



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO
NACIONAL**

UNIDAD ZACATENCO
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SECCIÓN DE BIOELECTRÓNICA

Propuesta de diseño de un sistema de cauterización a partir de un
seguidor solar

Tesis que presenta

Rafael Sánchez Solano

para obtener el Grado de

Maestro en Ciencias

en la Especialidad de

Ingeniería Eléctrica

Director de la Tesis: Arturo Minor Martínez

Ciudad de México

Diciembre 2016

Dedicatoria

Dedico este trabajo de tesis a:

Alejandra Solano Hernández

Mi Madre.

Agradecimientos

Sinceramente y de todo corazón agradezco:

A Dios por lo que soy, lo que tengo y lo me rodea.

A mi madre y hermanos por haberme apoyado siempre y porque siempre me han deseado lo mejor.

Al pueblo Mexicano, porque gracias a sus impuestos se me ha podido entregar una beca con la cual pude solventar mis gastos de maestría durante dos años.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento proporcionado a mi formación académica y científica durante dos años de maestría.

Al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional por permitirme hacer uso de todas sus instalaciones para mi desarrollo profesional y personal, durante el corto tiempo que duraron mis estudios de maestría.

Al Dr. Arturo Minor Martínez por aceptarme como su alumno, por asignarme un espacio de trabajo y permitirme trabajar libremente en el laboratorio 5 de la sección de Bioelectronica.

A todos los integrantes que tuve el honor de conocer del laboratorio 5 en especial a Manuel Pineda, Pedro, Roció, Perla, Elba, Emanuel, Reinaldo y Fernando, gracias por su agradable compañía, y por el aprendizaje, ayuda y consejo que recibí de cada uno de ustedes, al señor José por su ayuda y al Ingeniero Irving por su apoyo e ideas aportadas en la manufactura de la estructura del seguidor solar y porque siempre demostró profesionalismo en su trabajo.

A todos mis compañeros de generación y de maestría: Juanita por su amistad y toda su ayuda en la realización de este trabajo de tesis, al buen Joaquín y perlita por imprimir y entregar mi tesis a mis sinodales cuando por motivos personales no pude hacerlo yo, a David Pérez mi compañero de equipo de digitales por su paciencia y porque de él aprendí los conceptos básicos de electrónica, a todas las demás personas que tuve el gusto de conocer durante mis estudios de maestría: Sagid, usiel, cory, gasper, emilio, esmeralda, Anais, Florencio, Linda, Sandra, Hector.

A todas las demás personas que de forma directa o indirecta participaron y por lo tanto fueron de gran ayuda para la elaboración de este trabajo de tesis.

Resumen

Este trabajo se enfoca en la utilización de la energía solar como fuente alternativa para satisfacer la demanda energética de un instrumento empleado en cirugía médica (cauterizador), y también se le da una segunda aplicación como una alternativa de pre-tratamiento para el óxido de grafeno. Ambas aplicaciones son un primer esfuerzo en la sección de Bioelectrónica para que en un futuro la energía solar cubra parte importante de la demanda energética de hospitales y otros sectores.

En este proyecto se diseñó y fabricó un seguidor solar de alta precisión y se controló mediante una cámara web, se utilizaron y caracterizaron diversos sensores para el monitoreo de sus parámetros, se utilizó un micro-controlador y se implementó un algoritmo en una computadora portátil para la operación del sistema. Con todo ello se obtuvo una alta precisión de colección y concentración de energía solar, así como su transporte y manipulación.

El seguidor solar es una estructura móvil de dos grados de libertad, cuya posición varía durante el día. Sobre la estructura del seguidor va montada una lente de Fresnel, la cual (gracias al algoritmo programado en Matlab), en todo momento está en una posición perpendicular a los rayos solares, con la finalidad de captar la mayor cantidad de energía en forma de radiación solar que llegue a éste (insolación) para alcanzar la mayor eficiencia térmica. La energía solar es focalizada eficientemente a una distancia de 54 cm perpendicular a la lente y concentrada en cualquier punto deseado, dentro del rango de movilidad del seguidor.

La energía concentrada es transmitida, mediante una fibra óptica hasta su extremo emisor con la finalidad de que más adelante pueda ser utilizada para cauterizar vasos sanguíneos o diversas aplicaciones médicas o no médicas.

Abstract

This work focuses on the use of solar energy as an alternative in order to satisfy the energy demand of an instrument used in medical surgery (cautery), and there is also a second application as an alternative pre-treatment for graphene oxide. Both applications are a first effort in the section of Bio-electronics to, in the future, solar cover important part of the energy demand of hospitals and other sectors.

This project was designed and built a solar tracker high precision and monitored by a web-cam, were used and characterized various sensors for monitoring parameters, a micro-controller was used and an algorithm was implemented on a PC for the system operation. With all this, we had a high accuracy of collection and concentration of solar energy, and its transport and handling was obtained.

The solar tracker is a mobile structure of two degrees of freedom, whose position varies during the day. On the structure of the tracker is mounted a Fresnel lens, which (thanks to the algorithm programmed in Matlab), all time is in a position perpendicular to the sun's rays in order to capture as much energy as solar radiation you reach at this (insolation) to achieve higher thermal efficiency. The solar energy is focused efficiently at a distance of 54 cm perpendicular to the lens and focused at any desired point within the range of motion of the tracker.

The concentrated energy is transmitted through a fiber to the sending end with the purpose to be used as a solar cautery that can achieve an appropriate speed the temperatures required in medical surgery.

Contenido

| | |
|---|-----------|
| Capítulo 1..... | 1 |
| Introducción | 1 |
| Capítulo 2..... | 3 |
| Antecedentes | 3 |
| 2.1. Introducción | 3 |
| 2.2 Radiación | 5 |
| 2.2.1 Radiación Térmica..... | 5 |
| 2.2.2 Radiación Atmosférica y Solar | 7 |
| 2.3 Concentrador Solar | 9 |
| 2.3.1 Tipos de concentradores solares..... | 10 |
| 2.4 Seguidor Solar | 13 |
| 2.5 Guías ópticas y Fibras ópticas..... | 14 |
| 2.5.1 Historia..... | 15 |
| 2.5.2 Teoría | 16 |
| 2.5.3 Propagación de la Luz | 16 |
| 2.5.4 Reflexión Interna Total..... | 17 |
| 2.5.5 Ángulo de Admisión y Apertura Numérica | 19 |
| 2.5.6 Características de las Fibras Ópticas | 19 |
| 2.6 Electrocirugía..... | 20 |
| 2.6.1 Efecto Joule..... | 20 |
| 2.6.2 Corriente Eléctrica y Tejido Biológico | 20 |
| 2.6.3 Efectos de la Corriente Eléctrica sobre el Tejido | 21 |
| 2.6.4 Unidad Electroquirúrgica..... | 22 |
| 2.6.5 Factores de los que Depende la Acción de la Electrocirugía en los Tejidos..... | 23 |
| 2.6.6 Factores que Influyen en los Efectos Titulares de la Electrocirugía..... | 25 |
| 2.6.7 Complicaciones de la Electrocirugía..... | 25 |
| 2.6.8 Prevenciones..... | 27 |
| 2.6.9 Costo del Equipo de Electrocirugía..... | 28 |
| 2.6.9.1 2Force 2 ESU (unidad electrocauteria para cirugía eléctrica)..... | 28 |

| | | |
|---------|--|-----------|
| 2.6.9.2 | <i>Electrocauterio Sonolife</i> | 29 |
| 2.7 | <i>Cirugía Láser y Solar</i> | 29 |
| 2.7.1 | <i>Cirugía Laser</i> | 29 |
| 2.7.2 | <i>Algunas Causas de Riesgo en el Uso de los Láseres</i> | 31 |
| 2.7.3 | <i>Clasificación de los Productos Láser de Acuerdo a la Peligrosidad de su Radiación</i> | 32 |
| 2.7.4 | <i>Prevención de Accidentes de la Vista</i> | 32 |
| 2.7.5 | <i>Prevención de Quemaduras de la Piel por la Acción del Láser.</i> | 33 |
| 2.7.6 | <i>Cirugía Solar</i> | 33 |
| 2.8 | <i>Grafeno, oxido de grafeno y fibra óptica y energía solar</i> | 34 |
| | Capítulo 3 | 37 |
| | Desarrollo | 37 |
| 3.1 | <i>Concentrador y Estructura mecánica</i> | 37 |
| 3.2 | <i>Sensores y actuadores</i> | 40 |
| 3.2.1 | <i>Cámara Web</i> | 40 |
| 3.2.2 | <i>Sensor de temperatura</i> | 41 |
| 3.2.3 | <i>Instrumentación del Termopar tipo J</i> | 42 |
| 3.2.4 | <i>Sensor de Radiación solar</i> | 43 |
| 3.2.5 | <i>Interruptores de encendido y apagado</i> | 44 |
| 3.2.6 | <i>Codificadores de movimiento</i> | 45 |
| 3.2.7 | <i>Actuadores</i> | 48 |
| 3.3 | <i>Descripción del código e interface de control</i> | 50 |
| 3.3.1 | <i>Funcionamiento</i> | 50 |
| 3.3.1.1 | <i>Funcionamiento Automático</i> | 53 |
| 3.3.1.2 | <i>Funcionamiento Manual</i> | 54 |
| 3.3.2 | <i>Concentración de la energía en un objetivo</i> | 54 |
| 3.3.3 | <i>Sensores y Actuadores</i> | 55 |
| 3.3.4 | <i>Control de temperatura</i> | 55 |
| 3.4 | <i>Diagrama esquemático de integración de los dispositivos electrónicos</i> | 56 |
| 3.5 | <i>Caja de circuitos electrónicos</i> | 57 |
| 3.5.1 | <i>Fuente de alimentación</i> | 57 |
| 3.5.2 | <i>Tarjetas electrónicas</i> | 58 |

| | | |
|-------|--|-----------|
| 3.6 | <i>Sistema de transmisión de luz solar</i> | 58 |
| 3.7 | <i>Protección al Trabajar con Radiación Solar</i> | 60 |
| 3.8 | <i>Costo del seguidor solar</i> | 61 |
| | Capítulo 4 | 62 |
| | Pruebas | 62 |
| 4.1 | <i>Seguimiento Automático del sol</i> | 62 |
| 4.2 | <i>Prueba de control de temperatura</i> | 66 |
| 4.2.1 | <i>Pasos de la prueba</i> | 67 |
| 4.3 | <i>Prueba de transporte de radiación solar</i> | 68 |
| 4.4 | <i>Pruebas de la radiación solar concentrada por la fibra óptica</i> | 70 |
| 4.5 | <i>Prueba de radiación solar incidiendo sobre Óxido de grafeno.</i> | 71 |
| | Capítulo 5 | 74 |
| | Resultados | 74 |
| 5.1 | <i>Funcionamiento general</i> | 74 |
| 5.2 | <i>Seguimiento Automático del sol</i> | 74 |
| 5.3 | <i>Resultados del control de temperatura</i> | 74 |
| 5.4 | <i>Resultados del transporte y concentración de radiación solar</i> | 75 |
| 5.5 | <i>Resultados de la Radiación Solar Incidiendo sobre el Óxido de Grafeno</i> | 75 |
| 5.6 | <i>Costos</i> | 76 |
| | Capítulo 6 | 77 |
| | Discusión | 77 |
| 6.1 | <i>Funcionamiento general</i> | 77 |
| 6.2 | <i>Seguimiento Automático del sol</i> | 77 |
| 6.3 | <i>Control de temperatura</i> | 78 |
| 6.4 | <i>Transporte y manipulación de la radiación solar</i> | 78 |
| 6.5 | <i>Radiación Solar Incidiendo sobre el Óxido de Grafeno</i> | 79 |
| 6.6 | <i>Costos</i> | 79 |
| | Capítulo 7 | 81 |
| | Conclusiones y Perspectivas | 81 |
| | Capítulo 8 | 83 |
| | Referencias | 83 |

Capítulo 1

Introducción

Los altos costos de los combustibles fósiles, aunado a su ya predicho agotamiento dentro de algunos años, ha creado la necesidad de buscar y emplear nuevas fuentes de energía para satisfacer las demandas energéticas de la población a nivel mundial. Entre estas fuentes energéticas, la energía solar colectada y concentrada, es una de las técnicas más limpias de aprovechamiento de energía, debido a su bajo nivel de emisiones de carbón, la cual es obtenida a partir de la radiación electromagnética proveniente del sol.

En la actualidad se sabe que el sol es necesario para la salud y bienestar de los seres humanos. A pesar de los efectos nocivos causados por la exposición al sol como: son eritema, fotoinmunosupresión, fotoenvejecimiento, fotocarcinogénesis, cataratas, fotoqueratitis entre otros, la exposición al sol también es benéfica, debido a que dosis moderadas ofrecen efectos fisiológicos benéficos: ayuda a la síntesis de la vitamina D en el cuerpo humano la cual puede jugar un rol de protección en enfermedades comunes como la esclerosis múltiple, diabetes mellitus, cáncer, tuberculosis, enfermedades cardiovasculares, ayuda a la salud mental etc. Además de que la energía solar es un tratamiento complementario en la ictericia fisiológica que afecta principalmente a recién nacidos. La falta de exposición al sol, puede ser aún más peligrosa para la salud humana, que la exposición excesiva. Evitar la exposición al sol conduce a la deficiencia de vitamina D que se asocia no sólo con el raquitismo y la osteomalacia, sino también con un mayor riesgo de enfermedades cardiovasculares, esclerosis múltiple, artritis reumatoide, diabetes, influenza, muchos tipos de cáncer y resultados adversos del embarazo.

Por otra parte las tecnologías de energía solar para la producción de electricidad, calor y combustibles pueden aplicarse en varios sectores que demanden un consumo de energía. La energía solar en sus diversas formas: calor solar, energía solar fotovoltaica, energía termoeléctrica, combustibles solares, tiene la capacidad de contribuir a resolver algunos de los problemas que se enfrentan a nivel mundial: el cambio climático, seguridad energética y el acceso universal a los servicios modernos de energía.

En las investigaciones realizadas principalmente en las últimas dos décadas, se han obtenido resultados experimentales que han demostrado aplicaciones médicas de energía solar que podrían ser empleadas directamente en hospitales, tales como la cirugía solar mediante fibra óptica, en donde se aprovecha la capacidad que tiene la energía solar concentrada de dañar el tejido de los seres vivos, además de poder aplicar una variante de éste como cirugía radiactiva.

A pesar de los esfuerzos por llevar las diversas aplicaciones de la energía solar a los hospitales, este tipo de aplicaciones aún no han presentado un desarrollo importante. Quizás la parte que presenta un mayor reto para la aplicación de este tipo de tecnologías en el sector hospitalario, es la transmisión eficiente de la energía solar hasta el punto de utilización. La transmisión de energía solar se puede realizar mediante luminiductos, revestimientos anhidólicos compuestos por lentes y parábolas de material reflexivo y por fibra óptica, teniendo estos últimos la desventaja de tener precios muy elevados. Sin embargo entre estos medios de transporte, encontramos que algunos son más eficientes y versátiles que otros y su implementación puede depender en gran medida de la aplicación requerida.

Es por todo lo mencionado anteriormente que el objetivo particular de este trabajo es proponer una aplicación biomédica que emplee la energía solar de modo que cubra parcial o totalmente los requerimientos energéticos que emplearía un dispositivo médico que se alimente con energía eléctrica, mientras que el objetivo general es que sirva como contribución para la posible utilización de la energía solar en sectores como el hospitalario o doméstico.

Entre el equipo médico empleado en los hospitales, los electrocauterios realizan una forma de electrocirugía que entrega energía eléctrica a altas frecuencias al tejido para cortarlo o realizar coagulación. Por otra parte los láseres quirúrgicos pueden utilizarse en cierto tipo de cirugías, donde el haz luminoso del láser puede reemplazar con grandes ventajas al bisturí. La principal ventaja es que al mismo tiempo que corta va cauterizando los pequeños vasos sanguíneos, evitando prácticamente toda hemorragia.

Estos dispositivos son de gran utilidad e indispensables en cirugía, sin embargo su adquisición representa un elevado costo económico y su uso requiere de un determinado consumo energético.

Es aquí donde encontramos una aplicación que mediante el uso de energía solar, proporcione la suficiente energía a un dispositivo que realice la misma función que un electrocauterio o un láser quirúrgico, pero a un precio más accesible, en este caso la propuesta de diseño es un dispositivo médico que utiliza energía solar para cauterizar. Para la transmisión de energía en un principio se decidió emplear varillas cilíndricas de acrílico, las cuales básicamente son fibras ópticas de mayor calibre con la ventaja de tener un precio más económico que las fibras ópticas, aunque con la desventaja de ser rígidas y por lo tanto no poseen la flexibilidad que presentan las fibras ópticas. En este trabajo se pudo manipular lo suficiente una guía de acrílico como para cumplir con los requisitos solicitados por esta aplicación, pero debido a las curvaturas presentadas, se obtuvieron pérdidas energéticas enormes, por lo que al final se optó por emplear una fibra óptica, la cual por todo el trabajo e investigación empleados en su desarrollo y fabricación, proporcionan un medio eficiente de transporte de radiación solar.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Introducción

La cauterización es un término clínico usado para describir la quemadura de una herida o la destrucción de un tejido.

El verbo cauterizar proviene del latín cauterizare "quemar o marcar con hierro". La cauterización era usada para detener hemorragias, especialmente durante alguna amputación.

El procedimiento era simple: Una pieza de metal se calentaba sobre el fuego y se aplicaba a la herida. Esto provocaría que los tejidos con vasos sanguíneos elevaran su temperatura de manera extrema ocasionando una coagulación de la sangre y así controlar el sangrado, a costa de un daño extenso en el tejido. Tiempo después instrumentales médicos especiales fueron usados para cauterizar arterias. Hoy en día existen muchas formas de cauterización, entre las que encontramos: electrocauterización, cauterización por láser y cauterización química.

En este trabajo se propone una alternativa más a las técnicas de cauterización existentes, pretendiendo compararse principalmente con la electrocauterización y la cauterización por láser, buscando obtener resultados similares a ellos, pero a un costo económico inferior en cuanto la adquisición de los equipos y consumo energético al utilizar energía solar para su funcionamiento.

La energía solar es limpia, renovable y ampliamente distribuida. La energía solar podría ser una de las energías renovables más prometedoras y ha demostrado un enorme potencial como fuente energética. Como se menciona en [1], la energía contenida en la radiación solar que recibe el planeta por año es aproximadamente 1800 veces el consumo global de energía primaria. Esto implica que capturando y utilizando solo una fracción de la radiación solar, puede ser suficiente para satisfacer la demanda energética mundial. Sin embargo, en la práctica se han encontrado grandes limitantes en su utilización, como es el hecho de su carácter oscilante e intermitente, su dispersión, su baja intensidad, las bajas eficiencias de conversión asociadas a los actuales dispositivos y su complicado almacenamiento.

El esfuerzo por incrementar la eficiencia y lograr un manejo conveniente de la energía proveniente del Sol que permita satisfacer los requerimientos de la demanda energética, ha impulsado durante los últimos años importantes proyectos de desarrollo científico-técnico.

La utilización de la radiación solar puede ser mediante, energía fotovoltaica, energía fotoquímica y/o energía térmica. Los sistemas que aprovechan la energía solar, por lo general utilizan concentradores, los cuales son sistemas auxiliares que mediante un área de gran tamaño o mediante pequeños paneles reflejantes captan los rayos solares y los concentran para incrementar la densidad de energía solar por unidad de área, con lo cual es posible obtener elevadas temperaturas en un punto focalizado y utilizar esta energía en las distintas aplicaciones pertinentes.

Para aumentar la eficiencia del sistema de captación solar, el concentrador es montado sobre un sistema de seguimiento solar, el cual se encarga de mantenerlo en todo momento en una posición perpendicular a la dirección de los rayos solares.

Una vez captados los rayos solares, estos son concentrados obteniéndose la mayor densidad de energía en un punto focal, el cual está a una determinada distancia perpendicular del plano de la superficie captadora del concentrador solar, y conforme la distancia aumenta a partir de la superficie captadora y posteriormente del punto focal, los rayos vuelven a dispersarse, por lo que el aprovechamiento de la energía debe hacerse en el punto focal del concentrador solar.

En ocasiones dependiendo de la aplicación deseada, la energía no puede utilizarse directamente en la ubicación del punto focal, por lo que esta energía debe ser transportada de algún modo y llevada hasta el lugar donde será utilizada. Ejemplo de ese tipo de aplicaciones es la cirugía solar.

Es por ello que en este trabajo de tesis se identifican cuatro aspectos importantes a considerar y resolver, el primero es la selección adecuada del colector y concentrador solar, la segunda es el tipo de seguidor solar empleado así como su funcionamiento, la tercera es un medio de transporte de la energía solar, y finalmente la implementación de una aplicación biomédica basada en energía solar que en nuestro caso será la primera propuesta de diseño de un sistema que utilice energía solar para cauterizar realizado en nuestro país.

2.2 Radiación

Existen tres mecanismos de transferencia de calor: Conducción, convección y radiación. La radiación difiere con respecto de los otros dos mecanismos en que no requiere presencia de un medio material para llevarse a efecto [2]. De hecho la transferencia de calor por radiación es la más rápida y es el único mecanismo que puede ocurrir en el vacío ya que no sufre atenuación. Como es el caso de la energía del sol que llega a la tierra por radiación.

El fundamento teórico de la radiación fue establecido en 1864 por el físico James Clerk Maxwell, quien postuló que las cargas aceleradas o las corrientes eléctricas cambiantes dan lugar a campos eléctricos y magnéticos. Estos campos que se mueven con rapidez se llaman ondas electromagnéticas y representan la energía emitida por la materia como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas.

En 1887 Heinrich Hertz demostró en forma experimental su existencia. Las ondas electromagnéticas transportan energía de la misma forma que las otras ondas y viajan a la velocidad de la luz en el vacío, la cual es $c_0 = 2.9979 \times 10^8$ m/s. Las Ondas electromagnéticas se caracterizan por su frecuencia ν o su longitud de onda λ . Estas dos propiedades en un medio están relacionadas por

$$\lambda = c/\nu \quad (2.1)$$

En donde c es la velocidad de propagación de una onda en el medio. La velocidad de propagación en un medio está relacionada con la velocidad de la luz en el vacío por

$$c = c_0/n \quad (2.2)$$

En donde n es el índice de refracción de ese medio. EL índice de refracción es en esencia igual a la unidad para el aire y la mayor parte de los gases, alrededor de 1.5 para el vidrio y más o menos 1.33 para el agua. La unidad de uso común para la longitud de onda es el micrómetro (μm) o micra en donde $1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ m. A diferencia de la longitud de onda y de la velocidad de propagación, la frecuencia de una onda electromagnética sólo depende de la fuente y es independiente del medio a través del cual viaja.

2.2.1 Radiación Térmica

Aun cuando todas las ondas electromagnéticas tienen las mismas características generales, las ondas de distinta longitud difieren de manera significativa en su comportamiento. La radiación electromagnética que se encuentra en la práctica abarca una amplia gama de longitudes de onda

que varían desde menos de 10^{-10} μm , para los rayos cósmicos, hasta más de 10^{10} μm , para las ondas de energía eléctrica. El espectro electromagnético también incluye los rayos gama, los rayos X, la radiación ultra violeta, la luz visible, la radiación infrarroja, la radiación térmica, las microondas y las ondas de radio.

El tipo de radiación electromagnética que resulta pertinente para la transferencia de calor es la radiación térmica emitida como resultado de las transiciones energéticas de las moléculas, los átomos y los electrones de una sustancia. La temperatura es una medida de la intensidad de esas actividades en el nivel microscópico, y la rapidez de la emisión de la radiación térmica se incrementa al aumentar la temperatura. La radiación térmica es emitida en forma continua por toda la materia cuya temperatura está por arriba del cero absoluto. Es decir todo lo que nos rodea constantemente emite y absorbe radiación. La radiación térmica también se define como la parte del espectro electromagnético que se extiende desde alrededor de $0.1 \mu\text{m}$ hasta $100\mu\text{m}$, dado que la emitida por los cuerpos, debida a su temperatura cae casi por completo en este rango de longitud de onda. Por tanto, la radiación térmica incluye toda la radiación visible y la infrarroja (IR), así como parte de la radiación ultra violeta (UV).

Un cuerpo que emite alguna radiación en el rango visible recibe el nombre de fuente luminosa. Es obvio que el sol es nuestra principal fuente luminosa. La radiación electromagnética emitida por el sol se conoce como radiación solar y casi toda ella cae en la banda de longitud de onda $0.3\text{-}3 \mu\text{m}$. Casi la mitad de la radiación solar es luz (es decir, cae en el rango visible). La restante es ultra violeta o infrarroja.

La radiación emitida por los cuerpos a la temperatura ambiente cae en la región infrarroja del espectro, la cual se extiende de 0.76 a $100 \mu\text{m}$.

La radiación ultra violeta incluye el extremo de baja longitud de onda de onda del espectro de radiación térmica y se encuentra entre las longitudes de onda de 0.01 y $0.40\mu\text{m}$. Los rayos ultravioleta deben evitarse ya que pueden matar microorganismos y causan serios daños a los humanos y otros organismos vivientes. Alrededor de 12% de la radiación solar se encuentra en el intervalo ultravioleta y sería devastador si llegara a alcanzar la superficie de la tierra. Por fortuna la capa de ozono (O_3) de la atmósfera actúa como una cubierta protectora y absorbe la mayor parte de esta radiación. Los rayos ultravioleta que permanecen en la luz solar todavía son suficientes como para causar serias quemaduras a la piel debido a exposiciones prolongadas a la luz solar directa, la cual es la causa principal de cáncer de piel, el cual puede ser mortal.

La radiación es un fenómeno volumétrico. Sin embargo, para los sólidos opacos (no transparentes), como los metales, la madera y las rocas, se considera que la radiación es un fenómeno superficial, ya que la emitida por las regiones interiores nunca puede llegar hasta la

superficie y la que incide sobre esos cuerpos suele ser absorbida dentro de unas cuantas micras de la superficie.

2.2.2 Radiación Atmosférica y Solar

El sol es nuestra principal fuente de energía. La energía que proviene de él, llamada energía solar, llega a nosotros en forma de energía electromagnética después de experimentar considerable interacciones con la atmosfera. La energía de radiación emitida o reflejada por los constituyentes de la atmosfera forma la radiación atmosférica.

El sol es un cuerpo casi esférico que tiene un diámetro $D \approx 1.39 \times 10^9$ m y una masa $m \approx 2 \times 10^{30}$, y se encuentra ubicado a una distancia media $L = 1.5 \times 10^{11}$ m de la Tierra. Emite radiación en forma continua a razón de $E_{sol} \approx 3.8 \times 10^{26}$ W. Menos de una mil millonésima parte de esta energía (alrededor de 1.7×10^{17} W) choca contra la Tierra, lo cual es suficiente para mantenerla caliente y sostener la vida a través del proceso de fotosíntesis.

La energía del sol se debe a la reacción continua de fusión durante la cual dos átomos de hidrógeno se funden para formar uno de helio. Por lo tanto, en esencia, el Sol es un reactor nuclear, con una temperatura tan elevada como 40 000 000 K en la región de su núcleo. La temperatura cae hasta alrededor de 5800 K en la región exterior del sol, llamada la zona de convección como resultado de la disipación de dicha energía como radiación.

La energía solar que llega a la atmosfera terrestre se llama irradiación solar total G_s , cuyo valor es $G_s = 1373$ W/m².

La irradiación solar total (también llamada constante solar) representa la tasa a la cual la energía solar incide sobre una superficie perpendicular a los rayos del Sol en el borde exterior de la atmosfera, cuando la tierra se encuentra a su distancia media del Sol.

La radiación solar sufre atenuación considerable cuando pasa a través de la atmosfera, como resultado de la absorción y la dispersión. Cerca de 99% de la atmosfera está contenida a menos de 30 Km de la superficie terrestre. Las variaciones en la distribución espectral de la radiación sobre la superficie de la Tierra se deben a la absorción por los gases O₂, O₃ (ozono), H₂O y CO₂. La absorción en la región infrarroja está dominada por el vapor de agua y por el bióxido de carbono. Las partículas de polvo y otros contaminantes que se encuentran en la atmósfera también absorben la radiación en diversas longitudes de onda.

Como resultado de estas absorciones la energía solar que llega a la superficie terrestre está considerablemente debilitada, hasta alrededor de 950 W/m² en un día claro y mucho menos en

los días nublados o con smog. Asimismo, prácticamente toda la radiación solar que llega a la superficie terrestre cae en la banda de longitudes de onda de 0.3 a 2.5 μm .

Otro mecanismo que atenúa la radiación solar a medida que pasa a través de la atmósfera es la dispersión o reflexión por las moléculas del aire y las muchas otras clases de partículas, como el polvo, el smog y las gotitas de agua suspendidas en la atmósfera.

La energía solar que incide sobre la superficie de la Tierra se considera que consta de partes directa y difusa. La parte de la radiación solar que llega a la superficie terrestre sin ser dispersada ni absorbida por la atmósfera se llama radiación solar directa G_D . Se supone que la radiación dispersada llega a la superficie terrestre de manera uniforme desde todas direcciones y se llama radiación solar difusa G_d . Entonces, la energía solar total que incide sobre la unidad de área de una superficie horizontal sobre el piso es

$$G_{\text{solar}} = G_D \cos \theta + G_d \quad (2.3)$$

En donde θ es el ángulo de incidencia de la radiación solar directa (el ángulo que forma el rayo solar con la perpendicular de la superficie). La radiación difusa varía desde alrededor de 10% de la radiación total, en un día claro, hasta cerca de 100% en un día totalmente nublado.

La cantidad total de radiación solar (directa y reflejada) que se recibe en un punto determinado del planeta, sobre una superficie de 1 m, para un determinado ángulo de inclinación entre la superficie colectora y la horizontal del lugar, recibe el nombre de insolación.

Existe un gran número de instrumentos para medir la radiación solar total o sus componentes directa o difusa, tanto en sus valores instantáneos como de los integrados a lo largo de un cierto intervalo de tiempo. Entre los instrumentos de medición pueden distinguirse los pirheliómetros de incidencia normal (radiación directa), los piranómetros (radiación total) y los difusómetros (radiación difusa). El valor de la insolación en una dada locación debe reflejar el valor promedio de la misma. Para obtenerlo, se necesita tener en cuenta las variaciones cíclicas estacionales, conduciendo mediciones de la radiación solar diaria durante 10 ó más años. El Centro de Estudios para la Energía Solar (Censolar) publica datos para la insolación media, en un plano horizontal, para una multitud de países en el mundo. Para expresar el valor de la insolación de un lugar, se usa el kilowatt hora por metro cuadrado (kWh/m^2). Si la energía del sol es usada para calentar agua, se expresa en calorías por metro cuadrado (Cal/m^2) o en Btu/ft^2 . El ángulo de inclinación de la superficie colectora es el que ésta forma con la horizontal (Fig. 2.1).

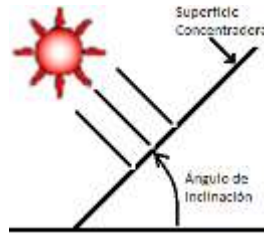


Fig. 2.1 Ángulo de inclinación de la superficie colectora es el que ésta forma con la horizontal.

Con las estaciones, la altura del sol respecto a la horizontal cambia al alcanzar el zenit. La diferencia de altura respecto a la horizontal varía con la latitud del lugar. Para las locaciones donde el cambio de altura es apreciable, la variación del ángulo de inclinación permite que los rayos solares incidan casi perpendicularmente sobre la superficie colectora durante todo el año, lo que incrementa el nivel de energía que puede ser transformada. El ángulo deberá incrementarse cuando la altura del sol sobre el zenit es la menor. En estas locaciones, la duración del día solar promedio, para una misma estación, varía en función del ángulo de inclinación. Una forma universal de presentar los valores de insolación es usar, como referencia, un ángulo de inclinación para la superficie colectora que es igual al de la latitud del lugar [27].

2.3 Concentrador Solar

Los colectores solares son dispositivos diseñados para recoger la energía radiada por el sol y convertirla en energía térmica. Un concentrador solar es un tipo de colector capaz de concentrar la energía solar en un área reducida, aumentando la intensidad energética. Similar a una lupa enfocando la luz en un punto focal.

Dependiendo de la óptica utilizada para llevar a cabo la concentración de la energía solar, los concentradores se pueden clasificar en concentradores de imagen y no-imagen, dependiendo de si se forma una imagen bien definida del sol en el receptor o no, respectivamente.

La clasificación de colectores solares también puede realizarse en dos categorías: los que tiene sistema de concentración y los que carecen de éste. En un colector no concentrador con seguimiento aparente del Sol el área de apertura del colector es igual al área de recepción, mientras que en un colector concentrador con seguimiento solar el área de apertura es más grande que el área de recepción. En los colectores concentradores se usan dispositivos que reflejan o refractan la luz hacia el área de del receptor más pequeña, es decir, la energía solar se concentra teniendo una mayor densidad de flujo radiativo por unidad de área [30].

Los colectores concentradores tienen ciertas ventajas comparados con los colectores planos convencionales:

- Se obtienen mayores temperaturas en un colector concentrador para la misma superficie de colección. Esto significa que se puede lograr una mejor eficiencia termodinámica.
- La eficiencia térmica es mayor debido a que el área de pérdida de calor es pequeña comparada con el área de recepción.
- Es económicamente viable el tratamiento de superficies selectivas y la instalación de tubos de vacío para reducir las pérdidas de calor.

Las desventajas son:

- Los sistemas de concentración prácticamente no colectan la radiación difusa (como en el caso de los sistemas fotovoltaicos) y solo aprovechan la radiación solar directa. Por lo tanto, no pueden funcionar en días nublados.
- Se requiere de un sistema de seguimiento del movimiento aparente del Sol, de forma que se intercepte la radiación directa y mejore su eficiencia.
- Las superficies reflectoras pueden perder su reflectancia con el tiempo, además requieren limpieza y mantenimiento periódicos.

2.3.1 Tipos de concentradores solares

Existen cuatro sistemas de captación y concentración: Torres centrales, Disco Stirling o parabólico, Canal Parabólico y Lente de Fresnel.

En las plantas termo-solares se utilizan dos sistemas para la concentración de la radiación solar directa, ya que la difusa no se puede aprovechar. Estos sistemas son:

1.- Concentración puntual, que consiste en orientar todos los espejos hacia un mismo punto, consiguiendo con ello elevadas temperaturas.

a) Torres Centrales: consiste en un campo de espejos que orienta la radiación hacia una torre concentrando toda la radiación en un punto donde se ubica un receptor (fig. 2.2).

b) Disco Stirling o plato parabólico: consisten en un espejo con forma de antena parabólica que concentra toda la radiación en un punto donde se coloca un receptor (fig. 2.3).

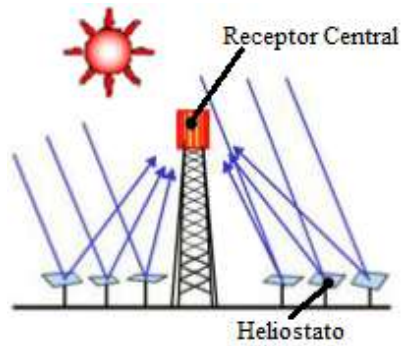


Fig. 2.2 Captación solar por torre con campo de espejos o heliostatos.

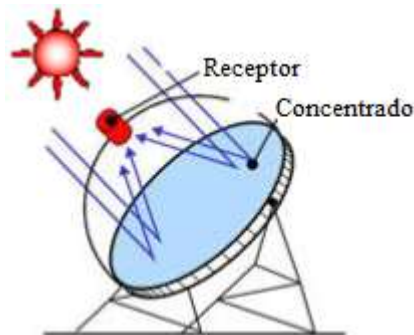


Fig. 2.3 Captación solar por Disco Stirling

2.- Concentración lineal, consiste en concentrar la radiación solar en un receptor lineal que está situado por encima del espejo (Fig. 2.4). Este sistema alcanza menores temperaturas ya que la región donde se capta la energía solar concentrada presenta un área mayor que en los de foco puntual. Entre estos se encuentra el canal Parabólico: es el sistema más utilizado actualmente, consiste en una serie de espejos con forma de un media caña o canal con geometría parabólica (en algunos casos circular), y que por encima de ellos (en la línea focal) se encuentra colocada la tubería con el fluido transportador de calor, la función de los espejos es concentrar la máxima energía posible en los tubos.

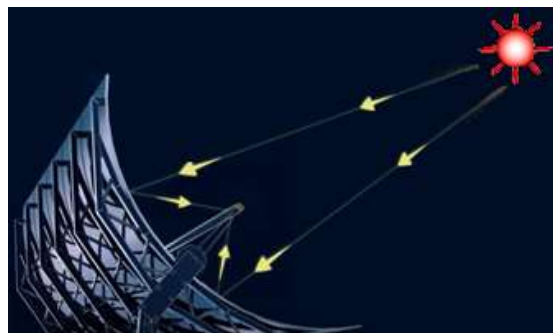


Fig. 2.4 Captación solar por sistema cilindro-parabólico

3.- Concentrador Fresnel reflectivo: en este sistema los espejos son planos y están colocados en el mismo plano horizontal, van girando a lo largo del día o periódicamente según su orientación para ir reflejando los rayos solares sobre la línea focal donde pasa el tubo con el fluido calor-

portador. Es común que estos sistemas cuenten con un segundo sistema concentrador en el receptor para asegurar la máxima captación de la energía solar (Fig.2.5).

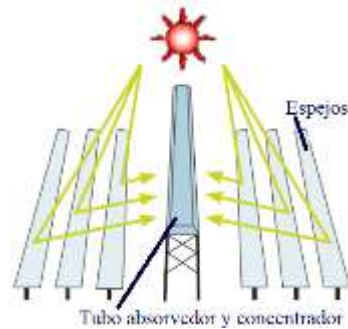


Fig. 2.5 Captación solar por sistema Fresnel

4.- Lente de Fresnel: es un diseño de lentes que permite la construcción de lentes de gran apertura y una corta distancia focal sin el peso y volumen de material que debería usar en una lente de diseño convencional (Fig. 2.6).

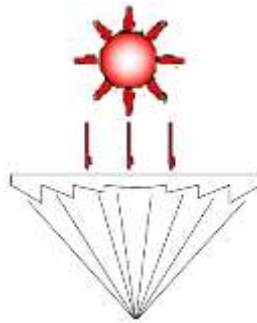


Fig. 2.6 Lente de Fresnel concentrando los rayos solares

Como antecedente en México, se puede mencionar que el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del instituto politécnico nacional ha desarrollado

Como antecedente en México, se puede mencionar que el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional(CINVESTAV) y el Centro de Investigación en Energía de la UNAM desde su creación han realizado actividades de investigación en las tecnologías de concentración solar, desarrollando proyectos de distintos tipos de concentradores abarcando casi todos los mencionados anteriores (Fig. 2.7 y 2.8).



Fig. 2.7 Dispositivos de concentración solar desarrollados en el CINVESTAV



Fig. 2.8 Dispositivos de concentración solar desarrollados en CIE-UNAM. De izquierda a derecha: DICEF-2, DEFRAC y COSPAA.

2.4 Seguidor Solar

Para la instalación del concentrador solar, es necesario un soporte lo suficientemente estable y resistente sobre el cual se montara y sujetara el concentrador. Las estructuras utilizadas pueden ser de dos tipos, fijas o móviles. En las estructuras fijas, el régimen de carga puede ser satisfecho con la selección de un ángulo de inclinación fijo. En las estructuras móviles (seguidores solares) la posición de estas varía durante el día. Dependiendo del grado de libertad de movimiento, se conocen dos tipos: el seguidor de un eje y el de dos ejes. El seguimiento del sol puede ser llevado a cabo usando un seguidor de un eje, el cual solamente se mueve de este a oeste (movimiento acimutal). O mediante un seguidor de dos ejes, el cual combina el movimiento acimutal con el de norte a sur (elevación) [3]. Para una alta precisión, se emplean los sistemas de dos ejes.

Existen Seguidores pasivos (mecánicos) y activos (electrónicos) [31]. Los seguidores mecánicos no inutilizan ningún tipo de componente eléctrico o electrónico. Además son menos complejos y más baratos que los seguidores activos, pero trabajan con una menor eficiencia y aún no han sido ampliamente aceptados por los consumidores.

Los sistemas del seguimiento activos pueden ser de ciclo cerrado o de ciclo abierto [9]. Para los sistemas de ciclo abierto, el seguidor realiza cálculos para identificar la posición del sol y determina los ángulos de rotación del seguidor utilizando una ecuación específica de seguimiento solar [10]-[12], sin embargo estos sistemas automáticos presentan algunos problemas como seguir operando incluso si el sol no está visible (por ejemplo en días nublados) y por lo tanto gastaran energía sin recibir ganancia energética alguna. El mismo efecto se obtiene cuando se usa un algoritmo para orientar al seguidor en distintos ángulos dependiendo de la hora del día, en donde los ángulos son transformados en coordenadas que dirigen al seguidor [13]. Otra alternativa es tener una base de datos que contenga información sobre los correctos ángulos de incidencia de los rayos solares, y de esta forma igualmente orientar al seguidor. Aunque el empleo de una base de datos de este tipo hace a los sistemas costosos y complicados al requerir una base de datos almacenada para un movimiento basado en un sentido horario. En general, los sistemas de ciclo abierto son baratos y simples, pero estos no pueden compensar los disturbios en el sistema y tienen baja precisión.

Por otro lado para el seguimiento en ciclo cerrado, el seguidor solar emplea algún tipo de sensor que envía una señal de retroalimentación para poder orientar en todo momento al colector solar en una posición perpendicular a la dirección de los rayos solares para conseguir con esto, la insolación máxima [14-19]. Entre los sensores empleados en los seguidores solares podemos encontrar foto-sensores, foto-resistencias, cámaras digitales, web-cams entre otros [20].

El mecanismo de seguimiento de circuito cerrado tiene un error de seguimiento más bajo que el mecanismo de seguimiento de ciclo abierto. Sin embargo, el mecanismo de seguimiento de circuito cerrado no es fiable en condiciones meteorológicas de niebla y nubes. Varios investigadores han propuesto el uso de esquemas de optimización numérica para el desarrollo de sistemas de seguimiento solar precisos. Ejemplos típicos de tales esquemas incluyen algoritmos de lógica y esquema de control neuro-fuzzy adaptativo [21-23].

2.5 Guías ópticas y Fibras ópticas

Para la elaboración de este trabajo fue de vital importancia encontrar un sistema que permitiera transportar la energía solar desde el foco de concentración del lente, hasta un punto donde fuese posible utilizar la energía, el cual estuviera lejos del alcance del movimiento mecánico del seguidor solar para el fácil manejo de dicha energía, es por ello que se analizaron algunos sistemas utilizados en el transporte de energía solar, con el fin de analizar su comportamiento y poder seleccionar o proponer algún medio que permitiera transportar la energía solar, el cual sea funcional, confiable, eficiente, económico y que se encuentre disponible comercialmente en el país.

Los sistemas analizados fueron lentes y espejos, ductos de luz, guías ópticas y fibras ópticas, siendo los dos últimos, los que presentaron las características más adecuadas desde el punto de vista práctico para este sistema.

2.5.1 Historia

En 1975, Robieux [25] fue el primero en transportar energía solar concentrada usando grandes espejos parabólicos asociados a guías ópticas rígidas para transportar la energía solar concentrada a un punto de conversión. Así, las guías ópticas ofrecerían una interesante solución a las problemáticas de transportar la luz solar al utilizar el fenómeno de reflexión interna total asociado a los dos índices de refracción diferentes entre el material de la guía de onda y el medio ambiente. La propuesta hecha por Robieux resultó muy interesante en su momento, puesto que las guías ópticas transportarían la energía solar concentrada desde el punto de colección hasta el sistema de conversión disminuyendo las pérdidas de transporte. Sin embargo, esta tecnología no llegó a su aplicación pues el sistema de seguimiento para la captación de la energía solar presentó problemas prácticos, debido a la rigidez propia de las guías de onda, las cuales resultaron poco maniobrables.

En 1976, Kato y Nakamura (Kato y Nakamura, 1976) estudiaron la capacidad teórica de la transmisión de radiación solar por fibras ópticas, las cuales presentan una rigidez menor debido a sus diámetros pequeños. El estudio de Kato y Nakamura se basó en la absorción por longitud de onda del espectro solar al ser transmitido mediante fibras ópticas. De tal forma que establecieron valores promedio de transmisión para las diferentes componentes espectrales de la irradiación solar.

La idea de transmisión de energía Solar concentrada a través de fibras ópticas (TCSEvOF) fue presentada en 1980 por un grupo de investigadores franceses. Pero debido a la falta de disponibilidad de fibras ópticas de alta calidad y el alto costo de su diseño, este proyecto se limitó a sólo el análisis teórico.

Hoy en día, los materiales de fibra óptica ofrecen una atenuación menor, las fibras ópticas modernas producen mejor eficiencia óptica [30]. Pueden transmitir un flujo de calor por radiación mayor que el que transmitían las fibras ópticas utilizadas hace 20 años.

Kribus y colaboradores en el año 2000 presentaron un estudio sobre el uso potencial de fibras ópticas para la generación de energía solar térmica.

Jaramillo y otros en 2002 en México, llevaron a cabo un estudio teórico y experimental del comportamiento térmico de fibras ópticas con un núcleo de alta pureza de SiO₂ para transportar energía solar concentrada, determinando la dependencia del coeficiente de absorción con la energía transportada.

2.5.2 Teoría

Una fibra óptica está compuesta por un filamento de material transparente, rodeado por una capa de otro material con un índice de refracción menor. La luz entra en la fibra con rayos paraxiales que inciden en las paredes interiores formando ángulos muy rasantes, mayores que el ángulo crítico obtenido por la diferencia de índices de refracción entre el núcleo y la cubierta. De este modo sufre reflexión total y va rebotando por el interior de la fibra sin perder apenas intensidad. Cualquier haz de rayos que entre en la fibra seguirá las curvaturas o giros de la misma siempre que la fibra no se doble con un radio excesivamente pequeño. Así pues, la fibra actúa como tubería que permite transportar la luz de un lugar a otro.

Este mismo principio puede aplicarse a cualquier tubo de vidrio o plástico transparente que tenga extremos pulidos. Sin embargo, el cilindro no es flexible como la fibra óptica [24]; además, cualquier suciedad o contacto de otro medio en la parte externa cambia las condiciones de refracción en el punto de contacto y afecta a la reflexión. Esa es precisamente la utilidad de la cubierta, que actúa como capa protectora permitiendo mantener la efectividad de la fibra constante y controlada. En realidad, no es necesario que la cubierta sea transparente, sino simplemente que se comporte como dieléctrico. Seleccionando adecuadamente los índices del núcleo y de la cubierta, los ángulos que se reflejan con ángulos demasiado pequeños (con respecto a la normal de la superficie interior) acaban perdiéndose, mientras que los rayos paraxiales pueden atravesar la fibra en su totalidad. La fibra no necesita ser cilíndrica, aunque suele realizarse así por facilidad de fabricación; además cualquier irregularidad que contuviese el núcleo atraparía la luz y produciría pérdidas luminosas.

2.5.3 Propagación de la Luz

En la figura 2.9 el índice de refracción cambia siendo alto en el núcleo y bajo en el recubrimiento. La luz se propaga a través de la interface núcleo-recubrimiento. Para simplificar la discusión de la propagación de la luz, es preferible utilizar la técnica de trazado de rayos. De esta forma se sigue un rayo de luz representado por un vector, a través de la fibra. La

propagación de los rayos de luz en la fibra ocurre desde el inicio de la fibra hasta el final de ella. Las condiciones necesarias para inyectar los rayos eficientemente dependen de la estructura de la fibra, así como de las características de la fuente de luz.

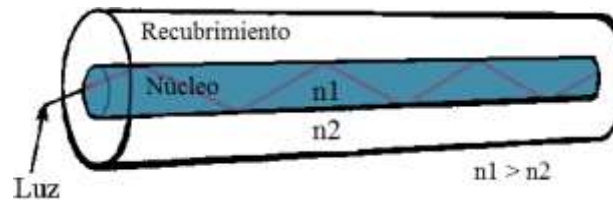


Fig. 2.9 Esquema de un haz de luz propagándose a través de una fibra óptica

2.5.4 Reflexión Interna Total

En la figura 2.10 se muestran dos rayos. Uno (La línea sólida) es inyectado en un ángulo más pequeño que el otro (Línea punteada).

Analizando el rayo de la línea punteada, primero en la interface A entre el aire y el núcleo, se presenta la refracción y el rayo se propaga por la fibra óptica con un ángulo más pequeño y más cercano a la línea central, por lo tanto $\theta_2 < \theta_1$. Posteriormente el rayo llega a la interface núcleo-recubrimiento en el punto B. Nuevamente se presenta la refracción ahora a través del recubrimiento y el rayo se inclina un poco más. Por último, el rayo se vuelve a inclinar, a la salida de la fibra. Este rayo no fue confinado y por tanto no se propagó dentro de la fibra.

Ahora, analizando el rayo de la línea sólida, la refracción se presenta en el punto A, en el punto B' ocurre la reflexión interna total. Este rayo es confinado y propagado dentro del núcleo de la fibra. Por conveniencia se asume que el ángulo de incidencia de este último rayo sobre la interface núcleo recubrimiento es el ángulo crítico α_c para la fibra, donde el índice de refracción para el recubrimiento es n_2 y para el núcleo n_1 . La ecuación del ángulo crítico está dada por:

$$\alpha_c = \text{Sin}^{-1}(n_2/n_1) \quad (2.4)$$

Un rayo incidente con un ángulo mayor a α_c será propagado en la fibra. El rayo crítico (Línea sólida) forma un ángulo θ_c con el centro de la fibra. Los rayos con un ángulo de propagación mayor a θ_c no se propagarán. El ángulo θ_c es llamado ángulo crítico de propagación y se puede relacionar con el ángulo crítico mediante.

$$\text{Sin } \alpha_c = \text{Cos } \theta_c = n_2/n_1 \quad (2.5)$$

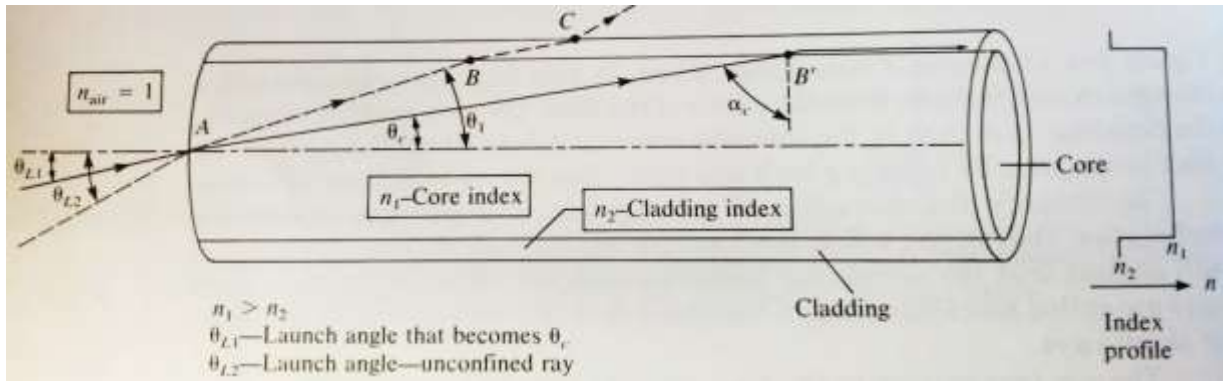


Fig. 2.10 Esquema de dos haces de luz propagándose a través de una fibra óptica

Es importante notar que la reflexión interna total solo ocurre cuando la luz viaja de un medio con un índice de refracción alto a uno bajo.

La conversión de un modo a otro es causado por un dobles en la guía óptica, ya sea grande o pequeño, macro-curvas y micro-curvas respectivamente. En la Figura 2.11 se muestran dos rayos que pasan a través de una macro-curva. Cuando un rayo con ángulo θ_1 alcanza el punto A, su ángulo de propagación llega a ser mayor que θ_c , y por lo tanto el rayo sale de la fibra. En el caso del segundo rayo, este tienen un ángulo inicial θ_2 y después de incidir sobre el punto B, el rayo es reflejado pero ahora con un ángulo θ_2' , el cual es mayor que θ_2 debido a la curvatura de la fibra. Por tanto, un haz de luz entra por un extremo de una barra transparente, la luz se refleja internamente en su totalidad incluso si la barra es curva, siempre y cuando dicha curva no sea muy grande [28], [29].

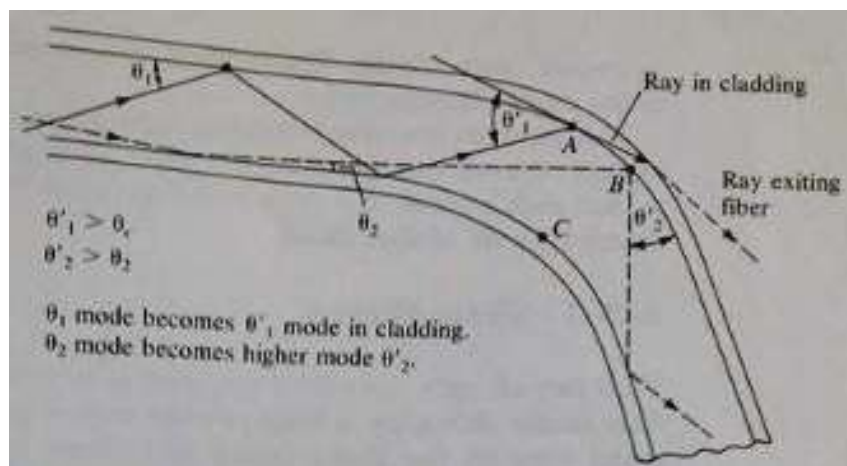


Fig. 2.11 Esquema de dos haces de luz propagándose a través de la macro-curva de una fibra óptica

2.5.5 Ángulo de Admisión y Apertura Numérica

El ángulo de propagación debe ser igual o menor que el ángulo crítico, La figura 2.11 muestra dos rayos entrantes que llegan a ser dos rayos críticos en la fibra. Si se sigue el rayo representado por la línea sólida, se observa una refracción en el punto A, por lo que θ_a es diferente de θ_c . Los índices de refracción involucrados son el del aire $n = 1$, y el del núcleo n_1 (mayor que 1). Solo los rayos incidentes sobre la fibra con ángulos de inclinación con respecto del centro del núcleo que se encuentren dentro del rango $2\theta_a$, serán aceptados dentro de ella. El ángulo $2\theta_a$ es el ángulo de admisión. En tres dimensiones, es un cono de aceptación limitado por $2\theta_a$.

Es útil relacionar al ángulo θ_a con el índice de refracción de la fibra. Aplicando la ley de Snell y un poco de álgebra en el punto A, se obtiene una ecuación para calcular la apertura numérica.

$$N.A. = \sin \theta_a = n_1 \sin \theta_c \quad (2.6)$$

Para obtener N.A. en términos de los índices de refracción n_1 y n_2 , del núcleo y del recubrimiento, respectivamente.

$$N.A. = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2.7)$$

2.5.6 Características de las Fibras Ópticas

Las características de las fibras ópticas dependen de dos cosas, la composición específica del material del cual están hechas y la forma física y tamaño. Cosas como la composición del vidrio o plástico, diámetro de la fibra y la forma en que el índice de refracción varía dentro de la fibra, afectan directamente el rendimiento de la fibra, las imperfecciones también afectan las pérdidas en la fibra, así como hacer pequeñas micro curvaturas en la fibra [28].

Hay tres principales causas fundamentales de pérdidas en las fibras ópticas.

1. Pérdidas por el material. Absorción debida al material. Esto incluye la absorción de la luz debida a la interacción con la estructura molecular del material, como pueden ser pérdidas debido a las impurezas del material.
2. Dispersión de la luz. La dispersión de la luz por las moléculas del material debido a las impurezas e imperfecciones del material. La luz dispersada no se propaga a través de la fibra, y por tanto esta luz se pierde.

3. Guías de onda y pérdidas de banda. Son pérdidas causadas por imperfecciones y deformaciones de la estructura de la fibra.

Las pérdidas en la fibra se definen como.

$$\text{Loss} = P_{\text{out}}/P_{\text{in}} \quad (2.8)$$

En donde P_{in} es la potencia que entra a la fibra y P_{out} es la potencia que sale de ella.

2.6 Electrocirugía

La electrocirugía es la aplicación de electricidad, por medio de radiofrecuencia, sobre un tejido biológico, para obtener un efecto clínico deseado. Entre sus ventajas destacan el menor sangrado, que conlleva un menor tiempo quirúrgico, y la garantía de una buena asepsia.

2.6.1 Efecto Joule

La Ley de Joule, permite calcular la energía disipada en forma de calor en un conductor. Ésta afirma que: "la cantidad de energía calorífica producida por una corriente eléctrica (I), depende directamente del cuadrado de la intensidad de la corriente, del tiempo (T) que ésta circula por el conductor y de la resistencia que opone el mismo al paso de la corriente"

$$Q = I^2 \times R \times T$$

Sustituyendo Intensidad según la ley de Ohm obtenemos:

$$Q = V^2 / R \times T$$

Podemos concluir, por tanto, que el calor en los tejidos es mayor cuando aumentamos el voltaje o lo mantenemos en el tiempo. Por otro lado, cuando aumenta la resistencia, necesitamos más voltaje para generar el mismo calor.

2.6.2 Corriente Eléctrica y Tejido Biológico

El principio de la electrocirugía se basa en la aplicación de una corriente eléctrica sobre el tejido, con el objetivo de conseguir energía calorífica o térmica sobre el mismo. La corriente eléctrica define el conjunto de electrones que fluye a través de un cuerpo conductor.

Corriente directa: El intercambio de electrones es unidireccional y continuo entre dos polos de signos opuestos.

Corriente alterna: El intercambio de electrones es bidireccional. La polaridad cambia rítmicamente de forma sinusoidal. Se caracteriza por su frecuencia medida en Hertz (Hz).

Centrándonos en la Corriente Alterna, podemos distinguir entre:

Corriente de baja frecuencia: inferior a 3,000 Hz.

Corriente de frecuencia media: de 3,000 a 50,000 Hz.

Corriente de alta frecuencia: superior a 50,000 Hz.

2.6.3 Efectos de la Corriente Eléctrica sobre el Tejido

Efecto electrolítico: La corriente eléctrica causa en el tejido biológico una corriente de iones. En el caso de corriente continua, los iones positivos (cationes) se desplazarían hacia el polo negativo y los iones negativos (aniones) hacia el polo positivo. En los polos, el tejido biológico sufriría daño. La corriente alterna permite una oscilación o cambio permanente de la dirección del movimiento de los iones, evitando el daño del tejido.

Efecto farádico: Se produce por estimulación de estructuras musculares o nerviosas por energía alterna de baja o media frecuencia, pudiendo producir extrasístoles, fibrilación ventricular, tetania e incluso la muerte; dicho efecto tiene su máxima repercusión con corrientes de 100 Hz. El efecto farádico disminuye conforme aumentamos la frecuencia (cesa con corrientes con frecuencias superiores a 100.000 Hz o 100 KHz). Las corrientes alternas de alta frecuencia hacen que la oscilación de electrones en el interior de la célula sea demasiado rápida como para que ésta pueda ser estimulada. Para evitar el efecto farádico, en electrocirugía se emplea corriente alterna con frecuencias superiores a 300 - 400 KHz.

Por todo ello, la Electrocirugía se basa en la aplicación de corriente alterna de alta frecuencia sobre un tejido biológico, con el objetivo de producir un efecto que genere energía térmica, y que llevará a cabo diferentes efectos quirúrgicos dependiendo de la temperatura alcanzada:

37 - 43 °C: Calentamiento.

43 - 45 °C: Retracción.

> 50 °C: reducción de la actividad enzimática.

70 - 80 °C: Coagulación blanca, por desnaturalización de las proteínas.

90 - 100 °C: Deseccación, por ebullición del H₂O y rotura de membranas celulares, conservando las células su arquitectura.

> 100 °C: Corte, por vaporización que conlleva rotura del citoplasma y explosión celular.

> 200 °C: Carbonización o fulguración.

2.6.4 Unidad Electroquirúrgica

La unidad de electrocirugía es la encargada de generar la energía alterna de alta frecuencia usada en electrocirugía a partir de corrientes eléctricas de baja frecuencia, con el propósito de conseguir un efecto térmico sobre el tejido.

Un circuito completo de una Unidad de electrocirugía está compuesto por:

- El generador de corriente eléctrica.
- Un electrodo activo, que concentra la energía en el punto de contacto.
- El paciente (o tejido).
- Un electrodo neutro de retorno o dispersión, que permite el cierre del circuito con el generador.

Dispone de conexiones para electrodos activos y de retorno, y controles que determinan el voltaje y frecuencia de la corriente eléctrica para llevar a cabo el efecto deseado sobre el tejido. En las unidades de electrocirugía la corriente pasa a través del cuerpo del paciente o de una porción de tejido, y siempre regresa finalmente al equipo, estas cuentan con sistemas aislados que evitan posibles complicaciones (quemaduras).

Hablamos de Electrocirugía monopolar cuando la corriente fluye desde un electrodo activo de superficie pequeña a un electrodo pasivo, neutro o de retorno de gran superficie colocado sobre el paciente, de manera que el cuerpo de éste forma parte de un circuito cerrado de corriente. La aplicación cuidadosa del electrodo de retorno es imprescindible para evitar quemaduras extensas que pueden ocurrir si no se posiciona adecuadamente.

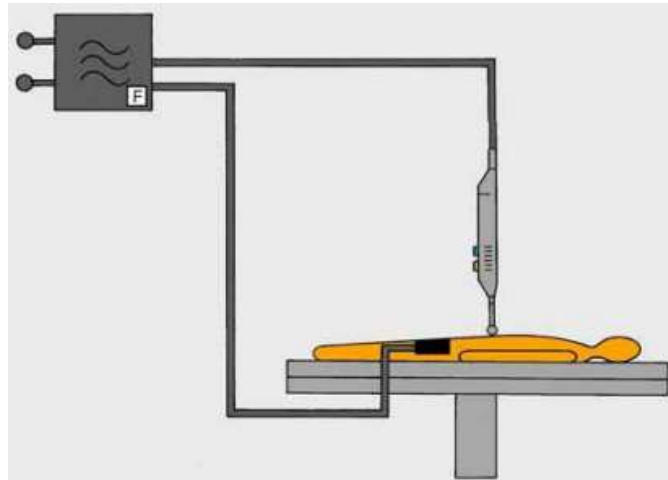


Fig. 2.12 Electrocirugía monopolar

La Electrocirugía bipolar define aquella corriente que fluye a través del tejido situado entre dos electrodos de igual tamaño enfrentados entre sí, a modo de forceps. La energía bipolar es la más segura al evitar posibles quemaduras involuntarias del paciente, por no formar éste parte del circuito eléctrico.

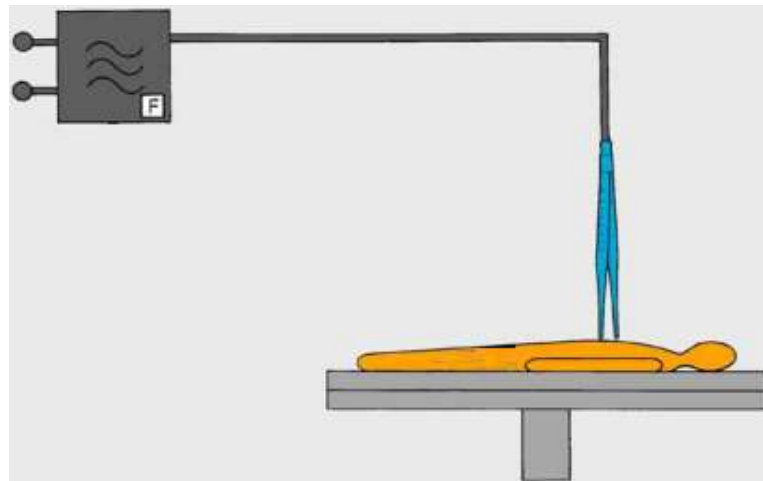


Fig. 2.13 Electrocirugía bipolar

2.6.5 Factores de los que Depende la Acción de la Electrocirugía en los Tejidos

Potencia:

La lesión térmica aumenta a medida que aumentamos el voltaje, y por consiguiente la potencia de la energía eléctrica aplicada. El calentamiento desproporcional del tejido al aplicar una

energía de alto voltaje puede provocar una coagulación superficial prematura y el aumento de la resistencia del tejido adyacente.

Densidad de potencia: Se define como la potencia total que llega al tejido por área de electrodo activo. A una misma potencia, la densidad de potencia viene determinada en gran medida por la forma del electrodo. Un electrodo con forma de punta, concentra la corriente aumentando la densidad de potencia, produciendo un aumento rápido y elevado de la temperatura favoreciendo la vaporización y corte del tejido. Si el electrodo es mayor, la densidad de potencia se reduce, administrando una menor potencia total por área del electrodo, la temperatura generada será menor, produciéndose deshidratación celular (coagulación) en lugar de vaporización (corte). La efectividad del electrodo de retorno se basa, en parte, en su adherencia completa sobre el tejido, ya que así la densidad de potencia será menor y se evitará el riesgo de quemadura sobre la zona expuesta.

Proximidad tisular del electrodo: En el corte, el electrodo se encuentra casi en contacto con el tejido, ya que para el efecto de vaporización se precisa una envoltura de vapor alrededor del electrodo, la cual no se forma si éste contacta totalmente. En la coagulación, el electrodo ha de estar en pleno contacto con el tejido, produciendo un mayor daño térmico en tejidos adyacentes. La fulguración se lleva a cabo sin contacto del electrodo con el tejido, produciéndose un centelleo de electrones en la pequeña capa de aire interpuesta entre el electrodo activo y el tejido, lo cual provoca hemostasia superficial con mínima penetración.

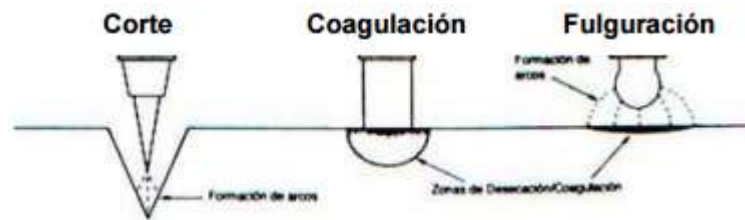


Fig. 2.14 Aplicaciones de un electrocauterio

Tiempo en contacto con los tejidos: Si la velocidad con la que se mueve el electrodo es baja, la lesión térmica colateral será mayor, por el contrario, si es rápida se producirá coagulación superficial.

Resistencia de los tejidos: La corriente fluye con mayor facilidad en aquellos tejidos con mayor cantidad de agua. Aquellos tejidos con escasa cantidad de agua tienen más impedancia para el paso de la corriente (hueso, tejido graso, tejido coagulado...) debiendo incrementar la potencia si queremos conseguir iguales resultados.

2.6.6 Factores que Influyen en los Efectos Titulares de la Electrocirugía

El corte se consigue utilizando una onda de corriente no modulada, con un electrodo puntiforme que permita conseguir una densidad de potencia que genere rápidamente temperaturas superiores a 100°C; de este modo, al aproximar el electrodo al tejido (sin tocarlo) se formará un arco voltaico que dará lugar a la vaporización de la célula. Para cortar se utiliza: Corriente monopolar, corriente no modulada, electrodo en forma de punta.

Para realizar coagulación tisular se puede emplear cualquier tipo de onda, las corrientes de “corte” y “mixtas” son preferibles al modo “coagulación”, debido a que esta última corriente, de naturaleza discontinua o modulada, puede originar la formación de una cantidad desigual de enlaces proteicos, impidiendo la oclusión de un vaso sanguíneo; además, el alto voltaje que caracteriza este tipo de corriente podría coagular rápidamente las capas superficiales de los tejidos, impidiendo la transmisión de la corriente a capas más profundas. Así mismo, el electrodo dispondrá de un tamaño suficiente para no alcanzar una densidad de potencia que genere temperaturas superiores a 100 °C. Para coagular se utiliza: Corriente bipolar con corriente no modulada, Corriente monopolar con corriente no modulada o mixta (“corte” o “mixta”), electrodo grande.

Para la fulguración (coagulación en spray) se emplea una onda de corriente modulada de alto voltaje que permita alcanzar temperaturas de 200°C. La aplicación de un electrodo grande, a cierta distancia del tejido, permite la “pulverización” de electrones que crean arcos electroquirúrgicos repetidos, actuando solo superficialmente. Este tipo de coagulación es preferible para detener sangrados en sábana debidos a sección de capilares, ya que al formar un tejido carbonizado de alta resistencia no permite calentar capas titulares profundas. Para fulgurar se utiliza: Corriente monopolar con corriente a cierta distancia del tejido.

2.6.7 Complicaciones de la Electrocirugía

Son secundarias a la lesión térmica y se pueden dividir en:

Lesiones térmicas accidentales: Se producen al activar accidentalmente un electrodo que se encuentra en la cavidad abdominal. Por extensión, la zona de corte o coagulación puede afectar a otras estructuras vitales (vasos, vejiga, uréter, intestino). El riesgo de éste tipo de lesión es menor, aunque no nulo, con la energía bipolar. También se puede producir por derivación de la corriente debido a que ésta encuentra una salida directa del paciente a través de tomas de tierra distintas al electrodo de retorno (ejemplo piercing, electrodo de ECG...).

Puede ocurrir igualmente una quemadura a nivel del electrodo de dispersión si éste se despegara en parte, por un aumento de la densidad de potencia de la corriente de retorno. Si el electrodo

se sitúa en un área que ofrece una mayor impedancia (zona cicatricial, con prominencias óseas, con gran cantidad de grasa...) también existe riesgo de quemadura; de ahí la importancia de sistemas de desconexión automática al detectar un error en el sistema.

Acople directo: Ocurre cuando se produce la ruptura del material aislante que rodea el electrodo, lo que conlleva contacto del electrodo con algún conductor y derivación de la corriente al tejido adyacente. El órgano más frecuentemente lesionado es el intestino.

Acople capacitivo: Se define como el campo eléctrico que genera todo electrodo unipolar laparoscópico activado al pasar a través de una cánula de metal. No es peligroso si el circuito se completa a través de una vía de dispersión como es la pared abdominal. Si la cánula metálica se ancla a través de un mango de plástico, la corriente no se dispersará por la pared abdominal, haciéndolo por otro conductor cercano, dañándose órganos vecinos (el conductor más cercano suele ser el intestino). Para evitar lesiones por el llamado acople capacitivo, es importante que las cánulas estén compuestas con sólo un material, normalmente metal.

Humo: La destrucción del tejido por la energía térmica produce humo. Este humo puede contener gases tóxicos (cianuro, benceno, formaldehído) y altas concentraciones del mismo puede ocasionar irritación ocular y/o respiratoria. Algunos estudios han demostrado que las sustancias tóxicas causadas por el humo son carcinogénicas. Sería recomendable emplear mascarillas especiales que filtren esas sustancias, así como aspiradores de humo cuando empleemos la energía eléctrica en cirugía.

Interacciones de la electrocirugía con dispositivos cardíacos: Los dispositivos cardíacos implantables como son los marcapasos y los desfibriladores cardíacos internos, pueden representar una complicación en el uso de la electrocirugía, ya que la corriente eléctrica puede interferir con su funcionamiento al ser erróneamente interpretada como actividad cardíaca intrínseca. Han sido descritos varios efectos por interacción entre dispositivos cardíacos y electrocirugía, pudiendo ocasionar bradicardia, taquicardia, fibrilación auricular, fibrilación ventricular, infarto agudo de miocardio e incluso la muerte. El uso de la electrocirugía no está contraindicada pero sí se requiere extremar las precauciones:

Preoperatoriamente determinar si el paciente utiliza un marcapasos.

Disponer de una monitorización muy exhaustiva del paciente (ECG).

Utilizar energía preferiblemente Bipolar.

Cuando se usa energía Unipolar, no usar la punta del electrodo a una distancia menor de 15 cm del dispositivo.

Emplear la mínima cantidad de energía durante el menor tiempo posible.

Desconectar el aparato durante la intervención si es posible.
Disponer de un desfibrilador y un programador adecuado del marcapasos en quirófano.
Debería estar disponible un médico de la Unidad de Marcapasos para casos de emergencia.
Analizar el marcapasos inmediatamente después del procedimiento y a las 24 horas y 48 horas posteriores.

2.6.8 Prevenciones

Respecto de la seguridad del paciente y de los operadores del electrocauterio, es conveniente que la tensión de línea, se tome de un transformador de aislación simétrica montado permanentemente en la sala de cirugía. Así mismo, el propio equipo debe poseer un transformador de poder con aislación simétrica.

Existe la posibilidad de que se corte el cable del electrodo pasivo; en ese caso, el paciente quedara colocado a un potencial superior a 100V por encima de tierra. Si el paciente tiene contacto con algún objeto puesto a tierra, puede pasar suficiente corriente a través de la discontinuidad del cable, como para causarle una quemadura en la zona de contacto a tierra. Además, un miembro del staff quirúrgico que de alguna manera se halle a tierra, al tocar al paciente puede cerrar el circuito y recibir un cierto shock; la aislación proporcionada por los guantes quirúrgicos no es suficiente. Muchas unidades quirúrgicas poseen un sistema de alarma y desactivación ante la ruptura del cable de la placa.

Un peligro eventual deviene de utilizar viejas unidades de diatermia quirúrgica junto con otros aparatos o monitores de etapa de entrada no aislada. Dado que en dichas unidades la placa está conectada a tierra, si en uno de los otros aparatos falla la conexión a tierra puede producirse una peligrosa corriente a través del paciente. En los modernos equipos electroquirúrgicos se intercala un condensador de mica de 0,01 μF de alta aislación entre el borne de la placa y tierra. Este capacitor presenta una impedancia de 0,3 M Ω a 50 Hz y 40 Ω a 400kHz de modo que la aislación del electrodo pasivo con respecto a la tensión de línea es enteramente satisfactoria.

Al efectuar electrocirugía se pueden producir fugas aún a través de los monitores que estuvieran en óptimas condiciones operativas. Un monitor que posea su etapa de entrada a tierra presentará un camino obvio y fácil para la energía radiante dado que el generador tendrá su placa conectada también a tierra, sea directamente sea a través del capacitor de 0,01 μF . La energía radiante se concentra en los sitios donde están instalados los electrodos sensores de los monitores y es allí donde se pueden producir quemaduras.

La manera más sencilla de evitar cualquier pasaje de radiación a altas frecuencias hacia los monitores, averiados o no, es colocar en serie con los cables de paciente de éstos un choque de bloqueo de R.F. Este debe colocarse tan cerca del sitio de contacto del electrodo con la piel como sea posible.

2.6.9 Costo del Equipo de Electrocirugía

A continuación se muestra el precio y las especificaciones de dos equipos comerciales de electrocirugía. Los precios mostrados fueron cotizados al día 3 de julio del 2016

2.6.9.1 2Force 2 ESU (unidad electrocauteria para cirugía eléctrica)



Fig. 2.15 Electrocauterio comercial Force 2 ESU (carro de desplazamiento no incluido)

| | | |
|--|-------------|-----------------------|
| Precio en dólares: | \$2,462.00 | |
| Precio en pesos (1 dólar = 18.31 pesos): | \$45,079.22 | (3 de julio del 2016) |

Especificaciones:

Corte y coagulación, monopolar, bipolar, peso: 10.4 Kg, potencia: 300 W, voltaje de operación: 85 a 135 V ca, corriente en corte: 8 A, corriente en coagulación: 4 A.

2.6.9.2 Electrocauterio Sonolife



Fig. 2.16 Electrocauterio comercial Sonolife con accesorios

Precio: **\$34,999 pesos**

Especificaciones:

Corte I & II - 300 W 300 Ω , mezclado - 200 W 300 Ω , desecación - 120 W 500 Ω , Spray - 80 W 500 Ω , bipolar - 80 W 150 Ω , ciclo Duty - 10 S / 30 S, frecuencia de salida: 490 kilohercios \pm 5, corriente de entrada: 4.5 A \sim , Voltaje: 100 - 240 V \sim F.

2.7 Cirugía Láser y Solar

2.7.1 Cirugía Laser

La luz del láser ha demostrado ser excepcionalmente adecuada para ciertos procedimientos quirúrgicos, en los que el tejido ofensivo (por ejemplo, un tumor canceroso) es destruido fototérmicamente por un relativamente rápido calentamiento muy localizado.

Una de las aplicaciones de los láseres es en cierto tipo de cirugías, donde el haz luminoso del láser puede reemplazar con grandes ventajas al bisturí. La principal ventaja es que al mismo tiempo que corta va cauterizando los pequeños vasos sanguíneos, evitando hemorragias. La mayoría de los láseres usados en cirugía son de bióxido de carbono. La intensidad y la velocidad del punto luminoso se regulan a fin de controlar la penetración del corte. La luz del láser se acopla en una fibra óptica y pasa a través de un catéter hacia el órgano a tratar.

Los crecimientos dirigidos comúnmente tienen diámetros del orden de unos pocos milímetros a decenas de ellos. Las longitudes de onda visibles y cercanas al infrarrojo son preferibles porque:

Las fibras ópticas de alta transmisibilidad y la flexibilidad para estas longitudes de onda están disponibles comercialmente, y porque la profundidad de penetración óptica es mucho mayor que en el infrarrojo lejano y ultravioleta, que reduce la dependencia de la conducción de calor impulsado por una fuente térmica puntual.

El amplio despliegue de los procedimientos de cirugía láser y fibra óptica, en particular, se ha visto limitada por el alto costo de la unidad y la costosa infraestructura asociada. Las altas densidades de potencia de radiación necesarias para la cirugía efectiva han impedido el uso de menos costosas fuentes de luz convencionales incoherentes.

Las aplicaciones más exitosas del láser en cirugía son los siguientes tipos de operaciones:

a) *Cirugía ginecológica.* Los cánceres de la vagina y del útero tienen el gran inconveniente de que están ubicados en lugares de difícil acceso para el cirujano y, para agravar la situación, frecuentemente el cáncer está esparcido en una gran área. Esta es la situación ideal para el láser, pues puede irradiarse con la luz del láser toda el área deseada cuantas veces se quiera, a fin de destruir las células malignas sin provocar ningún sangrado.

b) *Operaciones de la garganta y del oído.* La garganta y el oído son órganos muy delicados, que fácilmente pueden lastimarse con la cirugía convencional. Con el láser se pueden cortar o cauterizar zonas pequeñísimas de estos órganos sin lastimar el resto. El láser más usado para este tipo de intervenciones es el de argón.

c) *Cirugía oftalmológica.* La diabetes, con el tiempo, tiene una gran propensión a provocar una degeneración de la retina del ojo, llamada retinopatía diabética. Esta enfermedad ha llegado a ser la causa número uno de la ceguera. La causa de este tipo de ceguera es la proliferación de vasos sanguíneos en la retina, que frecuentemente se rompen debido a su gran fragilidad. El tratamiento consiste en fotocoagular con la luz de un láser de argón estos vasos. El láser más usado es el de argón, debido a que su color verde hace que sea más fácilmente absorbido por la sangre, que es roja. La luz del láser se enfoca sobre el punto deseado en la retina, usando como lente enfocadora la misma lente del ojo, por lo que no es necesario abrir el ojo con bisturí.

Desgraciadamente, esta técnica no es tan eficaz como se desearía, pues ayuda a reducir o impedir la ceguera en tan sólo el cincuenta por ciento de los casos. Por otro lado, la técnica convencional de la fotocoagulación con una lámpara de xenón de alta intensidad es tan efectiva como el láser. La ventaja de este último es su mayor facilidad de manejo.

d) *Destrucción de úlceras hemorrágicas.* La combinación del endoscopio y el láser es un instrumento ideal para la coagulación de las úlceras hemorrágicas. El médico localiza la úlcera observando a través del endoscopio y luego envía la luz del láser a lo largo de una fibra óptica

que va unida al endoscopio. Los láseres más usados han sido en primer lugar el de neodimio en YAG y en segundo lugar el de argón. El alto costo del equipo ha impedido que esta técnica se haga más popular.

e) *Cicatrización rápida de heridas*. Se ha observado que la exposición prolongada a la luz de un láser de baja potencia como el de helio-neón o el de argón puede ayudar a la cicatrización y endurecimiento de heridas ulcerosas pequeñas. La desventaja de este tratamiento es que es muy largo, con muchas sesiones de varias horas de exposición al láser. El mecanismo que ayuda a la cicatrización no ha sido todavía comprendido, ni este uso se ha difundido mucho.

2.7.2 Algunas Causas de Riesgo en el Uso de los Láseres

Los láseres representan peligrosidad y pueden afectar la salud del hombre por diversas causas. Éstas dependen del tipo del láser, y pueden ser:

1. Por emplear fuentes de alta tensión.
2. Por emitir radiación óptica de alta direccionalidad.
3. Por emitir radiación óptica de alta potencia y energía.
4. Por emplear sustancias tóxicas, asfixiantes, cancerígenas, etc.
5. Por producir radiación ionizante (en algunos casos).
6. Por producir la radiación óptica efectos biológicos diversos.
7. Por tener elementos al vacío o bajo alta presión.

Un láser, en dependencia de su principio de funcionamiento y sus parámetros de trabajo, puede no presentar peligrosidad o presentar peligrosidad por una o más causas. En algunos casos el efecto no se manifiesta en un accidente, si no por acumulación, por ejemplo, de dosis de radiación.

Los accidentes más probables, producto del trabajo con láser, son los siguientes:

1. Daño a la retina por inducir radiación láser en ella.
2. Quemaduras al incidir radiación láser de alta potencia a la superficie del cuerpo.
3. Choques eléctricos.
4. Incendios eléctricos.
5. Incendios por inflamación de sustancias combustibles al incidir en ellas radiación laser de alta potencia.
6. Inhalación de gases o vapores nocivos a la salud.
7. Contacto con sustancias nocivas a la salud.

2.7.3 Clasificación de los Productos Láser de Acuerdo a la Peligrosidad de su Radiación

Los productos láser, que comprenden a los propios láseres y a equipos contruidos con ellos, se dividen, de acuerdo a la peligrosidad de su radiación, en las siguientes clases.

Clase 1: No peligrosos. La irradiación de ellos no provoca daño o, por su diseño, no permiten que en ninguna condición la irradiación pueda ser dañina.

Clase 2: Poco peligrosos. Emiten en la zona del espectro visible definido por el intervalo de 0.4 a 0.7 μm . Pueden causar daño a la retina, pero la respuesta defensiva de la persona y el parpadeo reflejo lo evitan.

Clase 3: Peligrosos. La visión directa del haz es siempre peligrosa.

Clase 4: Muy peligrosos. La radiación directa de la piel produce daño. La reflexión difusa de sus haces puede ser también peligrosa.

2.7.4 Prevención de Accidentes de la Vista

- a) No exponer la vista a los haces directos de los láseres.
- b) Las instalaciones experimentales deben ser tales que los haces se propaguen en un plano horizontal que diste al menos 60-90 cm del plano horizontal definido por la estructura media del personal que la atiende.
- c) Se deben emplear anteojos de protección. Estos espejuelos constituyen un filtro óptico que atenúa fuertemente la radiación del láser que se emplea.

La elección del vidrio o plástico que se vaya a emplear depende de su transmitancia espectral y su atenuación. Por regla general, los anteojos de protección se venden con la especificación del láser para el cual están diseñados. La exposición que brindan los lentes, siempre se debe evitar la exposición directa a la radiación láser.

- d) Los locales deben estar profundamente iluminados para que las pupilas se mantengan lo más cerradas posibles y disminuir el flujo luminoso láser que llega a la retina.

2.7.5 Prevención de Quemaduras de la Piel por la Acción del Láser.

- a) Tener mucho cuidado al trabajar con sistemas ópticos e instalaciones que empleen radiación no visible, pues como lo haces no pueden visualizarse es muy grande la probabilidad de que por error o descuido incida radiación láser sobre el cuerpo.
- b) Al irradiar pacientes con láser de alta potencia, deben emplearse paños u otros elementos no transparentes y no combustibles para cubrir los tejidos que no se desea irradiar.
- c) Los instrumentos y otros elementos sobre los cuales pueda incidir casualmente radiación láser no deben poseer superficies que produzcan reflexiones. Deben ser rugosos y de color negro o mate para que reflejen poca luz y la reflexión sea difusa.

2.7.6 Cirugía Solar

La simplicidad y el bajo coste potencial de una unidad de cirugía solar ofrecen una alternativa a la cirugía láser, se ha propuesto el uso de la luz solar altamente concentrada, aunque su mayor efectividad está restringido a los lugares de alta radiación solar.

Feuermann y Gordon (2001) [21] analizaron las lentes de barra de índice de gradiente (gradient-index rod lenses) como imágenes de elementos ópticos, pero su capacidad como concentradores de flujo no ha sido explorado. Tanto los métodos analíticos como las simulaciones de trazado de rayos fueron utilizados para una evaluación completa de la concentración y la eficacia de estas barras. Se predijo que podrían ser muy adecuadas como concentradores para el extremo distal de las unidades quirúrgicas de fibra óptica láser, hacia la mejora de la eficacia quirúrgica y la reducción del empleo del láser caro.

Gordon et al. [22-24] informó de la realización y la experiencia de campo experimental de un concentrador de mini plato, el cual consiste de un espejo parabólico de 200 mm de diámetro y 120 mm de longitud focal que concentra la radiación solar sobre una fibra óptica de 1 mm de diámetro y 20 metros de longitud, que proporcionó varios watts de luz solar concentrada con niveles de flujo superiores a 10^4 veces la de la irradiación solar normal.

Para la aplicación particular de cirugía solar, concentradores de segunda etapa dieléctricos se han diseñado y puntas de fibra fueron esculpidas para impulsar la concentración de flujo en un factor de 2 a 4, para la extracción de la luz en el aire y el tejido, respectivamente.

Los hallazgos impulsan la viabilidad de la eficiente y completa disociación de la recogida y de la entrega remota de la radiación solar altamente concentrada. Se indicó que las transformaciones de tejidos quirúrgicos que normalmente se producen con láseres, se demostraron experimentalmente con luz solar altamente concentrada.

Los resultados experimentales se presentaron para demostrar que la luz solar altamente concentrada puede producir pragmáticamente en la misma medida, la tasa y tipo de foto daño tisular térmico normalmente generado con la cirugía de fibra óptica láser.

Los resultados experimentales demostraron que la cirugía solar puede producir lesiones de hasta varios centímetros cúbicos, con una eficacia quirúrgica tan buena como la de los láseres para procedimientos correspondientes. Se hizo hincapié en que la cirugía solar podría ofrecer una alternativa económica a los láseres quirúrgicos, aunque con limitaciones en lugares viables y períodos de funcionamiento [22-24].

2.8 Grafeno, oxido de grafeno y fibra óptica y energía solar

El grafeno ha atraído un gran interés por sus excelentes propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas y ópticas. Puede ser producido por exfoliación micro-mecánica de grafito pirolítico altamente ordenada, el crecimiento epitaxial, la deposición química de vapor, y la reducción de óxido de grafeno (OG). Los primeros tres métodos pueden producir grafeno con una estructura relativamente perfecta y excelentes propiedades, mientras que en comparación, el OG tiene dos características importantes: (1) puede ser producido utilizando grafito de bajo costo como materia prima por métodos químicos rentables con un alto rendimiento, y (2) es muy hidrófilo y puede formar coloides acuosas estables para facilitar el montaje de las estructuras macroscópicas por procedimientos en solución simples y económicos, los cuales son importantes para la gran escala utiliza de grafeno. Un tema clave en la investigación y las aplicaciones de OG es la reducción, que restaura parcialmente la estructura y las propiedades del grafeno. Procesos de reducción diferentes dan lugar a diferentes propiedades de reducción de óxido de grafeno (GO), que a su vez afecta al rendimiento final de materiales o dispositivos compuestos por óxido de grafeno reducido (rGO).

En contraste con los métodos antiguos, la reducción de OG es un método de bajo costo para preparar materiales basados en el grafeno en la producción de la cantidad a granel, ya que el OG está disponible comercialmente.

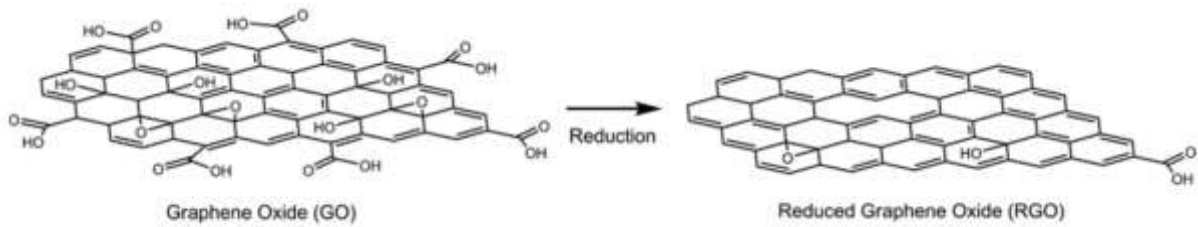


Fig. 2.17 Estructura molecular del óxido de grafeno y el óxido de grafeno reducido

En la actualidad, la reducción del GO se lleva a cabo principalmente por química y los medios de reducción térmica. Sin embargo, el reductor tóxico hidrazina es utilizado frecuentemente en procedimientos de reducción química. Por otro lado, el tratamiento a alta temperatura en el curso de la reducción térmica no es adecuado para la electrónica de plástico y puede implicar posibles peligros.

En comparación, la fotorreducción de OG por irradiación con luz ultravioleta o visible puede realizarse como un método "verde", que atrae cada vez más la atención como una ruta alternativa para producir rGO.

Un método consiste en la fotorreducción auto controlada de películas delgadas de OG para preparar estructura de bicapa OG/ROG mediante el uso de la luz solar como fuente de irradiación como lo realizaron Dong-Dong Han y Yong-Lai Zhang en [41]. Al realizar el experimento observaron que la penetración de la luz solar y la relajación térmica subsiguiente fueron significativamente suprimidas después de formar una capa de RGO expandida, la fotorreducción sólo se produjo en la capa superficial de la hoja de GO. De esta manera, una estructura única (bicapa GO/RGO) se preparó con éxito de una manera auto-controlado.

La figura 2.18 muestra la ilustración esquemática del sistema de fabricación para la preparación de películas de doble capa GO/RGO, las cuales se secaron al aire a temperatura ambiente. La fotorreducción controlada del GO se llevó a cabo utilizando la irradiación de luz solar concentrada. Un cubreobjetos de cuarzo fue firmemente presionado sobre la superficie de un pedazo de papel de GO para aislarlo del oxígeno ambiental. Entonces la radiación solar incidente se focalizó sobre la superficie de papel de GO utilizando una lente convexa de 60 mm de diámetro (longitud focal = 15 cm, diámetro del punto enfocado = 1 mm). La fotorreducción de la película de GO ocurrió tan pronto como la luz del sol concentrada se focalizó sobre el papel de GO.

Dado que la solución GO como preparado demuestra una fuerte absorción en la región UV, la luz ultravioleta de la radiación solar puede ser esencial para la reducción de GO.

Después de los tratamientos de luz solar concentrada, el color del papel GO resultante presentó un color negro con un brillo metálico, lo que indica la reducción exhaustiva de GO (Fig 2.18 b). Sin embargo, cuando se observó el reverso del papel RGO, todavía seguía siendo de color marrón oscuro, que revela la diferencia en el grado de reducción (Fig 2.18 c).

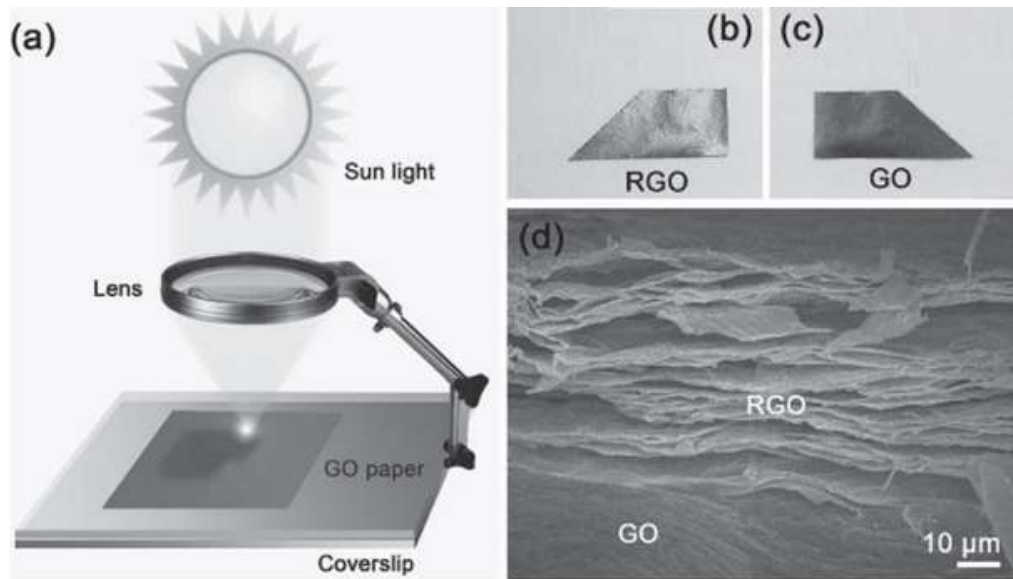


Fig. 2.18 Ilustración esquemática del sistema de fabricación para la preparación de películas de doble capa GO/RGO

Esta posibilidad de eludir o complementar los métodos litográficos clásicos hace que a la foto-reducción de OG muy atractiva para aplicaciones en microelectrónica.

Capítulo 3

Desarrollo

El cauterizador desarrollado consta de una estructura electromecánica que automáticamente sigue al sol y orienta en todo momento a una lente de Fresnel en posición perpendicular a los rayos solares, posteriormente mediante un algoritmo de alta precisión, la energía es focalizada en un punto único en todo momento y sin importar la posición del sol durante el transcurso del día o de los meses, para finalmente transmitir dicha energía hasta la punta de un sistema capaz de cauterizar utilizando la energía del sol.

El sistema está conformado básicamente de siete partes principales: Concentrador solar, Estructura mecánica, sensores y actuadores, código e interface de control, caja de circuitos electrónicos, sistema de transmisión de luz solar y sistema de cauterización.

3.1 Concentrador y Estructura mecánica

Para concentrar la radiación electromagnética proveniente del sol se empleó una lente Fresnel, debido a que sus adecuadas características como peso ligero, tamaño pequeño y buen rendimiento óptico, la hacen especial en el campo de concentración de luz, ya que el principio básico de la lente de Fresnel es eliminar el material óptico innecesaria tanto como sea posible mientras se mantiene la curvatura de la superficie. Además de que las de lentes de Fresnel constituyen una parte esencial en la concentración de sistemas de energía solar que convierten la energía luminosa en energía eléctrica o térmica con una excelente eficiencia [34]. La lente utilizada se muestra en la figura (3.1).



Fig. 3.1 Lente de Fresnel empleada para coleccionar y concentrar la luz solar, montada sobre el seguidor

La lente de Fresnel necesita de un medio de soporte que le permita concentrar la radiación solar a la distancia adecuada. Por ello se diseñó y construyó una estructura metálica que cumpliera con estos requerimientos. Además, debido al movimiento de rotación y traslación de la tierra, el sol es observado en una posición que cambia conforme transcurre el tiempo. Por tal motivo, la estructura de soporte del concentrador solar se diseñó utilizando dos motores de c.c. logrando de esta forma un sistema electromecánico de seguimiento solar de dos ejes, al cual se le soldaron cuatro llantas para su fácil desplazamiento (fig. 3.2).

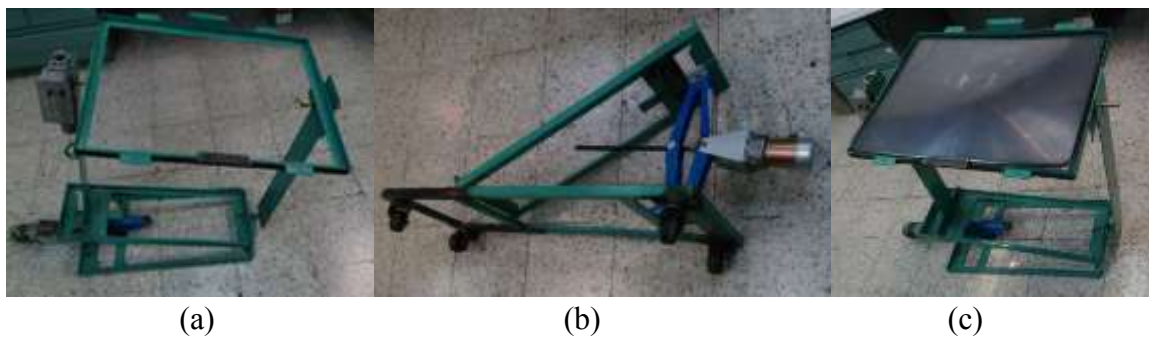


Fig. 3.2 Seguidor solar, (a) Estructura metálica, (b) Base mostrando las cuatro ruedas y un motor de c.d. para mover un de los ejes del motor, (c) Seguidor solar con el Lente de Fresnel montado sobre él.

Debido a las altas temperaturas alcanzadas por la radiación solar concentrada, el cauterizador requiere un sistema de control de la radiación solar concentrada que será útil tanto en la etapa de pruebas como en la de aplicación final. El sistema empleado fue un mecanismo de persianas, el cual se colocó en la parte superior del seguidor solar. Las persianas son accionadas por un pequeño motor de c.d. para regular la cantidad de radiación solar concentrada por el lente de Fresnel (fig. 3.3) y que posteriormente será concentrada sobre una única superficie determinada.

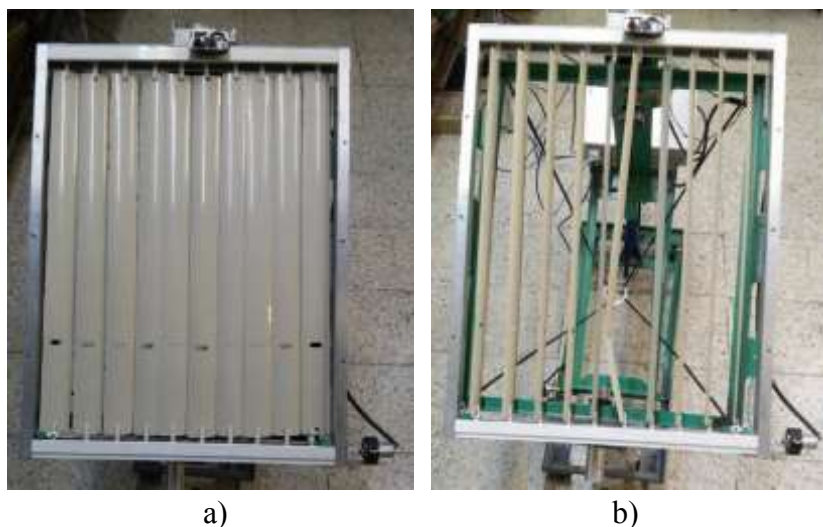


Fig. 3.3 Sistema de persianas para regular la radiación solar que incide sobre el lente de Fresnel, a) Persianas totalmente cerradas, b) Persianas totalmente abiertas

Para transportar la radiación solar concentrada hasta el punto de aplicación se empleó una fibra óptica bifurcada de vidrio (vidrio de borosilicato), la cual requiere de un medio de soporte que le permita operar conjuntamente con el seguidor solar mientras este está en movimiento, es por ello que se diseñó un mecanismo para el acople de la guía óptica con el seguidor solar en cualquiera de sus dos ejes de movimiento y que al mismo tiempo recolecte y transmita la energía solar concentrada.

El mecanismo de sujeción del primer extremo de la guía óptica se muestra en la figura 3.4, el cual consiste de cuatro varillas soldadas en un extremo a la estructura del seguidor, y en el otro soldadas a un anillo metálico, el cual está diseñado para servir como referencia al punto de concentración de la radiación solar, así como para sostener el extremo de la guía óptica por donde incidirá la radiación concentrada (Fig. 3.4).

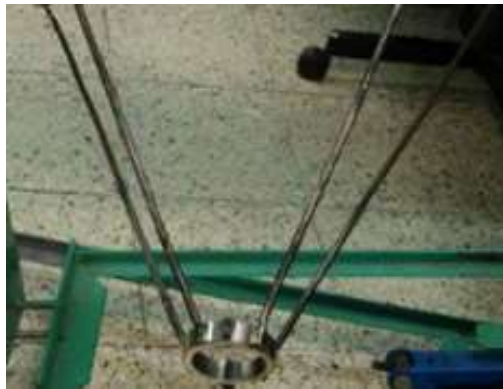


Fig. 3.4 Varillas y anillo metálico de sujeción de uno de los extremos de la guía óptica

En medio del anillo metálico se colocó un sujetador de aluminio para sostener firmemente a la fibra óptica a utilizar para el transporte de la radiación solar. (Fig. 3.5).



Fig. 3.5 Sistema de acoplamiento de la radiación solar concentrada y una fibra óptica

3.2 Sensores y actuadores

Para su operación y registro de información, el seguidor solar está equipado con sensores los cuales son una cámara web, un sensor de densidad de radiación solar, un sensor de temperatura, dos interruptores de encendido y apagado y dos codificadores de posición.

3.2.1 Cámara Web

La cámara web es el sensor principal y el más importante del seguidor solar, podría considerarse a los demás sensores como complementarios, mientras que sin la cámara web el seguimiento simplemente no se daría. Este sensor se colocó en la parte superior del seguidor y mediante un algoritmo de programación la cámara toma fotos al cielo para posteriormente enviar la información a través de un cable USB a una computadora en donde mediante una interface, la información será procesada para determinar la posición del sol con respecto al plano horizontal de la lente de Fresnel montada sobre el sistema.

La cámara empleada fue una cámara comercial Logitech C170, con una resolución de 2 megapíxeles, a la cual se le colocó un filtro polarizado color rojo, el cual protege a la cámara de

la radiación solar, cuando ésta es muy intensa. El filtro también se encontró útil para desarrollar una pre-binarización de la imagen que se va a procesar en la computadora. La cámara con y sin filtro se muestra en la figura 3.6.



Fig. 3.6 Cámara Web empleada como sensor para identificar la posición del sol

La cámara web se sujetó en la parte superior izquierda del seguidor solar, mediante una pequeña estructura de aluminio como se muestra en la figura 3.7. La cámara pudo haberse colocado también en cualquier otro extremo de la parte superior del seguidor solar.



Fig. 3.7 Cámara Web sujeta a la parte superior izquierda del seguidor solar

3.2.2 Sensor de temperatura

Para obtener la eficiencia de nuestro sistema, es necesario conocer el promedio de la densidad de energía solar que recibe el lente de Fresnel, la densidad de radiación solar concentrada en el punto focal del lente de Fresnel y la densidad de radiación solar que se obtiene al final de la fibra óptica. Para ello sería deseable un sensor de potencia, pero debido al costo que implica la

adquisición de un sensor de este tipo, se empleó un termopar tipo J, utilizado para registrar temperaturas que van desde la temperatura ambiente (25°C) hasta 760°C (figura 3.8).

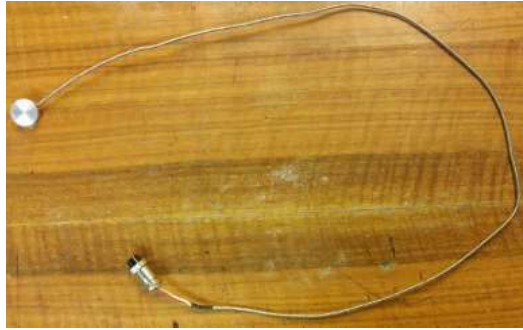


Fig.3.8 Sensor de temperatura

3.2.3 Instrumentación del Termopar tipo J

El sensor de temperatura es un termopar tipo J que cuenta con dos puntas; punta fría y punta caliente. La punta caliente es la parte expuesta al medio del cual se registrara su temperatura, mientras que las terminales de la punta fría entregan el voltaje proporcional a la temperatura obtenida a un amplificador de instrumentación. Se eligió el amplificador INA 128P por su precisión, alta ganancia, brinda un bajo nivel de offset, bajo nivel de ruido a frecuencias bajas y alto CMRR.

La temperatura del termopar es calculada restando la temperatura de la punta fría (a temperatura ambiente) a la de la punta caliente, por lo que para compensar la resta de temperatura de la punta fría, se utilizó el sensor de temperatura LM35 con una sensibilidad de $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$.

Para calcular la ganancia del amplificador de la señal proveniente del termopar, se tomó en cuenta que el microcontrolador cuenta con convertidores analógico-digitales de 10 bits, y un rango de entrada de 0V a $+5\text{V}$. La sensibilidad del termopar se tomó de $55.5\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ a la temperatura de 500°C . A la señal se le dio una ganancia de voltaje de 152.53 proporcionada por el amplificador operacional, empleando una resistencia de ganancia de 330Ω .

Las señales analógicas de ambos sensores fueron enviadas por separado a dos convertidores analógico-digitales del micro-controlador en donde se realizaron las operaciones pertinentes para la obtención de la temperatura real a la cual se expone la punta caliente del termopar.

La ecuación para calcular la temperatura en el termopar fue la siguiente [35].

$$T = ((-0.0488683) + 19873.145VT + (-218614.54)VT^2 + 11569199.8VT^3 + (-264917531)VT^4 + 2018441314VT^5)$$

Con ambas señales el termopar podrá registrar temperaturas correctamente en el rango de la temperatura ambiente hasta 570°C. El diagrama electrónico de la instrumentación del sensor de temperatura se muestra en la figura 3.9.

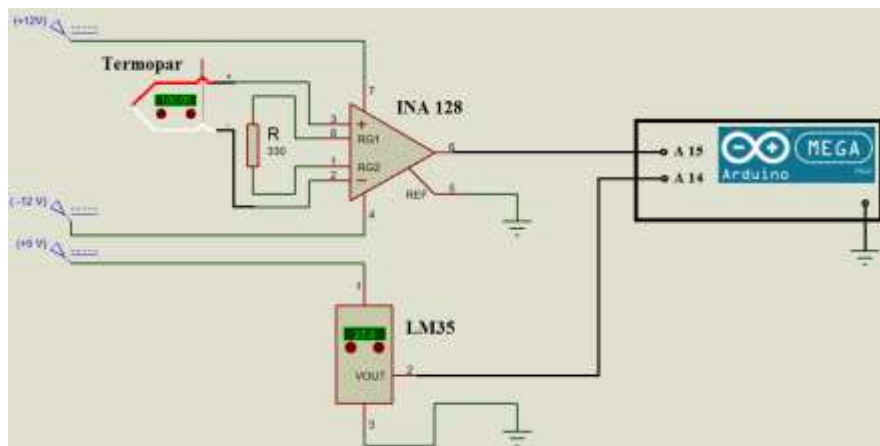


Fig. 3.9 Instrumentación del sensor de temperatura

3.2.4 Sensor de Radiación solar

La densidad de radiación solar que incide sobre la lente de Fresnel es la proporcionada por el sol en cada instante en que la lente está expuesta a ella, evidentemente esta radiación varía en función del tiempo y de las condiciones climatológicas. Por tal motivo es necesario conocer la cantidad de radiación que incide sobre la lente de Fresnel para obtener conclusiones y predicciones sobre la cantidad de radiación solar concentrada que se obtendrá en el punto focal de la lente, así como en el extremo emisor de la fibra óptica.

Se utilizó un sensor de medición de densidad de radiación solar (sin concentrar), el cual utiliza un fotodiodo detector que crea una tensión de salida proporcional a la radiación incidente sobre él a razón de 400-100 nm y sensibilidad de 10 µV/W/m². Esta señal recibió una ganancia de voltaje con un amplificador de instrumentación y posteriormente fue enviada al convertidor analógico-digital del micro-controlador para su procesamiento.



Fig. 3.10 Sensor de densidad de radiación solar sin concentrar

3.2.5 Interruptores de encendido y apagado

Para regular la radiación térmica que llega hasta el punto de aplicación del cauterizador, sobre el lente de Fresnel se colocó un sistema de persianas accionadas por un motor de c.d. Dicho sistema abre y cierra dependiendo de los requerimientos energéticos del usuario. Sin embargo las persianas tienen un punto máximo de apertura, así como un punto mínimo de cerrado, en el cual el motor que las acciona debe detenerse, pues de lo contrario podría dañar al sistema.

Para indicar cuando las persianas han llegado a cualquiera de estos dos puntos máximo o mínimo, se colocaron dos interruptores de encendido y apagado. El primer interruptor detecta cuando las persianas han llegado a su punto máximo de cerrado y en este caso envía una señal al pin digital 53 del microcontrolador (Arduino Mega 2556) indicando que el motor ya no debe girar más en ese sentido. El segundo interruptor detecta cuando las persianas han llegado a su punto máximo de apertura y envían una señal al pin digital 52 del microcontrolador indicando que el motor ya no debe girar más en ese sentido.

En la figura 3.11 se muestran los interruptores 1 y 2 conectados a los pines digitales 53 y 52 del microcontrolador respectivamente. Ambos interruptores están alimentados con 5 volts, y cuentan con respectivas resistencias de 10 k Ω de pull down para evitar que los pines de entrada no queden en estado flotante.

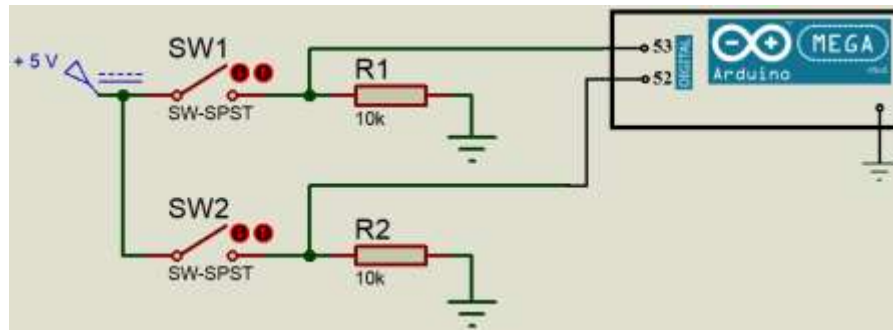


Fig. 3.11 Diagrama de conexión de los interruptores con el microcontrolador para indicar los puntos máximos de apertura y cierre del control de radiación térmica

3.2.6 Codificadores de movimiento

Los Encoders (Codificadores de movimiento) son sensores que generan señales digitales en respuesta al movimiento. Están disponibles en dos tipos, uno que responde a la rotación, y el otro al movimiento lineal. Estos pueden ser utilizados para medir movimientos lineales, velocidad y posición. Los encoders están disponibles con diferentes tipos de salidas, unos de ellos son los Encoders Incrementales, que generan pulsos mientras se mueven, se utilizan para medir la velocidad, o la trayectoria de posición. El otro tipo son los Encoders Absolutos que generan multi-bits digitales, que indican directamente su posición actual. Los encoders pueden ser utilizados en una gran variedad de aplicaciones. Actúan como transductores de retroalimentación para el control de la velocidad en motores, como sensores para medición, de corte y de posición. También como entrada para velocidad y controles de rango.

Sobre el seguidor se instalaron dos codificadores abosolutos, uno para indicar la posición y movimientos del seguidor cuando rota siguiendo la trayectoria del sol de este a oeste, y el segundo para seguir los cambios de la posición del sol en el cielo conforme transcurren las estaciones del año. Los encoders utilizados se muestran en la figura 3.12.

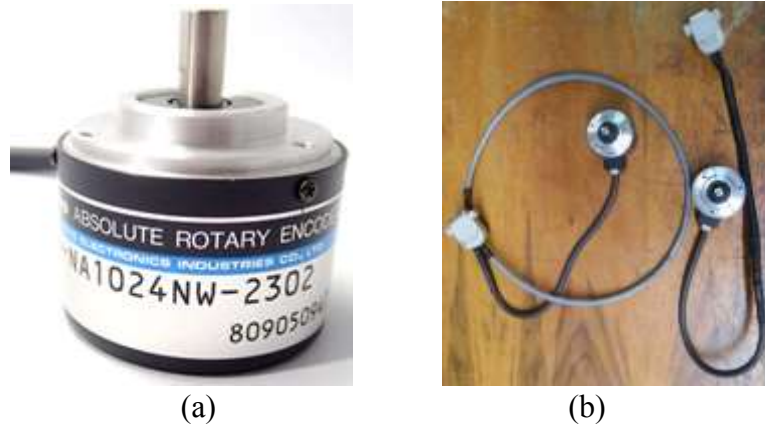


Fig. 3.12 (a) Encoder utilizada para detectar los movimientos de rotación del seguidor solar, (b) Encoders con conectores, para enviar la información digital a la caja de circuitos eléctricos.

Para este proyecto se utilizaron dos encoders giratorios absolutos TRD-NA 1024 NW-2302 de la marca KOYO, estos encoders fueron alimentados con 12 V, tienen una resolución de 10 bits y cada salida es del tipo NPN. La salida NPN se muestra en el circuito eléctrico de la figura 3.13.

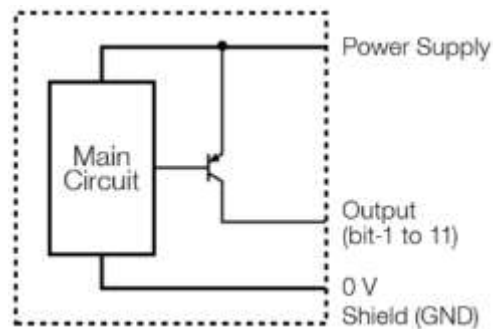


Fig. 3.13 Diagrama de salida NPN correspondiente a una de las diez salidas digitales para los bits del 1 al 10 del encoder, de las cuales todas tiene la misma configuración.

En la tabla 3.1 se muestran las entradas y salidas de voltaje de los tipos de encoders. En donde los números en paréntesis indican el bit al que corresponde cada pin.

Tabla 3.1 Tabla de entra entradas y salidas para cada Pin del Encoder

| Color of core cable | Connector pin number | 1024 Resolution |
|---------------------|----------------------|------------------|
| Blue | 1 | 0V |
| Brown | 2 | +12 / 24V |
| Black | 3 | bit 1 (2^0) |
| Red | 4 | bit 2 (2^1) |
| Orange | 5 | bit 3 (2^2) |
| Yellow | 6 | bit 4 (2^3) |
| Green | 7 | bit 5 (2^4) |
| Purple | 8 | bit 6 (2^5) |
| Gray | 9 | bit 7 (2^6) |
| White | 10 | bit 8 (2^7) |
| Black / White | 11 | bit 9 (2^8) |
| Red / White | 12 | bit 10 (2^9) |
| Shield | - | GND |

MSB

Debido a que cada salida del encoder (transistor NPN) es de bajo voltaje, se requiere conectar resistencias adicionales de 2.2 K Ω a cada salida, para ajustar las señales a una lógica de 5V y posteriormente enviar la salida a los pines digitales del Microcontrolador como se muestra en la figura 3.14 para los dos encoders.

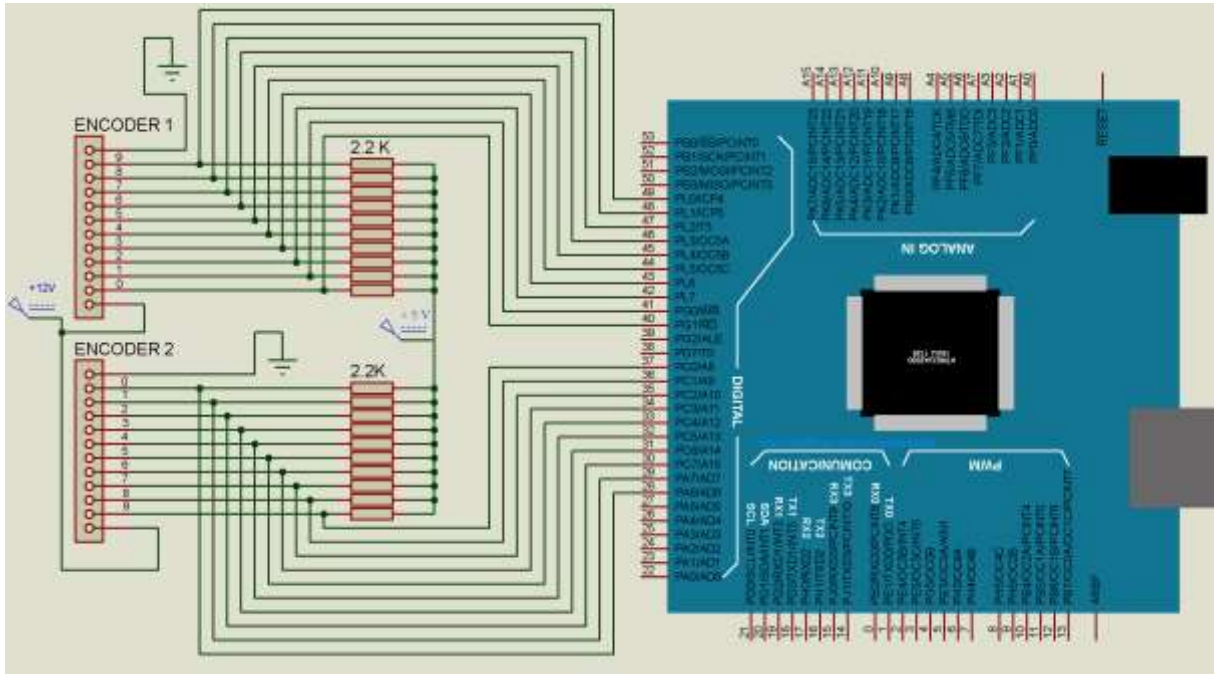


Fig. 3.14 Diagrama de conexión de los dos encoders al microcontrolador Arduino con sus respectivas resistencias de ajuste de lógica a 5V y fuente de alimentación a 12 V.

3.2.7 Actuadores

Para llevar a cabo el movimiento del seguidor solar en sus dos ejes de movimiento, así como el movimiento de las persianas en el control de temperatura, se emplearon tres motores de C.C. los cuales fueron alimentados con 12 V.

El motor 1 es el motor que permite el movimiento de elevación del seguidor solar, el motor 2 es el que permite el movimiento de este a oeste y el motor 3 es el motor empleado para el control de las persianas que controlan la temperatura (Fig. 3.15).

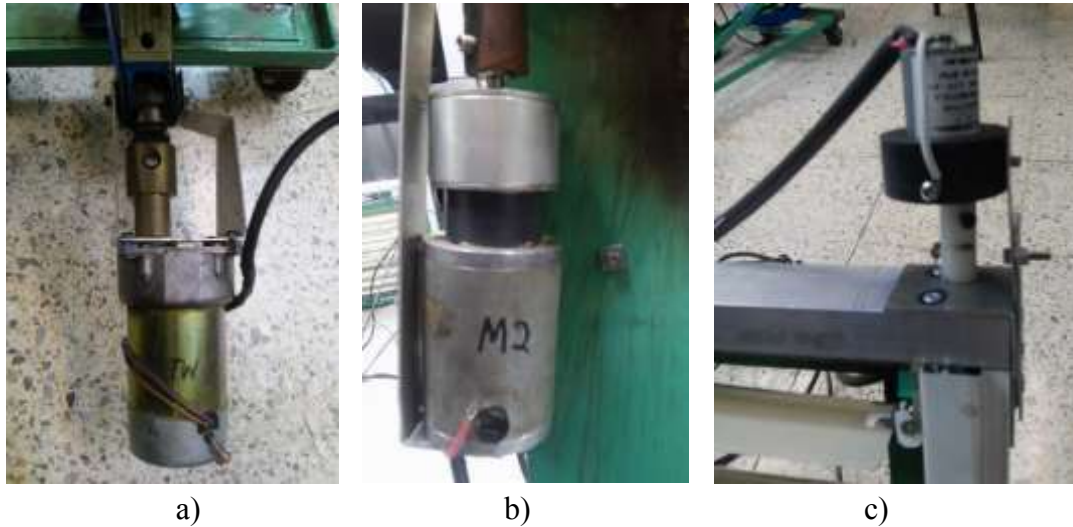


Fig. 3.15 Motores empleados en el seguidor solar a) Motor 1, b) Motor 2, c) Motor 3.

Los motores requieren girar en un sentido o en otro, dependiendo de la exigencia del sistema, por lo que para invertir su giro automáticamente, se requirió de un puente H para cada uno de estos. El puente H seleccionado fue el L6203. En la figura 3.16 se muestra el diagrama del circuito eléctrico de los tres puentes H alimentados a una misma fuente de alimentación de 12 V en donde se muestra que cada puente H tiene dos bloques de conexiones J y M en donde J corresponde a las terminales que reciben las señales IN1, IN2 y ENABLE provenientes del microcontrolador y M corresponde a las terminales de salida del puente H que alimentan a cada uno de los motores. En la figura 3.16, se muestra el diagrama del circuito electrónico de control de los tres motores.

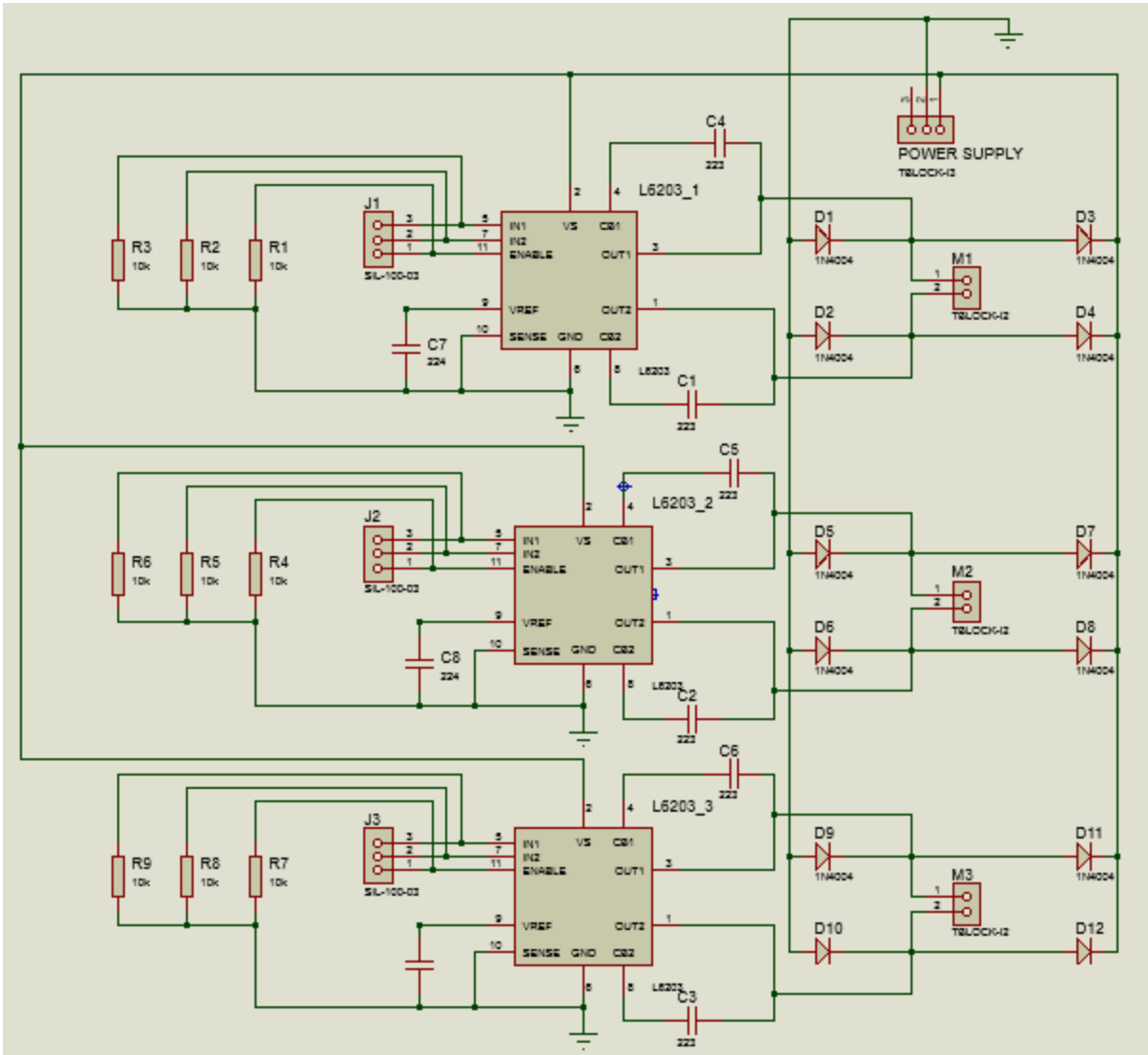


Fig. 3.16 Diagrama electrónico de conexión de los tres puentes H usados para el control del movimiento del seguidor solar

3.3 Descripción del código e interface de control

3.3.1 Funcionamiento

Para localizar la posición del sol y llevar a cabo su seguimiento, se desarrolló un algoritmo de ciclo cerrado, utilizando el software Matlab. Una vez que se inicializa la interface de control y se presiona el botón de inicio, comienza el funcionamiento del programa. En la figura 3.16 se muestra la interface de control con todos sus componentes, antes de que se inicie el programa.

Para la visualización indirecta de la posición del sol con respecto al plano del lente de Fresnel, se empleó la siguiente interface gráfica, que igualmente es resultado del algoritmo programado, además en ella despliegan los valores de la energía registrada por el sensor de energía, así como la posición del seguidor solar, registrada por los dos encoders. En la gráfica también se muestran diferentes botoneras para la operación y control de las diversas funciones tanto de la interface, como del seguidor solar (figura 3.17).

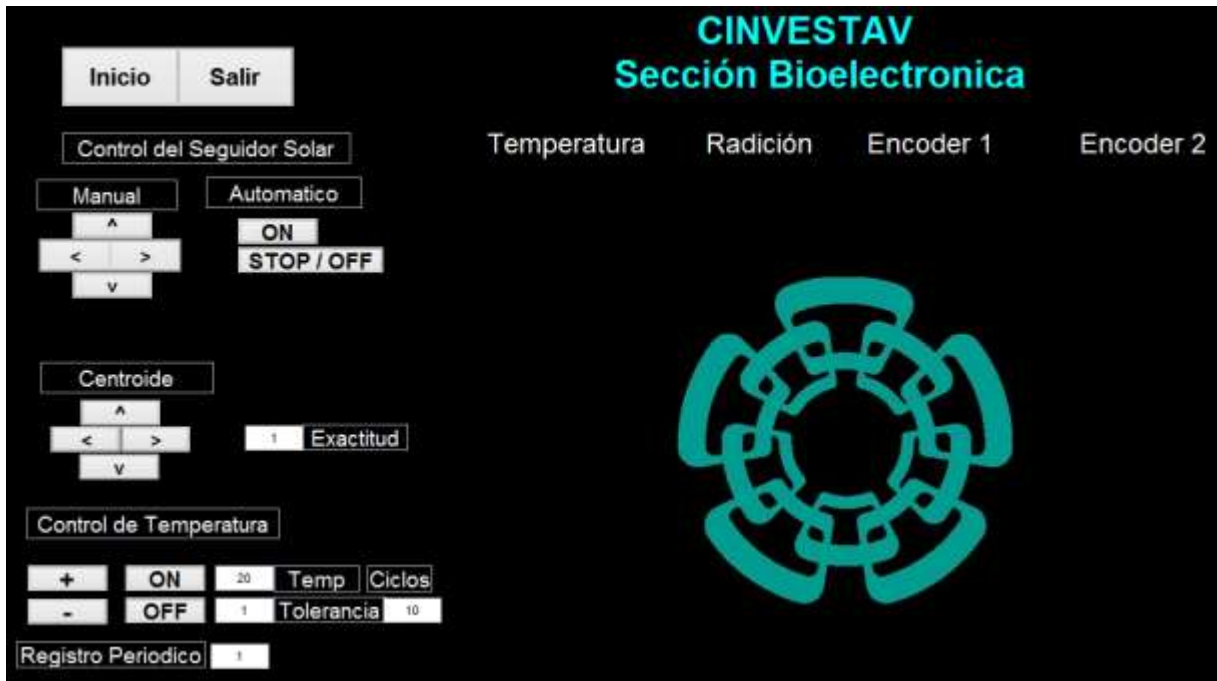


Fig. 3.17 Interface gráfica sin ejecución del programa de control del seguidor solar, con el botón de inicio en la parte superior izquierda.

Una vez presionado el botón de inicio de la interface mostrada en la figura 3.17, se ejecuta el programa que hace funcionar al seguidor solar, el cual indica a la cámara web que tome una fotografía al cielo, posteriormente dicha imagen es digitalizada y la información es enviada mediante un cable USB a una computadora portátil, una vez obtenida la imagen, se procede a convertirla a una escala de grises, después la imagen es binarizada para estar formada únicamente de ceros y unos lógicos, esta información es analizada para detectar si en la fotografía aparece la imagen del sol. En caso de ser así, se obtendrá el centroide de la imagen del sol, el cual arroja las coordenadas (x, y) de su posición en la imagen.

Al inicializarse el programa, hay dos posibles visualizaciones en la parte gráfica, las cuales dependerán de si aparece o no la imagen del sol en cada una de las fotografías tomadas por la cámara web. En caso de que la imagen del sol no aparezca en la fotografía, se visualizará la parte grafica de color gris, indicando la ausencia de alguna fuente luminosa dentro del rango de

la imagen tomada (Fig. 3.18a). En el caso de que la imagen del sol si aparezca en la imagen tomada, se distinguirán dos colores, el blanco (un 1 lógico por pixel) que representara a la imagen del sol (o alguna otra fuente luminosa) y el color negro (un 0 lógico por pixel) que representa a todo el espacio que rodea a la imagen de la fuente luminosa (Fig. 3.18b). En ambos casos se mostrará en la imagen un indicador ya sea un punto o una cruz mostrando la ubicación con la que deberá coincidir el centroide del sol para lograr focalizar los rayos solares en algún punto determinado. Al mismo tiempo el sistema recibirá datos de los demás sensores y los mostrara en pantalla en tiempo real.

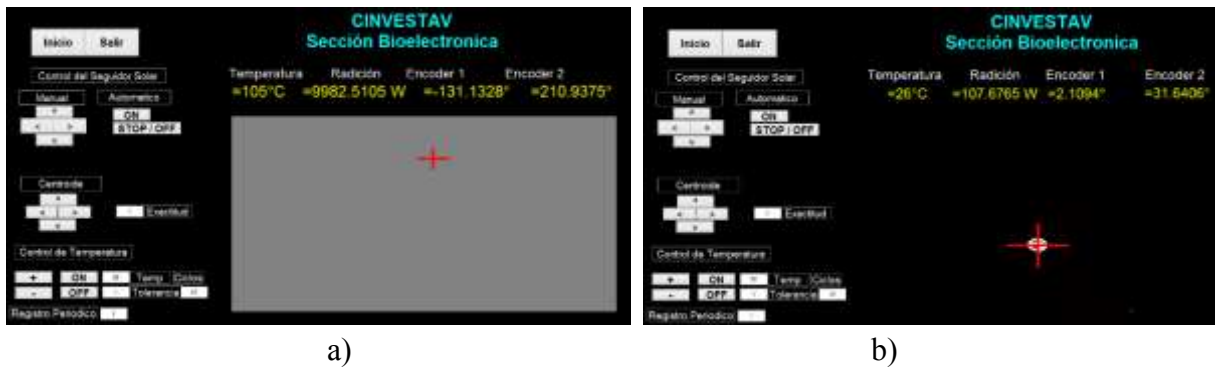


Fig. 3.18 Interface inicializada indicando a) La ausencia de una fuente luminosa, b) Cuando hay una fuente luminosa (el sol) en el rango de visión de la cámara web

Una vez que la imagen del sol (imagen de color blanco) es mostrada en la interface gráfica como una imagen binarizada, es necesario obtener el centro de simetría de la imagen del sol, esto para tener un punto de referencia de dicha imagen, el cual nos permitirá tener una alta precisión en el control del seguidor solar. El centro de simetría de la imagen del sol se conoce como Centroide, y una vez obtenido mediante procesamiento de imágenes, éste es graficado (Fig. 3.19).

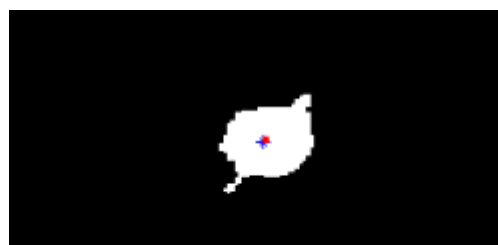


Fig. 3.19 Imagen binarizada del sol con su centroide coincidiendo con el centroide objetivo

Como se mencionó anteriormente, dentro de la imagen, se muestra un punto o una cruz para indicar el rango de posición en el que la localización del centroide de la imagen del sol es aceptable. Esto significa que cuando el centroide de la imagen del sol esté dentro del área que corresponde a ese indicador, el seguidor solar no realizará acción alguna, pero por el contrario,

cuando esté fuera del rango, el seguidor solar, mediante dos motores de corriente directa con los que cuenta, comenzará a moverse hasta que el centroide de la imagen del sol vuelva a estar dentro del área que corresponde al indicador, en cuyo caso el centroide ya no se graficará y solo se observara el indicador en el centro de la imagen del sol.(Fig. 3.20).



Fig. 3.20 Imagen binarizada del sol. a) Cuando su centroide aún no coincide con el centroide objetivo, b) Cuando su centroide ha coincidido con el rango de aceptación (centroide objetivo)

Al indicador que proporciona el área de aceptación para el centroide de la imagen del sol (Centroide objetivo), se le puede cambiar dicha área desde la interface mediante un cuadro de texto que tiene como título exactitud (Fig. 3.21), este tiene como valor inicial el número 1, que corresponde a un pixel, lo que significa que el seguidor solar en su modalidad de seguimiento automático, seguirá moviéndose hasta que las coordenadas (x, y) del centroide de la imagen del sol coincidan con las coordenadas (x, y) centroide objetivo (Fig. 3.21a). En los casos que no sea necesaria una alta precisión, se puede aumentar el tamaño del indicador(Fig. 3.21).

En la figura 3.21 se muestran tres diferentes tamaños posibles del centroide objetivo.

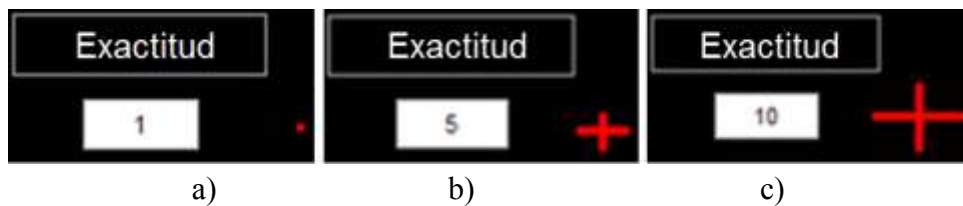


Fig. 3.21 Cuadro de texto con tres tamaños distintos para el centroide objetivo

3.3.1.1 Funcionamiento Automático

Después de iniciar el programa mediante la interface, independientemente de la ubicación del centroide del sol con respecto al indicador, el seguidor solar no realizará movimiento alguno, esto debido a que en este punto el seguimiento automático esta desactivado, por lo que para activarlo hay que presionar el botón de encendido del control automático, y de la misma forma para desactivarlo, se presiona el botón de apagado (Fig. 3.22).



Fig. 3.22 Botones de encendido y apagado del posicionamiento automático del seguidor solar

Una vez activado el seguimiento automático, cuando el centroide se encuentre fuera del rango del indicador, el programa enviará una señal al micro-controlador a través del cable USB para activar, en el sentido adecuado, a los motores de C.C. correspondientes, con la finalidad de que el centroide de la imagen del sol coincida o se encuentre dentro del rango de referencia indicado por el centroide objetivo.

3.3.1.2 Funcionamiento Manual

Independientemente de que el seguimiento automático este activado o desactivado, el seguidor solar puede ser controlado manualmente, en todo momento, mediante cuatro botones digitales (Fig.3.23), los cuales están diseñados para ser utilizados cuando el sol no se encuentre dentro del rango de captura de la cámara, por lo que mediante dichos botones, el seguidor será orientado hasta que el sol aparezca en las fotografías tomadas por la cámara web, en ese instante, si el seguimiento automático está activado, el seguidor colocara automáticamente al lente de Fresnel en la posición adecuada. En caso de que el seguimiento automático este desactivado, el seguidor solar permanecerá en la posición en la que se le coloco manualmente.



Fig. 3.23 Botones de accionamiento y posicionamiento de control manual

3.3.2 Concentración de la energía en un objetivo

Una vez que el sistema sea capaz de localizar y seguir al sol, es necesario que la radiación concentrada, sea focalizada en un punto específico, y además que dicho punto pueda ser cambiado a voluntad, para ello es necesario modificar el punto de referencia (coordenadas "x"

y “y” del centroide objetivo) a coincidir con el centroide del sol, dependiendo del punto en el que se desea concentrar la radiación solar, para ello se programó la ubicación del centroide objetivo, cuya coordenada (x, y) en la interface gráfica es modificada con una serie de botoneras digitales. Dichas botoneras se muestran en la figura 3.24.

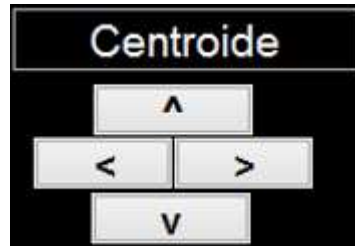


Fig. 3.24 Botones para el cambio de referencia a coincidir con el centroide de la imagen del sol, y así poder manipular el punto físico donde se concentrara la radiación solar.

3.3.3 Sensores y Actuadores

Además de utilizar la cámara web, el sistema adquiere mediante el micro-controlador, los valores de las señales de entrada de los dos interruptores, los dos encoders y el sensor de potencia, y los muestra en la interface. En la figura 3.25 se muestran los nombres de los valores que se visualizarán una vez que se inicializó el sistema. Las señales del sensor de energía, de los dos interruptores y de los dos encoders, son adquiridas como se describe en 3.2.2 a 3.2.5 respectivamente. En la figura 3.27 se muestra un diagrama esquemático de todos los sensores y actuadores utilizados, así como la dirección que toman las señales de todos los dispositivos involucrados en el funcionamiento del seguidor.



Fig. 3.25 Interface gráfica con los nombres de los valores que se visualizarán una vez que se inicializa el sistema

3.3.4 Control de temperatura

Para la aplicación de este sistema como un cauterizador, así como en alguna otra de sus posibles aplicaciones, es fundamental un control de temperatura ya sea manual o automático, dependiendo de las exigencias al momento de utilizarlo. Para el funcionamiento automático se

debe presionar el botón de encendido de este módulo (Fig.3.26), el número 20 indica la temperatura que se desea mantener durante la operación del sistema, la tolerancia mostrada con el número 1, indica que el sistema se regulara en el rango de más, menos un grado centígrado alrededor de la temperatura ingresada (20°C para este ejemplo), los ciclos indicados con el número 10, indican que el sistema se ajusta únicamente cada 10 ciclos del bucle principal del software implementado, finalmente el número 1 que corresponde al registro periódico, indica el tiempo en minutos en el que se guardaran los valores mostrados por los sensores en un archivo en Excel. Todos los valores mostrados dentro de los recuadros color blanco, son ajustables de acuerdo a los requerimientos del operario.



Fig. 3.26 Modulo de control manual y automático de temperatura

3.4 Diagrama esquemático de integración de los dispositivos electrónicos

A continuación se muestra el diagrama esquemático de la integración de todos los dispositivos electrónicos involucrados en el funcionamiento del seguidor solar.

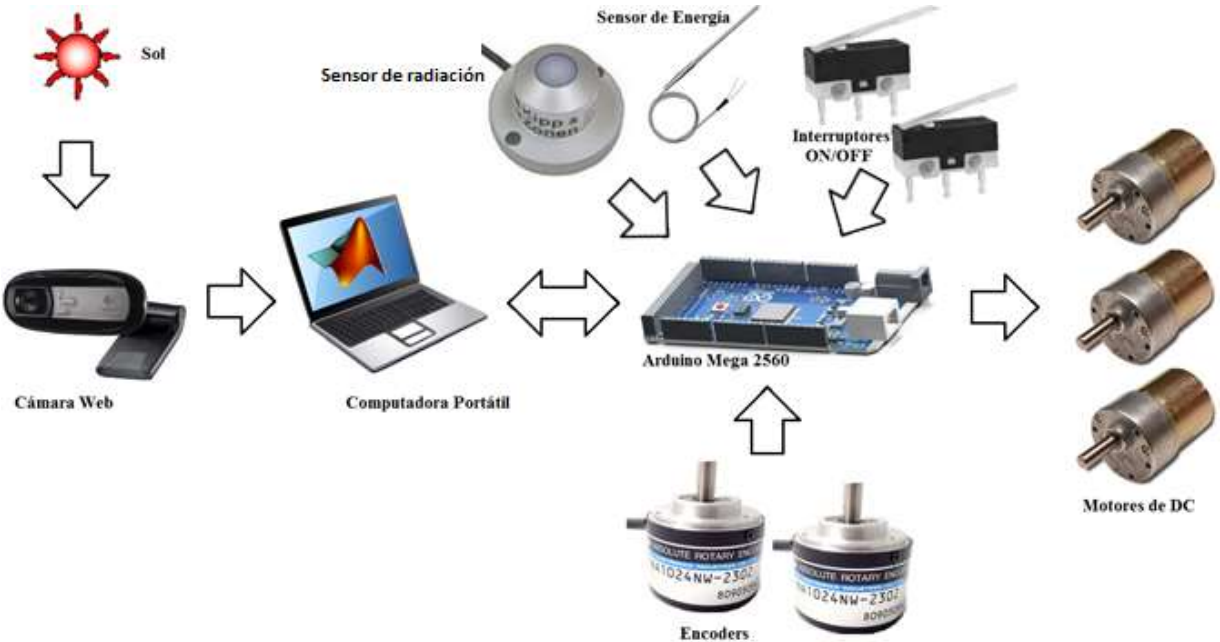


Fig. 3.27 Diagrama esquemático de la comunicación de todos los dispositivos involucrados en el funcionamiento del seguidor solar.

3.5 Caja de circuitos electrónicos

La caja de circuitos contiene en su interior las tarjetas electrónicas diseñadas para la operación del seguidor solar. Esta caja es reprogramable desde la interface de control de Matlab y contiene la fuente de voltaje para la alimentación de todos los circuitos electrónicos, sensores y actuadores requeridos para la operación del sistema (Figura 3.28).



Fig. 3.28 Vista anterior de la caja de circuitos electrónicos mostrando los conectores para los dos encoders, los dos interruptores y el termopar

En la figura 3.29 se muestra la caja de circuitos electrónicos desde su vista posterior con y sin conexiones.



Fig. 3.29 Vista posterior de la caja de conexiones para la alimentación a 120V de CA, los tres motores del seguidor (M1, M2 y M3) El cable USB del Arduino, alimentación del Arduino a 5V de CC. a) Sin conectar, b) con conexiones.

3.5.1 Fuente de alimentación

Para el suministro de energía a los componentes del seguidor solar, se utilizó una fuente de alimentación con las siguientes características:

AC INPUT: 115 V/60 HZ 6A

DC OUTPUT:

| | | |
|----------|--------|------|
| Amarillo | + 12V | 19A |
| Rojo | + 5V | 28A |
| Naranja | + 3.3V | 15A |
| Azul | - 12V | 0.8A |
| Morado | + 5VSB | 2A |

3.5.2 Tarjetas electrónicas

Toda la circuitería electrónica está integrada en tres tarjetas electrónicas de las cuales, los diagramas de circuitos electrónicos mostrados en figuras anteriores, fueron implementados en dos tarjetas electrónicas, una que contiene a los puentes H para el control de los motores, y la otra que contiene la circuitería para la adquisición de las señales procedentes de los sensores. Dichas señales fueron enviadas posteriormente a la tercera tarjeta Arduino Mega 2560 cuyas funciones se describieron en la sección 3.3.

3.6 Sistema de transmisión de luz solar

Para transmitir la radiación solar hasta su punto de aplicación se propusieron dos mecanismos de transmisión de luz solar.

El primero fue una guía óptica que consiste en una barra de acrílico transparente, esto debido a las buenas características del acrílico de transportar la luz visible con poca atenuación (el índice de refracción del acrílico se considerara de 1.49 según [32] y [33]) y asimismo debido a su bajo costo, lo cual permitió la realización de varias pruebas antes de llegar a la configuración final de la guía óptica.

La barra de acrílico seleccionada fue de una pulgada de diámetro, esto para lograr un buen acoplamiento entre la guía y la energía solar concentrada en el punto focal del lente de Fresnel (el cual tiene un diámetro no muy por debajo de una pulgada). Una de las desventajas que presenta este tipo de guía óptica, es su rigidez, por lo que la transmisión de la energía solar a través de ella en todo momento requirió de una configuración especial, la cual incluyó ciertos

dobles (como se muestra en la figura 3.30) con el fin de lograr transmitir la radiación solar a la vez que se acopla a los movimientos mecánicos del seguidor solar en todo momento.



Fig. 3.30 Barra de acrílico de prueba doblada con un ángulo de 90°

El segundo mecanismo consistió de una guía óptica, la cual aporta un manojo de fibras ópticas de vidrio Bifurcado, con apertura numérica de 0.55.

Esta fibra óptica de la marca ORIEL INSTRUMENTS Modelo 77533 [36], es un manojo de fibras ópticas, la cual a partir de una entrada produce salidas uniformemente divididas. Cuando la luz se enfoca de manera uniforme sobre la superficie de entrada de 0.55 de apertura numérica, cada pata de un haz bifurcado recibe el 43% de la energía total incidente. El cable está recubierto en acero inoxidable y soporta 107°C . Las fibras individuales tienen 0,05 mm de diámetro. Su radio de curvatura mínimo es de 50 mm para cada pierna de la guía de fibras ópticas.

Nota: Estos manojos de fibras ópticas son sensibles a los cambios de posición. El cambio de la posición del extremo común o de cualquiera de las piernas, cambiara la distribución del haz de salida y la energía. Se recomienda evitar el movimiento del paquete durante una medición.

La tabla 3.2 muestra las especificaciones de la guía óptica.

Tabla 3.2 Tabla de especificaciones de la guía óptica bifurcada

| | |
|--|--|
| Model | 77533 |
| Fiber Type | Bifurcated Fiber Bundle |
| Transmittance Range | 400 to 2000 nm |
| Core Diameter | 4.5 mm (common end), 3.2 mm (legs) μm |
| Length | 36 in. |
| Fiber Material | Borosilicate Glass |
| Acceptance Cone, 2α | 68 ° |

La figura 3.31 muestra la guía óptica bifurcada utilizada



Fig. 3.31 Guía óptica

3.7 Protección al Trabajar con Radiación Solar

Durante la operación de un sistema de seguimiento y concentración solar, se presenta una cantidad considerable de radiación solar concentrada (luz visible, radiación infrarroja y ultravioleta), capaz de incidir sobre el cuerpo de una persona que trabaje directamente con el sistema por medio del reflejo de los rayos solares ocurren durante la operación del sistema. En tales circunstancias la piel y ojos del operario sufrirán los efectos causados por dichos reflejos.

Por tal motivo, se requiere la utilización de equipo de protección que mitigue la cantidad de radiación que incidente sobre la piel y ojos del operario, tomando en consideración que dicho

equipo de protección dependerá de la cantidad de radiación solar concentrada e incidente sobre el operario.

En este trabajo el sistema de seguimiento solar no es de gran tamaño, por lo que se considera que la cantidad de radiación solar que alcance a la piel puede ser despreciable, sin embargo, tomando en consideración que los ojos son significativamente más sensibles ante la radiación solar que la piel, se decidió utilizar gafas de sol como equipo de protección al momento de realizar las pruebas con el sistema.

Las gafas seleccionadas fueron de la marca Maui Jim, las cuales cuentan con las siguientes características de protección solar:

Eliminación de reflejos (eliminación del 99% del resplandor).
Eliminación del 100% de los rayos UV dañinos.

3.8 Costo del seguidor solar

Los siguientes precios son un estimado del costo real de los componentes del seguidor solar.

| | | |
|---|---------|--|
| Estructura metálica: | \$1,500 | Total: \$14,000 pesos mexicanos |
| Lente de Fresnel: | \$2,000 | |
| Circuitería: | \$1,000 | |
| Fuente de alimentación: | \$ 300 | |
| Cables y accesorios: | \$ 200 | |
| Sensores: | \$4,000 | |
| Actuadores: | \$2,000 | |
| Fibra óptica y sistema óptico de acople | \$3,000 | |

Capítulo 4

Pruebas

En esta etapa se requirió hacer distintas pruebas en el exterior. Dichas pruebas ayudaron a evaluar el funcionamiento general del seguidor solar y su efectividad en sus posibles aplicaciones.

4.1 Seguimiento Automático del sol

Se comenzó llevando al exterior, todo el equipo necesario para la realización de las pruebas (Fig. 4.1). Antes de iniciar la prueba de concentración de energía solar, se montó y enfocó manualmente el lente de Fresnel del seguidor solar para garantizar que una vez que el sistema esté en operación, el sol se encuentre en el rango de visibilidad de la cámara web.



Fig. 4.1 Equipo y componentes principales utilizados en la realización de las pruebas, a) Gafas de sol b) Lente de Fresnel, c) Laptop y fibra óptica, d) Estructura del seguidor solar.

En seguida se conectó la caja de circuitos electrónicos a una toma de corriente eléctrica, se conectó la laptop (que contiene los archivos de ejecución del programa de la interface) a la caja de circuitos electrónicos y se ejecutó el programa para comenzar el funcionamiento del sistema.

En esta primera prueba se desea que el centroide de la imagen del sol (asterisco de color azul en medio de la imagen de color blanco), coincida con el centroide objetivo (punto de color rojo Fig. 4.2). En esta prueba tanto el centroide del sol, como el centroide objetivo son representados como cualquiera un pixel a lo largo de la imagen capturada por la web cam.

Una vez inicializado el sistema, se pudo observar la imagen del sol en la interface del programa, en la parte inferior izquierda de la interface con su centroide y su posición con respecto al centroide objetivo, así como todos los valores de los diversos sensores adquiridos adecuadamente (Fig. 4.2). El centroide objetivo inicialmente se graficó en el centro de la imagen tomada del sol (La Figura 4.2 solo muestra una parte de la imagen real). También se observó que la imagen del sol no es circular, esto debido a que en ese momento la lente de la cámara web no está totalmente perpendicular a los rayos del sol y debido también a que en ese punto algunos rayos del sol son demasiado brillantes, por lo que la imagen circular que se esperaría del sol tiende a distorsionarse.

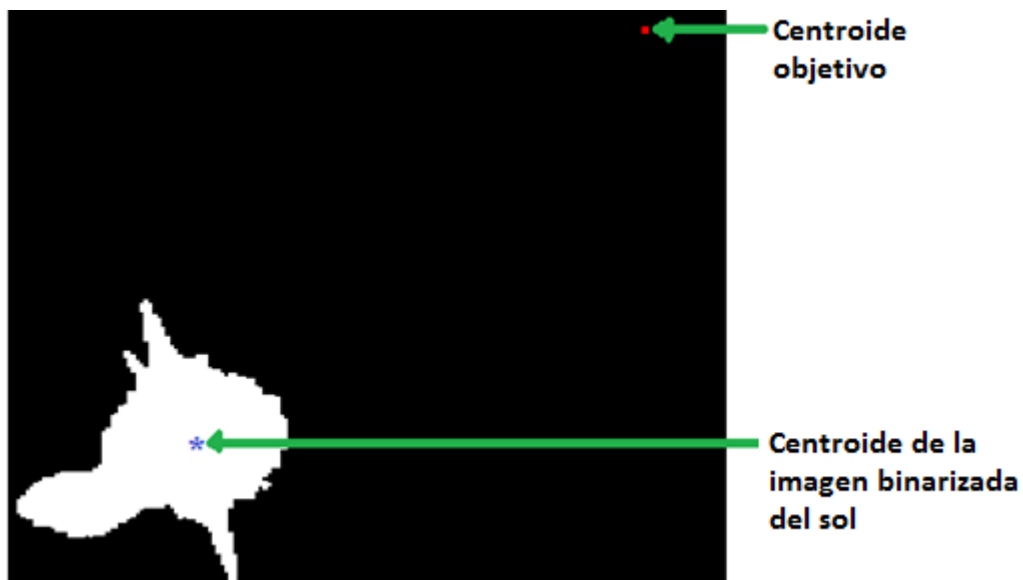


Fig. 4.2 Imagen binarizada del sol con su respectivo centroide a una distancia considerable del centroide objetivo

La imagen de la figura 4.2 fue tomada cuando no estaba activado el funcionamiento automático del seguidor solar. Cuando se activó el seguimiento automático, el centroide objetivo se encontraba en el centro de la fotografía, y el seguidor no tuvo problema alguno al momento de realizar el movimiento acimutal debido a que alcanzó la posición deseada satisfactoriamente (Fig. 4.3a), por el contrario, al realizar el movimiento de elevación (realizado por el gato hidráulico), se presentó el problema de no alcanzar la posición deseada quedando limitado el movimiento por el pequeño rango de elevación que presentó el seguidor solar (Fig. 4.3b). Sin embargo, este problema se resolvió colocando al seguidor solar en una posición adecuada, tal que los movimientos de elevación que tenga que realizar para seguir al sol, se encuentren dentro de su rango de desplazamiento de elevación.

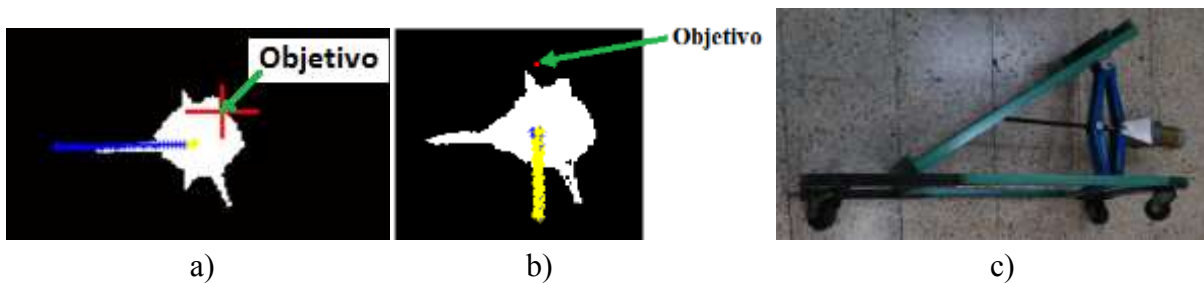


Fig. 4.3 a) Imagen binarizada del sol cuando el seguidor realiza un movimiento acimutal, b) Imagen del sol cuando el seguidor solar realiza un movimiento de elevación, c) Parte de la estructura del seguidor solar encargada de realizar el movimiento de elevación.

Una vez resuelto el problema anterior, gracias a una adecuada posición del seguidor solar, se procedió a realizar la prueba para determinar el punto sobre el cual se focalizaría la radiación colectada por el lente de Fresnel.

Esta prueba se realizó cuando el centroide objetivo estaba en la parte central de la interface gráfica. Después de iniciar el sistema y activar el seguimiento automático se observó que la radiación solar no se concentraba en el punto deseado, como se observa en la Figura 4.4 en donde la radiación solar está focalizada a unos cuantos centímetros del extremo receptor de la fibra óptica.



Fig. 4.4 Radiación solar concentrada a unos cuantos centímetros del punto deseado.

Esto se explica porque en la simetría de la lente de Fresnel, al colocarla en una posición perpendicular al sol, la radiación se concentra en la parte central del lente y a una determinada distancia de su superficie (Fig. 2.6). Este punto de concentración debería estar dentro del rango del área abarcada por el mecanismo de sujeción de la fibra óptica (Fig.3.4, 3.5 y 4.4).

Para lograr esto, una opción sería colocar la cámara web exactamente en la parte superior central del lente de Fresnel en posición perpendicular a dicho lente y mirando hacia el sol. Si bien lo último si es posible, por cuestiones prácticas, la cámara web no se colocó en la parte superior central del lente de Fresnel, si no que se colocó por encima del extremo superior izquierdo del seguidor solar, tal y como se mostró en la figura 3.7.

Si la cámara se hubiera colocado sobre el lente de Fresnel en su parte central, teóricamente el centroide objetivo debería permanecer en la parte central de la interface gráfica, sin embargo al no ocurrir esto, es claro que la posición del centroide objetivo debe de cambiar para lograr que la radiación solar se concentre exactamente en la parte central del lente, a una determinada distancia de su superficie.

Para ello se utilizaron las botoneras de la interface gráfica que permiten cambiar permanentemente la ubicación del centroide objetivo (Fig. 3.24) con la finalidad de ir ajustando la posición del centroide objetivo hasta lograr que la radiación solar se concentrara en el punto deseado (dentro del rango del área abarcada por el mecanismo de sujeción de la fibra óptica) tal y como se observa en la figura 4.5.



Fig. 4.5 Radiación solar concentrada en la parte central del lente, a una distancia de 55 cm de su superficie.

4.2 Prueba de control de temperatura.

Debido a las altas temperaturas alcanzadas en el punto de concentración del seguidor solar, se empleó el sistema de persianas mencionado en la unidad 3 (Fig. 3.3). La apertura y cierre de las persianas puede ser controlado desde la computadora oprimiendo manualmente las botoneras digitales para a su vez, controlar la cantidad de radiación y la temperatura que se obtiene en el punto de concentración de radiación solar.

Si bien, controlar manualmente la radiación y temperatura resulta muy útil, además de que gracias a los parámetros de configuración del sistema, se pueden obtener valores muy cercanos a los deseados, debido a que este sistema depende de las condiciones climatológicas, las cuales son cambiantes a lo largo del día, como puede ser en días parcialmente nublados, el ajuste manual tendría que realizarse cada vez que haya una variación que exceda los parámetros establecidos por cada aplicación.

Es por lo anterior que se implementó un control automático de temperatura, el cual será de gran utilidad en las aplicaciones que requieran de temperatura o radiación constante.

4.2.1 Pasos de la prueba

Para controlar la temperatura de una forma automática, se programó el sistema para que dependiendo de la opción deseada, este pueda ser ya sea manual o automático.

Para probar el funcionamiento automático, se llevó el seguidor solar al exterior, y se colocó en su punto de sujeción, la punta caliente del termopar tipo J (Figura 4.6).

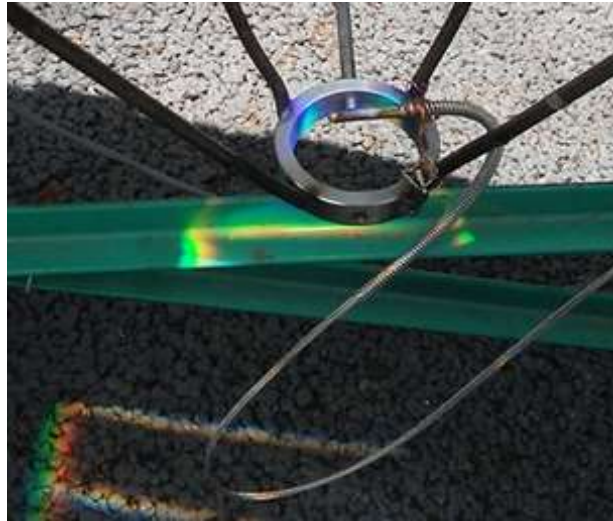


Fig. 4.6 Termopar Colocado sobre la pieza de sujeción central del seguidor solar

Posteriormente se programó al sistema para que dependiendo de la temperatura especificada, el sistema abriera o cerrara sus persianas para ajustar el valor de la temperatura proporcionada por el termopar, al sistema se le agregó un rango de tolerancia para tratar de compensar las oscilaciones de temperatura presentadas. Para verificar la efectividad del control de temperatura, se implementó en él software un sistema de registro, el cual es capaz de tomar una muestra cada determinado tiempo (en minutos) y guardarla en un archivo en Excel una vez que el control de temperatura comenzara a funcionar.

La figura 4.7 muestra los parámetros programados, en donde se especificó que el sistema se auto ajustara cada 5 ciclos del programa a 100°C , con una tolerancia de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, y que una muestra de la radiación solar (sin concentrar) y el valor de temperatura registrado en el punto de la radiación solar concentrada quedara registrada en el archivo en Excel cada minuto.



Fig. 4.7 Interface de control de temperatura manual y automático

4.3 Prueba de transporte de radiación solar

Una vez demostrada la capacidad de concentrar la radiación solar en cualquier punto deseado y teniendo la capacidad de controlar la cantidad radiación que se concentra, se procedieron a hacer las pruebas de transmisión de la radiación solar. La finalidad de esta prueba es la de comprobar la capacidad de transportar la radiación solar desde el punto de concentración debido a la lente de Fresnel, hasta cualquier otro punto deseado, limitado por las características físicas de la fibra óptica.

El extremo de la fibra óptica que recibiría la radiación solar se colocó en el centro del sujetador metálico, justo a la altura donde se concentra la radiación solar por acción del lente de Fresnel (a 55 cm de la posición del lente de fresnel). Para sostener a la fibra óptica de tal forma que siempre permaneciera en una sola posición, se empleó una camisa de aluminio la cual se colocó entre el sujetador metálico y la fibra (Fig. 4.8).



Fig. 4.8 Mecanismos de Sujeción de la fibra óptica

Con la fibra óptica sujeta y la capacidad de concentrar la radiación en un punto determinado, se procedió a realizar la prueba de hacer incidir a la radiación solar concentrada sobre el extremo receptor. Una vez sujeta la fibra óptica, se encendió el equipo, se inició el seguimiento automático, y mediante las botoneras para cambiar la posición del centroide objetivo, se fue moviendo dicho centroide hasta que la radiación solar incidiera exactamente sobre el extremo receptor de la fibra óptica tal y como se observa en la figura 4.9. En a) la imagen fue tomada directamente con la cámara y se observa que en realidad la radiación concentrada cubre un área mayor que la correspondiente a la fibra óptica, en b) la imagen fue tomada colocándole un filtro de luz a la cámara, para poder visualizar mejor como se estaba concentrado la radiación sobre la fibra óptica y se observó que la luz emitida por la radiación solar era más intensa en la parte receptora de la radiación solar.

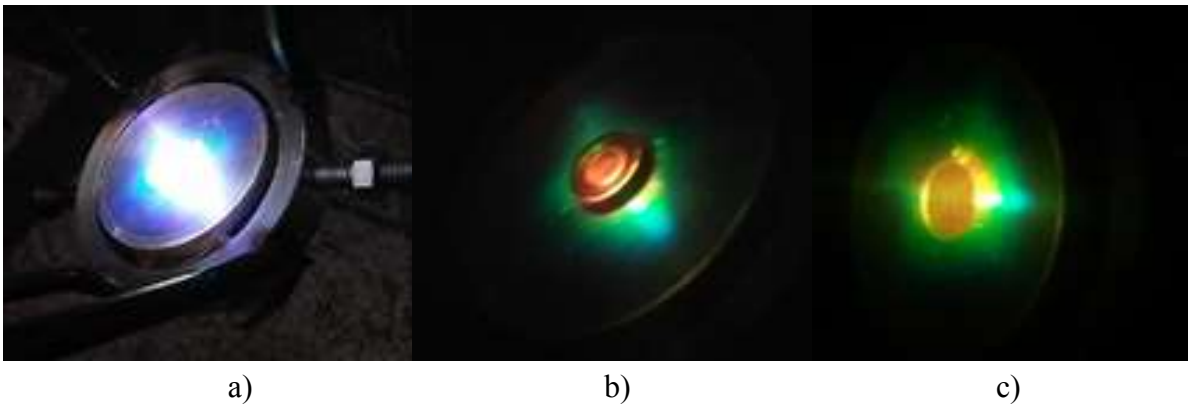


Fig. 4.9 Imagen de la radiación solar incidiendo sobre el extremo receptor de la fibra óptica, a) Imagen tomada sin filtro de luz en la cámara, b) y c) Imágenes tomadas después de colocarle un filtro de luz a la cámara en donde se observa cómo es que la mayor cantidad de radiación solar incide sobre la parte receptora de la fibra óptica.

Una vez que se logró una alta precisión en la concentración de radiación solar sobre el extremo receptor de la fibra óptica, la radiación fue transportada a través de la fibra óptica hasta el extremo bifurcado en donde se pudo observar la luz emitida por la radiación solar concentrada (Fig.4.10).

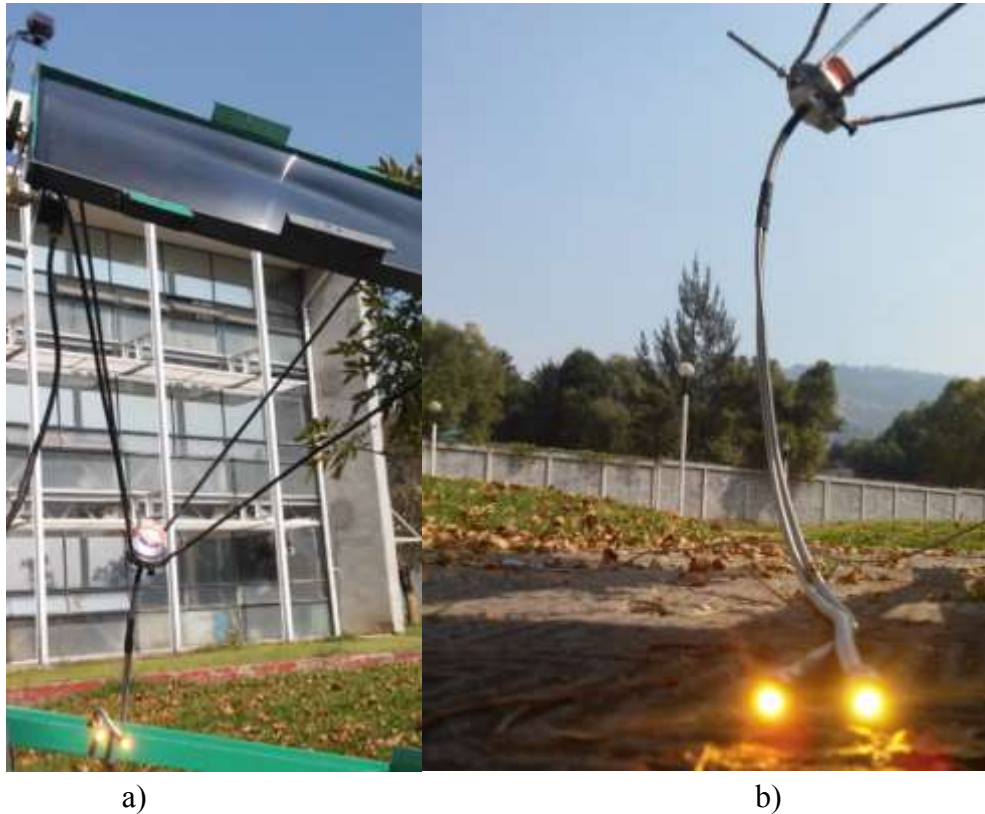


Fig. 4.10 Radiación solar concentrada por el lente de Fresnel sobre el extremo receptor de la fibra óptica y transmitida hasta su extremo bifurcado.

4.4 Pruebas de la radiación solar concentrada por la fibra óptica

Después de concentrar a la radiación solar sobre el extremo receptor de la fibra óptica (Fig. 4.9) y de poderla transmitir hasta su extremo final (Fig. 4.10), se hizo evidente que se consiguió un sistema el cual permite manipular manualmente a la radiación solar para su aplicación en un determinado punto a cualquier hora de un día soleado.

La energía obtenida a partir de uno de los extremos de la fibra óptica, se hizo incidir sobre el termopar para medir la cantidad de temperatura obtenida a partir de ella (Fig. 4.11), la temperatura máxima obtenida fue de 81°C el 12 de febrero del 2016 a las 3:38 pm, en un día soleado cuando el sensor de radiación marco 887W.



Fig. 4.11 a) Medición de temperatura de radiación solar concentrada por uno de los extremos de la fibra óptica, b) Valor de temperatura en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) alcanzada por la radiación solar y valor de radiación solar sin concentrar en W/m^2 .

Para comprobar la capacidad de daño que puede causar la radiación solar concentrada por la fibra óptica, se hizo incidir sobre algunas hojas verdes, en donde se observó que después de alrededor de 10 segundos, la superficie de la hoja expuesta a la radiación comenzaba a quemarse. En la figura 4.12 a) se observa a los dos extremos finales de la fibra óptica haciendo incidir a la radiación solar que concentran sobre una hoja, y junto de estos, se observan dos marcas de quemaduras sobre la hoja provocadas previamente por los mismos extremos de la fibra. En la figura 4.12 b) se muestra a los dos extremos de la fibra óptica emitiendo radiación y al lado izquierdo a otra hoja más pequeña con una mayor cantidad de quemaduras. Sin embargo en la figura 4.12 c) se muestra un trozo de cartón al cual se le hace incidir la radiación solar proveniente de la fibra óptica, pero en este caso no se muestra daño alguno.

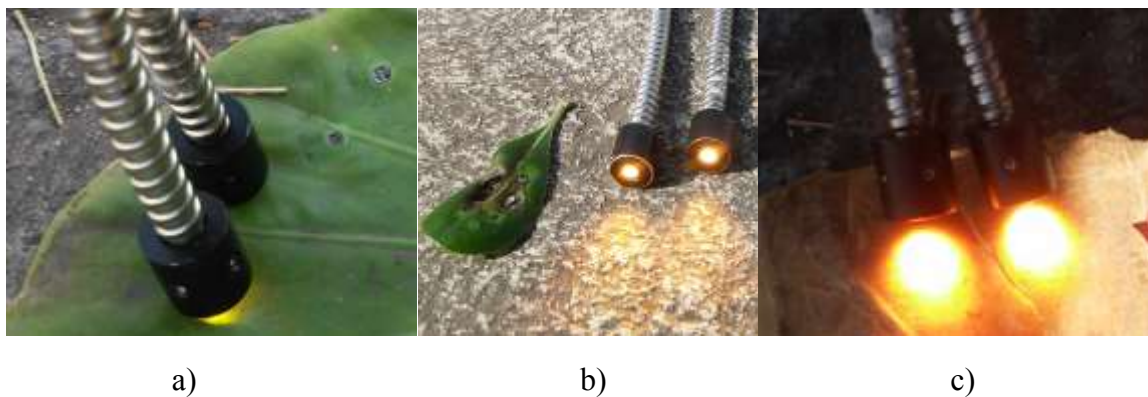


Fig. 4.12 Imágenes del daño causado por la radiación solar concentrada y transportada por la fibra óptica sobre algunos materiales a) y b) hojas verdes, c) Cartón.

4.5 Prueba de radiación solar incidiendo sobre Óxido de grafeno.

Al exponer el óxido de grafeno a la radiación ultravioleta se presenta cierto grado de reducción de éste, con lo que se propicia la formación de grafeno [38], [39], Debido a que el grafeno se ha encontrado útil en aplicaciones médicas [40]. Se encuentra útil al seguidor solar como una forma indirecta de contribuir con una aplicación medica que es la formación de grafeno.

Para lograr la reducción del óxido de grafeno utilizando la energía concentrada del seguidor solar se realizó una prueba en la que se comenzó colocando una muestra de una fina capa de éste material sobre un porta objetos de vidrio, el porta objetos a su vez se colocó sobre una base metálica, en la cual la muestra de óxido de grafeno permaneció fija. Para aplicar la radiación solar a la muestra, se utilizó la fibra óptica bifurcada, con la cual mediante el método descrito anteriormente, se transportó la radiación solar hasta el punto deseado para poder aplicar dicha radiación sobre la muestra de óxido de grafeno (Figura 4.13).



Fig. 4.13 Imágenes de la radiación solar concentrada y transportada mediante una fibra óptica, aplicándose sobre una muestra de óxido de grafeno.

Para lograr la reducción del óxido de grafeno, se debe exponer la muestra a la radiación UV por un tiempo determinado, este tiempo disminuye conforme aumenta la cantidad de radiación a la que la muestra es expuesta. En esta prueba se observa que mientras disminuye la distancia entre la radiación aplicada por la fibra óptica y la muestra de óxido de grafeno, aumenta la efectividad de la radiación térmica y ultravioleta(UV) aplicada, por lo que se comenzó aplicando la radiación a una distancia aproximadamente de 10 centímetros entre la fibra óptica y la muestra, y se fue acercando la fibra tanto como fue posible, puesto que se observó que a distancias inferiores a medio centímetro, la muestra se quema instantáneamente y se convierte en cenizas.

Se escogió una distancia de 3cm para exponer la muestra a la radiación solar transportada por la fibra, esto debido a que a esa altura se observó una distribución uniforme de la radiación sobre

una cierta proporción la película de óxido de grafeno con lo que se logró una alta radiación térmica, sobre toda la muestra, sin llegar a dañarla (Fig. 4.14).



a)



b)

c)

Fig. 4.14 Radicación solar transportada y por la fibra óptica, incidiendo sobre una porción de una película de óxido de grafeno.

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos a partir de las pruebas reportadas en el capítulo 4, así como de información de los capítulos 2 y 3.

5.1 Funcionamiento general

El funcionamiento general del seguidor solar resultó satisfactorio en cada una de las ocasiones en que se puso a prueba, demostrándose su correcto funcionamiento por tiempos prolongados de hasta 5 horas continuas. El control manual del seguidor solar funcionó prácticamente de manera instantánea teniéndose una velocidad de respuesta de 0.22 segundos por cada ciclo del programa principal. La lectura de los 6 sensores mostró valores correctos.

5.2 Seguimiento Automático del sol

El seguimiento automático del sol proporcionó una alta precisión con movimientos tan finos, que el centroide de la imagen del sol, coincidió con cualquier pixel de la imagen capturada (con una resolución de 320 x 240 pixeles) en cada posición (pixel) en la que se colocó al centroide objetivo.

En cuanto a su desplazamiento angular, el movimiento del seguidor solar resultó más fino que la resolución del encoder de 1024 bits (0.3515° de una vuelta completa), teniendo el seguidor solar una precisión de 0.1289° .

5.3 Resultados del control de temperatura.

En estas pruebas, el sistema detectó una muestra de temperatura cada 0.22segundos.

Mediante el control manual se obtuvieron valores de temperatura muy cercanos a los deseados con un margen de error de $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

El control automático de temperatura respondió a todas las instrucciones indicadas mediante el software, sin embargo presentó una oscilación de más, menos 15°C bajo condiciones climatológicas constantes cuando la radiación solar presentó una media de 701 W/m^2 .

5.4 Resultados del transporte y concentración de radiación solar

El sistema focalizó con precisión la radiación solar concentrada por la lente de Fresnel sobre el extremo receptor de la fibra óptica y la transportó hasta cualquier otro punto deseado a una distancia de 91.44 cm mediante la fibra óptica.

Sin embargo se presentaron grandes pérdidas de radiación principalmente por dos factores.

1. Debido a que el área formada por la radiación solar concentrada por el lente de Fresnel es superior al área receptora de la fibra óptica, no toda la radiación insidió sobre ella, por lo que la demás energía se desaprovechó.
2. Debido a las características físicas de la fibra óptica como el ángulo de apertura, su longitud y las curvaturas que se presentan al manipular la fibra.

La falta de instrumentos de medición adecuados, no permitió medir la radiación solar concentrada en el extremo receptor y emisor de la fibra óptica. Por lo tanto, para medir su eficiencia, se registró la temperatura alcanzada por la radiación solar en ambos extremos de la fibra óptica, observándose valores de temperatura de hasta 550°C para la radiación solar concentrada por el lente de Fresnel y 81°C para la radiación solar transportada y concentrada por el extremo emisor de la fibra óptica el, 12 de febrero del 2016 a las 3:38 pm (un día soleado) cuando se registró una densidad de radiación solar de 887° W/m^2 .

5.5 Resultados de la Radiación Solar Incidiendo sobre el Óxido de Grafeno.

Después de exponer la muestra de óxido de grafeno a la energía solar concentrada por la fibra óptica, se observó que mientras disminuye la distancia entre la radiación aplicada por la fibra óptica y la muestra de óxido de grafeno, aumenta la efectividad de la radiación térmica y ultravioleta (UV) aplicada, sin embargo cuando esta radiación se acerca demasiado a la fina

capa de óxido de grafeno (distancias inferiores a 1 mm cuando la densidad de radiación solar es de $887^{\circ} \text{ W/m}^2$), la capa se quema y se convierte en ceniza instantáneamente.

La distancia óptima observada para exponer la muestra a la radiación solar fue de 3 cm. Distancia en que se observó una distribución uniforme de la radiación sobre una cierta proporción la película de óxido de grafeno con lo que se logró una alta radiación térmica sobre esa área de la muestra y sin llegar a dañarla.

Al final de la prueba que duró una hora, se observó que la impedancia del material pasó de un valor superior a 20 mega ohms, a un valor de hasta 5 kilo ohm.

5.6 Costos.

Los costos de los equipos comerciales cotizados ascienden a \$45,070.22 pesos para el electrocauterio Force 2 ESU, y 34,999 pesos para el electrocauterio Sonolife, Mientras que el costo aproximado del sistema de cauterización propuesto, diseñado y construido en este trabajo asciende a \$14,000, una tercera parte del costo del cauterizador Sonolife y una cuarta parte de costo del cauterizador Force 2 ESU (sección 2.5.8).

No se cotizaron los precios del equipo láser quirúrgico.

Capítulo 6

Discusión

En este capítulo se analizan e interpretan los resultados incluyendo una discusión objetiva y crítica de sucesos inesperados.

6.1 Funcionamiento general

El que el seguidor solar haya funcionado correctamente en cada ocasión en que se puso a prueba y específicamente durante la prueba de 5 horas, garantiza su adecuado desempeño, con un software robusto capaz de operar por tiempos prolongados sin trabarse ni alentarse en cada una de las aplicaciones que así lo requieran.

La velocidad de respuesta de 0.22 segundos tanto para el control del seguidor, como para la notificación de los valores proporcionados por los sensores, resultó adecuada para aplicaciones de seguimiento solar, ya que no presentó limitación alguna en cada una de las aplicaciones empleadas en este trabajo, y ofrece la posibilidad de darle un amplio rango de aplicaciones posibles al seguidor solar.

6.2 Seguimiento Automático del sol

La alta precisión del seguidor solar garantiza que la radiación solar se concentrara exactamente en un punto deseado en todo momento y de forma continua a lo largo de un día soleado. Lo que proporcionara una alta eficiencia de la energía concentrada para las aplicaciones que hagan uso de este sistema.

Si bien el sistema presentó movimientos muy finos de 0.1289° de vuelta, estos movimientos podrían hacerse aún más finos mediante software al configurar el PWM y los tiempos en los que se alimenta a los controladores de los motores.

La resolución de 320 x 240 píxeles del sensor (cámara web) empleado para monitorear al sol, proporcionó una altísima precisión al seguimiento solar ofreciendo un buen tiempo de respuesta, puesto que al aumentar esta precisión (lo que es posible mediante software) disminuyó el tiempo

de respuesta del sistema (0.22 segundos), y por el contrario, si se disminuye esta precisión, el tiempo de respuesta aumentaría drásticamente, pero se perdería precisión del seguimiento solar.

6.3 Control de temperatura.

Con una muestra de temperatura cada 0.22 segundos, el sistema ofrece un monitoreo prácticamente instantáneo y con el mismo tiempo de respuesta se obtiene un control manual de temperatura con una oscilación de solo $\pm 3^{\circ}\text{C}$, lo que podría resultar útil para un gran número de aplicaciones, sin embargo la importancia real radica en el control automático de temperatura el cual a pesar de responder a todas las instrucciones indicadas mediante el software, no logró un buen control, por lo que es evidente que requieren modificaciones de software y la posible implementación de la teoría de control.

6.4 Transporte y manipulación de la radiación solar

La capacidad de transportar y manipular la radiación solar, son dos de los aspectos más importantes para lograr con este trabajo un sistema de cauterización utilizando energía solar concentrada, y a su vez fue la parte que presentó un mayor reto al autor de este trabajo.

Además de focalizar la radiación solar sobre un punto deseado, el sistema demostró tener la capacidad de transportar la radiación solar a cualquier otro punto a una distancia de 91.44 cm mediante la fibra óptica empleada, dicha distancia está limitada (en parte) por la longitud de la fibra óptica, ya que una fibra de mayor longitud obviamente proporcionará la capacidad de transportar la radiación a una mayor distancia lo que proporcionaría una mayor versatilidad al sistema. A pesar de su limitada longitud, se demostró que utilizando una fibra óptica para transportar la radiación solar, se puede tener una gran capacidad de manipulación de la radiación solar para aplicaciones tan diversas como lo sería en un quirófano como cauterizador mediante energía solar.

La temperatura alcanzada por la radiación solar concentrada por el lente de Fresnel fue de 550°C mientras que la radiación solar concentrada por el extremo emisor de la fibra óptica fue de 81°C , por lo que es evidente la gran pérdida de radiación solar. Dichas pérdidas se atribuyen al acoplamiento entre la radiación solar concentrada por el lente de Fresnel y a las características físicas de la fibra óptica como lo son su longitud y las curvaturas que se pudieran producir debido a la manipulación de la fibra óptica.

Otro aspecto importante a resaltar es que él decir que las pérdidas fueron muy grandes no ofrece un parámetro de evaluación técnico ni mucho menos científico por parte de este trabajo, por lo que se hace evidente la necesidad de instrumentos adecuados de medición que ayuden a evaluar la eficiencia del sistema, así como el progreso que podría llegar a tener bajo distintas modificaciones de operación o de trabajos futuros.

6.5 Radiación Solar Incidiendo sobre el Óxido de Grafeno.

Si bien la aplicación principalmente deseada para el seguidor solar en éste trabajo de tesis, es la implementación de un cauterizador mediante energía solar concentrada, el sistema tiene la capacidad de emplearse adecuadamente en diversas aplicaciones, hecho por el cual el sistema también se utilizó como herramienta para ayudar a reducir el óxido de grafeno y de esta manera ayudar a su proceso de conversión a grafeno.

La distancia entre el extremo emisor de la fibra óptica y la película de óxido de grafeno fue de 3 cm, distancia a la cual se obtuvo una buena distribución de la radiación solar concentrada sobre la capa de óxido de grafeno, procurando la máxima efectividad de la radiación térmica y ultravioleta en la reducción del óxido de grafeno, y a la vez se cuidó de no dañarla, debido a la temperatura de hasta 81°C (que se alcanzó en el extremo receptor de la fibra óptica.) capaz de carbonizar la muestra a una distancia inferior a 1mm entre ella y la fibra óptica.

La prueba duró una hora, tiempo en el que la impedancia del material pasó de un valor superior a 20 mega ohms, a un valor de 5 kilo ohm, que si bien aún tiene un alto valor resistivo, la disminución de la impedancia que presentó, es bastante considerable, por lo que este método podría considerarse como una buena alternativa de pre-tratamiento para el óxido de grafeno, en su proceso de conversión a grafeno.

6.6 Costos

El costo aproximado del sistema propuesto en este trabajo fue de una tercera parte del costo del cauterizador Sonolife y una cuarta parte de costo del cauterizador Force 2 ESU, sin embargo el costo aproximado del equipo diseñado en este trabajo, es el costo con las características con las que posee el equipo actualmente, de entre las cuales, la fibra óptica utilizada aun no cumple con los requerimientos deseados para realizar las funciones que realizaría un electrocauterio, o un láser quirúrgico comercial, por lo que se prevé que para conseguirlo se requeriría utilizar una fibra óptica distinta y un sistema de acople más eficiente que el que se entrega en este trabajo

de tesis, por lo que se recomienda que el presupuesto destinado para la adquisición de dicha fibra y acople ópticos sea al menos de \$10,000 pesos mexicanos, para asegurar la obtención de un sistema de transporte de radiación solar eficiente que cumpla las especificaciones de sus contrapartes comerciales satisfactoriamente.

Los precios del equipo láser quirúrgico no fueron cotizados, pero se presume que estos son aún más elevados que los de un electrocauterio comercial.

Capítulo 7

Conclusiones y Perspectivas

El objetivo planteado al inicio de este capítulo fue proponer una aplicación biomédica que emplee la energía solar de modo que cubra parcial o totalmente los requerimientos energéticos que emplearía un dispositivo biomédico que se alimente con energía eléctrica, además de que sirva como contribución para la posible utilización de la energía solar en sectores como el hospitalario o doméstico.

En este trabajo se consiguió un sistema de alta precisión de colección, concentración, transporte y manipulación de la radiación solar que garantiza un funcionamiento continuo a lo largo de todo un día soleado con buena velocidad de respuesta y con costos estimados de fabricación.

Por lo tanto al tener un sistema, preciso, confiable y de bajo costo, se puede pensar en su utilización para un sin número de aplicaciones que requieran de energía solar concentrada, entre las que podrían encontrarse aplicaciones Biomédicas.

La aplicación biomédica que se deseó implementar en este trabajo fue la de un cauterizador solar, en donde la energía solar concentrada por la fibra óptica se utilizaría para proporcionar la energía térmica necesaria en un electrocauterizador o un láser quirúrgico comercial que utiliza energía eléctrica.

El objetivo de construir un cauterizador solar queda incompleto debido a que se consideró que la energía que proporcionaba el extremo emisor de la fibra óptica fue insuficiente, a causa de las pérdidas producidas principalmente entre el acoplamiento entre la radiación concentrada por el lente de Fresnel y el extremo receptor de la fibra óptica. Se utilizó una fibra óptica bifurcada, de la cual cada uno de sus dos extremos emisores, entregaron solo la mitad de la potencia total y el diámetro del extremo receptor debe ser aún más pequeño para ciertas aplicaciones. Es por esto que se plantea que si como trabajo a futuro se mejora el acoplamiento ya mencionado y se selecciona una fibra óptica no bifurcada con mejores características para la transmisión de la radiación solar y acorde a las necesidades requeridas en cirugía, hay buenas probabilidades de alcanzar la potencia térmica que actualmente entrega un equipo de cauterización comercial.

Por lo anterior se concluye que se entrega una herramienta de alta precisión de colección, concentración y transporte de radiación que ofrece la posibilidad de manipular la radiación solar manualmente y a voluntad mediante una fibra óptica, que si bien aún requiere de mucho trabajo, tiempo e investigación antes de poder llegar a una sala de quirófano, este trabajo constituye un avance importante para la realización de dicho objetivo.

El sistema utiliza energía eléctrica para su funcionamiento y a cambio entrega energía solar para ser implementada en una aplicación deseada, por lo que como trabajo a futuro, debe hacerse un análisis comparativo entre la cantidad de electricidad que se consume, y la cantidad de energía que es capaz de coleccionar y aprovechar, además de que el sistema puede modificarse para disminuir su consumo energético, o que funcione con algún tipo de energía alternativa, como igualmente podría ser la solar.

Es indispensable que un electrocauterio solar cuente con un control de temperatura altamente confiable, por lo que este trabajo proporciona un control manual de temperatura que cumple con este requisito, pero un control automático también es necesario para compensar el posible cambio de las condiciones del clima durante su utilización, por lo que se recomienda que este control se mejore al hacer uso de la teoría de control en trabajos futuros.

El uso de este trabajo como alternativa de pre-tratamiento para el óxido de grafeno, en su proceso de conversión a grafeno, se efectuó como otra aplicación del seguidor con lo que se demuestra que la implementación de un cauterizador solar es solo una de las aplicaciones posibles de este trabajo con lo que se cumple el objetivo de contribuir en la demanda energética de diversos sectores.

Por lo tanto se concluye que los objetivos planteados inicialmente quedan cumplidos con la elaboración de este trabajo de tesis.

Capítulo 8

Referencias

- [1] X. Xu, C. Hao, and M. Bishop, « Development and planning of solar power in china,» Power & Energy Society General Meeting, p.1 – 5, July 2003.
- [2] 2016 Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar
- [3] A. J. Cesareo, “Desarrollo de un prototipo de auto solar” B.D. dissertation, Ingeniería. Mecánica Eléctrica, Universidad Veracruzana, Xalapa Ver. México 2010.
- [4] H. Mousazadeh, et al., "A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, pp. 1800-1818, 2009.
- [5] W. A. Lynch and Z. M. Salameh, "Simple electro-optically controlled dual-axis sun tracker," Solar Energy, vol. 45, pp. 65-69, 1990.
- [6] P. A. Davies, "Sun-tracking mechanism using equatorial and ecliptic axes," Solar Energy, vol. 50, pp. 487-489, 1993.
- [7] S. A. Kalogirou, "Design and construction of a one-axis sun-tracking system," Solar Energy, vol. 57, pp. 465-469, 1996.
- [8] S. Xu, D. Kong, Z. Ma and L. Yao, “The Implementation of High-Precision Solar Tracking System”, Electronics Communications and Control, pp 1708 - 1711, September 2011.
- [9] P. Bajpai and S. Kumar, “Design, Development and Performance Test of an Automatic Two-Axis Solar Tracker System”, Annual IEEE India Conference, pp 1 - 6, Dec. 2011.
- [10] J. A. Beltran, J. L. S. Gonzalez Rubio and C. D. Garcia-Beltran, “Design, manufacturing and performance test of a solar tracker made by embedded control electronics,” Conference on robotics and automotive mechanics, pp. 129-134, 2007.
- [11] K. K. Chong and C. W. Wong, “General formula for one-axis sun tracking system and its application in improving tracking accuracy of solar collector,” Solar Energy, vol. 83, pp. 298-305, 2009.
- [12] D. Marinescu and C. Marinescu, “Control Optimizing Algorithm for Soft Sun-Trackers,” IEEE International conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, pp. 54-57, 2006.
- [13] A. B. Manish, “Performance of a self-aligning solar array tracking controller,” Photovoltaic Specialists Conference, IEEE, vol. 2, pp. 864- 869, 1990.
- [14] N. Barsoum, “Implementation of a prototype for a traditional solar tracking system,” Third UKSim European Symposium on Computer Modeling and Simulation, pp. 23-30, 2009.
- [15] F. Huang, D. Tien and J. Or, “A microcontroller based automatic sun tracker combined with a new solar energy conversion unit,” International Conference on Power Electronics Drives and Energy Systems for Industrial Growth, vol. 1, pp. 488-492, 1998.
- [16] M. Rebhi, M. Sellam, A. Belghachi and B. Kadri, “Conception and Realization of Sun Tracking System in the South-West of Algeria,” Applied Physics Research, vol. 2(1), 2010.

- [17] O. Stalter, B. Burger, S. Bacha and D. Roje, "Integrated solar tracker positioning unit in distributed grid-feeding inverters for CPV power plants," IEEE International Conference on Industrial Technology, pp. 1- 5, 2009.
- [18] R. Zogbi and D. Laplaze, "Design and construction of a sun tracker," Solar Energy magazine, vol. 33(3-4), pp. 369-372, 1984.
- [19] M. Hossein, K. Alireza, J. Arzhang, A. Karen and S. Ahmad, "A Review of principle and sun-tracking method for maximizing solar system output," Renewable and Sustainable Energy Review, vol. 13(8), pp. 1800-1818, 2009.
- [20] M. M. Arturo, G. P. Alejandro, "High-Precision Solar Tracking System", Proceedings of the World Congress on Engineering, vol. 2, pp 1-3, July 2010.
- [21] Hung-Ching Lu and Te-Lung Shih, "Fuzzy system control design with application to solar panel active dual-axis sun tracking system," IEEE international conference on systems man and cybernetics, pp. 1878- 1883, 2010.
- [22] M. Taherbaneh, H. G. Fard, A. H. Rezaie and S. Karbasian, "Combination of Fuzzy-based maximum power point tracker and sun tracker for deployable solar panels in photovoltaic systems," IEEE international conference on Fuzzy systems, pp. 1-6, 2007.
- [23] M. Alata, M. A. Al-Nimir and Y. Qaroush, "Developing a multipurpose sun tracking system using fuzzy control," Energy Conversion and Management, vol. 46(7-8), pp. 1229-1245, 2005.
- [24] J.H. Mauldin, "Luz, Láser Y Óptica", McGraw-Hill/Interamericana, 1992.
- [25] O. A. Jaramillo and J. A. del Río, "Optical fibres for a mini-dish/Stirling system: thermodynamic optimization", J. of Phys. D: Appl. Phys, vol. 35, pp 1241-1250, February 2002.
- [26] Yunus A. Çengel, "Transferencia de calor y masa", McGraw Hill, 2011.
- [27] A. J. Cesareo, "Desarrollo de un prototipo de auto solar" B.D. dissertation, Ingeniería.
- [28] H. Zanger, "Fiber Optics Communication and Other Applications", Merrill Pub Co, 2000.
- [29] Y. H. D, FISICA UNIVERSITARIA SEARS ZEMANSKY (Spanish Edition), #REF! ed., PRENTICE HALL, 2009.
- [30] O. A. J. Salgado, "TRANSPORTE DE ENERGÍA RADIATIVA A TRAVÉS DE FIBRAS ÓPTICAS: TEORÍA Y EXPERIMENTACIÓN", Ph.D. dissertation, Ingeniería Mecánica, UNIV. Nacional Autónoma de México, Temixco, Morelos, México, 2002.
- [31] H. Mousazadeh, A. Keyhani, A. Javadi, H. Mobli, K. Abrinia y A. Sharifi, «A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output,» Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, n° 8, p. 1800-1818, Oct 2009.
- [32] Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_refractive_indices.
- [33] Disponible en: http://html.rincondelvago.com/reflexion_refraccion_prisma.html.
- [34] W. Xie, Y. Dai, R. Wang and K. Sumathy, "Concentrated Solar Energy Applications Using Fresnel Lenses: A Review," Renew. Sust. Energ. Rev. Vol.15, pp. 2588-2606, 2011.
- [35] R. P. Areny, "Sensores acondicionadores de señal", Marcombo, 2004.
- [36] Disponible en: <http://www.oriel.com>.
- [37] S. Pei y H.-M. Cheng, «The reduction of graphene oxide,» Carbon, vol. 50, n° 9, p. 3210 - 3228, Aug 2012.
- [38] K. Chakraborty, S. Chakrabarty, P. Das, S. Ghosh y T. Pal, «UV-assisted synthesis of reduced graphene oxide zinc sulfide composite with enhanced photocatalytic activity,» Materials Science and Engineering: B, vol. 204, Feb 2016.

- [39] Y. H. Ding, P. Zhang, Q. Zhuo, H. M. Ren, Z. M. Yang y Y. Jiang, «A green approach to the synthesis of reduced graphene oxide nanosheets under UV irradiation,» *Nanotechnology*, vol. 22, n° 21, Mar 2011.
- [40] G. Xiong, H. Luo, G. Zuo, K. Ren, Y. Wan, “Novel porous graphene oxide and hydroxyapatite nanosheets-reinforced sodium alginate hybrid nanocomposites for medical applications”, *Mater. Charact*, 107 (2015), pp. 419–425.
- [41] Moisture-Responsive Graphene Paper Prepared by Self-Controlled Photoreduction.