vec{v}$, dividido por el intervalo de tiempo Δt , es decir:

$$\vec{a}_m = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_f - \vec{v}_i}{t_f - t_i} \quad (1.8)$$

La aceleración media es un vector dirigido hacia donde se dirige el cambio de velocidad, $\Delta \vec{v}$.

1.1.6.2 ACELERACIÓN INSTANTÁNEA, \vec{a}_i

La aceleración instantánea resulta cuando se lleva los instantes inicial y final muy cerca uno del otro de la aceleración promedio. Sirve para conocer el valor de la aceleración en forma puntual en los instantes de tiempo en el intervalo que ocurre el desplazamiento.

Se define como el límite de la aceleración promedio cuando Δt tiende a cero, es decir:

$$\vec{a}_i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (1.9)$$

La aceleración instantánea es la derivada de la velocidad respecto al tiempo:

$$\vec{a}_i = \frac{d}{dt} \vec{v}(t) \quad (1.10)$$

La aceleración instantánea es un vector dirigido hacia donde se realiza el cambio de velocidad, $\Delta\vec{v}$. Geométricamente la aceleración instantánea, representa la pendiente de la recta tangente de la gráfica Velocidad versus Tiempo.

1.1.6.3 COMPONENTES INTRÍNSECOS DE LA ACELERACIÓN

De la definición de aceleración se concluye que ésta es diferente de cero siempre que hayan cambios en la velocidad. Como la velocidad es un vector, puede cambiar en magnitud, en dirección, o en ambas.

Tomando el vector velocidad que lo constituye un módulo y su vector unitario que indica la dirección, se expresa como:

$$\vec{v} = |\vec{v}| \hat{v} \quad (1.11)$$

Derivando para la magnitud y para la dirección, utilizando la regla del producto para las derivadas se determina:

$$\vec{a} = \left(\frac{d}{dt} |\vec{v}| \right) \hat{v} + |\vec{v}| \frac{d}{dt} \hat{v} \quad (1.12)$$

Si la velocidad cambia en magnitud se dice que el cuerpo tiene aceleración tangencial (\vec{a}_t). Esta \vec{a}_t se encarga de "medir" la variación de la velocidad sin importarle su dirección ni sentido, sino solo su módulo, es decir su "intensidad". Y se representa en el primer término de la ecuación (1.12).

Si cambia en dirección, se dice que el cuerpo tiene aceleración centrípeta o normal (\vec{a}_c). Este es el segundo término de la ecuación (1.12), ambos representados en la figura 9.

Se representa el módulo de la ecuación de la aceleración normal de la siguiente forma:

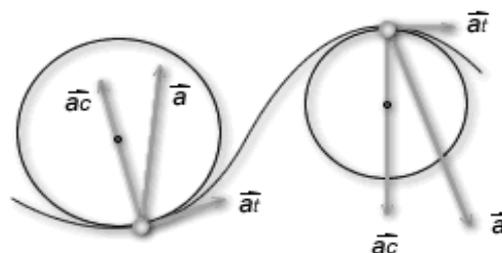
$$|\vec{a}_n| = \frac{|\vec{V}|^2}{R} \quad (1.13)$$

Donde, R es el radio de curvatura de la trayectoria, su dirección es siempre perpendicular a la trayectoria y hacia el interior de la "curva".

En el caso que cambie simultáneamente en magnitud y en dirección, la aceleración resultante (\vec{a}) será la suma vectorial de las aceleración tangencial y de la aceleración centrípeta, por lo que la magnitud de la aceleración resultante será igual a:

$$a = \sqrt{a_c^2 + a_t^2} \quad (1.14)$$

FIGURA 9. Gráfica que representa las componentes intrínsecas de la aceleración.



1.2 IMPACTO DEL EXCESO DE VELOCIDAD

La velocidad es un importante factor en el Transporte, ya que tiene implicaciones económicas, de seguridad, de tiempo y servicio (confort), tanto para el conductor como para el público en general.

1.2.1 LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN

Es la velocidad con que circulan los automotores en las condiciones que presenta la orografía de las carreteras teniendo como objetivo la seguridad vial de sus usuarios, esta velocidad se determina mediante un análisis del flujo vehicular y la forma geométrica de la carretera, de modo que se establece un rango de velocidad a la que el conductor debe de conducirse con normalidad. Este rango de la velocidad de operación es diferente para una carretera que corresponde al área urbana como una carretera entre departamentos.

1.2.2 VELOCIDAD DE DISEÑO

Corresponde a la máxima velocidad a la que un vehículo puede circular en condiciones de flujo libre, con seguridad teóricamente total. Esta velocidad se localiza por encima de la velocidad de operación y solo corresponde a puntos importantes sobre una carretera debido a la forma geométrica; como curvas cerradas, pendientes pronunciadas y peligrosas para al conductor, para mantener esta seguridad vial se han colocado una serie de señalización sobre carreteras indicando estos límites de velocidad.

1.2.3 EXCESO DE VELOCIDAD

Quienes conducen a una excesiva velocidad o sobre la velocidad de diseño tienen más probabilidad de sufrir un accidente automovilístico porque el exceso de velocidad causa deficiencia en la visión del conductor.

Las leyes de la física dictan inexorablemente que cuanto mayor sea la velocidad en el momento del impacto, tanto mayor será la cantidad de energía que se transfiere al metal del auto oponente o en trayectos opuestos, quedando expuesto el cuerpo humano a daños lesivos.

La velocidad al impactar será función de la velocidad previa al incidente y del tiempo y la distancia disponibles para tomar medidas que permitan eludir el impacto (frenada y control de la dirección). La reducción de la velocidad (y el aumento de la distancia de seguridad hasta el vehículo precedente) permitirá tener más tiempo para evitar la intersección de las trayectorias (choque).

1.2.4 CONSECUENCIAS DEL EXCESO DE VELOCIDAD

En el siglo pasado el tránsito dejó 30 millones de muertes en accidentes automovilísticos en el mundo, desde que en 1896 se produjo el primer deceso de un peatón y dos años más tarde el primero de un conductor, según el último informe mundial sobre desastres de la Cruz Roja Internacional (CRI).

Con estas cifras de muertes producto de accidentes automovilísticos son considerados como la tercera causa de muerte en el mundo, según el informe, sin tomar en cuenta a los heridos. Las consecuencias de los accidentes han llegado a considerarse al nivel de desastres, al igual que los terremotos o los huracanes.

En Guatemala, de acuerdo con datos proporcionadas por la Secretaría del Cuerpo Voluntario de Bomberos C.V.B. se muestran la siguiente tabla sobre accidentes colectivos y sus víctimas en la red vial de Guatemala, en los últimos dos años y medio:

TABLA I. DATOS ESTADÍSTICOS DE LOS ACCIDENTES DE TRÁNSITO

ACCIDENTES COLECTIVOS CUBIERTOS POR EL CVB EN EL AÑO 2002		
No. ACCIDENTES	HERIDOS	FALLECIDOS
67	976	44

EL 82% DE LOS ACCIDENTES SON BUSES

ACCIDENTES COLECTIVOS CUBIERTOS POR EL CVB EN EL AÑO 2003		
No. ACCIDENTES	HERIDOS	FALLECIDOS
109	1587	69

EL 86% DE LOS ACCIDENTES SON BUSES

ACCIDENTES COLECTIVOS CUBIERTOS POR EL CVB HASTA 2 DE MAYO DEL AÑO 2004		
No. ACCIDENTES	HERIDOS	FALLECIDOS
55	828	63

EL 81% DE LOS ACCIDENTES SON BUSES

Fuente: Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Guatemala, Resumen de accidentes anuales.

Estos datos reflejan un crecimiento de la cantidad de accidentes y las víctimas, pues en el año 2002 fueron 44 los fallecidos en accidentes colectivos y en mayo del año 2004 se registraron 63 personas fallecidas siendo el quinto mes del año y su resultado se acerca al del año 2003, siendo comprobable que esta cifra es alarmante.

Se analizaron los accidentes colectivos debido que los buses son los medios populares masivos y necesarios para la comunicación, pero es donde existe la mayor imprudencia al igual que los vehículos pesados que constantemente se ven involucrados en estos tipos de accidentes.

Existen varios elementos cuando se produce un accidente entre los que se menciona el alcoholismo, la falta de precaución, el exceso de velocidad y el “no” respetar los señalamientos de tránsito. Pero el denominador común de los accidentes es el exceso de velocidad.

Los bomberos voluntarios indican que las víctimas de los accidentes fatales de tránsito tienen una gran oportunidad de sobrevivir si son atendidos dentro de la “hora de oro” posterior al hecho y que reciban los adecuados primeros auxilios.

El elemento más importante en los accidentes de tránsito es el factor humano, pues es quien ocasiona el accidente y es a la vez víctima que conlleva a otras víctimas. Especialistas que analizan estos tipos de accidentes consideran que los siniestros son un reflejo de la competitividad y la violencia en el manejo.

2. ANÁLISIS REALIZADO POR INGENIERÍA DE TRÁNSITO PARA IDENTIFICAR LAS RUTAS Y TRAMOS DE ALTO RIESGO EN GUATEMALA

Para lograr determinar las rutas y tramos de alto riesgo el Departamento de Ingeniería de Tránsito de la Dirección General de Caminos (D.G.C) de Guatemala realizó un cuadro de frecuencias de accidentes de la red vial, su función es determinar tanto las condiciones exteriores al entorno donde se protagonizan estos accidentes involucrando a la ruta y las causas que preceden el hecho.

El cuadro de frecuencias refleja la sumatoria de accidentes que existen anualmente en determinados tramos sobre determinadas carreteras del sistema vial de Guatemala (ver figura 10), el conteo va desde un accidente individual sin víctimas hasta los accidentes de muertes masivos, lo que se trata de determinar es la frecuencia con que ocurren estos accidentes.

El cuadro de frecuencias de accidentes en la red nacional enfoca el análisis de la siguiente manera:

A) El análisis de las rutas viales donde ocurren los accidentes frecuentemente:

- 1) Geometría de la carretera.
 - Cuestas prolongadas y pronunciadas.

- Curvas cerradas de casi 180° donde la visibilidad no existe.
 - Pendientes prolongadas y pronunciadas
- 2) Elementos climáticos
 - Exceso de lluvia
 - Neblina
 - 3) Zona de derrumbes
 - 4) Carretera sin mantenimiento
 - 5) Vías estrechas, existe un exceso de tráfico vehicular en las carreteras; los dos carriles son insuficientes porque posee un carril para cada vía.
 - 6) Falta de señalización
 - 7) Diseño de cruces e intersecciones sin la adecuada señalización.
 - 8) Mal diseño de entradas sobre las carreteras.

B) Las causas que protagonizan estos accidentes son:

- 1) Exceso de velocidad de las unidades de transporte colectivo, pesado y particulares.
- 2) Sobrecarga, especialmente en el transporte de carga pesada y extraurbano.
- 3) Falta de precaución de los pilotos al tomar las curvas y pendientes.

El resultado del análisis refleja lo siguiente:

1) La carretera más afectada por la frecuencia de accidentes es la *carretera al Atlántico*, se observa en el mapa de la red vial asfaltada de Guatemala(fig. 10). La nomenclatura para distinguir esta carretera es CA -9 NORTE, donde cualquier carretera con la nomenclatura CA es debido que es de carácter centroamericana y es porque esta carretera es la que nos enlazan con los países vecinos; como Belice, Honduras y El Salvador.

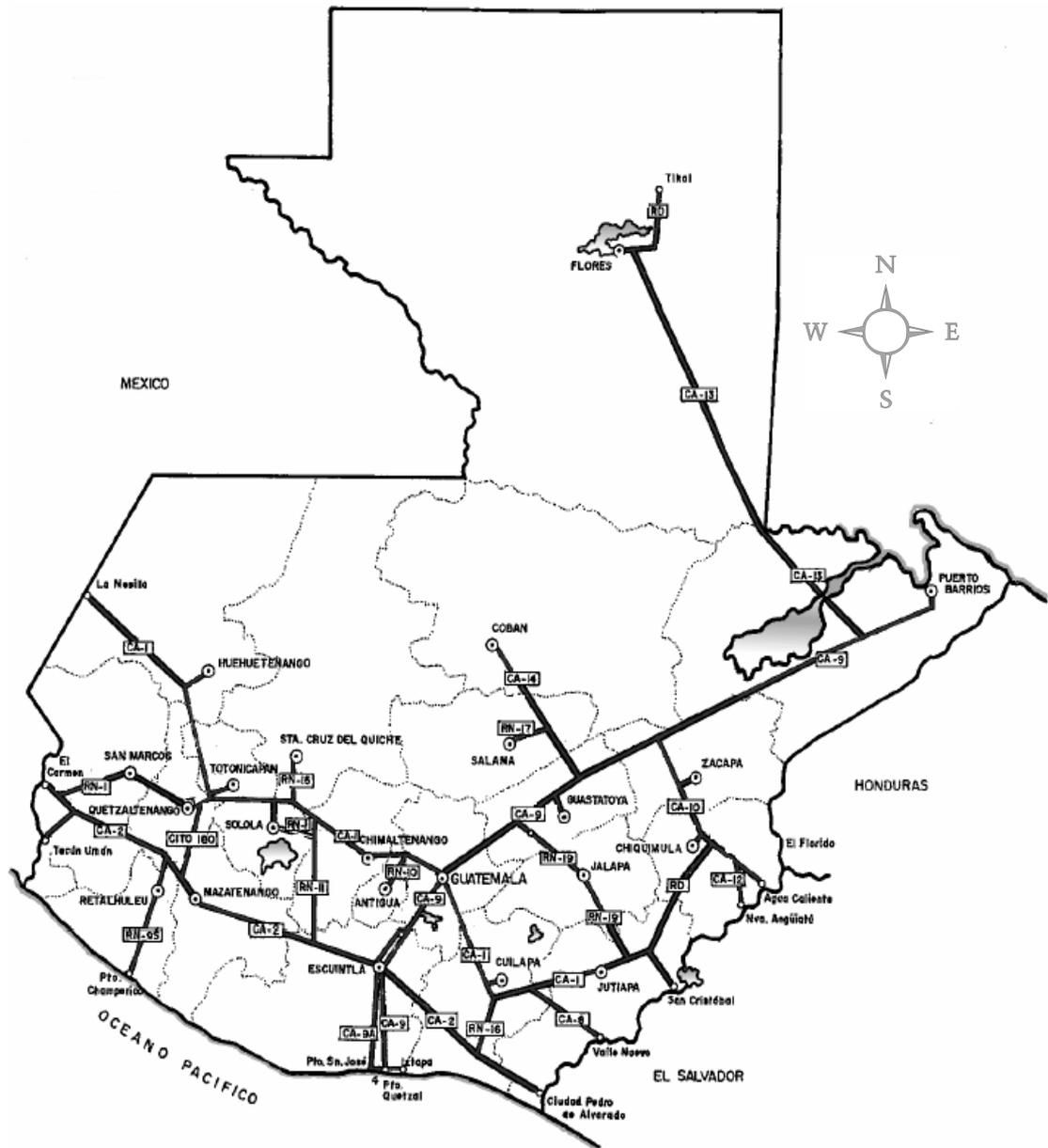
La carretera del Atlántico CA-9 NORTE es una ruta peligrosa del sistema vial, son aproximadamente 295 Kilómetros de cinta asfáltica que va desde la Ciudad de Guatemala hacia Puerto Barrios que se podría denominar como la “ruta de la muerte”.

2) Los tipos de vehículos involucrados constantemente en los accidentes viales son los buses extraurbanos y los transportes pesados.

Se caracteriza el transporte pesado porque jalan furgones de carga que vienen de Puerto Barrios hacia la capital o transportarlo hacia otros puertos, los buses extraurbanos para enlazar los departamentos del norte y oriente con la capital, que tienen en común parcialmente esta carretera.

Es evidente que es una carretera importante tanto para la comunicación entre los demás departamentos y países; como para la economía, además con el incremento vehicular aumenta la demanda de su uso que ya no es apta para la cantidad que la transitan a diario, su diseño es inadecuado actualmente pues su carril es estrecho y se encuentran en malas condiciones.

FIGURA 10. Mapa de la red vial asfaltada de Guatemala.



Fuente: Departamento Ingeniería de tránsito / división planificación y estudios / D.G.C.

2.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS TRAMOS DE ALTO RIESGO SOBRE LA CARRETERA CA-9 NORTE

Del análisis del *Departamento de Ingeniería de Tránsito de Guatemala* se determinan donde se concentran los accidentes con frecuencia que se denominan “puntos negros”.

Los tramos de alto riesgo sobre la carretera CA-9 Norte se presenta en la Tabla II, donde se identifica la ubicación de estos y las características de la ruta presentando las causas comunes de los accidentes de tránsito.

TABLA II. TRAMOS PELIGROSOS DE LA CARRETERA CA-9 NORTE.

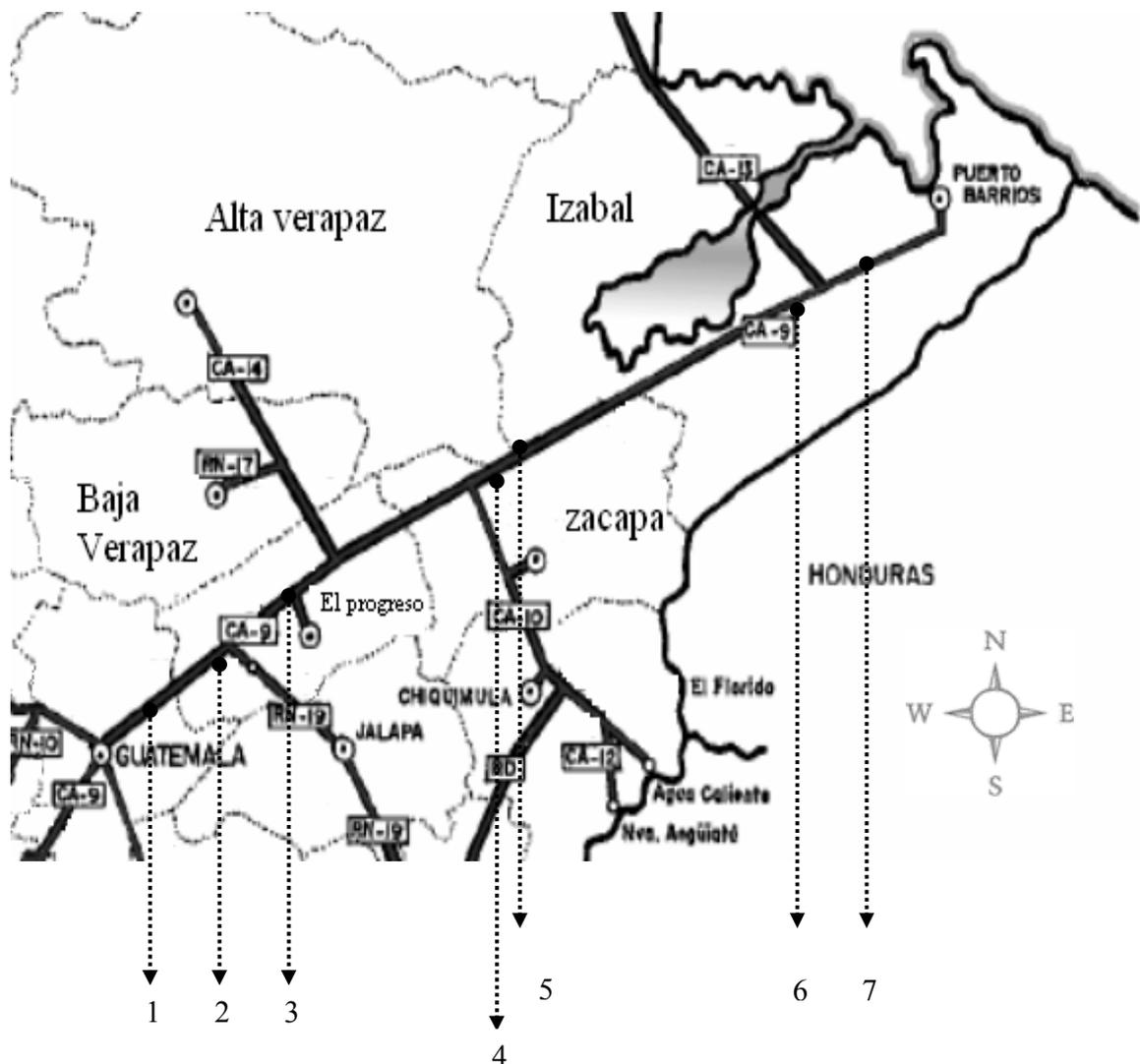
No.	DEPTO.	KM.	TRAMO	CARACTERISTICA DEL TRAMO	CAUSAS
1	GUATEMALA	29	Aguas calientes	Pendientes y curvas pronunciadas*	Exceso de velocidad y no respetar carril
2	EL PROGRESO	40 - 42	San Rafael las flores	Muchas pendientes y curvas*	Exceso de velocidad, transporte pesado**
3	EL PROGRESO	70 Aprox.	Entrada a Cementos Progreso	Curva peligrosa* sin señalización	Exceso de velocidad**
4	ZACAPA	114 - 116	Entrada a Uzumatlán	Rectas y curvas*	Exceso de la velocidad**
5	ZACAPA	118	Entrada a Teculután	Rectas y curvas*	Exceso de velocidad**
6	IZABAL	200 Aprox.	Entrada a Quirigua	Geometría de la carretera*	Exceso de la velocidad**
7	IZABAL	257	Entrada a Morales	Geometría de la carretera*	Exceso de la velocidad**

* tramos estrechos.

** generalmente no respetan el carril, rebasando el tráfico pesado.

Fuente: Departamento Ingeniería de tránsito / división planificación y estudios / D.G.C.

FIGURA 11. Ampliación de la carretera CA-9 Norte para identificar los tramos peligrosos sobre la ruta identificados en la tabla 2.



Fuente: Departamento Ingeniería de tránsito / división planificación y estudios / D.G.C.

3. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DEL RADAR LASER (LIDAR)

El Lidar es un sistema de radar que sirve para detectar vehículos que se conducen con exceso de velocidad sobre tramos de carreteras. Este sistema es activo debido a que transmite y luego recibe la *radiación óptica* emitida, la frecuencia de la radiación óptica opera en la región ultravioleta del espectro electromagnético.

Este sistema de radar láser es un sistema moderno que solo difiere en la longitud de onda de la radiación usada, o sea, que es la versión óptica del radar.

El transmisor del LIDAR es un láser, mientras su receptor es un telescopio óptico basándose en dispositivos de convergencia como lentes, prismas, y/o espejos.

El propósito de este capítulo, es el de analizar los principios teóricos científicos que hacen posible el desenvolvimiento del sistema Lidar, y se realiza de la siguiente manera:

1. Estudio de la naturaleza de la luz, con el fin de conocer su principal participación en el láser.
2. Estudio de la reflexión y refracción, la reflexión de la radiación láser es la que detecta el receptor con una frecuencia diferente a la emitida y la procesa para determinar la velocidad del automotor.
3. Estudio de los elementos ópticos que lleva a cabo su funcionamiento.

3.1 PRINCIPIOS SOBRE LA NATURALEZA DE LA LUZ

Diferentes teorías se han ido desarrollando para interpretar la naturaleza de la luz para llegar al conocimiento actual. Para poder explicar la naturaleza de la luz, se planteó con base a dos teorías, a finales del siglo XVII, la Teoría de Partículas (corpúscular) por **Isaac Newton** y la Teoría Ondulatoria por **Christiaan Huygens**. Cada teoría trataba de explicar las características de la luz observadas en esos tiempos.

3.1.1 TEORÍA CORPUSCULAR

Se le conoce como teoría corpuscular o de la emisión, propuesto por **Newton** en 1666. Supone que la luz está compuesta por una granizada de corpúsculos o partículas luminosas, los cuales se propagan en línea recta, logrando atravesar medios transparentes y ser reflejados por materias opacas.

La teoría de Newton se fundamenta en estos puntos:

- Propagación rectilínea. La luz se propaga en línea recta porque los corpúsculos que la forman se mueven a gran velocidad.
- Reflexión. se sabe que la luz al chocar contra un espejo se refleja de manera que al llegar a ella varía de dirección pero siempre en el mismo medio. Newton explicaba este fenómeno diciendo que las partículas luminosas son perfectamente elásticas y por tanto la reflexión cumple las leyes del choque elástico.

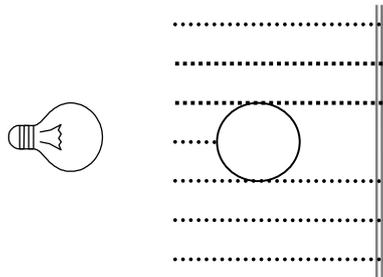
- Refracción. El hecho que la luz cambie la velocidad en medios de distinta densidad, cambiando la dirección de propagación, tiene difícil explicación con la teoría corpuscular. Sin embargo Newton supuso que la superficie de separación de dos medios de distinto índice de refracción ejercía una atracción sobre las partículas del medio más denso, por lo tanto, aumentando la componente normal de la velocidad mientras que la componente tangencial permanecía invariable.

La propagación de la luz es semejante a un flujo de proyectiles que son emitidos por un cuerpo que genera luminosidad. Se supuso que la visión era la consecuencia de la colisión de granizadas de proyectiles que impactaban en los ojos.

Se pensaba que las partículas producen sombras con contornos bien definidos por los rayos rectilíneos de luz constituida por partículas, como se muestra en la figura 12.

Newton explicó que la variación de *intensidad* de la fuente luminosa es proporcional a la cantidad de corpúsculos que se emite en determinado tiempo. 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).

FIGURA 12. **Las partículas de luz produce sombra con contornos bien definidos, argumento a favor de la teoría corpuscular.**



Fuente: Tippens, **Física**, página 305.

La teoría corpuscular explica la propagación rectilínea de la luz, la refracción y reflexión; pero no explica los anillos de Newton, ni tampoco los fenómenos de interferencia y difracción.

3.1.2 TEORÍA ONDULATORIA

Propugnada por **Christiaan Huygens** en el año 1678, define a la luz como un movimiento ondulatorio. La luz se propaga mediante ondas mecánicas emitidas por un foco luminoso, y supuso tres hipótesis:

- Todos los puntos de un frente de ondas eran centros emisores de ondas secundarias.
- Todo centro emisor se propagaban como ondas en todas direcciones del espacio con velocidad distinta en cada medio.

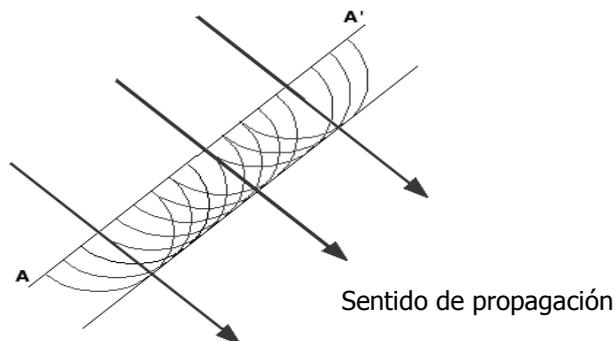
- Como la luz se propagaba en el vacío y necesitaba un material perfecto sin rozamiento de gran elasticidad, impalpable que todo lo llena, incluyendo el vacío puesto que la luz también se propaga en él; se supuso que todo el espacio estaba ocupado por **éter**.

En este medio, es necesario equiparar las vibraciones luminosas con las elásticas transversales de los sólidos sin que se transmitan, por lo tanto las vibraciones son longitudinales. Aquí es donde se presenta la mayor contradicción en cuanto a la presencia del éter en la teoría ondulatoria como medio de transporte de ondas, ya que se requeriría que éste reuniera alguna característica sólida pero que a su vez no opusiera resistencia al libre tránsito de los cuerpos sólidos.

La energía luminosa no está concentrada en cada partícula, como en la teoría corpuscular sino que está repartida por todo el frente de onda. El frente de onda es perpendicular a las direcciones de propagación, véase la figura 13. La teoría ondulatoria explica perfectamente los fenómenos luminosos mediante una construcción geométrica llamada principio de **Huygens**.

Después de un siglo fue considerada la teoría ondulatoria sobre la luz, esto se debía a que no se logró definir la frecuencia de las ondas de luz, para ello se realizaron experimentos por **Thomas Young** sobre los fenómenos de Interferencias luminosas y los del físico **Auguste Jean Fresnel** sobre la difracción que fueron decisivos para determinar la naturaleza de la luz.

FIGURA 13. **Propagación de una onda plana en el vacío, descrita por Huygens.**



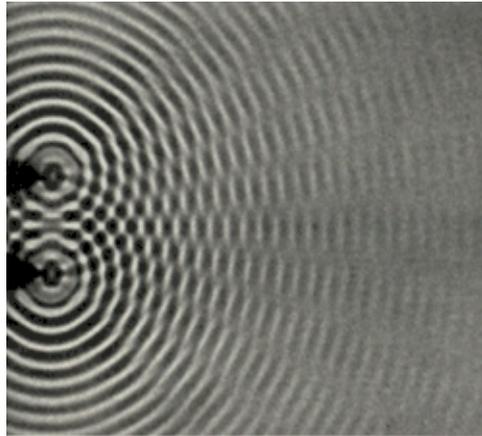
Fuente: Robert Resnick, **Física**, tomo 2 página 352.

Por parte de **Young** demostró experimentalmente el hecho paradójico que se daba en la teoría corpuscular de que la suma de dos fuentes luminosas pueden producir menos luminosidad que por separado. En una pantalla negra, dos minúsculos agujeros (rendijas) muy próximos entre sí, la luz de un pequeño y distante foco aparece en forma de anillos alternativamente brillantes y oscuros. Observó como el efecto de ambos agujeros que por separado darían un campo iluminado, y combinados producen sombra en ciertas zonas.

Young logra explicar que las ondas suman sus crestas cuando se hallan en concordancia de fase y 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 por tanto existe franjas de oscuridad. Dedución simple imputada a una interferencia (véase figura 14) donde se maneja la idea de la luz como estado vibratorio (ondulatorio).

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**, la explicación que presentó fue sobre el fenómeno de la difracción.

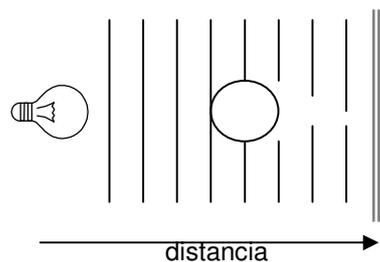
FIGURA 14. Patrón de interferencia, las ondas se traslapan para formar un patrón de máximos y mínimos de las ondas.



Fuente: Robert Resnick, **Física**, tomo 2 Página 396.

La difracción consiste en que una onda puede rodear un obstáculo, véase figura 15 , o propagarse a través de una pequeña abertura véase figura 16.

FIGURA 15. Difracción de las ondas luminosas que encuentra un obstáculo donde las ondas se desvían rodeando los bordes, produciendo una sombra borrosa o sin sombra.

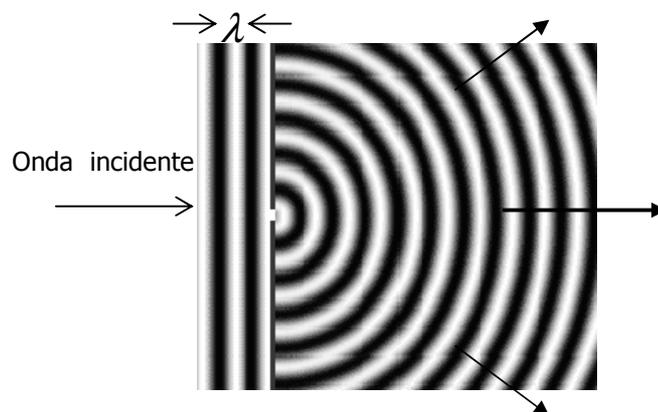


Fuente: Tippens, **Física**, Página 305.

Aunque este fenómeno es general, su magnitud depende de la relación que existe entre la longitud de onda y el tamaño del obstáculo o abertura.

Si una abertura (obstáculo) es grande en comparación con la longitud de onda, el efecto de la difracción es pequeño, y la onda se propaga en líneas rectas o rayos, de forma semejante a como lo hace un haz de partículas. Sin embargo, cuando el tamaño de la abertura (obstáculo) es comparable a la longitud de onda, los efectos de la difracción son grandes y la onda no se propaga simplemente en la dirección de los rayos rectilíneos, sino que se dispersa como si procediese de una fuente puntual localizada en la abertura.

FIGURA 16. Difracción producida por una rendija, la abertura de la rendija tiene el tamaño de la longitud de onda.



Fuente: Robert Resnick, **Física**, Página 348.

Las ondas se desvían hacia una nueva dirección, puede rodear obstáculos y seguir su trayecto, por ejemplo, las ondas de sonido son difractados por objetos y como resultado podemos escuchar sonidos aun cuando no estemos en línea directa a su fuente.

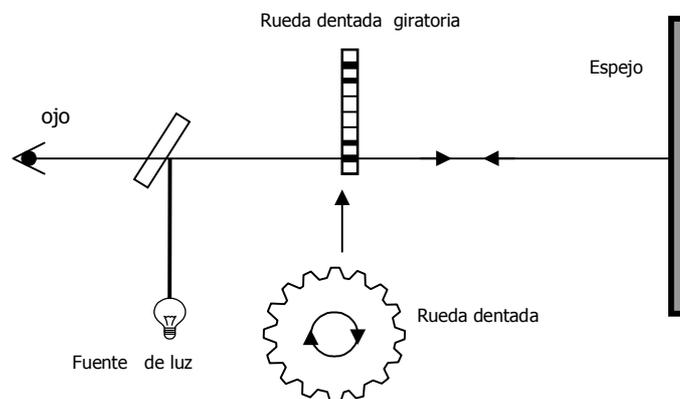
Los avances de **Fresnel** es el explicar una multiplicidad de fenómenos respecto a la luz, analiza la luz polarizada. Observó que dos rayos polarizados ubicados en un mismo plano se interfieren, pero no lo hacen si están polarizados entre sí cuando se encuentran perpendicularmente. Este descubrimiento indica que un rayo polarizado debe vibrar perpendicularmente en dirección a la propagación.

La conclusión es que las vibraciones de la luz no pueden ser longitudinales, como **Young** lo propusiera, sino perpendiculares a la dirección de propagación (transversal). Las distintas investigaciones y estudios que se realizaron sobre la naturaleza de la luz, 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 en siglos anteriores.

En 1849, el físico francés **Fizeau**, logró medir la velocidad de la luz con una experiencia hecha en la tierra. Envío un rayo de luz entre los dientes de una rueda dentada que giraba a gran velocidad, de modo que se reflejara en un espejo y volviera hacia la rueda. Esta relación de velocidad entre el camino recorrido por la luz en su ida y vuelta queda en función de la frecuencia conocida de la rotación de la rueda dentada, se muestra en la figura 17, y fue la que tomó **Fizeau** de base para calcular la velocidad de la luz, su resultado fue de 3.133×10^8 [m/s].

Simultáneamente **Fizeau** y León **Foucault** en 1850 descubrieron otro método que permite medir la velocidad de la luz en espacios reducidos. La idea consiste en enviar un haz de luz sobre un espejo giratorio haciéndole atravesar una lámina de vidrio semitransparente y semirrefleitora, un espejo fijo devuelve el rayo y atraviesa la lámina observándose la mancha luminosa en una pantalla.

FIGURA 17. **Aparato de Fizeau para medir la velocidad de la luz.**



Fuente: Tippens, **Física**, Página 312.

En general todas las mediciones de que se tiene conocimiento por diversos métodos obtuvieron resultados entre 298.000 Km./seg. y 313.300 Km./seg. sin embargo se toma como velocidad de la luz en el vacío 300.000 Km./seg. actualmente.

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.

3.1.3 TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA

El descubrimiento de la *interferencia* y la *difracción* se inclinó la discusión en favor de la teoría ondulatoria de **Huygens** porque estos fenómenos podían explicarse solo en términos de una teoría ondulatoria. El problema era el medio donde viaja la onda de luz ya que el vacío no posee un medio que vibrara realmente y sin embargo la luz puede viajar; como la luz del sol o de las estrellas. Este es el cuestionamiento del éter.

En el siglo XIX **James Clerk Maxwell** (1831-1879) emprendió el camino para determinar las propiedades de un medio que permitiera que la luz pudiera transmitirse, asimismo la energía eléctrica y el calor. En 1865, **Maxwell** explicó sus ecuaciones electromagnéticas creando el andamiaje matemático, logrando reunir los fenómenos ópticos y electromagnéticos.

La interacción electromagnética se describe en términos de dos campos; el campo eléctrico **E**, y el campo magnético **B**, estos campos vienen determinados por la distribución de las cargas y por sus movimientos (corrientes). La teoría del campo electromagnético se puede condensar en cuatro leyes denominadas ecuaciones de **Maxwell** que se escriben de forma integral de la siguiente manera:

Ley de **Gauss** para el campo eléctrico, generaliza la ley de **Coulomb** que dice “toda carga encerrada por una superficie S produce un campo eléctrico”.

$$\bullet \oint E \cdot ds = q / \epsilon_0 \quad (3.1)$$

Ley de **Gauss** para el campo magnético, indica la no existencia de los monopolos magnéticos.

$$\bullet \oint B \cdot dS = 0 \quad (3.2)$$

Ley de inducción **Faraday-Henry**, define la existencia de un campo eléctrico variable si existe un campo magnético variable. Por ello las líneas de flujo eléctrico puede formar trayectorias cerradas.

$$\bullet \oint E \cdot dl = - \frac{d}{dt} \oint B \cdot dS \quad (3.3)$$

Ley de **Ampere-Maxwell**

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I + \frac{d}{dt} \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \quad (3.4)$$

Las características esenciales de las ecuaciones de **Maxwell** indica lo siguiente:

1. Las ondas electromagnéticas transportan energía que se reparte de igual manera entre campos eléctricos y magnéticos mutuamente perpendiculares, estos oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda, ver figura 18. La dirección de propagación está dada por el vector $= \mathbf{E} \times \mathbf{B}$.
2. Las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío con una velocidad c .

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (3.5)$$

donde ϵ_0, μ_0 es la permitividad y la permeabilidad del medio.

3. Para una onda electromagnética armónica las amplitudes de los campos eléctrico E_0 y magnético B_0 están relacionados, $c = E_0 / B_0$ en el vacío.
4. La energía electromagnética que atraviesa una sección S en la unidad de tiempo es

$$\int_S c^2 \epsilon_0 (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{S} \quad (3.6)$$

5. El momento lineal p por unidad de volumen de una onda electromagnética es el cociente entre la densidad de energía electromagnética y la velocidad c .

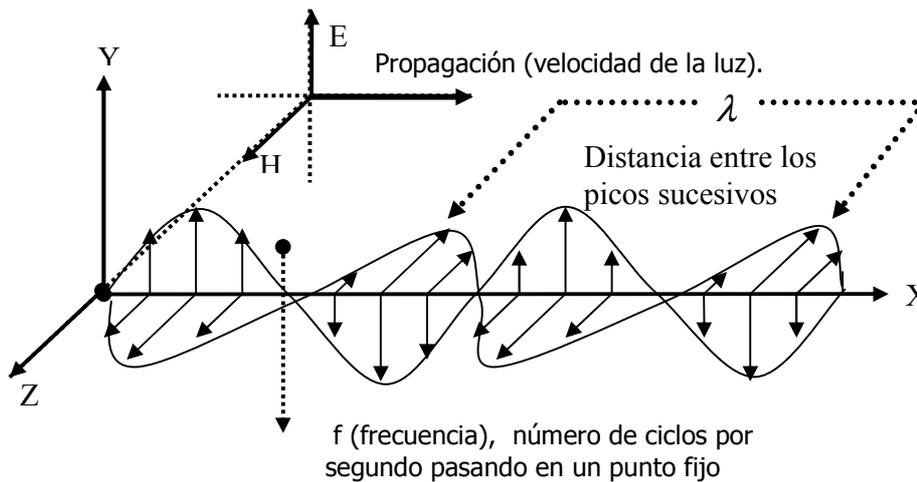
$$\mathbf{p} = \epsilon_0 (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \quad (3.7)$$

Las ecuaciones de Maxwell tiene tres consecuencias importantes:

1. La ecuación de onda es básicamente la propagación de ondas electromagnéticas.
2. El vector de Poynting o densidad de energía.
3. Emisión de radiación.

Las ecuaciones de Maxwell no solo resumen los fenómenos eléctricos y magnéticos, sino que indica su propagación, además muestran que la luz puede comprenderse como un tipo de onda electromagnética. Por tanto, una onda de luz no tendría que depender de la vibración de materia (éter) ya que podría propagarse por la oscilación de campos transversales; donde un campo eléctrico variable genera un campo magnético variable y que esta a su vez genera otro campo eléctrico variable, así sucesivamente por autoinducción, de esta forma estas ondas se sostienen a través del vacío sin requerir de algún medio para que la onda se propague.

FIGURA 18. Ilustración de una onda electromagnética, con los campos eléctricos E y magnético H asociados, avanzando a la velocidad de la luz.



De esta doble analogía, Maxwell concluye que la luz consiste en una perturbación electromagnética que se propaga. Ondas eléctricas y ondas luminosas son fenómenos idénticos. Maxwell supuso que la luz representaba una pequeña porción del espectro de ondas electromagnéticas.

Veinte años más tarde, **Heinrich Hertz** (1857-1894) comprueba que las ondas hertzianas de origen electromagnético tienen las mismas propiedades que las ondas luminosas, estableciendo la identidad de la luz. **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.

Esto deja en evidencia que las ondas eléctricas 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. 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.

3.1.4 TEORÍA CUÁNTICA

La teoría electromagnética de **Maxwell** tiene debilidades, ya que deja sin explicación fenómenos tan evidentes como la absorción o emisión de energía radiante, el efecto fotoeléctrico y la emisión de luz por cuerpos incandescentes.

En consecuencia **Planck** en 1900, retoma la teoría corpuscular para analizar la radiación electromagnética, experimentando con la **Radiación de cavidad**, que esta conformada por una fuente de luz artificial (incandescente que se excita su filamento) cubierta donde se hace una cavidad y manteniendo las paredes de la cavidad a una temperatura uniforme, este pequeño orificio proporciona un escape de radiación para ser examinada, esta radiación de cavidad (térmica) tiene un espectro (véase espectro electromagnético) sencillo cuya naturaleza se determina mediante la temperatura de las paredes que es la radiación infrarroja del espectro. La ley de radiación analiza la interacción entre la radiación en el volumen de la cavidad y los átomos que forman las paredes de la cavidad, **Planck** supuso que estos átomos se comportan como osciladores minúsculos, cada una con una frecuencia de oscilación característica.

Estas oscilaciones irradian energía en la cavidad y absorben energía en ella, donde la característica de radiación de la cavidad depende de las características de los osciladores que lo generan.

Para determinar la ley de la radiación **Planck** hace una suposición radical que los osciladores atómicos no deben emitir o absorber ninguna energía E (paquetes o fotones) sino solo energías seleccionadas de un conjunto discreto definido por:

$$E = n \times f \times h \quad (3.8)$$

Donde:

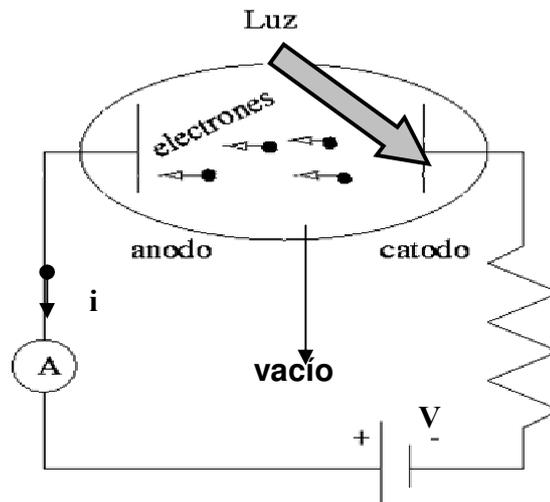
- E = energía del fotón
- h = constante de **Planck** (6.625×10^{-34} [J / HZ]), la pequeñez de la constante de **Planck** hace la granulosidad de la energía demasiado fina como para no detectarla.
- f = frecuencia del fotón.
- n = número cuántico (la energía de un oscilador atómico se cuantiza)

Esta ecuación indica que los niveles de energía del oscilador están espaciados igualmente, siendo “ hf ” el intervalo entre niveles contiguos. La energía de un fotón es mayor cuanto menor sea la longitud de onda.

En 1905 **Einstein** realizó matemáticamente el efecto fotoeléctrico. Este efecto consiste en el hecho de que, cuando se ilumina una superficie metálica limpia y si la frecuencia fuera lo suficientemente grande, la luz expulsará electrones de la superficie.

Estos electrones pueden ser recogidos en un tubo de rayos catódicos para relacionar su emisión con algo fácilmente medible, como es la intensidad y el voltaje eléctrico, este efecto cubre la región de la luz visible y la luz ultravioleta del espectro electromagnético, (ver figura 19).

FIGURA 19. Dispositivo simplificado para estudiar el efecto fotoeléctrico.



Fuente: <http://bellota.ele.uva.es/~imartin/libro/node22.html>

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 un electrón + energía cinética del electrón emitido.

Algebraicamente:

$$hf = hf_0 + \frac{1}{2} m v_m^2 \quad (3.9)$$

que puede también escribirse como:

$$hf = \phi + E_k \quad (3.10)$$

Donde:

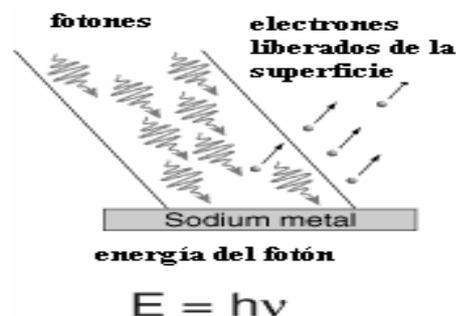
- h es la constante de **plank**.
- f_0 es la frecuencia de corte o frecuencia mínima de los fotones para que tenga lugar el efecto fotoeléctrico.

- ϕ es la función de trabajo, o mínima energía necesaria para liberar un electrón de su enlace con el átomo
- E_k es la máxima energía cinética de los electrones que se observa experimentalmente.

Si la energía del fotón (hf) no es mayor que la función de trabajo (ϕ), ningún electrón será emitido. Esto es, porque parte de la energía es absorbida o emitida como radiación, y porque los electrones emitidos pueden ser absorbidos por otros átomos de la red cristalina produciendo una pérdida de energía en forma de calor.

Einstein propone que la cuantización es una propiedad intrínseca de la luz y no de los osciladores como había pensado **Planck**. En este nuevo modelo, la luz es una onda electromagnética, tal como lo propuso **Maxwell**, sólo que en lugar de tratarse de una onda continua se encuentra modulada en paquetes de energía. Esto implica una dualidad de características, pues, a pesar de ser una onda, al estar localizada en el espacio y poseer una energía definida, presenta características similares a las de las partículas, ver figura 20.

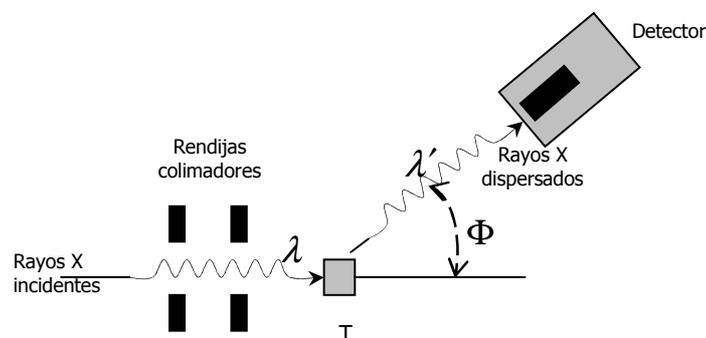
FIGURA 20. **La luz se comporta como partículas (fotones o paquetes) y que su energía esta de acuerdo a la frecuencia del tipo de luz.**



Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/mod1.html>

Otro fenómeno que ayuda a entender la naturaleza de la luz, es realizado por **Arthur H. Compton** en 1923, conocido como el efecto Compton. En este experimento se envían rayos X (un tipo de luz más energética que la visible del espectro) a una zona con átomos, y posteriormente se medía tanto la frecuencia y ángulo de la luz que se dispersa como la velocidad del electrón derivado tras el choque. Un haz de rayos X con longitud de onda (λ) bien definida incide sobre un blanco de grafito T, se observa en la figura 21. A diversos ángulos de dispersión Φ , la intensidad de los rayos X dispersados se miden en función de su longitud de onda. Los rayos dispersados muestra una longitud de onda (λ') diferente a la emitida.

FIGURA 21. **Arreglo experimental para observar el efecto Compton. El detector se puede mover a diversos ángulos Φ .**



Fuente: Robert Resnick, **Física**, tomo 2 Página 490.

Desde el punto de vista ondulatorio, la onda incidente de frecuencia "f" causa que los electrones que estén en el blanco dispersor oscilen a esa misma frecuencia radiando ondas electromagnéticas como una pequeña antena, de esta manera las ondas dispersas deben de tener una misma frecuencia que la onda que incide.

Compton explicó que los rayos “X” incidentes no se comportaba como una onda sino como un conjunto de fotones de energía $E=hf$ y que estos fotones experimentan colisiones como las bolas de billar con los electrones libres en el blanco dispersor, con este panorama, la radiación dispersada consta del retroceso de los fotones que emergen del blanco.

Puesto que el fotón cuando incide transfiere parte de su energía e ímpetu al electrón con el que choca, el fotón dispersado debe de tener una energía menor E' en consecuencia una frecuencia menor f' e ímpetu diferente, esta es la explicación del corrimiento de $\Delta\lambda$ desde el punto de vista ondulatorio.

Se analiza cuantitativamente una colisión fotón-electrón, el electrón está inicialmente en reposo, se analiza la conservación de la su energía en la colisión.

$$E_i = E_f \quad (3.11)$$

$$hf + mc^2 = hf' + mc^2 + K \quad (3.12)$$

Donde:

- mc^2 energía de reposo del electrón golpeado
- K energía cinética relativista

Utilizando los principios de conservación de la energía y del momento lineal en estos choques, todos los resultados eran coherentes, suponiendo que la luz se comporta como una partícula (un fotón) que colisiona con el electrón, con energía dada por la relación de Planck $E=hf$. En la teoría especial de la relatividad la energía de una partícula cuya masa en reposo es “ m ” y que tiene energía cinética “K”, se expresa de esta manera:

$$E = mc^2 + k = E_0 + k \quad (3.13)$$

Si $p = mv$ es el momento lineal (ímpetu) de la partícula, se tiene que:

$$E^2 = m^2_0 c^4 + p^2 c^2 = E^2_0 + p^2 c^2 \quad (3.14)$$

Para el caso de una partícula que se mueva con velocidad cercana a la de la luz $v \approx c$, el término $p^2 c^2$ es mucho mayor que $m^2_0 c^4$, de manera que con la teoría clásica, la energía y cantidad de ímpetu de la onda electromagnética está dado por:

$$E^2 = p^2 c^2; \quad E = pc \quad (3.15)$$

3.1.5 DUALIDAD DE LA LUZ (onda-partícula)

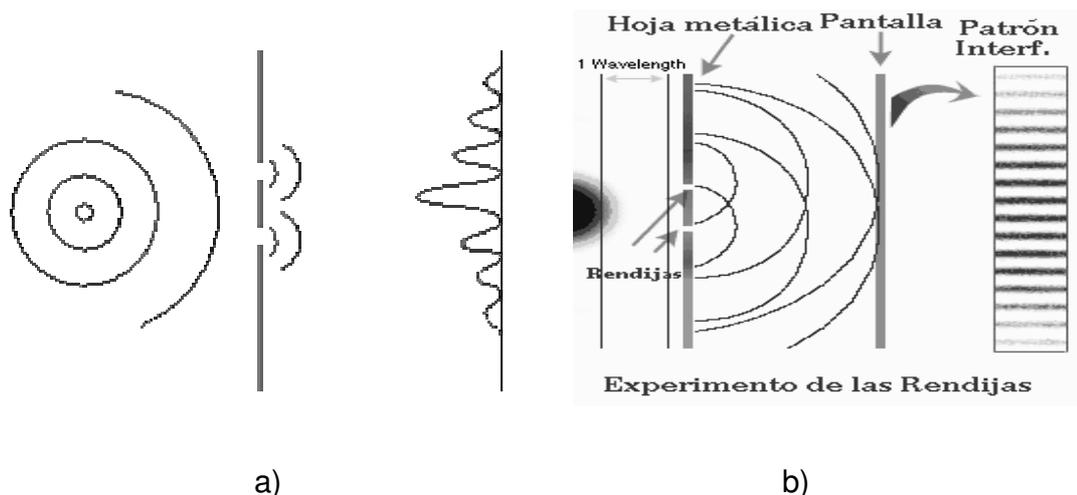
Se propone que la energía al igual que la materia también se encuentra atomizada, fue una idea genial que trajo consigo el desarrollo de la mecánica cuántica. Sin embargo, había una diferencia entre “cuantos” de energía y las “partículas”, pues estas últimas también se caracterizan por un ímpetu lineal. La posibilidad de asignar ímpetu a los cuantos. Los primeros experimentos fueron realizados por **Compton** donde sus observaciones confirmaron que al chocar un cuanto de luz con un electrón, éstos dividen su energía y su ímpetu de acuerdo con la cinemática que se esperaría del choque entre dos partículas. Paradójicamente, al tiempo que se consolidaba el concepto del fotón como una partícula, el concepto de materia, y por tanto el de partícula, perdió el sentido determinista que hasta entonces se le asociaba. Tradicionalmente, los electrones se habían considerado como partículas, y por tanto un haz de electrones sería algo claramente distinto de una onda. En 1924 **Louis Víctor de Broglie** propuso una teoría sobre el electrón, que posteriormente fue generalizada para el resto de las partículas, en la cual se consideraba al electrón como un paquete de onda, similar al fotón pero con masa.

Louis de Broglie propuso eliminar esta distinción, un haz de partículas y una onda son esencialmente el mismo fenómeno; simplemente, depende del experimento que realicemos. De esta manera el electrón posee una longitud de onda (que es un parámetro totalmente característico de las ondas).

Esta propuesta teórica, fue confirmada experimentalmente en 1927, cuando se consiguió que haces de electrones experimentasen un fenómeno muy característico de las ondas; la “difracción” de electrones que atraviesa una rendija muy estrecha, y con ella queda confirmada la hipótesis de **De Broglie**.

En un experimento con ondas viajeras, se puede interponer ante estas una pantalla con dos rendijas produciendo el patrón de interferencia, ver figura 22. El resultado es que las ondas secundarias producidas por ambas rendijas, interfieren de manera constructiva a veces y de manera destructiva otras veces.

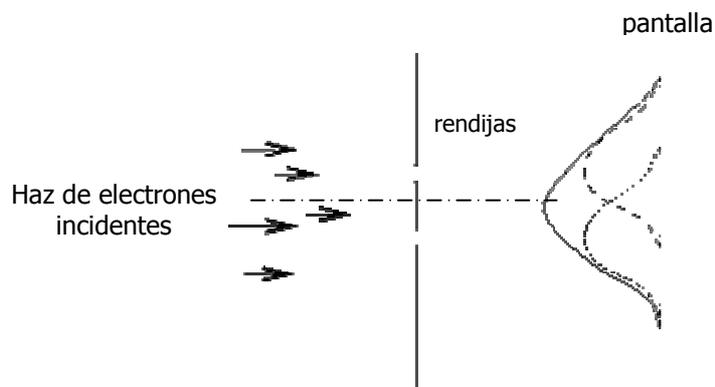
FIGURA 22. a) Ocorre difracción en una sola rendija, con dos rendijas se observa interferencia de las ondas, b) patrón de interferencia en la pantalla de las ondas.



Fuente: <http://fis.linuxchile.cl/docs/mcuant/node15.html>

Si en vez de ondas pensamos en un experimento con electrones, la teoría corpuscular nos predice un comportamiento como el que aparece en la figura 23.

FIGURA 23. **Dos rendijas producen interferencia para el electrón.**



Fuente: <http://fis.linuxchile.cl/docs/mcuant/node15.html>

Al realizarse experimentos muy precisos con electrones, se pudo constatar que los electrones también exhiben un comportamiento ondulatorio. Finalmente **Broglie** unifica la teoría electromagnética y la de los cuantos demostrando la doble naturaleza de la luz, bajo el siguiente razonamiento:

- La naturaleza es sorprendentemente simétrica de muchas maneras.
- Nuestro universo observable está compuesto totalmente de luz y de materia.
- Teniendo en cuenta la dualidad onda-corpúsculo de la luz (Young-Einstein), quizás también la materia goce de esta cualidad.

Tal es el caso de los fotones, de manera que por definición un fotón tiene energía en reposo (por lo tanto también masa en reposo) y toda su energía es cinética.

Para poder explicar fenómenos de origen esencialmente ondulatorio como el de interferencia, y conservar el concepto corpuscular de fotón asociado a la luz, que tan exitosamente explicaba el efecto fotoeléctrico y otros, **De Broglie** propuso asociar ondas con los fotones de esta manera:

La energía de un fotón de frecuencia “f” propuesta por **Planck** es: $E = hf$

La energía de un fotón según la teoría especial de la relatividad es: $E = pc$

- P es el ímpetu, propiedad propia de las partículas; donde el efecto **Compton** demuestra que un haz de luz o fotones tiene un momento lineal (ímpetu).

Relacionando las ecuaciones (8) y (16) queda:

$$E = hf = pc \quad (3.16)$$

Despejamos p de la ecuación 16, se obtiene $\therefore P = \frac{hf}{c}$, sustituyendo $c = \lambda f$ y despejando la longitud de onda. Por lo tanto se obtiene:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (3.17)$$

Esta ecuación conocida como *la longitud de onda de De Broglie* proporciona una conexión entre una propiedad ondulatoria de la radiación (la longitud de onda “ λ ”) con la propiedad de las partículas (el ímpetu “p”). Donde la constante de **Planck** proporciona el eslabón de unión entre las naturalezas ondulatoria y de partícula tanto de la materia como de la radiación.

Para el caso de electrones, tiene utilidad esta relación en el mundo microscópico, debido a que el ímpetu puede ser lo suficientemente pequeño como para llevar a la longitud de onda **de Broglie** a la región en que puede observarse las propiedades ondulatorias.

Esta relación proporciona un medio para calcular la longitud de onda asociada con el comportamiento ondulatorio de la materia.

De acuerdo a **De Broglie**, una ecuación similar puede utilizarse para asignar una longitud de onda a un electrón, sustituyendo el ímpetu de la partícula dado por $p = mv$ en la ecuación 17, se obtiene:

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (3.18)$$

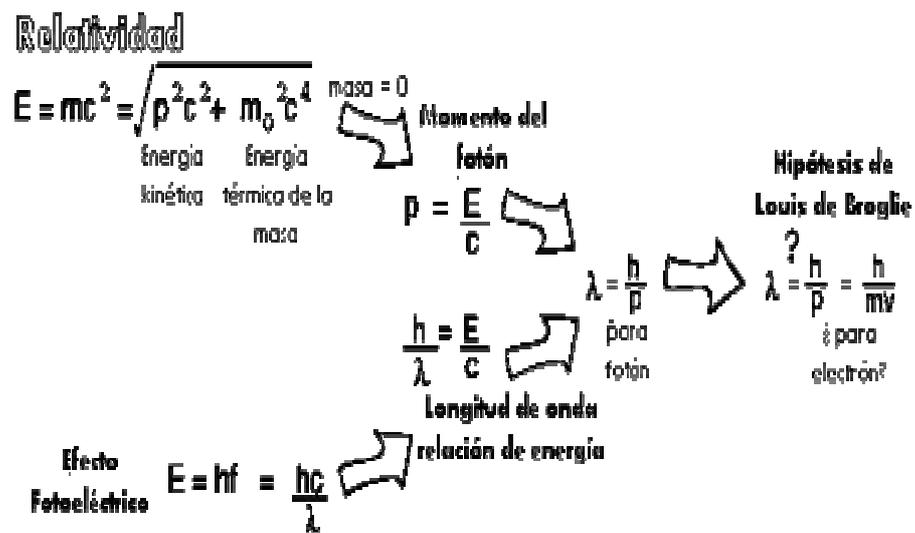
Donde:

- m masa del electrón
- v velocidad del electrón

La sugerencia de **De Broglie** quizás no hubiera recibido seria atención si no hubiera predicho cuál debía ser la longitud de onda asociada a las llamadas ondas de materia. Donde la longitud de onda de las ondas de materia debían estar dada por la misma relación aplicable a la luz.

En la figura 24, se muestra el esquema de un diagrama de flujo de la dualidad de la luz establecida por **Brogie**.

FIGURA 24. Diagrama de flujo de la dualidad de la luz.



La luz cumple con la dualidad actualmente, se usa la teoría ondulatoria cuando se estudia la propagación de la luz como una onda electromagnética pero la teoría corpuscular es necesaria para describir la interacción de la luz con la materia.

Puede definirse la luz como energía radiante transportada por fotones y transmitidas por un campo ondulatorio (electromagnético).

3.2 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Las ondas electromagnéticas se organizan en un espectro continuo de acuerdo a sus longitudes de onda ó frecuencias, de esto obtenemos el espectro electromagnético representado en la figura 25.

Las ondas electromagnéticas cubren una amplia gama de frecuencias o de longitudes de onda y pueden clasificarse según su principal fuente de producción.

La clasificación no tienen "límites precisos", se extiende desde longitudes de onda de radio hasta los rayos gamma; aunque en realidad ambos extremos del espectro electromagnético se extienden desde cero hasta el infinito. En la tabla III se detallan los rangos aproximados de las frecuencias que componen el espectro electromagnético.

FIGURA 25. **Espectro electromagnético.**

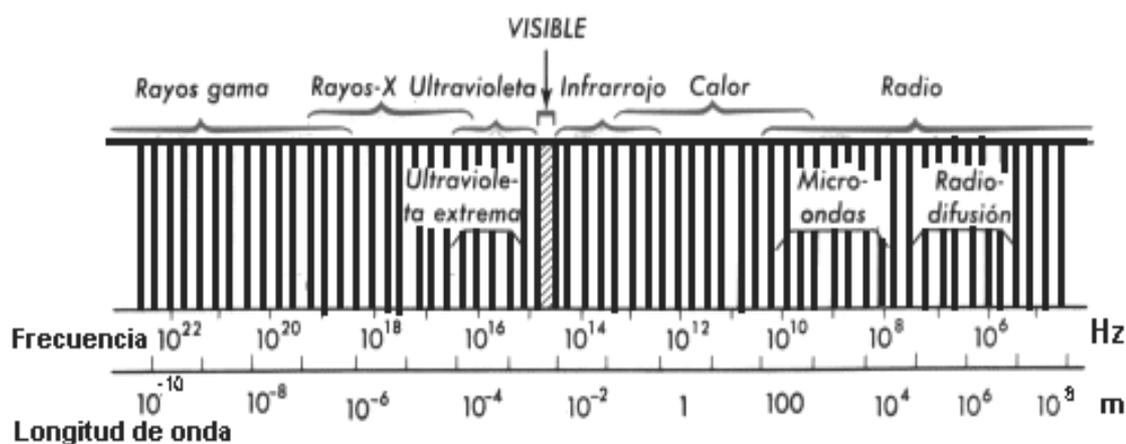


TABLA III. **División del espectro electromagnético por su frecuencia.**

	Región del espectro	Intervalo de frecuencias (Hz)
1-2	Radio-microondas	0 - $3.0 \cdot 10^{12}$
3	Infrarrojo	$3.0 \cdot 10^{12}$ - $4.6 \cdot 10^{14}$
4	Luz visible	$4.6 \cdot 10^{14}$ - $7.5 \cdot 10^{14}$
5	Ultravioleta	$7.5 \cdot 10^{14}$ - $6.0 \cdot 10^{16}$
6	Rayos X	$6.0 \cdot 10^{16}$ - $1.0 \cdot 10^{20}$
7	Radiación gamma	$1.0 \cdot 10^{20}$ - ∞

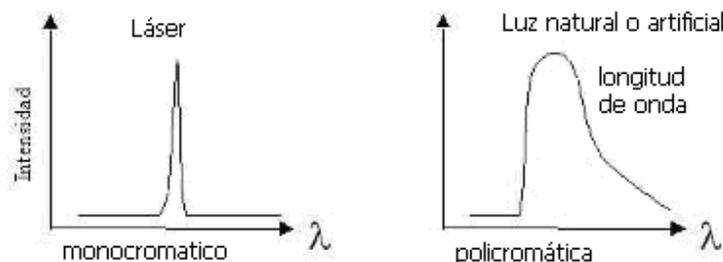
3.3 PRINCIPIOS DE LA LUZ LÁSER

El láser llamado a veces fotónica que trata la interacción (a nivel cuántico) entre los fotones y la materia a nivel macroscópico. El LÁSER es una contracción de las palabra en inglés "*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*" que traducido al español significa "amplificación de la luz por emisión estimulada de la radiación". La luz del láser difiere de la luz convencional en varios aspectos, aunque los dos son de naturaleza electromagnética, la luz del láser tiene ciertas propiedades que lo hacen muy deseable en una multitud de campos y aplicaciones.

Se describe las características intrínsecas de la luz láser con respecto a la luz convencional de espectro continuo:

- La luz láser es altamente monocromática: Un láser emite un "color" (una longitud de onda) o más exactamente una banda muy estrecha de longitudes de onda con toda la potencia concentrada en una longitud de onda única, se representa en la figura 26 .

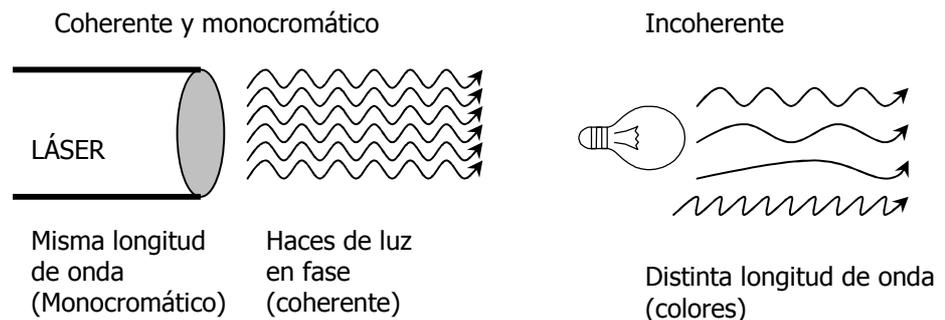
FIGURA 26. Gráfica de la luz monocromática respecto a una luz policromática.



Fuente: <http://www.informed.es/selo/articulo10.html>

- La luz láser es altamente coherente: todas las ondas en el rayo láser están altamente ordenadas en espacio y correlacionadas en tiempo. Una analogía para explicar esta condición de orden es relacionar la fuente del láser a un gran grupo de soldados caminando en un desfile, con el mismo paso y al mismo tiempo. Una fuente de luz ordinaria es similar a un desfile cuando se ha dado la orden de despliegue, es decir no hay ninguna relación de la fase fija entre los fotones emitidos por la fuente (figura 27).

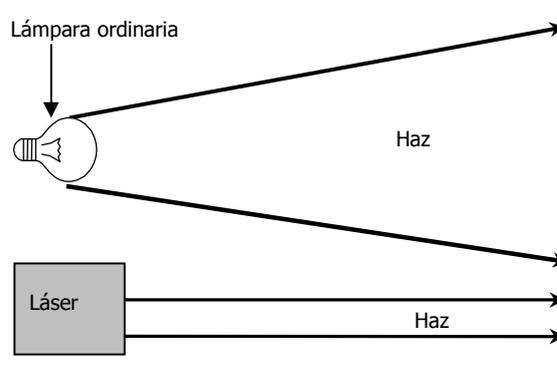
FIGURA 27. **La coherencia de la luz láser respecto a la luz natural.**



Fuente: <http://www.informed.es/selo/articulo10.html>

- La luz láser es altamente direccional: es emitida en un rayo bastante estrecho que permanece estrecho en su trayectoria. Esta propiedad hace posible el enviar un rayo láser desde la Tierra hasta la Luna con una divergencia muy pequeña. Para muchos fines prácticos, este es un rayo paralelo (figura 28).

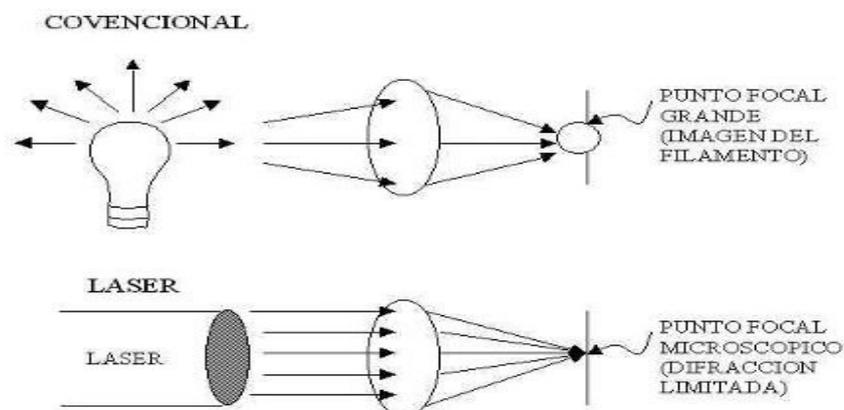
FIGURA 28. Patrón de radiación de la luz blanca respecto al LÁSER.



Fuente: <http://www.informed.es/selo/articulo10.html>

- La luz láser tiene mayor *luminosidad* (resplandor): puede ser recogida en su totalidad por un lente, y ser enfocada a un punto lejano más pequeño que la luz de una fuente convencional. Este punto de enfoque más pequeño del láser contiene mayor cantidad de luz concentrada (una irradiación más alta) que el punto focal de una fuente de luz convencional (figura 29).

FIGURA 29. Representación del grupo focal de la luz láser respecto a la luz convencional.



Fuente: <http://www.informed.es/selo/articulo10.html>

- Densidad de potencia alta: Su radiación se concentra en un delgado haz de luz, cuya área es unos pocos milímetros cuadrados. La densidad de potencia de este rayo láser por sí misma es alta; más aún, el rayo puede enfocarse en un punto cuyo diámetro es del orden de la longitud de onda. La densidad de potencia en el punto focal es extremadamente alta, con magnitud de muchos órdenes por encima que el caso de una lámpara ordinaria.

3.3.1 EL FUNCIONAMIENTO DEL LÁSER

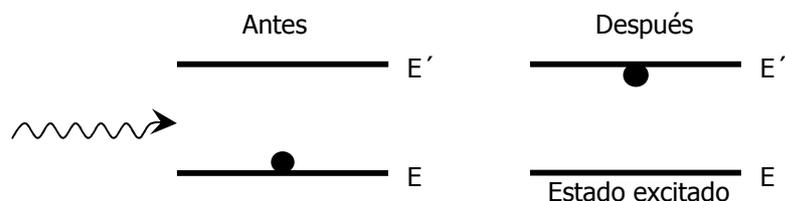
Para explicar la luz láser se describe tres procesos que participan en la interacción entre la materia y la radiación para su funcionamiento, estos son la *absorción*, *emisión espontánea* y la *emisión estimulada*.

3.3.1.1 ABSORCIÓN Y EMISIÓN ESPONTÁNEA

Los electrones exhiben diferentes niveles de energía, y son capaces de cambiar las órbitas energéticas, pero para hacer esto necesitan una fuente externa de energía como la luz.

Cuando se añade un fotón a un átomo, los electrones que están orbitando pasan a una energía mayor, como resultado el fotón desaparece y el electrón cambia de nivel energético dentro del átomo, el nivel inicial (E) pasa al nivel final (E'), estos son órbitas más inestables conocidas como estados excitados, (ver figura 30).

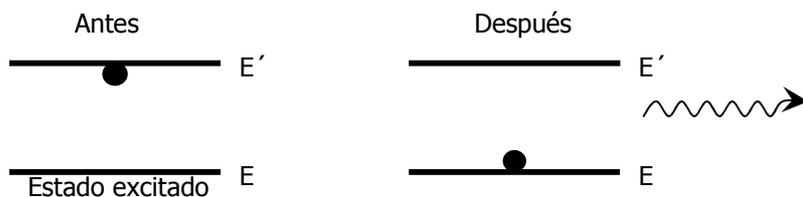
FIGURA 30. Interacción de la materia y la radiación, en el proceso de absorción.



Fuente: Robert Resnick, Física, Página 571.

Un electrón excitado intenta recuperar una órbita más estable, al hacer esto, libera la energía que obtuvo en la forma de un fotón y el átomo decae del estado excitado a un estado de energía más baja. Este proceso se llama emisión espontánea de radiación, (ver figura 31).

FIGURA 31. La emisión espontánea, la energía en exceso se libera como un fotón.



Fuente: Robert Resnick, Física, tomo 2 Pagina 571.

La relación matemática entre la variación de energía y la frecuencia del fotón de luz emitido es:

$$E' - E = h \times f \quad (3.19)$$

El intervalo entre absorción y re-emisión usualmente es muy corto, esto define el tiempo de vida fluorescente del átomo.

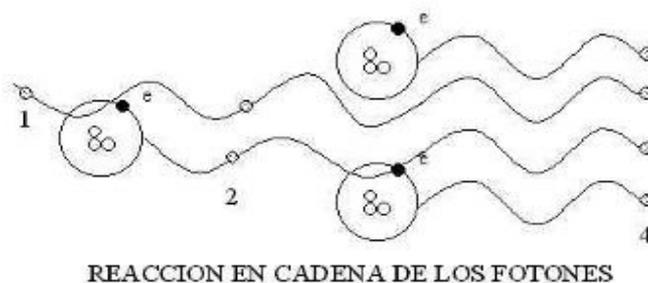
Nótese en la Figura 31 que el fotón emitido espontáneamente tiene menos energía (una longitud de onda más larga) que el fotón absorbido. La diferencia en energía usualmente se convierte en calor.

Cualquier átomo, sólo admite ciertas órbitas (niveles de energía). Cuando un fotón es absorbido, el átomo salta a uno de los niveles de energía admisibles. Esto significa que cada tipo de átomo o molécula puede absorber solamente fotones de la energía (o longitud de onda) adecuada. El resultado es que cada especie de átomo o molécula tiene un espectro de absorción único.

3.3.1.2 EMISIÓN ESTIMULADA

El proceso del láser ocurre cuando un átomo excitado, puede ser estimulado para emitir un fotón antes de que el proceso ocurra espontáneamente (ver Fig. 32). Cuando un fotón, con exactamente la energía adecuada (longitud de onda) entra en el campo electromagnético de un átomo o varios átomos en estado de excitación, se presenta una inversión de población; condición necesaria del láser, el fotón incidente dispara la caída del electrón excitado, hacia el estado de energía más bajo. Esto es acompañado por la liberación de la energía almacenada en forma de un segundo fotón.

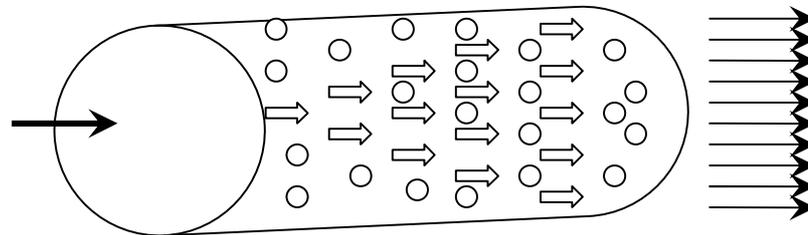
FIGURA 32. **Interacción de la radiación con la materia, en el proceso de emisión estimulada**



Fuente: <http://www.informed.es/selo/articulo10.html>

Si el primer fotón no es absorbido continúa hasta encontrar un átomo excitado, esto estimulará la liberación de un segundo fotón en un segundo átomo, y estos dos fotones dispararán la liberación de dos fotones más; estos cuatro entonces conducirán a ocho, ocho llevarán a dieciséis, y así sucesivamente. Esta generación se llama proceso de cascada (ver Figura 33) y lleva a la amplificación de la energía de luz que es la característica del proceso láser. Esto ocurre solamente cuando el fotón incidente tiene exactamente la misma energía que el fotón liberado. De esta forma, el resultado de la emisión estimulada es dos fotones de idéntica longitud de onda que viajan en la misma dirección. La liberación del segundo fotón está dependiente del tiempo de las oscilaciones del primer fotón, de tal modo que los dos fotones oscilan juntos en fase.

FIGURA 33. Emisión estimulada en cascada de fotones.

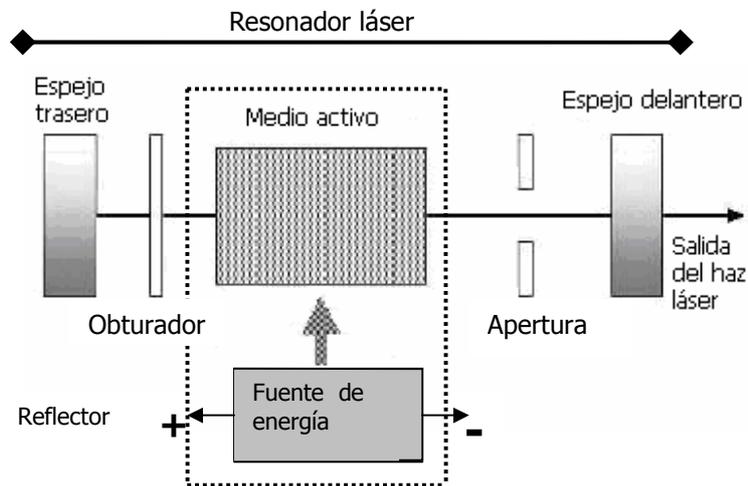


Fuente: <http://www.informed.es/selo/articulo10.html>

3.3.2 COMPONENTES DEL LÁSER

Todos los instrumentos láser tienen tres componentes generales, *una fuente de energía, un medio activo y una cavidad resonante* (Fig. 34).

FIGURA 34. Componentes de un láser.



Fuente: <http://www.informed.es/selo/articulo10.html>

3.3.2.1 MEDIO ACTIVO

Es la parte esencial del láser donde se genera la luz, porque son sus átomos los que se excitan previo a la emisión estimulada y sólo ciertas sustancias tienen las características ópticas, mecánicas, atómicas o moleculares necesarias para hacer posible la eficiente acción láser. Para que una acción láser ocurra, debe ser posible traer, simultáneamente, a la gran mayoría de los átomos o moléculas dentro del medio activo hacia un estado de energía mayor.

3.3.2.2 FUENTE DE ENERGÍA

Se requiere una fuente de energía para excitar el medio activo e instituir la acción láser. La entrada de energía que conduce la acción láser generalmente es en forma de luz desde una lámpara de flash, y una corriente eléctrica enviada a través de un tubo de gas o diodo semiconductor.

Otros componentes que pueden estar dentro de la cavidad incluyen aperturas para darle forma al rayo, y obturadores para controlar la acción láser. Estas fuentes de potencia energizan los átomos en el medio activo para producir la "inversión de población". Una inversión de población ocurre cuando la energía es vertida tan rápidamente dentro del medio, que la mayoría de sus átomos o moléculas adquieren energía en exceso y por tanto están "en un estado de excitación". Una vez que esto ocurre, los átomos o moléculas se preparan para la emisión estimulada.

3.3.2.3 CAVIDAD RESONANTE

La alta energía del rayo láser se obtiene mediante el pasaje de la energía estimulante a través de un considerable volumen del medio activo excitado, como se observa en la figura 34. Una forma de hacer esto sería tener el medio activo en la forma de un cilindro muy largo. Uno puede visualizar que los fotones que viajan paralelos al eje del cilindro tendrían una mayor probabilidad de encontrarse con otros átomos excitados y estimularlos para que emitan su energía, conduciendo a una construcción de fotones que viajan a lo largo del cilindro. Este paso de luz a lo largo de un largo tubo o cilindro, formará un rayo colimado de intensa radiación óptica de un sólo color saliendo del final del cilindro.

En la práctica real no resulta práctico construir un láser con un tubo muy largo, en su lugar, se fuerza a que la luz viaje entre espejos. Estos espejos se colocan en ambos extremos de un cilindro corto y se envían los fotones para que reboten de atrás hacia adelante, dentro del medio energizado.

El espacio formado por el medio óptico determinado por los dos espejos es un espacio óptico especial denominado cavidad resonante.

Si un espejo es totalmente reflexivo (trasero) y el otro espejo parcialmente transmisible (delantero) la luz que escapa a través del espejo delantero se convierte en rayo láser. Si la potencia de circulación es de 1,000 W y el espejo delantero es un 10% transmisible, entonces la potencia que regresa de este espejo es de 900 W, y el rayo resultante es de 100 W. Un viaje completo a través del medio del láser regresa la potencia de nuevo a los 1,000 W.

3.3.3 TIPOS DE LÁSER

La luz láser es generada dentro del medio activo , el cual puede ser sólido, semiconductor, líquido o gaseoso. Esta se clasifica de acuerdo a su medio activo de la siguiente manera.

3.3.3.1 LÁSER DE ESTADO SÓLIDO

Los medios más comunes en los láser de estado sólido son varillas de cristal de rubí y cristales con impurezas de Neodimio. Los extremos de la varilla se tallan de forma que sus superficies sean paralelas y se recubren con una capa reflectante no metálica. Los láser de estado sólido proporcionan las emisiones de mayor energía. Normalmente funcionan por pulsos, generando un destello de luz durante un tiempo breve. Se han logrado pulsos de sólo $1.2 * 10^{-14}$ segundos, útiles para estudiar fenómenos físicos de duración muy corta. El bombeo se realiza mediante luz de tubos de destello de xenón, lámparas de arco o lámparas de vapor metálico. La gama de frecuencias se ha ampliado desde el infrarrojo (IR) hasta el ultravioleta (UV) y se han obtenido longitudes de onda aún más cortas, correspondientes a rayos X, enfocando el haz de un láser sobre blancos de Itrio. Un láser de Titanio-Zafiro emite luz sintonizable desde 690 nm. a 1,100 nm. Los láser de este tipo se utilizan en la industria, medicina y aplicaciones científicas.

3.3.3.2 LÁSER DE GAS

El medio de un láser de gas puede ser un gas puro, una mezcla de gases o incluso un vapor metálico, y suele estar contenido en un tubo cilíndrico de vidrio o cuarzo. En el exterior de los extremos del tubo se sitúan dos espejos para formar la cavidad del láser. El láser de gas es bombeado por luz ultravioleta, haces de electrones, corrientes eléctricas o reacciones químicas. El láser de dióxido de carbono es muy eficiente y es láser de onda continua (CW, siglas en inglés) más potentes. El láser He-Ne es de helio y neón que en su versión más corriente, emite una luz roja de longitud de onda igual a 632,8 nm. Este tipo de láser es de baja potencia y se utiliza con frecuencia en centros de enseñanza. El láser de Argón, es de media potencia y se emplea mucho en medicina y aplicaciones científicas.

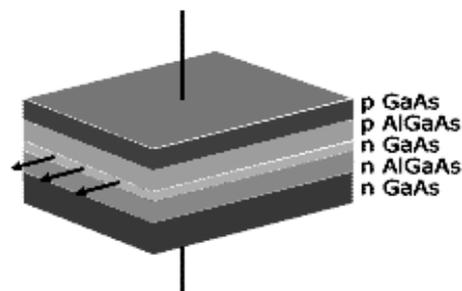
3.3.3.3 LÁSER DE COLORANTE

El medio activo en este tipo de láser es un colorante líquido, por ejemplo Rodamina. Se excitan normalmente con un láser de argón o lámparas de flash. El colorante absorbe la luz láser de excitación produciendo fluorescencia en un abanico de luz muy amplio cuya emisión láser se selecciona mediante la utilización de prismas u otros elementos ópticos. El rango de longitudes de onda es desde 400 nm hasta 1,000 nm. Se emplea en aplicaciones médicas y científicas. La frecuencia de un láser de colorante sintonizable puede modificarse mediante un prisma situado en la cavidad del láser.

3.3.3.4 LÁSER SEMICONDUCTOR

El láser semiconductor es el más compacto, y suelen estar formado por una unión entre capas de semiconductores con diferentes propiedades de conducción eléctrica. La cavidad del láser se mantiene confinada en la zona de la unión mediante dos límites reflectantes. El Arsénico de Galio es el semiconductor más usado, ver la figura 35. Los láser semiconductor se bombean mediante la aplicación directa de corriente eléctrica a la unión, y pueden funcionar en modo de onda continua, con una eficiencia superior al 50%. Se ha diseñado un método que permite un uso de la energía aún más eficiente. Esto implica un montaje vertical de las capas semiconductoras que emite luz IR de longitud de onda entorno a 900 nm. Este tipo de láser se emplea en equipos e instrumentos electrónicos y en sistemas de telecomunicaciones.

FIGURA 35. Láser semiconductor con medio activo de Arsénico de Galio.



Fuente: <http://myspace.eng.br/eng/laser/laser1.asp>

3.4 PRINCIPIO FÍSICOS DE LA REFRACCIÓN Y REFLEXIÓN DE LA LUZ

Se analiza la refracción y la reflexión de la luz debido a que es necesario comprender como interactúa un haz de luz cuando choca con un obstáculo, para este caso, cuando el radar emite una onda hacia un objetivo; esta onda regresa por la reflexión con menor energía porque parte de ella se refracta y esta es una fuente de información a analizar.

La reflexión se analiza a través de la óptica de rayos o óptica geométrica, esta es usada cuando se encuentra un haz de luz frente a obstáculos como espejos, lentes o prismas (cualquier obstáculo que encuentre el haz de luz) cuyo tamaño sea mucho mayor que la longitud de onda, de lo contrario se analiza con la óptica ondulatoria.

3.4.1 LA REFLEXIÓN DE LA LUZ

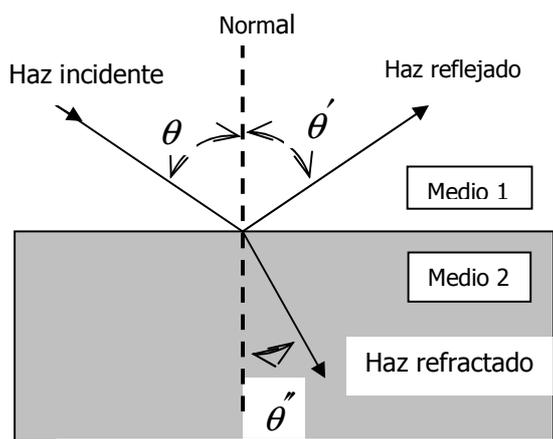
Cuando la luz llega a la superficie de un cuerpo, esta se refleja total o parcialmente en todas direcciones en el mismo medio, ver figura 36. Una superficie irregular esparcirá y dispersará la luz incidente, dando como resultado la reflexión difusa.

Las leyes de reflexión son:

- El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado se encuentran en un mismo medio.
- El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

$$\theta = \theta' \quad (3.20)$$

FIGURA 36. Representación de la incidencia, reflexión y refracción de un haz de luz.



Fuente: http://usuarios.lycos.es/pefeco/ondas4/ondas4_indice.htm

3.4.2 LA REFRACCIÓN DE LA LUZ

La luz se propaga en línea recta con velocidad constante en un medio uniforme, si cambia el medio de propagación; a uno con índice de refracción mayor, la frecuencia no varía, entonces cambia la longitud de onda de la luz y tiene como consecuencia el cambio de velocidad. En el nuevo medio la luz se propaga en línea recta a lo largo de una nueva trayectoria (dirección) teniendo una tendencia de acercarse a la normal y se conoce como rayo refractado, ver figura 36.

En la refracción se cumplen las siguientes leyes:

1. El rayo incidente, el rayo refractado y la normal están en un mismo plano.
2. Se cumple la ley de Snell:

$$n_1 \times \text{Sen}(\theta) = n_2 \times \text{Sen}(\theta'') \quad (3.21)$$

Donde:

- θ es el ángulo incidente y
- θ'' el ángulo de refracción,
- n_1 y n_2 son constantes adimensionales conocidas como índice de refracción de cada medio.

El índice de refracción "n" es la característica del medio y es la razón entre la velocidad de la luz en el vacío "c", y la velocidad que tiene la luz en ese medio "v". El valor de "n" es siempre adimensional y mayor que la unidad, se representa de la siguiente manera:

$$n = \frac{c}{v} \quad (3.22)$$

En la tabla IV se muestra los índice de refracción de varios medios.

TABLA IV. Índice de refracción para la luz amarilla ($\lambda = 589nm$).

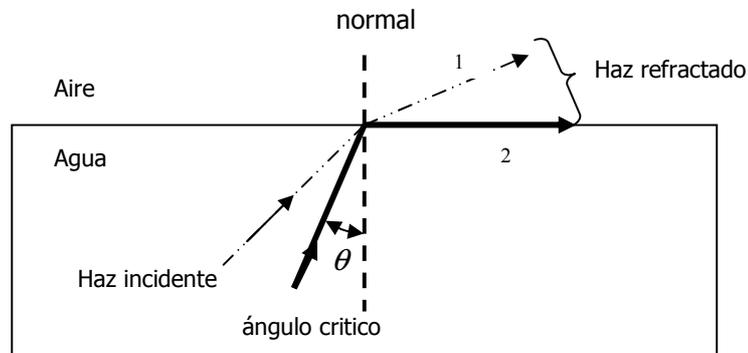
Medio	vacio	Aire	Agua(20°C)	Poliestireno	Zafiro	Diamante
Índice (n)	1.0000	1.00029	1.333	1.55	1.77	2.417

Fuente: Robert Resnick, Física, tomo 2 página 350.

3.4.3 REFLEXIÓN INTERNA TOTAL

Esto ocurre cuando la luz pasa oblicuamente de un medio a otro con un índice de refracción menor, según especificado en la tabla IV es de derecha a izquierda, si el rayo de luz pasa del agua al aire el haz refractado se aleja de la normal; se observa en la figura 37.

FIGURA 37. **Ángulo crítico de incidencia.**



Fuente: http://usuarios.lycos.es/pefeco/ondas4/ondas4_indice.htm

A un determinado ángulo de incidencia le corresponde un ángulo de refracción de 90° y el rayo refractado saldrá "rasante" con la superficie de separación de ambos medios. Este ángulo de incidencia se llama ángulo límite o ángulo crítico θ_c .

$$\text{Sen } \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (3.23)$$

Para ángulos de incidencia mayores que el ángulo crítico, el ángulo de refracción será mayor de 90° y el rayo no será refractado, ya que no pasa de un medio a otro por tanto se produce una reflexión total interna.

3.5 PRINCIPIOS SOBRE SISTEMAS ÓPTICOS

Para analizar una imagen usamos sistemas ópticos ya sea compuestos (varios tipos de lentes y espejos) o elementos individuales, se podrá obtener una imagen resultante que puede ser mayor, menor o de igual tamaño. Para entender este proceso acudimos a la óptica, la óptica es la parte de la física que estudia las propiedades de la luz y los fenómenos relacionados con ella, su estudio comienza cuando el hombre intenta explicarse el fenómeno de la visión.

Entre las aplicaciones tradicionales de la óptica se encuentran los lentes de corrección para la visión y la formación de imagen en telescopios y microscopios.

En las aplicaciones modernas se incluye el almacenamiento y recuperación de información, entre los que se menciona los discos compactos, códigos de barra, fibra óptica, radar láser entre otros. Mediante combinaciones de espejos y lentes podemos lograr que objetos diminutos parezcan grande o que objetos distantes parezcan cercanos.

3.5.1 LENTES

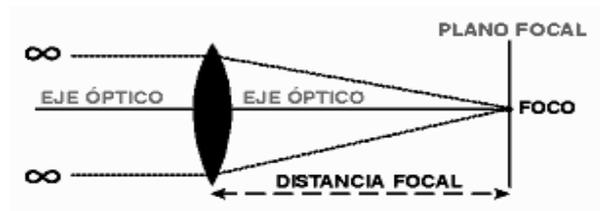
Una lente es un objeto transparente y refringente que altera la forma de un frente de onda que pasa a través de la misma; suelen construirse de vidrio limitada por dos caras donde tienen diversas combinaciones entre curvos y planas, cuando son curvos su centro de curvatura están sobre el eje óptico; al atravesarlas un conjunto paralelo de rayos de luz hace que éstos converjan o diverjan regularmente. El comportamiento de las lentes está basado en los fenómenos de transmisión y refracción que se analizo anteriormente.

En los lentes ó espejos de cualquier tipo manejan una terminología en común (figura 38), los cuales son:

- Eje óptico: es la línea principal que pasa por los centros de curvatura de las dos caras.
- Foco: punto focal, o foco principal, es el punto del eje óptico, situado en el plano focal, donde se reúnen los rayos de luz cuando el objetivo está enfocado al infinito.

- Plano focal: es el plano que contiene el punto focal y es perpendicular al eje óptico.
- Longitud focal: es la distancia comprendida entre el centro de la lente y el punto focal.

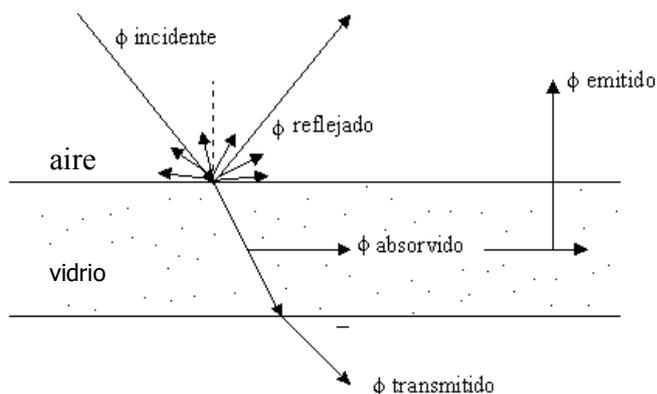
FIGURA 38. Terminología usada por la geometría óptica, para este caso es una lente convergente.



3.5.1.1 LENTES PLANOS

Al penetrar oblicuamente un rayo de luz en un bloque de vidrio de caras planas paralelas, se refracta acercándose a la normal. Por el contrario, al salir del bloque, el rayo se acelera, al pasar a otro medio menos denso, por lo que el rayo se separa de la normal. En conjunto, las trayectorias aunque se han desplazado, resultan paralelas (figura 39). Si se pierde el paralelaje de las caras, el comportamiento respecto a la normal resulta idéntico, pero la trayectoria deja de ser paralela, y el rayo resulta desviado. Estos tienen una utilidad limitada debido a que no son capaces de cambiar la luz divergente en luz convergente. Permanece la misma forma de la luz aún cuando pasa en el lente plano.

FIGURA 39. **Desplazamiento lateral de la luz al pasar por vidrio.**



Fuente: Tippens, **Física**, página 340.

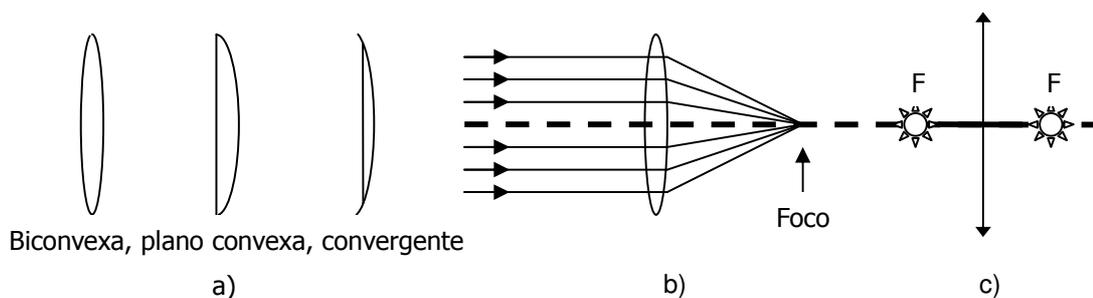
Entre los tipos de lentes se encuentran convexas o convergente y cóncavas o divergentes.

3.5.1.2 LENTES CONVERGENTES

Es aquella que cuando los rayos de luz paralelos se refractan y convergen, inciden en un punto llamado foco. Cuando los rayos se refractan, se interceptan en un punto; dando origen a la imagen que para una lente convergente es real. La imagen real se forman por rayos de luz verdaderos que pasan por ella y puede ser proyectada en una pantalla. Un ejemplo de imagen real es la que se obtiene al proyectarse una película en pantalla.

En la figura 40 se muestra tres ejemplos de lentes positivos que al atravesarlos un conjunto de rayos paralelos, hace que éstos converjan en el foco. Entre los lentes positivos se encuentran: biconvexa, plano convexa y menisco convergente, su característica en común es el grosor en la parte media que en sus bordes.

FIGURA 40. a) Lentes convergentes, b) punto focal en una lente convergente se encuentra detrás de la lente, c) esquema de una lente convergente.



Fuente: Tippens, **Física**, página 352.

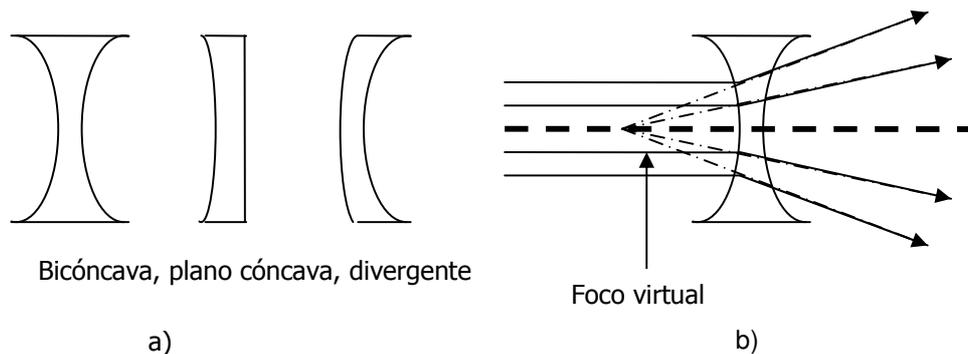
3.5.1.3 LENTES DIVERGENTES

Son aquellos que refractan y divergen la luz paralela de un punto localizado en frente de la lente, existen los mismos elementos que en las convergentes y el tipo de imagen que se forma es virtual, siempre de menor tamaño y el foco es virtual. La imagen virtual es la que parece formarse por luz proveniente de la imagen, pero que verdaderamente los rayos de luz no pasan por ella, esta se forma del mismo lado del objeto.

La característica de estas lentes es la parte gruesa de sus bordes que la parte media por tanto los rayos de luz paralelos que pasan por una de estas lentes cambian de dirección hacia la parte más gruesa de modo que el haz diverge.

En la figura 41 se muestran tres ejemplos de lentes divergentes: bicóncava, plano cóncava y menisco divergente, estos son conocidos como lentes negativas porque divergen el conjunto de rayos paralelos que lo penetran.

FIGURA 41. a) Lentes divergentes, b) lente divergente, esta refracta la luz de tal forma que ésta parece provenir de un punto enfrente de la misma.



Fuente: Toppens, **Física**, pagina 353.

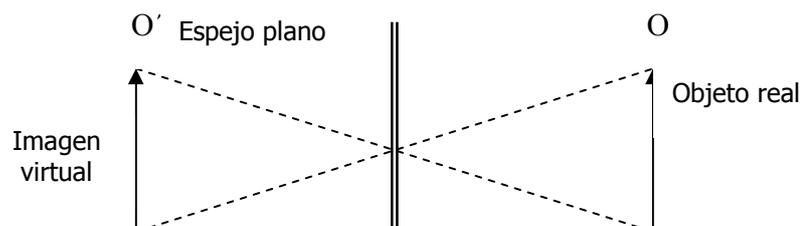
3.5.2 ESPEJOS

Los espejos son superficies reflectantes, pueden ser planos o curvos, los más utilizados son los curvos que pueden ser casquetes de esfera y paraboloides, de acuerdo a su forma pueden ser: plano, cóncavo y convexo.

3.5.2.1 ESPEJO PLANO

En un espejo plano, la imagen que se forma esta a la misma distancia del espejo que del objeto real, en la grafica 42 se muestra un objeto representado por una flecha y su imagen, las líneas punteadas representan rayos de luz.

FIGURA 42. Un objeto "O" forma una imagen virtual en un espejo plano.



Las imágenes formadas por un espejo plano son reflexiones de objetos reales, por ello se observa que la imagen se forma en el interior del espejo, pero es una imagen virtual porque no son formados por rayos reales de luz y por tanto no pueden proyectarse sobre una pantalla.

Los espejos esféricos son casquetes de una esfera hueca, los cuales reflejan los rayos luminosos que inciden en ellos. Son cóncavos cuando la superficie reflectora es la parte interior, y convexos si la superficie reflectora es la parte exterior.

3.5.2.2 ESPEJO CÓNCAVO

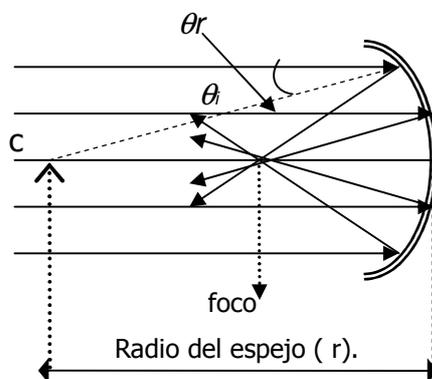
Un espejo cóncavo es una porción de una esfera donde tiene un radio de curvatura "r". El foco se ubica sobre el eje óptico del espejo. El resultado de la reflexión que presenta el espejo cóncavo es que el rayo reflejado pasa por el foco donde convergen los rayos de luz paralelo; donde la línea punteada es la distancia radial, y la relación del ángulo del haz incidente con el haz que se refleja determina que estos dos ángulos son idénticos, la imagen en el foco es real, el foco se ubica a la mitad de su radio de curvatura conocido como longitud focal (figura 43).

$$f = \frac{r}{2} \quad (3.24)$$

Donde:

- f longitud focal.
- r radio de curvatura.

FIGURA 43. La imagen en el punto focal de un espejo cóncavo.

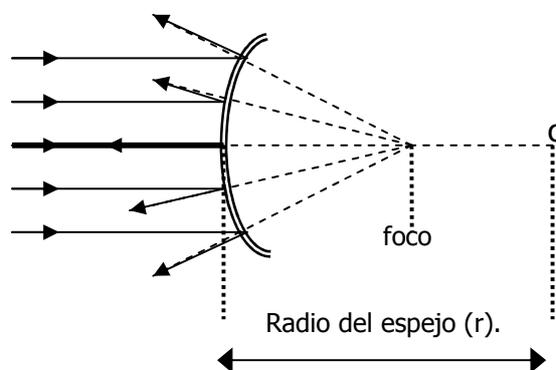


Fuente: Robert Resnick, **Física**, tomo 2 página 371.

3.5.2.3 ESPEJO CONVEXO

Cuando un haz de luz paralelo incide sobre la superficie convexa el haz diverge, estos rayos reflejados parece provenir de un punto focal ubicado detrás del espejo, pero en realidad los rayos de luz no pasan por él. El punto *focal es virtual*, esta distancia respecto al espejo conocido como longitud focal (ecuación 24) es negativo al igual el radio, ver figura 44. Los ángulos del haz incidente y reflexión son idénticos ($\theta = \theta_r$), en los dos tipos de espejos.

FIGURA 44. Punto focal de un espejo convexo.



Fuente: Robert Resnick, **Física**, tomo 2 pagina 371.

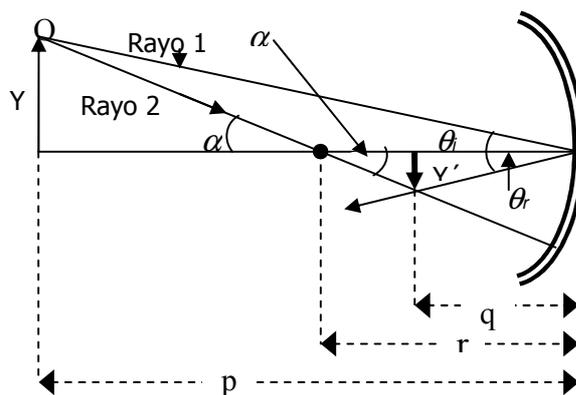
3.5.3 ECUACIÓN DEL ESPEJO Y LENTE

La ecuación de un espejo o una lente representa la relación de tres variables ópticas, las cuales son: la distancia del objeto real, la distancia de la imagen (real o virtual) y la longitud focal, se tienen condiciones para cada caso lente y/o espejo. En su deducción se empieza afirmando que rayos son paraxiales; esta afirmación indica que los rayos que divergen del objeto en el espejo forma un ángulo pequeño con el eje óptico.

3.5.3.1 LA ECUACIÓN DEL ESPEJO

Esta ecuación se analiza mediante la reflexión y para este caso con un espejo cóncavo. Partiendo de una condición predominante; que el tamaño del espejo es menor que su radio de curvatura. En la figura 45 se observa que el rayo 1 incide sobre el vértice del espejo; formando ángulos iguales del haz incidente con el de reflexión, y el haz que se refleja se cruza con el rayo 2 del objeto, formándose una imagen real e invertida en el foco del espejo.

FIGURA 45. Grafico para la deducción de la ecuación del espejo.



Fuente: Robert Resnick, **Física**, página 374.

Donde:

- p distancia del objeto
- q distancia de la imagen
- r radio de la curvatura
- Y tamaño del objeto
- Y' tamaño de la imagen, este es negativo porque esta invertida
- θ_i ángulo de incidencia
- θ_r ángulo de reflexión
- α ángulo que se forma al cruzar el rayo 2 con el eje óptico.

Se relaciona estas cantidades mediante el ángulo " α " obtenida por los rayos paraxiales, estos ángulos son iguales, por tanto la relación queda de la siguiente manera:

$$\tan \alpha = \frac{y}{p-r} = \frac{-Y'}{r-q} \Rightarrow \frac{y'}{y} = \frac{r-q}{p-r} \quad (3.25)$$

relacionando el ángulo incidente y la reflejada se obtiene:

$$\tan \theta_i = \tan \theta_r, \frac{y}{p} = \frac{-y'}{q} \quad (3.26)$$

combinando las ecuaciones (25) y (26) queda:

$$\frac{q}{p} = \frac{r-q}{p-r} \Rightarrow q * p - q * r = r * p - q * p$$

Reordenando los términos, se obtiene la ecuación del espejo.

$$2 * q * p = r * (p+q) \Rightarrow \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{r} \quad (3.27)$$

Usando la ecuación (3.24), la ecuación del espejo respecto a la longitud focal queda de la siguiente manera:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad (3.28)$$

Para un espejo convexo se usa la misma ecuación pero adoptando una apropiada convención de signos. Las distancias “p” y “q” deben ser positivos para objetos e imágenes reales y negativas para objetos e imágenes virtuales.

El radio de curvatura “r” y la longitud focal “f” tienen que ser tomados positivos para espejos convergentes(cóncavos) y negativos para espejos divergentes (convexos).

3.5.3.2 LA ECUACIÓN DE UNALENTE

Tiene mucha analogía con la ecuación del espejo, pero se consideran unos puntos importantes, primero; se considera que son lentes delgadas esto es si su espesor es pequeño a comparación de la distancia del objeto real, segundo; una lente tiene dos focos, esto es debido a que la lente tiene dos caras donde se puede transmitir en ella, todo depende de la colocación de la fuente de luz. Tercero; la longitud focal de la lente curva no es igual a la mitad de radio de curvatura sino que depende del índice de refracción del material del cual esta hecha, también depende de los radios de curvatura de cada cara de la lente. Esta ecuación se analiza mediante la refracción y para este caso con una lente biconvexa que converge los rayos de luz.

Para determinar la longitud focal que relaciona estas dimensionales se presenta la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{f} = (n-1) * \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (3.29)$$

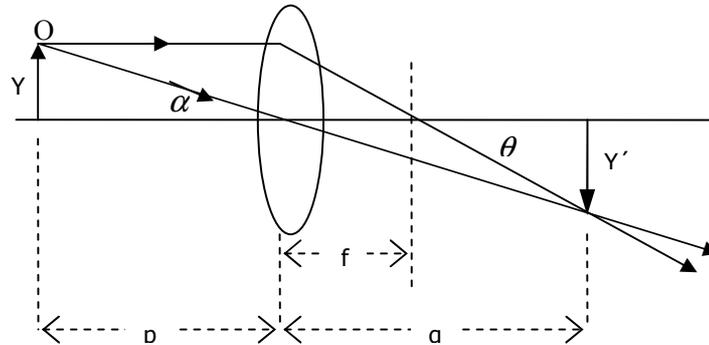
Conocida como la ecuación del fabricante porque incluye parámetros de construcción de una lente, se aplica por igual a lentes convergentes y divergentes teniendo presente la convención de signos que le corresponde. Para determinar el signo para R_1 o R_2 se considera positivo si la superficie curvada va hacia fuera (convexa) y negativo si la superficie esta curvada hacia adentro (cóncava). El signo que determina la longitud focal de una lente convergente es positivo y negativa para una lente divergente.

La deducción de la ecuación de una lente es análoga a la ecuación del espejo, la figura 46 presenta los trazos de los rayos de una lente convergente, la ecuación relaciona la distancia al objeto, la distancia de la imagen y la distancia focal en una expresión matemática.

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad (3.30)$$

Donde la longitud focal “ f ” esta en representación de la ecuación (3.29).

FIGURA 46. Deducción de la ecuación de las lentes.



Fuente: Robert Resnick, **Física**, tomo 2 pagina 380.

Donde:

- p distancia del objeto
- q distancia de la imagen
- f distancia focal
- Y tamaño del objeto
- Y' tamaño de la imagen, este es negativo porque esta invertida

Las mismas convenciones de signos que se establecieron para los espejos pueden usarse en la ecuación de las lentes. Esto se resume de la siguiente manera: la distancia del objeto “ p ” y la distancia de la imagen “ q ” se consideran positivas para una imagen real y negativas para imágenes virtuales. Para lentes convergentes la longitud focal se consideran positivas y lentes divergentes se toma como negativa.

3.5.4 ABERRACIONES EN LOS LENTES ÓPTICOS

Los instrumentos ópticos causan en las imágenes ciertos defectos o aberraciones. Las aberraciones no se deben a defectos de construcción, sino que son una consecuencia de las leyes de la refracción-reflexión de la luz.

En la óptica geométrica que hemos estudiado hasta ahora se introdujeron varias simplificaciones las cuales son:

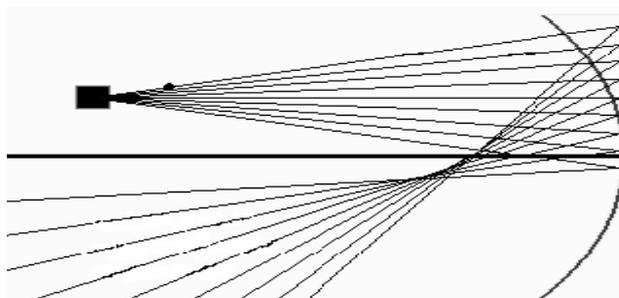
- Las lentes son siempre delgadas
- Los rayos son paraxiales
- La luz es monocromática.

En la práctica no se cumplen estas condiciones por lo que la formación de las imágenes no se ajusta totalmente a la teoría. Las aberraciones más comunes son la esférica y monocromática.

3.5.4.1 ABERRACIÓN ESFÉRICA

Tiene lugar en las lentes y en los espejos esféricos. La aberración esférica (astigmática) se debe a que no se cumple la aproximación paraxial ya que no todos los rayos van próximos al eje óptico. Los rayos paralelos al eje óptico reflejados (caso de los espejos) o refractados (caso de las lentes) se concentran en el foco, pero ese punto focal es diferente para los rayos que son paraxiales que para los que van alejados del eje de la lente (ver figura 47).

FIGURA 47. **Aberración en un espejo cóncavo.**



Fuente:

<http://www.edu.aytolacoruna.es/aula/fisica/fisicalInteractiva/OptGeometrica/aberracions/aberracions.htm>

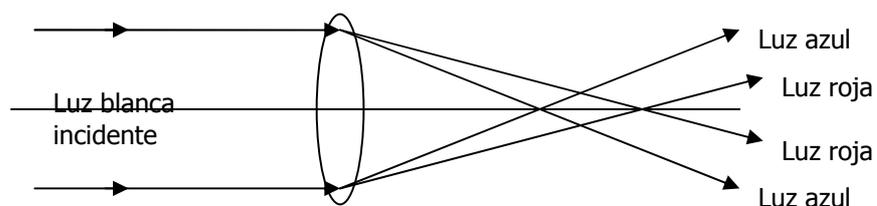
La aberración esférica se evita con un diafragma (disco opaco centrado en el eje con un orificio central) o asociando adecuadamente una lente convergente con otra divergente.

Los rayos marginales (no paraxiales) convergen a menor distancia de la lente si esta es convergente, y a mayor distancia si es divergente.

3.5.4.2 ABERRACIÓN CROMÁTICA

Se origina debido a que la luz no es monocromática. Los distintos colores de la luz tienen distintas velocidades dentro del material de las lentes y por lo tanto distinto índice de refracción, se muestra en la figura 48. La distancia focal depende del índice de refracción, como se presentó en la ecuación (29). Cada color tiene un foco distinto y experimenta una desviación distinta. Esto hace que la imagen no se forme en un único punto y aparece una distorsión.

FIGURA 48. **Aberración cromática.**



Fuente:
[Http://www.edu.aytolacoruna.es/aula/fisica/fisicaInteractiva/OptGeometrica/aberracions/aberracions.htm](http://www.edu.aytolacoruna.es/aula/fisica/fisicaInteractiva/OptGeometrica/aberracions/aberracions.htm)

Este defecto se corrige combinando adecuadamente una lente convergente con otra divergente de distinto índice de refracción. Los espejos no producen esta aberración porque en ellos no hay refracción.

4. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL RADAR LASER (LIDAR) y SUS BLOQUES COMPONENTES

4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL RADAR LÁSER (LIDAR)

Se conoce con el nombre de LIDAR la contracción de las siglas de la expresión en inglés "*Light Detection And Ranging*" que puede ser traducida como "*Detección de objetos y medidas de distancias por medio de la luz*".

El origen de este tipo de radar fue predominantemente en la medición de parámetros atmosféricos, tal como, la composición química y biológica, la temperatura y la medición de la velocidad del viento. Actualmente tiene muchas aplicaciones tanto científicas como prácticas, una aplicación moderna es la medición de la velocidad vehicular sobre carreteras en que se infringen los límites de velocidad establecidos.

El Lidar es un radar que opera a frecuencias ópticas; usa un láser para generar radiación óptica ya sea en la región del infrarrojo, visible o ultravioleta del espectro electromagnético, teniendo presente que mientras más alta es la frecuencia usada más energía posee esta radiación.

La directividad que presenta el láser es muy útil porque distingue con mayor precisión su objetivo; puede distinguir desde una motocicleta hasta vehículos grandes o pesados dentro de un gran tráfico de vehículos que transitan sobre una carretera.

Su funcionamiento consiste en ubicar un vehículo en movimiento, por medio del sistema óptico del Lidar que proporciona un punto preciso a cubrir sobre la superficie del vehículo.

El sistema transmisor del Lidar emite pulsos de luz láser para el monitoreo de la velocidad, la longitud de onda de esta radiación se ubica en la región del infrarrojo. Se usan pulsos de luz láser porque poseen mayor cantidad de energía siendo más robustos a los distintos cambios meteorológicos que ocurra en el tramo de carretera donde se ubique el Lidar. Estos pulsos son enviados por un sistema de lentes para amplificar el área del haz de luz que va a ser emitido, otro propósito que tiene es el de reducir el ángulo de divergencia del haz transmitido y lograr apuntar con precisión al vehículo. El sistema de lentes tanto del transmisor como del receptor son análogas a las antenas usadas en radiofrecuencia, por ejemplo, una antena larga se puede comparar a la lente de un telescopio, mientras que una antena más corta es similar a una lente cóncava, ambas poseen como parámetro la longitud focal ya sea corta o larga. Para continuar la analogía, una antena larga proporciona una imagen detallada o de alta resolución de un área pequeña, mientras que una antena corta provee una imagen de un área grande con menos detalle.

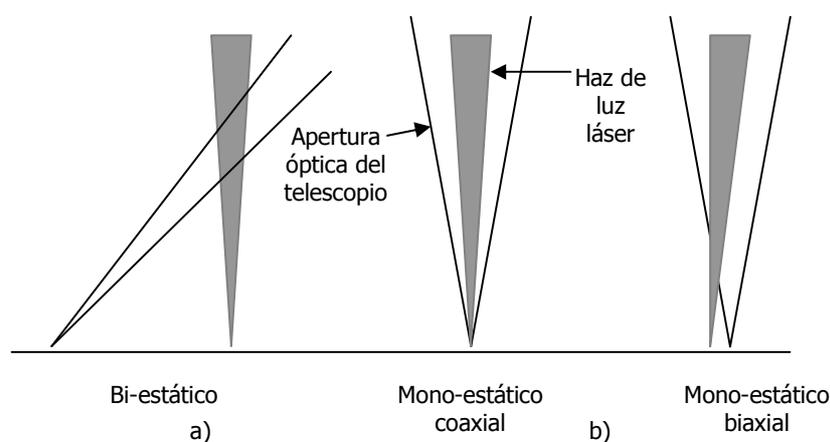
Los pulsos emitidos viajan en línea recta durante su propagación hasta llegar al vehículo a monitorear, la radiación que posee los pulsos de luz láser se dispersa por el móvil cuando lo golpea, esto se debe a la reflexión, porque el material que constituyen los vehículos proporciona esta característica de la radiación electromagnética, también ocurren otros fenómenos como la de absorción ó refracción de la atmósfera pero cierto porcentaje de la energía que posee los pulsos son recolectados por el sistema óptico del receptor.

Estos sistemas ópticos son de vital importancia, porque permite una reducción de las reflexiones de otros tipos de luz como por la noche la iluminación de la luna, estrellas, luces artificiales o la luz del sol de día. Para el receptor estas dispersiones de otra índole es reducido por la apertura óptica del telescopio, que siempre es mayor que el haz del láser.

Es importante conocer la configuración del transmisor con respecto al receptor, esto puede ser de forma bi-estática o mono-estática.

La configuración bi-estática tiene el transmisor y el receptor físicamente separados (figura 49a). Típicamente el sistema Lidar que monitorea la velocidad de vehículos usa la configuración mono-estático, esto quiere decir que el transmisor y el receptor están colocados en un mismo espacio físico. El sistema mono-estático puede ser subdividido en dos categorías: sistema coaxial, donde el láser es transmitido en forma coaxial con el receptor, y el sistema biaxial, donde el transmisor y el receptor son localizados adyacentemente una de otra (figura 49b).

FIGURA 49. Configuraciones del haz transmitido y el campo de vista del receptor del Lidar.



Fuente: http://pcl.physics.uwo.ca/pclhtml/pub/LidarPapers/EAS_argall.pdf

La configuración mono-estático coaxial se refiere que la luz láser se ubica en un mismo espacio físico con el telescopio, el láser que emite los pulsos y el telescopio que recolecta los pulsos reflejados. Esta configuración presenta ciertas ventajas como un dispositivo compacto en un solo instrumento, la alineación del láser con respecto al telescopio es más seguro debido a que el sistema común se enfoca en el mismo punto donde ocurre la reflexión.

Cuando el sistema óptico receptor recolecta estos pulsos reflejados estos son canalizados por medio de fibra óptica para procesar esta señal, en este sistema en particular usa el proceso conocido como detección coherente. La detección coherente mezcla dos haces de luz (la recibida y una local) sobre un foto-detector (transductor que convierte la luz en una señal eléctrica), esta señal eléctrica se ubica en la región de Radio frecuencia del espectro electromagnético.

Esta es una forma de detección del sistema Lidar que determina la velocidad del vehículo por mediciones del efecto Doppler, el análisis se centra sobre el cambio de la frecuencia del pulso emitido; esto se debe a la reflexión que ocurre cuando golpea al vehículo en movimiento, su velocidad altera en forma proporcional a la frecuencia de la señal óptica final. Por tanto, el efecto Doppler establece que el cambio de la frecuencia es proporcional a la velocidad con que se mueve el vehículo.

El ruido que se tiene en este proceso de la señal, se generan de varias fuentes como el ruido del foto-detector, resistencias y un ruido adicional en el procesamiento de la señal eléctrica. La detección Heterodino es útil para reducir los efectos del ruido.

El resultado de la señal heterodino se filtra para la etapa del procesamiento de la señal eléctrica, para entrar a la fase de un microprocesador, en esta etapa digital es donde se almacena en un memoria el límite de máxima velocidad correspondiente en el tramo de carretera, con la medida de la velocidad actual el microprocesador realizará la comparación constantemente durante su monitoreo. Su resultado es la visualización de su veredicto que lo conforma una luz intermitente de color rojo indicando el sobrepaso del límite de velocidad.

Esta es la única información que transmite el Lidar al piloto del vehículo, físicamente el visualizador tiene una forma como la de un semáforo en ruta.

4.1.1 ECUACIÓN DEL LIDAR

La ecuación del Lidar se usa para determinar el número de fotones detectados por el receptor del sistema. Estos fotones constituyen la naturaleza del pulso de luz cuando interactúa sobre el foto-detector.

La ecuación del Lidar toma en consideración los parámetros del instrumento y variables geofísicos. La forma general de la ecuación del Lidar incluye todas las formas de dispersión y esto puede ser usada para calcular la señal de potencia y energía.

El número de fotones detectadas por cada pulso de luz láser se expresa de la siguiente manera:

$$A \int_{\Delta\lambda} PS(\lambda) \times \tau_r(\lambda) \times \tau_t(\lambda) \times Q(\lambda) \int_{R_1}^{R_2} \xi(r) \times \tau_a(r, \lambda)^2 \times \frac{1}{r^2} \times \sum_i \frac{d\sigma_i}{d\Omega}(\lambda) \times N_i(r) dr d\lambda \quad (4.1)$$

Donde:

- A = área del telescopio.
- $PS(\lambda)$ = convolución de $P(\lambda)$ y $S(\lambda)$.
- $P(\lambda)$ = número de fotones emitidos por el láser en un único pulso.
- $S(\lambda)$ = función la cual toma dentro del cálculo cualquier cambio de la longitud de onda durante la dispersión, incluye el efecto Doppler ($\Delta\lambda$) indicando el rango de la longitud de onda para que $PS(\lambda)$ no sea cero.
- $\tau_i(\lambda)$ y $\tau_r(\lambda)$ = coeficientes de transmisión óptico del transmisor y del receptor respectivamente.
- $Q(\lambda)$ = quantum (capacidad de absorción de fotones), eficiencia del fotodetector.
- $\xi(r)$ = factor del traslape dentro del cálculo de la distribución de intensidad del haz láser y el traslape físico del láser con el campo de vista del receptor óptico.
- $\tau_a(r, \lambda)$ = transmisión óptica a la atmósfera a lo largo del trayecto del láser.
- $\left(\frac{d\sigma_i}{d\Omega}\right)(\lambda)$ = luz dispersada que regresa sobre una sección transversal.
- $N_i(r)$ = densidad numérica de la dispersión centrada.

La forma general de la ecuación Lidar puede ser simplificada cuando se aplica con las condiciones particulares de su funcionamiento.

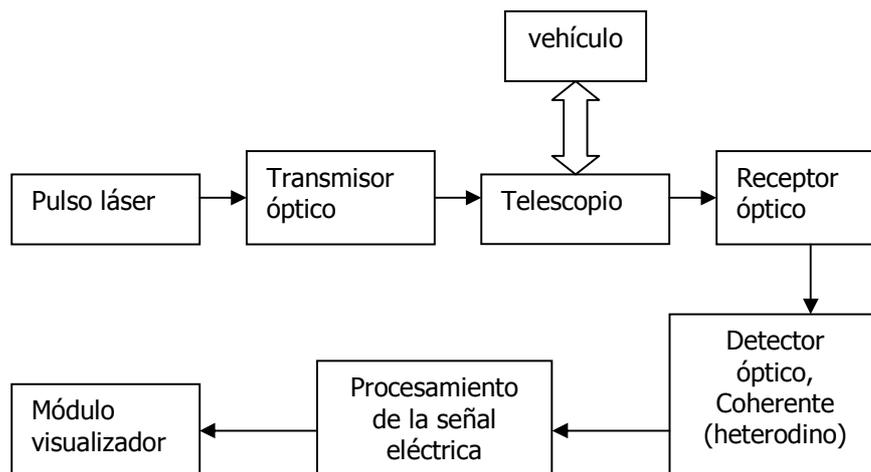
4.2 COMPONENTES POR BLOQUES DEL RADAR LÁSER

El Lidar tiene las siguientes características:

1. Emite pulsos para la detección de la velocidad del vehículo.
2. La frecuencia de la luz láser es estable, infrarrojo.
3. Esta colimado.
4. Su configuración es mono-estático y de forma coaxial.
5. Funciona bajo el principio Doppler.
6. Sistema de detección coherente (heterodino).

La estructura física del Lidar puede ser dividido en los siguiente subsistemas: el transmisor, el receptor, el detector, la sección de procesamiento de la señal eléctrica y el módulo visualizador. La figura 50 representa un diagrama por bloques del sistema, muestra como trabaja los subsistemas juntos para completar el Lidar.

FIGURA 50. Esquema del Lidar.



Fuente: http://pcl.physics.uwo.ca/pclhtml/pub/LidarPapers/EAS_argall.pdf

El Lidar debe de tener todos los componentes en su máxima eficiencia para que en conjunto se obtenga el máximo resultado, por tanto, se analiza los elementos que constituye los subsistemas.

4.2.1 SISTEMA TRANSMISOR

El sistema transmisor del Lidar esta constituido por dos subsistemas, el emisor del pulso láser y el sistema óptico que proyecta la luz láser sobre el vehiculo a monitorear.

4.2.1.1 SUBSISTEMA DE EMISIÓN DEL PULSO LÁSER

Este subsistema se encarga del control de la frecuencia del pulso y la radiación óptica que es producida por un diodo láser. Se analiza la característica de funcionamiento del diodo láser .

4.2.1.1.1 DESCRIPCIÓN DEL DIODO LÁSER

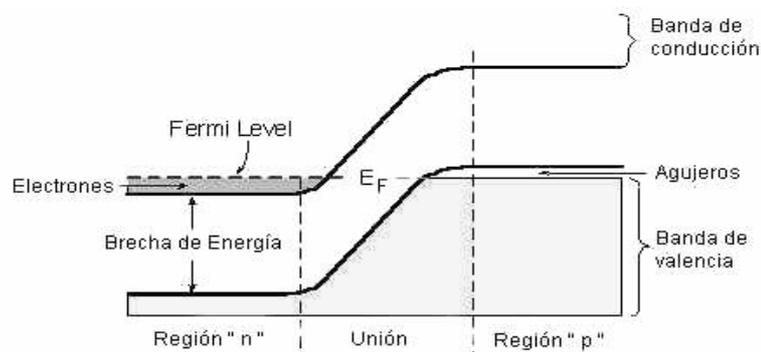
El diodo láser es un transductor que varía sus propiedades ópticas con la aplicación de un determinado potencial eléctrico, o sea, que transforman la energía eléctrica en energía luminosa con una longitud de onda de 904 nm (ubicándose en la región del infrarrojo del espectro electromagnético).

Un diodo láser usa material semiconductor como medio activo, el material activo más común es la aleación de Arsénico, Galio y Aluminio. De acuerdo con la teoría cuántica, solo ciertos niveles discretos de energía están agrupados en intervalos muy amplios, o bandas de energía, en el semiconductor se constituye de la siguiente manera: banda de valencia, banda prohibida y la banda de conducción.

La banda de valencia representa a los electrones que posee un nivel de energía superior dentro del átomo y estos están ligados por enlaces covalentes con átomos vecinos, entonces un electrón de valencia debe absorber cantidades discretas de energía al pasar a la banda de conducción. La banda prohibida es la energía necesaria para que los electrones rompan los enlaces covalentes. La banda de conducción son electrones libres que han dejado un enlace covalente y son sensibles al potencial eléctrico externo, creando una corriente de conducción.

El proceso básico para generar la luz en un diodo láser se produce en la unión del semiconductor dopado (cuando al semiconductor intrínseco se agrega impurezas), los dos tipos de dopado son: **tipo N** (donador de electrones) y **tipo P** (aceptador de electrones o huecos), polarizado directamente. La generación de la luz se produce entre las bandas de energía de la unión. En la figura 51 muestra las bandas de energía ideales de una unión p-n del diodo láser, sin aplicar un voltaje externo.

FIGURA 51. **Niveles de energía de una unión p-n del diodo láser, sin polarización.**

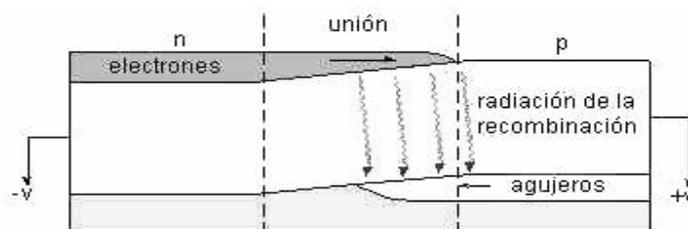


Cuando se aplica un voltaje a través de una unión p-n, la población de las bandas de energía cambia.

Con polarización directa indica que el polo negativo del voltaje es aplicado a la cara "n" de la unión, y el polo positivo a la cara "p", como se muestra en la figura 52. Esta polarización crea portadores extra en la unión, reduciendo la barrera de potencial, y origina la inyección de portadores de carga a través de la unión hacia la otra región.

Cuando un electrón de la banda de conducción en el lado "n" es inyectado a través de la unión a un "agujero" de la banda de valencia del lado "p", tiene lugar un proceso de recombinación (electrón + agujero), liberándose energía fotónica.

FIGURA 52. **Bandas de energía de una unión p-n cuando se aplica voltaje positivo.**



El diodo láser se concentran en los casos específicos en que la energía es liberada en forma de luz.

Los Diodos láser emiten luz por el principio de emisión estimulada, la cual surge cuando un fotón (energía liberada) induce a un electrón que se encuentra en un estado excitado a pasar al estado de reposo, este proceso esta acompañado con la emisión de un fotón, con la misma frecuencia y fase del fotón estimulante.

Para que el número de fotones estimulados sea mayor que el de los emitidos de forma espontánea y que se incremente la pureza espectral compensando las pérdidas, es necesario tener una fuerte inversión de portadores, la que se logra con una polarización directa de la unión y una cavidad resonante, la cual posibilita tener una trayectoria de retroalimentación positiva facilitando que se emitan más fotones de forma estimulada y se seleccionen ciertas longitudes de onda haciendo más angosto al espectro emitido, lo que significa que los fotones originados estén a la misma frecuencia y fase. La presencia de una inversión grande de portadores y las propiedades de la cavidad resonante hacen que las características de salida (potencia óptica como función de la corriente de polarización) tenga un umbral a partir del cual se obtiene emisión estimulada, el cual es función de la temperatura.

Un diodo láser produce luz coherente lo que significa que todas las ondas luminosas están en fase entre sí. La idea básica del diodo láser consiste en usar una cámara resonante que está limitada por dos espejos que depende de la geometría del material activo para confinar la luz en una sola dirección, por tanto uno de ellos debe ser totalmente reflectante mientras el otro debe de permitir una salida de luz con una alta irradiación enfocada y pura.

Un factor importante en la construcción de un diodo láser es el confinamiento de la luz dentro del área activa. Dicho confinamiento se acompaña por la deposición de distintos materiales cerca de la zona activa. En consecuencia, se clasifican en grupo o familias los diodos láser, entre los que se menciona :

1. **Láser de unión homogénea:** Todo el láser está constituido por un mismo material normalmente GaAs (Arsénico de Galio).

En este tipo de estructura simple, los fotones emitidos no están confinados en direcciones perpendiculares al eje del láser, con lo que su eficiencia es muy baja.

2. **Estructura heterogénea simple:** En un lado de la capa activa existe otro material con una brecha de energía diferente. Esta diversidad de brechas de energía motiva un cambio en el índice de refracción de los materiales, de modo que se pueden construir estructuras que guía y reúne a los fotones en un área determinada. Normalmente, la segunda capa es de un material similar al de la primera, solo que con un índice de refracción menor. Por ejemplo, GaAs (Arsénico de Galio) y GaAlAs (Arsénico de Galio Aluminio).
3. Para propósito del sistema emisor del Lidar se hace uso de un tipo de láser que se conoce como **Estructura heterogénea doble**, este tipo de estructura confinan la luz dentro de la capa activa, por lo que son más eficientes. Por ejemplo la capa activa de GaAs confinada entre dos capas de GaAlAs, como se observa en la figura 53.

FIGURA 53. **Diodo láser con estructura heterogénea doble.**



Muchos diodos láser tienen una capa delgada de óxido, depositada sobre la parte superior de la capa de cubierta final tipo P-GaAlAs de la figura 53.

Esta capa de óxido, hace un ataque químico de manera que pueda formarse una cinta metálica de contacto en receso de poca profundidad, longitudinalmente a lo largo de la superficie superior del diodo para la conexión exterior.

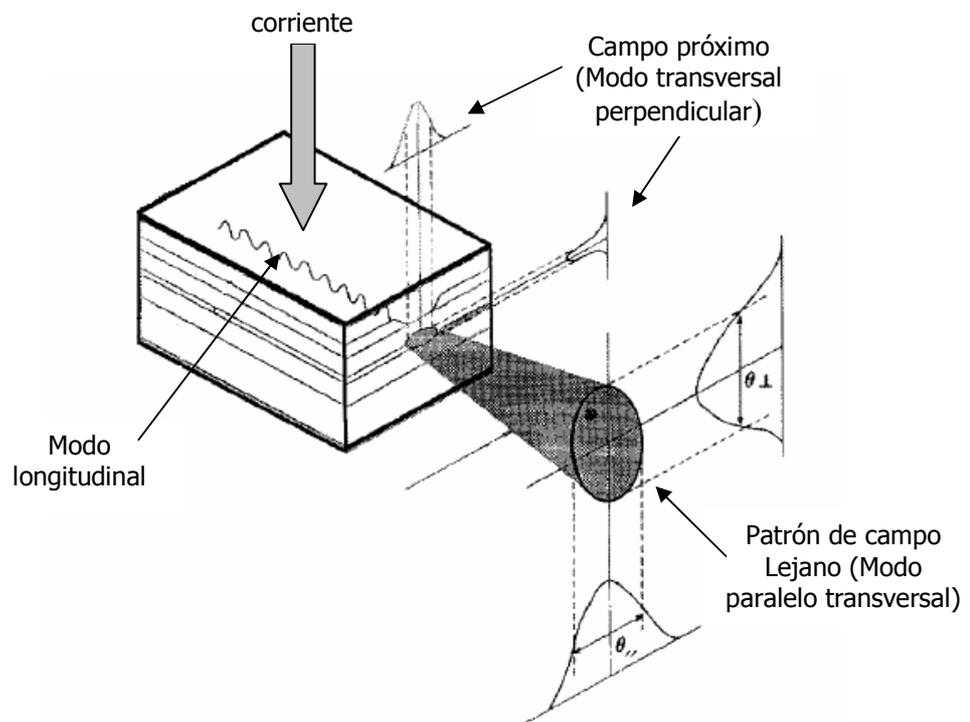
En la región de la unión se droga ligeramente para que el índice de refracción de la capa activa (P-GaAs) sea mayor que las capas de recubrimiento debido a que están pesadamente dopado con impurezas. Este tipo de unión está diseñada para reducir la pérdida de la difracción en la cavidad óptica produciendo un efecto de emisión ligera que ayuda a confinar la luz láser en la región activa. Con la estructura heterogénea doble se consigue un adecuado perfil de composición que da lugar a dos fenómenos imprescindibles para obtener emisión láser en forma eficiente:

- Confinamiento de portadores que son acumulados y forzados a recombinarse en la región activa (P-GaAs).
- Confinamiento óptico sobre el perfil de índices que produce un efecto de guía de la onda que confina el campo óptico en la zona activa.

El haz de luz que emerge del diodo láser forma una elipse vertical (modo paralelo transversal), aunque del diodo láser emerge la luz en forma de elipse horizontal (Modo transversal perpendicular), como se muestra en la figura 54. La luz que se propaga dentro del diodo, se extiende hacia afuera en forma transversal (verticalmente) desde las capas de recubrimiento superior e inferior. Cuando el diodo está funcionando en el modo fundamental, el perfil de intensidad de su haz emitido en el plano transversal es una curva de Gauss de forma acampanada.

En el láser se amplifica la luz al viajar hacia atrás y hacia adelante en la dirección longitudinal, entre los espejos de cada extremo del diodo, donde la salida del haz se produce por un espejo semi-reflexivo. Los modos resonantes que se extienden en dirección perpendicular a la unión PN, se llaman modos transversales.

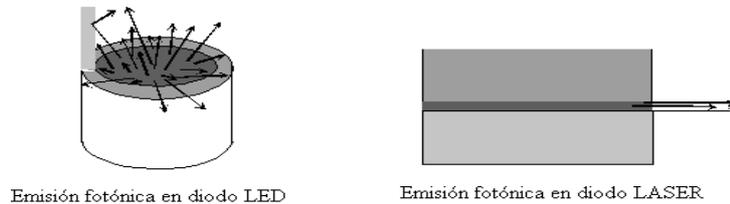
FIGURA 54. Características ópticas del diodo láser de estructura heterogénea doble.



Las características de un diodo láser son:

1. Emite luz en una sola dirección (figura 55).

FIGURA 55. El diodo láser es altamente direccional en Comparación del LED.

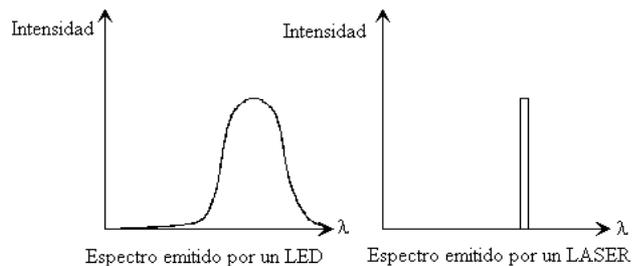


- Alta irradiación, este es un parámetro radiométrico. Se determina mediante la relación:

$$\text{Irradiación} = \text{Potencia óptica} / \text{área de la luz.} \quad (4.2)$$

- La emisión de luz láser es monocromática, los fotones emitidos por un láser poseen longitudes de onda muy cercanas entre sí, (figura 56).

FIGURA 56. Comparación de la intensidad de luz en función de la longitud de onda del láser respecto al LED.



- La luz láser es altamente coherente, todas las ondas en el rayo láser están altamente ordenadas en espacio y correlacionadas en tiempo.

Debido a estas propiedades, el diodo láser puede conseguir rayos de luz monocromática dirigidos en una sola dirección.

Las ventajas de un diodo láser son:

- **Tamaño y peso:** Un diodo típico del láser mide menos de un milímetro y pesa una fracción de un gramo.
- **Requisitos de energía:** La mayoría de los diodos láser requieren solamente algunos milivatios de energía, de 3 a 12 voltios de corriente continua y varios miliamperios. Por lo tanto, pueden funcionar con pequeñas fuentes, como una batería.
- **Umbral de corriente muy bajo**
- **Intensidad reducida:** Un diodo de láser no se puede utilizar para los propósitos espectaculares como quemar agujeros en metal, o cegando pilotos de vehículos. Pero su salida coherente resulta en eficacia alta y con facilidad para su procesamiento.
- **Rayo de ángulo ancho:** Un diodo del láser produce un "cono" más bien que un "lápiz" de luz IR, aunque este "cono" se puede enfocar usando lentes.
- **Son muy eficientes:** más del 20% de la energía suministrada se consigue en forma de radiación láser.
- **Son muy confiables**
- **Tienen vidas medias muy largas:** estimadas en más de 100 años de operación continuada.
- **Son muy baratos:** debido a que se construyen con técnicas de producción en masa utilizadas en la industria electrónica.
- **Permiten la modulación directa de la radiación emitida;** se logra simplemente controlando la corriente eléctrica a través de la unión p-n.

4.2.1.1.2 CIRCUITO GENERADOR DE PULSOS

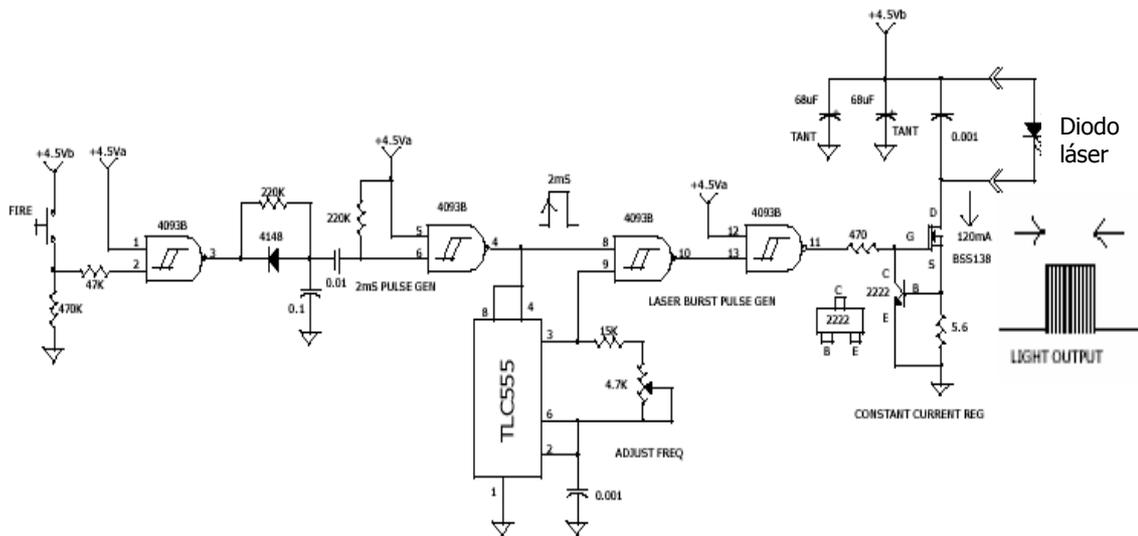
El generador de pulso de luz láser del Lidar, transmite pulsos de corta duración y con potencia luminosa eficiente para realizar el monitoreo.

Su diseño contempla dimensiones espaciales, espectrales y temporales de la señal del pulso cuadrada, la densidad espectral del pulso se modela de la forma Gaussiana.

El sistema contempla dos partes, la primera esta compuesta por un oscilador Astable, que puede ser diseñado con distintos elementos semiconductores, pero en este caso usa el temporizador integrado 555 para generar la señal oscilante; debido a que es un componente confiable, fácil de usar y muy económico.

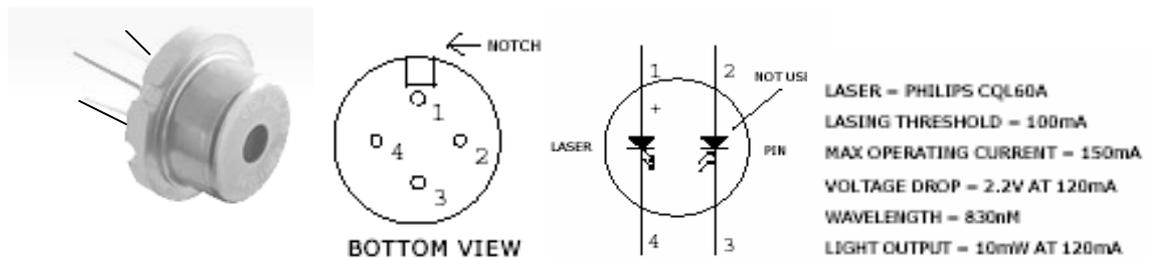
Segundo, un amplificador activo que se constituye por un transistor MOSFET(unipolar) y un BJT(bipolar) que se encarga de regular la corriente de la compuerta del MOSFET; este tipo de transistor está constituido por metal-oxido-semiconductor que es mucho más estable a la temperatura y de menor tamaño, tiene tres componentes para su conexión las que son: el drenaje (D), la fuente (S) y la compuerta (G). El MOSFET proporciona una mejor respuesta a la frecuencia. El amplificador recibe la señal del oscilador y amplifica esta señal cuadrada en una potencia mayor eléctricamente para alimentar al diodo láser, de esta manera el transductor convierte los pulsos eléctricos en pulsos de luz con una alta irradiación (ver figura 57).

FIGURA 57. **Generador de pulsos de luz láser.**



En la figura 58 se presenta la forma física y características específicas de conexión del diodo láser.

FIGURA 58. **El diodo láser del generador de pulsos.**



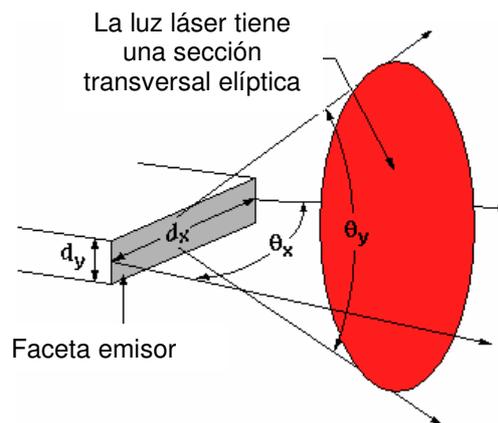
4.2.1.2 SISTEMA ÓPTICO PARA LA EMISIÓN LÁSER.

En adición al diodo láser, el sistema transmisor del Lidar tiene un sistema óptico que expande y dirige la luz del pulso láser en forma directa hacia el vehículo a monitorear, este acoplamiento óptico reduce la divergencia del láser.

Sin embargo, la luz del diodo láser tiene cierto defecto conocido como astigmatismo, el cual causa distorsión en la aplicación directa de lentes de aumento.

Generalmente la cara del material activo del diodo semiconductor que emite la luz tiene una faceta rectangular, la cual causa que la salida del haz tenga forma elíptica en su sección transversal exhibiendo el fenómeno conocido como astigmatismo, ver figura 59.

FIGURA 59. Fenómeno de astigmatismo del diodo láser.

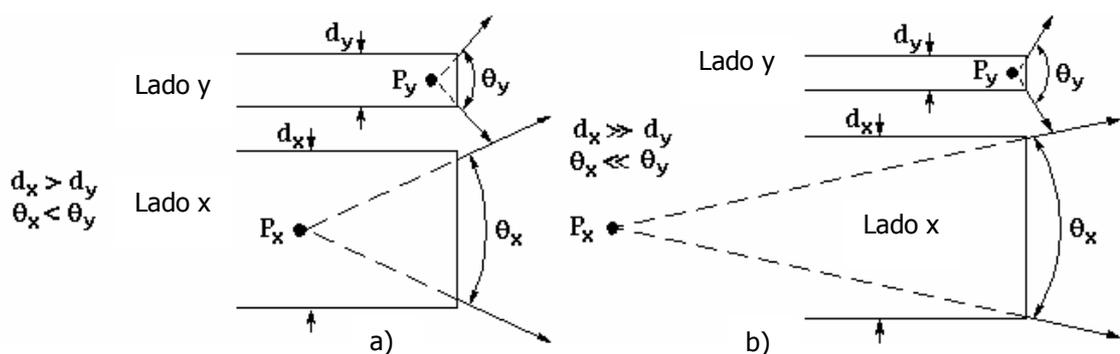


La diferencia de los ángulos de emisión " θ_x y θ_y " causa que la forma transversal del haz del diodo láser tenga una forma elíptica, por tanto, la luz emitida por la faceta del emisor es equivalente a la luz emitida por una fuente imaginaria de luz "P" cuya posición puede localizarse rastreando la viga del frente hacia atrás (figura 60a). Puede verse que P_x se localiza detrás de P_y porque θ_x es más pequeño que θ_y .

Cuando d_x es mucho mayor que d_y , θ_x es mucho más pequeño que θ_y y la distancia entre P_x y P_y es por consiguiente también mucho más grande, ver figura 60b.

La distancia entre P_x y P_y es la descripción numérica del astigmatismo. Si la forma transversal de la luz es circular P_x y P_y coinciden en el mismo punto por tanto no se tendría este problema.

FIGURA 60. Dos tamaños de la faceta emisor del diodo láser.

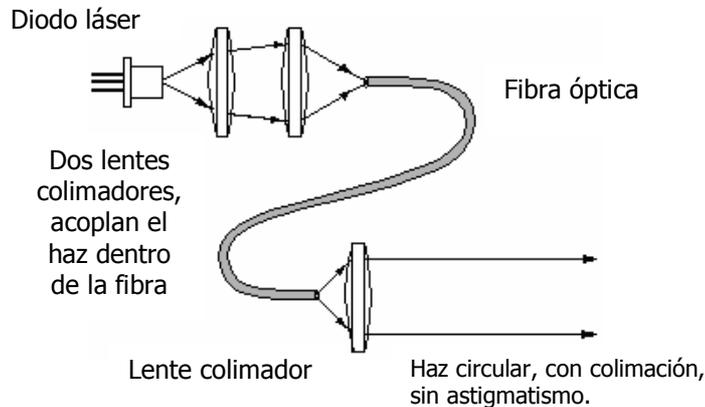


La existencia de astigmatismo significa que cuando se usa un lente óptico para aumentar y dirigir el haz de luz láser esta se produzca en una sola dirección, ya sea en la dirección de “X” o en la dirección de “Y”, porque P_x y P_y no pueden converger simultáneamente al un mismo punto focal del lente óptico.

Un método alternativo consiste en que la luz del diodo láser sea acoplada por dos lentes colimadores teniendo convergencia dentro de una fibra óptica, y su salida pasa por un tercer lente colimador, ver figura 61.

La acción de un lente colimador es la de amoldar el haz de luz láser con una mejor calidad óptica, distribuyendo la luz en el área del lente colimador y obtener en su salida un patrón de radiación Gaussiana, donde, en el centro del lente posee la mayor energía.

FIGURA 61. Eliminación del astigmatismo por fibra óptica.



La teoría de fibra óptica indica que la fibra usada debe de tener una longitud mayor que la longitud de onda del láser. La acción de la fibra es la de mezclar lo suficiente el haz de luz, pudiéndose pasar la luz láser a través de la fibra, lográndose que el haz pueda librarse de las características espaciales.

La característica del haz saliente de la fibra está determinada por la calidad de la superficie y la forma final de la fibra. Así, la sección transversal elíptica y el astigmatismo de la luz láser se elimina cuando pasa en este proceso óptico, sin afectar la características del rendimiento del haz de luz.

El centro de la fibra tiene una sección transversal circular con un diámetro constante en cualquier dirección radial, esta característica de la fibra revela que el haz saliente tenga un ángulo divergente constante en cualquier dirección radial, teniendo una forma transversal circular constante sin astigmatismo.

4.2.2 SISTEMA RECEPTOR

El sistema LIDAR se clasifica como un sistema “activo” debido a que emite pulsos de radiación infrarrojo y luego recibe parte de la dispersión que los vehículos han reflejado, en este proceso se involucra fenómenos físicos tales como la dispersión y absorción. La absorción ocurre en el trayecto directo entre el Lidar y el vehículo a monitorear, el proceso ocurre por las moléculas y partículas de la atmósfera que absorben la energía radiante emitida y reflejada, reduciendo así la energía de los pulsos de luz láser cuando son captados por el receptor. La dispersión es un fenómeno que se traduce en un redireccionamiento de la trayectoria de la luz láser o un pequeño desvío de la propagación rectilínea, causado por la interacción ó choque entre los pulsos de radiación IR y el automóvil que se monitorea, resultado de la absorción y reflexión de los pulsos que retornan al receptor estos tienen un desfase de frecuencia y una menor amplitud de energía que la emitida.

El sistema receptor junto a los subsistemas que los componen colecta los pulsos de radiación mediante un receptor óptico, y son canalizados hacia un foto-detector dentro del detector coherente-heterodino para la reducción del ruido, la señal eléctrica es procesada para determinar la velocidad con que se desplaza determinado vehículo.

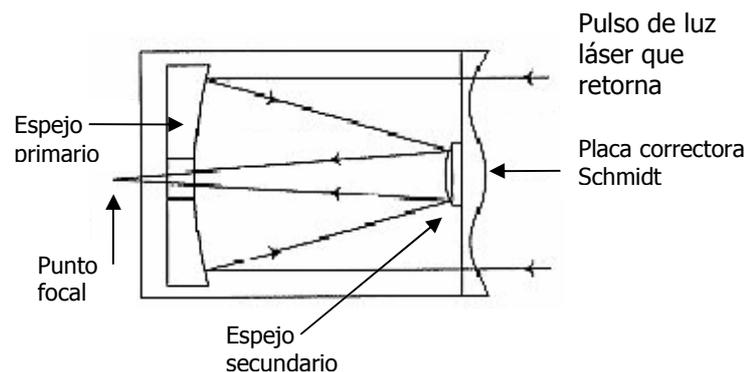
4.2.2.1 RECEPTOR ÓPTICO

El receptor óptico esta constituido básicamente por un telescopio, este instrumento recoge cierta cantidad de pulsos de luz láser reflejados y la concentra en un punto focal del instrumento.

La cantidad de luz captada por el instrumento depende fundamentalmente de la apertura óptica (campo de vista del telescopio), limitándose a esa área únicamente debido a otras fuentes de luz externas.

La apertura óptica del telescopio es el mismo para la sección del transmisor, esto es una ventaja de la configuración coaxial, la diferencia obtenida consiste en la dirección de la luz. Por tanto, el receptor se fundamenta en el uso del telescopio Schmidt-Newton (figura 62) por su diseño compacto, logrando obtener distancias focales muy grandes en tamaños reducidos.

FIGURA 62. Telescopio catadióptricos SCHMIDT-NEWTON.



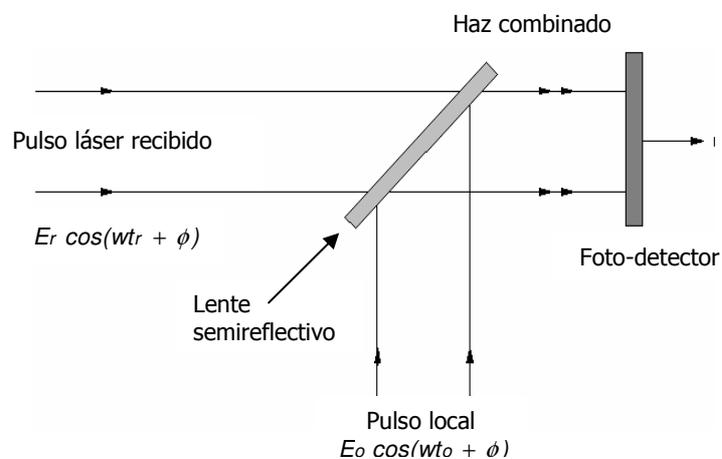
En el foco del telescopio se concentra los pulsos de luz láser colectados y se canaliza hacia el detector óptico mediante fibra óptica.

4.2.2.2 DETECTOR COHERENTE-HETERODINO

La detección coherente es usada por este tipo de sistema Lidar diseñada para la medición de la velocidad. Esta técnica de detección óptica mezcla dos haces de radiación láser coherentes sobre un tipo de foto-detector, ver figura 63.

La primera fuente es un pulso láser que proviene del receptor óptico y la segunda fuente proviene del sistema local del detector como una radiación altamente estable, coherente y monocromática.

FIGURA 63. **Detección coherente.**

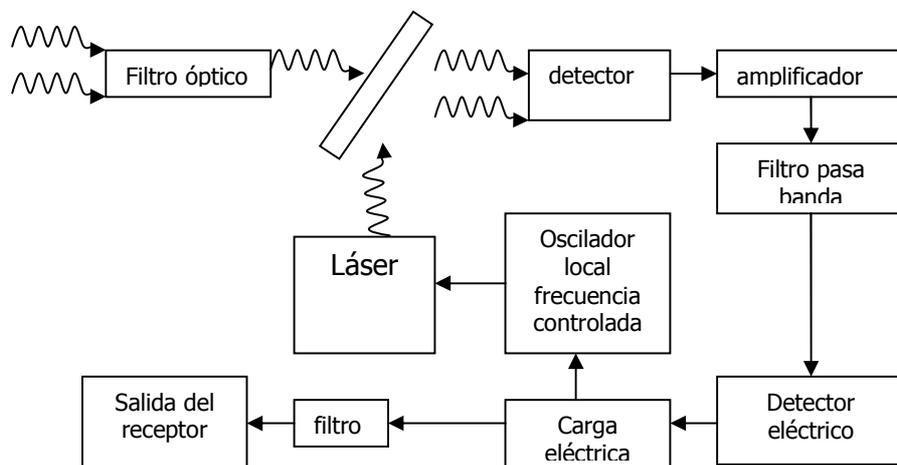


Fuente: <http://www.cozeti.org/>

La salida del foto-detector es una señal que posee ruido, esto puede ser consecuencia de las siguientes fuentes: ruido de fondo de la señal, ruido del foto-detector, influencia de ruido de resistencias y el ruido del procesamiento, la técnica de detección heterodino se usa para reducir los efectos que lo causan.

El diagrama básico de bloques de un receptor óptico heterodino se muestra en la figura 64.

FIGURA 64. Diagrama de bloques del receptor óptico detección heterodino.



Fuente: [http://bulletin.pan.pl/\(52-1\)](http://bulletin.pan.pl/(52-1))

El espejo semi-reflector tiene la función de mezclar coherentemente las fuentes de radiación óptica hacia la superficie del detector, este espejo se conoce como "beam splitter", se constituye de un plato de vidrio con un adecuado coeficiente de refracción, de manera que sea semi-reflectivo. Se usa un foto-detector para procesar la radiación mezclada y obtener una señal eléctrica, esta señal es próximamente amplificada. Un filtro activo a frecuencia intermedia continúa para extraer la diferencia de frecuencia, se tiene un detector eléctrico para demodular la señal de acuerdo a la naturaleza de la modulación. La señal de la impedancia de carga pasa a través de un filtro de salida para continuar con el procesamiento de la señal eléctrica, la segunda radiación de luz láser esta controlado por el oscilador local que esta en función de la diferencia de frecuencia de forma retroalimentada.

Este proceso de detección representa sustancialmente una alta sensibilidad del foto-detector que depende del ancho de banda del filtro intermedio.

La ventaja de esta técnica, es que necesita coleccionar simplemente sólo unos fotones para determinar la velocidad del vehículo, en lugar de coleccionar bastante radiación para obtener una intensidad contra la medida de la longitud de onda (espectro de la señal) y posteriormente la comparación de fase.

Uno de los desafíos de la detección coherente-heterodino es que la única luz láser útil que retorne debe de permanecer coherente y alineado; pero con diferente amplitud y frecuencia, o sea, que debe de conservar las características de la luz láser enviada por el Lidar, la alineación óptica es muy precisa y crucial para determinar la medición.

Esta técnica se basa en el efecto Doppler para medir la velocidad, y se obtiene en la salida del foto-detector debido a que esta señal eléctrica tiene como resultado una diferencia de las frecuencias ópticas, típicamente su frecuencia se encuentra en la región de Radio frecuencia del espectro electromagnético, esto hace que este detector óptico sea un sistema simple y robusto sobre el efecto del ruido que otros tipos de detectores.

El sistema del Lidar es estacionario y está monitoreando la velocidad de los vehículos en movimiento, la frecuencia de la radiación óptica recibida sufre el desplazamiento Doppler. Esto significa que la frecuencia en el receptor difiere de la frecuencia emitida en un “ Δf ”, esta cantidad de cambio es proporcional a la velocidad del vehículo, el desplazamiento Δf se puede calcular como :

$$\Delta f = \frac{2 \times v \times f_0}{c} \quad (4.2)$$

Donde:

- f_0 es la frecuencia a la que se emite los pulsos de luz láser.

- v es la componente radial de la velocidad del vehículo.
- c es la velocidad de la luz.

4.2.2.2.1 FOTO-DETECTOR

Un foto-detector es un dispositivo transductor que transforma la energía luminosa en energía eléctrica, todo foto-detector es sensible a la presencia de luz debido a que se constituyen de material semiconductor teniendo como consecuencia la generación de pares de electrón-hueco. Estos elementos ópticos responden a la potencia que contiene el haz de radiación cuando inciden sobre estos, y su resultado es proporcional al cuadrado del campo eléctrico de la luz y son llamados por “detectores de ley-cuadrático”, a diferencia de un detector de microondas que mide el campo eléctrico directamente.

La opción de elegir un detector en particular depende de las características de la aplicación específica, una característica muy importante es la longitud de onda donde existe la máxima eficiencia, porque los foto-detectores ópticos sólo responden en ciertas partes del espectro electromagnético debido al material semiconductor que lo compone, la máxima eficiencia se consigue mediante la capacitancia de transición y de difusión que proporciona las capas semiconductoras que constituyen este elemento óptico, de esta manera se ubica en una región específica para su operación.

Para el sistema Lidar un diodo **PIN** es versátil para su condición de operación, debido a que es altamente fiable, tiene bajo ruido y es compatible con circuitos amplificadores de baja tensión. Además, es sensible a un gran ancho de banda debido a que no tiene mecanismo de ganancia.

4.2.2.2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL DIODO PIN

La estructura básica del diodo PIN es parecido como la de un diodo común de silicio, pero su diferencia se constituye por una tercera capa que se ubica en una zona intermedia. La estructura del diodo PIN es planar y se constituye de material semiconductor como el Arsénico, Indio y Galio (As-In-Ga), posee dos capas altamente conductivas; una es dopado como aceptador conocido como tipo P y el otro dopado como donador conocido como tipo N que se constituyen del material semiconductor Ga-As, en medio de estas capas se encuentra un material extrínseco poco conductivo tipo N de Indio Fosforoso.

Para su funcionamiento, el diodo PIN se polariza inversamente, esto hace que las capas tipo N y P se separen de la unión creando así una región de depleción y tiene la función de que las cargas generadas en esta zona sean aceleradas por el campo eléctrico presente. El comportamiento cuando se polariza en inversa se ve claramente influenciado por la incidencia de luz. Conviene recordar que el diodo real presenta unas pequeñas corrientes de fugas de valor I_S . Las corrientes de fugas son debidas a los portadores minoritarios, electrones en la zona P y huecos en la zona N. La generación de portadores debido a la luz provoca un aumento sustancial de portadores minoritarios, lo que se traduce en un aumento de la corriente de fuga en inversa.

El comportamiento del diodo PIN con polarización directa apenas se ve alterado por la generación luminosa de portadores. Esto es debido a que los portadores provenientes del dopado (portadores mayoritarios) son mucho más numerosos que los portadores de generación luminosa.

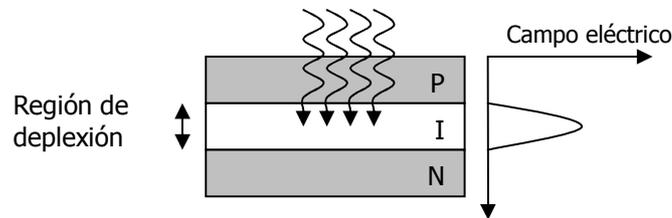
La superficie donde incide la luz, es sobre el material Ga-As dopado como aceptador y está ubicado en la parte superior (ver figura 65), esta sección del diodo PIN se encuentra recubierta de una fina capa aislante o capa pasiva; esto con el fin de proteger la superficie de una luz ajena a la que se recibe, esta capa de protección reduce la sensibilidad (se debe al incremento de intensidad al polarizar el dispositivo en inversa por unidad de intensidad de luz, expresada en luxes o en mW/cm^2) del diodo PIN que produce la recombinación de electrones y huecos.

Es necesario enfocar directamente la luz sobre la superficie del transductor o por medio de un lente convergente que la acopla sobre dicha superficie, esto proporciona un área de luz sensitiva del transductor para lograr que funcione de la mejor forma, cuando detecta los fotones de la radiación láser, estos fotones entran a la zona intermedia generando pares de electrón-hueco en forma de portadores minoritarios.

Cuando un fotón entra en la zona de depleción, es absorbido y genera un par electrón-hueco, los cuales son dirigidos hacia los electrodos opuestos, por la polarización inversa. Allí se recogen y aparecen como corriente en el circuito exterior. El par de portadores es separado en menos tiempo que el tiempo tomado para su recombinación, el proceso de detección es rápido y eficiente. Debido a que no existe mecanismo de ganancia en un fotodiodo PIN, la máxima eficiencia del detector es la unidad y el producto *ganancia x ancho de banda* coincide con esta última.

El ancho de banda de un diodo PIN está limitado por el tiempo tomado en coleccionar las cargas. Este tiempo es inversamente proporcional al ancho de la zona de depleción y directamente proporcional a la velocidad de los portadores de cargas en la región de alto campo eléctrico.

FIGURA 65. **Fotodiodo PIN.**



Se describen los parámetros que define al Fotodiodo PIN:

1. **La Responsividad:** es un parámetro esencial del transductor óptico, indica una medida de la sensibilidad y para determinarlo se relaciona la potencia luminosa de entrada (φ_e) con la salida eléctrica correspondiente (I_p) de la siguiente forma:

$$R_p = \frac{I_p}{\varphi_e} \quad (4.3)$$

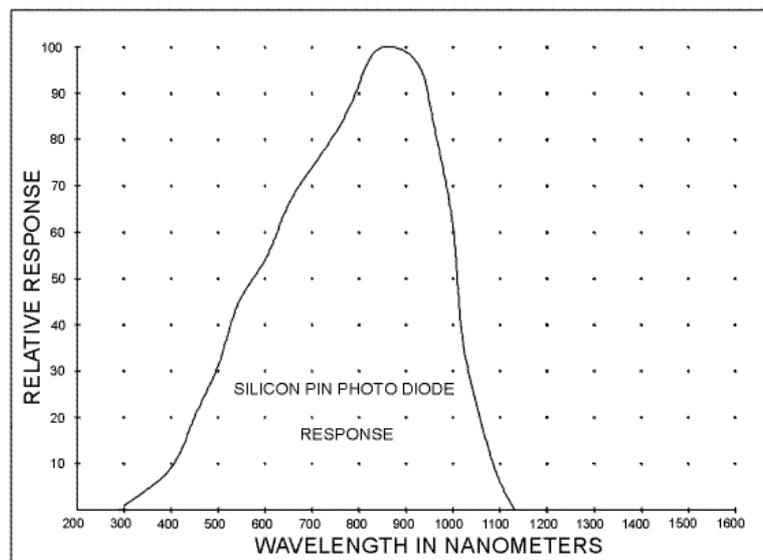
La responsividad varía con los cambios de:

- Específicamente una longitud de onda, debido a las características de absorción del material sensible del detector cambia con la longitud de onda.
- Influencia de voltaje, porque I_p es proporcional al voltaje que lo alimenta.
- La temperatura, estos cambios afectan las constantes ópticas del material semiconductor del detector y su eficacia de la colección de fotones.

2. **Respuesta espectral:** si trazamos la responsividad absoluta en función de la longitud de onda, se obtiene una curva de respuesta espectral. El valor máximo de la curva representa la máxima responsividad que determina una longitud de onda.

La curva de respuesta del fotodiodo **PIN** (figura 66), muestra que el área de sensibilidad ocurre en las longitudes de onda de la “región del infrarrojo”, teniendo su máxima sensibilidad a 900 nm. Para longitudes de onda mayores el dispositivo decae instantáneamente a comparación del cambio gradual que tiene a longitudes de onda más corta.

FIGURA 66. **Respuesta espectral.**



3. **Potencia equivalente del ruido (NEP):** el NEP es la potencia radiante que produce una señal eléctrica (responsividad, R_p) equivalente al voltaje o corriente del ruido (I_{ruido}) en el foto-detector, y se expresa de la siguiente manera:

$$NEP = \frac{I_{ruido}}{R_p} \quad (4.4)$$

La capacidad del transductor óptico para detectar señales de luz débiles depende de su sensibilidad y en particular del ruido propio, las principales fuentes de ruido dentro del sistema donde se usa un fotodiodo PIN son:

- Shot noise: es el “ruido de granalla”, producido en la zona de depleción de la unión **P-N** inversamente polarizada, generado por el proceso estadístico de los electrones que atraviesan la unión del diodo PIN.
- El ruido Johnson: es un tipo de ruido generado por fluctuaciones térmicas en materiales conductores, esto es resultado de los electrones en constante movimiento colisionando con otros electrones y átomos de la estructura cristalina del semiconductor. Representa una pequeña corriente en la estructura del material. La suma de esta corriente sobre un largo período de tiempo es cero, pero la fluctuación aleatoria sobre un corto intervalo de tiempo que constituye los pulsos es la causa del ruido térmico de Jonson.

La ecuación que representa este tipo de ruido se escribe de la siguiente manera:

$$V^2 = 4KTRB \quad (4.5)$$

Donde:

- V = voltaje
- K = constante de Boltzmann's
- T = temperatura absoluta
- R = resistencia
- B = ancho de banda de amplificación

El voltaje del ruido al cuadrado es directamente proporcional al valor de la resistencia. La resistencia de carga es usualmente mayor que la resistencia interna del foto detector, por tanto, el ruido de Johnson puede ser dominado por esta resistencia.

- Frecuencias bajas: muchos tipos de ruido para la cual la potencia del ruido varía inversamente proporcional con la frecuencia. Un término común para este tipo de ruido es $1/f$.

4. **Detectividad:** es la habilidad de detectar el mínimo flujo radiante de luz de un diodo PIN, el mejor detector es el que tiene un NEP de valor bajo. Si se toma el recíproco del NEP, se obtiene un valor alto, entonces se puede definir un nuevo término llamado detectividad y está en función de:

- Área del detector.
- Ancho de banda del receptor.

- Frecuencia intermedia.
- Voltaje.
- Longitud de onda de la radiación.
- Temperatura del detector.

5. **Quantum Efficiency:** Se relaciona de la misma manera que la responsividad pero en intervalos de tiempo, o sea que se maneja el valor de la generación de electrón-hueco producida por los fotones incidentes en un intervalo de tiempo. Este resultado normalmente está expresado como porcentaje, prácticamente es una medida de la efectividad del detector en producir corriente eléctrica.

4.2.2.3 PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL ELÉCTRICA

En la salida del detector coherente-heterodino se tiene una señal eléctrica con una frecuencia que representa un corrimiento Doppler. Su procesamiento se basa en digitalizar esta frecuencia y realizar la operatoria que está representada por la relación matemática de Doppler, que indica una relación proporcional entre esta frecuencia y la velocidad que se está monitoreando (figura 67).

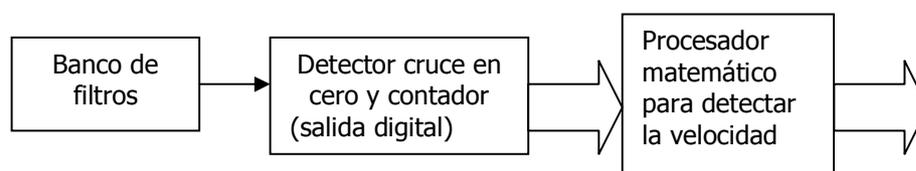
La sección del procesamiento de la señal consiste en: adquirir los datos y procesarlo:

1. La adquisición de datos se realiza mediante un banco de filtros centrados en diferentes frecuencias que van desde la frecuencia nula hasta el valor de una frecuencia máxima en representación de un límite. Con el objetivo de limitar un ancho de banda y de esta manera limitar señales indeseables.

La señal se ubicará en un filtro, y su análisis se centra en determina en forma digital el valor de la frecuencia recibida (diferencia de frecuencia Doppler).

2. Un detector cruce en cero y un contador puede determinar el periodo de esta señal, y lo hace de la siguiente manera: una señal que oscila tiene una variación de amplitud (que baja y sube), se coloca un nivel de referencia sensible a estos cambios. Esta medición no se hace con los bordes de subida y bajada sino a partir de un punto en el ciclo de entrada al mismo punto en el siguiente ciclo, lo que es el periodo de la señal. En este caso un flip-flop se activa en un punto de subida dado por el detector cruce en cero de la onda de entrada y se desactiva al mismo punto de subida del siguiente ciclo, este cambio de estado en el flip-flop activa/desactiva también al contador, este tiempo de compuerta se representa en el contador como un tiempo de periodo digital donde se obtiene una frecuencia.
3. Un procesador matemático realiza la relación de Doppler para encontrar la velocidad.

FIGURA 67. Diagrama de bloques que representa el procesamiento de la Señal, para obtener la velocidad del vehículo.



4.2.2.4 COMPARACIÓN CON EL LÍMITE DE VELOCIDAD Y SU VISUALIZACIÓN

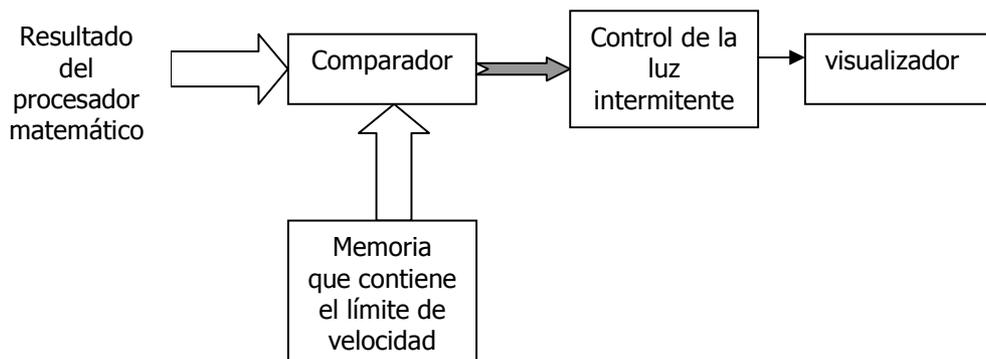
Es necesario realizar una comparación de la velocidad que obtiene el Lidar con el límite de velocidad establecido. El límite de velocidad representa un valor máximo a la que se deben de conducir los vehículos teniendo presente la peligrosidad del tramo de carretera, de esta manera el sistema Lidar cumple la función de indicar y prevenir accidentes automovilísticos por exceso de velocidad.

La magnitud del límite de velocidad es un valor fijo, éste se almacena en forma digital en una memoria EEPROM, debido a que su valor puede ser ajustado a las diversas condiciones que presentan los tramos de las carreteras.

La comparación de los datos digitales que representa la velocidad obtenida con el límite establecido la realiza un circuito comparador o en la mayoría de los casos un microprocesador (figura 68), donde se necesitan manejar dos condiciones:

1. Si el límite de velocidad es mayor que la velocidad obtenida por el Lidar el comparador no proporcionará una señal de salida para visualizarse.
2. Pero si el límite de velocidad es igual o menor a la velocidad obtenida por el Lidar entonces el comparador proporciona una señal de salida para visualizarse.

FIGURA 68. Diagrama de bloques de la comparación de velocidad y su visualización.



Un microcontrolador **PIC16F876** ejecuta todo el procesamiento de la señal eléctrica explicado con anterioridad, su resultado es la generación de la señal intermitente cuando el Lidar detecte un sobrepaso de la velocidad hacia el módulo visualizador.

El módulo visualizador consiste en un sistema muy simple, una luz intermitente de alta visibilidad de color rojo se activará en caso de exceso de velocidad, de lo contrario esta no se activa.

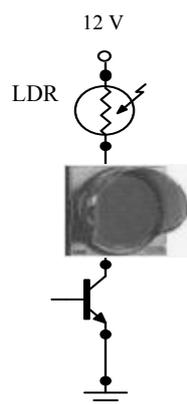
Un sistema de visualización conformada por un visualizador numérico es en muchos casos un punto de distracción para el piloto cuando interpreta el valor numérico de la velocidad con que se conduce. Por tanto, el efecto que produce el sistema de visualización intermitente es instantáneo de acuerdo al momento que es visible. Éste tiene el efecto de un semáforo sobre la carretera que solo alertara al piloto en forma directa cuando excede la velocidad y en caso contrario el Lidar pasa de forma desapercibida.

La luz que activa esta señal intermitente se consigue mediante “diodos emisores de luz” de muy alta eficiencia ahorrando el consumo energético y de manutención, teniendo una alta fiabilidad con respecto a la utilización de las bombillas tradicionales.

La forma del visualizador es como la de un semáforo, constituido con un diámetro de 30 cm y 250 LED’S ordenados en anillos en forma concéntricas, que es una medida “estandard” para una mejor área de visualización de la luz.

El sistema de LED’S se alimenta con 12 voltios, cuenta con un sistema automático de la luminosidad día/noche; esto se consigue colocando un resistor variable a la luz solar (LDR) en serie con los LED’S rojos. La resistencia varía su valor en función de la luz solar que incide sobre su superficie. Cuanto más sea la intensidad de luz que incide en la superficie del LDR, menor será su resistencia y cuando no hay luz solar mayor será la resistencia. En la figura 69 se muestra el sistema visualizador del sistema Lidar.

FIGURA 69. Representación del modulo visualizador del Lidar.



El transistor BJT representa la potencia requerida por la suma de corriente de los LED’S, el arreglo de los diodos se realiza en paralelo y por sectores.

Generalmente estos transistores están configurados en emisor común y sin estabilidad debido que solo funcionan en corte y en saturación, prácticamente es la acción de un switch electrónico.

El sistema completo tiene una gran ventaja en la visibilidad en todas las condiciones, esto se debe a un reducido ángulo de concentración de la luz emitida y no existe el efecto "fantasma" a causa del reflejo de la luz solar, una lente en la carátula de los diodos del tipo convergente consigue evitar este efecto.

La siguiente tabla representa un cuadro de comparación entre el uso de una bombilla común respecto al uso de LED'S.

TABLA V. Cuadro comparativo entre la bombilla y LED.

SISTEMA TRADICIONAL (Bombilla)	NUEVO SISTEMA (Diodos LED)
Duración máxima de la bombilla 6 meses	Duración máxima de los LED 10 años
Gran pérdida de luminosidad después 5000 horas	Pérdida de luminosidad después 10,000 horas Entre 6% y 12%.
Luminosidad no uniforme	Luminosidad uniforme
Bajo contraste con la luz solar, Problemas de visualización a distancia	Alto contraste con la luz solar, Mejor visibilidad a distancias superiores
Efecto "fantasma" a causa del reflejo de la luz solar en la lente	Efecto "fantasma" inexistente
Condición no neutral con semáforo apagado para la utilización de lentes rojas	Condición neutral con semáforo apagado No se utilizan lentes rojas
En caso de bombilla quemada o la ruptura del filamento puede causar un corto circuito,	Los LED se ordenan por sectores, Posibilidad de avería a 70°C >> 1.500.000 horas
Limpieza anual interno debido al vapor generado por la bombilla	Limpieza anual externo (lente) No necesita limpieza interno
Reemplazo semestral de las bombillas, posibilidad de ruptura del filamento a causa de estimulaciones mecánicas como vibraciones por viento, manutención preventiva semestralmente.	Reemplazo de LED'S después de 10 años, Baja sensibilidad a vibraciones por viento, ninguna manutención preventiva.
Consumo: 80 W	Consumo: 20 W

5. CRITERIOS Y NORMAS APLICABLES AL LIDAR DE CONFORMIDAD CON EL “MANUAL CENTROAMERICANO DE DISPOSITIVOS UNIFORMES PARA EL CONTROL DEL TRÁNSITO”

El Lidar es un sistema que tiene como objetivo regular la velocidad en tramos críticos sobre la carretera, y esto se consigue mediante la visualización de una luz intermitente que pertenece al módulo de visualización del sistema, pero su estructura física es igual a la de un semáforo, con una diferencia; que sólo posee una sección óptica de visualización de color rojo que indica el exceso de la velocidad con que se conduce el vehículo.

Este sistema prácticamente es un dispositivo de control de tránsito, por tanto, debe de cumplir criterios y normas reglamentadas por el “manual centroamericano de dispositivos uniformes para el control del tránsito” que maneja el Departamento de Tránsito de Guatemala (entidad del Estado) que es el encargado de que la señalización tenga efecto consecuentes en el sistema vial.

A nivel mundial existen dos estándares internacionales sobre la reglamentación de la señalización vial, el del continente americano y el europeo. El sistema que se presenta en el manual se identifica con el estándar americano, y tiene como objetivo la uniformidad; esto corresponde a un acuerdo a nivel internacional. La uniformidad ayuda al reconocimiento y entendimiento de los dispositivos, obligando a los peatones, conductores y autoridades de tránsito a dar a las señales la misma interpretación.

Además, es importante que los ciudadanos de distintos países, como regiones del país puedan entender el significado del señalamiento vial en forma independiente de su lenguaje materno, y esto tiene prioridad porque esta propuesta de aplicación del sistema Lidar es sobre la carretera CA-9 NORTE.

A continuación se desarrollarán las normas que se identifica con el dispositivo de control de tránsito; el sistema Lidar bajo estas normas es de carácter externo, y ayuda a los dispositivos de control de tránsito para que sea uniforme y acorde con las necesidades actuales, que le permita al usuario viajar con el mínimo de demoras, con seguridad y con la información necesaria para alcanzar su destino.

5.1 EL OBJETIVO DE UNA REGLAMENTACIÓN DE LA SEÑALIZACIÓN

El objetivo general del “Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control del Tránsito” es establecer normas, criterios y recomendaciones que permitan facilitar y asegurar el movimiento ordenado, seguro y predecible de todos los usuarios de la vía (automotor, peatonal y de otra índole) a través de toda la red vial del área centroamericana. El señalamiento y los otros dispositivos de control prescritos en el Manual deben ser utilizados para dirigir y asistir a los conductores en las tareas de prevención, guía, orientación y navegación propias de la conducción de un vehículo automotor para garantizar un viaje seguro en cualquier obra de infraestructura vial abierta al público.

La aplicación de las normas del presente Manual tiene como metas principales:

1. Mejorar la seguridad vial en las carreteras centroamericanas, reflejado en una disminución del número de accidentes de tránsito.

2. Reducir las demoras innecesarias provocadas por congestionamiento en el tránsito, por la escogencia de rutas erróneas o por la realización de trabajos temporales sobre la vía.
3. Suministrar una orientación oportuna y completa a los usuarios de las vías, tanto nacionales como extranjeros, en forma uniforme en cualquiera de los países de la región.

5.2 CRITERIOS TÉCNICOS QUE DEBE CUMPLIR UN DISPOSITIVO DE CONTROL.

El Manual establece los principios básicos que rigen el diseño y uso de los dispositivos de control de tránsito. Es importante que estos principios se consideren de forma prioritaria en la selección, aplicación y adaptación de cada dispositivo.

Para que sea efectivo, cualquier dispositivo para el control del tránsito deberá cumplir a cabalidad los cinco requisitos fundamentales que se enumeran a continuación:

1. Satisfacer una necesidad para el adecuado desenvolvimiento del tránsito. Cuando se coloca un dispositivo donde no se requiere, no sólo resulta inútil sino perjudicial por cuanto inspira irrespeto en el usuario. Además, cuando este problema es frecuente, en forma reiterada se violan las expectativas de los usuarios, con lo cual se fomenta una cultura de desobediencia generalizada al señalamiento.

2. Atraer la atención del usuario. Todo dispositivo debe ser advertido por el público. Cuando esto no se cumple, el dispositivo resulta completamente inútil.
3. Transmitir un mensaje claro y sencillo. La indicación suministrada por un dispositivo debe ser lacónica y clara para que sea interpretada rápidamente.
4. Infundir respeto a los usuarios de la vía. Los usuarios deben ser compelidos por la sensación que brinde el dispositivo, debiéndose respetar la indicación que éste transmite.
5. Permitir suficiente tiempo y espacio para una respuesta adecuada. Los dispositivos deben tener un diseño y colocarse de modo que el usuario, al advertirlos, tenga suficiente tiempo y espacio para efectuar la maniobra o realizar la acción requerida conforme lo dispongan el mensaje.

Para conseguir los propósitos antes mencionados, deben tenerse en cuenta los siguientes factores básicos: Diseño, Localización, Operación, Uniformidad y Mantenimiento.

5.2.1 DISEÑO

El diseño y la apariencia exterior del dispositivo tienen gran importancia en el desarrollo de su función. El diseño del dispositivo debe asegurar que cada característica como tamaño, contraste, colores, figura, composición e iluminación o reflectorización, estén combinadas para llamar la atención del usuario hacia el dispositivo para producir un mensaje sencillo y claro.

Manejando estas características se garantiza lo siguiente:

- permitir un tiempo adecuado de percepción y reacción.
- infundir respeto.
- Comprensión clara de los mensajes desde una distancia mayor y en un tiempo corto.

5.2.2 LOCALIZACIÓN

La ubicación de los dispositivos debe ser tal que garantice que el dispositivo esté dentro del cono visual del usuario, de manera que atraiga su atención y facilite su lectura e interpretación tomando en consideración la velocidad a la que vaya el vehículo.

El dispositivo debe estar posicionado con respecto al punto, objeto o situación a la cual se aplica, para ayudar a transmitir el mensaje correcto. Su localización, combinada con una legibilidad adecuada, debe ser tal que un conductor viajando a velocidad normal cuente con tiempo suficiente para su comprensión y para responder en forma adecuada.

5.2.3 UNIFORMIDAD

La uniformidad de los dispositivos para el control del tránsito simplifica la labor del usuario de las vías públicas, puesto que ayuda al reconocimiento y entendimiento de los mismos, ofreciendo a los peatones, conductores, inspectores de tránsito y autoridades judiciales, la misma interpretación de un dispositivo dado. De igual modo favorece la reducción de los costos de fabricación, instalación, conservación y administración de dichos dispositivos.

Dicho en forma simple, uniformidad significa tratar situaciones similares en la misma forma. El esfuerzo que desarrollan los usuarios de la carretera para descifrar el mensaje de los dispositivos se simplifica cuando existe uniformidad en éstos por cuanto el significado de la indicación se conoce de antemano. Un determinado dispositivo deberá emplearse siempre para el mismo propósito y colocarse en una localización similar de acuerdo con el lugar donde rige su indicación y ésta ha de ser la misma para que los usuarios se habitúen a reconocerla inmediatamente.

El uso de dispositivos uniformes de control de tránsito por sí mismo no constituye uniformidad. Cuando se usa un dispositivo estándar en un sitio donde no es apropiado, se está en presencia de una situación tan inaceptable como utilizar un dispositivo no estándar. De hecho, esta situación puede ser más dañina, ya que el uso incorrecto puede resultar en irrespeto de parte de los usuarios en aquellos sitios donde el dispositivo realmente se necesita.

5.2.4 OPERACIÓN

La operación o aplicación debe asegurar que los dispositivos y equipos apropiados se instalen para cumplir con las demandas del tránsito en un sitio dado. Además, el dispositivo debe ser colocado y operado en una forma uniforme y consistente para asegurar, hasta donde sea posible, que los operadores de vehículos respondan en forma adecuada al dispositivo, basados en su exposición previa a situaciones de control de tránsito similares.

5.2.5 MANTENIMIENTO

El mantenimiento de los dispositivos debe ser de primera calidad para asegurar su legibilidad y visibilidad; los dispositivos limpios, legibles, adecuadamente localizados y en buenas condiciones de funcionamiento, llaman la atención e inspiran el respeto de los conductores y peatones. De igual forma es necesario observar un estricto control al hacerse el reemplazo de los dispositivos, que deberán cumplir con las características de diseño y colocación previstas originalmente. Además del mantenimiento físico, se requiere mantenimiento funcional para ajustar los dispositivos de control requeridos a las condiciones actuales.

5.3 NORMAS QUE DEBE DE CUMPLIR EL LIDAR COMO RESULTADO DE LA APLICACIÓN DEL MANUAL

A continuación se presenta las siguientes normas previo al funcionamiento del sistema Lidar, y de esta manera cumple con el reglamento del Departamento de Ingeniería de Tránsito en base del “Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control del Tránsito”.

5.3.1 ESTUDIO DE INGENIERÍA REQUERIDO

La decisión de utilizar el Lidar en un tramo determinada sobre la carretera, deberá basarse en un estudio de ingeniería de tránsito adecuado para este sitio. Este tipo de estudio se define como la evaluación y análisis exhaustivo de toda la información pertinente disponible, y la aplicación de los principios, estándares, guías y criterios prácticos, tales como los contenidos en este Manual y en otras fuentes técnicas, tiene el propósito de decidir sobre la aplicabilidad, diseño e instalación de dispositivos de control de tránsito.

Este debe ser realizado por profesionales en Ingeniería civil bajo la condiciones del manual. El resultado del estudio debe ser documentado, como respaldo técnico de la decisión tomada. Consecuentemente se obtiene la ubicación exacta y precisa para su máxima visibilidad.

5.3.1.1 UBICACIÓN

La ubicación del sistema Lidar es un elemento importante para su eficiencia, esto se debe a que se debe de medir la velocidad a una distancia donde el conductor pueda reaccionar dentro de una distancia antes del tramo crítico, o sea, que se previene sin llegar al punto preciso del peligro. Por tanto, el Lidar se coloca de una forma frontal hacia el vehiculo que se va a monitorear, de modo que la cara del semáforo intermitente (módulo visualizador del Lidar) sea visible a los conductores que circulan por el carril correspondiente, colocándolas directamente al lado derecho del carril correspondiente o en ambas direcciones si el estudio de ingeniería lo requiere.

5.3.1.2 VISIBILIDAD

La indicación del semáforo intermitente deberá distinguirse claramente desde una distancia mínima de 400 m en condiciones atmosféricas normales. Con esta visibilidad se logra identificar un rango de distancia para que el conductor reaccione ante su situación sin ser sorprendido en el tramo peligroso, esto en el caso de que no exista un flujo vehicular.

La visibilidad del semáforo intermitente deberá ser mejor que la especificada para los semáforos convencionales de tránsito.

5.3.2 DISEÑO DEL MONTAJE DEL LIDAR

El montaje del sistema Lidar se realiza de una forma vertical, sobre el nivel de la carretera y colocado sobre un poste para su elevación, esto permite un mejor panorama de los automóviles que transitan y para advertir sobre el exceso de velocidad con que se desplaza ante la existencia de un tramo peligroso en la carretera y su entorno.

5.3.2.1 POSTE

El poste junto a los soportes proporcionan elevación, debe ser construido para soportar el sistema Lidar en la posición adecuada de forma permanente, para resistir el empuje y el balanceo repetitivo producido por el viento, la actividad sísmica prevaeciente en la zona, así como las características geotécnicas del suelo, y también para contrarrestar el vandalismo.

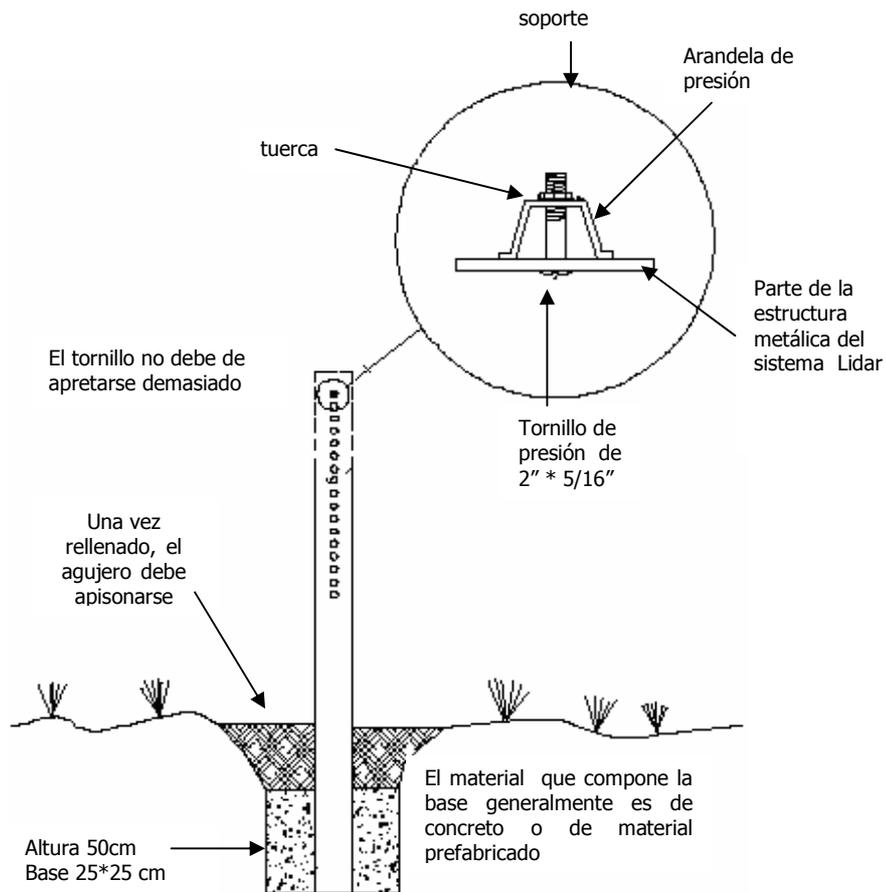
En la Figura 70, se presenta el detalle constructivo del poste y el soporte típico del dispositivo de control. Es recomendable que los postes tengan un diseño de rigidez, o sea, que se quiebre sin resistencia al impacto de un vehículo. La base de concreto utilizada como fundición del poste de soporte no deberá sobresalir del nivel del suelo, para evitar que se convierta en un obstáculo adicional.

Los soportes son los elementos que sostiene la estructura metálica del Lidar al poste, por el peso que tiene debe usarse varios soportes para brindar protección al dispositivo. Los soportes deben de construirse con la rigidez adecuada de acuerdo a todos los factores externos que involucra la ubicación.

La colocación del poste es ubicada a 50 cm. de la orilla del asfalto de la carretera, con una altura mínima de 2.5 metros hasta una máxima de 4.5 metros, este criterio se tomará de acuerdo con el estudio de ingeniería que se presente sobre el tramo determinado; esta altura es sobre el nivel de la carretera.

Según, el código de colores que presenta el Manual, indica que se usa el color verde para pintar los postes debido a que es un color que representa señales informativas.

FIGURA 70. Detalle de colocación para el sistema Lidar.



Fuente: **Manual centroamericano de dispositivos uniformes para el control del tránsito.**

5.3.2.2 ÁNGULO DE COLOCACIÓN

El sistema Lidar necesita un ángulo efectivo para realizar el monitoreo de la velocidad de los vehículos y un ángulo efectivo para visualizar la luz intermitente. De cierta manera estos dos ángulos son diferentes.

El monitoreo de la velocidad lo realiza mediante un láser con frecuencia óptica, y una de sus características es la directividad; o sea, que se desplaza en línea directa, siendo la altura y la distancia factores para determinar un ángulo de operación. La distancia donde debe de realizar el monitoreo debe ser especificado por un estudio de ingeniería que se realice al tramo específico.

El ángulo para visualizarse la luz intermitente generalmente debe ser colocada formando un ángulo recto con respecto a la dirección del flujo vehicular al que se transmite su mensaje. Pero cuando se afecta la luz intermitente por refracción, por ejemplo, las reflexiones del sol que se produce en el windshield (vidrio delantero del vehículo) logra disminuir la irradiación de la luz intermitente, por tanto debe de cambiar este ángulo para poder transmitir con exactitud el mensaje.

Es evidente que estos cambios corresponde al resultado que proponga el estudio de ingeniería.

5.3.3 DISEÑO DE LA LUZ INTERMITENTE

El diseño de la luz intermitente tiene la misma forma física que la de un semáforo, solo que cuenta con una sola luz o más, del mismo color, si el estudio de tránsito lo requiera.

Este se compone de una serie de elementos físicos, como la cabeza, soportes, cara, lentes y visera.

5.3.3.1 CABEZA

Es la armadura que contiene la parte visible del semáforo intermitente. La cara esta orientada hacia la visualización del carril correspondiente.

5.3.3.2 SOPORTES

Son las estructuras que se usan para sujetar la cabeza del semáforo y tienen como función situar los elementos luminosos del semáforo en la posición donde el conductor y el peatón tengan la mejor visibilidad y puedan observar las indicaciones.

5.3.3.3 CARA

Es la unidad óptica del semáforo intermitente, se compone de un lente, reflector, bombilla o LED'S, y que están orientadas para una visualización óptima del mensaje que se esta presentando. Existen dos diámetros nominales, el de 20 cm. y el de 30 cm., siendo el ultimo el más usado porque posee mayor área de iluminación.

Bajo el código de colores que representa el Manual indica que el rojo con destellos intermitentes se refiere a los conductores que deben hacer un alto o maniobra crítica.

5.3.3.4 LENTE

Es la parte de la unidad óptica que por refracción dirige la luz proveniente de la lámpara o LED'S y de su reflector en la dirección deseada. Todos los lentes de los semáforos para control de vehículos deberán ser de forma circular.

Junto a la unidad óptica se acopla un lente de 30 cm. de diámetro, esto es aconsejable cuando hay riesgo de que el semáforo pueda pasar inadvertido por el conductor, ya que proporcionan un importante aumento de visibilidad para el semáforo. Los diámetros de la parte visible del lente deberán ser como mínimo de 28.5 cm. y el diámetro exterior mínimo del lente será de 30.5 cm.

Se usa un lente de color cuando la unidad óptica usa una bombilla incandescente, pero cuando se ilumina por medio de LED'S usa un lente transparente debido a que un lente de color causa disminución de su intensidad.

La experiencia con este tamaño de lente, hasta ahora, ha sido relativamente limitada, pero ha tenido suficiente éxito para justificar su aceptación, al menos para sitios donde es necesario que el semáforo sea más llamativo.

5.3.3.4.1 VISIBILIDAD E ILUMINACIÓN DE LOS LENTES

Esto es esencial para obtener uniformidad en la posición de los lentes, para darle satisfactoria brillantez y para proporcionar la flexibilidad necesaria en las indicaciones requeridas. Cuando un lente de semáforo está iluminado y su imagen no está obstruida por algún objeto físico, las indicaciones deberán distinguirse claramente desde una distancia mínima de 400 metros en condiciones atmosféricas normales.

La cara del semáforo debe orientarse en un ángulo tal que su foco óptico sea de máxima efectividad hacia el tránsito que se aproxime en la dirección para la cual está prevista. Viseras, celosías, túneles y rebordes oscuros muchas veces mejoran la efectividad de un semáforo.

5.3.3.5 VISERA

Es un elemento que se coloca encima o alrededor de cada una de las unidades ópticas, para evitar que, a determinadas horas, los rayos del sol incidan sobre éstas y den la impresión de estar iluminadas, así como también para impedir que la señal emitida por el semáforo sea vista desde otros lugares distintos a aquel hacia el que está orientada.

5.3.4 MANTENIMIENTO DEL SEMAFORO DEL LIDAR

Un mantenimiento adecuado es muy importante para el funcionamiento eficiente del semáforo intermitente y para prolongar la vida útil de los mismos. Además, la autoridad y el respeto que un semáforo de esta naturaleza inspiran es debido únicamente a sus indicaciones precisas y exactas. Semáforos con indicaciones imprecisas no pueden imponer el respeto necesario. Por lo tanto, su mantenimiento es muy importante desde este punto de vista. Deben llevarse registros de mantenimiento detallados y analizarse a intervalos regulares.

Los registros de trabajo de mantenimiento, bien llevados, son útiles desde varios puntos de vista:

- Su análisis ayudará a determinar si el programa de trabajos de mantenimiento que se está siguiendo es satisfactorio o no.

- El análisis de los costos sirve para determinar los equipos más convenientes de adquirir en el futuro y para mejorar los procedimientos de conservación.
- Los registros de mantenimiento con frecuencia son de gran utilidad para las autoridades que intervienen en caso de accidentes.

Todos los elementos exteriores que ayuda al desarrollo eficiente del Lidar debe ser pintado por lo menos cada dos años (o con más frecuencia, si ello fuere necesario) para evitar corrosión y mantener la buena apariencia de los mismos.

Los postes, ménsulas, cajas y conductos visibles deberán pintarse en color verde mate y repintarse cada dos años como mínimo, o con mayor frecuencia si es necesario. Las partes internas de las viseras que se usan alrededor de las lentes deberán pintarse en negro mate para reducir la reflexión de la luz hacia los lados del semáforo.

6. ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DEL LIDAR EN LA MEDICIÓN DEL LÍMITE DE LA VELOCIDAD VEHÍCULAR EN TRAMOS PELIGROSOS SOBRE CARRETERAS EN GUATEMALA

En materia de transporte automotor, América Central ha sufrido una rápida evolución en el transcurso de las últimas décadas, y en la mayoría de los países la flota vehicular ha crecido a un ritmo acelerado.

En Guatemala en el año 2002 se registró 1,450,796 vehículos, actualmente esta cantidad de auto-motorización se ha incrementado y se refleja en los altos niveles de congestión con mayor enfoque en las carreteras arteriales importantes del país. Además, la mayor auto-motorización también ha provocado que los accidentes de tránsito se hayan colocado en los primeros lugares como causa de muertes violentas, particularmente en el transcurso de las últimas décadas.

El aumento del volumen de automotores (número de vehículos que pasan en un punto dado durante un período específico de tiempo) demanda un sistema de control eficiente de acuerdo a la densidad vehicular (la división del volumen con respecto a la velocidad media), para mitigar los problemas de accidentes de tránsito como consecuencia de la velocidad se hace uso de soluciones en infraestructura, señalización y nuevos dispositivos de control.

El Lidar puede ayudar en el control de la velocidad con que se conducen los automotores en los distintos puntos o tramos peligrosos que existen en la red vial del país.

Para la aplicación del Lidar, se debe analizar desde el punto que se ubicará y posteriormente la altura de su colocación, la operabilidad enmarca las ventajas y desventajas que proporciona, existiendo limitantes tanto del diseño como de elementos externos; y de esta manera ayudará a comprenderse el comportamiento real y práctico.

6.1 LOCALIZACIÓN DEL LIDAR SOBRE CARRETERAS EN GUATEMALA

Para determinar la localización y la ubicación del Lidar, primero se debe de determinar sobre que carretera cumplirá su función, para ello el Departamento de Tránsito ha realizado estudios sobre las carreteras más peligrosas del sistema vial. La carretera que se identifica como la más peligrosa es la carretera al Atlántico CA-9 Norte, concluyéndose en la localización de “siete” tramos críticos o puntos de alta peligrosidad sobre dicha carretera (ver capítulo 2), entonces, es sobre esta carretera en especial donde se requiere de un control específico de la velocidad sobre sus tramos peligrosos.

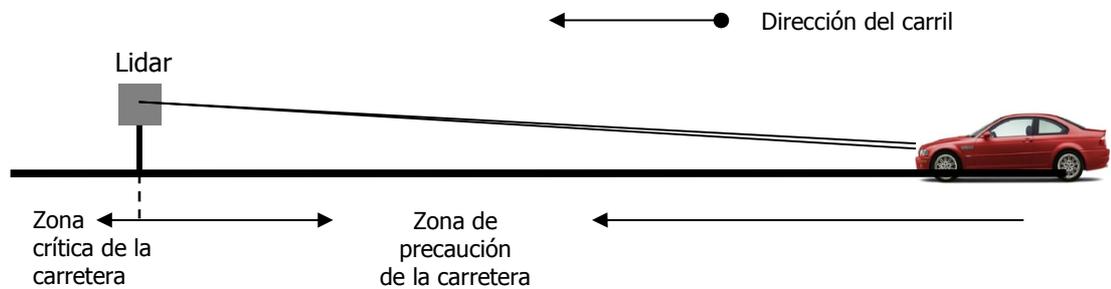
La ubicación debe ser preciso y exacta, esto es posteriormente a la localización del tramo, porque en ese punto se instalará el Lidar. Específicamente un tramo de carretera se constituye en dos zonas, la primera es conocida como la zona de precaución y la segunda es la zona peligrosa.

Por ejemplo, un tramo crítico es el de Aguascalientes que empieza con una zona de descendencia de la carretera hasta llegar a una curva cerrada y luego una pendiente de ascendencia, este intervalo es de 1.5 Km. aproximadamente iniciando desde el kilómetro 28 al 29.5 pero el punto crítico es el kilómetro 29, la orografía y forma geométrica de este tramo en particular es complicada porque el intervalo del tramo es prolongado y tiene consecuencia sobre la zona crítica.

Por tanto, es vital el estudio de ingeniería para que sea sólido el criterio de la ubicación del Lidar sobre el intervalo del tramo, porque no solo indica la posición física del poste donde se instalará sino que permite la máxima visibilidad para cumplir con eficiencia su función, o sea que, este estudio debe de considerar la mejor posición geométrica del Lidar contemplando la reglamentación que indica el “Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control del Tránsito”, el principal objetivo que debe de cumplir la ubicación es la de permitir un tiempo adecuado de percepción y para una posterior reacción; y esto debe ocurrir dentro de la zona de precaución que es antecesor de la zona crítica.

La posición del Lidar debe ser frontal al carril que debe de monitorear, y se ubicará al lado de la carretera, esto con el fin de no tener consecuencia en una obstrucción física como visual, en la figura 71 se muestra una vista lateral de la posición del Lidar sobre la carretera.

FIGURA 71. Vista lateral de la posición del Lidar.



6.2 OPERABILIDAD DEL LIDAR

El Lidar es un dispositivo de control de tráfico porque monitorea la velocidad de los vehículos que transitan sobre la carretera, indicando con una luz intermitente cuando excede la velocidad establecida por el tramo.

Los elementos básicos que hacen posible la operabilidad del Lidar para su funcionamiento adecuado se debe a los siguientes sistemas: transmisor, receptor, procesamiento y su visualizador; el sistema transmisor lo constituye un láser mientras, el receptor es un telescopio, el procesamiento se basa en circuitos electrónicos y el visualizador es una luz intermitente de color rojo con la estructura física de un semáforo .

La forma de operar se da de la siguiente manera:

1. Se debe de determinar el punto exacto donde dirigir la luz del láser sobre el carril y de esta manera cuando pasen los vehículos sea justo la zona superficial donde exista una intersección entre el área transversal del pulso de luz láser con el vehículo.

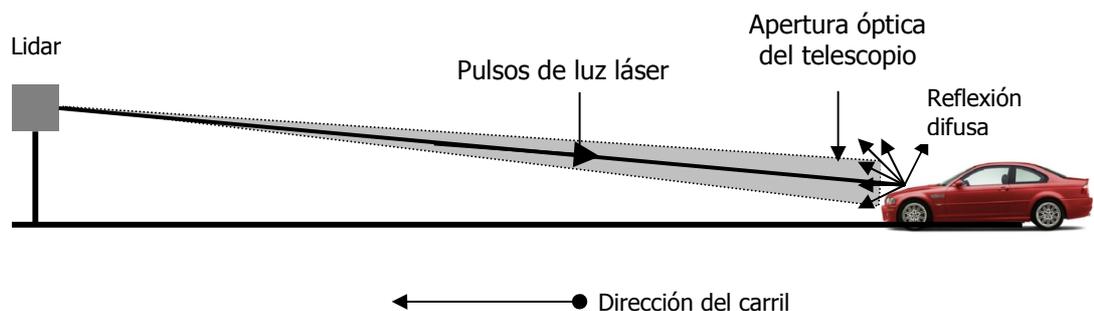
Esto se consigue mediante el enfoque del lente del telescopio, porque el sistema transmisor y el receptor se encuentra de una manera coaxial, y esto indica que el campo de vista del telescopio se comparte con el láser.

2. El transmisor es el encargado de emitir pulsos de luz láser que se ubica en la región del infrarrojo, esta se proyecta en línea recta hacia la parte frontal de los vehículos logrando cubrir un área de control limitada sobre su superficie y es la zona donde impacta los pulsos láser emitidos, estos pulsos son reflejados o dispersados en direcciones impredecibles, por tanto, esta superficie puede ser cooperante o no cooperante de acuerdo a la forma de la estructura frontal del vehículo. La cooperante indica que la superficie es altamente reflexiva, la reflexión que se ha analizado con anterioridad ha sido sobre una superficie ideal o especular; como un espejo, donde se cumple perfectamente la ley de la reflexión.

Una superficie no cooperante refleja difusamente los pulsos láser que emite el Lidar, esta reflexión difusa es causada por la forma estética de la fachada del vehículo, generalmente se constituye de metal y plástico, además existen varios tipos de fachadas de acuerdo al tipo de vehículo.

Este tipo de superficie indica que la zona donde golpea la radiación óptica no se ha preparado para reforzar el retorno reflexivo, la consecuencia es que emite los pulsos reflejados como un modelo hemisférico en varias direcciones como se representa en la figura 72.

FIGURA 72. Representación de la reflexión que ocurre sobre la superficie de los vehículos.



Prácticamente el Lidar es un sistema activo debido a que parte de la radiación que emite es la que recibe, y una ventaja que presenta es que necesita únicamente detectar un pulso de los reflejados para poder visualizarlo por medio de una luz intermitente que indica el exceso de velocidad limitada por el tramo de carretera, esta es la máxima información que presenta al usuario.

Los factores inconvenientes que puede proporcionar el entorno para el desenvolvimiento del Lidar son:

1. Tiene que existir vista directa entre el Lidar y los vehículos, debido a que la luz láser no puede atravesar objetos que obstruyan su trayecto hasta su objetivo, puede existir obstrucción directa o obstrucción por difracción.
 - Una obstrucción directa puede ser causado por las hojas, ramas de los árboles o por acciones vandálicas que obstruyan la lente del telescopio y esto tendría una acción nula en el monitoreo de la velocidad.

- Una obstrucción por difracción puede causar un bajo porcentaje de reflexión debido a la pérdida de la energía en el contenido del pulso de luz láser. El clima puede causar estas pérdidas, el Lidar está diseñado para operar bajo condiciones climáticas, pero, con una lluvia excesiva puede alterar su funcionamiento, la pérdida de energía que contenga la reflexión es debido por la refracción que pueda causar las gotas de lluvia.
 - También, el exceso de contaminación de la atmósfera como el polvo, vapor, humo proveniente de basureros clandestinos o de los vehículos, causan una pérdida por difracción en el trayecto.
2. El color del vehículo afecta la intensidad de la luz láser que retorna luego de la reflexión que ocurre sobre su superficie, los colores que se acercan al extremo del espectro visible como el color violeta tienen una capacidad alta de absorción de energía fotónica, el de mayor absorción es el color negro y también las superficies oxidadas. Por ejemplo, a 300 metros retorna un porcentaje del 60% de la luz láser sobre un vehículo blanco que es opuesto al 6% que retorna por un vehículo negro.
 3. A veces, una reflexión fuerte de la luz del sol puede saturar al sensor del receptor produciendo lecturas inválidas o erróneas, el Lidar está diseñado para operar bajo condiciones de la luz del día, por tanto, esto depende del ángulo y altura correcta de colocación. La luz láser es insensible a la luz del sol.

Los siguientes factores no afectan al Lidar:

1. Los cambios de la temperatura no afectan al Lidar, debido a que la luz del láser se propaga a la velocidad de la luz y es insensible a estos cambios.
2. El ángulo de medición puede orientarse a cualquier dirección, pero considerando el efecto coseno y las reflexiones del sol.
3. No depende de la iluminación del ambiente.

6.3 ERRORES TÉCNICOS Y OPERARIOS DE LIDAR

Los problemas del Lidar depende mucho de los errores técnicos que solapan con los errores operacionales cuando esta operando.

6.3.1 LOS ERRORES OPERACIONALES

Como su nombre indica este tipo de error depende de la operación o manipulación del Lidar, incluyendo una adecuada manutención. Estos errores son los más frecuentes debido a la capacidad humana que se relacione constantemente con el Lidar, entre los que se menciona:

1. La calibración del Lidar es muy importante para obtener la velocidad real que se está monitoreando, debido a que el Lidar es un sistema coaxial es muy importante la alineación para conseguir la misma dirección tanto del telescopio como el láser sobre el mismo punto de la superficie de los vehículos, o sea, que apunten en la misma dirección y de esta manera con un solo pulso dispersado detectado es suficiente.

2. Una mala ubicación y colocación del Lidar puede causar un error en el rango de medición, estos son factores externos muy esenciales para su operación.
3. Es necesario mantener la calidad de los pulsos de luz láser emitidos, de antemano se debe de conocer si el diámetro transversal de la luz se mantiene como fue diseñado.
4. La capacidad de la energía que alimentan al Lidar es muy importante, se debe de contemplar baterías, aunque este alimentado con voltaje alterno de la red del sistema eléctrico siempre necesita un soporte por medio de estos acumuladores, en caso contrario el tiempo de vida para mantener una carga efectiva de la batería es esencial, para su reposición o carga.
5. Debe existir un chequeo semestral, en caso de que su alimentación de energía no sea por medio de una batería, porque lo más importante es que sea capaz de medir la velocidad de manera eficiente y representarla a los conductores. Es necesario un chequeo de la circuitería interior, aunque no lo requiera los componentes debido a su tiempo de vida prolongada, es necesario que las frecuencias de operación sea estable, porque un 1% de error en el oscilador iguala a un 20 % de error en la proporción en la lectura de la velocidad, una limpieza de manera general requiere anualmente en el caso del módulo visualizador, lo más importante es que esté calibrado la velocidad que proporciona y esto se puede inspeccionar de manera externa simplemente comparándolo a otra unidad conocida, este es el método comúnmente usado.

6.3.2 LOS ERRORES TÉCNICOS

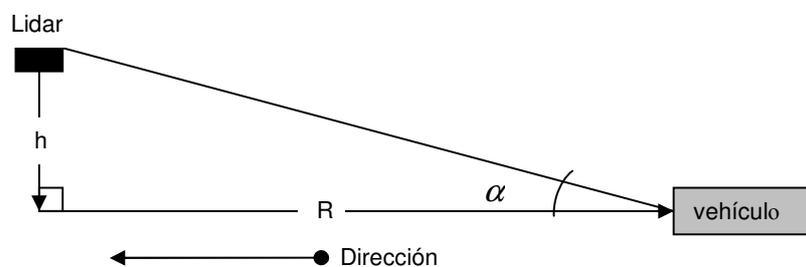
Estos errores depende del tipo de diseño, y generalmente se representa como incerteza del Lidar en la medición de la velocidad real con que transita el vehículo a monitorear, los errores comunes que ocurren son los siguientes:

6.3.2.1 EFECTO COSENO

Esto prevalece cuando la luz láser del Lidar no se encuentra alineado perpendicularmente hacia el sentido de viaje del vehículo cuando está monitoreando la velocidad. Un ángulo se crea entre el haz láser y la dirección del vehículo, esto depende de la altura donde se posiciona el Lidar. Este ángulo proporciona un valor diferente de la velocidad real del automotor que se detecta; el ángulo se conoce como alfa (α) y es el causante del error conocido como efecto coseno que se representa en la figura 73.

La distancia real que esta midiendo el Lidar es diferente a la distancia de la dirección del viaje, si el trayecto de la carretera horizontal (R) y la altura del Lidar (h) entonces formamos un triangulo rectángulo; por trigonometría, estaría midiendo la velocidad sobre la hipotenusa.

FIGURA 73. Representación del efecto coseno en la medición de la velocidad.



Fuente: <http://copradar.com/preview/chapt1/ch1d1>

Donde:

- h es la altura del Lidar
- R es el rango de la medición
- $(\text{alfa}) \alpha = \text{tg}^{-1}(d / R)$

El ángulo alfa debe ser pequeño para que el Lidar mida la velocidad con precisión y el efecto coseno sea tolerable, de lo contrario afecta significativamente la velocidad que se monitorea, por tanto la velocidad que detecta el Lidar es menor que la velocidad real y se representa en la siguiente ecuación:

$$\text{Velocidad que mide el Lidar} = \text{velocidad del vehículo} * \cos(\text{alfa}) \quad (6.1)$$

Se observa que la velocidad que mide el Lidar es directamente proporcional al coseno del ángulo, mientras más grande es el ángulo más pequeño es el valor de la velocidad. Para minimizar los errores de efecto coseno el Lidar se debe de ubicar muy cerca de la orilla de la carretera respetando las normas del reglamento sobre la señalización vial y lo más importante es la altura eficiente donde se coloque el Lidar.

La siguiente tabla muestra en que proporciones afecta esta ángulo a la velocidad real.

TABLA VI. Resultado de la velocidad con diversos ángulos.

ángulo alfa	velocidad real			
	30	40	50	60
0	30	40	50	60
1	29.99	39.99	49.99	59.99
3	29.96	39.94	49.93	59.92
5	29.89	39.85	49.81	59.77
10	29.54	39.39	49.24	59.09
15	28.98	38.64	48.3	57.94
20	28.19	37.59	46.99	56.38
30	25.96	34.64	43.3	51.96
45	21.21	28.28	35.36	42.43
60	15	20	25	30
90	0	0	0	0
	Velocidades que detecta el Lidar por efecto coseno.			

Fuente: http://www.cjtc.state.wa.us/classes/Lidar_Student_Manual.pdf

Como puede verse en esta tabla que el efecto del ángulo es despreciable hasta que se excedan los 10 grados hacia abajo de la vista horizontal y dirigiéndose hacia el vehículo a monitorear.

6.3.2.2 ERROR DE BARRIDO

El error de barrido es otro posible error que puede manifestar el Lidar. Este problema ocurre cuando el Lidar se mueva ya sea por efecto de viento o en una prueba manual durante su funcionamiento, el láser del Lidar está apuntando sobre una posición fija de la superficie del vehículo mientras realiza la medición en un tiempo muy pequeño, pero si en ese instante se mueve a otra porción de la superficie del vehículo, el cambio da la impresión de una distancia mayor o menor del rango de medición y produce un cambio de la lectura de velocidad, ya sea más alta o más baja.

Cuando el cambio sobre la superficie del vehículo ocurre cuando se monitorea hacia atrás, el Lidar entiende como si el láser hubiera realizado un barrido hacia la parte trasera del vehículo que está en movimiento, entonces la distancia de medición aumentará y la velocidad se leerá mayor. Un barrido hacia el frente del vehículo disminuiría la distancia y causaría una lectura baja de la velocidad.

Por ejemplo, cuando está monitoreando la velocidad se apunta sobre la placa del vehículo, y si por accidente se mueve el láser hacia el parabrisas, el cambio súbito en la distancia proporciona un error en el monitoreo de la velocidad, debido a que tanto el vehículo está en movimiento como el láser del Lidar.

Las fabricaciones del Lidar admiten la posibilidad de una lectura errónea por este barrido, consecuencia ya sea de un viento debido a que este flojo su anclaje o bien la manipulación de la misma mientras se realiza el monitoreo, pero este defecto es raro cuando el Lidar está posicionado de una manera estacionaria.

6.3.2.3 ERROR DE LA REFLEXIÓN

La reflexión puede dar lugar también a una lectura errónea. Frecuentemente cuando la temperatura del día es muy caliente, sobre todo en la región del sur y oriente donde la atmósfera no siempre mantiene fresco el asfalto de la carretera, este puede comportarse como un espejo y máximo dentro del rango de monitoreo, la luz láser se refleja del vehículo luego a la imagen del espejo creada por la condición térmica de la carretera, y esto se dirige hacia la apertura óptica del telescopio del Lidar, es evidente que es un pequeño porcentaje que proviene de esta segunda reflexión que a veces es capaz de proporcionar una lectura errónea del monitoreo de la velocidad.

Esta condición es momentánea y solo perdura en la intersección de la frente del vehículo con la luz láser. El mismo efecto podría ocurrir en los días lluviosos cuando hay agua acumulada sobre el asfalto.

6.3.2.4 ERROR FANTASMA

Este error es resultado de diversas radiaciones que existen en el entorno del Lidar, desde la presencia de líneas de alto voltaje, transmisiones de microondas ó transmisiones telefónicas móviles. Hay evidencia de que puede afectar al Lidar no de forma directa sino a través de la circuiteria electrónica, pero esto es muy raro que ocurra pero debe de contemplarse, para evitarlo se coloca blindaje al equipo.

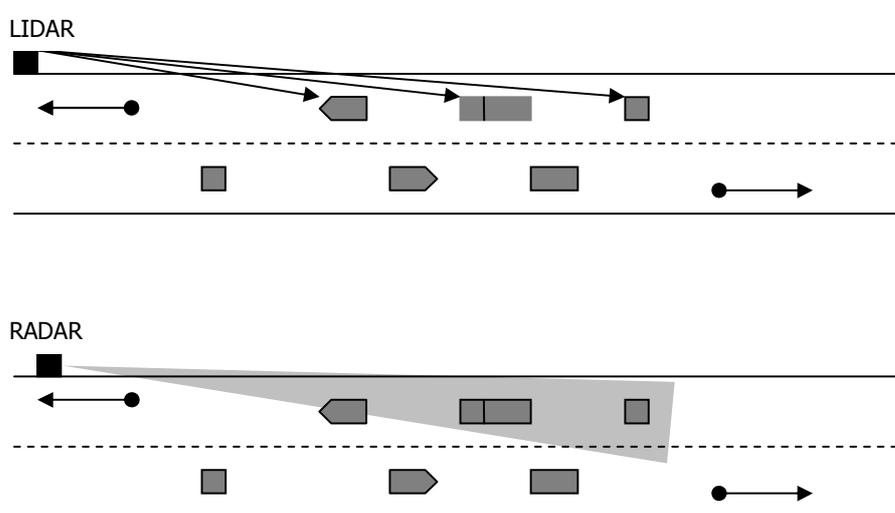
6.4 VENTAJA Y DESVENTAJAS DEL LIDAR

6.4.1 VENTAJAS

1. El Lidar emite pulsos de luz láser y una de las características que posee es su baja divergencia, cuando se propaga se evita el efecto cono mediante la ayuda de lentes colimadores, el láser tiene como característica la concentración de la energía fotónica dentro de un reducido área transversal circular que se ubica dentro de un rango de uno a diez centímetros aproximadamente, esta es una ventaja para poder seleccionar en forma directa al automotor infractor dentro del tráfico pesado.

A comparación del radar es diferente en el lóbulo principal de la radiación de microonda que tiene mayor divergencia. Esta comparación se muestra en la figura 74, el Lidar puede detectar la velocidad de cada automóvil mientras el otro no lo permite.

FIGURA 74. **Comparación de la radiación del Lidar con respecto al radar.**



2. El Lidar es menos susceptible a la interferencia, porque opera en una frecuencia óptica y las frecuencias tanto de aficionados como comerciales se ubican en la región de Radio frecuencia; y son las causantes de interferencia si operará en esta región.
3. El funcionamiento del Lidar es indetectable mediante circuitos sintonizadores, y los conductores pueden ser sorprendidos cuando visualiza la luz intermitente. No puede anularse el efecto mediante circuitos osciladores que causan interferencia.

4. El Lidar monitorea la velocidad en menos de 1/3 de segundo, porque solo necesita un pulso reflejado que contenga las características necesarias para realizar el monitoreo, esto vuelve al Lidar en un sistema eficiente para que el usuario tome su precaución.

6.4.2 DESVENTAJAS

1. La lluvia y las partículas como vapor, polvo, humo, aerosoles y composición química que contiene la atmósfera puede limitar el rango de funcionamiento del Lidar.
2. Los colores como el negro, azul y violeta que conforma la superficie de los vehículos son pocos reflectores de la luz láser. Un retorno de los pulsos con una baja irradiación causa que la responsividad del sensor de luz láser sea indetectable y que el Lidar no logre desplegar un resultado.
3. Requiere un alineamiento preciso entre el láser y el telescopio, esto es por la configuración coaxial, para que el Lidar logre detectar la velocidad con un solo pulso reflejado.
4. La extrema cantidad de luz solar puede dañar al Lidar, puede penetrar por reflexión al telescopio y las radiaciones ópticas no deseadas como la ultravioleta que aunque sean filtrados por lentes estos interfieren con el funcionamiento del sensor que esta ubicado para la región del infrarrojo.

CONCLUSIONES

1. La velocidad es un elemento esencial en la conducción de un vehículo, pero su exceso disminuye la visibilidad del conductor transformándose en un menor tiempo de reacción sobre la carretera para evitar accidentes.
2. El Lidar, como cualquier diseño electrónico, se debe al conocimiento científico, esto garantiza un diseño muy eficiente para desenvolverse en el campo de operación.
3. El Lidar es un dispositivo opto-electrónico; se basa en el principio físico de detectar y muestrear la velocidad, proporcionando su veredicto por medio de un mensaje sencillo y claro.
4. La aplicación del Lidar se complementa con el “Manual centroamericano de dispositivos uniformes para el control del tránsito”, que indica por medio de normas y reglas cómo debe realizarse el montaje.
5. El Lidar es una propuesta efectiva, pues a pesar de sus limitaciones, es un sistema que tiene mayor capacidad, actualmente, que otros sistemas.

RECOMENDACIONES

1. Es necesario que los conductores tengan conciencia, responsabilidad y respeto por las normas de seguridad vial. También, las autoridades correspondientes deben implementar la aplicación de sanciones para establecer un orden disciplinario sobre las carreteras importantes del país.
2. Es necesario realizar estudios de ingeniería en cada tramo de la carretera CA-9 Norte, para detallar las condiciones exactas y precisas sobre la necesidad que presenta cada tramo, previo a su instalación.
3. Es imprescindible que todo el personal tenga preparación y capacitación previo al montaje del Lidar, para obtener la óptima ubicación, colocación y mantenimiento.
4. Se debe realizar un chequeo constante, documentándose con informes sobre su funcionamiento.
5. Es importante regirse al “Manual centroamericano de dispositivos uniformes para el control del tránsito”, aplicando cada una de sus disposiciones para garantizar la uniformidad de su funcionamiento.

6. Es conveniente que Guatemala se actualice constantemente en políticas de tránsito, normadas por entidades internacionales, lo cual contribuye a garantizar la seguridad vial a la población usuaria, siendo el Lidar una propuesta moderna de aplicación eficaz.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Manual centroamericano de dispositivo uniformes para el control del tránsito.** Acuerdo Centro Americano sobre señales uniformes. SIECA 2000. Dirección general de Transito Guatemala. Departamento de Ingeniería de Transito.
2. HALLIDAY/RESNICK/KRANE. **Física**, Cuarta edición. Tomo 1, tomo2.
3. HUGH D. YOUNG, **Óptica y física moderna**, 1971 Mcgraw-Hill.
4. JACOB MILLMAN, CHRISTOS C, HALKIAS, **Electrónica integrada**, 1ra. reimpresión octubre 1992.
5. JOSE LUIS HURTADO MONTENEGRO, **Aplicación del radar doppler al sistema de navegación aérea** Tesis Usac. Esc. Mec. Elec.
6. MARCUS ZAHN. **Teoría electromagnética**. Universidad de florida. Editorial interamericana.
7. O. S. HEAVENS. R. W. DITCHBURN. **Insight into optics**, reimpresso en agosto 1993.
8. PAUL TIPPENS. **Física, Concepto y aplicaciones**. McGraw Hill.
9. ROBERT COUGHLIN FREDERICK DRISCOLL. **Amplificadores operacionales. Y circuitos integrados lineales**. 5ta. edición
10. SAMUEL L. MARSHALL, **Láser: Tecnología y aplicaciones**, capítulo 5, editorial reverté España 1972.
11. WILLIAM H. HAYT, **Teoría electromagnética**, Quinta edición
12. Boselec@boselec.com
13. webadmin@www.madsci.org
14. copradar.com

15. <http://www.massa.com/>
16. Detectoresderadar.com
17. <http://www.grc.nasa.gov/www/K-12>
18. Ing_electronico@hotmail.com
19. <http://copradar.com/preview/chapt6/ch6d1.html>
20. <http://www.ee.ucr.edu/~dgiles/sendesign03/lidar.pdf>
21. <http://www.u.arizona.edu/~dmoss/MPLEnergyMeasurement.pdf>
22. <http://www.seguridadvial.org.ar/notidesta.htm#inicio>
23. http://apuntes.rincondelvago.com/trabajos_global/telecomunicaciones/5/
24. <http://www.1-radar-laser-jamer-detectors.com/index.html>
25. www.rodrico.com
26. <http://www.info-ab.uclm.es/labelec/solar/Componentes/OPTOELECTRONICA.html#1%F1>
27. <http://www.qrg.northwestern.edu/projects/vss/docs/Communications/2-how-does-reflection-affect-radio-waves.html>
28. http://www.astrocappella.com/activities/dopp_lp.html
29. <http://members.aol.com/copradar/index>
30. www.dot.gov
31. www.fhwa.gov
32. www.nhtsa.dot.gov
33. <http://cord.org/cm/content1>