



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

32  
2el.

SEÑALES INFRARROJAS EN LA SOLUCION  
DE SISTEMAS CONTROLADOS EN FORMA  
REMOTA

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
(AREA ELECTRICA-ELECTRONICA)  
P R E S E N T A:  
LEONARDO NAHUN CANSECO RODRIGUEZ

DIRECTOR DE TESIS:  
ING. FELIPE RAUDA GARCIA

CIUDAD DE MÉXICO.

JUNIO DE 1997

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# SEÑALES INFRARROJAS EN LA SOLUCION DE SISTEMAS CONTROLADOS EN FORMA REMOTA

<b>Introducción . . . . .</b>	<b>1</b>
-------------------------------	----------

## **Antecedentes**

1.1 <i>Naturaleza de la radiación . . . . .</i>	3
1.2 <i>Aspecto ondulatorio y corpúscular . . . . .</i>	5
1.3 <i>El espectro de frecuencias . . . . .</i>	10

## **Significado de la tecnología infrarroja**

2.1 <i>Utilización de la luz y emisores de luz . . . . .</i>	20
2.2 <i>Sistemas infrarrojos y traductores . . . . .</i>	22
2.3 <i>Frecuencias de trabajo . . . . .</i>	27

## **Origen y características de la radiación infrarroja**

3.1 <i>Leyes de la radiación . . . . .</i>	28
3.2 <i>Fuentes térmicas y no térmicas . . . . .</i>	32

## **Detectores de infrarrojo**

4.1 <i>Fundamentos de la detección infrarroja . . . . .</i>	38
4.2 <i>Los fotodetectores . . . . .</i>	40
4.3 <i>características electro ópticas de los fotodiodos . . . . .</i>	41
4.4 <i>Características electro ópticas de los fototransistores . . . . .</i>	42
4.5 <i>La sensibilidad del ojo Humano a las radiaciones infrarrojas . . . . .</i>	44

<i>4.6 Detectores térmicos . . . . .</i>	<i>.44</i>
--	------------

**Materiales y sistemas ópticos de infrarrojo**

<i>5.1 Los sistemas ópticos . . . . .</i>	<i>.48</i>
---	------------

<i>5.2 Propiedades de los sólidos . . . . .</i>	<i>.52</i>
---	------------

<i>5.3 Materiales. . . . .</i>	<i>.56</i>
--------------------------------	------------

**Diseño para un control de un sistema en forma remota**

<i>6.1 Planteamiento del problema. . . . .</i>	<i>.60</i>
--	------------

<i>6.2 Requisitos de operación. . . . .</i>	<i>.61</i>
---	------------

<i>6.3 Herramientas para el proyecto. . . . .</i>	<i>.62</i>
---	------------

<i>6.4 Simulación. . . . .</i>	<i>.63</i>
--------------------------------	------------

**Pruebas y evaluación**

<i>7.1 Medición del parámetro del detector y del transmisor. . . . .</i>	<i>.81</i>
--	------------

<i>7.2 Medición de características finales. . . . .</i>	<i>.81</i>
---	------------

<b>Conclusiones. . . . .</b>	<b>85</b>
------------------------------	-----------

<b>Apéndice. . . . .</b>	<b>87</b>
--------------------------	-----------

<b>Bibliografía. . . . .</b>	<b>107</b>
------------------------------	------------

## INTRODUCCIÓN

La radiación infrarroja hoy no es quizá tan importante como lo fue en su época de descubrimiento. el señor William Herschel fue el que descubrió esta radiación invisible para el ojo humano utilizando el experimento del prisma de Newton. Dicho experimento consiste en pasar a través de este prisma un rayo de luz para obtener un espectro de la luz solar; este señor buscaba los efectos térmicos y no el de la distribución de la intensidad visible en el espectro. Durante bastante tiempo, la actividad en la investigación de la espectroscopia fue dedicada al campo en el infrarrojo. Esta radiación resulta una herramienta tan satisfactoria para la solución de algunos problemas de los químicos, que ellos resultan ser los mayores usuarios de la espectroscopia infrarroja.

No tardó en anunciarse la utilización de esta radiación como vehículo de información que comprende la transmisión de mucha información por medio de rayos invisibles. Toda esta tecnología fue desarrollada en su principio por las organizaciones militares con fines bélicos; esto ocurrió antes de que finalizara la primera guerra mundial. También esta radiación, puede servir para estudiar la composición o constitución de la materia, así como las brechas de energía en semiconductores; estos casos mencionados son ejemplos típicos del uso del infrarrojo en la física del estado sólido. Con esto, se ve claro que el hombre adquiere un mejor conocimiento de la naturaleza y con esto se trata de comprender aun mejor la interacción de la radiación con la materia, con este entendimiento se pudo crear una nueva fuente de radiación infrarroja, conocida como el láser. Esta fuente fue concebida y realizada prácticamente con la utilización y aceptación del comportamiento de la radiación en los dos estados en los que se encuentra en la naturaleza, ya que ésta se encuentra en la naturaleza en una infinita interacción con sus dos estados de comportamiento básicos, hablando de sus dos existentes formas, radiación electromagnética y radiación cuántica. Concluyendo que:

La radiación infrarroja es una forma de radiación electromagnética y presenta otras formas hablando en el sentido de la mecánica cuántica.

En un principio Herschel descubrió la radiación infrarroja en su manera calorífica, poniendo termómetros muy sensibles a todo lo largo del espectro solar. el encuentro que la temperatura incrementa en el extremo lejano del rojo y aun más allá en el extremo lejano del rojo visible, no tenía claro la naturaleza de lo que estaba pasando; si la luz y los rayos térmicos eran de la misma clase o era un nuevo tipo de radiación. A.H.L. Fizeau y J.B.L. Foucault determinaron realmente la longitud de onda de las ondas que se encuentran en el extremo cercano al infrarrojo, por franjas de interferencia. Así se aceptó de modo general la identidad del infrarrojo con la luz. Maxwell predijo teóricamente la existencia de ondas electromagnéticas y propuso el reconocimiento de la identidad de estas ondas con las ondas de la luz. Hertz, fue el que produjo ondas electromagnéticas y confirmó que se propagaban

con la misma rapidez con la que se propaga la luz, y que poseían las mismas propiedades de polarización que tiene la luz. Por último Nichols y J.D. Tear, por medio de un oscilador de chispa tamaño miniatura, similar al que utilizó Hertz, lograron generar ondas electromagnéticas en el extremo lejano del infrarrojo de *220 micras* de longitud de onda con lo cual ya no hay duda que la naturaleza infrarroja es también electromagnética. Con todo esto, no existe en la teoría electromagnética una ley de validez general para describir la distribución espectral de la energía radiada para un cuerpo ideal; este cuerpo ideal se conoce como *cuerpo negro* solo tienen algún éxito parcial las leyes existentes, pues con la forma experimental hay discordancia con la ley. Planck halló que solo era posible predecir la distribución de la energía entre los osciladores elementales que componen el cuerpo de radiación térmica, solo si se abandona el concepto de que la energía es divisible en modo continuo. Su postulado, de un intercambio discontinuo, cuantizado de energía radiante fue la única manera de llegar a una teoría correcta para que hubiera una concordancia con la evidencia experimental.

La ley de radiación que demostró tal comportamiento, parece ser que se derivó intuitivamente con el uso explícito del concepto de cuanto. Enunciando que los estados de energía de los osciladores elementales solo pueden variar por múltiplos enteros de cuantos elementales; los cuantos de energía deben ser proporcionales con la frecuencia. Planck determinó correctamente la magnitud de la constante de proporcionalidad que ahora se conoce como constante de Planck. Esta ley tuvo un largo alcance, propiciando a la investigación y desarrollo de la mecánica cuántica; Einstein fue el que utilizó de manera muy importante el concepto cuántico para su teoría del efecto fotoeléctrico, y estableció la idea de cuantos de luz como una forma moderna de los corpusculos de la luz de Newton. Bohr introdujo la teoría cuántica de el espectro atómico, que propició a la fundación de una nueva rama de física en la investigación, conocida como mecánica cuántica. La radiación de acuerdo con su naturaleza se comporta de maneras muy distintas teniendo varias formas; estas formas dependerán de la interacción de la radiación con la materia. Considerándose a veces como ondas y otras como partículas. Los físicos han aprendido a aceptar la naturaleza dual de la radiación como uno de los sucesos de la vida.

## Capítulo 1

### Antecedentes

#### 1.1.- Naturaleza de la radiación.

Entendiendo la importancia que tiene la radiación en sus diferentes formas y tratando de ir comprendiendo su naturaleza y su energía que consigo trae, siempre ha sido uno de los retos más importantes para las mentes de los científicos humanos; el poder explicar uno de los temas que siempre ha tenido gran controversia en todos los tiempos, es decir explicar el comportamiento de la radiación en sus distintas formas posibles, todo esto es para entender mejor las radiaciones presentes en la naturaleza. Para estudiar los espectros, los científicos usan los espectroscopios, son instrumentos que forman espectros de luz cuando esta atraviesa dicho instrumento, y para llevar a cabo esto utiliza el concepto de la dispersión de la luz, de cualquier modo en que se origine. La separación de la luz en sus diferentes componentes de colores, ordenados de acuerdo con su longitud de onda, se llama *dispersión*. Al utilizar el espectroscopio para observar las diferentes fuentes luminosas, se descubre que los espectros varían en gran medida. El espectro de la luz solar parece continuo teniendo un mayor brillo en los verdes y azules, en comparación con el espectro de una lámpara de wolframio que resulta ser continuo, teniendo en el extremo rojo mucho más brillo que en el extremo violeta. Si se observa el espectro de una lámpara de vapor de mercurio, de neon o algún otro gas, se encuentra que el espectro consiste en unas pocas líneas (*rayas*) brillantes. Los espectros de emisión se producen por sustancias que emiten luz, los espectros antes mencionados se les conoce como espectros de emisión, excepto el del sol, estos se forman por la luz emitida por sus propios cuerpos luminosos, para poder entender la diferencia de un espectro continuo de emisión y la de fuentes de espectros no continuos, existe en la naturaleza tres clases de emisión de espectros.

*Espectros continuos.*- Estos se producen por sólidos y líquidos incandescentes o por gases incandescentes a una alta presión, cada sustancia presenta más brillo en alguna región de su espectro de manera particular; si se ha observado una varilla de hierro cuando se calienta, lo muy factible que ocurra, es que se note un cambio de color, desde el rojo mate al anaranjado para finalmente llegar hasta el blanco, para cuando esta se encuentra extremadamente caliente. Ya que la emisión del color azul es tan intensa que llega a ser de la misma magnitud de intensidad de los demás colores de la luz. Debido a que la intensidad relativa de cada uno de los colores del espectro, cambia con la temperatura, el estudio del espectro de una estrella, por ejemplo, revelará su temperatura, aunque el cuerpo celeste se encuentre a miles de años luz de distancia.

*Espectros de líneas brillantes.*- Estos se producen por los átomos de los gases incandescentes son producidos por un elemento en particular y que son muy distintos todos entre ellos mismos. Un

espectro de líneas brillantes es la "forma" de los átomos de un elemento. Si un químico desea conocer los elementos que están presentes en un trozo de algún material, lo vaporiza en una llama, o lo excita en un arco eléctrico para estudiar su espectro luminoso. Si el observador ve una línea amarilla con una longitud de onda de  $579 \text{ m}\mu$ , comprueba que está presente el mercurio.

*Espectros de bandas.* - Estos se producen por las moléculas de los gases incandescentes. Cuando un espectroscopio es capaz de obtener una dispersión muy grande de la luz observada, las bandas se convierten en muchas líneas brillantes muy próximas. Los químicos pueden usar los espectros de bandas para identificar compuestos químicos.

El espectro del sol es diferente de los otros, presenta líneas oscuras, es decir que es un espectro de absorción. El sol se encuentra a temperaturas extremadamente muy calientes, tan calientes, que se encuentra compuesto principalmente de gases; es tan grande que sin ninguna duda los gases se encuentran a una presión extremadamente grande así este cuerpo de esta clase debe transmitir un espectro continuo de emisión, como es aproximadamente el del sol. Con esto quiero decir, que al sol le faltan ciertas longitudes de onda, estas aparecen como líneas oscuras conocidas como *líneas de Fraunhofer*, quien fue el que estudió estas líneas encontrando que existen cientos de ellas, encuentro que en la región del amarillo un par de líneas oscuras tenían la misma longitud de onda que las líneas amarillas del sodio. Más tarde Kirchhoff, colocó una llama de sodio entre el sólido incandescente y el prisma de espectroscopio, y cuando dicha llama era más brillante que el sólido vio un espectro continuo con las líneas amarillas del sodio más brillantes que los colores del fondo. Cuando el sólido incandescente brillaba más que la llama de sodio, observo un espectro continuo con líneas oscuras donde habían estado líneas brillantes del sodio. Kirchhoff llegó a la conclusión de que el sodio en su llama había absorbido la misma clase de luz que comúnmente emite. Lo que ocurre en este fenómeno es una especie de resonancia. Por ejemplo, esto ocurre en los diapasones. Si dos diapasones tienen la misma frecuencia natural y se hace sonar uno de ellos, se aprecia que el otro se pone en vibración al absorber energía del primero. Para un experimento imaginario, en donde se posee un oído extraordinariamente agudo. Entonces si uno se colocara de modo en que los diapasones estuvieran alineados entre sí, como en la figura 1-1, se encontraría que llega menos sonido al oído, que si se situara lateralmente, porque la energía sonora absorbida por el segundo diapason y después es emitida por él, se irradia en todas direcciones (*no solo hacia el observador*), dejando una especie de línea oscura en el espacio donde el sonido es menos intenso. Aparentemente esto es lo que sucede con la luz, la línea oscura no es perfectamente negra, sino que representa un lugar en el espectro donde hay menos luz que en el resto. Siempre que la luz de una fuente de espectro continuo atraviese un vapor más frío, los átomos de este absorberán la longitud de onda que ellos emiten de ordinario. De acuerdo con esto, el espectro de líneas oscuras se llama *espectro de absorción*.

## 1.2.- Aspecto undulatorio y corpúscular.

Al calentar un trozo de hierro en una flama, se encontrara que primero reluce en ella el color rojo obscuro, despues en rojo naranja mas brillante, luego en amarillo y finalmente en blanco. Ya he comentado que el espectro de la luz es continuo, pero su parte mas brillante se corre desde el rojo hacia el violeta, al elevarse la temperatura. La intensidad de la luz puede medirse en cada parte del espectro y trazarse una grafica, como la de la figura 1-2, aqui se tiene que aclarar que el espectro no termina en los bordes de la zona visible, sino que se extiende hacia las zonas del infrarrojo y ultravioleta. Algunas leyes tratan de describir el comportamiento de estas curvas de radiacion. La ley de Rayleigh-Jeans, concuerda muy bien su comportamiento para las longitudes de onda largas, la ecuacion de Wein, casi era aplicable, pero sin ninguna buena razon para ello. No se habia encontrado ninguna ecuacion que se aplicara al comportamiento que tiene la distribucion de energia en un espectro continuo (*son emitidos por solidos incandescentes*). Fue cuando el aleman Max Planck estudio las dos ecuaciones realizando algunos cambios para unir las entre si, y con ello llego a una mejor ecuacion. Los cambios que realizo fue poner en duda las hipotesis que habian hecho los demas: pensando en un diapason muy grande, en lugar de un oscilador atomico de cuerpo caliente, este diapason puede vibrar con cierta energia que llamaremos  $\epsilon$ . Pegandolo cada vez mas fuerte a este diapason seguramente vibrara cada vez mas, suponiendo que existe mucha habilidad para pegarle o comunicarle cualquier cantidad de energia, es razonable pensar que este pueda recibir cualquier cantidad de energia deseada, por ejemplo, probablemente se pueda entregar  $1.5 \epsilon$  o  $1.00111233 \epsilon$ . ¿Podra comunicarsele al diapason cualquiera de estas cantidades de energia? Conforme este diapason vibra emite ondas sonoras y consigo pierde energia, el experimento imaginario con el diapason incluye dos suposiciones de la fisica clasica:

- 1.- Un oscilador puede ganar o perder cualquier fraccion de su energia.
- 2.- Un oscilador puede tener cualquier cantidad de energia.

Estas dos afirmaciones que suenan muy razonables fueron las que Planck puso en duda. Al descartarlas y sustituirlas por nuevas suposiciones, dedujo la ecuacion para la intensidad luminosa para el espectro continuo. Sus nuevas hipotesis fueron:

- 1.- Un oscilador no puede tener cualquier cantidad de energia, puede tener energia solo en porciones paquetes de ciertos tamaño. El paquete básico de energia para cualquier oscilador se llama en latin, *quantum (cuanto)* Planck dijo que su magnitud es igual a la frecuencia del oscilador multiplicada por una constante, designada con la letra " $h$ ", y conocida como la constante de Planck

Quedando como:

$$1 \text{ cuanto de energia} = h f \text{ o } E = h f$$

Un oscilador de acuerdo con Planck puede poseer 1,2,3,4 o cualquier numero de enteros de cuantos pero no podra poseer 1,5 o 3,65 cuantos

2.- Cuando un oscilador absorbe o radia energia puede hacerlo solo en cuantos, es decir, en multiples enteros de "h". Entonces, podemos definir que un cuanto de energia es una porcion de energia poseida, emitida o absorbida por una fuente de ondas electromagneticas. Con la ayuda de las nuevas suposiciones, Planck dedujo una ecuacion que concuerda con las curvas; por supuesto que esta ecuacion no es sencilla, es la siguiente:

$$E \lambda = \frac{2 \pi c^2 h}{\lambda^5 (e^{ch/\lambda k T} - 1)}$$

Donde  $A$  es la energia de una cierta longitud de onda emitida por segundo, por unidad de area y por unidad de intervalo de longitud de onda, debemos conocer el significado de todas las letras del segundo miembro de la ecuacion excepto  $A$  que es la constante de Boltzmann, relacionada con la energia molecular; y  $e$  es la base de los logaritmos naturales. La teoria cuantica de Planck revolucionaria, por que afirmo que una fuente oscilante de ondas electromagneticas no radia o absorbe energia de modo continuo, sino que se emite y absorbe energia en pequenas porciones o paquetes llamados cuantos

Heinrich Hertz estaba interesado en producir ondas de radio, no se llamaban asi porque en ese tiempo no se tenia idea de lo que era la radio, con las predicciones de Maxwell de que existian ondas electromagneticas en el espacio por el movimiento de cargas electricas. Hertz las observo estableciendo dos circuitos como se muestra en la figura 1-3. En el primer circuito se obligaba a saltar una chispa entre dos esferas metalicas. La chispa nunca es sencilla, sino que oscila de un lado a otro a traves del intervalo entre las esferas. Luego establecio otro circuito a alguna otra distancia que consistia en un espacio de chispa y alambres para completar el circuito. Encontro que siempre que una chispa oscilante cruzaba la primera abertura, otra chispa oscilante se producia en la abertura de la segunda bobina. En verdad era mucho mas debil que la primera, pero saltaba si las condiciones eran favorables, se radiodifundia una onda de radio de un circuito al otro. Realizando el mismo experimento pero con una modificacion, encerro el segundo circuito dentro de una caja negra para ver si las ondas atravesaban el material de la misma, encontro que tenia que reducir la abertura para producir una chispa en el segundo circuito, deduciendo que perdian un poco de energia al atravesar las paredes de la caja, pero otra posibilidad seria que el circuito no funcionara igual de bien cuando se encontrara en la obscuridad, esto suena absurdo para aquella epoca. Hertz probo con iluminar las

terminales del segundo espacio de chispa con luz ultravioleta. Comprobo que de nuevo saltaba una chispa con mayor abertura, concluyendo que la luz ultravioleta ayuda a las cargas electricas a escapar de las terminales metalicas. Otros investigadores pronto descubrieron que una placa metalica cargada perdía su carga cuando esta era iluminada con luz ultravioleta, si la carga era negativa pero no si era positiva. Con esta nueva teoria desarrollada por Planck, se sabia que al iluminar ciertas substancias, superficies metalicas, por ejemplo, originaba la emision de electrones, el proceso se le llama emision fotoelectronica o efecto fotoelectronico. El efecto fotoelectronico puede estudiarse con la figura 1-4

Si la luz de cierta frecuencia ilumina la superficie de ciertos metales, fluyen electrones en el circuito, suponiendo que la energia necesaria para arrancar un electron del metal proviene de la luz, entonces, cuanto mas luz brillante, habra mas electrones emitidos y sera mayor la corriente. Esto parece razonable. Se agrega una bateria al circuito, cuando el emisor se hace positivo, la corriente disminuye. Tambien esto es razonable por que la carga positiva del emisor tiende a evitar que todos los electrones, excepto los mas rapidos, abandonen el metal. Cuando se hace mas y mas positivo, llega un punto donde la corriente es nula, entonces es cuando se le aplica mas intensidad de luz para que los electrones mas rapidos pudieran adquirir mas energia para poder escapar e iniciar un flujo de corriente, pero para sorpresa esto no sucede, no importa que tan brillante sea la luz incidente, no puede producir fotoemision. Ahora con la placa todavia negativa de modo que no puedan fluir los electrones, se cambia la frecuencia de la luz. Si la frecuencia disminuye no pasa nada, pero al ir aumentandola hasta una frecuencia en particular comienzan a fluir los electrones, aunque la luz sea muy debil. Concluyendo que:

- 1.- La intensidad de la luz controla el numero de electrones que escapan fuera del metal, pero no su energia.
- 2.- La frecuencia de la luz controla la energia de los electrones si la frecuencia es demasiado baja ningun electron tiene suficiente energia para escapar.

Albert Einstein conocia todo esto. Se dio cuenta que el efecto fotoelectronico tenia sentido si se suponía que la luz alcanza la superficie metalica en forma de cuantos o *fonones* razono que esto podia suceder cuando un electron proximo a la superficie del metal absorbe un foton de energia luminosa. La energia agregada puede bastar para obligar al electron a ser emitido por el metal, puesto que la energia de un foton es " $h\nu$ ", cuanto mayor sea la frecuencia, mayor sera la energia de un foton. Esto explica por que la frecuencia de la luz controla la energia de los electrones que escapan. Cuando " $h\nu$ " es demasiado baja, ningun electron escapa del metal. La intensidad de la luz controla solo el numero de electrones que escapan, porque con mayor intensidad hay un numero mayor de fonones, pero sin aumentar la energia de cada foton.

Recordando el modelo del atomo de Rutherford, en su centro se encuentra un nucleo pesado de carga positiva, fuera del nucleo se encuentran los electrones con carga negativa girando al rededor del nucleo

ya que si se encontraban estaticos estos serian atraidos por el nucleo positivo. En el sistema solar la atraccion gravitacion entre el sol y los planetas los juntaria si estos no estuvieran en movimiento. En este punto se encuentra un problema. Maxwell predijo que si las cargas electricas se aceleraran, radiaran ondas electromagneticas. Hertz lo comprobó. Las cargas electricas negativas (*electrones!*) girando entorno del nucleo tendrian que radiar energia por que estan en movimiento y al perder esta energia se moverian en orbitas cada vez mas pequeñas, recorriendo una espiral hacia el nucleo, lo mismo que sucede con los satelites artificiales de la tierra. Si la prediccion de Maxwell fuera correcta, todos los atomos deberian haberse derrumbado desde hace mucho tiempo debido a la espiral descrita por los electrones. Rutherford demostro con claridad que no ocurre esto. Conforme los electrones se acercaran al nucleo radiarian energia de distinta frecuencia por lo tanto la luz producida tendria un espectro continuo, sin embargo no ocurre esto sino que presenta un espectro con lineas brillantes bien definidas, fue cuando Bohr, trabajo sobre esto. En el atomo mas sencillo que se conoce, el hidrogeno Planteo las siguientes suposiciones:

1. Un electron puede existir solo en ciertas orbitas particulares, cuando se encuentra en una de las orbitas permitidas, no radia energia aunque tenga movimiento acelerado.
2. Un electron puede saltar de una orbita bruscamente de una orbita mas exterior a una mas inferior.

Cuando así sucede, pierde energia que se radia en la forma de un foton. Cuando un atomo se excita de alguna manera, el electron absorbe energia y se mueve hacia una de las orbitas mas exteriores, tan pronto como cae el electron de vuelta a la orbita de salida, admite energia, el foton en este caso tiene una cierta longitud de onda de una de las lineas del espectro ultravioleta del hidrogeno. Puede que no descienda de una el electron sino que puede pasar de la quinta orbita a la tercera para despues caer a la primera en la que partio, produciendo dos fotones. Cada salto produce una clase particular de foton responsable de cierta linea en el espectro de lineas brillantes, un solo atomo no produce todas las lineas en el espectro, pero si un gran numero de atomos excitados, donde pueden ocurrir diversos saltos, proporcionan un espectro completo. Debido a que es imposible dibujar un atomo, actualmente, los fisicos prefieren trazar un diagrama de la situacion en el atomo de hidrogeno como se indica en la figura 1-5, en lugar de orbitas, piensan que el electron tiene ciertos estados o niveles de energia, con numeros cuanticos  $1, 2, 3$  etc. hasta el infinito, un electron puede estar en cualquiera de los estados de energia. Normalmente, se encuentra en el estado mas bajo o fundamental. Cuando un electron se mueve a un nivel superior, es que el atomo absorbe energia, y al regresar a un estado inferior, el electron emite energia.

En un sentido un foton tiene masa, resultante de su movimiento y teniendo una energia cinetica. Pero cuando se encuentra en reposo su masa es cero, muchas observaciones confirman la idea de que el foton tiene masa y cantidad de movimiento. Un haz de luz se desvia por la atraccion gravitacional del Sol, de manera que una estrella observada cerca del sol durante un eclipse parece estar en una posicion diferente de la esperada, un electron puede recibir diferentes impulsos cuando choca con un

foton de rayos  $x$  con medidas muy cuidadosas de las orbitas de los satelites terrestres. los cientificos han encontrado que la presion de la luz hace disminuir lentamente la altura del satelite sobre la tierra.

Un foton puede ser una especie de partucula, pero tambien tiene una longitud de onda y una frecuencia asociada. Aqui nos enfrentamos con la misma dificultad que con el atomo, no puede representarse mentalmente la situacion 'Como puede ser la luz a la vez onda y partucula?' Actualmente, debemos contentarnos con la idea de que la luz actua como una onda, cuando pasa a traves de rendijas estrechas o se refleja en peliculas de jabon, y que actua como partucula cuando choca contra una celula fotoelectronica o cuando es radiada de un atomo de hidrogeno o de un tubo de rayos  $x$ . La emision de los fotones puede ser con facilidad explicada en terminos de la clasica imagen de las ondas electromagneticas, como es sistematicamente representada en la figura 1-6, aqui el vector electrico de incidencia de onda electromagnetica es mostrada con una interaccion con un electron libre en un metal conductor, y las oscilaciones de este vector electrico producira oscilaciones correspondientes al el movimiento del electron. Como las ondas continuas que caen sobre la superficie metalica superan las fuerzas paralizantes del electron en el solido estas seran expulsadas a traves de la superficie, en consecuencia formando el fotoelectron.

La energia requerida para traspasar a traves de la superficie de el metal es normalmente medido en terminos de una funcion de trabajo y puede ser facilmente definida en unidades de electron Volts. Es entonces, encontrando que una tipica superficie metalica tendra una funcion de trabajo de unos pocos electron Volts. En primera instancia, la simple imagen de los mecanismos de el efecto fotoelectronico, extraño de explicar el fenomeno, cada electron necesilara de absorber una cierta cantidad de energia de las ondas electromagneticas despues esta podra superar la funcion de trabajo a la superficie. Pero al absorber esta cantidad de energia es entonces expulsado un electron para formar parte de la corriente fotoelectronica. De esta manera la energia adquirida por este electron, por este mecanismo dependera sobre alguna manera de la intensidad de la onda electromagnetica y sobre la manera en el tiempo que tarda la absorcion de esta energia, y se podra por consiguiente contemplar el parametro que resulta crucial a determinar, si los fotoelectrones pueden ser reproducidos en un determinado momento, preguntándose si la intensidad de la luz ultravioleta sera el parametro importante para iniciar el efecto de fotoconduccion, pero eso ya lo explicamos anteriormente.

### 1.3 El espectro de frecuencias.

Es conveniente analizar las distintas regiones que componen el espectro electromagnético, para una mejor comprensión de la naturaleza de todas las radiaciones electromagnéticas.

*La región visible y sus propiedades básicas.* - La región actual en la que se encuentra delimitada, se encuentra establecida simplemente por la sensibilidad del ojo humano, que en su parte más sensible se encuentra en su región central, y esta se encuentra en el amarillo del espectro visible, a una longitud de onda aproximadamente de *550 nanómetros* ( $5 \times 10^{-7}$  mts), y esta sensibilidad empieza a perderse claramente hacia la región violeta de manera muy rápida, con una longitud de onda aproximado de *400 nanómetros* ( $4 \times 10^{-7}$  mts), y por el otro extremo en la región del rojo, con una aproximada longitud de onda de *700 nanómetros*. No es muy difícil de imaginar el tamaño de las longitudes de onda: hay *1000 milímetros* en un metro y aproximadamente hay *2000* longitudes de onda en un *milímetro*. No obstante que este rango parece estar sujeto arbitrariamente por la subjetividad de la visión humana, recordando que esto depende del mecanismo que tiene el ojo humano para la detección de alguna radiación. Esto está determinado por el conjunto de niveles de energía en los que pueden encontrarse los electrones dentro de los átomos y moléculas que componen al material activo de la retina del ojo humano.

Newton fue el primero en demostrar inequívocamente, que la luz blanca puede artificialmente separarse en sus componentes, simplemente pasando un rayo de luz por un prisma de vidrio, su experimento formó en ese sentido el primer espectro óptico proveniente de la luz solar, se considera como el nacimiento del estudio sistemático de la radiación y de sus propiedades. Sus contribuciones al estudio y entendimiento de la naturaleza de la luz dejó un inmenso significado, así como sus experimentos de interferencia. Sin embargo Newton favoreció a la teoría de que la luz viaja como partículas o corpusculos siendo que la teoría ondulatoria contradice a la teoría de la partícula. Como resultado final del estudio de la luz se ha llegado a la fusión de estas dos teorías, dentro de las consideraciones generales de la dualidad entre ambas, materia y energía, en términos de ondas y partículas. Resumiendo las más importantes características de la región visible del espectro en una manera simbólica, el rango de longitudes de ondas con sus colores asociados, son mostrados en el centro de la figura 1-7, mientras la fuente de esta radiación está indicada en su parte superior y los métodos de detección de esta están indicados en su parte inferior, el método normal de producción práctica de esta radiación está mostrado en la figura, para el caso de radiación más simple en esta región se encuentra una lámpara de wolframio. La más remota, de las posibles formas de emitir esta radiación está representado como brinco de electrones entre los niveles de energía de un átomo de sólido de tungsteno, con forma de rizos en los filamentos de la lámpara. Esta esencial caracterización de la región visible está asociada con los brinco de electrones en las externas orbitas del átomo. Esto no se comprendió mucho después de que murió Newton. Los números que aparecen a lo largo de toda la banda del dibujo están asociadas con la representación de las energías asociadas con las particulares

longitudes de onda, medidas en *electron Volts*. Esta energía está relacionada con la frecuencia de las radiaciones por el postulado cuántico de Planck, así como la frecuencia y la longitud de onda están asociados por un factor. Su producto es igual a la velocidad de la luz, por lo tanto la energía de la radiación será directamente proporcional a ambos: frecuencia y el número de onda (*el número de longitud de onda en unidad de distancia es  $1/\lambda$* ). Estos parámetros están normalizados para la caracterización de la radiación. Estas están relacionadas con la ecuación de la energía:  $E = h\nu$  donde  $\nu = c/\lambda$ , y  $h$  es la constante de Planck igual a  $6.626 \times 10^{-34}$  *Joule seg* y  $c$  es la velocidad de la luz. La unidad en el sistema internacional para la energía es el *Joule* pero en el estudio del espectro la unidad utilizada es el *electron Volt*. Una está asociada a la frecuencia y otra con el número de onda, el *electron Volt* es la energía adquirida por un electron en bajada mediante una diferencia de potencial de *1 Volt*. De esta manera puede ser visualizado fácilmente como una medida tomada directamente de los saltos de electrones. Las diferencias energéticas entre las orbitas externas de los átomos son del orden de unos pocos *Volts* así la cantidad de energía asociada con un *electron Volt* es extremadamente pequeña, desde entonces solo las mediciones de energía se asocian con un solo electron.

La conversión de *Joules* a *electron Volts*, está dada por  $1 \text{ Joule} = 6.24 \times 10^{18}$  *electron Volts*  $1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19}$  *J*. Y el número de onda está relacionado con la energía de un *electron Volt* por la ecuación  $h\nu = (1/\lambda) \cdot L$   $1.24 \times 10^{-6}$ , donde  $L$  es medida en metros. También de manera resumida en la figura están los métodos prácticos de como la radiación puede ser detectada, en esta región en particular el mismo ojo humano se muestra como la principal forma del método de detección, otro método permanente está representado por la cámara y la fotografía de película.

*La región ultravioleta y sus propiedades:* Simples métodos como una fotografía estuvo representada como un método de detección en el espectro visible se encuentra mostrado en la figura 1-7, indicando que el ojo deja de ser sensible a la radiación más allá del final del rango visible en el color violeta. Hay sin embargo radiaciones que están más allá de esta radiación, y que pueden confundirse. Las principales propiedades de esta región están brevemente caracterizadas en la figura 1-8, aunque la radiación ultravioleta es invisible para el ojo humano es muy fácil y sorprendente de comprobar su existencia. La radiación proveniente de un tubo de descarga que cae sobre una pantalla que tiene material fluorescente, la radiación ultravioleta es absorbida por los átomos del material fluorescente produciendo cambios de energía dentro de ellos. Dichos cambios que ocurren dentro de los átomos del material son brinco de electrones que pasan de un nivel de energía a otro asociados con la radiación entrante en la pantalla, como resultado de semejantes brinco, la radiación visible es emitida y puede ser detectada por el ojo humano. Esta conversión de alta energía y cortas longitudes de onda (*de la radiación ultravioleta*), a las bajas cantidades de energía y largas longitudes de ondas (*que corresponden a la radiación del espectro visible*), ocasiona que aparezca el fenómeno de fluorescencia, resultando ser muy predominante. Esto tiene muchas maneras prácticas de utilización, como por ejemplo, la pintura hecha con material fluorescente; estos y otros tipos de dispositivo absorben la radiación ultravioleta que cae sobre el material fluorescente para luego reemitirla en un rango particular de la región visible, añadiéndose a la luz visible que está siendo reflejada. Este proceso de

detección de la radiación ultravioleta está esquemáticamente representado en la figura 1-8, junto con otros métodos que cuantifican la detección de la radiación ultravioleta. Esto incluye celdas fotoeléctricas, donde un cuanto de energía que viene de la radiación ultravioleta puede causar que los electrones se emitan hacia la superficie del metal; los electrones pueden después ser contados por medios electrónicos.

Como se mencionó, esta radiación puede ser detectada por una película junto con un lente de cuarzo u otro sistema adecuado de lentes para usarse junto con la cámara. Sin embargo los lentes de vidrio resultan ser opacos para muchas longitudes de onda en el ultravioleta. Las fuentes de la radiación ultravioleta se presentan en la figura 1-8, por un tubo de descarga que contiene un gas básicamente similar a el neon o tubos fluorescentes que son tan comunes ya hoy en día. El tubo de descarga excita a los electrones de los átomos del gas para después volver a su estado de equilibrio emitiendo radiación ultravioleta durante la excitación de los electrones, átomos de un material como el mercurio son frecuentemente usados.

Ya que la radiación ultravioleta es más energética que la luz visible, la energía asociada con los saltos electrónicos deben ser grandes, por lo tanto, esos saltos de electrones pueden saltar a través de dos o más niveles de energía con preferencia entre los niveles más alejados, como es el caso de la región visible. Estos brinco de electrones que aun son un tanto largos están indicados sistemáticamente en la parte de arriba de la figura 1-8. En la parte central se encuentran las características cuantitativas de esta región del espectro donde el rango de las longitudes de onda está mostrado de  $2 \times 10^7$  mts a  $10^8$  mts y las energías asociadas están también dadas. Su extensión es cerca de los 5 electron Volts a la orilla de la región visible hasta los 100 electron Volts al final de la alta energía. Esta apreciación no será bien definida en todo lo largo del espectro en ninguna longitud de onda, con esto quiero decir que hay un continuo traslape de longitudes de onda en todo lo largo de las diferentes regiones que tiene el espectro electromagnético.

Las longitudes de onda del ultravioleta en el extremo cercano a la región visible se traslapan con el extremo lejano de la región visible del violeta, y así sucede particularmente con todas las demás regiones que componen el espectro electromagnético, así que no existe ninguna región que empiece o finalice exactamente con una longitud de onda.

La región de los rayos x.- Considerando la región visible y la ultravioleta en que su principal interés fue sobre los brinco energéticos de los electrones en sus orbitas externas. La cuestión siguiente se plantea de la siguiente manera: ¿cual será el tipo de radiación que se producirá si los electrones más internos o más cercanos al núcleo del átomo se excitan?

Dentro de los átomos se tienen orbitas que contienen electrones que están alrededor del núcleo siendo que las cargas nucleares producen energías muy altas para su armonía y su interacción con el núcleo

ya que se encuentran en las orbitas mas intimas del atomo *(una gran cantidad de trabajo se necesita para poder remover al electron de semejantes orbitas)* Si un electron es removido de estas orbitas internas, uno de los electrones externos puede caer del otro lado de las orbitas externas, acomodandose a traves de muchas orbitas de electrones para llenar internamente el lugar. Esto producira muchos cambios energeticos y asi la radiacion sera emitida, y sera mucho mas energetica que la que esta asociada con las orbitas mas alejadas del nucleo o orbitas mas externas. La energia que se desprende del electron en transicion al ser removido de estas orbitas resulta ser tan alta que es el origen de la emision de las lineas de rayos  $x$  estas son altamente energeticas y penetrantes. En un tubo normal de rayos  $x$  los electrones son acelerados por un alto voltaje  $V$  para luego golpearse con un metal. Al chocar con el metal las cargas electricas generaran ondas electromagneticas o radiacion electromagnetica, y la maxima frecuencia de esta radiacion esta determinada por la relacion

$$h\nu_{max} = \text{máxima energia cinetica perdida} = eV$$

Informacion mas detallada de la produccion de esta radiacion y sus propiedades generales se encuentran brevemente resumidas en la figura 1-9. La fuente de lineas de emision espectral en esta region, estan dados por los saltos muy energeticos que hace el electron a traves de todas las orbitas asociadas con un atomo pesado, su manera practica de producir esta radiacion se encuentra representada en la figura 1-9, donde se encuentra la emision de esta radiacion en los destellos o haces de luz de los veloces electrones moviendose dentro del tubo y abandonándolo permitiendo el descenso de la velocidad de las cargas al caer sobre un metal pesado. Metales como el cobre o el tungsteno producirán radiación  $x$ . Los métodos que detectan dicha radiacion se indican en la figura en su parte superior. Como ejemplo se utiliza una placa fotografica en el campo de la medicina. Para esta particular aplicacion, la radiación  $x$  penetra en el material menos denso y revela la estructura interna del material más denso en el que no puede penetrar del todo bien.

Las longitudes de onda que se aplican para el campo de la medicina son pequeñas, estas son alrededor de  $10^{10}$  electron Volts estas pueden estar incluidas dentro del espacio de un metro mientras que las energias de los fotones correspondientes a las altas energias en su extremo final de la región, tienen un incremento cerca de los  $10^6$  electron Volts. El rango fotónico de energia de un *electron Volt* en la region visible se encuentra justo sobre los *100 000 electron Volts* en la región de los rayos  $x$  indicando el ancho rango de energias asociadas con los niveles electrónicos de los atomos.

Asi la radiación visible, la ultravioleta, y los rayos  $x$  pueden provenir de los brinco que tienen los electrones dentro de las orbitas atomicas. Despues del descubrimiento de los rayos  $x$  se descubrio otro tipo de radiacion de muy alta energia con ciertas caracteristicas en sus longitudes de onda, que indican las transiciones entre niveles energeticos especificos, siendo detectados del nucleo radioactivo. La existencia de esta nueva radiacion se lo conoce como rayos  $\gamma$ , mas por consiguiente esto implica la existencia de otros sistemas que tienen niveles energeticos mas profundos

La radiación  $\alpha$  y los núcleos: Un sistema de semejantes niveles energeticos que produce largos cambios de energia, se encuentran asociados con la estructura electronica del atomo, estas asociaciones implican unas fuerzas que están en infinita interaccion siendo muy fuertes entre los electrones y los nucleos. La existencia de la radiación y tiene su origen en el interior del nucleo de un atomo, y se pueden utilizar para la caracterizacion de los niveles energeticos de varios nucleos, y por lo tanto investigar las fuerzas e interacciones que hay dentro de ellos. La fuente para producir semejante radiación en el espectro, están representadas sistematicamente en la figura 1-10. Para producir tal cambio en la energia nuclear necesitamos isotopos radiactivos o la utilizacion de un acelerador de particulas. En este acelerador de particulas los protones, por ejemplo, son acelerados a muy altas energias y son proyectadas a varios diferentes nucleos para poder perturbar aquellos estados de energia que están dentro del nucleo del atomo. Las lineas espectrales de los rayos  $\gamma$  se empiezan a emitir cuando los nucleos vuelven de sus estados de excitación a sus estados de equilibrio o bien de no excitación: conocido como el estado de baja energia. La desaceleración de los electrones que viajan a muy altas velocidades por la utilizacion de tal acelerador producen radiación electromagnetica, de la misma forma que la radiación de los rayos  $\alpha$  pero las altas energias que se asocian para los rayos  $\gamma$  ahora dan una elevación en las frecuencias en que aparecen, siendo así de muy altas frecuencias. La radiación  $\gamma$  es normalmente detectada por contenedores especiales que frecuentemente cuentan los destellos y brillos producidos por la llegada de los rayos  $\gamma$ . La emision de los cuantos de luz pueden ser detectados por celdas fotoelectricas que tambien amplifican la señal para despues registrarlas electrónicamente.

Las longitudes de onda y las energias asociadas con esta region al final del espectro, están indicadas a traves de la figura, en su centro. En la parte final de este espectro, es decir, en su parte mas energetica se alcanzan miles de millones de *electron volts*. Podria pensarse que este es el limite mas superior en la creacion de radiación de muy alta energia que puede ser asociada con cualquier nucleo de un atomo. Ahora se sabe que no existe un limite superior para la producción de radiación de muy altas energias, o sea que es posible producir radiación de energia mas alta, con la aniquilación de la materia y de la antimateria. Por lo tanto no hay realmente un limite superior en esta region del espectro. Para las bajas energias de esta region hay que considerar un traslape con la region final de la radiación de los rayos  $\alpha$  en este caso particular el traslape sucede en realidad en un pequeño rango dentro del espectro. Se define la region de los rayos  $\alpha$  como la radiación que crece por los cambios de energia de las orbitas mas cercanas al nucleo y considerando que la region de los rayos  $\gamma$  proviene de los cambios de los estados energeticos del nucleo, que por decirse así, los estados energeticos están muy enmarañados con la energia nuclear y no con cualquier cambio de energia en los electrones dentro de la estructura del atomo.

La region infrarroja y su estructura molecular: Para ubicar esta region, se tiene que seguir el rango de las longitudes de onda que se encuentran al final de la region de las altas energias en el espectro electromagnetico, es necesario regresar a traves de la region visible y considerar la extension total del espectro en la direccion opuesta a las cortas longitudes de onda y altas energias. La primera region

mas alla de lo visible en esta region, se encuentra mas alla del rojo, y es conocida como radiacion infrarroja. La region infrarroja y la radiacion termica han sido desde mucho tiempo la asociacion perfecta. El hecho es que de una llama de fuego se producen ambas radiaciones, radiacion visible concentrada al final del rojo y radiacion termica que puede ser sentida mas no vista, esto es el claro ejemplo de la asociacion de estas dos radiaciones. Los cambios de energia que corresponden a los cuantos de luz en esta region son muy pequenas y no muy significativas, estos cambios estan asociados con la region visible con una creciente asociacion de las internas interacciones entre las moleculas, que por decirse asi, estan encadenadas para formar un todo *(estan muy juntas)*.

La radiacion infrarroja que emiten las particulas de un gas que se estudia demuestra que aparecen lineas espectrales que se pueden relacionar con las energias de las moleculas, como cuando estan en vibracion o cuando pueden estar sometidas a otros tipos de movimientos moleculares. De tales estudios que se hacen se ha llegado a deducir las magnitudes de las fuerzas inter atomicas que atan o sujetan a todas las moleculas en conjunto. La radiacion infrarroja que es emitida de solidos demuestra que las lineas espectrales estan diseminadas dentro de las bandas de energia. Entre estas bandas existen brechas de energia, las medidas de las brechas dentro de estas pueden extraerse precisamente informacion acerca de su estructura molecular del cristal. El caso del espectro gaseoso esta ilustrado en la figura 1-11. Donde las vibraciones de una molecula de agua se indica en la figura, esta molecula triangular tiene dos ramas que estan unidas con un atomo de hidrogeno en cada brazo. La molecula puede estar en cualquiera de los dos estados, de rapida vibracion o estado de lenta vibracion y los cambios de energia entre estos dos diferentes estados de vibracion corresponden a la energia asociada con la emision o la absorcion de la radiacion infrarroja. Diferentes cambios de vibraciones asocian rangos de energias que estan ilustradas en el centro de la figura, se pueden observar los cambios de energia asociados con los movimientos moleculares.

*La region de las microondas y las aplicaciones:* En esta region del espectro las longitudes de onda son largas por que la radiacion infrarroja o la region caliente del espectro, se une dentro de la region de las microondas. Aqui las lineas discretas del espectro son asociadas con el movimiento molecular, pero la sensacion normal de las ondas calientes se deja de sentir mas alla del espectro infrarrojo. En esta region se tiene un interes historico, ocurre que el desarrollo de esta radiacion fue solo para las aplicaciones en radares en los tiempos de la primera guerra mundial hasta. Estas radiaciones estan siendo usadas desde hace decadas. La llegada de fuentes que fueran las adecuadas para la radiacion de la banda para longitudes de onda en centimetros, tuvo que esperar al desarrollo del radar de manera que esto cerro una brecha en el espectro electromagnetico, quedando por primera vez completo el espectro. Como se menciona anteriormente para la creacion de radiacion cuantizada en esta region, sigue siendo el movimiento de las moleculas como un todo, pero los cambios de energia son aun pequenos, las vibraciones moleculares estan asociadas con la region del infrarrojo. Los movimientos que empiezan a incrementarse en el encadenado molecular dan inicio al ascenso de la intensidad de radiacion de microondas, esta energia esta asociada con las volteretas o rotaciones que tienen las moleculas o la reversión de estos movimientos, tales moleculas como el amoniaco son un

ejemplo de las que pueden facilmente radiar. Esto se ilustra en el esquema de la figura 1-12 como la molecula de amonaco con la forma de una piramide en relacion con un atomo de nitrogeno. En el otro extremo se forma otro plano por los atomos de hidrogeno.

El atomo de nitrogeno puede existir igualmente estando por encima o por debajo del plano formado por los atomos de hidrogeno. Con esto se consigue una oscilacion entre estas dos posiciones de la molecula y la frecuencia de oscilacion de dicha molecula invertida, es en realidad de  $24\ 000\ \text{MHz}$ ; que corresponde a una longitud de onda de  $1.25\ \text{cm}$  es muy notorio que esta longitud de onda es mas larga que las ondas en la region infrarroja en el espectro. Las maneras mas practicas en que esta radiacion puede ser producida son muy diferentes a las que se indicaron para la region del infrarrojo, estas tienen mucha precision en la generacion de las longitudes de onda de operacion con dispositivos electronicos. En realidad todos los metodos electronicos que son precisos se encuentran hasta la region de las longitudes de onda del radio. Dentro de la region de las microondas existe la produccion de unas lamparas conocidas como magnetron y klystron. Estas lamparas pueden producir radiacion monocromatica donde todo el poder es concentrado en un muy pequeno y angosto rango de longitudes de onda. De la misma forma la radiacion en esta region del espectro es detectada por metodos electronicos, como estan ilustrados en la figura como el tubo donde viajan las ondas. Se puede observar que se tienen distintas tecnicas de aplicacion en esta region del espectro, las magnitudes de las cortas longitudes de onda en esta region pueden ser medidas por simples reglas acotadas en centimetros y por lo tanto la difraccion y la interferencia en experimentos pueden ser eliminada con simples entreplados hechos de alambres. Dentro de este rango se pueden transportar facilmente informacion via microondas.

La region del espectro del radio: Moviendonos a traves de la region de las microondas hacia las aun mas largas longitudes de ondas. Estas se traslapan con la region del espectro del radio, donde las longitudes de onda pueden alcanzar cientos o miles de metros. Esta region del espectro estuvo primero investigada y explorada por Hertz, Maxwell, y Marconi. La llegada de las ondas de radio tuvo un impacto enorme en la mejora y comprension de la naturaleza de la radiacion electromagnetica, pero tambien sobre el profundo campo de las comunicaciones. El hecho es que la produccion de radiacion de longitudes de onda muy largas en la region del traslape con las microondas, es el limite apropiado para que los electrones se muevan rapidamente a traves de un dispositivo amplificador. De esta manera si los electrones pueden atravesar la parte activa del dispositivo en un tiempo corto comparado con un periodo de oscilacion, una eficiente amplificacion ocurriera, pero para las altas frecuencias de estas longitudes de onda estaran fuera de fase y la amplificacion no se obtiene. Las largas longitudes de onda de la region del radio se consideran estados ideales para la experimentacion lo que llevo a cabo un rapido desarrollo de todos los metodos electronicos de control y amplificacion. Estos metodos practicos de produccion y deteccion estan ilustrados simbolicamente en la figura 1-13. Para la capilacion de esta radiacion se utilizan circuitos que en su interior usan capacitores e inductancias. Ajustando estos parametros (capacitores e inductores) se puede seleccionar el resultado de las oscilaciones de una longitud de onda.

Figura 1-1

Ambas diáfonas tienen la misma frecuencia. Si se hace vibrar el de la izquierda, las ondas sonoras se propagan en todas direcciones. El diáfono de la derecha absorberá alguna cantidad de esta energía y empezará a vibrar, enviando también ondas sonoras en todas direcciones, pero, puesto que toda su energía procede de la parte de la onda original que llega de la derecha, el efecto será reducir la intensidad del sonido que avanza hacia la derecha. La absorción por el segundo diáfono crea una zona de sonido disminuido, semejante a una línea oscura en un espectro de absorción.



Figura 1-3 Heriz observó la producción de ondas de radio con este aparato.

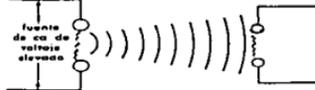


Figura 1-4

a. La luz ilumina a través de la ventana (arriba a la derecha) dentro de la caja donde se ha hecho el vacío. Cuando la luz incide en la superficie pulida del cátodo, el metal emite electrones (véanse los puntos). Los electrones se mueven hacia la placa, señalando una corriente en el microamperímetro. Cuanto más intensa sea la luz, mayor será la corriente.  
b. Si la placa se hace negativa, pocos electrones la alcanzan. Para un valor particular de  $V$ , todos los electrones son detenidos. Al aumentar la intensidad luminosa no se inicia la corriente. Si la frecuencia de la luz aumenta, la corriente empieza cuando se llega a un valor particular de la frecuencia. Si la frecuencia se incrementa después, los electrones salen del metal a velocidades mayores, pero la corriente sigue la misma.

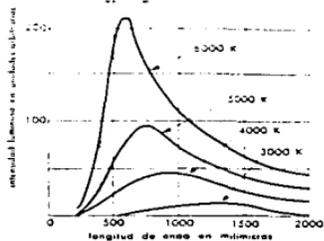
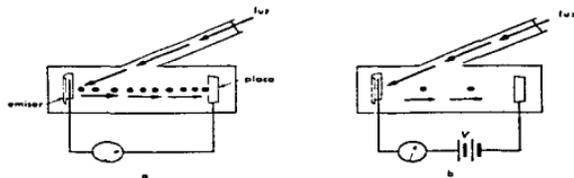
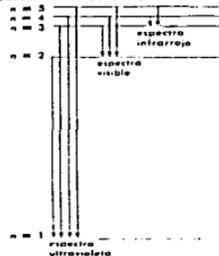


Figura 1-2

Esta gráfica muestra la distribución de la energía en el espectro continuo emitido por volutas incandescentes a varias temperaturas.

Figura 1-5

Diagrama de niveles de energía para el átomo de hidrógeno. De ordinario, el electrón está en el nivel de energía donde  $n = 1$ . Cuando recibe energía, el electrón se mueve a un nivel superior. Solo se muestran en la figura unos pocos niveles de energía.



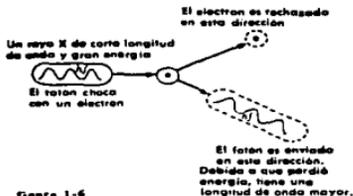


Figura 1-6

Arthur Compton descubrió que un fotón de gran energía de los rayos X puede dar cierta cantidad de movimiento a los electrones. Cuando un fotón choca con un electrón, ambos siguen diferentes direcciones y la longitud de onda del fotón es siempre mayor después de la colisión, demostrando que ha perdido energía. Compton encontró que la energía perdida por el fotón es igual a la ganada por el electrón, y que la cantidad de movimiento del fotón original es igual a la cantidad de movimiento del electrón, más la cantidad de movimiento del nuevo fotón.

## Antecedentes

Figura 1-7  
VISIBLE REGION

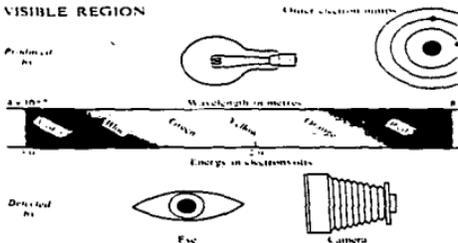


Figura 1-8  
ULTRAVIOLET

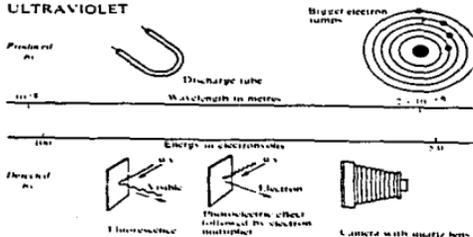
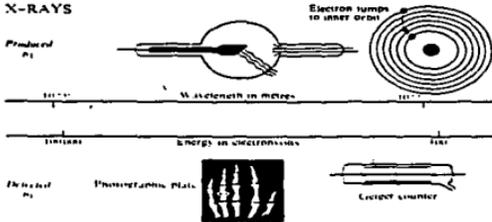


Figura 1-9  
X-RAYS



### γ-RAYS

Produced by

$10^{-11}$

100 Million

Detected by

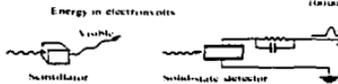
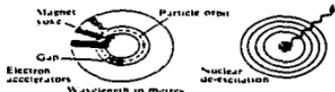


Figure 1-10

### INFRA-RED

Produced by

$10^{-5}$

100

Detected by



Wavelength in metres

Energy in electronvolts



Figure 1-11

### MICROWAVE REGION

Produced by

$10^{-2}$

$10^4$

Detected by



Wavelength in metres

Molecular inversion



Produced by

$10^0$

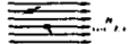
100000

Detected by



Wavelength in metres

Movement of electrons and nuclei in magnetic and electric fields



Energy in electronvolts



Energy in electronvolts

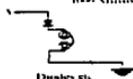
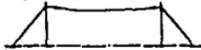


Figure 1-12

Figure 1-13

## Capítulo 2.

### Significado de la tecnología infrarroja.

#### 2.1 Utilización de la luz y emisores de luz.

Ahora con la tecnología actual, se ha podido profundizar en el estudio de la luz, pero no significa que sea bien comprendida en un 100% ¿Que es la luz? Su comportamiento es conocido, al grado que se tiene la medida de la velocidad con la que viaja la luz, teniendo como una base paramétrica de máxima magnitud. Hasta donde ha concernido el entendimiento de la luz, se ha llegado a la clasificación del uso de la luz en 3 grandes ramas conocidas como: 1.- Iluminación 2.- Transferencia de energía, 3.- Transmisión de la información

*La Iluminación:* Esta requiere de una fuente de luz con suficiente intensidad y que sea capaz de transmitir una particular longitud de onda. De modo que pueda ser reflejada por un objeto y captado por un detector determinado. El detector, proporcionara la información deseada acerca del medio ambiente que ha sido iluminado. En este caso la luz puede ayudarnos a determinar factores como la presencia o ausencia de objetos, la forma de estos, su color y sus movimientos, etc.

*Transferencia de energía:* Para realizar este tipo de transferencia, se debe tener una fuente muy eficiente y de gran intensidad, un medio de transmisión de bajas pérdidas y un detector que responda a solo a ciertas longitudes de ondas emitidas. Un ejemplo adecuado sería el de una celda solar, el sol produce alrededor de  $1\ 400\ \text{watts/cm}^2$  fuera de la atmósfera terrestre. A la superficie terrestre llegan aproximadamente unos  $800\ \text{watts/cm}^2$  y de esa potencia, en una celda solar de  $1\text{m}^2$  producirá  $80\ \text{watts/cm}^2$  de energía proveniente de la luz solar, que es un 10% de toda la potencia energética que llega a la superficie y el otro 90% es reflejado o convertido en calor. Otro caso que es muy conocido de este tipo de transferencia de energía, es el rayo láser, aquí se presenta la concentración de una gran cantidad de energía en una área tan pequeña, que la densidad de energía resultante alcanza magnitudes bastantes asombrosas capaz de penetrar, quemar, rajar materiales muy duros, así como de muchísimas otras aplicaciones comerciales que tiene hoy en día.

*Transmisión de la información:* En este caso, se encuentran elementos involucrados de crucial importancia para la exactitud de la transmisión. La fuente emisora, el medio de transmisión, y el receptor. Se tiene como primera instancia el medio de transmisión, que puede ser fijo o no fijo, para identificar las señales transmitidas. Aquí se agrupan todos los dispositivos de comunicación entre hombre y la máquina, tales como las computadoras, displays digitales, etc. Otro elemento es fijar la fuente emisora y variar el medio de transmisión, igualmente que el receptor pueda identificar la señal

## Significado de la tecnología infrarroja

Mencionando como ejemplo, las lectoras de tarjetas, sistemas de seguridad, lectoras de código de barras, televisión, graficas en computadoras, etc

Los emisores de luz son basicamente los dos tipos de fuentes que se describen como las fuentes naturales y las artificiales. Las posibles formas de generar ondas electromagneticas radiadas con longitudes de onda visibles para el ser humano, serian las que emite un foco incandescente el cual utiliza un filamento por el cual circula una corriente electrica. Otra forma seria la lampara fluorescente, en cual se utiliza la ionizacion de un gas dentro de un tubo al vacio. En esta familia aparecen las lamparas de neon y xenon. Existen tambien quinqués, en los cuales se aprovecha un cierto combustible que arde a traves de la mecha. Estan tambien las vetas, las lamparas de gas y la generacion de la luz a base de materiales semiconductores. El led entrando al mundo de la electronica, nos encontramos con la concepcion de poder crear luz utilizando un material denominado semiconductor, en breve el semiconductor es cuando se inyectan electrones a la region *n* de un diodo *pn* y son barridos en la region cerca de la union, se recombinan con un hueco. Esta recombinacion es similar a cuando un electron regresa a su nivel bajo de energia despues de estar en un mayor nivel de energia, al suceder este fenomeno, se genera luz, cuya frecuencia queda determinada por la diferencia entre los niveles de energia. Dado que ese movimiento dentro de este dispositivo, solo puede ocurrir en un sentido, hablando electronicamente, el comportamiento es analogo al de un diodo y dado que a demas emite luz, a tal dispositivo se la denomina, diodo emisor de luz, sus siglas son *LED*. Podemos ver una tabla donde se muestran algunos materiales semiconductores junto con la longitud de onda que producen y el rango del espectro electromagnetico en el que caen:

<i>TIPO DE LED</i>	<i>LONG. ONDA</i>	<i>RANGO</i>
Led antimonio de indio	69.000	infrarrojo
Led arsenico de indio	34.500	infrarrojo
Led antimonuro de galio	17.700	infrarrojo
Led fosfuro de indio	9.850	infrarrojo
Vled fosfuro de galio y arsenico	6.500	rojo
Vled fosfuro de galio	5.650	verde
Vled nitruo de galio	4.500	violeta

Las características de la fuente de luz, varían de la muchas maneras en la que se puede generar este tipo de luz, pero siempre existen los parámetros que hacen la distinción de los distintos tipos de luz, uno de esos parámetros es la distribución espectral. Para este caso, es una característica de la fuente

emisora que nos relaciona su potencia relativa de salida contra la longitud de onda que emite, otra característica interesante es la bien conocida como el ángulo visual, resulta que la mayoría de las fuentes no emiten luz uniforme en todas las direcciones. La muestra entre dos leds, y su relativa salida comparada contra su eje axial óptico, forman lo que es el eje perpendicular a los lentes del led. Otra característica bien importante es la eficiencia, que establece la relación entre la potencia de salida del dispositivo (*intensidad luminosa*) y la potencia de entrada del mismo (*energía eléctrica*). Una lámpara de fluorescencia tiene 70 lúmenes/watt. En base a esto se hace el criterio de selección para nuestras necesidades, por ejemplo, si se utilizara un led infrarrojo en el display de una calculadora, jamás se vería nada. Por esto hay que escoger una fuente adecuada según la necesidad.

### 2.2 Sistemas infrarrojos y transductores.

Esta tecnología ha evolucionado en todos los sentidos, todo el equipo necesario para la utilización de esta radiación necesita de ciertos elementos que conforman estos sistemas, básicamente son el objetivo o la fuente de radiación de energía tanto natural como artificial, el sensor óptico del objetivo y sus propiedades, el sistema óptico y los detectores de infrarrojo así como el medio de procesamiento y visualización de salida del detector. La clasificación para los sistemas infrarrojos, serían los sistemas pasivos y sistemas activos. Para los sistemas pasivos su función básica es actuar mediante el poder detectar los objetivos simplemente por su propia radiación natural, para los sistemas activos, estos actuarán cuando se requiera de una fuente controlada de radiación para iluminar el objetivo de un receptor óptico. Para cualquier sistema es muy importante el diseño adecuado de el sistema detector, ya que depende de las cualidades del objetivo, de una manera general este objetivo es detectado poniendo un trasfondo, como un cielo claro o nublado, lo que pueda servir para contrastar. Los efectos atmosféricos deben contemplarse para el diseño del receptor, así como la fuente transmisora, puesto que la radiación del objetivo y su fondo o trasfondo podrían llegar a ser permutadas por las condiciones atmosféricas. Un fenómeno que ocurre, es la absorción, la dispersión, la emisión y refracción.

Estos son parámetros que no se pueden controlar y determinar de manera muy fácil en una trayectoria óptica. Generalizando un poco, la manera de representar un sistema básico de infrarrojo, es la siguiente, que conste de una fuente de radiación, detectores, pantallas, componentes electrónicos y un medio de fondo en el que actúa un sistema óptico. La fuente se puede definir como la distribución espectral de energía emitida por un cuerpo ideal radiante. La distribución espectral resultante es característica única de la temperatura del cuerpo. Este cuerpo está ligado al espectro por un factor determinado, se llama emitividad. La emitividad es la proporción de cada longitud de onda de la emisión de un cuerpo bajo condiciones idénticas. Algunas fuentes de rayos laser infrarrojo que se utilizan emplean gases de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y monóxido de carbono ( $CO$ ). El medio de transmisión puede ser una trayectoria arbitraria a través de la atmósfera o el vacío. Los sistemas

ópticos se conforman de manera general por lentes y espejos que se combinan para enfocar la radiación sobre un sensor detector. Los materiales utilizados son diversos, debido a que algunos resultan ser opacos para ciertas longitudes de onda, o sea que no tienen la misma transparencia y visibilidad. Los espejos que son utilizados son de una sola pieza y el cuerpo del espejo es de materiales silíceos o de aluminio con berilio. Para la selección de los materiales se debe considerar su resistencia a la intensidad de la luz, su estabilidad térmica y mecánica. Estos espejos deben ser cubiertos por finas películas metálicas anti corrosivas para que la reflexión de esta fina película se incremente con la longitud de onda y de manera que no sea muy rugoso el pulimento de la superficie. Para los detectores infrarrojos que requieren fotografiar un objetivo, no pueden utilizar las películas para fotografías simples, estas no sirven en todo el espectro infrarrojo. Esto es por que los halogenuros de plata que tiene la película no reaccionan, solo unos pocos solamente es sensible alrededor de  $1.2 \mu m$  pero para las bandas más importantes de la transmisión atmosférica de  $3 \mu m$  y de  $8$  a  $12 \mu m$ , no reaccionan de forma general, entonces los sistemas infrarrojos se encuentran combinados de distintas técnicas para la detección. Los detectores funcionan con la base conceptual de generar una corriente eléctrica debido a la variación de un voltaje, este cambio de voltaje resulta de un cambio de temperatura en el detector de la energía radiante o el cambio de voltaje derivado de la interacción de fotones con electrones en el material detector; este efecto es llamado fotoeléctrico. Los electrones enlazados a los diferentes átomos se sitúan en la estructura del cristal recibiendo una carga de energía. Estos electrones se liberan de su posición orbital contribuyendo al flujo de electrones. La corriente necesaria para realizar estos brinco de orbitas (*anteriores* es de  $1.24 \lambda$ ,  $\lambda$  es la longitud de onda en micrometros). En consecuencia solo una pequeña energía de enlace de alrededor de  $0.1 eV$  es liberada en los detectores fotónicos. Este tipo de detectores pueden presentar disturbios térmicos en su estructura y propiciar emisiones espontáneas por lo que los fotodetectores se enfrían a temperaturas de  $10^3 K$  a  $100^0 K$ , sin que afecte esto a la velocidad de respuesta, pero sí afectan a la capacidad de los detectores térmicos. Todo voltaje o carga eléctrica resultante del detector se amplifica. Se utilizan circuitos que contienen transistores de efectos reforzados de óxidos metálico, semiconductores (*masfets*) que se utilizan para trabajar a temperaturas bajas. Una vez ya amplificadas la señal son manejadas relativamente con facilidad, estos sistemas registran cambios y no obtienen una reacción inmediata, así una restauración o nivel máximo de operación, serán establecidos mediante el empleo de una fuente de calibración térmica. La retícula es una de las principales características de las sistemas no imaginarios.

Para todos los fenómenos de interés en los científicos e ingenieros, se necesitan cuantificar de alguna forma todos los fenómenos para poder investigarlos y entenderlos. Casi todos estos fenómenos, no son del tipo eléctrico, pero sin embargo, casi en su totalidad, los instrumentos que son utilizados para la investigación de los fenómenos, sí son del tipo eléctricos. Debido a que resultan muy fáciles de utilizar, estudiar y registrar las señales eléctricas. Como es de esperarse, no todos los instrumentos pueden ser utilizados para una investigación de algún proceso específico por lo que se debe estar en condiciones de idear instrumentos integrales o sistemas que se logren ajustar a las necesidades que la evolución exija. El concepto de transductor es muy útil para hacer más claras las diversas funciones de

un instrumento. Un transductor de entrada es un dispositivo que convierte una señal no eléctrica a una señal eléctrica. Un modificador ajusta o cambia una señal eléctrica de entrada y el transductor de salida convierte la señal eléctrica modificada en una señal no eléctrica. Un ejemplo que es ilustrativo, es un equipo de sonido de alta fidelidad, para el caso del toca discos, este tiene una aguja que se desliza sobre la superficie de un disco, este sera el transductor de entrada por que convierte una señal debil de entrada que en este caso es mecanica y que es proporcionada por los surcos del disco, la aguja convierte esta señal mecanica en una eléctrica. La funcion del preamplificador es aumentar esta señal para que despues pase al amplificador en donde este eleva el nivel de potencia de la señal y al hacer esto se excita la bobina de voz de la bocina por supuesto que la bobina sera el transductor de salida por que esta convierte la señal eléctrica en otra señal no eléctrica, que es el sonido. Otro ejemplo ilustrativo es el determinar la fuerza con que se cierra un parpado. Cuando este se cierra, requiere de una debil señal eléctrica que la proporciona el cerebro, por lo que el cerebro sera el transductor de entrada. La señal del parpado corresponde a la distancia recorrida durante la acción. La diferenciación de la señal respecto al tiempo produce una señal proporcional a la aceleración del parpado, como esta es directamente proporcional a la fuerza, el transductor de salida produce una medida en unidades de fuerza. La calibración del medidor contendrá una evaluación de la constante de proporcionalidad, se define como la masa del parpado. La señal no eléctrica a la salida sera una señal visual. Para el caso correspondiente a la radiación infrarroja se tienen dos distintos tipos de transductores de entrada de radiación: termicos o termistores y de fotones o fotoconductores.

Para los detectores termicos, su principio basico es la absorción de la radiación de infrarrojo produciendo un cambio de temperatura en el elemento detector, cualquiera de sus propiedades sensitivas a la temperatura pueden ser utilizadas, tales como los efectos mecanicos, asi como las expansiones de un solido o el cambio de presión en un gas, asi como propiedades eléctricas, como el cambio en la resistencia de materiales como metales y semi conductores; tambien el voltaje producido en la union de materiales desiguales. La respuesta a la radiación monocromática de un detector termico ideal es independiente de la longitud de onda de la radiación, mientras que la respuesta es proporcional a la energía absorbida. Para los detectores actuales, no se ha podido lograr la independencia de la absorción de la longitud de onda y la respuesta espectral de frecuencia que muestra una determinada estructura, que puede ser modificada dependiendo del uso de un cubierta anti reflejante en el elemento sensitivo. Su rapidez en la respuesta se encuentra dependiente de la razón directa de la velocidad a la cual el elemento se calienta o se enfría. Osea que el tiempo de respuesta se puede decrementar reduciendo la capacidad termica del elemento sensitivo o disminuyendo la conducción calorífica de las componentes que conducen el calor hacia el elemento. En los detectores de fotones, la energía se empieza a absorber con mas o menos absorción dependiendo de los estados eléctricos de los átomos, osea que como vayan siendo liberados los electrones, la energía que se absorbe de los fotones incidentes resulta ser los suficientemente grande para poder emitir un electron hacia un solido dentro de su espacio circundante o solamente para liberar una carga de su átomo, incrementando de esta manera la densidad de electrones libres en un solido y su conducción.

Puesto que para liberar cargas portadoras o emitir electrones solo es necesario una cantidad de energía relativamente pequeña. Los detectores fotónicos poseen un umbral a una máxima longitud de onda en particular y no muestran alguna respuesta mas alla de este umbral. Ademas mientras un foton es requerido por una carga para un flujo de energía constante, el numero de fotones por intervalo de energía es incrementado linealmente con la longitud de onda. La respuesta de un detector ideal, generalmente se incrementa linealmente hasta su umbral de longitud de onda, el tiempo de respuesta esta gobernado por la respuesta del mecanismo, osea por la liberación y la recapturación de las cargas portadoras, su operación no reside en el factor del calentamiento o enfriamiento del elemento, estos detectores en su mayoría presentan una mayor rapidez de respuesta que los termicos. En los detectores termicos ocurre que se pueden describir por tres parametros basicos los que determinan la capacidad del detector, estos son la detectibilidad, constante de tiempo y respuesta espectral.

La detectibilidad, indica que bajo condiciones ideales todos los detectores de un mismo tipo deben tener parametros identicos. Los detectores termicos responden a todas las longitudes de onda por lo que estos se utilizan para los radiómetros, pero a causa de que estos sensores termicos resultan independientes de la longitud de onda supuestamente, existen limitantes basicos en los materiales usados como detectores termicos. La constante de tiempo, es una limitante que contemplan estos detectores y es alrededor de unos pocos mili segundos, lo cual no es conveniente para los sistemas de búsqueda u otros sistemas que necesiten gran cantidad de información inmediata. Los termistores pueden estar contruidos ya físicamente en distintas formas y tamaños de pendiente de las necesidades. Pueden estar encapsulados en vidrios para utilizarse en medios corrosivos, en fin, en diversas presentaciones. Cada una tendra ventajas y desventajas, unas con respecto a otras en su tiempo de respuesta. Los termistores mas conocidos comunmente son el bolometro, termopares o termocoples y la termopila. El bolometro no es mas que un termometro de resistencia que ha sido ennegrecida para aumentar la interacción que existe entre la radiación y el termometro. Los cambios de resistencia de temperatura de mas o menos  $5\%$  por grado centigrado.

La constante de tiempo puede modificarse dependiendo de la combinación de materiales que conforman al elemento sensitivo, los bolómetros no requieren de enfriamiento y resultan faciles para su acoplamiento con un amplificador. Este instrumento se utilizo generalmente en los primeros viajes espaciales, los otros dos termistores, el termocople y la termopila, son transductores de temperatura, se oscurecen para aumentar su eficiencia y el voltaje cambia junto con la temperatura (la combinación comun es el bismuto - plata, bismuto - estado). En la union de estos filamentos se forma la union termoelectrica que sera la definición de su area sensitiva. La resistencia eléctrica para los termopares es muy baja de alrededor de  $1 a 10 \text{ Ohm}$  su constante de tiempo es de algunos mili segundos y a veces hasta algunos segundos; su fabricación es barata. Para la termopila su constitución se basa en la union de varios termopares en serie, su beneficio es que cada union termoelectrica se suman para incrementar su voltaje y al mismo tiempo su tiempo de respuesta. La conexión en serie

aumenta la resistencia y con ello resulta más fácil acoplarlo a un amplificador, su constante de tiempo es de varios segundos.

Otro tipo de transductor son los fotónicos o fotocensores, estos se pueden definir como en el que en ellos, al menos una de sus propiedades eléctricas fundamentales varía bajo la influencia de la luz o de una radiación próxima a la longitud de onda de la luz. La palabra fotoelectrónico caracteriza a una acción, esta acción es la de provocar o facilitar un paso de corriente a través del vacío, de gases enrarecidos o semiconductores, con la ayuda de un efecto que se produce al recibir radiación luminosa, incluye radiación infrarroja y ultravioleta. Con el campo o banda de luz visible se enlaza por un extremo el campo infrarrojo con ondas más largas, y por el otro extremo se enlaza por el campo del ultravioleta con las ondas más cortas. Esta por demás decir que "infra" significa "por debajo", lo que hace referencia a las frecuencias más largas. "Ultra" se refiere a las frecuencias más altas, correspondientes a las ondas más cortas, en la mayoría de estos detectores su poder de detección en magnitud es dos veces mayor que la de los térmicos, ya que cuentan con la interacción de los fotones incidentes con los electrones de el material detector y esto ocurre en instantes.

El resultado de la interacción de un foton incidente a la superficie del elemento detector, es el transferir su energía a un electron del elemento detector, este tendrá la suficiente energía para escapar de la superficie y esta acción es bien conocida como efecto fotoeléctrico o fotoemisivo. Para longitudes de onda superiores a las *1.3 micras* los electrones de la superficie no serán liberados, debido a que estos fotones que alcanzan a los electrones de un estado de no conducción inicializarán un estado de conducción produciendo cargas portadoras. El tipo de carga portadora depende de las características del elemento detector, si el elemento detector es de material semiconductor, se llama del tipo intrínseco ( *puro*) los fotones producen pares de electron huecos conteniendo ambas cargas portadoras, negativas y positivas. Si el material semiconductor es extrínseco (*impuro*), los fotones producen cargas portadoras de un solo signo, esto es, positivas o negativas, pero nunca ambas. Si se aplica un campo eléctrico con el fin de hacer una polarización en el detector, un número de cargas portadoras hará variar el flujo de corriente a través del detector. Este fenómeno es conocido como efecto fotoconductor, cuando se llegan a producir los electron huecos en la cercanía de la unión *pn* el campo eléctrico a través de la unión separa las dos portadoras para generar un fotovoltaje, llamándose efecto fotovoltaico. No se requiere de una fuente externa de polarización para este detector fotovoltaico, puesto que este efecto es entregado por la unión *pn* cuando los pares de electron huecos se forman cercanamente a la superficie del semiconductor, estos se difunden dentro del material para restablecer la neutralidad eléctrica. Durante este proceso las cargas portadoras son capaces de separarse debido al fuerte campo magnético, generando un fotovoltaje, a esto se le conoce como efecto magnético.

### 2.3 Frecuencias de trabajo.

Muchos de los sensores tienen que ser enfriados a muy bajas temperaturas para poder ser utilizados. Estos sensores trabajan en la región de *0.2 micras a 50 micras*. Estos detectores usualmente se les conocen como los de imagen y los elementales o detectores de puntos. Para el caso de que se tenga un detector térmico, la respuesta de frecuencia es proporcional a la energía radiante absorbida, por lo que se asevera que la respuesta de frecuencia espectral es una línea horizontal, bueno siempre y cuando el comportamiento del detector sea ideal, o sea que no se contemplara ninguna posible pérdida de energía internamente. Para los detectores que funcionan con el efecto fotoeléctrico, su situación es muy diferente, estos son dependientes de la sensibilidad a la energía radiada. Su respuesta está basada particularmente a todo el total de números de fotones absorbidos, para que quede establecido esta particularidad, decimos que la energía de un fotón es inversamente proporcional a la longitud de onda: a mayor energía, menor será la longitud de onda y de manera viceversa. Con esta particularidad se observa que se requiere de un mayor número de fotones para equilibrar la longitud de onda, para que se mantenga constante la energía en un intervalo de tiempo. Como resultado, cuando la respuesta espectral de un detector de fotones se realiza adecuadamente, esta se incrementa con la longitud de onda, hasta que se alcanza el máximo de respuesta.

### Capítulo 3.

#### Origen y características de la radiación infrarroja.

##### 3.1 Leyes de la radiación.

Convencidos que el infrarrojo es una radiación. Lo podemos ilustrar ahora, en el mapa del espectro electromagnético sin ninguna dificultad. La longitud de onda  $\lambda$  se da en unidades acostumbradas, esto es en: *cm micras y angstroms* ( $\mu = 10^{-4}$ ,  $10^{-3}$  *cm* =  $1\text{\AA}$ ) en este mapa es claro observar que la región de infrarrojo en el extremo de la onda corta colinda con el límite del espectro de la percepción visual en el rojo oscuro. Y en el extremo de onda larga se superpone con el espectro de las microondas en el intervalo de onda de milímetros.

La espectroscopia utiliza el número de onda  $\nu$  en vez de longitud de onda. Este número de onda es igual al número de ondas por unidad de longitud o la recíproca de la longitud de onda. Es decir, los números de onda se dan recíprocamente de un *centímetro* y las longitudes de onda se dan en *micras* así la longitud de onda de  $\mu$  será igual a  $10\,000\text{ cm}^{-1}$ , teóricamente estos parámetros están relacionados con la frecuencia  $\nu$  (*en ciclos por segundo*) y se relacionan como sigue:

$$\lambda = \frac{1}{\nu} = \frac{c}{\nu}$$

$c$  denota la velocidad de la luz:  $c = 2.997 \times 10^{10}\text{ cm}\cdot\text{seg}$  Para el punto de vista de la mecánica cuántica, la energía de un cuanto de radiación de frecuencia es:

$$\epsilon_r = h\nu$$

en que  $h = 6.24 \times 10^{-27}\text{ erg}\cdot\text{seg}$  Es la constante de Planck, conforme a esto la longitud de onda asociada con un cuanto de energía es:

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

Observamos que las leyes básicas de radiación infrarroja están relacionadas con su origen térmico, es decir la radiación emitida por diversos cuerpos cuando se calientan a cierta temperatura. Esta abarca un amplio rango de longitudes de onda. La experiencia común demuestra que dependiendo de la coloración y brillos de una superficie, estas emiten y absorben la radiación.

Kirchhoff postulo a el cuerpo negro como el radiador mas completo, efectivo y absorbente. No hay ninguno como este cuerpo negro ni el grafito en polvo o el humo negro. Las propiedades de este cuerpo se determinan por el tipo de material absorbente, opaco y con una cavidad isotermitica. Dentro de ella se realiza el proceso multiple de emision, absorcion, reflexion y reemision. La radiacion en el interior tiene la misma intensidad por doquiera, va y viene en todas las direcciones posibles; es homogénea e isotópica. La radiacion de este cuerpo esta en funcion de su temperatura sea cualquiera el material del que este hecho la cavidad. Esta radiacion que emerge de aqui obedece a la ley de Lambert. Esto es, su intensidad mayor en la direccion a la normal del plano de la abertura y disminuye con el coseno del angulo entre la normal y la direccion de observacion. La radiacion emitida por cuerpos reales rara vez se acerca a esta ley.

La ley de Stefan Boltzmann dice que el poder total de emision o emitancia radiante en el cuerpo negro, es exactamente proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. La palabra total refiere a todo el espectro de longitud de onda desde  $\lambda = 0$  hasta infinito.

La emitancia se define como la energia radiante emitida por segundo en un  $cm^2$  de area en la superficie. Energia por segundo es potencia, de aqui que la emitancia pueda ser medida en unidades de vatio  $cm^{-2}$  la temperatura  $T$  se mide en grados Kelvin. La variacion de la energia radiante emitida con la direccion asignada se define como la radiancia, tambien se puede definir como la energia emitida por  $cm^2$ . La emitancia de cualquier cuerpo real es menor que la del cuerpo negro. Dice la ley de Kirchhoff:

$$w = \epsilon w_b = \alpha w_b$$

Donde  $w_b$  es la emitancia del cuerpo negro  $\epsilon$  se llama emisividad, la razon entre la energia radiante absorbida por un cuerpo y la energia incidente, se denota como absorbancia  $\alpha$ . Todas las cantidades radiométricas dependen de la longitud de onda, definiendo  $w_\lambda$  (emitancia espectral) como la cantidad de energia radiante de onda de  $\lambda$  a  $\lambda + d\lambda$ . Esta ley se aplica tambien a la emitancia de cuerpos opacos:

$$w_\lambda = \epsilon_\lambda w_{b\lambda} = \alpha_\lambda w_{b\lambda}$$

de esta forma puede decirse de la ley de Kirchhoff, que a una temperatura dada, un cuerpo absorbe mas fuertemente radiacion de la longitud de onda que emite.

La ley de Planck describe la dependencia espectral de las propiedades de la radiacion de un cuerpo negro respecto de la temperatura. En su forma mas sencilla, expresa la densidad espectral de energia,  $w_\nu$  esto es, la cantidad de energia radiante por unidad de volumen de la cavidad del cuerpo negro por intervalo en la unidad de frecuencia, en funcion de la temperatura  $T$  y la frecuencia  $\nu$ ; por la formula siguiente (para radiacion no polarizada)

$$u = \frac{8 \pi h \nu^3}{c^3 (e^{h\nu/kT} - 1)}$$

Esta fórmula contiene la constante de la velocidad de la luz  $C$ ,  $A$  es la constante de Boltzmann, su valor es  $1.380 \times 10^{-16}$  ergios/grado y la constante de Planck  $h$  es el cuanto de energía radiante.

La fórmula de Planck más práctica que se aplica a una pequeña abertura donde escapa la radiación del cuerpo negro. Midiendo su rapidez de flujo de energía radiante por unidad de área de la abertura con intervalo de longitud de onda  $d\lambda$ , a una longitud de onda  $\lambda$  o emitancia espectral, es:

$$w_{\lambda, b} d\lambda = \frac{2 \pi h c^2 d\lambda}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)}$$

La ley de Planck describe exactamente las propiedades de la radiación de un cuerpo negro sobre todo en el intervalo de longitud de onda, de  $0$  a  $\infty$

$$w_{\lambda, b} = \frac{c_1 T}{c_2 \lambda^5} \quad c_1 = 2\pi hc^2 \quad c_2 = hc/k$$

$C_1$  y  $C_2$  son constantes de radiación respectivamente.  $w_{\lambda, b}$  es una aproximación para longitudes de onda largas, esta ley de Rayleigh Jeans. El producto de  $\lambda$  es mucho mayor que  $100\,000$  micras grados esto es a temperaturas muy altas o longitudes de onda muy grandes. Esta ley predice que  $w_{\lambda, b}$  ha de hacerse infinitamente mas corta a medida que  $\lambda$  se acerque a cero. Si se representa gráficamente la fórmula de Planck para diversas temperaturas se obtienen las curvas mostradas en la figura 3-1. Observando que la emitancia espectral es cero a  $\lambda = 0$  luego aumenta rapidamente, pasa por un maximo para  $\lambda_{max}$  y despues tendiendo a cero para longitudes de onda muy grandes. Cuanto mas alta la temperatura, tanto mas corta es la longitud de onda a la cual ocurre el maximo. Es en realidad si se toma la derivada de la fórmula de Planck con respecto a  $\lambda$  y se halla el maximo, vemos  $\lambda_{max} = C_3 / T$  la constante vale  $2998$  micras grado. Esta es la ley de Wein del desplazamiento que expresa matemáticamente la observación comun en donde los radiadores termicos brillan con un color rojo oscuro cuando se calientan a temperaturas relativamente bajas (por ejemplo  $1200^\circ K$ ), pero luego aparecen mas anaranjados o amarillos a medida que se eleva su temperatura. Las estrellas muy calientes (por ejemplo, sirio,  $11\,000^\circ K$ ) emiten luz blanca azulada.

A temperaturas bajas, el maximo de la curva de Planck esta en el infrarrojo. A temperatura ambiente (alrededor de  $300^\circ K$ )  $\lambda_{max} = 9.7 \mu$ . A la temperatura del nitrogeno liquido ( $77^\circ K$ )  $\lambda_{max} = 38 \mu$  si se integra la emitancia espectral desde  $\lambda = 0$  hasta  $\lambda = \infty$  obtenemos la emitancia total:

$$w_b = \int_0^\infty w_{\lambda, b} d\lambda = \sigma T^4$$

Que esta es la ley de Stefan Boltzmann en terminos de las constantes fundamentales.

$$w_{\lambda} = \int_0^{\infty} w_{\lambda b} d\lambda = \mathcal{G} \tau^{-1}$$

Que esta es la ley de Stefan Boltzmann en terminos de las constantes fundamentales

$$\mathcal{G} = \frac{2 \pi^5 k^4}{15 c^2 h^3} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ erg.cm.}^{-2} \text{ gra.}^{-4} \text{ sg.}^{-1}$$

En la figura 3-1. rapidamente se puede ver que  $w_{\lambda}$  representa el area bajo la curva de Planck. Esta area aumenta rapidamente con la temperatura. Es de interes saber que la energia emitida en cierto intervalo de longitud de onda, es<sup>10</sup> dato se obtiene integrando  $w_{\lambda} d\lambda$  entre los limites deseados. Ejemplo, un cuerpo negro a  $4500^{\circ}\text{K}$ . (como un arco de carbono/tiene  $\lambda_{max}$  a  $0.65 \mu$  emite un 25% de su energia radiante en las regiones visible y ultravioleta del espectro, mientras la mayor parte de las regiones es radiada en el infrarrojo.

Los cuerpos que son emisores, no cumplen las leyes de los cuerpos negros en un gran intervalo de longitudes de onda, aun cuando puedan acercarse al comportamiento del cuerpo negro en ciertas regiones espectrales, como por ejemplo, la pintura blanca es perfectamente blanca en la region visible, pero esta se vuelve gris a  $3 \mu$  de longitud de onda, aproximadamente ( $\epsilon = 0.5$ ) Y para una longitud de onda de aproximadamente  $3 \mu$  ( $\epsilon = 0.9$ ) se vuelve casi negro. Unas de las principales causas de que difieren del cuerpo negro, es que transmiten parte de su radiacion, con esto quiero decir que no son opacos, y otra cosa es que reflejan parte de ella. Lo que transmiten depende de su espesor finito, el producto del espesor y el coeficiente de absorcion determina la transmitancia de un cuerpo. Los cuerpos de espesor infinito son siempre opacos. La reflexion, es mas notable en los metales y no tanto en otros materiales, los metales seran el extremo opuesto de un cuerpo negro debido a que la radiacion incidente sobre una superficie metalica, la fraccion no absorbida sera reflejada. La reflexibilidad espectral  $\rho_{\lambda}$  es el cociente de la energia reflejada y la energia incidente a una longitud de onda dada podemos escribirla como:

$$\rho_{\lambda} + \alpha = 1$$

Pues la suma de dos fracciones debe dar el total. La ley de Kirchhoff  $\epsilon_{\lambda} = \rho_{\lambda}$  se aplica a cuerpos opacos y podemos escribir  $\epsilon_{\lambda} = 1 - \rho_{\lambda}$ . Para la mayoria de los metales la reflexibilidad es alta y no tiene mucho que ver con la longitud de onda, por lo cual la emisibilidad de los metales es baja. En un cuerpo semitransparente, cuando este se calienta la radiacion generada en su interior ha de abrirse paso hacia las superficies a traves del material en el cual esta parcialmente absorbida. Cuando llega a

la superficie, parte de ella es reflejada hacia el interior y así sucesivamente hasta debilitarse. Han de sumarse todas para saber la emitancia total

$$\epsilon = \frac{(1 - \rho_{\lambda})(1 - \tau_{\lambda})}{(1 - \rho_{\lambda} \tau_{\lambda})}$$

Aquí,  $\epsilon$  es la transmitancia espectral que es igual al cociente de la energía radiante transmitida por la placa y la energía incidente con la longitud de onda  $\lambda$ . Cuando la placa es opaca  $\tau_{\lambda} = 0$ . La fórmula se reduce a la ley de Kirchhoff

### 3.2 Fuentes térmicas y no térmicas.

La fuente de radiación térmica de particular importancia es el cuerpo negro, esta formada por una cavidad que sea opaca y que sus paredes estén construidas con un material de alta emisividad. Para que este cuerpo comience a emitir radiación infrarroja, se calientan sus paredes a una temperatura constante. La teoría exige que el área de la abertura de la cavidad debe ser pequeña en comparación con el área de la superficie de la cavidad. Si el orificio es pequeño, solo saldrá un pequeño flujo de radiación, se debe tener una cavidad con paredes de un material de alta emisividad, entonces puede alcanzarse equilibrio radiactivo con un número pequeño de reflexiones internas y es con esto posible el uso de un orificio bastante grande. Los radiadores de cavidad usualmente se hacen de forma de cilindros o conos huecos, su emisividad aparente puede calcularse por distintos métodos. Algunos materiales utilizados en estas cavidades son por ejemplo, el cobre oxidado y óxido de aluminio, dependiendo de las temperaturas de operación. En este caso se pueden ennegrecer las paredes con una mezcla de óxidos de cromo, níquel y cobalto. Para temperaturas de 1500 °K, el radiador se hace de grafito con una capa de gas inerte como el argón, para evitar su rápida oxidación, pero la emisividad de grafito es de 0.5m en el infrarrojo medio y aun más baja en el infrarrojo lejano.

En los radiadores sólidos es esencial que tenga el material una emisividad razonablemente alta y una curva de emitancia espectral lisa. Con una barra de carburo de silicio sinterizado calentándola por pasarle una corriente alterna, su emisividad media es aproximadamente 0.75 en el intervalo de longitud de onda de 2m a 15m.

Con temperatura de operación de 1300-K, el carburo de silicio se oxida lentamente hasta desintegrarse. Otra fuente típica surge al aplicarle corriente continua a una mezcla de óxidos de circonio y de itrio.

Los radiadores de metal, en forma de calentadores eléctricos se usan domesticamente e industrialmente, por su comodidad y no tanto por su emisividad que es mala. La emisividad del wolframio, que es con la que están hechas las lámparas térmicas infrarrojas, es de solo 0.28 m a 1m, 0.10 m a 2m y 0.05 m a 5m. Y al rededor de 0.01 m desde 10 m. Las aleaciones que resultan

algunos mejores tienen formación de óxidos en su superficie y resisten las altas temperaturas. El nicromo es una aleación usada típicamente en radiadores, calentadores, tostadores y hornos eléctricos tiene una emisividad de 0.85 aproximadamente a  $1\text{ m}$  y baja lentamente a unos  $0.7$  a  $10\text{ m}$ .

El sol, es una fuente de radiación de máxima importancia, su densidad de flujo radiante total medio por encima de la atmósfera terrestre es de aproximadamente de  $2000\text{ cal cm}^2$  por minuto, es decir  $1400$  vatios por metro cuadrado. Su uso en el laboratorio no es cómodo, aunque esta radiación se encuentra presente en todos los fenómenos naturales de la tierra. Se ha construido un espejo parabólico que concentra todo el flujo radiante utilizándolo como horno solar (hasta  $4000\text{ K}$ ) si no fuese por la atmósfera se encontraría que el espectro solar sería muy parecido a las curvas de Planck para un cuerpo negro. Si se hacen coincidir las curvas de emulancia solar con la de las curvas espectrales del cuerpo negro en las distintas regiones espectrales se hallarán las temperaturas cuando se observa la radiación superpuesta, procedente de las diversas capas gaseosas de la superficie solar, las cuales tienen diferentes propiedades de radiación, según su profundidad. La distribución espectral de la energía radiante solar, tal como se recibe después de atravesar la atmósfera terrestre, se extiende a las mediciones de la emulancia solar hacia el infrarrojo y se han identificado varias bandas de absorción procedentes del agua atmosférica, del dióxido de carbono, del ozono y otros gases de la atmósfera.

El descubrimiento de fuentes electrónicas cuánticas de radiación conocidas ahora comúnmente como láseres (*laser es la compuesta de las iniciales "light amplification of simulated emission of radiation" amplificación luminosa por emisión estimulada de radiación*). Aunque se utilicen en la mayoría como generadores que como amplificadores de radiación, cuando funcionan como generación solo se necesita que exista la retroalimentación, esta se efectúa por espejos que reflejan de nuevo parte de la radiación hacia el medio del láser; la distancia entre los espejos, están en relación con la longitud de onda de la radiación de láser, determinando la fase, esta fase tiene que ser la adecuada a la entrada. En el láser de rubí la parte esencial es el medio en el que se origina la amplificación de la energía, el rubí es el medio para producir el láser. Se encuentra compuesto por óxido de aluminio (*zafiro*) con un  $0.05\%$  de óxido de cromo lo que le da un toque rosado en su aspecto. Este rubí emite radiación monocromática en el rojo intenso, aproximadamente a  $0.682\text{ m}$ . El ion de cromo,  $\text{Cr}^{3+}$ , es la sustancia activa a la que se debe esta emisión en particular.

El cristal de zafiro tiene disueltos los iones de cromo, en particular, iones de tierras raras y de uranio están alojados en las redes estructurales del fluoruro, calcio o de wolframio. El calcio son cristales útiles para el láser.

Para el láser de rubí un ejemplo esquemático es el de la figura 3-2. Tiene una lámpara de destello (*flash*) y un espejo elíptico, el cual envía a la barra de cristal un impulso de radiación intensa de espectro blanco, de este bombeo, parte de los iones de cromo absorben energía en su banda de absorción verde azulada y son llevados a un estado excitado (*meta estable*). En circunstancias

normales estos iones regresarian rapidamente a su estado fundamental, con emision de radiacion de fluorescencia relativamente debil en una ancha banda alrededor de  $0.7 \mu$ . Cuando el impulso de luz es potentisimo hace que los iones de cromo ascendan momentaneamente al estado excitado, la radiacion de los iones que experimentan una transicion estimulan a que los otros, que estan todavia en estado meta estable, comiencen a unirse al proceso. Los espejos en sus extremos reflejan nuevamente la radiacion hacia el interior del cristal generando un campo electromagnetico intenso, necesario para inducir la emision estimulada. Al hacer la combinacion de una emision espontanea y una estimulada rapidamente toma proporciones de alud, y la radiacion emitida toda de la misma fase, surge como una explosion de radiacion a traves de uno de los espejos de los extremos que es parcialmente transparente. Esta explosion posee densidades energeticas de muchos  $\text{Aw/cm}^2$  y  $\text{megavoltios/cm}^2$ . La poca amplitud de la banda resultante normalmente de  $0.1 \text{ \AA}$ , se deba a un efecto resonador sintonizado de los espejos extremos, que estan separados exactamente a una distancia de un numero entero de longitudes de onda. La radiacion es coherente en el sentido de que tiene la misma fase sobre una parte importante del area de extremo de la barra de rubi. Como los frentes de onda son planos, la radiacion emitida se propaga como un haz estrecho cuya extension angular esta limitada exclusivamente por la difraccion en la abertura de salida. Con circunstancias de una temperatura muy baja del cristal, como por ejemplo, a  $77^\circ \text{K}$  (*temperatura del nitrogeno liquido*), para un cristal de volframato de calcio estimulado con neodimio, es posible obtener un estado constante de excitacion y de emision continua. El laser de rubi es una fuente de radiacion monocromatica y de emitanca espectral extremadamente alta. Cuando son laseres de gran potencial no se logra su operacion continua, solo para los de baja potencia polarizada, si se orienta debidamente el cristal.

El laser de gas, lo invento A Javan en 1961, el medio de la amplificacion que se utilizo fue el gas de helio y neon a baja presion, ionizado por una descarga electrica. El neon fue el elemento activo, generando el exceso de atomos de neon, que están en estado excitado por colisiones con atomos de helio, excitados a su vez por colisiones con electrones en la descarga. La excitacion de electrones por descarga reemplaza el bombeo del destello de luz blanca en los laseres de rubi. La emision estimulada se realiza por espejos colocados a los extremos del tubo de descarga y alineados exactamente de modo que sintonicen un campo intenso de ondas estacionarias a lo largo del tubo. Su operacion es continua pero su densidad energetica es pequena comparada con el laser de rubi pulsado.

Esta radiacion es coherente altamente monocromatica y puede ser polarizada. Estos laseres de gas pueden emitir longitudes de onda discretas correspondientes a las transiciones de radiacion permitidas entre ciertos estados de energia del atomo de neon excitado, solo una longitud de onda de todas ellas se encuentra en el rojo visible ( $0.633 \mu$ ). Las demas se encuentran en el extremo cercano del infrarrojo. Hay otros gases y mezclas de gases que emiten muchas otras longitudes de onda, muchas de ellos en el infrarrojo.

El laser junta ocurre en las puntas de diodos semiconductores. Cuando pasa corriente en la direccion delantera en una conexion rectificadora, *pa* la recombinacion de portadores de corriente (*electrones* -

### Origen y características de la radiación infrarroja

corriente en la junta por encima del valor de umbral (del orden de  $10^3$  a  $10^4$  amp/cm<sup>2</sup>), en estas condiciones la radiación emitida tiene las características típicas de una emisión de laser. Es altamente monocromática (alrededor de  $0.5 \text{ \AA}$ ), coherente y muy intensa. Estos presentan una alta elevación de temperatura a causa de su densidad de corriente, estos funcionan con impulsos de breve duración y a temperaturas muy bajas (nitrogeno líquido). Su eficiencia cuántica es muy alta, es decir, se emite casi un fotón por cada electrón (o hueco), transportándolo a través de la conexión. La longitud de onda emitida corresponde aproximadamente a la brecha de energía que han de cruzar los portadores entre la parte superior de la banda de valencia y la parte inferior de la banda de conducción del semiconductor, utilizando un semiconductor de Ga As, la brecha de energía es de  $1.45 \text{ eV}$  correspondiente por la ecuación:

$$\lambda_{cm} = \frac{124 \times 10^{-4} \text{ eV cm}}{E_g}$$

A una longitud de onda de  $0.85 \text{ m}$  en un material (In As) es de  $0.35 \text{ eV}$  y así  $\lambda = 3.5 \text{ m}$ . Estos láseres de junta son fuentes útiles de infrarrojo, en particular cuando se necesita un pequeño tamaño y alta eficiencia.

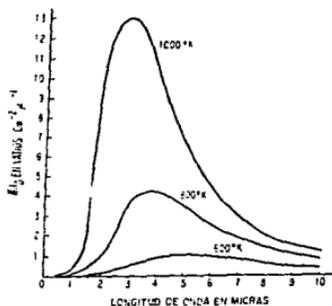
### 3.3 Fuentes continuas de radiación

Las fuentes continuas de radiación que se usan en la región infrarroja son, por ejemplo, las de arco de carbón, Mendenhall wedge, filamentos incandescentes, varillas de carbón, y Nernst glower. De todas estas fuentes, las más populares son aun las del filamento Nernst y la global rod (varilla global). La que se utiliza en temperatura altas para propósitos generales, es la del arco de carbón, su temperatura efectiva de operación se encuentra en el orden de los  $3000 \text{ K}$ , no es difícil de obtener este tipo de fuente. Algunos espectroscopistas suponen que existe cierta inestabilidad en esta fuente lo que ocasiona una operación errática en sus mediciones, aunque se use como una fuente estándar. Los cambios en la corriente que circula por el arco, alteran en la efectividad de la fuente y esto se verá reflejado en una influencia sobre el brillo aparente del arco. Donde justamente salta el arco, se le llama cráter. Se tiene que tener mucho cuidado en la entrada del espectómetro, por que en su centro, puede haber una ruptura debido al poderoso arco. Su funcionalidad se observa en su estabilidad, una fuente del tipo de global rod es del  $\pm 2\%$ . Para longitudes de onda cortas su intensidad mejora mayormente.

Otra fuente que es muy vieja y que da una aproximación a la de un cuerpo negro, es la Mendenhall wedge. Si una franja de metal refractario de forma larga y delgada tipo wedge se calienta por una corriente eléctrica, surge la radiación desde el centro del lado concavo de la wedge, esta radiación se aproxima a la de un cuerpo negro, después esta será reflejada varias veces antes de emerger. Hay

Otra fuente que es muy vieja y que da una aproximación a la de un cuerpo negro, es la Mendenhall wedge. Es una franja de metal refractario de forma larga y delgada tipo wedge se calienta por una corriente eléctrica, surge la radiación desde el centro del lado cóncavo de la wedge, esta radiación se aproxima a la de un cuerpo negro, después esta será reflejada varias veces antes de emerger. Hay otros metales que pueden ser operados a muy altas temperaturas como el tungsteno, molybdenum y tantalio. Estas fuentes se deterioran cuando están operando a altas temperaturas y encontrándose al aire libre. Las fuentes del tipo de Mendenhall wedge o un cilindro ahuecado, están limitadas como los filamentos incandescentes, por que se tiene la necesidad de tener la fuente dentro de una atmósfera controlada (*neutral*). Estas fuentes pueden ser operadas a más de 3000°K, correspondiendo a una rica emisión de longitudes de ondas cortas. Las cubiertas están echas a la medida con ventanas de vidrio, de cuarzo, y zafiro. Se tiene que evitar el calentamiento de estas frágiles ventanas. El filamento de Nernst es de uso comercial, tiene forma de un filamento cilíndrico muy estrecho de 1 a 3 mm en su diámetro y a unos pocos centímetros a lo largo, y consiste de una mezcla de tierras raras y óxidos y es usualmente hecho a la medida para electrodos con alambres de platino. La potencia disipada es del orden de 100 a 200 watt y la longitud de onda es determinada por el voltaje de operación. Cuando se enfría, la resistencia es alta, y el filamento será precalentado por una fina flama de gas con una pequeña pieza de algodón absorbente o por un alambre pequeño de platino caliente. Los electrodos están sujetos con una separación y estos son mecánicamente frágiles y pueden deformarse. Esta fuente es utilizada en la región del cercano infrarrojo, sin embargo su vida está limitada por los malos logros que surgen de las fracturas mecánicas, deformándose o arqueándose los electrodos.

La fuente del tipo Welsbach o de gas incandescente, no es muy utilizada, esta consiste en una malla envuelta de seda impregnada con torio y un pequeño porcentaje de cerio, que es calentado a incandescencia por una flama de gas. Tal incandescencia es usada como fuente de radiación infrarroja para trabajar con longitudes de ondas cortas aproximadamente de  $15 \mu$ . El gas incandescente fue originalmente introducido y usado como una fuente comercial de radiación visible. El elemento torio, en su forma pura tiene una emisividad muy baja y con una pequeña porción de cerio mejora la emisión en la región visible. La emisividad de esta mezcla se muestra en la figura 3-3, es de esta manera que hay una alta radiación en la región visible y una baja en el cercano infrarrojo, y es relativamente alta más allá de  $10 \mu$ .



Curva espectral de un cuerpo negro, según la ley de Planck.

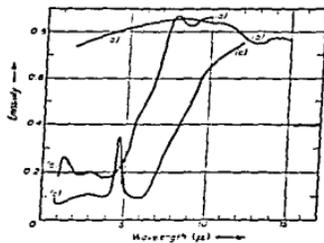


Figura 3-3 Emisividades de fuentes de radiación  
(a) Material Nicmat; (b) Silicon carbon (Globar)  
© Mezcla de Cerro y Tono



Figura 3-2 Diagrama esquemático de un láser de rubí.

## Capítulo 4

### Detectores de infrarrojo

#### 4.1 fundamentos de la detección infrarroja

Einstein trataba de explicar de manera convincente el efecto fotoeléctrico para todos los científicos en general. Planck con anterioridad había introducido este concepto de manera teórica, en las leyes de radiación, pero parecía ser que el contexto se trataba de un dispositivo matemático en lugar de un concepto físico. Einstein apareció de manera crucial para explicar el fenómeno llamado efecto fotoeléctrico, decía que la energía emitida por el efecto fotoeléctrico dependía de la frecuencia de la intensidad luminosa, y que era poco favorable que fuese por la intensidad luminosa. Esta se encuentra resumida en la figura 4-1, donde la máxima energía limitada por los fotoelectrones se encuentra determinada por la medida del voltaje  $V_0$  que está dibujado contra la frecuencia de la iluminación incidente. Dos características principales surgen de este experimento de cuantificación; la primera es que hay un definido rango en el corte de frecuencia y una vez que la frecuencia de iluminación está por debajo de un cierto valor en su frecuencia, no existiría la emisión en los fotoelectrones, de la manera que la intensidad de la radiación no afectaría a la corriente fotoeléctrica. El segundo punto crucial, es aquella en que la variación del voltaje con la frecuencia, se comporta meramente lineal, existiendo una correspondencia entre la máxima energía emitida por un fotoelectrón y la frecuencia de la iluminación. Einstein supo reconocer que este fenómeno era el postulado de Planck, en que los osciladores atómicos emiten y absorben radiación en cuantos energéticos, y la magnitud era proporcional a la frecuencia. Además si este concepto de emisión de cuantización y absorción de la radiación en cuantos, proponía un modelo de preferencia de desplazamiento de la iluminación y su caída sobre una superficie metálica, que traerían una serie de paquetes de onda, conteniendo aun energía  $h\nu$  y que no tenía nada que ver con la idea de una continua oscilación electromagnética, como el vector de Maxwell. Estos dos modelos están representados en la figura 4-1, de una manera muy contrastante, con esto es evidente que existen completamente nuevas predicciones para las características de la corriente emitida por el efecto fotoeléctrico.

De esta manera sobre la nueva imagen propuesta por Einstein de cuantos, la emisión de un fotoelectrón dependerá enteramente de la energía contenida dentro de cada uno de los paquetes de onda incidentes, quedando la posibilidad de que la fotoemisión dependerá enteramente de la frecuencia de radiación y no sobre el número de paquetes de onda que llegan a la superficie del metal (*intensidad con la que llega la radiación*)

La explicación de la ecuación fotoeléctrica, se basa en las principales características de la teoría de Einstein del efecto fotoeléctrico y que pueden ser resumidos fácilmente en una fórmula directa expresada como una ecuación

$$e v_s = \frac{m v^2}{2} = h \nu - e \phi$$

La primera de las dos partes de la ecuación representa las dos diferentes expresiones para la máxima energía cinética emitida por el fotoelectron, medida para cualquiera de los dos terminos, en unidades de diferencias de potencial eléctrico. Donde  $m$  es la masa del electron y  $v$  es la velocidad. La teoría de Einstein predijo que la energía cinética era igual a las energías de incidencia de un cuanto  $h \nu$  menos la mínima energía requerida para escapar de la superficie metálica, que es medida por la función de trabajo como se explicaba anteriormente y denotada aquí por el símbolo  $\phi$ . El valor de esta función es usualmente dada en unidades de *electron Volts*. Frecuentemente llevados a través en terminos de Joules, como unidades de energía. La precisión de esta ecuación fotoeléctrica fue verificada a detalle por el trabajo de Milika en 1916, pero la idea general estaba propuesta por Einstein en 1905, fue fácilmente aceptada, desde entonces esto tuvo un acontecimiento en los medios científicos que contradice el modelo clasico.

Existen distintos tipos de detectores por ejemplo, los fototubos que son ideales para los detectores celestiales, detectores de sulfuro, radio antenas, el ojo humano y fotografías. Estas están siendo utilizadas para los distintos campos en la investigación científica. Mas adelante están los análisis de los procesos de detección de los fotones

Un punto importante es el ruido eléctrico que aparece a la salida de los detectores, despues de analizar los limites de la detección para ese detector es esencial tener un claro entendimiento de las características de dichos ruidos, hay varias clases de ruido, obviamente estas dependen del tipo de salida que tenga el detector. Las pruebas para un detector en el laboratorio están basadas en dos mediciones que son un estándar. Primero es medir de varios detectores el parametro *D (detectabilidad)* su constante de tiempo, resistencia, espectro del ruido y la segunda prueba es la calibración de la respuesta del detector, así que todo esto determina la capacidad de eficacia para hacer mediciones de radiaciones absolutas. Estos parametros son los acostumbrados a contemplarse en el diseño y fabricación de un detector de infrarrojo. Un ejemplo de un detector termico es una termopila. La radiación incidente sobre la termopila es absorbida y así se eleva su temperatura, y un voltaje termico se genera de manera proporcional a la temperatura de ascenso. La respuesta del detector puede ser determinada en terminos de las unidades electricas. El laser es una fuente de altísima radiación coherente, esta se pueden obtener cuando se utilizan tecnicas heterogeneas y homogeneas en el infrarrojo

Existen detectores adecuados para usarse en los sistemas de comunicacion de infrarrojo y en sistemas opticos. Los requerimientos no son los mismos para aquellos que normalmente son utilizados para convencionales busquedas y aplicaciones en la quimica, astronomia etc. Para las comunicaciones se utilizan detectores que tengan una rapida respuesta. Un detector comunmente es equipado con un escudo para proteger el campo de vista del detector, el proposito de este escudo es el de obstaculizar los fotones que se encuentran alrededor del detector y que alcanzan a introducirse ya que estos producen ruido a la salida del detector. El valor de  $\mathcal{D}$  para un detector con este escudo es proporcional a la cantidad del protector provisto.  $\mathcal{D}$  denota la deteccion normalizada en un area de  $1 \text{ cm}^2$  y un ancho de banda de  $1 \text{ Hz}$  y adicionalmente a un angulo solido de  $\pi$  radianes. Un camino para incrementar la  $\mathcal{D}$  de un detector es mediante una inmersion optica, esto se refiere a que el detector tenga contacto con lentes hechos de un material que tenga un alto indice de refraccion. La teoria de sumergir los detectores muestran que cuando la deteccion es limitada por el ruido que se genera internamente, el valor de  $\mathcal{D}$  puede ser incrementado por un factor igual al indice de refraccion de  $\mathcal{N}$  es un camino relativamente poco costoso para este incremento.

#### 4.2 los fotodetectores

Los dispositivos que cumplen con la idea de recibir la luz de alguna manera y transformarla en energia electrica, se conocen como fotofet, fotodiodo de avalancha y fototransistor. El fotofet significa "foto field effect transistor", es decir, fototransistor de efecto de campo. Estos fotofet, estan hechos con tecnologia de oxido de metal de semiconductores (*mos*). Su modo de operacion es muy parecido de alguna manera al de los fotodiodos y fototransistores, claro que existen sus diferencias; en general se puede decir que este dispositivo presenta: en su rango de linealidad, una respuesta en frecuencia muy superior y con mayor ganancia que el fototransistor, es decir, que resulta mas preciso que un fototransistor, esto ultimo dependiendo de las caracteristicas necesarias que se requieran para resolver dicho problema. El fotodiodo de avalancha resulta ser muy sensible a la temperatura y la ganancia esta en estrecha relacion con la polarizacion en inversa. Sus respuestas en frecuencia resultan ser muy rapidas, cuando se encuentran las senales muy cercanas al rango del espectro visible del infrarrojo. Estos fotodiodos de avalancha suelen tener otro diodo en conjunto para formar una referencia y de este modo eliminar un poco la sensibilidad de las variaciones de temperatura. Los fototristores son dispositivos de *switches*, que se activan por una corriente controlada externamente, esta corriente solo sirve para activar al dispositivo, ya una vez activado el circuito esta corriente no se vuelve a utilizar para nada. Un tipo de transistor por mencionar es el SCR "silicon controlled rectifier" o rectificador controlado por silicio, ya que estos dispositivos son utilizados en su mayoria para controlar corrientes muy grandes necesitan de circuitos electronicos especiales para activarlos externamente. El resultado de la conjuncion de un SCR con algun fotodiodo en un encapsulado es llamado fototristor. Este dispositivo presenta uniones del tipo *pnpn* en el cual se cuenta con acceso al anodo, catodo y una compuerta del dispositivo. Su modo de operacion tiene de alguna manera el mismo principio que el

transistor convencional y posee los mismos parámetros que los fotodetectores. Un parámetro muy importante que se añade es la corriente de la compuerta  $I_g$  "gate current", es decir, la corriente de disparo que activa el dispositivo. De todos los parámetros vistos y las características en general, se analizan bien, para poder seleccionar cual de todos cumple con una mejor compatibilidad con el emisor que se elija utilizar para que el sistema se logre acoplar ópticamente lo mejor posible.

#### 4.3 características electro ópticas de los fotodiodos

Al incidir luz en el fotodiodo, en la unión  $p-n$  se formara un movimiento entre los huecos y los electrones libres transformandose en una corriente a la que llamaremos corriente fotoeléctrica. La contribucion del par electro-hueco a la fotocorriente dependera de que tan rapido puedan separarse entre ellos antes de juntarse y anularse. Si una unión  $p-n$  es polarizada en inversa en la zona cercana a la union aparece una region desierta de cargas y los extremos de la region se comportan como un capacitor, cuya capacitancia dependera del ancho de esta region y de la carga que puedan almacenar en sus placas; la energia del capacitor determinara la capacidad del fotodiodo. Esta conclusion es muy interesante, por que nos damos cuenta de que si de alguna manera se varia esa capacitancia aumentaremos la efectividad del fotodiodo. Una manera de hacerlo es introduciendo entre la unión  $p-n$  un material semiconductor puro, llamado material intrinseco, y lo que resulta de todo esto es conocido como el diodo. La importancia de esto es que las características del fotodiodo involucran la relacion entre la luz que recibe un fotodiodo y la fotocorriente. Tambien debemos recordar que si el fotodiodo es polarizado en inversa, la corriente de fuga se incrementa con el aumento del voltaje, y debe buscarse que esta sea lo mas bajo posible para evitar que se produzca un efecto de avalancha por causa de la corriente inversa y dañe el fotodiodo, esto es una clara desventaja.

El uso específico del diodo determinara como sera usado, ya sea si polarizado en inversa y la magnitud de voltaje en la polarizacion en directa. Las características que se contemplan en este nivel son: 1) Eficiencia cuantica, que se refiere al numero de pares de electron hueco creados por cada foton de luz que incida en la juntura  $p-n$  del fotodiodo. 2) La respuesta de flujo, esta es la característica que nos relaciona la salida de la fotocorriente en Amperes y los watt del flujo radiante que causan la fotocorriente. 3) Respuesta espectral se refiere a la frecuencia a la que se trabaja y como responde el fotodiodo al entregar cierta corriente. En estas graficas del fabricante se puede ver la magnitud relativa de la respuesta que se representa solo ante ciertas frecuencias y se nota como hay un valor de longitud de onda para la cual existe un valor maximo. Irradiacion contra la fotocorriente, dado que la fotocorriente tambien depende de la polarizacion inversa aplicada al diodo, es posible graficar esa fotocorriente como una funcion de la polarizacion en inversa a niveles de irradiancia.

*Características ópticas de los fotodiodos:* Aquí se plantea que el diodo tiene un ángulo de incidencia del haz de luz óptico es decir, que la recepción del haz luminoso depende de la posición física del fotodiodo, y esto se interpreta como el grado de alineación que hay entre el emisor y el receptor. Este parámetro se mide utilizando la relación que hay entre el ángulo de incidencia del haz sobre el fotodiodo y la fotocorriente producida, esta gráfica puede estar representada en el plano cartesiano o en el polar. Un diodo con lente tiene un mayor ángulo de incidencia. Las características eléctricas de los fotodiodos son muy similares a las del diodo eléctrico convencional, se involucra su voltaje máximo de operación, su máxima corriente de mantenimiento, su voltaje en inversa, etc. Y los datos se dan en tablas de especificaciones del fabricante. Analizando los parámetros VBR o voltaje de rompimiento y es el máximo voltaje de polarización en inversa que se puede aplicar al diodo antes de dañarlo. CT, se refiere a la capacitancia de la unión  $p-n$  este parámetro nos indicará que tan rápida es su respuesta en el tiempo para los cambios de intensidad de luz incidente a la juntura, esta alcanza valores de varias decenas de  $pf$ . Si la capacitancia de la unión  $p-n$  es muy grande su tiempo de respuesta a los cambios de intensidad de luz también lo serán, es decir, será más lento. Si se aumenta el voltaje de la polarización en inversa tendrá como consecuencia el reducir el tiempo de respuesta, pero existe al mismo tiempo un aumento en la corriente de fuga. TR, FT, FC, la respuesta en frecuencia es muy distinta a la respuesta espectral y no se deben confundir.

El diodo no se comporta de manera ideal al recibir una señal tarda un tiempo en darse cuenta para después empezar con la actividad en la juntura, y tiene que entrar en una estabilización. A todo este tiempo se le llama tiempo de subida o TR. Usualmente al cesar el estímulo sigue por un pequeño lapso de tiempo en donde ocurre la actividad en la juntura, hasta que alcance de nuevo sus condiciones iniciales, esto es sin estímulo. Todo este tiempo que transcurre en llevarse a cabo esta actividad se le denomina tiempo de bajada o TF. PD en un semiconductor todas sus uniones quedarán muy sensibles a los cambios de temperatura. La disipación de potencia en dispositivo, es decir un voltaje aplicado por una corriente circulante.

#### 4.4 Características electro-ópticas de los fototransistores

El fototransistor es utilizado en muchísimas aplicaciones. Este está constituido por un fotodiodo en conjunción con un amplificador. Este amplificador tiene que cumplir con ciertas características requeridas para el aumento del efecto de fotocorriente. Un transistor comercial debe tener en una de sus uniones  $p-n$  una polarización en inversa, esta unión será la del colector base y la otra unión  $p-n$  corresponde a la del colector emisor, que debe estar polarizada en directa para así poder amplificar la corriente aplicada por la base del transistor. Todo esto es lo necesario para conformar un fototransistor. Para los transistores, la luz incidente en la juntura colector base resultará una máxima fotocorriente de base de entrada al transistor, que esta se multiplicará por su  $\beta$  AC para poder producir una corriente en el colector. Con esto se tiene un mayor control del dispositivo. Las

características electro-ópticas de los fototransistores y el comportamiento del fototransistor es muy parecido al del fotodiodo normal. La corriente oscura  $I_D$  y la fotocorriente  $I_L$  son iguales a las del fotodiodo normal; solo la corriente de saturación se llama ICBO. Comparando las áreas de las uniones de un ánodo y un cátodo de un diodo con la unión colector-base de un fototransistor, resulta ser menor la del diodo. Con esto se puede deducir que por tener una mayor área en la unión se tendrá una mayor capacitancia, por lo cual, su respuesta en frecuencia será más pobre en comparación que un fotodiodo. El comportamiento de este fototransistor no es igual al de un fotodiodo, está más limitado en su comportamiento lineal. Las características ópticas del fototransistor son iguales a las del fotodiodo. Solo que incluye su respuesta espectral y la sensibilidad direccional del dispositivo.

Las características de los fototransistores de manera eléctrica están compuestas por la corriente oscura del fototransistor, que es la corriente de saturación en esta que fluye en la juntura colector-base polarizada en inversa con la terminal de colector en circuito abierto. A esa corriente denominada ICBO, donde CBO, significa la juntura colector-base con emisor en circuito abierto. Esta corriente también es amplificada por el transistor y suele darse este dato como la corriente  $\beta$  amplificada y se denota como  $\beta_{ce}$  donde  $ce$  indica juntura colector-emisor con la base en circuito abierto. Como existen las tres terminales en un transistor existe análogamente tres diferencias de potencial y que son:  $V_{ce}$ , voltaje de rompimiento inverso entre colector y base con el emisor en circuito abierto, análogamente tendremos el  $V_{be}$  y  $V_{bc}$ . También se tienen características como la  $\beta$  que es la máxima corriente de colector, factor de amplificación de corriente  $\beta$  ( $\beta_{ce}$ ), máxima disipación de potencia.

El voltaje de saturación colector-emisor  $V_{ce}$  es necesario conocerlo para darle una aplicación al fototransistor como switch entre las regiones de corte y saturación. El fototransistor funcionará como un fotodiodo si la terminal emisor se deja abierta y pues con esto se tendría unas características importantes. El fabricante nos da toda esa información y características del fotoconductor operando como fotodiodo o fototransistor. Se tienen parámetros aquí como la  $S_{ce}$  que es la relación de fotocorriente del colector contra la radiancia teniendo abierta la base; también existe la relación  $S_{cb}$  y la ganancia. La ganancia está determinada por:  $\beta = S_{ce} / S_{cb}$ . En las gráficas el fabricante nos muestra la relación entre las corrientes, los voltajes y las irradiancias. Es importante calcular la disipación de potencia y saber que no estamos trabajando por encima de los límites que nos proporciona el fabricante.

#### 4.5 La sensibilidad del ojo humano a las radiaciones infrarrojas

La sensibilidad de la vision del ojo humano ha sido medida en la region cercana al infrarrojo dentro de dos regiones del ojo. La region central de la fovea y una area periferal en que las respuestas obtenidas estan dadas por los bastones que se encuentran en el ojo. en ambos casos las sensibilidades espectrales estan basados sobre la determinacion de un umbral de radiacion. En esta medicion se paso la radiacion infrarroja a traves de una serie de filtros infrarrojos. Los limitantes del espectro visible se ubican alrededor de  $400\text{ m}\mu$  y las  $750\text{ m}\mu$ . considerando las cortas o largas longitudes de onda que son visibles en las regiones del ultra violeta y del infrarrojo. El umbral de visibilidad de las radiaciones ultravioletas ha sido medido en longitudes de onda largas como de  $300\text{ m}\mu$  y  $312.5\text{ m}\mu$  y las medidas en el cercano infrarrojo se extienden desde  $1000\text{ m}\mu$  a  $1050\text{ m}\mu$ . donde el ojo se encontraba fijo y controlado adecuadamente: este dato se obtiene de la sensibilidad de ambas regiones. la region de la fovea y los bastones (*periféricos*). Los bastones decaen en su sensibilidad mas rapidamente en el lejano rojo y la fovea es mas sensible. Las mediciones muestran que a largas longitudes de onda existe la tendencia a ser menos sensibles estas dos regiones, y mucho mas alla de  $800\text{ m}\mu$  bajo ciertas condiciones de observacion los bastones son apreciablemente mas sensibles que los conos.

#### 4.6 Detectores térmicos

a manera ilustrativa y sin profundizar en este tipo de detectores se describen de manera general el funcionamiento y principales características de estos dispositivos. Un ejemplo de sensibilidad a la radiacion es cuando empezamos acercarnos al fuego, u otra manera mas comun para todos es la exposicion directa de la luz solar con nuestra piel. Las cosas empiezan a ser de otra manera, mucho mas complicadas, cuando un quimico quiere determinar la intensidad de las bandas de absorcion de las moleculas de los compuestos que está estudiando. En el caso del astro fisico, este cientifico necesita determinar la temperatura de una estrella. Para estas magnitudes de radiacion resultan ser muy pequeñas y para estos casos se requieren de instrumentos muy sensibles a las radiaciones, de hecho la tendencia para resolver problemas con señales infrarrojas es hacer detectores que midan cantidades mas pequeñas de energia radiante. Los detectores térmicos fueron inventados para registrar un efecto termico que se produce despues de que una radiacion interactua con algun material sensible en su superficie, obviamente este material está localizado en el receptor. Parte de esta energia radiante sera absorbida y por eso habra un incremento en su temperatura. Para observar el incremento de esta temperatura se dispone de las propiedades que posea el material que sean dependientes de la temperatura. Algunos de estos detectores térmicos son el bolometro, termopares, radiómetros y celdas neumáticas. Sus características principales son la respuesta espectral plana, si debidamente han sido ennegrecidos con humo negro de oro depositado en vacio se obtiene de manera constante su responsabilidad en un intervalo amplio de longitudes de onda.

**La celda de Golay:** esta es igual que los demás detectores neumáticos. utilizan la propiedad de los gases se dilatan cuando aumenta su temperatura. para observar estas pequeñas dilataciones se recurre a los instrumentos electrónicos para captar estas pequeñas dilataciones del gas. El gas se localiza entre una membrana flexible y una placa fija. Por medios ópticos es posible apreciar los desplazamientos de la membrana. La energía radiada es absorbida y no reflejada por una película que tiene la característica de tener un impedancia de superficie muy aproximadamente igual a la impedancia de  $377 \text{ Ohms}$  que se encuentra en las ondas electromagnéticas que se propagan en el espacio libre. Esta película está hecha de un medio absorbente muy negro constituido por una película de colodion metalizada.

La dilatación gaseosa resultante del calentamiento de la película se transmite por un conducto central a una membrana de colodion flexible en el extremo posterior. Esta membrana no tiene desviaciones indeseadas ocasionadas por diferenciales de temperatura y de corrientes lentas debido a que el conducto central es muy estrecho. Esta última membrana está revestida de metal para reflejar la luz de un foco en una fotocelda a través de un sistema óptico que contiene un enrejado de líneas, de la cual la mitad de estas se refleja sobre la otra mitad, y tiene que coincidir cada línea brillante con la imagen, es decir, que coincida con cada línea opaca de la otra mitad de la rejilla y que no la traspase la luz. La distensión de la membrana da paso a la luz y así da origen a una corriente eléctrica, la cual es amplificada por métodos electrónicos. Como son muy pequeñas las masas que intervienen, sus tiempos de respuesta son muy cortos, al rededor de  $10 \text{ mili segundos}$  y con esto se pueden utilizar para una radiación pulsada. Con esto se ofrece la posibilidad de amplificar la corriente alterna y una rectificación sincronizada. Esta celda se utiliza en espectroscopia en el extremo lejano del infrarrojo. La figura 4-2 muestra el esquema de esta celda.

**Termopares:** Esto fue un hallazgo tecnológico que dio una base cuantitativa a la detección de radiación infrarroja. Aprovechando este descubrimiento, en el que una diferencia de temperatura entre la junta de dos materiales diferentes producen un pequeño voltaje. La mejor de las posibles combinaciones de los metales para producir este voltaje más eficiente es el Bismuto y antimonio. En el esquema de la figura 4-3 se muestra para un termo par las espigas  $M_1$  y  $M_2$ , son de aleaciones termoeléctricas (Bismuto - Estado, y Antimonio - Cadmio), el receptor es de hoja de oro ennegrecida, esta forma la conexión entre los metales activos. Las soldaduras entre los metales  $M_1$  y  $M_2$  con la terminal del metal  $M$  representan la soldadura que se encuentra a temperatura ambiente. Y la soldadura caliente es calentada por la radiación con un tercer metal que está introducido en el circuito como el metal  $M$ . El receptor de oro entre las espigas produce un voltaje termoeléctrico, que es cancelado cuando son iguales a las temperaturas adicionales. Su responsabilidad, cuando incide un flujo radiante de energía  $W \text{ vatios/cm}^2$  sobre un receptor con un área sensitiva  $A$  su aumento de temperatura  $\Delta T$  está determinado por la rapidez con la cual cede su calor al medio ambiente

El bolómetro: Fue inventado por Langley (1880) Este dispositivo depende de la temperatura y utiliza la resistividad eléctrica de un metal o un semiconductor. Se pueden utilizar finas películas producidas por la evaporación en el vacío de Platino, Níquel y Bismuto. Estas películas se ennegrecen para que absorban la radiación. En semiconductores se han obtenido valores mucho más altos en el coeficiente de temperatura de la resistividad  $r$ . El voltaje proviene en el cambio de la resistencia, este cambio es causado por el aumento de la temperatura, este voltaje se encuentra conectado a un puente de Wheatstone. Aquí se utilizan dos elementos, uno protegido a la radiación y el otro no, esto es para que se compensen los cambios lentos (*corrientes*) en la temperatura ambiente.

El puente que inicialmente se compensa, se descompensa cuando es irradiado el elemento del bolómetro, cuando la radiación varía periódicamente se utiliza un amplificador de corriente alterna y se utiliza un circuito más simple. Para señales de corriente continua en un bolómetro su responsabilidad puede expresarse por la relación  $\gamma_p = R r / G$  donde  $\gamma$  es la corriente que pasa por la batería a través del bolómetro de resistencia  $R$  y  $G$  es la conductancia térmica. Para una mejor responsabilidad tiene que ser muy grande la  $r$ , y su límite lo determinará el ruido generado por la corriente. La responsabilidad para corriente alterna es  $r(\omega) = \gamma_p (1 + \omega^2 \tau^2)^{-1/2}$  y se mejora acortando la constante de tiempo. Para bolómetros semiconductores se les coloca el elemento de resistencia sobre un sustrato sólido de alta conductividad, forzando el incremento de la conductividad térmica; esto se conoce como termistores, diseñados por W. H. Brattain. Este material semiconductor es una mezcla de óxidos de Mn, Co, y Ni. Estos materiales pueden tener un coeficiente muy alto como de un  $\frac{1}{2}\%$  por grado Centígrado, comercialmente estos son pequeños con celdas chicas que están provistas de una ventana transmisora de radiación infrarroja o con una lente focal hemisférica a la cual se le unen las celdas. Existen mejores bolómetros que superan cien veces más que los mencionados antes, estos operan con un elemento cortado en una fina oblea cortada de un mono cristal de germanio estimulado con galio. Pero operan a una temperatura de  $4.2^\circ\text{K}$  (*helio líquido*), su respuesta espectral permanece plana desde una región de  $2\mu$  hacia el extremo lejano del infrarrojo y sobre las ondas milimétricas y su eficiencia depende del ruido de la radiación, que tiene fluctuaciones al azar en el número de fotones que llegan al detector.

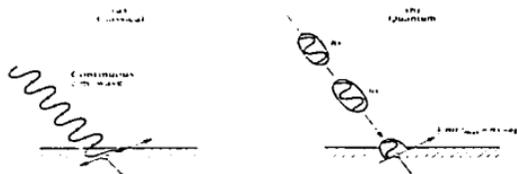


figura 4-1 Comparación del modelo clásico y el cuantico del efecto fotoeléctrico. (A) Electrones continuamente absorben energía de las ondas de incidencia provenientes de un campo eléctrico oscilante

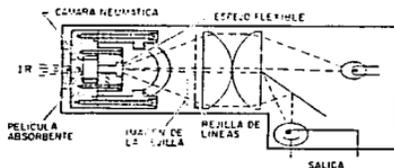


figura 4-2 Diagrama esquemático de un detector neumático de Galat.

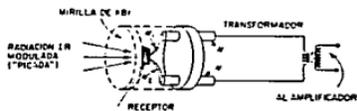


figura 4-3 Termopar del tipo de alambres.

## Capítulo 5

### *Materiales y sistemas ópticos de infrarrojo*

#### 5.1 Los sistemas ópticos

Espejos y lentes: la finalidad de los sistemas ópticos de infrarrojo es la de observar realmente imágenes de los objetos, ya sea si emiten su propia radiación o alimentados por otra fuente de radiación. Hay que hacer que la imagen no sea distorsionada y lo más intensa posible. Ya que existen diferentes materiales para la transmisión de infrarrojo que ofrecen variedades de índices de refracción y dispersión para poder construir lentes acromatizadas y lentes compuestas. Estos sistemas operan en un rango muy estrecho de longitudes de onda, y cuando es necesario extenderse a más rangos de longitudes de onda en el extremo medio infrarrojo y hasta el lejano infrarrojo. Los lentes no sirven y se reemplazan por espejos concavos, que son de metal, estos funcionan independientemente de la longitud de onda; casi resultan ser del todo acromáticos. Estos espejos concavos están contruidos de trozos de vidrio bruto pulidos, para luego ser recubiertos por una capa de aluminio u oro en su superficie, utilizando la técnica de evaporación al vacío. Cuando se quiere rescatar u obtener la imagen de algún punto infinitamente distante, la superficie de reflexión adecuada es la de una paráboloide de revolución. Para encontrar la imagen de un punto finito se requiere, que la forma del espejo sea de un elipsoide concavo. El objeto es colocado en uno de los focos y la imagen se forma en el otro foco. Para el hiperboloide de revolución convexo, también sus propiedades serán similares, solo que un foco será virtual, y el otro normal; para este sistema se requiere de la utilización de otro espejo concavo auxiliar como en la figura 5-1. Las aberraciones que se pueden presentar como astigmatismo, son a causa de que los rayos procedentes del objeto al llegar en todas direcciones se desvían considerablemente del eje de simetría. Para reducir estas astigmatismos, el sistema se diseña de la forma en que los ejes de los rayos incidan en el espejo cerca de la dirección de incidencia normal, es decir, se tiene que buscar que las reflexiones sean de una naturaleza en la que sus aberraciones por desviación con respecto de su eje de simetría se empujen a cancelar y no a sumarse.

Límites a la resolución por la difracción: para los sistemas ópticos de infrarrojo, es en general no necesaria la nitidez de la imagen. Esto es, que el área mínima que puede resolverse está limitada por el tamaño del detector, más o menos lo más pequeño anda en  $0.25 \text{ mm}^2$ . Para cualquier sistema óptico las propiedades ondulatorias de la radiación impone un límite

fundamental para obtener la nitidez de alguna imagen. Existe difracción de ondas en la abertura del sistema, lo que causa un emborramiento de la imagen, es mucho más apreciable cuanto mayor es la razón entre la longitud de onda y la apertura mostrado en la figura 5-2. Un espejo parabólico que se encuentra formando la imagen de un punto a distancia infinita, el ejemplo común puede ser el de una estrella, al analizar esta imagen muy de cerca observamos que consta de una imagen central muy brillante rodeada de anillos altamente brillantes en que su intensidad gradualmente disminuye mientras más grandes son los anillos. Por ejemplo cuando se tiene una estrella infinita, pero resulta ser que son dos estrellas muy cercanas. Para poder resolver éstas dos imágenes hay que separarlas, por lo menos a la mitad de la anchura de la imagen central. Lord Rayleigh introdujo un criterio para poder separar las dos imágenes, con la cual el centro de una cae en el primer mínimo de la otra. Para la anchura efectiva de la imagen central de una abertura circular derivó teóricamente la fórmula  $d = 1.22 \lambda / \theta = 1.22 \lambda N'$ . En que  $N' = f/D$  es el número  $f$  del sistema, como el que se usa en un lente de una cámara fotográfica. Podemos ver, por ejemplo, que un espejo de 10 cm de diámetro y 50 cm de longitud focal ( $N' = 5$ ) tendría  $\lambda = 10 \mu$  una resolución limitada por la dirección de  $60 \mu$  aproximadamente.

Brillo de la imagen- El término brillo no es muy utilizable para los estudios en infrarrojo, lo cual se sugiere referirse mejor como radiancia, como en todo el trabajo fue mencionado. Para la terminología en el infrarrojo, la intensidad de una fuente puntiforme (*una estrella distante*) se describe por su intensidad radiante  $j$  que se mide en vatios por unidad de ángulo sólido o estereorradian ( $Wsr^{-1}$ ). Una fuente (*por ejemplo, el sol o un filamento de volframio incandescente*) se caracteriza por su emitancia radiante,  $M$  medida por vatios por unidad de área ( $Wcm^{-2}$ ). La cantidad correspondiente cuando nos referimos a una imagen y no a una fuente, es irradiancia  $M'$  medida en  $Wcm^{-2}$ . Cuando la energía radiante de la fuente varía con la dirección a esta cantidad característica se le llama  $I_0$  radiancia, definida como la energía radiante emitida por unidad de área en una dirección dada por unidad de ángulo sólido ( $Wcm^{-2}sr^{-1}$ ). La irradiancia de la imagen es proporcional a  $f$ , que es la rapidez de la lente para un sistema óptico infrarrojo, con rapidez media. La irradiancia de la imagen nunca puede ser mayor que la emitancia radiante de la fuente. Por que la temperatura de la imagen sería más grande, que la propia temperatura de la fuente, se violaría la segunda ley de la termodinámica.

Algunos sistemas ópticos- los espejos cóncavos son utilizados para sistemas que requieren gran rapidez. En un sistema como el de la figura 5-1 llamado sistema casegrainiano de número,  $f$  y  $N' = f_2$  de una clasificación usual para radiómetros infrarrojos o cámaras para rastrear blancos. Funcionan de la siguiente manera: los espejos parabólicos forman la imagen de una fuente distante en el foco  $F_1$  que coincide con el foco virtual del espejo hiperbólico convexo, el cual forma entonces la imagen real en el punto focal  $F_2$ . En un ejemplo claro, se observa el uso de distintos tipos de espejos que son necesarios para construir un sistema óptico usado en un

espectrometro comun de prisma para infrarrojo, como el de la figura 5-3. La fuente de la radiación está representada por un punto, pasara por las rendijas de entrada del espectrometro para formar su imagen en un espejo condensador de  $f = 35$ . El espejo condensador es muy simple por que este tiene una forma esferica, la calidad de la imagen aqui formada es mejor de lo necesario, que nos sirve para llenar netamente la rendija con radiacion. Entonces, la imagen de la rendija de entrada iluminada se forma en el infinito por el llamado colimador, el cual ha de ser un espejo parabolico mayor (*mostrado en la figura en líneas punteadas*) cuyo eje pasa por la hendidura. El az de rayos paralelo formado por el colimador es enviado al prisma y devuelto de nuevo por reflexion sobre un espejo plano colocado detras del prisma. Los rayos refractados por el prisma, de acuerdo con su longitud de onda y las propiedades de dispersion del material del prisma (*NaCl o KBr*), llegan al colimador todavia como un az paralelo, pero en angulo algo diferente. El colimador enfoca el haz paralelo sobre la rendija de salida. Si la radiación fuera monocromatica solo se formaria en la rendija de salida una imagen de la entrada. Con radiacion, de cuerpo negro, se forma en el plano de la rendija de salida una banda ancha de imagenes (*esta es un espectro continuo*). Las longitudes de onda se pueden seleccionar, solamente se hace girar lentamente el espejo plano situado detras del prisma, por ejemplo, si en dicho caso se hace girar tan solo unos  $5^\circ$  este espejo plano; utilizando un prisma hecho de sal de gema se obtiene un barrido del espectro de  $5\mu$ . La radiacion que emerge de la rendija de salida se desvia por un espejo plano de  $45^\circ$  a un espejo eliptico, el cual enfoca la radiacion sobre el receptor termopar. Los focos de la elipse coinciden con la rendija de salida y con el receptor termopar respectivamente. Todas las distancias focales y espejos están colocados de manera que toda la rula optica por donde pasara toda la radiacion procedente de la fuente, sea canalizada hacia el receptor de la manera mas economica y eficiente. Para obtener espectros de absorcion de gases o liquidos, la muestra de estos se coloca en una celda enfrente de las rejillas de entrada. Tambien otra utilizacion es como monocromador para la seleccion de un espectro continuo una longitud de onda deseada. Este sistema es del tipo Littrow, esto es por que el fue el primero que penso en utilizar en espejo plano colocado a tras del prisma para así obtener una refraccion del prisma doble.

Dispersión por una rejilla- la rejilla de difraccion se utiliza como elemento de dispersion en el espectrometro. Esta rejilla de difraccion, está ideada bajo un tecnica para concentrar la intensidad de la luz difractada en la direccion deseada, utilizando una rejilla del tipo Echelette. Una rejilla de difraccion para infrarrojo consiste esencialmente en un trozo de vidrio bruto opticamente plano, revestido de un película de aluminio o de oro. En estas películas se graban un gran numero de surcos exactamente de manera paralela y equidistantes, con una densidad de hasta unos miles de surcos por pulgada, segun el intervalo espectral que haya de cubrirse. En una rejilla ordinaria como en la figura 5-4(a) los surcos mas o menos actuan como objetos

dispersores en el otro espejo plano. Cuando la radiación monocromática alcanza una rejilla de este tipo, la radiación será dispersada en direcciones bien definidas  $\pm\theta_1, \pm\theta_2, \pm\theta_3, \dots$  en que las de primer orden serán las más fuertes y las de órdenes superiores se irán haciendo más débiles. Estas rejillas hacen que las vibraciones ondulatorias de los rayos difractados entren en fase y la intensidad de radiación se reforzará en esa dirección particular. Entonces la idea de las rejillas Echelette, es que en los sesgamientos de las partes reflectoras de los surcos concentren casi toda la energía difractada en un solo orden. El perfil preferible para esta rejilla es el de la figura 5-4(b). Un arreglo que se utiliza en los espectrografos de rejilla es el llamado montaje de Ebert representado en la figura 5-5. La dispersión de la rejilla está dado por  $d\theta/d\lambda = m/S \cos \theta$ , solo incluye dos cantidades exactamente mensurables,  $S$  y  $\theta$  la resolución de líneas espectrales que puede obtenerse con un rejilla, se encuentra determinada por los mismos factores para el caso de un prisma. En el caso de resolución limitada por la energía, se tiene  $\Delta\lambda_p = (\lambda \cos \theta / m)$ , para el otro caso de resolución limitada por la difracción, se tiene  $\Delta\lambda_p = A d \lambda / B d \theta$  en donde se encuentra la mejor resolución de estas rejillas, es en el rango de  $2.5\mu$  a  $5\mu$ , muy superior a la que se necesita en espectroscopia molecular. Estas rejillas marcadas pueden entregar más energía radiada a los detectores y de modo análogo ser más eficientes bajo las mismas condiciones. Su inconveniente es la superposición de espectros de orden superior.

*Espectrómetros prácticos:* los instrumentos llamados de doble as van a dividir la energía radiada de alguna fuente en dos ases. Uno de ellos será tomado como referencia y el otro será la muestra. La radiación de los dos ases pasa alternativamente por un espectrómetro del tipo normal. Hay un interruptor, que de manera sincronizada funciona. Pasa la señal amplificada del detector por dos demoduladores, los cuales generan señales proporcionales a la energía en el trayecto de la muestra y en el trayecto de referencia respectivamente. La diferencia de las dos señales pone en operación un segundo motor, el cual intercala un atenuador en el trayecto de referencia de modo que se igualen los flujos de radiación en los dos trayectos. Acoplada con el movimiento del atenuador hay una pluma registradora que se mueve por toda la anchura de la gráfica mientras es transportada hacia delante por el mismo motor que mueve el control de longitud de onda del espectrómetro. Si se usan amplificadores logarítmicos en vez de lineales se puede usar la señal resultante de la diferencia de señales para producir un registro del cociente entre las dos señales. El uso de dos trayectorias idénticas en estos instrumentos elimina el efecto de absorción por el vapor de agua y el bióxido de carbono atmosféricos, cuyas bandas se superponen a la de la muestra en los instrumentos de un solo haz, igualmente cuando se trabaja con soluciones se pueden eliminar las bandas de absorción del disolvente colocándolo puro en el trayecto de referencia. Los interferómetros de Farby Perot consisten de dos placas transparentes exactamente paralelas y sus superficies internas se encuentran revestidas en su totalidad por un material parcialmente transmisor y altamente reflector. Un haz de rayos paralelos que incide sobre una placa frontal, figura 5-6. Con un ángulo  $\theta$ , este será refractado,

múltiplemente reflejado entre las placas y refractado nuevamente hacia el exterior, donde es recogido en el plano focal de un espejo concavo. Las ondas de los rayos emergidas de la placa posterior tienen diferentes fases que dependen de la diferencia del trayecto que recorren entre las placas. Como en la ecuación de la rejilla hallamos que ocurre un refuerzo (*interferencia constructiva*), cuando  $2d \cos \theta = m\lambda$ , el número de orden  $m$  es igual al número de reflexiones entre las placas. Dependiendo de la pérdida por reflexión en las superficies revestidas,  $m$  puede tomar valores enteros grandes, por consiguiente la dispersión y el poder de resolución de los interferómetros puede ser mucho mayor que el de los prismas y rejillas. Este interferómetro no presenta, ni requiere el uso de rendija de entrada y la abertura de salida circular en el centro del diagrama de interferencia puede ser bastante grande sin pérdida substancial de resolución. Este interferómetro es ideal para exploraciones rápidas, la exploración del intervalo de longitudes de onda se hace moviendo las placas de un lado a otro. Los inconvenientes son el tener que usar filtros para la separación de los órdenes que se superponen y de la absorción en las placas del interferómetro y en los revestimientos reflectores.

## 5.2 Propiedades de los sólidos

La radiación infrarroja fue descubierta por la búsqueda de una sustancia que deluviera la radiación solar térmica que calentaba los lentes de los telescopios. Pero era una controversia decir que existía esta radiación térmica y que solo afectaba en ciertas medidas mas intensas o menos para los diferentes telescopios, esto se debía a que los telescopios eran contruidos de diferentes cristales y cada cristal puede ser más transparente o menos a la radiación infrarroja. El primer material que era transparente a el infrarrojo fue la sal de gema natural (*NaCl*), que se obtenia en cristales naturales bastantes grandes y con ello se empezaron a construir los lentes. Ahora se encuentra toda una gama de materiales cristalinos naturales, como por ejemplo, el cuarzo (*SiO<sub>2</sub>*), fluorita (*CaF<sub>2</sub>*) y silvina (*AlCl*). También los hay de materiales sintéticos, que tambien son transparentes a la radiación infrarroja.

Las propiedades ópticas de los materiales transparentes se caracterizan por dos constantes:  $\eta$  que es índice de refracción y  $\alpha$  es el coeficiente de absorción. En realidad  $\alpha$  y  $\eta$  no son constantes por que en algunas regiones estas dependen de la longitud de onda. Midiendo la dependencia espectral de  $\alpha$  y  $\eta$  de angulos solidos en un amplio intervalo de longitud de onda se observa la figura 5-7, diagrama típico similar describiendo el comportamiento de la medida en que las longitudes de onda se empiezan a hacer mas largas, el índice de refracción baja abruptamente hasta un mínimo y luego asciende repentinamente alcanzando un máximo para inmediatamente volver a descender en el lado de las longitudes de onda largas. Al mismo tiempo, para el coeficiente de absorción pasa por un máximo centrado a una longitud de

aproximadamente a la mitad del camino entre el mínimo y el máximo índice de refracción. La región de longitudes de onda por la cual se extiende esta doble acción se llama la banda de dispersión. En la figura 5-7 se muestran dos bandas de dispersión situación normal para los cristales de compuestos diatómicos, como NaCl, KBr. Los cristales de estructura no cúbica y más complejos tales como el cuarzo ( $SiO_2$ ) o la calcita ( $CaCO_3$ ) muestran varias bandas de absorción. Para estos materiales se define un índice de refracción, sacándolo de la ley de refracción de Snell  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$  y donde  $\theta$  es el ángulo de incidencia sobre la superficie que los separa, es decir, entre el vacío y el medio. Y  $\theta$  es el ángulo por el cual son refractados los rayos en el medio. la ley de Lambert, describe la atenuación de la radiación en el medio absorbente en función de la distancia

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad \text{o} \quad T_x = e^{-\alpha x}$$

Aquí  $I_0$  denota la intensidad de la radiación incidente en el límite,  $I$  es la radiación a la distancia  $x$  en el medio.  $T_x = I / I_0$  es la transmitancia. En ocasiones se usa la cantidad llamada índice de extinción  $k$ ,  $k \propto \alpha \lambda^{-1}$ . En tanto  $\eta$  varíe con la longitud de onda, el ángulo de refracción de los diferentes componentes de la radiación que inciden sobre un prisma varían también según la longitud de onda. Así los rayos de diversas longitudes de onda serán separados o dispersados unos de otros, cuando la dispersión es realmente grande la absorción también resulta muy grande y con esto las regiones útiles quedan entre las bandas ultra violeta e infrarroja. En la relación que existe entre  $\eta$  y  $\alpha$ , viéndolo desde el punto de vista de un circuito eléctrico, se observan las características de una resonancia en las bandas de dispersión. La curva del índice de refracción recuerda la variación del ángulo de fase con la longitud de onda, mientras que la curva del coeficiente de absorción corresponde a la variación de amplitud de la intensidad del voltaje. Estas resonancias en la región del infrarrojo se deben a las vibraciones en la red cristalina de los sólidos, las bandas de dispersión en el ultra violeta se deben a resonancias de electrones débilmente ligados en las bandas de valencia atómicas.

Los materiales que no son aislantes transparentes muestran otro tipo de comportamiento, los materiales semiconductores que tienen propiedades eléctricas intermedias entre la de los metales y aislantes, en la región visible se parecen mucho a los metales y son bastantes opacos, y que en el infrarrojo son transparentes funcionando como aislantes. Esto se debe a una determinada cantidad de energía que tienen los cuantos de luz. En la región del espectro visible se puede hacer la excitación de los electrones de valencia para hacerlos cambiar a la banda de conducción y con ello iniciar la fotoconducción. Este material se vuelve conductor y refleja y absorbe radiación igual que un metal. Para las longitudes de onda más largas, la energía de unos cuantos infrarrojos no es suficiente para iniciar la fotoconducción, así volviéndose muy pequeña la absorción que se comporta de modo semejante a un aislante transparente, así la figura 5-8

muestra el comportamiento de la curva de absorción de semiconductores. Es típico que su coeficiente de absorción sea alto en el intervalo visible y bajo en el intervalo de longitudes de onda correspondientes a la energía de la brecha. Después se mantiene bajo en un intervalo grande de longitudes de onda, cuanto más larga es esta curva, esta empieza a ascender a causa de algunos portadores libres en la banda de conducción. El índice de refracción en semiconductores es muy alto  $n \approx 4$  para el germanio, y no varía mucho con la longitud de onda. Estos no presentan en la región del infrarrojo bandas de dispersión, ya que no son iónicos, sino covalentes en su constitución química. En su estructura no se forman dipolos eléctricos, y su red cristalina no interactúa con las ondas electromagnéticas y no se observan efectos de resonancia. La reflexión, cuando incide radiación en difracción normal a la superficie en el vacío y un sólido transparente casi se absorbe toda y una parte es reflejada de nuevo, pero cuando es muy débil la absorción, la fracción de radiación reflejada se determina por el índice de refracción, por la relación:

$$\rho = \frac{I_r}{I_o} = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2$$

Por ejemplo, la sal gema de índice  $n = 1.5$  tiene muy baja reflexión,  $\rho = 0.04$  el germanio de índice de refracción  $n = 4.0$  refleja aproximadamente el 36% de la radiación incidente, esto es  $\rho = 0.36$ . Cuando el ángulo de incidencia no es en dirección normal, es decir cualquiera, la reflexión se calcula por las fórmulas de Fresnel.

$$\rho_{\perp} = \frac{\sin^2(\phi - \alpha)}{\sin^2(\phi + \alpha)}$$

$$\rho_{\parallel} = \frac{\tan^2(\phi - \alpha)}{\tan^2(\phi + \alpha)}$$

$\rho_{\perp}$  se refiere a la reflexión para radiación polarizada, el vector eléctrico de onda es perpendicular al plano de incidencia.  $\rho_{\parallel}$  se refiere a la onda con el vector eléctrico paralelo al plano de incidencia. Observamos que  $\rho_{\parallel}$  se convierte en cero cuando  $\phi = \alpha = \pi/2$  por que en su denominador tiende a infinito. Eliminando  $r$  de la ecuación obtenemos  $\tan 2\phi = n$ . El ángulo de incidencia definido por esta relación se llama ángulo de Brewster. La radiación incidente con este ángulo no tendrá en absoluto una componente polarizada paralela con el haz reflejado. Solo es polarizada en la dirección perpendicular, esta circunstancia hace posible tener radiación infrarroja polarizada. Haciendo ventajosa esta acción desde el punto de que una ventanilla que tengan el ángulo de Brewster permita así mismo el paso de radiación sin permitir alguna pérdida por reflexión: para grandes ángulos de incidencia  $\phi \rightarrow \pi/2$ ,  $\rho_{\perp}$ ,  $\rho_{\parallel}$  y  $\rho$  tienden a tomar el

valor máximo, la unidad. Esto pasa cuando la radiación pasa desde el interior del medio hacia la superficie límite con el vacío. Esta condición queda  $\sin \theta_c = n$  donde  $\theta_c$  es ángulo crítico. Toda radiación que llegue a la superficie con este ángulo o con un ángulo  $\theta > \theta_c$  desde el interior del medio es reflejada totalmente. Cuando el material no es del todo transparente pero su absorción es mensurable, se vuelve muy complejo de manejar las formulas de Fresnel. La alta reflexión se produce cuando el índice de refracción sea alto y también cuando  $\lambda$  (coeficiente de extinción) sea también grande, esto es un comportamiento de los metales. Para cristales transparentes casi es también en el centro de la banda de dispersión, en que  $\lambda$  pasa por un máximo. La banda de los rayos residuales se refiere a cuando al reflejar radiación de un cuerpo desde un cristal de baja reflexión, excepto en su región de dispersión solo queda finalmente una estrecha banda espectral, de aquí el nombre de rayos residuales. El cuarzo tiene dos bandas de rayos residuales, una a  $3\mu$  y otra a  $27\mu$ . La reflexión selectiva por el método de rayos residuales puede usarse para aislar estrechas bandas espectrales del espectro infrarrojo de la misma manera que se usan filtros de color en el espectro visible.

*La reflexión en metales:* Estos son muy utilizados en instrumentos ópticos de reflexión para infrarrojo. La conducción eléctrica de los metales es una característica sobresaliente, debido a que tienen una alta densidad de electrones presentes en toda su estructura. En la teoría clásica, la conducción del metal depende del intervalo de tiempo medio  $\tau$  entre las colisiones de electrones y átomos metálicos, tanto menor era el impedimento al movimiento de electrones es un tanto más alta la conducción, esta teoría clásica describe la conducción de un metal como

$$\sigma_c = \frac{N_e e^2 \tau}{m}$$

$N_e$  es el número de electrones por unidad de volumen,  $e$  es la carga del electrón y  $m$  es la masa del electrón. La masa inercial de los electrones es tan pequeña que puede responder a los campos electromagnéticos de corriente alterna a cualquier frecuencia, hasta las que se extienden más allá de las microondas en el infrarrojo. Es decir que la conducción eléctrica determina las propiedades ópticas de los metales en el infrarrojo. Para los metales también se aplican las leyes de refracción y reflexión solo que el índice de refracción sería reemplazado por  $\eta - ik$  donde hay una cantidad compleja. La teoría clásica de electrónica relaciona la conducción y el índice de refracción compleja así:

$$(\eta - ik)^2 = (1 - 2\sigma_c \tau) + i\sigma_c \tau$$

La plata resulta ser el mejor conductor eléctrico y también el mejor reflector, en tanto este libre de oxidación. El oro se oxida, es excelente para reflejar infrarrojo. En la figura 5-9 se muestra

las reflexiones de algunos metales. La radiación en los metales no penetra muy profundamente y su absorción es muy alta. Debido a esto la superficie del metal debe ser extremadamente lisa, puliéndolo por medios mecánicos, ya que es desordenado este seguimiento presenta una conducción muy inferior a la de un sólido puro. Lo que determina la reflexión, es la conducción de la capa de superficie alterada ya sea por oxidación o corrosión. La escala muy fina de comparación de las asperezas de la superficie con la longitud de onda puede determinar la reflexión, cuando unas y otras son aproximadamente de la misma magnitud la dispersión se vuelve grande y menor la reflexión.

### 5.3 Materiales

Los materiales ópticos de la tabla siguiente se muestran en el orden de su límite de transmisión en longitudes de onda larga.

Material	$n$ ( a una $\lambda = 2\mu$ )	Límite de transmisión aprox. ( $\mu$ )
Cuarzo Si O <sub>2</sub>	1.50	3
Zafiro Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.78	7
Irtran - 1 Mg F <sub>2</sub>	1.4	8
Fluorita Ca F <sub>2</sub>	1.45	9
Irtran - 2 ZnS	2.28	16
Sal gema Na Cl	1.54	24
Ag Cl	2.01	24
K Br	1.65	25
KRS - 5 (TlI - IBr )	2.60	40
Cs I	1.75	50
Vidrios ópticos crown	1.5	28
Silice vitrea	1.42	37
Vidrios especiales IR	1.75	55
Vidrio As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	2.4	12
Silicio	3.4	40
Germanio	4.1	50

En la gráfica 5-13 la cantidad usada para trazar estas gráficas es llamada transmitancia externa  $T_e = (1 - \rho)^2 e^{-\alpha x}$ . El término exponencial es la atenuación por absorción de la ley de Lambert.  $(1 - \rho)^2$  es la pérdida por reflexión se encuentra al cuadrado por que ocurren dos reflexiones; una en la superficie anterior y otra en la posterior. La transmitancia no solo depende de las propiedades del material, sino también depende de su grosor. Para la transmisión de radiación infrarroja se contemplan otros factores en los materiales, tales como la resistencia mecánica, resistencia química, resistencia térmica. Por ejemplo, la sal de gema se utiliza hasta las  $16 \mu$  pero se disuelve fácilmente con el agua, por lo que no funcionaría al utilizarlo en el medio ambiente, es decir al aire libre. El sulfuro de Zinc sinterizado (*Meris-2*) resiste condiciones húmedas pero su radiación que transmite no es muy buena; tiene mucha absorción. El Cuarzo tiene transmisión limitada más allá de  $7 \mu$ , el cloruro de plata es excesivamente muy blando, el  $AgCl$  es tóxico, y el yoduro de Cesio es muy costoso. Los vidrios tienen transmisión muy limitada en el infrarrojo, salvo el de tipo de trisulfuro de arsénico, el cual, por desdicha es tóxico. Los semiconductores son opacos en el infrarrojo cercano y su pérdida por reflexión es alta.

Todos los materiales listados en la tabla anterior son del tipo inorgánicos. Los vidrios orgánicos (*polímeros, plásticos*) solo tienen uso limitado en el infrarrojo, principalmente por que presentan varias bandas de absorción a consecuencia de su constitución molecular. Además, son bastante blandos y no resisten temperaturas elevadas. A veces se utilizan en forma de finas películas para ventanillas de celdas y como revestimientos de protectores. El poliestireno negro se usa como un filtro para evitar que la radiación visible y la infrarroja cercana entren en detectores sensibles para la radiación infrarroja lejana.

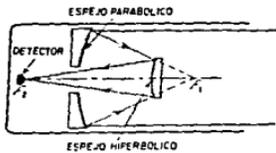


Figura 3-1 Sistema óptico de espejo Cassegrain de número f.  $N = 1.5$ .

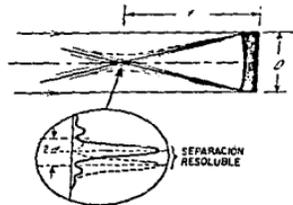


Figura 3-2 Difracción por un espejo circular.

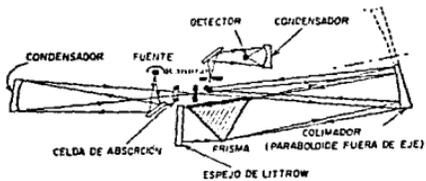


Figura 3-3 Sistema óptico de un espectrómetro de prisma.

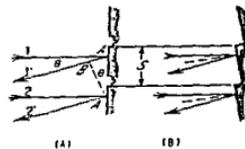


Figura 3-4 Difracción por una rejilla ordinaria (a) y por una rejilla echelette (b).

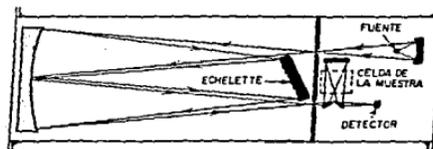
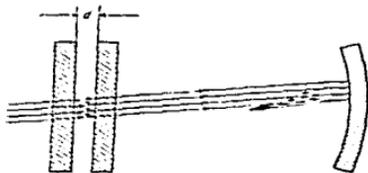


Figura 3-5 Espectrómetro de rejilla del tipo de Ebert; se dispone el recinto en vacío para trabajo en el infrarrojo lejano.



Reflexiones múltiples en el interferómetro de Fabry-Perot.

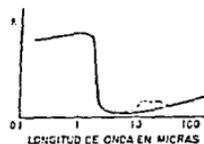


Figura 5-6 Dependencia del coeficiente de absorción de un semiconductor intrínseco (Ge), respecto de la longitud de onda.

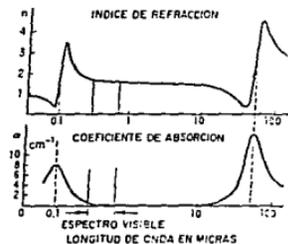


Figura 5-7 Dependencia del índice de refracción y del coeficiente de absorción de un cristal representativo (NaCl), respecto de la longitud de onda.

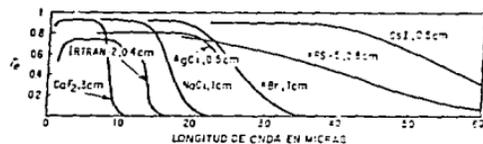


Figura 5-8 Transmitancia de varios materiales en el infrarrojo.

## Capítulo 6

### *Diseño para un control de un sistema en forma remota*

#### **6.1 planteamiento del problema.**

Para este punto se plantea obtener una solución óptima y cómoda para controlar el sistema eléctrico de una recámara utilizando la radiación infrarroja como medio de comunicación entre el usuario y la parte electrónica que ejecutará alguna tarea. Como cualquier proyecto ingenieril se plantea el hecho de hacerle la vida más sencilla al humano y, que en este caso en particular se realice el mínimo esfuerzo para llevar a cabo el control eléctrico de una recámara con la comodidad de estar localizado en casi cualquier punto de la recámara.

Primero se necesita ubicar las variables que se queremos controlar de alguna forma en dicho sistema. Una de las variables a controlar son los apagadores de *luz (encendido y apagado de los focos)*, la intensidad de luz de los focos, que se puedan modificar a la intensidad deseada (*dimmers*). Otra opción de control es el poder abrir una ventana o una persiana. Para llevar a cabo este trabajo, se plantea como solución que el usuario pueda controlar la instalación eléctrica de la recámara usando como ayuda un control remoto que utilice radiación infrarroja. El objetivo de esta solución es que el usuario no tiene que acudir a un lugar en específico para hacer manualmente las acciones que se pueden controlar simplemente con un botón a la mano y, que pueda controlar desde un área razonablemente amplia y grande los apagadores de luz, abrir y cerrar persianas, cerrar ventanas, así como bajar la intensidad de la luz de la recámara al gusto. O bien si es necesario controlar más tareas remotamente. Otro planteamiento en este sistema es que tenga la ventaja de poderse hacerse más grande y más complejo según las necesidades del diseñador y, si bien, esta es una propuesta útil e ilustrativa que plantea la solución de las necesidades básicas para el control eléctrico en una recámara. Del interesado en este tipo de sistemas dependerá si quiere añadir más propuestas a controlar.

Las partes principales del planteamiento del problema a solucionar son: 1)implementar un control remoto; 2)implementar o comprar el sensor de radiación infrarroja; 3)implementar un microcontrolador para decodificar la información transmitida y ejecutar las tareas correspondientes a cada información; 4)implementar la etapa de electrónica de potencia para el control de focos y motores (*depende del tipo de carga ya sea inductiva, capacitiva o resistiva*). En la solución de este problema, se tiene que documentar las opciones que existen en el mercado de los integrados que faciliten la implementación.

## 6.2 Requisitos de operación.

El dispositivo transmisor debe enviar las palabras código de manera binaria, o sea que se debe transmitir una palabra conformada con unos y ceros, por lo tanto un uno se tiene que diferenciar de un cero de alguna forma. La información viene en un tren de pulsos que se transmite en PCM y cada ancho de pulso que está contenido en el tren de pulsos o palabra código está compuesta de una señal que puede estar modulada en AM/FSK. Para el modo de AM el tren de pulsos se encuentra modulada a una frecuencia de  $31.25 \text{ kHz}$  con una frecuencia de referencia de  $500 \text{ kHz}$ . Si se selecciona el modo FSK dos frecuencias moduladoras se usan para distinguir un cero de un uno, esto se muestra detalladamente en las hojas de especificaciones del circuito MC11497. Un requisito importante del transmisor para este tipo de sistema es que tenga un ángulo muy grande de dispersión en la transmisión, y que tenga una muy buena potencia a la salida.

La parte receptora tiene que ser especialmente diseñada para sistemas infrarrojos donde una alta sensibilidad y una muy buena inmunidad al ruido serán muy importantes. El diodo detector debe tener una alta ganancia y estar conectado a un sistema que maneje un detector de la forma de la señal para recobrar con exactitud los datos. También tiene que operar con un voltaje de  $5 \text{ Volts}$  para que sea compatible con la lógica TTL o CMOS y que no detecte las señales que no han sido moduladas en un rango de frecuencias con las que trabaja el transmisor, en este caso particular oscila entre  $30 \text{ kHz}$  ( $\pm 1 \text{ kHz}$ ) a  $4 \text{ MHz}$ . El diseño debe proveer una inmunidad total al ruido externo inducido por los campos magnéticos. La parte que decodifica la palabra código depende de un microcontrolador, debe ser de alta densidad, de preferencia que sea de 8 bits, y que se alimente con de 5 Volts, y que tenga baja potencia de consumo. En pocas palabras el microcontrolador tiene que combinar un tamaño muy pequeño, velocidades muy altas con baja potencia y una alta inmunidad al ruido. En esta etapa se necesita un sistema de memoria, se puede implementar o aprovechar el sistema de memoria que ofrecen algunos microcontroladores. Se requiere que cuente con un sistema contador principal que cuente libremente 16 bits y que trabaje en coordinación con tres distintas líneas de entradas que capturen señales. Para este caso son los trenes de pulsos. También debe contener un puerto paralelo de uso exclusivamente de salida de datos. Estas características antes mencionadas son los requisitos mínimos que debe tener el microcontrolador para que pueda controlar el sistema eléctrico de una recámara, por supuesto que los microcontroladores poseen más características que los hacen más poderosos, como por ejemplo: los convertidores analógicos/digitales, líneas de interrupciones externas, puertos en paralelo y puertos en serie, etc.

La parte de electrónica de potencia debe de manejar corriente alterna, ya que la carga que se controla necesita de una señal de alimentación de AC de  $127 \text{ Volts}$ ,  $60 \text{ Hz}$ . Otro requisito para esta etapa, es que se encuentre totalmente aislada la parte de control de la parte de potencia.

### 6.3 Herramientas para el proyecto.

Para la solución de este sistema afortunadamente existen muchas herramientas en el mercado. Las herramientas que se utilizan para la solución se escogieron considerando una posible modificación del sistema. Esta posible modificación puede ser el convertirlo a uno mas grande o mas chico. En otras palabras se plantea una solución con herramientas que puedan controlar el sistema eléctrico de una recámara y, con la posibilidad de controlar un mayor número de tareas y que no quede limitado simplemente el control para una sola recámara.

Para el circuito transmisor de la información via radiación infrarroja se selecciono el circuito integrado MC4497 de motorola, por que cumple con las necesidades basicas y con posibilidades de controlar el sistema eléctrico de toda una casa. Esto se refiere, a que este integrado transmite 60 palabras diferentes, codificadas y moduladas, con la opción de que la transmisión se realice ya sea en FSK/AM. Las hojas de especificaciones se anexan en el apéndice en donde se explica detalladamente el funcionamiento de este integrado y características

En la parte receptora, se escogio de entre muchas posibilidades un circuito ya encapsulado, el CPU52X receptor infrarrojo demodulador, es muy sensible a un rango particular de longitudes de onda. Este encapsulado en particular es muy pequeño y funciona muy bien con las longitudes de onda del transmisor, así como su respuesta en el tiempo es muy buena, las hojas de especificaciones también se anexan en el apéndice donde está ilustrado el diagrama de bloques de su funcionamiento

Para la parte de la decodificación escogí el microcontrolador 68HC11A1 por que puede cumplir con las demandas básicas, y por que puede cubrir el trabajo de mas áreas de control en caso de que el usuario quiera expandir el sistema del control remoto teniendo a su disposición mas puertos de entradas y salidas en el microprocesador, así como de convertidores analógicos/digital. Su diagrama, hojas de especificaciones, lista de instrucciones y demás particularidades se encuentran en el manual de referencia del HC11

Para la parte de electrónica de potencia, se necesita utilizar transistores triacs con ciertos requisitos de operación que dependen de el tipo de carga que manejaran, los que se utilizaron son TIC206D y TRIACS 6073B de estos sus hojas de especificaciones estan en la parte final del apéndice. Para aislar la parte de control y de la parte de electrónica de potencia se tiene que hacer un acople de impedancias con el fin de evitar que se dañe el sistema la parte del sistema que opera con lógica TTL. La manera mas sencilla y eficiente es usar opto-acopladores los que utilice son MOC3010 y MOC3011 de los cuales sus hojas de especificaciones también se encuentran el apéndice

Para la realización y funcionamiento de este sistema obviamente se utilizaron componentes electrónicos diversos como resistencias, capacitores, transistores, dip-switches, los diodos transmisores de infrarrojo así como de algunas compuertas lógicas, que también se anexan sus hojas de especificaciones en el apéndice.

#### 6.4 Simulación.

Primero antes que nada es necesario aclarar que no se llevo a cabo el proceso de la simulación por computadora, ya que no existe un simulador adecuado para hacer este tipo de pruebas, por lo tanto, las pruebas se tuvieron que hacer sin simulación en computadora, se hizo que solo una parte de todo el sistema estuviera implementada y operando de forma correcta. Las partes del sistema que se necesitaron para realizar las primeras pruebas fueron:

- 1) El transmisor infrarrojo (*control remoto*).
- 2) El sensor y demodulador infrarrojo.
- 3) El microprocesador 68HC11A1, funcionando en modo bootstrap.

Para el funcionamiento correcto del control remoto, se alambro el circuito integrado MC4497 tal y como se muestra en las hojas del diagrama unificado. La configuración de operación de este integrado se selecciono de acuerdo con las necesidades del sistema planteado y de los requisitos seleccionados, por lo tanto, este integrado se encuentra implementado de tal forma que su transmisión opera con un start-bit, en modulación AM y 8 canales de transmisión.

La operación de este circuito consiste en la transmisión de 6 bits codificados binariamente dando un total de 64 posibles combinaciones o palabras códigos. Todos esos canales pueden ser seleccionados individualmente por el usuario, excepto los últimos dos (*el canal 63 no se transmite mientras que el canal 62 es automáticamente transmitido al final de cada transmisión como un código de fin de transmisión*).

En cada modo, FSK o AM, la transmisión de la señal se lleva a cabo en modulación PCM. La codificación AM se muestra en el apéndice, figura 1 de las hojas de especificaciones de este integrado. En el modo AM, f1 es un tren de pulsos modulados a una frecuencia de *31.25 kHz*. En el modo FSK, se utilizan dos frecuencias de modulación como se muestra en el apéndice, figura 2 de las hojas de especificaciones. En este modo, f3 está a *50 kHz* y f2 está a *41.66 kHz*.

El teclado puede ser una simple matriz de swichs conectados directamente a los cuatro canales de rastreo (*A1-A4*) y a las 8 líneas de entradas (*E1-E8*). Bajo estas condiciones, solo los

primeros 32 canales o palabras códigos serán los disponibles para transmitir siempre y cuando el bit F este siempre en un estado lógico 0 (el bit F es el último bit de la palabra código). Existe una manera para acceder a los demás canales y es cambiando la polaridad de el bit-F. Esto se logra utilizando diodos externos entre las direcciones de entrada, se muestra en el apéndice, figura 3 de las hojas de especificaciones. Esto hace el efecto de producir direcciones fantasmas a la entrada forzando dos entradas bajas a el mismo tiempo, causando que el bit-F se vaya a un estado lógico alto (un 1) Interconectando solo ciertas direcciones de entrada con los diodos se podrá tener un teclado que transmita entre 32 y 64 canales.

Los otros dos switches que aparecen en el diagrama de bloques en las hojas de especificaciones (FK1 y FK2) cambian el tipo de modulación. Cerrando FK1 cambia la modulación de FSK a AM y la polaridad del start-bit. Cerrando FK2 cambia el start-bit a un cero lógico. El rango completo de las opciones esta ilustrado en la tabla 1 de las hojas de especificaciones.

Mientras no se cierre ningún switch o se oprima alguna tecla, el circuito estara en estado ideal y el oscilador de referencia estara sin operar. También, las líneas de direcciones de entrada están en alta impedancia a través de unas resistencias internas de pull-up.

Tan pronto como sea oprimida una tecla, esta toma la apropiada línea de dirección bajando la alta impedancia, señalizando al circuito que tecla está siendo oprimida. El oscilador se habilita, si la tecla es desoprimida antes de que la palabra código haya sido enviada, el circuito retorna a su estado ideal, para prevenir la activación accidental de transmisión, el circuito tiene un tiempo de reacción de aproximadamente 20ms, despues de ser oprimida una tecla. Despues de este retraso, la palabra código sera enviada y repetida en intervalos de cada 90ms tan pronto como sea oprimida la tecla. Tan pronto como sea desoprimida la tecla, el circuito automáticamente envia el canal 62, el "fin de la transmisión". El transmisor regresa a el estado ideal. Las diferencias entre los dos modos de modulación estan ilustrados en el apéndice, figura 4 de las hojas de especificaciones.

La línea de entrada E9 (pin 3) es una entrada especial programada y cuando esta es conectada a la línea apropiada de rastreo por medio de un diodo, esto hara que se modifique la transmisión de acuerdo a la tabla 1 ilustrada en las hojas de especificaciones. En la tabla 1, los datos dentro de los parentesis (FK1, etc) se refiere a los switches mostrados en la figura 3. Si solo una opción es seleccionada, el diodo puede ser omitido. Las conexiones mostradas en la tabla 1 pueden hacerse con cualquier combinación. Las líneas de rastreo (pins 4-7) bajo condiciones ideales, estas salidas estan en baja impedancia un cero lógico. Cuando una tecla es oprimida, el circuito se activa y el oscilador comienza a funcionar y deja de rastrear.

Las líneas de entradas y salidas del oscilador (*pins 12, 13*) están diseñadas para operar con un resonador cerámico o un circuito LC que oscila a 500 kHz. Esto es importante ya que este es un resonador cerámico y no un filtro.

La señal de salida (*pin 8*) proporciona la señal modulada lista para manejar la amplificación de la modulación. Si se desea, el transmisor puede ser usado como un tablero de codificación para usarse directamente con un receptor. En este caso, la opción AM se selecciona, la señal de salida se invierte, y esta se encuentra lista para ser recibida por el sensor.

El GPIU52X receptor infrarrojo y demodulador es un circuito diseñado y desarrollado con lo último en tecnología híbrida, este circuito detector de infrarrojo está diseñado para usarlo como un receptor de características altamente confiables en la detección de infrarrojo. Por lo cual es ideal para detectar infrarrojo a un bajo costo para diversas aplicaciones ingenieriles. Es de fácil manejo, el modulo es pequeño, tiene estabilidad eléctrica, puede ser instalado directamente al equipo que procesará la información.

Este circuito usa un pin para el foto-diodo que este tiene una sensibilidad pico en la rango cercano infrarrojo. El filtro que se encuentra dentro del diagrama de bloques reduce la luz visible o elimina la posible operación falsa causada por otras fuentes de luz.

La salida del foto-diodo se introduce en un circuito preamplificador limitado, para proveer una señal limpia para el resto del circuito. El filtro paso-baja entonces refuta todas las señales que estén fuera de la banda de paso (40 kHz +/- 4 MHz). Las señales que salen de este filtro alimentan al demodulador, integrador, y a un circuito detector de forma de onda (*ver el apéndice: diagrama de bloques de las hojas de especificaciones*). La salida es una señal clara, limpia y bien formada sin la portadora.

El circuito que procesa la información básicamente consta del microcontrolador 68HC11A1, para mayor información acerca de este microcontrolador se puede consultar el manual de referencia de motorola. Aquí solo se describen todos los subsistemas internos y funciones que se utilizaron en el programa para la decodificación y control.

Este microcontrolador tiene dos acumuladores de 8-bits cada uno (*A y B*) que pueden ser usados por algunas instrucciones como un sencillo acumulador llamado registro D que permite hacer un conjunto de operaciones de 16-bits, pero técnicamente en CPU es un procesador de 8-bits.

El microcontrolador posee un grupo bastante largo de instrucciones que involucran a dos registros indexados (*X y Y*: de 16-bits) que pueden hacer operaciones con el registro de

condiciones de banderas del microcontrolador (*CCP*) El CPU tiene su stack pointer y puede estar localizado en cualquier de los 64K byte de espacio para las direcciones. Normalmente, el registro del stack pointer es inicializado por una de las primeras instrucciones del programa de aplicacion. Cada vez que un byte es introducido en el stack, el stack pointer es automaticamente decrementado, y cada vez que un byte es sacado del stack, el stack pointer es automaticamente incrementado. En cualquier tiempo el registro del stack pointer coge la direccion de 16-bits de la siguiente locacion libre del stack. El stack es usado normalmente para llamar subrutinas, interrupciones, y para guardar temporalmente valores o datos.

Cada vez que ocurre una interrupcion (*que no sea mascarable*) las instrucciones que se estan realizando terminan normalmente, la direccion de la siguiente *instruccion (el valor que se encuentre en el contador de programa)* es almacenado dentro del stack, todos los demas registros del CPU tambien son almacenados dentro del stack, y la ejecucion del programa continua a la direccion especificada por el vector de alta prioridad de interrupcion. Despues de completar el servicio de rutina de interrupcion, la instruccion para el regreso de la interrupcion (*RTI*) es ejecutada. La instruccion RTI causa que los valores salvados de los registros son sacados del stack en orden reversivo, y se reanuda la ejecucion del programa como si no hubiese habido una interrupcion. Un aspecto importante es que todo esto es completamente automatico, para asegurar que el stack opere con suficiente espacio es necesario conocer la máxima profundidad de la subrutina o interrupcion anidada en una aplicacion en particular.

El contador de programa (*PC*) es un registro de 16-bits que guarda la direccion de la siguiente instruccion a ser ejecutada.

El registro de codigo de condicion contiene 5 niveles de indicadores, dos bits para interrupciones mascarables, y un bit para deshabilitar el paro de la ejecucion del programa. Los estatus de las 5 banderas reflejan los resultados de operaciones aritmeticas u otras operaciones del CPU conforme se ejecute una instruccion. El bit N refleja el estado del bit mas significativo de un resultado. Para el complemento a dos, un numero es negativo cuando la bandera N es puesta en uno y positivo cuando esta en cero. La bandera Z es puesta en uno cuando todos los bits del resultado son cero reflejando el resultado de una substraccion. La bandera V es usada para indicar si un sobre flujo ha ocurrido en una operacion de complemento a dos. La bandera C es normalmente usada para indicar si un acarreo de un bit ha ocurrido en una resta, o actúa como un indicador de que una la operacion de multiplicacion o division es erronea. Las instrucciones de rotar y cambiar operan con y a traves del bit de acarreo para facilitar multiples operaciones de cambio en la palabra. La bandera E se utiliza para habilitar o deshabilitar la instruccion de STOP, esta instruccion puede hacer que el oscilador se pare. La bandera I indica cuando una interrupcion ha sido requerida, esta (*IRQ*) resulta ser una mascara general que deshabilita todas las interrupciones mascarables. Mientras la bandera I este en uno, las interrupciones estaran dependiendo de esta bandera hasta que sea limpiada con un cero y el CPU continuara operando

hasta que I sea limpiada. Después de cada reset la bandera I es puesta en uno por default y solo puede ser limpiada por software. Cuando cualquier interrupción ocurre, la bandera I es automáticamente puesta en uno después de que los demás registros son guardados en el stack. Después de que el servicio de interrupción ha sido concluido, la instrucción RTI es normalmente ejecutada, restaurando los valores de los registros con los valores que tenían antes de que se presentara un servicio de interrupción. Normalmente la bandera I debe ser cero después de que se ejecute un RTI. Si bien las interrupciones pueden ser rehabilitadas dentro de una rutina de interrupción. La bandera X se utiliza para deshabilitar interrupciones que vienen del pin XIRQ. Después de cualquier reset, la bandera X es puesta en uno por default y solo puede ser limpiada por software. Posee las mismas características que la bandera I solo que esta interrupción es por el pin XIRQ.

Los modos de direccionamiento que utiliza el CPU del 68HC11 son seis y son usados como referencias en la memoria, cada modo de direccionamiento (*excepto el inherente*) resulta de una generación interna de un valor de dos byte referido a la dirección efectiva. Este valor, es un informe del resultado del operando que se aplica, este valor aparece sobre el buz de direccionamiento durante se hace la referencia a la memoria en una porción de la instrucción.

El modo de direccionamiento inmediato ocurre después del código de operación, esta especificado el dato sobre el cual va a operar la instrucción. Ejemplo: LDAA #8A.

El modo extendido o absoluto se indica después de código de operación, esta especificada la dirección donde se encuentra el dato sobre el cual va a operar la instrucción. Ejemplo LDAA #4030.

El modo directo se indica después del código de operación, se especifica el bit menos significativo de la dirección donde se encuentra el dato sobre el cual va a operar la instrucción. El byte más significativo de esa dirección, el microprocesador lo considera 00. Ejemplo LDAA #20.

El modo inherente o implícito no se requiere especificar ninguna dirección ya que el dato generalmente está contenido en un registro interno del CPU. Ejemplo: ABA.

El modo indexado de direccionamiento ocurre cuando la dirección efectiva donde se encuentra el dato se forma de la siguiente manera: el contenido del registro del índice X o Y más un offset (*desplazamiento*) especificado después del código de operación forman la dirección del dato. Ejemplo: LDAA #00.X.

El modo de direccionamiento relativo es usado generalmente por instrucciones de salto, en el caso particular del 68HC11, es usado únicamente y exclusivamente por las instrucciones de

birfurcacion (*branch*) Estas instrucciones de branch en otros microcontroladores se conocen como saltos condicionados en los cuales despues del codigo de operacion se especifica el numero de bytes o localidades de memoria que tiene que saltar. este numero de bytes puede estar especificado en complemento a dos para indicar saltos hacia tras. De lo anterior se puede ver que la capacidad de salto de estas instrucciones esta limitada a 128 localidades hacia en frente o 128 localidades hacia tras.

El puerto B se utiliza como de proposito general, o sea que opera como puerto de salida, es de 8-bit. Escribir algo en el puerto B causa que los datos sean registrados, guardados y sacados o puestos sobre los pines del puerto B. La lectura del puerto B regresa el ultimo dato que fue escrito en este puerto. Cuando el handshake I/O subsistema está operando en modo simple, el escribir al puerto B automaticamente causa un pulso sobre el pin de salida  $\overline{STRB}$ . Este modo simple se selecciona poniendo en handshake (*HAZS*) en su respectivo lugar un cero, este se encuentra dentro del registro de control PIOC. Cuando el MCU opera en modo sencillo, este puerto se usa de proposito general. Cuando el MCU opera en modo expandido, los pines son usados para multiplexar direcciones/buz de datos

El puerto A incluye tres pines solo para captura de senales, cuatro pines par salidas, y un pin que puede ser configurado para operar como entrada o como una salida. Los pines de solo entrada (*PA0-IC2*, *PA1-IC2*, y *PA2-IC1*) tambien sirven como sensores de flancos de bajada o subida de la señal asi como de contadores cuando se detecta un flanco. Los cuatros pines de salida (*PA3-OC3-OC1*, *PA4-OC4-OC1*, *PA5-OC3-OC1*, y *PA6-OC2-OC1*) tambien sirve como un contador principal de salidas de comparacion. Cada funcion de captura incluye un latch de 16-bit. El latch captura el valor del el contador que corre libremente cuando un flanco seleccionado ha sido detectado en el correspondiente pin de entrada

La captura de flancos es generalmente asincrona con respecto a el reloj interno, entonces se sincroniza con respecto al reloj PH2, este proceso de sincronizacion introduce un retraso de cuando el flanco aparece para cuando el valor del contador es transferido y guardado (*latched*) Este retraso debe ser ignorado por que es muy pequeño

El elemento central de cada funcion de captura a la entrada, es el latch que puede ser leido por software como un par de registros de 8-bit. Los registros TICx no son afectados por el reset y no pueden ser escritos o modificados por software. Cuando un flanco ha sido detectado y sincronizado, el contador de 16-bit corre libremente, y su valor es transferido dentro del par de registros como una transferencia paralela de 16-bit. El valor del contador de tiempo se incrementa en uno justo a la mitad del ciclo del reloj PH2 asi que el valor del contador es estable cada que ocurre una captura. La funcion de captura a la entrada opera independientemente uno de otro, y las tres funciones pueden capturar el mismo valor del

contador de 16-bit si la entrada de flancos son detectados dentro del mismo ciclo del contador de tiempo.

Para el MCU, el tiempo físicamente esta representado por la cuenta en el contador de 16-bit que corre libremente. Este contador es el elemento central en el sistema principal de reloj. Las funciones de captura a la entrada son usadas para grabar el tiempo al que algun evento externo ocurre, esto se lleva a cabo por ir registrando el contenido del contador que corre libremente cuando un flanco de subida o bajada es detectado en un pin de capturas a entradas. El tiempo en el que el evento ocurrio es salvado en el registro de captura *(16-bit latch)* y con software se puede leer exactamente cuando ocurrio el evento. Registrando los tiempos de sucesivos flancos que vienen en una señal, el software puede determinar el periodo y/o el ancho del pulso de la señal. Para medir el periodo de una señal se mide dos sucesivos flancos de la misma polaridad de la señal que esta capturandose. Para medir el ancho del pulso, dos polaridades alternadas de flancos son capturadas, para el programa que se utiliza en el sistema de control remoto se captura un flanco de subida y despues se resta este tiempo con el tiempo de cuando ocurre un flanco de bajada. Entonces el ancho de pulso o periodo debe ser menor a la máxima cuenta del contador de 16-bit, de no ser así ocurre un sobre flujo.

Para tener el control sobre estas funciones de captura a la entrada es necesario utilizarlos conjuntamente con los registros TMSK1 y TFLG1. ICxI, ICxF, habilitacion de la interrupcion en las capturas a la entrada y el indicador de que una captura se ha registrado *(x=1,2,3)*. El estatus del bit ICxF es puesto automaticamente en uno cada vez que un flanco seleccionado ha sido detectado en el correspondiente pin de captura. Este estatus puede ser limpiado escribiendo en el registro TFLG1 un uno en la correspondiente posicion del dato. El ICxI controla y permite al usuario configurar cada funcion de captura a la entrada para trabajar en modo de interrupcion o estar periodicamente censando si hay algun evento en dicho pin *(modo conocido como polled)*, esta operacion no afecta el poner o limpiar las correspondientes posiciones de los ICxF. Cuando ICxI es cero, la correspondiente captura a la entrada es inhibida, y la captura a la entrada opera en modo polled. En este modo, las ICxF deben ser leidas de modo polled usando software para determinar cuando un flanco ha sido detectado. Cuando los ICxI estan con un valor de uno, la interrupcion es requerida en el pin de captura si el correspondiente ICxF esta puesto en uno. Antes de dejar la rutina de servicio de interrupcion, con software debe limpiarse las ICxF escribiendo en el registro TFLG1.

Una escala programable permite al usuario seleccionar uno de las cuatro velocidades del reloj que manejan el principal contador de 16-bit. Esta eleccion permite hacer un cambalache entre la resolusion del reloj y el rango del reloj. Por default la velocidad del reloj tiene una resolusion de *500ns* y un rango del reloj de *32.77 ms* entre sobreflujos *(over/low)* para *E=2 MHz*. La velocidad mas lenta causa que el principal contador de reloj E se divida entre una razon de 16 propiciando una resolusion de *8µs* y rango de tiempo de *5213 ms* entre sobreflujos *(para E=2*

## Diseno para un control de un sistema en forma remota

*Nota:* Esto es importante por que el software necesita estos datos si se consideran los sobreflujos, pero si se sabe que el tiempo que se medira es menor al tiempo en el que suceden dos sucesivos sobreflujos, entonces los sobreflujos se ignoran.

Asi este programa tiene un manejador de interrupciones, o sea que tiene una rutina de servicio de interrupcion, que es automaticamente llamado como un resultado de una interrupcion. Esta parte del programa no se puede correr sobre un software de evaluacion o simulador en computadora, asi que el vector de interrupcion se trata de una manera inusual. El vector de interrupcion actual para la captura a la entrada I esta en la direccion \$FFFE y \$FFEF. Para poder hacer uso de esas localidades o vectores, estos se tienen que inicializar en un punto especifico dentro de la memoria RAM llamados pseudo-vectores. Para usar un vector de interrupcion hay que poner la instruccion JMP a la direccion de la rutina de servicio de interrupcion a las locaciones de los pseudo-vectores en la memoria RAM.

En una aplicacion normal, las direcciones de las rutinas de servicio estarian codificadas dentro de la locacion de un vector de dos byte en lugar de escribir una instruccion JMP dentro de la memoria RAM durante la inicializacion del programa principal. Como el microcontrolador se encuentra conectado con la PC en modo bootstrap, automaticamente se cargaran 256 bytes de datos de un programa, que seran puestos dentro del chip en la memoria RAM comenzando en la direccion \$0000 y las localidades normales de los vectores de interrupcion estaran ocupadas por el programa de comunicacion entre el MCU y PCBUG11. Igualmente el vector de reset se encuentra ocupado por el programa de comunicacion. En su funcion normal este vector guarda la direccion en donde comienza la ejecucion del programa principal. Cada vez que al MCU se le aplica un reset comienza a inicializarse, y si se encuentra en modo sencillo automaticamente busca en el vector de reset en el cual se encuentra la direccion a la que debe saltar para comenzar a ejecutar el programa principal. Por lo cual se debe de hacer alguna modificacion para forzar al MCU que ejecute el programa grabado en la EEPROM.

Los diseñadores del MC68HC11A1 anticipadamente hicieron una manera practica para forzar al MCU que brinque directamente dentro de la memoria EEPROM despues de un reset, sin la necesidad de tener modos especiales que hicieran mas dificil de entender. Lo que sucede es que despues de la inicializacion del SCI y puerto D, el bootloader busca en la direccion \$FF el caracter que determinara la velocidad con la que bajara el programa. Si un caracter de interrupcion es recibido en este punto, en lugar de la \$FF, un salto inmediato ocurre al comienzo de la EEPROM (\$B600). Asi el bootloader está listo para transmitir un caracter de interrupcion, el usuario puede lazar los pines RxD y TxD juntos con una resistencia de pull-up, este procedimiento causa un brinco directo a la EEPROM a la \$B600.

La memoria EEPROM se localiza en la direccion \$B600 a \$B7FF (512 bytes) y en estas localidades reside el programa principal del sistema. Antes de entrar a la programacion del sistema lo

### Diseño para un control de un sistema en forma remota

primero a analizar en un osciloscopio es la señal que está enviando el control remoto. Para el control remoto que se utilizó la forma de la señal observada es la misma que aparece en las hojas de especificaciones del MC4497, se encuentran en el apéndice, ahí se describe perfectamente los tiempos aproximados de referencia de cada parámetro de la señal. Experimentalmente la medición de estos parámetros en el osciloscopio varía con respecto a los que aparecen en las hojas de especificaciones, por ejemplo, para el ancho de pulso de un cero se indica que este mide  $540 \mu s$  y experimentalmente este valor no es el adecuado para que el sistema opere de forma eficiente.

Al observar la palabra código en el osciloscopio se decide cuál va a ser la lógica para la decodificación, los criterios que se siguieron para la decodificación fueron:

- Identificar el start-bit.
- Identificar los unos y ceros que contiene el tren de impulsos.
- Identificar cuando termina una palabra código.

Para la identificación del start-bit se realizó una identificación del período que existe entre los dos primeros bits que aparecen en la palabra código, este es de un tiempo que fluctúa entre  $345 \mu s$  y  $328 \mu s$ . El programa está operando en modo de interrupciones, de este modo la medición de los tiempos es mucho más rápida que si operara en modo polled y para este sistema se depende de la velocidad con la que se registren los tiempos en la identificación de los bits lógicos y del período que se contienen en cada palabra código. Las siguientes líneas describen las partes importantes para la medición del período de una señal que entra por el pin PA2/IC1.

WAITL2	LDAA	IC1DUN	se determina después de que se ha decodificado una palabra código
	.	.	.
	BEQ	WAITL2	loop hasta que se halla llevado el proceso de decodificación
	SEI		la decodificación se realizó y se deshabilitan las interrupciones
	.	.	.
SV2IC1	LDX	#REGBAS	apunta al inicio del bloque de registros
	LDAA	IC1MOD	se determina cuando un período se ha leído
	BEQ	ASII	si es igual a cero comienza a medir el período

**Diseño para un control de un sistema en forma remota**

	BRA	LUPE	si no brinca a LUPE (leer la palabra código)
ASII	INC	IC1MOD	de \$FF a 0 es 1 <sup>er</sup> de 0 a 1 es 2 <sup>da</sup> flanco
	BNE	NOIST2	brinca si es el segundo flanco
	LDD	TIC1.X	lee el tiempo en el que ocurre el primer flanco
	STD	FRSTE	guarda el valor en esa localidad
NOIST2	BRA	OUI2IC1	termina la primera lectura
	LDD	TIC1.X	lee el tiempo en el que ocurre el segundo flanco
	SUBD	FRSTE	se obtiene el valor del periodo
	BCLR	TCTL2.X.\$30	deshabilita la detección de flancos
OMNI	CPD	BAJO	el periodo se compara con un umbral
	BHI	OMNI	brinca si es menor el umbral
	BRA	ZPRI	si no pasa a terminar
	CPD	ALTO	se compara el periodo con un umbral
LIFE	BLS	LIFE	si no lo excede pasa a leer la palabra código
	BRA	ZPRI	de lo contrario pasa a terminar
	LDAA	#1	se inicializa la lectura de la palabra código
	STAA	IC2MOD	habilita la detección de flancos de subida
ZPRI	BSET	TCTL2.X.\$10	se inicializa el registro para una nueva lectura del periodo
	LDAA	#FF	
	STAA	IC1MOD	se limpia la bandera ICIF. listo para detectar otro flanco
OUI2IC1	BCLR	TFLG1.X.\$FB	
	RTI		regresa a ejecutar el programa principal

En la parte inicial del programa principal se encuentra una porción dedicada a la inicialización de los pseudo-vectores. Esta forma indirecta de usar los vectores de interrupción tiene su justificación en que estas localidades no son accesibles para el usuario cuando se está trabajando con el microcontrolador conectado a una computadora operando en modo bootstrap. Para poder utilizar estas interrupciones, los vectores se reacomodan automáticamente en unas localidades específicas en la memoria RAM llamadas pseudo-vectores. Una instrucción JMP se guarda en esas locaciones de la RAM, que apunta al comienzo de una rutina de servicio de interrupción. En una aplicación normal, la dirección de comienzo de una rutina de servicio de interrupción podría ser codificada dentro de las locaciones para los vectores que se encuentran en las últimas localidades del MCU. Es importante aclarar que las instrucciones que se encuentran en el programa principal no afectan el mínimo pulso medible y que la operación de interrupción no empieza hasta que se termine la ejecución de la instrucción que se está realizando en el programa principal.

Como se observa arriba, el CPU se encuentra en un loop continuamente cuando esta en WAITL2 esperando detectar que ocurra el primer flanco de subida, asi el flanco llega asincronamente a la ejecucion del programa, donde el flanco ocurrira de manera incierta

Cuando una interrupcion ocurre, el loop continua ejecutandose mientras que el MCU lee lo hay dentro del pseudo-vector, se encuentra una instruccion de brinco y la direccion a la que debe brincar. Esta direccion es donde se encuentra el comienzo de la rutina de servicio de interrupcion. La instruccion BEQ ASII no brincara hasta que se halla hecho el registro del primer periodo. El registro temporal IC1MOD guarda el dato que sirve de control para identificar cuando ha ocurrido el primer flanco y cuando ha ocurrido el segundo flanco. La instruccion BNE NOSIT no brincara hasta que se haya registrado el tiempo del primer flanco. La medicion del periodo se realiza en la instruccion SUBD FRSTE, esta instruccion lo que hace es sacar una diferencia de los tiempos registrados, y este nuevo valor se almacena en el registro D por que es de 16-bits. La lectura de los tiempos se lleva acabo inmediatamente despues de que se detecto un flanco con la instruccion LDD TIC1.X. Este registro es un contador de 16-bits que empieza a contar libremente y no se puede detener, por lo que una primera lectura en un instante aleatorio de este registro se resta de una segunda lectura en un instante dado y es importante tener en cuenta que este programa no considera los sobre flujos que existen en el registro TIC1, entonces solo se pueden hacer mediciones máximas de tiempo que no excedan la cuenta máxima de los 16-bits del registro.

Se puede observar en el programa que despues de hacer la medicion de un periodo se deshabilitan las detecciones de flancos para inmediatamente despues hacer una comparacion del valor medido con unos umbrales, o sea que se ha definido un rango fijo en el que puede oscilar fluctuar la medicion de este periodo, si el valor obtenido cae dentro de este intervalo (*umbrales*) el registro IC2MOD automaticamente hace que el programa brinque a otra parte del programa (*etiqueta LUPE*) en donde se realiza la decodificacion de la palabra código. La etiqueta ZPRI siempre activara la deteccion de flancos de subida y la etiqueta OUI2IC1 limpia las banderas de deteccion de flancos. Las siguientes lineas describen las partes mas importantes de la decodificacion de la palabra código que entran por el pin PA2/IC1.

SV2IC	1LDX	#REGBAS	apunta al bloc de registros
	LDAA	IC2MOD	se determina despues de leer un periodo
	BEQ	ASII	identifica que se va a leer (un periodo o un ancho de pulso)
	BRA	LUPE	brinca para medir anchos de pulsos
ZPRI	BSET	CTL2.X:\$10	se deshabilitan las sensibilidades de deteccion de flancos

	LDAA	#FF	
	STAA	ICIMOD	se inicializa de nuevo para detectar flancos
OU2IC1	BCLR	TFLG1.X.\$FB	limpia IC1F
	RTI		regresa a donde se te llamo
LUPE	INC	ICIMOD	si el cambio es: FF = -0 es el 1o flanco; 0 = +1 es el 2o flanco
	BNE	NUOIST2	si no es cero, es el final del pulso
	LDD	TIC1.X	lee el tiempo del 1o flanco
	STD	FRSTE	y lo guarda hasta la proxima captura
	BCLR	TCTL2.X.\$30	deshabilitar las sensibilidades de captura
	BSET	TCTL2.X.\$30	reconfigura la sensibilidad a flancos de bajada
	BRA	OU2IC1	se termina el proceso del 1o flanco
NUOIST2	LDD	TIC1.X	lee el tiempo cuando hay fin del pulso (flanco de bajada)
	SUBD	FRSTE	saca la duracion del ancho de pulso = T
	BCLR	TCTL2.X.\$30	deshabilita las sensibilidades de deteccion
	CPD	CEBA	*****
	BHI	UNI	*
	BRA	OUT	*
UNI	CPD	UNAL	*
	BLS	ESSO	*todo este bloque realiza las comparaciones de T
	BRA	OUT	*con sus respectivos limites o umbrales y clasifica
ESSO	CPD	CEAL	*de acuerdo a su tiempo si es un cero o un uno y si
	BLS	PONO	*no alcanza clasificacion se manda a la etiqueta OUT
	CPD	UNBA	*
	BHI	PON11	*
	BRA	OUT	*****

En la parte dedecodificacion de la palabra código se escogio que la logica dedecodificacion fuera realizada en base a los tiempo que dura un ancho de pulso, como se puede observar en las hojas de especificaciones del MC4497, la señal cuando esta modulada en AM un 1 logico tiene un ancho de pulso de  $500\mu s$  y para el cero este tiene  $510\mu s$ ; entonces el MCU tiene que hacer una lectura del tiempo que tiene cada ancho de pulso que contenga la palabra código y en base a esta medicion se determinara quien es un uno o un cero. Mas adelante se observa que no se consideran los anchos de pulso que indican las hojas de especificaciones, se toma otro criterio para clasificar un cero y un uno, pero eso se explica mas adelante.

El método que se ilustro para la medicion de un periodo es muy semejante al que se utiliza para la medicion de anchos de pulsos, excepto en que el tipo de sensibilidad de un flanco se reconfigura entre la captura del primer flanco (*de subida*) y la captura del segundo flanco (*de bajada*). Asi este particular programa se configura para capturar primero un flanco de subida a

#### Diseno para un control de un sistema en forma remota

la entrada del pin PA2/IC1 Despues de ser detectado el primer flanco, el tipo de flancos que va ha detectar se reconfigura para detectar flancos de bajada.

Como se observa en las primeras lineas de este programa parcial la instruccion BRA LUPE esta intimamente ligado con el registro temporal IC2MOD, cuando este registro contenga puros ceros significa que no se ha leido ningun periodo que se encuentre dentro de los umbrales establecidos y cuando contenga un valor diferente de uno, entonces si procede a hacer mediciones de anchos de pulsos. El valor que contiene este registro se actualiza cada que se lee un periodo completo. La instruccion BNE NUOIST2 no brincar durante el proceso de medicion del primer flanco del pulso que se este leyendo. Continua la ejecucion del programa con la instruccion LDD TIC1X. Las instrucciones BCLR; BSET no son tan rapidas como un par de instrucciones LDAA # \$TAA TCTL2, ya que su secuencia en ciclos maquina es mas larga pero se escogieron por que no alteran los bits que se encuentran en los demas registros. Esto se observa cuando se da lugar a la deteccion de un flanco siempre se tiene que limpiar las banderas en el registro TFLG1. En el programa cada que se detecta un flanco se pone un uno en la bandera correspondiente al pin de entrada, aqui se tiene que las entradas son por el pin PA2/IC1 y le corresponde la bandera ICIF del registro TFLG1.

Se determinaron ciertos umbrales que no deben ser excedidos o que deben ser excedidos para la cota superior de un cero (CEAL) igual a:  $1091 \mu s$ . Para la cota inferior (CEBI) igual a:  $1536 \mu s$ . Los rangos quedaron para la cota superior de un uno (UNAL) igual a:  $8178 \mu s$ . Para su cota inferior (UNBA) igual a:  $2560 \mu s$ . Estos umbrales se encuentran en la parte inicializadora del programa. Se puede observar que el rango asociado con sus respectivos umbrales es demasiado grande, es porque cuando se observo la palabra codigo en un osciloscopio los anchos de pulsos varian con respecto al angulo de recepcion. Cuando el angulo de recepcion se incrementa los anchos de pulso disminuyen, entonces se tiene que considerar esta observacion para ajustar la medicion del minimo y maximo ancho de pulso, con estas consideraciones se hace mas eficiente el funcionamiento del sistema. El criterio muy importante que se hizo para determinar los umbrales que clasifican los ceros y unos, se determino observando la palabra codigo, cuando se presenta el caso en que un cero es precedido de un uno se forma un solo pulso de duracion igual a la suma de sus respectivos anchos de pulsos, entonces este pulso de mayor duracion se determino como un uno logico, por eso es que los umbrales para el uno son tan amplios. Y cuando se presenta un uno o un cero segun como se indica en las hojas de especificaciones, aqui se consideraron como ceros. Con estos criterios se reducen las posibles combinaciones de bits lógicos que forman la palabra codigo, teniendo como resultado solo 13 distintas palabras código en comparacion con las 60 que se pueden tener siguiendo las consideraciones de las hojas de especificaciones. Pero para este pequeno sistema solo se necesitan cuando mas 8 palabras código para realizar las funciones establecidas en el planteamiento del problema

### Diseno para un control de un sistema en forma remota

Las siguiente parte del programa realiza la decodificacion de la palabra codigo y tiene tambien la funcion de identificar cuando se ha terminado de transmitir la palabra codigo. Despues de la clasificacion del ancho de pulso medido se acomoda la palabra codigo de una manera logica dentro de un registro que constantemente sera cambiado. este registro funciona como un flip-flop.

PONO	LDAA	WORD	lee el ultimo acomodo de bits en WORD
	LSLA		se introduce un 0 en WORD
	STAA	WORD	se actualiza WORD
	DEC	CUENTA	decremento en 1 el contador de bits
	BNE	ZPRI	si cuenta no es 0 está en proceso descodificador
	BRA	OUT	
PON11	LDAA	WORD	lee el ultimo acomodo de bits en WORD
	LSLA		se introduce un espacio que sera ocupado
	STAA	WORD	se actualiza WORD
	LDAA	#700000001	
	ORAA	WORD	se rellana el espacio vacio con un 1
	STAA	WORD	se actualiza WORD
	DEC	CUENTA	
	DEC	CUENTA	
	BNE	ZPRI	si la cuenta no es 0 está en proceso descodificador
OUT	LDAA	#1	
	STAA	ICIDUN	la decodificacion termino
	BCLR	TFLG1.X.\$FB	se limpia la bandera ICF
	RTI		regresa al servicio ICI de interrupcion

Como se observa en el programa las etiquetas PONO y PON11 funcionan como una especie de subrutinas se encargan de crear una nueva palabra resultante de la decodificacion de la palabra código. El registro temporal WORD sirve para ir acomodando con forme se vayan descodificando los bits lógicos de cada palabra código. Cada que se brinque a cualquiera de estas etiquetas lo primero es leer el ultimo estado que se tiene en el proceso dedecodificacion. La instruccion LSLA sirve para abrir un espacio que sera rellenado despues o simplemente para introducir un cero en el registro WORD. La secuencia LDAA #700000001, ORAA WORD, introduce un 1 logico en el espacio vacio previamente hecho sobre el registro WORD. Sabemos de ante mano que la palabra codigo consta de 6-bits por lo que el contador CUENTA contiene el valor de la distancia en bits que tiene la palabra codigo, y cuando esta cuenta llegue a cero esto indica que se han leído 6 anchos de pulsos y se ha terminado la decodificacion de una palabra, esto sucede cuando se brinca a la etiqueta OUT. En particular el valor inicial que tiene el registro CUENTA es de 8 bits, entonces va a leer 7 bits y no 6, pero en lo unico que se modifica este proceso, es que la

palabra final descodificada se recorre en una localidad hacia la izquierda. Como interes personal se decidio introducir este valor

Como parte final en la descripcion de los fragmentos mas importantes de este sistema se encuentra el control en la intensidad de la en un foco. Aunque esta parte se encuentra dentro del loop antes mencionado en la etiqueta WAIT1.2, se explica hasta ahora ya que primero se tiene que tener bien entendido el concepto de interrupciones y el correcto funcionamiento dedecodificacion de una palabra codigo. Para esta etapa de pruebas se necesita tener todo el sistema implementado para hacer las modificaciones pertinentes al programa. Para la solucion de este problema se controla el angulo de disparo que tiene un TRIAC, variando este angulo se consigue que el triac deje drenar mas o menos corriente hacia el foco. Analizando las hojas de especificaciones de los TRIACS 2N6342-49 se observa que el angulo minimo de conducción es  $30^\circ$  y el maximo es de  $180^\circ$  y se observa que estos angulos solo estan asociados con un medio ciclo que componen la señal de AC de *120 Volts 60 Hz*. Entonces lo que hay que estar controlando es el incremento o decremento de este angulo que deja drenar corriente en mayor o menor medida entre sus terminales MT1 y MT2. Las hojas de especificaciones de los TRIACS se anexan en el apendice

Cuando se presenta un pulso en el GATE del TRIAC este deja conducir una corriente entre las terminales MT1 y MT2 encendiendo el foco, entonces dependiendo de la duracion que tenga el pulso en G sera el tiempo que dure el TRIAC en conducción, y si controlamos el ancho de pulso que se presenta a la entrada de G se puede controlar el instante de conducción del TRIAC. Entonces si sabemos cuando empieza un medio ciclo de la señal de AC de *120 Volts 60 Hz* y si en ese instante ponemos un pulso en G de duracion finita, no mayor al tiempo de duracion del medio ciclo de la señal de AC de *120 Volts 60 Hz* estaremos controlando el angulo de disparo. El periodo de la señal de *60 Hzes* de *16666  $\mu$ s* y el medio ciclo del periodo es de *8333  $\mu$ s* entonces dividiendo el tiempo del medio ciclo entre *255* se obtiene la particion del medio ciclo en *255* pequenos intervalos de tiempo de *32  $\mu$ s* y cada uno de estos pequenos intervalos corresponde a una porcion del ángulo maximo de conducción, es como si se dividiesen los *180^\circ* en *255* intervalos, pero para este caso necesitamos conocerlos en tiempo y no en grados. La razon del porque de la division entre *255* es por que realmente se divide entre un contador de 8-bits y dependiendo del valor que contenga el contador sera la duracion que tenga el pulso en el GATE que dejara conducir al TRIAC un cierto angulo, por ejemplo, si el contador llega a su maxima cuenta *255* entonces el TRIAC conduce todo el medio ciclo (*180^\circ*) pero si la cuenta se encuentra en cero el TRIAC no conduce nada. Por lo tanto entre sea mas grande el angulo a los  $30^\circ$  la intensidad de luz del foco sera mayor y caso contrario

Entonces lo que se hace es disenar un circuito que sincronice la señal de AC de *120 Volts 60 Hz* con otra que salga del microcontrolador a la misma frecuencia, si bien que se tiene que detectar el comienzo de un medio ciclo de la señal de AC e inmediatamente despues mandar un pulso al

Diseno para un control de un sistema en forma remota

GATE del TRIAC, donde este ancho de pulso como se explico arriba controla la intensidad de luz en un foco. El circuito debe modificar la señal de AC a una señal de DC cuadrada a *5 Volts, 60 Hz (lógica TTL)* que se introduce al registro TMSK1 de capturas de entradas justo que corresponde al pin PA1/IC2. Para obtener esta señal con estas características es necesario pasar la señal de AC por un transformador de *120 Volts, 6 Volts* se obtiene la misma señal de AC de *60 Hz* pero con un voltaje de 6 Volts, inmediatamente se pasa la señal por un diodo N4007 en serie con una resistencia que recorta los lobulos negativos de la señal de AC y limita la corriente; a la salida de este se conecta un diodo Zener aterrizado, este diodo Zener es a *5 Volts/1/2 Watt* y para asegurar que la señal tenga a la salida 5 Volts se pone un divisor de voltaje. Pero aun no se tiene una señal cuadrada completamente, se tiene una señal casi cuadrada, mas bien trapezoidal a *5 Volts* y con solo lobulos positivos. Para obtener la señal completamente cuadrada se introduce la señal por unas compuertas inversoras que operan con ciclo de histeresis para asegurar que la transición de 0 Volts a 5 Volts sea lo mas rapido posible. A la salida de estas compuertas se tiene la señal perfectamente cuadrada con lobulos positivos que van de 0 a 5 Volts y que tiene una frecuencia de 60 Hz lista para ser puesta en el pin PA1/IC2.

La siguiente fracción del programa describe el control de la intensidad de luz en un foco.

WAITL2	BRCLR	TFLG1.X.\$02.WAITL2	es un loop hasta detectar un flanco
	LDAB	CONTEO	se lee el angulo de disparo
SOPAS	LDAA	#\$0A	se lee el valor de una sola partición
HAPY	DECA		transcurre el tiempo de una sola particion
	BNE	HAPY	hasta que A llegue a 0
	DECB		transcurre el tiempo del CONTEO
	BNE	SOPAS	hasta que CONTEO sea cero
	LDAA	#\$10000000	se introduce el pulso que controla al GATE
	ORAA	PALABROTA	se actualiza la palabra descodificada
	STAA	PORTB.X	se manda el pulso al GATE
HOLD	LDY	TIC2.X	
			.....
	CPY	#\$0005	*esta secuencia sirve para que no se
	BIH	LAOU	*l traslapen os pulsos enviados al Triac
	BRA HOLD		.....
LAOU	LDAA	#\$01111111	se corta el ancho del pulso que controla el
GATE			
	ANDA	PALABROTA	se actualiza la palabra descodificada
	STAA	PORTB.X	se manda el corte del pulso al GATE
	BCLR	TFLG1.X.\$FD	limpia la bandera IC2F
	LDAB	IC1DUN	se determina al decodificar la palabra codigo

### Diseño para un control de un sistema en forma remota

BEQ	WAITL2	loop hasta reconocer la palabra código
SEI		se descodifica, no hay interrupciones

La instrucción BRCLR TFLG1.X.\$02.WAITL2 hace que el CPU opere en modo polled repitiendo esta instrucción continuamente esperando la detección del primer flanco de la señal de 60 Hz ya sea de bajada o de subida. Inmediatamente después de ser detectado un flanco comienza a contar el tiempo que tenga el registro CONTEO, y una vez que termina ese tiempo manda un pulso al GATE del TRIAC por el pin PBO/AB que tiene que ser cortado antes de que termine el medio ciclo de la señal de 60 Hz de lo contrario existe un traslape en un instante con el medio ciclo siguiente causando un destello de luz mayor al que se tenga si su ángulo de conducción es mucho menor a los 100°. Una vez cortado el pulso se regresa al loop infinito en donde siempre está preguntando la existencia de la señal de 60 Hz y si existe, continuamente manda un pulso al GATE del triac que hace que tenga una particular intensidad de luz el foco. Si no existe la señal de 60 Hz en el pin PA1/IC2 no podrá salir del loop.

La parte final del programa son solo sencillas instrucciones de comparación para identificar si una palabra ha sido enviada una o dos veces, para tener el control de que si se ha enviado una vez la palabra código mande un pulso al GATE del TRIAC correspondiente (*se prende el foco*) y hasta que se detecte que nuevamente esta palabra código ha sido enviada entonces cortara la transmisión del pulso que se tenía en el respectivo TRIAC (*se apaga el foco*). También se encuentra la parte de identificación de las funciones de incremento o decremento en la intensidad, así como el control del motor de AC. Esto se encuentra en las siguientes líneas del programa.

BCLR	TCTL2.X.\$30	se deshabilitan las sensibilidades del pin PA2/IC1
LDA	WORD	se lee la palabra descodificada
CMPA	#%00110000	se compara con una palabra determinada
BEQ	SUBINT	si es igual sube la intensidad
CMPA	##\$40	se compara con una palabra determinada
BEQ	BAJINT	si es igual baja intensidad
LDAB	##FF	
RISS	DECB	transcurre un tiempo entre la repetición de la palabra
BNE	RISS	
CMPA	##%00110000	se compara con una palabra determinada
BEQ	RIAND	si es igual mueve motor
ORAA	PALABROTA	se actualiza la palabra descodificada en un nuevo registro
CMPA	PALABROTA	se compara la anterior con la nueva
BEQ	PUSH2	si es la misma se ha oprimido 2 veces la misma tecla
STAA	PALABROTA	si se oprimio solo una vez (se prendera el foco)

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

	BRA	COCA	se alista para transmitir la informacion nueva
PUSH2	LDA	WORD	se lee la palabra descodificada
	COMA		se saca su complemento
	ANDA	PALABROTA	se apaga el foco, se ha oprimido 2 veces
	STAA	PALABROTA	se actualiza la informacion
COCA	STAA	PORTB.X	se transmite la nueva informacion
	JMP	PWTOP	concluye el proceso de actualizacion de estados

como se puede observar en las lineas de arriba este fragmento opera como un flip-flop, conserva su estado lógico por tiempo indefinido hasta que este sea modificado nuevamente. la secuencia ORAA: CMPA hace la comparacion de informacion que se tenia con la informacion nueva y en base a esa comparacion hace la funcion de apagar o prender un foco segun se halla detectado la secuencia de transmision. Las primeras lineas tienen la funcion de identificar cuando se manda a subir o bajar la intensidad de luz así como de cuando mover un motor.

Las lineas restantes del programa como se pueden observar se dedican a la inicialización del programa, es decir inicializar todos los registros que se ocupan y meterle las condiciones iniciales a cada registro. Todo el programa unificado y ordenado se anexa en el apéndice de este trabajo.

## Capítulo 7

### Pruebas y evaluación

#### 7.1 Medición del parámetro del detector y transmisor

aquí los parámetros a medir para el control remoto son: el ángulo de cobertura con el que sale el haz de luz infrarroja de los foto transmisores. Para el detector es la distancia máxima de sensibilidad del sensor para recuperar la palabra código, así como también su ángulo máximo de sensibilidad para la recepción.

El ángulo con el que sale el haz de luz infrarroja del control remoto no depende de la vida que tenga la pila que alimenta al circuito transmisor. El ángulo de cobertura que se midió experimentalmente se encuentra entre unos 145º de extremo a extremo. Debido a que tiene tres foto transmisores el control remoto su región de cobertura es mucho mayor que el de los controles que existen comercialmente que solo tienen un foto transmisor. La figura 8.1 muestra la mediciones experimentales y aproximadas de los parámetros del detector y transmisor. Estas mediciones se hicieron con los circuitos al intemperie, es decir que no se encontraban dentro de los gabinetes que están destinados para su presentación final.

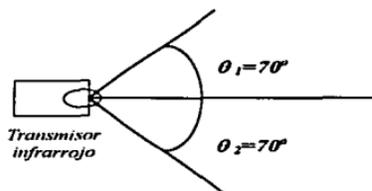
#### 7.2 Medición de características finales.

Para este último punto a tratar me encontré que se modificaron los parámetros de transmisión y de detección cuando todo el sistema fue incorporado en su presentación final (en su respectivo gabinete). La presentación final limitó drásticamente los parámetros de detección y transmisión debido al diseño del gabinete que cubre a todo el sistema receptor, este diseño no es el óptimo, en el diseño de la caratula se tiene una ventana donde se ubica el foto censor, esta ventana tiene un tamaño muy pequeño, la cual limita el campo receptor del sensor y por otra parte se le puso una mica para protección del sensor, pero esta mica polariza la luz de una manera que no es conveniente para conservar el ángulo de recepción que tenía el sistema antes de ser puesto en este gabinete. Esta mica debe ser del material óptico para infrarrojo, delgada y de color adecuado, de preferencia de color rojizo oscuro para que sirva como un filtro para las demás longitudes de onda que puedan meter ruido al sistema. Entonces se notó que el ángulo de sensibilidad en la cobertura para el receptor se redujo. Para el transmisor prácticamente se conservó el ángulo de cobertura, no se notó diferencia alguna. Y su potencia a la salida es la misma, la cual es muy buena, se comprueba cuando se hace que la señal con los obstáculos que se encuentre en su trayectoria y que de entre algunos de esos rebotes la señal alcance al receptor. En la figura 8.2 se muestran las medidas finales de los parámetros del receptor y el transmisor.

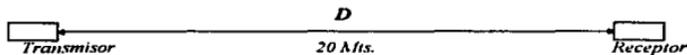
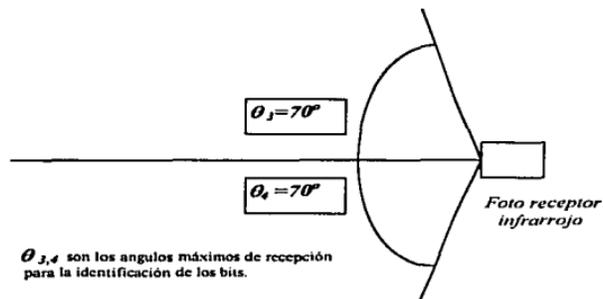
Una observacion experimental importantisima que se tiene que considerar para el desarrollo del programa, fue que los anchos de los pulsos de cada bit que envia el control remoto varian conforme se incrementa el ángulo de recepcion, es decir, considerando como un ángulo de 0º entre el transmisor y receptor cuando estos se encuentran frente a frente, por lo tanto cuando se mueve el control remoto hacia la derecha se incrementara al ángulo de recepcion hacia la derecha y si rebasa los 45º se nota un disminucion en los anchos de pulsos de cada bit uniformemente. Esta variacion aumenta conforme se siga incrementando el ángulo de recepcion hasta el punto en que desaparecen los pulsos. Para el programa se consideraron estas variaciones y se diseño el programa para que reconociera cada bit aun cuando este tuviera un ancho de pulso muy pequeño, hasta el limite que tiene el programa para medir anchos de pulsos muy pequeños. Entonces con estas consideraciones el parametro del detector solo dependió de las limitantes que ofrece el gabinete en el que encierra a todo el sistema, como ya se comento anteriormente.

Para la alimentacion de todo el sistema excluyendo a la parte de potencia se requiere como minimo una fuente de 2 Amperes a 5 Volts para que el sistema opere de forma correcta. Y para la parte de electrónica de potencia se necesita usar cables de calibre 18 para cada terminal de los Triacs (MT1, MT2) ya que las diferentes cargas (inductivas, resistivas) pueden demandar varios Amperes, segun la potencia de consumo que tenga este.

Para la transmision existe un rango de voltajes para la operacion del integrado que se ocupa para en transmision, este rango fluctua entre 4.5 Volts hasta 12 Volts, por lo cual, con una pila cuadrada de 9 Volts el integrado opera de manera correcta, y una ventaja de esta pila para un control remoto es que quita poco espacio y alimenta con más voltaje al circuito que si tuvieramos 3 pilas de tamaño AAA que solo darían un total de 4.5 Volts para la alimentacion de este circuito. Otra ventaja es que su periodo de vida es más larga.

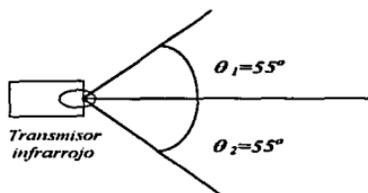


$\theta_{1,2}$  son los ángulos aproximados de dispersión de la radiación infrarroja

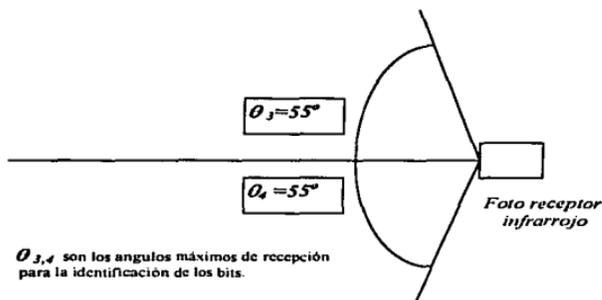


$D$  es la distancia máxima para la decodificación

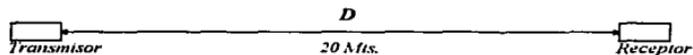
Figura 8.1 Mediciones de los parámetros del sensor y receptor



$\theta_{1,2}$  son los ángulos aproximados de dispersión de la radiación infrarroja



$\theta_{3,4}$  son los ángulos máximos de recepción para la identificación de los bits.



$D$  es la distancia máxima para la decodificación

Figura 8.2 Mediciones de los parámetros del sensor y receptor

## Conclusiones.

Para este trabajo de tesis el objetivo principal y particular, era hacer una investigación amplia del comportamiento de la radiación infrarroja con la naturaleza y con los sistemas ópticos de infrarrojo. Con el fin de obtener las bases necesarias para comprender como se pueden hacer sistemas que interactuen con este tipo de radiación o posiblemente mejorar sistemas que ya existen. Este tema ya está sobre estudiado y explotado de manera muy profunda a nivel mundial pero podría aprovecharse asegurar que sobre este tema todavía se pueden explotar muchos de los recursos que ofrece esta radiación para la investigación en las distintas áreas de interés. Para una iniciación en este tema es básico tener el conocimiento del comportamiento de las radiaciones con la naturaleza y con los sistemas ópticos ya desarrollados que interactúan con este tipo de radiación, es por eso que profundice más en los temas que explican las características de esta radiación.

El otro objetivo de este trabajo de tesis resulta del planteamiento de una solución para el control de un sistema en forma remota e inalámbrica, utilizando como medio de comunicación la radiación infrarroja. Uno de los puntos importantes que comprenden este objetivo, es que la solución de este problema sirva como base o parte importante para solucionar de algún modo más problemas en los que se requiera controlar algún sistema en forma remota e inalámbrica o para la descodificación de información.

Este tipo de solución que se da para el control del sistema eléctrico de una recámara resultó ser muy cómodo y bueno en el sentido de que es económico, de tamaño pequeño y aparte de que funciona muy bien, creo que con este tipo de sistema se tuvo una buena explotación de los recursos que ofrece el microcontrolador y el control remoto.

Las dos grandes ventajas que ofrece el utilizar un microcontrolador para este sistema son: la simplificación y comodidad de la implementación así como la flexibilidad para modificar las necesidades de control, de manera que si cambiasen las características de operación del sistema, sea sencillo hacer que el programa cambie para satisfacer nuevas necesidades.

Para la solución de este sistema la parte más importante y difícil fue el programa para descodificar la señal y unirlo con el programa principal que controla el ángulo de disparo de un triac y con la parte que ejecuta las acciones después de reconocer una palabra código que es válida para este programa.

En cualquier diseño e implementación de los sistemas se tienen que buscar la manera de hacer más óptima la realización del sistema, o sea que parte del trabajo consiste en documentarse muy bien acerca de las herramientas que existen en el mercado.

Ya con los criterios establecidos en la descodificación lo siguiente a tratar es la electrónica de potencia se busca la solución más óptima para acoplar la parte de control con la de potencia para protección del sistema de control. Para esta etapa las consideraciones que se tienen que hacer son de que tipo de carga será la que controle los triacs, si son resistivas o inductivas, así como la potencia de consumo de las cargas para la elección de las características que deben tener los triacs.

La bibliografía utilizada y de consulta en general sobre la radiación infrarroja es escasa dentro del círculo de bibliotecas de la UNAM en comparación con otros temas. Y estas bibliografías no tratan este tema de manera general, sino que es literatura que se especializa en un área de investigación en específico, en otras palabras no encuentro libros de consulta general para el tema de la radiación infrarroja, por lo cual, tuve la oportunidad de consultar distintos libros que tratan los distintos aspectos de la radiación infrarroja de manera muy profunda. Esto contribuyó positivamente de manera particular en mi intelecto durante el proceso de estructuración de esta tesis. Este trabajo de tesis abarca muchos aspectos generales que fueron documentados de las distintas bibliografías que consulte, haciendo que este trabajo sea un libro de consulta más general que los que se encuentran en las bibliotecas.

Con este objetivo bien claro logre combinar de manera satisfactoria ( muy personal ) la teoría con la construcción de un sistema que utiliza esta radiación. Si bien no resultó ser un experto en la teoría cuántica ni en el diseño de sistemas digitales, pero los resultados de la combinación de dos diferentes objetivos por decirse así; una investigación amplia de dicha radiación y el diseño e implementación de un sistema que interactúe con esta radiación. Hizo que hubiera un equilibrio entre una visión más profunda y profesional en esta área de interés y la realización física e ingenieril de un sistema ya funcionando en tiempo real. En principio yo considero que esta combinación es óptima por que se puede aplicar de manera general y específica los conocimientos recabados en la investigación y documentación para la solución del problema en este tema de interés.

Conforme paso el tiempo en la elaboración de este trabajo de tesis, puedo decir que la tarea de aplicar en un proyecto de tesis todo lo aprendido durante la carrera profesional fue plenamente cumplida, desde las operaciones de aritmética básica, pasando por el diseño de sistemas electrónicos sean digitales y analógicos, hasta la programación de un microcontrolador, demuestran un reflejo bueno de la formación que se recibe durante la carrera profesional. Todo lo mucho o poco que se aprendió antes y durante la elaboración de este trabajo se lo debo a la formación que brinda la facultad de ingeniería.

Lo que resulta más significativo para un estudiante es saber que desde el índice hasta la bibliografía, los conocimientos y problemas previstos e inclusive otros por menores, enriquecieron este andar hasta el final. Con este trabajo y esfuerzo se concluye una etapa de estudio, dejando atrás una solución para que facilite en algo a posibles sistemas que requieran la interacción con radiación infrarroja.

## Apéndice

## Triacs

### Silicon Bidirectional Triode Thyristors

...designed primarily for full-wave ac control applications, such as light dimmers, motor controls, heating controls and power supplies, or wherever full-wave silicon gate controlled solid-state devices are needed. Triac type thyristors switch from a blocking to a conducting state for either polarity of applied anode voltage with positive or negative gate triggering.

- Blocking Voltage to 800 Volts
- All Diffused and Glass Passivated Junctions for Greater Parameter Uniformity and Stability
- Small, Rugged, Thermowatt Construction for Low Thermal Resistance, High Heat Dissipation and Durability
- Gate Triggering Guaranteed in Two Modes (2N6342, 2N6343, 2N6344, 2N6345) or Four Modes (2N6346, 2N6347, 2N6348, 2N6349)
- For 400 Hz Operation, Consult Factory
- 12 Ampere Devices Available as 2N6342A thru 2N6349A

**2N6342  
thru  
2N6349**

TRIACs  
8 AMPERES RMS  
200 thru 800 VOLTS



3

## MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
*Peak Repetitive On State Voltage ( $T_J = -40$ to $+100$ C)	VDRM	200 300 500 800	Volts
*1/2 Sine Wave 50 to 60 Hz Gate Open 2N6342, 2N6346 2N6343, 2N6347 2N6344, 2N6348 2N6345, 2N6349			
*RMS On State Current Full Cycle Sine Wave 50 to 60 Hz ( $T_C = -80$ C) ( $T_C = -90$ C)	$I_T(RMS)$	8 4	Amps
*Peak Non-Repetitive Surge Current (One Full Cycle 50 Hz, $T_C = -80$ C) Preceded and followed by Rated Current	ITSM	100	Amps
Circuit Fusing ( $t = 8.3$ ms)	$i^2t$	40	A <sup>2</sup> s
*Peak Gate Power ( $T_C = -40$ C, Pulse Width = 2 $\mu$ s)	PGM	20	Watts
*Average Gate Power ( $T_C = -50$ C, $t = 8.3$ ms)	PG(AV)	0.5	Watt
*Peak Gate Current	IGM	2	Amps
*Peak Gate Voltage	VGM	10	Volts
*Operating Junction Temperature Range	$T_J$	-40 to +125	C
*Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-40 to +150	C

2N6342 thru 2N6349

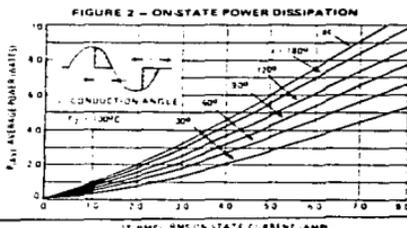
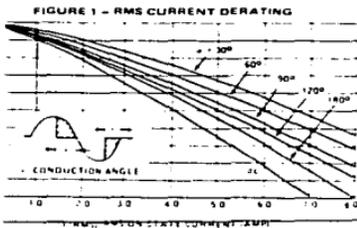
MAXIMUM CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Maximum Resistance Junction to Case	$R_{\theta J-C}$	2.2	$^{\circ}C/W$

RATINGS CHARACTERISTICS (T<sub>C</sub> = 25°C and Either Polarity of MT2 to MT1 Voltage, unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Forward or Reverse Blocking Current (I <sub>DRM</sub> or I <sub>RRM</sub> , gate open)	I <sub>DRM</sub> , I <sub>RRM</sub>	—	—	10 2	$\mu A$ mA
On State Voltage (V <sub>CE</sub> = 11 A Peak, Pulse Width = 1 to 2 ms, Duty Cycle = 2%)	V <sub>CE</sub>	—	1.3	1.55	Volts
Trigger Current (Continuous d.c.)	I <sub>GT</sub>	—	—	—	mA
V <sub>CE</sub> = 12 Vdc, R <sub>L</sub> = 100 Ohms minimum Gate Pulse Width = 2 $\mu s$ N = 1, GI = 1 All Types N = 1, GI = 1 2N6346 thru 49 N = 1, GI = 1 All Types N = 1, GI = 1 2N6346 thru 49 N = 1, GI = 1, MT2(-), GI = 1 T <sub>C</sub> = -40°C All Types N = 1, GI = 1, MT2(-), GI = 1 T <sub>C</sub> = -40°C 2N6346 thru 49		—	12 12 20 35 — —	50 75 50 75 100 125	
Trigger Voltage (Continuous d.c.)	V <sub>GT</sub>	—	—	—	Volts
V <sub>CE</sub> = 12 Vdc, R <sub>L</sub> = 100 Ohms minimum Gate Pulse Width = 2 $\mu s$ N = 1, GI = 1 All Types N = 1, GI = 1 2N6346 thru 49 N = 1, GI = 1 All Types N = 1, GI = 1 2N6346 thru 49 N = 1, GI = 1, MT2(-), GI = 1 T <sub>C</sub> = -40°C All Types N = 1, GI = 1, MT2(-), GI = 1 T <sub>C</sub> = -40°C 2N6346 thru 49 V <sub>CE</sub> = Rated V <sub>DRM</sub> , R <sub>L</sub> = 10 k Ohms, T <sub>J</sub> = 100°C N = 1, GI = 1, MT2(-), GI = 1 All Types N = 1, GI = 1, MT2(-), GI = 1 2N6346 thru 49		—	0.9 0.9 1.1 1.4 — —	2 2.5 2 2.5 2.5 3	
Ring Current (I <sub>R</sub> ) V <sub>CE</sub> = 12 Vdc, Gate Open f = 200 mA	I <sub>R</sub>	—	—	6 7.5	mA
T <sub>C</sub> = 25°C T <sub>C</sub> = -40°C		—	—	—	
Turn On Time (t <sub>on</sub> ) V <sub>CE</sub> = Rated V <sub>DRM</sub> , I <sub>TM</sub> = 11 A, I <sub>GT</sub> = 120 mA, t <sub>rise</sub> = 0.1 $\mu s$ , Pulse Width = 2 $\mu s$	t <sub>on</sub>	—	1.5	2	$\mu s$
at Rate of Rise of Commutation Voltage V <sub>CE</sub> = Rated V <sub>DRM</sub> , I <sub>TM</sub> = 11 A, Commutating di/dt = 4.3 A/ms, Unenergized, T <sub>C</sub> = 80°C	dv/dt(c)	—	5	—	V/ $\mu s$

\*\* JEDEC Registered Data



3

## 2N6342 thru 2N6349

FIGURE 3 - TYPICAL GATE TRIGGER VOLTAGE

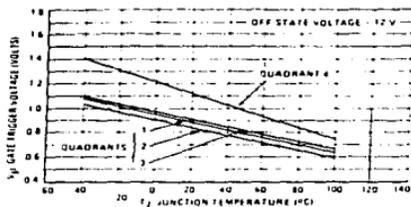


FIGURE 4 - TYPICAL GATE TRIGGER CURRENT

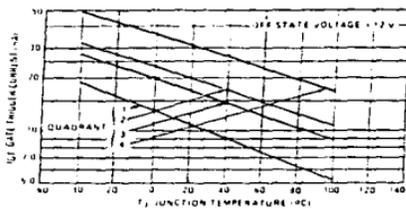


FIGURE 5 - ON-STATE CHARACTERISTICS

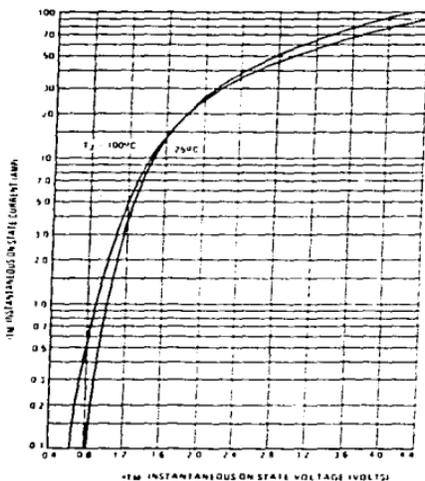


FIGURE 6 - TYPICAL HOLDING CURRENT

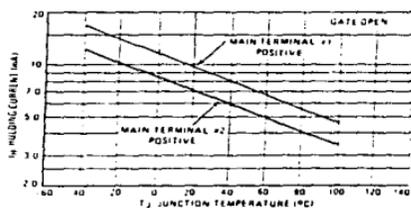
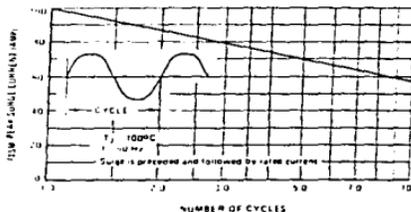
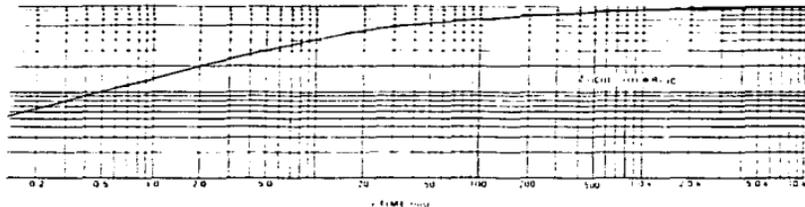


FIGURE 7 - MAXIMUM NON-REPETITIVE SURGE CURRENT



2N6342 thru 2N6349

FIGURE 8 - TYPICAL THERMAL RESPONSE



3



## 6-Pin DIP Optoisolators Triac Driver Output (250 Volts)

The MOC3009 Series consists of gallium arsenide infrared emitting diodes, optically coupled to silicon bilateral switch and are designed for applications requiring isolated triac triggering, low-current isolated ac switching, high electrical isolation (to 7500 V peak), high detector standoff voltage, small size, and low cost.

### Applications

- Solenoid/Valve Controls
- Lamp Ballasts
- Interfacing Microprocessors to 115 Vac Peripherals
- Motor Controls
- Static ac Power Switch
- Solid State Relays
- Incandescent Lamp Dimmers

### MAXIMUM RATINGS ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
<b>INFRARED EMITTING DIODE</b>			
Reverse Voltage	$V_R$	3	volts
Forward Current — Continuous	$I_F$	60	mA
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	100	mW
Negligible Power in Transistor Derate above $25^\circ\text{C}$		1.33	mW/°C

### OUTPUT DRIVER

On-State Output Terminal Voltage	$V_{ORM}$	250	volts
Peak Repetitive Surge Current (PW = 1 ms, 120 pps)	$I_{TSM}$	1	A
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	300	mW
		4	mW/°C

### TOTAL DEVICE

Isolation Surge Voltage (1) (Peak ac Voltage, 60 Hz, 5 Second Duration)	$V_{ISO}$	7500	Vac
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	330	mW
		4.4	mW/°C
Junction Temperature Range	$T_J$	-40 to +100	°C
Ambient Operating Temperature Range (2)	$T_A$	-40 to +85	°C
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-40 to +150	°C
Soldering Temperature (10 s)	$T_L$	260	°C

(1) unless surge limited.  $V_{ISO}$  is an internal device electrical breakdown rating for this test. Pins 1 and 2 are common, and Pins 4, 5 and 6 are common.

(2) Refer to Quality and Reliability Section for test information.

### MOC3009

(IFT = 30 mA Max)

### MOC3010\*

(IFT = 15 mA Max)

### MOC3011

(IFT = 10 mA Max)

### MOC3012\*

(IFT = 5 mA Max)

\* Motorola Preferred Devices  
STYLE 8 PLASTIC



STANDARD THRU HOLE  
CASE 730A-04



T LEADFORM  
WIDE SPACED 0.4"  
CASE 730D-05



5-PIN LEADFORM  
SURFACE MOUNT  
CASE 730C-04  
(STANDARD PROFILE)



CASE 730F-04  
(LOW PROFILE)

### COUPLER SCHEMATIC



1. ANODE
2. CATHODE
3. NC
4. MAIN TERMINAL
5. SUBSTRATE
- DO NOT CONNECT
6. MAIN TERMINAL

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
<b>INPUT LED</b>					
Reverse Leakage Current ( $V_R = 3\text{ V}$ )	$I_R$	—	0.05	100	$\mu\text{A}$
Forward Voltage ( $I_F = 10\text{ mA}$ )	$V_F$	—	1.15	1.5	Volts
<b>OUTPUT DETECTOR (<math>I_F = 0</math> unless otherwise noted)</b>					
Peak Blocking Current, Either Direction (Rated $V_{DRM}$ , Note 1)	$I_{DRM}$	—	10	100	nA
Peak On-State Voltage, Either Direction ( $I_{TM} = 100\text{ mA Peak}$ )	$V_{TM}$	—	1.8	3	Volts
Critical Rate of Rise of Off-State Voltage (Figure 7, Note 2)	$dv/dt$	—	10	—	V/ $\mu\text{s}$
<b>COUPLED</b>					
LED Trigger Current, Current Required to Latch Output (Main Terminal Voltage = 3 V, Note 3)	$I_{FT}$	—	15	30	mA
	MOC3009	—	8	15	
	MOC3010	—	5	10	
	MOC3011	—	3	5	
	MOC3012	—	—	—	
Holding Current, Either Direction	$I_H$	—	100	—	$\mu\text{A}$

Notes: 1. Test voltage must be applied within dv/dt rating.

2. This is static dv/dt. See Figure 7 for rise current. Commutating dv/dt is a function of the load-driving thyristor(s) only.

3. All devices are guaranteed to trigger at an  $I_F$  value less than or equal to max  $I_{FT}$ . Therefore, recommended operating  $I_F$  lies between max  $I_{FT}$  (30 mA for MOC3009, 15 mA for MOC3010, 10 mA for MOC3011, 5 mA for MOC3012) and absolute max  $I_F$  (100 mA).

## TYPICAL ELECTRICAL CHARACTERISTICS

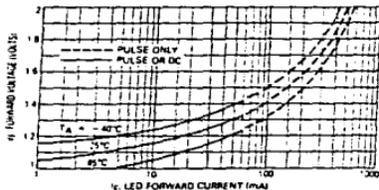
 $T_A = 25^\circ\text{C}$ 

Figure 1. LED Forward Voltage versus Forward Current

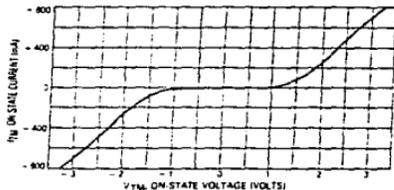


Figure 2. On-State Characteristics

**MOTOROLA**  
**SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA**
**PCM Remote Control Transmitter**

The MC14497 is a PCM remote control transmitter realized in CMOS technology. Using a dual-angle (FSK/AM) frequency bi-phase modulation, the transmitter is designed to work with the MC3373 receiver. Information on the MC3373 can be found in the Motorola *Linear and Interface Integrated Circuits* book (DL158 D).

There is not a decoder device which is compatible with the MC14497. Typically the decoding resides in MCU software.

- Both FSK/AM Modulation Selectable
- 62 Channels (Up to 62 Keys)
- Reference Oscillator Controlled by Inexpensive Ceramic Resonator
- Maximum Frequency  $\approx$  500 kHz
- Very Low Duty Cycle
- Very Low Standby Current: 50  $\mu$ A Maximum
- Infrared Transmission
- Selectable Start-Bit Polarity (AM Only)
- Shifted Key Mtime Available
- Wide Operating Voltage Range: 4 to 10 V
- See Application Notes AN1016 and AN1203

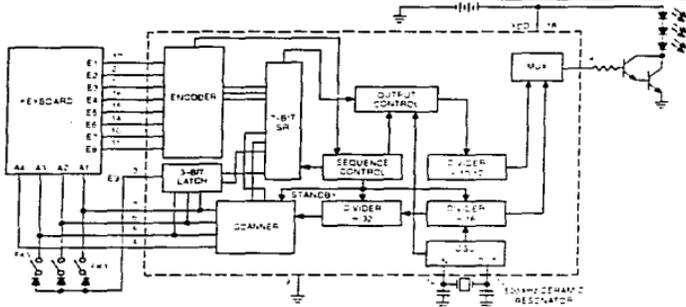
**MC14497**

 P-SUFFIX  
 148 149 150

**ORDERING INFORMATION**  
 MC14497P    P14    14P

**PIN ASSIGNMENT**

E1	1	1	10
E2	2	1	11
E3	3	1	12
E4	4	1	13
E5	5	1	14
E6	6	1	15
E7	7	1	16
A4	8	1	17
A3	9	1	18
A2	10	1	19
A1	11	1	20
SIGNAL	12	1	21
RES	13	1	22

**BLOCK DIAGRAM**


SAME AS IN DL158 D R3

MOTOROLA

MAXIMUM RATINGS (Voltages referenced to  $V_{CS}$ )

Parameter	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	$V_{DD}$	-0.5 to +18	V
Input Voltage At Input	$V_{in}$	-0.5 to $V_{DD} + 0.5$	V
Output Current per Pin	$I_{out}$	10	mA
Operating Temperature Range	$T_A$	-40 to +85	°C
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-65 to +150	°C

This device contains circuitry to protect the inputs against damage due to high static voltages or electric fields; however, it is advised that normal precautions be taken to avoid application of any voltage higher than maximum rated voltages to the high-impedance circuit. For proper operation it is recommended that  $V_{in}$  and  $V_{out}$  be constrained to the range  $V_{SS} \leq V_{in}, V_{out} \leq V_{DD}$ .

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_A = 0$  to  $70^\circ\text{C}$ , all Voltages Referenced to  $V_{CS}$ )

Characteristic	Symbol	$V_{DD}$	Min	Max	Unit
Supply Voltage	$V_{DD}$	—	4.0	10.0	V
Supply Current — Idle	$I_{DD}$		10	—	$\mu\text{A}$
Supply Current — Idle			10	—	5
Supply Current — Signal Generation			—	50	$\mu\text{A}$
Supply Current — Signal Generation			—	5	mA
Supply Current — Signal Generation			—	900	$\mu\text{A}$
Supply Current — Signal Generation			—	120	—
Supply Current — Scanner			4	-30	$\mu\text{A}$
Supply Current — Scanner			4	245	—
Supply Current — Oscillator			4	-300	$\mu\text{A}$
Supply Current — Oscillator			4	245	—
Supply Current — Oscillator			10	$\pm 2$	$\mu\text{A}$
Supply Current — Oscillator			4	30	—
Supply Current — Encoder			10	-15	$\mu\text{A}$
Supply Current — Encoder			4	—	-50
Supply Voltage — Encoder			10	9	V
Supply Voltage — Encoder			10	—	12
Supply Voltage — Encoder			4	3	—
Supply Voltage — Encoder			4	—	10

## CIRCUIT OPERATION

The transmitter sends a 6-bit, labeled A (LSB) to F (MSB), binary code giving a total of 64 possible combinations or code words. All of these channels are user selectable, except the last two (where channel 63 is not sent while channel 62 is automatically sent by the transmitter at the end of each transmission as an "End of Transmission" code).

In either mode, FSK or AM, the transmitted signal is in the form of a bi-phase pulse code modulation (PCM) signal. The AM coding is shown in Figure 1.

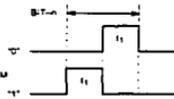


Figure 1. AM Coding

In the AM mode,  $f_1$  is a train of pulses at the modulating frequency of 31.25 kHz for a reference frequency of 500 kHz.

In the FSK mode, two modulating frequencies are used as shown in Figure 2.

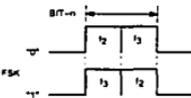


Figure 2. FSK Coding

In this mode,  $f_3$  is 50 kHz and  $f_2$  is 41.66 kHz for a reference frequency of 500 kHz.

The keyboard can be a simple switch matrix using no external diodes, connected to the four scanner inputs (A1 - A4) and the eight row input (E1 - E8). Under these conditions, only the first 32 code words are available since bit-F is always at logical 0. However, a simple 2-pole changeover switch, in the manner of a typewriter "shift" key (switch FK3 in the Block Diagram) can be used to change the polarity of bit-F to give access to the next full set of 32 instructions.

An alternative method of accessing more than 32 instructions is by the use of external codes between the address inputs (see Figure 3). These have the effect of producing "phantom" address inputs by pulling two inputs low at the same time, which causes bit-F to go high (i.e., to logical 1). By interconnecting only certain address inputs it is possible

to make an intermediate keyboard with between 32 and 64 keys.

The other two switches in the Block Diagram (FK1 and FK2) change the modulation mode. Closing FK1 changes the modulation from FSK to AM and the start-bit circuit. Closing FK2 changes the start-bit to a logical 0.

The full range of options available is illustrated in Table 1.

Table 1.

	Start	Modulation	Bit-F	Channels
E0 = Open	1	FSK	0	0 - 31*
E0 = A1 (FK1)	1	AM	0	0 - 31*
E0 = A2 (FK2)	0	FSK	0	0 - 31**
E0 = A3 (FK3)	1	FSK	1	32 - 63*
E0 = A1 - A2	0	AM	0	0 - 31*
E0 = A1 - A3	1	AM	1	32 - 63*
E0 = A2 - A3	0	FSK	1	32 - 63**
E0 = A1 - A2 - A3	0	AM	1	32 - 63*

\* Not allowed

One of the transmitter's major features is its low power consumption (in the order of 10  $\mu$ A in the idle state). For this reason, the battery is perpetually in circuit. It has in fact been found that a light discharge current is beneficial to battery life.

In its active state, the transmitter efficiency is increased by the use of a low duty cycle which is less than 2.5% for the modulating pulse train.

While no key is pressed, the circuit is in its idle state and the reference oscillator is stopped. Also, the eight address input lines are held high through internal pull-up resistors. As soon as a key is pressed, this takes the appropriate address line low, signaling to the circuit that a key has been selected. The oscillator is now enabled. If the key is released before the code word has been sent, the circuit returns to its idle state. To account for accidental activation of the transmitter, the circuit has a built-in reactive time of approximately 20 ms, which also overcomes contact bounce. After this delay, the code word will be sent and repeated at 90 ms intervals for as long as the key is pressed. As soon as the key is released, the circuit automatically sends channel 62, the "End of Transmission" (EOT) code. The transmitter then returns to its idle state.

The differences between the two modulation modes are illustrated in Figure 4. However, it should be noted that in the AM mode each transmitted word is preceded by a burst of pulses lasting 512  $\mu$ s. This is used to set up the AGC loop; the receiver's preamp in the FSK mode, the first frequency of the first bit is extended by 1.5 ms and the AGC burst is suppressed. In either mode, it is assumed that the normal start-bit is present.

PIN DESCRIPTIONS

**E1 - E8**  
**Row inputs (Pins 1, 2, 10, 11, 14, 15, 16, 17)**  
 Under idle conditions, these inputs are held high by internal pull-up resistors. As soon as a key is pressed, a logical 0 is detected. Particular line signals to the circuit that a key has been selected. After a delay of 20 ms, the internal register is latched with the code word for the key selected.

**EP**  
**Row input (Pin 3)**  
 This is a special programming input and when connected to an appropriate scanner output via a diode, it will modify the transmitted output according to Table NO TAG. In Table NO TAG, the figures in brackets (FK1, etc.) refer to the switches shown in the Block Diagram and Figure 3. If the diode option is required, the diode may be omitted. The connections shown in Table NO TAG may be made in any combination.  
 Although EP is a row input, forcing this line low will not activate the circuit.

**A1 - A4**  
**Scanner Outputs (Pins 4 - 7)**  
 Under idle conditions, these outputs are held low, logical 0. When a key is pressed, the circuit is activated and the oscillator will start and release the outputs (see Figure 5).

**O5Cin - OSCout**  
**Oscillator Input and Oscillator Output (Pins 12, 13)**  
 These pins are designed to operate with a 500 kHz ceramic resonator or a tune LC circuit. It is important that a ceramic resonator and not a filter be used here, as the oscillator frequency cannot be guaranteed if a ceramic filter is used.

**SIGNAL OUT**  
**Transmit Output (Pin 8)**  
 This output provides the modulating signal ready to drive the modulation amplifier. If required, the transmitter can be used as a keyboard encoder for direct use with a receiver. In this case, the AM option is selected, the output inverted, and the frequency to the receiver's signal input pin.

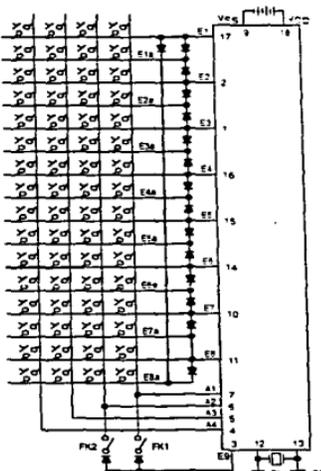


Figure 3. 64-Key Keyboard

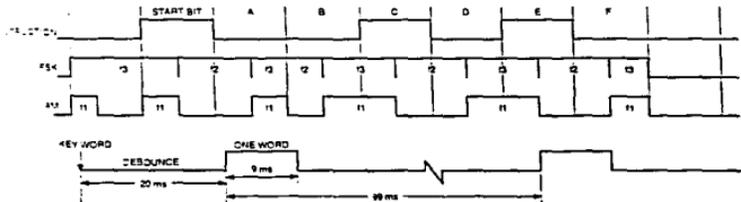
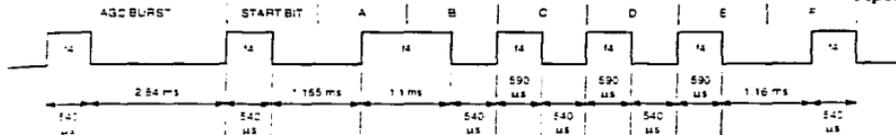


Figure 4. Transmitted Waveforms and Timing (Not Drawn to Scale)





- NOTES  
 1.  $f_c = 28.4 \text{ kHz}$   
 2. Indicated time durations are approximated

Figure 7. AM Mode Transmitted Wavetrain with 455 kHz Oscillator

2

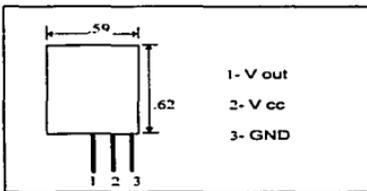
Table 2. Transmitted Codes

Code Word								Keyboard									
Channel	F	E	D	C	B	A	In	Out	Channel	F	E	D	C	B	A	In	Out
1	0	0	0	0	0	0	E8	A4	32	1	0	0	0	0	0	E8a	A4
2					0	0	E1	A4	33				0	0	1	E1a	A4
3					0	1	E2	A4	34				0	1	0	E2a	A4
4					0	1	E3	A4	35				0	1	1	E3a	A4
5					1	0	E4	A4	36				1	0	0	E4a	A4
6					1	0	E5	A4	37				1	0	1	E5a	A4
7					1	1	E6	A4	38				1	1	0	E6a	A4
8					1	1	E7	A4	39				1	1	1	E7a	A4
9	0	0	1	0	0	0	E8	A1	40	1	0	1	0	0	0	E8a	A1
10					0	0	E1	A1	41				0	0	1	E1a	A1
11					0	1	E2	A1	42				0	1	0	E2a	A1
12					0	1	E3	A1	43				0	1	1	E3a	A1
13					1	0	E4	A1	44				1	0	0	E4a	A1
14					1	0	E5	A1	45				1	0	1	E5a	A1
15					1	1	E6	A1	46				1	1	0	E6a	A1
16					1	1	E7	A1	47				1	1	1	E7a	A1
17	0	1	0	0	0	0	E8	A3	48	1	1	0	0	0	0	E8a	A3
18					0	0	E1	A3	49				0	0	1	E1a	A3
19					0	1	E2	A3	50				0	1	0	E2a	A3
20					0	1	E3	A3	51				0	1	1	E3a	A3
21					1	0	E4	A3	52				1	0	0	E4a	A3
22					1	0	E5	A3	53				1	0	1	E5a	A3
23					1	1	E6	A3	54				1	1	0	E6a	A3
24	0	1	1	0	0	0	E8	A2	55				1	1	1	E7a	A3
25					0	0	E1	A2	56	1	1	1	0	0	0	E8a	A2
26					0	1	E2	A2	57				0	0	1	E1a	A2
27					0	1	E3	A2	58				0	1	0	E2a	A2
28					0	1	E4	A2	59				0	1	1	E3a	A2
29					1	0	E5	A2	60				1	0	0	E4a	A2
30					1	0	E6	A2	61				1	0	1	E5a	A2
31					1	1	E7	A2	62				1	1	0	E6a	A2
32	0	1	1	1	1	1	E7	A2	Not Transmitted	1	1	1	1	1	1	E7a	A2

NOTE Although the "a" suffix applies to a phantom input when using a keyboard with up to 64 keys, the coding is identical with a 32-key keyboard when switch FK3 is closed.

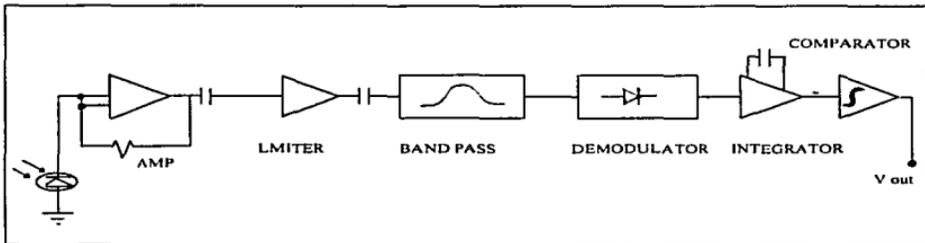
## GPIU52X INFRARED RECIVER/DEMODULATOR

### Package Outline



### Features:

- \*Rejects all sources not modulated at 40 kHz for reliable operation
- \*Compact size for miniature applications
- \*Operates from 5V, making direct connection to TTL or CMOS components easy
- \*Coil-free design provides total immunity from external noise induced by magnetic fields
- \*Built-in low-pass filter on the power supply helps isolate the circuitry from power supply noise



### Block Diagram

### Specifications

Maximum Supply Voltage	6.3 V
Recommended Operating Voltage	5 V +/- 0.3 V
Current Dissipation (ICC)	50 mA
Bandpass Center Frequency	40 kHz
-3dB Band Width of 40 kHz	4 kHz
Infrared Passband	980 nm +/- 100 nm

```

0000          1  regbas  equ  $1000
0000          2  portb   equ  $04
0000          3  tic1    equ  $10
0000          4  tic2    equ  $12
0000          5  tct12   equ  $21
0000          6  tmask1  equ  $22
0000          7  tflg1   equ  $23
0000          8  pvic1   equ  $00e8
0000          9          org  $0000
0001         10  icldun  rmb  1
0002         11  ic1mod  rmb  1
0003         12  ic2mod  rmb  1
0004         13  word    rmb  1
0005         14  palabrota rmb  1
0006         15  cuenta  rmb  1
0008         16  frste   rmb  2
000A         17  hpw     rmb  2
000C         18  ALTO    RMB  2
000E         19  BAJO    RMB  2
0010         20  ceba   rmb  2
0012         21  ceal   rmb  2
0014         22  unba   rmb  2
0016         23  unal   rmb  2
B600         24  conteo  rmb  1
B600         25          org  $B600
B604 [04] 18CE1AFF 26  LDV  #$1aFF
B604 [05] 18DFOA  27  STY  ALTO
B607 [04] 18CE1A00 28  LDY  #$1a00
B60B [05] 18DF0C  29  STY  BAJO
B60E [04] 18CE0300 30  ldy  #0300
B612 [05] 18DFOE  31  sty  ceba
B615 [04] 18CE07FF 32  ldy  #07ff
B619 [05] 18DF10  33  sty  ceal
B61C [04] 18CE0500 34  ldy  #0500
B620 [05] 18DF12  35  sty  unba
B623 [04] 18CE108F 36  ldy  #108f
B627 [05] 18DF14  37  sty  unal
B62A [06] 7F0004  38  clr  palabrota
B62D [02] 8650    39  ldaa #550
B62F [03] 9716    40  staa conteo
B631 [03] 8E00FF  41  PWINZ lds  #500ff
B634 [02] 867E    42  ldaa #57e
B636 [03] 97EB    43  staa pvic1
B638 [03] CEB6EB  44  ldx  #sv2ic1
B63B [04] DFE9    45  stx  pvic1+1
B63D [03] CE1000  46  pwtop ldx  #regbas
B640 [02] 861C    47  ldaa #0011100
B642 [04] A721    48  staa tct12,x
B644 [02] 86FF    49  ldaa #5ff
B646 [03] 9701    50  staa ic1mod
B648 [02] 8608    51  ldaa #508
B64A [03] 9705    52  staa cuenta
B64C [06] 7F0003  53  clr  word
B64F [06] 7F0000  54  clr  icldun
B652 [06] 7F0002  55  clr  ic2mod

```

07] 1D23F9  
07] 1C2204  
02] 0E

56  
57  
58

bclr tflg1,x,\$f9  
bset tmsk1,x,\$04  
cli

Apéndice

4

Assembled with IASM 03/28/1997 18:33 PAGE 2

```
[07] 1F2302FC 59 wait12 brc1r tflg1,x,$02,wait12
[03] D616 60 ldab conteo
[02] 860A 61 sopas ldAA #$0a
[02] 4A 62 hapy deCA
[03] 26FD 63 bne hapy
[02] 5A 64 decb
[03] 26F8 65 bne sopas
[02] 8680 66 ldaa #11000000
[03] 9A04 67 oraa palabrota
[04] A704 68 staa portb,x
[06] 1AEE12 69 ldy tic2,x
[05] 18C0005 70 cpy #$0005
[03] 2202 71 bhi laou
[02] 20F5 72 bra hold
[02] 867F 73 ldaa #10111111
[03] 9404 74 anda palabrota
[04] A704 75 staa portb,x
[07] 1D23FD 76 bclr tflg1,x,$fd
[03] D600 77 ldab icldun
[03] 27D4 78 beq wait12
[02] 0F 79 SEI
[07] 1D2130 80 bclr tct12,x,$30
[03] 9603 81 ldaa word
[02] 811C 82 cmpa #100011100
[03] 2737 83 beq subint
[02] 8140 84 cmpa #$40
[03] 2744 85 beq bajint
[02] C6FF 86 ldab #$ff
[02] 5A 87 riss decb
[03] 26FD 88 bne riss
[02] 8130 89 cmpa #100110000
[03] 2716 90 beq riand
[03] 9A04 91 oraa palabrota
[03] 9104 92 cmpa palabrota
[03] 2704 93 beq push2
[03] 9704 94 staa palabrota
[03] 2007 95 bra coca
[03] 9603 96 push2 ldaa word
[02] 43 97 coma
[03] 9404 98 anda palabrota
[03] 9704 99 staa palabrota
[04] A704 100 coca staa portb,x
[03] 7EB63D 101 jmp pwtop
[02] 8602 102 riand ldaa #100000010
[03] 9A04 103 oraa palabrota
[04] A704 104 staa portb,x
[02] 868F 105 ldaa #$8f
[02] 4A 106 hijole deca
[03] 26FD 107 bne hijole
[02] 86FD 108 ldAA #11111101
[03] 9404 109 anda palabrota
[04] A704 110 staa portb,x
[03] 7EB63D 111 jmp pwtop
[03] 9616 112 subint ldaa conteo
```

02]	4A	113	deca
02]	811F	114	cmpa #51f
03]	2306	115	bls ileg
02]	4A	116	deca

Appendix

1 Assembled with IASM 03/28/1997 18:33 PAGE 3

03]	9716	117		staa	conteo
03]	7EB63D	118		jmp	pwttop
02]	4C	119	ileg	inca	
03]	7EB63D	120		jmp	pwttop
03]	D616	121	bajint	ldab	conteo
02]	5C	122		incb	
02]	C1EF	123		cmpb	#5ef
03]	2206	124		bhi	gal
02]	5C	125		incb	
03]	D716	126		stab	conteo
03]	7EB63D	127		jmp	pwttop
02]	5A	128	gal	decb	
03]	7EB63D	129		jmp	pwttop
		130			
03]	CE1000	131	sv2ic1	ldx	#regbas
03]	9602	132		ldaa	ic2mod
03]	2702	133		beq	asi1
03]	202F	134		bra	lupe
06]	7C0D01	135	asi1	inc	ic1mod
03]	2606	136		bne	noist2
05]	EC10	137		ldd	tic1,x
04]	DD06	138		std	frste
03]	2020	139		bra	ou2ic1
05]	EC10	140	noist2	ldd	tic1,x
05]	9306	141		subd	frste
07]	1D2130	142		bclr	tct12,x,\$30
06]	1A930C	143		cpd	ba1o
03]	2202	144		bhi	omni
03]	20EB	145		bra	ZPRI
06]	1A930A	146	omni	cpd	alto
03]	2302	147		bls	life
03]	2004	148		BRA	ZPRI
02]	8601	149	life	ldaa	#1
03]	9702	150		staa	ic2mod
07]	1C2110	151	zpri	bset	tct12,x,\$10
02]	86FF	152		ldaa	#5ff
03]	9701	153		staa	ic1mod
07]	1D23FB	154	OU2IC1	bclr	tflg1,x,\$fb
12]	3B	155		rti	
06]	7C0D01	156	lupe	inc	ic1mod
03]	260C	157		bne	nuoist2
05]	EC10	158		ldd	tic1,x
04]	DD06	159		std	frste
07]	1D2130	160		bclr	tct12,x,\$30
07]	1C2120	161		bset	tct12,x,\$20
03]	20EB	162		bra	ou2ic1
05]	EC10	163	nuoist2	ldd	tic1,x
05]	9306	164		subd	frste
07]	1D2130	165		bclr	tct12,x,\$30
06]	1A930E	166		cpd	csba
03]	202	167		bhi	uni
03]	2032	168		bra	out
06]	1A9314	169	uni	cpd	unal
03]	2302	170		bls	esso

B747 [03]	202B	171		bra	out	
B749 [06]	1A9310	172	esso	cpd	ceal	
B74C [03]	2307	173		bls	pon0	
B74E [06]	1A9312	174		cpd	unba	

DEV.ASM Assembled with IASM 03/28/1997 18:33 PAGE 4

B751 [03]	220E	175		bhi	pon11	
B753 [03]	201F	176		bra	out	
B755 [03]	9603	177	pon0	ldaa	word	
B757 [02]	48	178		lsla		
B758 [03]	9703	179		staa	word	
B75A [06]	7A0005	180		dec	cuenta	
B75D [03]	26B9	181		bne	zpri	
B75F [03]	2013	182		bra	out	
B761 [03]	9603	183	pon11	ldaa	word	
B763 [02]	48	184		lsla		
B764 [03]	9703	185		staa	word	
B766 [02]	8601	186		ldaa	#\$00000001	
B768 [03]	9A03	187		oraa	word	
B76A [03]	9703	188		staa	word	
B76C [06]	7A0005	189		dec	cuenta	
B76F [06]	7A0005	190		dec	cuenta	
B772 [03]	26A4	191		bne	zpri	
B774 [02]	8601	192	out	ldaa	#1	
B776 [03]	9700	193		staa	icldun	
B778 [07]	1D23FB	194		bclr	tflq1,x,\$fb	
B77B [12]	3B	195		rti		
		196				
		197				
		198				

Symbol Table

ALTO	000A
ASII	B6F4
BAJINT	B6DA
BAJO	000C
CEAL	0010
CEBA	000E
COCA	B6B0
CONTEO	0016
CUENTA	0005
ESSO	B749
FRSTE	0006
GAL	B6E7
HAPY	B664
H1JOLE	B6BD
HOLD	B678
HPW	0008
IC1DUN	0000
IC1MOD	0001
IC2MOD	0002
ILEG	B6D6
LAOU	B67B
LIFE	B714
LUPE	B723
NOIST2	B6FF
NUOIST2	B734
OMNI	B70D
OU2IC1	B71F

OUT	B774
PALABROTA	0004
PONO	B755
PON11	B761

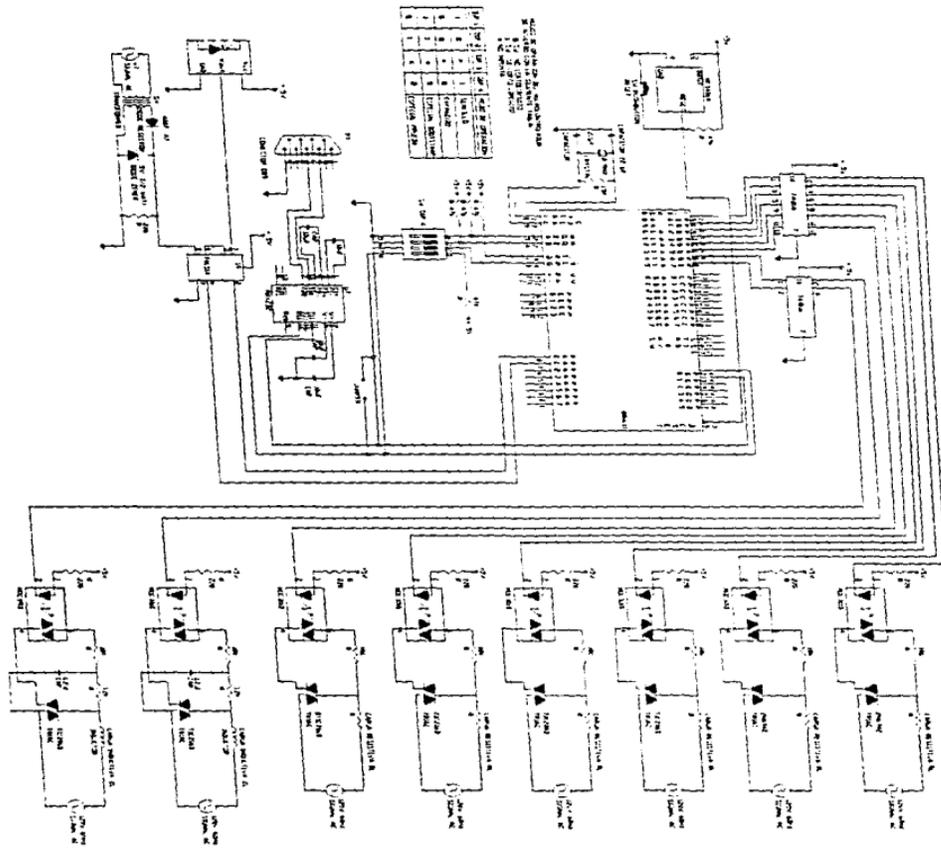
DEY.ASM

Assembled with IASM 03/28/1997 18:33 PAGE 5

PORTB	0004
PUSH2	B6A9
PVIC1	00E8
PWINZ	B631
PWTOP	B63D
REGBAS	1000
RIAND	B6B5
RISS	B698
SOPAS	B662
SUBINT	B6C9
SV2IC1	B6EB
TCTL2	0021
TFLG1	0023
TIC1	0010
TIC2	0012
TMSK1	0022
UNAL	0014
UNBA	0012
UNI	B742
WAITL2	B65C
WORD	0003
ZPRI	B718



# Diagrama unificado del sistema



**Bibliografía**

- Simon Ivan: Infrared radiation  
Comission on college physics Princeton. 1966
- M. La Toison: Infrarrojo y sus aplicaciones termicas  
Paraninfo. España. 1965
- Hudson, Richard: Infrared detectors  
Dowden, Hutchinson Ross, Inc. Stroudsburg, Pa.: 1975
- David Jhon Edward: Radiation and quantum physics  
Comission on college physics
- J. Wilson; J.F.B Hawkes: Optoelectronics an introduction  
Prentice Hall
- W. Summer: Ultra violet and infrared engineering  
London: Pitman
- Hudson Richard: Infrared system engineering  
Dowden, Hutchinson Ross, Inc. Stroudsburg
- Jameson Johna: Infrared physics and engineering  
McGraw Hill
- Button, Kenneth J: Infrared and milimeter waves  
Academic.,Orlando. 1979
- Kingslake: Applied optic an optical engineering  
Academic
- Conn George. Infrared methods: principles and applications  
Academic press. New York
- Bueche: Fundamentos de fisica  
McGraw Hill
- Motorola: manual HC11
- Motorola: manual Communications device data: Thyristores; Optoisolars