

# **CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS**



## **“Simulación, diseño y construcción de un prototipo de colector solar foto-térmico tubular”**

### **TESIS**

Presentada como requisito parcial para obtener el título de

### **MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AMBIENTAL Y ENERGÍAS RENOVABLES**

Por:

**ING. DIEGO BARRERA MÉNDEZ**

**Dirigida por: Dr. Mario Miki Yoshida**

Chihuahua, Chihuahua

Diciembre de 2011

# **INDICE**

## **Capítulo 1.** Introducción

## **Capítulo 2.** Generalidades

### **2.1** Sistemas térmicos solares

#### **2.1.1** Tipos de colectores solares térmicos

#### **2.1.2** Modelo y simulación de colectores solares térmicos

#### **2.1.3** Optimización de la eficiencia de colectores solares

### **2.2** Recubrimientos transparentes selectivos

#### **2.2.1** Síntesis

#### **2.2.2** Caracterización microestructural

##### **2.2.2.1** Microscopía electrónica de barrido

##### **2.2.2.2** Difracción de rayos X

##### **2.2.2.3** Emisión, Reflexión y Absorción UV-vis e Ir

#### **2.2.3** Propiedades eléctricas

## **Justificación**

## **Objetivo**

## **Capítulo 3.** Modelo teórico del sistema

### **3.1** Planteamiento del problema físico

### **3.2** Modelo matemático del colector

#### **3.2.1** Aproximaciones y suposiciones

#### **3.2.2** Formulación de la ecuación de balance energético

##### **3.2.2.1** Radiación solar absorbida por los elementos del colector

##### **3.2.2.2** Intercambio de energía térmica entre los elementos del colector por radiación

**3.2.2.3** Pérdidas del colector al ambiente

**3.2.2.4** Variación de la energía interna de los elementos del colector

**3.3** Análisis y solución de las ecuaciones del balance energético

**3.3.1** Planteamiento de la ecuación diferencial adimensional

**3.3.2** Solución analítica aproximada de la ecuación diferencial y método de análisis

**Capítulo 4.** Métodos experimentales

**4.1** Recubrimientos

**4.1.1** Síntesis

**4.1.2** Caracterización

**4.2** Colector

**4.2.1** Descripción

**4.2.2** Mediciones

**Capítulo 5.** Presentación y discusión de resultados

**5.1** Evaluación de las propiedades microestructurales

**5.2** Evaluación de las propiedades eléctricas

**5.3** Evaluación de la eficiencia

**5.3.1** Colector sin recubrimiento

**5.3.2** Colector con recubrimiento

**5.3.3** Validación del modelo teórico

**Capítulo 6.** Conclusiones

**Referencias**

**Trabajo a futuro**

## **Resumen**

*En años recientes ha aumentado en gran medida la necesidad de fuentes alternas de energía para nuestro planeta, es así que el aprovechamiento foto-térmico de la energía solar es una alternativa viable en México, sobre todo en la región norte. El uso de colectores solares foto-térmicos ha tomando gran importancia debido a las ventajas del sol como fuente de energía inagotable, renovable, no contaminante y sobre todo gratuita. Una forma de optimizar los colectores solares es el uso de recubrimientos transparentes selectivos, transparentes a radiación solar, pero reflectivos a la radiación térmica. En este sentido, en el presente trabajo se desarrolló un modelo teórico matemático para el desempeño térmico de un colector solar. Así mismo, fueron estudiadas las propiedades microestructurales, eléctricas y ópticas de un recubrimiento transparente selectivo conformado por óxido de estaño ( $\text{SnO}_2$ ) dopado con fluor. Mediante la caracterización microestructural por la técnica de microscopía electrónica de barrido se observó la topografía superficial de los depósitos sin dopar, así como el espesor de película y se determinó la temperatura óptima de depósito. Estas propiedades fueron confirmadas por difracción de rayos X, donde se registró la presencia única de la fase tetragonal de óxido de estaño y tamaño de grano grande. El estudio óptico permitió elegir la concentración adecuada de dopante que presentara el comportamiento óptico deseado y éste fue depositado en tubos y caracterizado de la misma manera para su posterior uso como cubierta para el colector solar. Un prototipo de colector solar fue construido para el estudio del impacto del recubrimiento en la eficiencia térmica así como la validación del modelo teórico. Los resultados indicaron que el uso del recubrimiento transparente selectivo en la cubierta del colector solar aumentó la eficiencia aproximadamente un 10%; además, evidenciaron concordancia entre los datos obtenidos experimentalmente y los calculados por medio del modelo teórico, resultando ser confiable. Finalmente, es importante mencionar que es la primera vez que se hace un estudio acerca del uso de recubrimientos transparentes selectivos en cubiertas de colectores solares térmicos por lo que este trabajo contribuye a entender mejor el impacto de estos materiales en aplicación solar. Además, el comportamiento óptico desarrollado por este recubrimiento podría favorecer su potencial de aplicación en otros campos como la industria de ventanas inteligentes.*

## **Abstract**

*In recent years the need for alternative sources of energy for our planet has greatly increased, thus, the photo-thermal use of solar energy is a viable alternative in Mexico, especially in the northern region. The use of photo-thermal solar collectors has great importance due to the advantageous characteristics of the sun as inexhaustible source of energy, renewable, environmental friendly, and above all free. One approach to optimize the solar collectors is the use of transparent selective coatings; transparent to the solar radiation, but reflective to thermal radiation. In this sense, this paper develops a theoretical mathematical model for the thermal performance of a solar collector. Also, microstructural, optical and electrical properties were studied of a selective transparent coating composed of tin oxide (SnO<sub>2</sub>) doped with fluorine. Scanning electron microscopy technique was utilized for microstructural characterization, homogeneity, surface topography, adherence, film thickness was observed for undoped deposits, thus, determined the optimum temperature of deposition. These properties were confirmed by X-ray diffraction, which showed the unique presence of tetragonal phase of tin oxide and large grain size. The optical study allowed to choose the appropriate concentration of dopant to conduce the desired optical performance and it was deposited inside of borosilicate tubes and characterized in the same manner for its latter use as a cover for the solar collector. A solar collector prototype was built to study the impact of the selective coating on the thermal efficiency and validation of the theoretical model. The results indicated that use of selective transparent coating on the cover of the solar collector efficiency increased about 10%, also showed concordance between the data obtained experimentally and those calculated from the mathematical model, proving to be reliable. Finally, it is important to mention that this is the first study done about the use of selective transparent coatings on the cover of a tubular solar thermal collector, so this work contributes to a better understand of the impact of these materials in solar application. In addition, the optical behavior developed by this coating could enhance their potential for application in other fields such as smart windows industry.*

## Capítulo 1. Introducción

El Sol tiene en su superficie una temperatura efectiva de cuerpo negro de 5762 K, la temperatura en su región central es mayor y su valor se estima entre  $8 \times 10^6$  y  $40 \times 10^6$  K. Así mismo, la energía total emitida por el Sol generada por fusiones nucleares de hidrógeno a helio es  $3.8 \times 10^{20}$  MW, que es igual a  $63 \text{ MWm}^{-2}$  en la superficie del sol. (Kalogirou, 2004) Esta energía es emitida en todas las direcciones y sólo una fracción,  $1.7 \times 10^{14}$  kW del total emitido, o sea  $1.366 \text{ kWm}^{-2}$  es interceptado por la Tierra. Este valor se conoce como la constante solar y su valor fluctúa en  $\pm 3\%$  debido a la variación periódica de la distancia entre la Tierra y el Sol. (Fernandez, 2008) Debido a esto, el Sol se considera la principal fuente de energía para todos los procesos que tienen lugar en nuestro planeta y se considera que treinta minutos de radiación solar impactando en la Tierra es igual a la demanda energética mundial por un año. (Kalogirou, 2004)

Para establecer con exactitud la cantidad de energía solar que se puede aprovechar en un sitio específico, además de la constante solar, se deben tomar en cuenta aspectos como la hora del día, la estación del año y sobre todo las condiciones atmosféricas. Esto último, a pesar de la complejidad en su relación con la radiación solar, es el factor de mayor importancia para este cálculo. (Energía solar térmica, 2006) Según la forma de recoger la radiación solar se puede obtener energía térmica o eléctrica, dependiendo de la tecnología utilizada en cada caso. La electricidad se consigue a través de los llamados módulos fotovoltaicos, mientras que el calor se logra mediante colectores solares térmicos. (Energía solar térmica, 2006) México tiene ante sí un amplio potencial de desarrollo en energía solar, un 95% del territorio nacional cuenta con niveles de insolación que permitirían su aprovechamiento (La energía eléctrica en Baja Cal. y el futuro, 2003) sobre todo en su parte norte, que gracias a la poca nubosidad, la baja humedad ambiental, el clima seco y la incidencia de rayos solares, hacen que esa zona del país tenga valores de radiación solar elevados.

En nuestro país, el desarrollo industrial y comercial de la energía solar se inició a mediados de los años cuarenta con la fabricación de colectores planos para

calentamiento de agua. Actualmente, la mayor parte de los colectores solares que se fabrican en México son de temperatura intermedia (60 a 80 °C) y su aplicación se ha orientado hacia el calentamiento y purificación de agua, secado y generación de electricidad vía procesos térmicos. (*La contaminación ambiental, 2002*)

En años recientes, un buen número de investigadores se han interesado en los materiales llamados conductores transparentes debido a su principal propiedad que combina la baja resistencia eléctrica con la alta transparencia óptica en el rango visible del espectro electromagnético. Gracias a estas propiedades, los conductores transparentes son considerados materiales con posibilidad de uso en aplicaciones tecnológicas por ejemplo en los dispositivos de celdas solares, diodos emisores de luz, pantallas de panel plano y como es en nuestro caso de interés, colectores solares. Un ejemplo de estos conductores transparentes es el óxido de estaño ( $\text{SnO}_2$ ), este óxido, a pesar de ser transparente a la luz visible es altamente reflectivo para la luz infrarroja. (*Batzill, 2005*) Es por ello que siguiendo esta tendencia, en este trabajo se presenta un estudio matemático apoyado en simulaciones de la optimización de un colector solar térmico de geometría cilíndrica mediante la aplicación de un recubrimiento transparente selectivo de óxido de estaño.

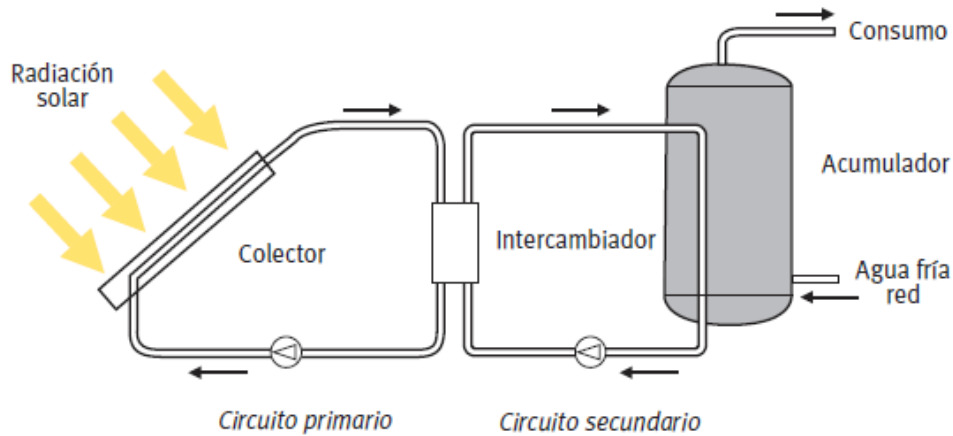
## Capítulo 2. Generalidades

### 2.1 Sistemas térmicos solares

Un colector térmico de energía solar es un intercambiador de calor especial que transforma la energía radiante del sol en calor. El componente principal de cualquier sistema térmico solar es el colector. Éste dispositivo absorbe la radiación solar, la convierte en calor y lo transfiere a un fluido (usualmente agua, aire o aceite) que fluye a través del colector. La energía solar colectada es llevada hacia el agua caliente directamente, o al equipo de acondicionamiento o a un tanque de almacenamiento de energía, del cual puede ser extraída en la noche o días nublados. El flujo de radiación incidente es, en el mejor de los casos, de  $1100 \text{ Wm}^{-2}$  (sin concentración óptica), y es variable. Este mecanismo tan sencillo como eficaz, representado en la figura 2.1, resulta muy útil en múltiples aplicaciones, tanto domésticas como industriales, por mencionar algunas: agua caliente para uso doméstico, calefacción, calentamiento de agua para piscinas o el (pre)calentamiento de fluidos de distintos procesos industriales. (*Duffie, 2006*) (*Kalogirou, cap 3, 2009*)

La posibilidad de captar la energía del sol en el lugar que se necesita, además de la capacidad de almacenarla durante el tiempo suficiente para disponer de ella cuando haga falta, es lo que hace que esta tecnología sea tan ampliamente aceptada en el mundo. En la actualidad, una instalación de energía solar cubre del 50 al 80% del total de la demanda de agua caliente sanitaria de una vivienda, aunque en zonas de gran soleamiento a lo largo del año (por ejemplo la ciudad de Chihuahua), el porcentaje de aporte puede ser mayor. (*López, 2006*)





**Figura 2.1:** Esquema básico de un sistema solar térmico con aplicación de agua caliente sanitaria

Es por estas razones que resulta tan importante desarrollar nuevas tecnologías basadas en el aprovechamiento de los recursos renovables, así como optimizar las ya existentes, propiciando el uso de fuentes de energía inagotables y sobretodo respetuosas con el medio ambiente.

### 2.1.1 Tipos de colectores solares térmicos

Básicamente, existen dos tipos de colectores solares: los no concentradores o estacionarios y los concentradores. Un colector no concentrador, tiene la misma área para interceptar y absorber la radiación solar; mientras que uno concentrador, usualmente tiene superficies reflejantes cóncavas para interceptar y concentrar la radiación solar directa a un área receptora más pequeña, así se consigue un incremento en el flujo de radiación.

Los colectores solares también pueden ser diferenciados por el tipo de fluido de transferencia de calor usado (agua, anticongelante, aire o aceite), o por si son cubiertos o descubiertos.

Los colectores estacionarios están permanentemente fijos en una posición y no rastrean al sol. Existen tres tipos principales en esta categoría:

1. Colectores planos (FPC por sus siglas en inglés)
2. Colectores parabólicos compuestos (CPC por sus siglas en inglés)
3. Colectores tubulares evacuados (ETC por sus siglas en inglés)

Así mismo, los colectores concentradores se pueden clasificar por su movimiento: estacionarios, de rastreo de un eje y de rastreo de dos ejes. Sus principales tipos de colectores son:

1. Colectores parabólicos cilíndricos (PTC por sus siglas en inglés)
2. Colectores Fresnel
3. Reflectores de disco parabólico (PDR por sus siglas en inglés)
4. Colectores de campos de helióstatos (HFC por sus siglas en inglés)

*(Kalogirou, cap 3, 2008)*

### **2.1.2 Modelos teóricos y simulación de colectores solares térmicos**

Los modelos son ensambles de las ecuaciones para los componentes del sistema incluyendo almacenaje, carga y cualquier otro componente que esté presente en el sistema físico. El efecto neto del ensamble es un conjunto de ecuaciones diferenciales y algebraicas acopladas con una variable independiente en común.

Estas ecuaciones pueden ser manipuladas y combinadas algebraicamente o pueden ser resueltas simultáneamente sin combinaciones; cada proceso tiene ventajas en la simulación de procesos solares. Si todas las ecuaciones son lineales, y no son muchas para manipularlas, las ecuaciones algebraicas pueden ser resueltas y sustituidas en las ecuaciones diferenciales, las cuales pueden ser resueltas por medio de métodos ya establecidos. Si las ecuaciones algebraicas son no lineales, o si hay un gran número de ellas acopladas como para dificultar su solución, es conveniente dejarlas separadas y resolver el conjunto de ecuaciones algebraicas y diferenciales numéricamente. *(Duffie, 2006) (Assilzadeh, 2005)*

Las simulaciones son experimentos numéricos que pueden dar la misma información de desempeño térmico que la experimentación física. Son relativamente rápidas y económicas y pueden producir información para diseñar

cambios en las variables de operación para el desempeño de sistemas. Con datos apropiados de costos y un análisis económico, la simulación puede ser usada para encontrar el sistema más económico.

Las simulaciones son utilizadas para estudios paramétricos y así ofrecer al diseñador de proceso la capacidad de explorar los efectos en las variables de diseño en el desempeño a largo plazo; tienen la ventaja de hacer el clima una variable reproducible, permitiendo posibles estudios paramétricos y de configuración sin las dificultades de un clima cambiante. Por otro lado, las simulaciones son complementarias a la experimentación física, componentes a escala son necesarios para entender el comportamiento y así asegurar el nivel de confianza de los modelos matemáticos correspondientes. *(Duffie, 2006)*

La modelación y simulación computacional de sistemas térmicos presenta varias ventajas. La más importante es la eliminación de la elaboración de prototipos costosos, la optimización de los componentes del sistema, estimación de la cantidad de energía entregada por el sistema y la predicción de su variación de la temperatura a través del tiempo. *(Assilzadeh, 2005)*

### **2.1.3 Optimización de la eficiencia de colectores solares**

Los colectores solares se basan en la alta absorbanza a la radiación en el espectro de emisión solar y en su posterior transporte hacia el fluido de transferencia. Sin embargo, al mismo tiempo existen pérdidas de energía por combinación de diferentes mecanismos incluyendo la radiación térmica de la superficie absorbadora. Lo que se desea es tener superficies que tengan alta absorbanza solar y baja emisión de energía de longitud de onda larga, esto es, superficies selectivas. *(Duffie, 2006)*

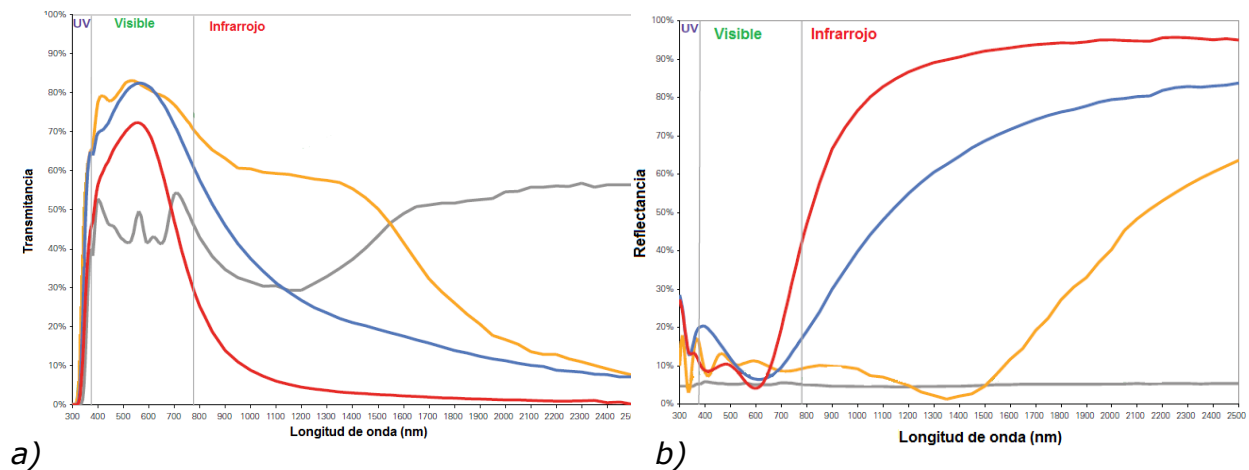
Las principales formas de optimización de colectores solares son por medio de superficies selectivas, éstas significan un incremento en la temperatura de operación o en la eficiencia. La selectividad se define como la relación de la absorción de radiación solar respecto a la emisión de radiación infrarroja.

Existen dos métodos principales a través de la utilización de superficies selectivas por los cuales se optimiza la eficiencia de un colector solar:

- El uso de recubrimientos absorbentes selectivos, por ejemplo el Cr negro trabajado por *Zhu* y colaboradores en 2001; estos recubrimientos presentan una alta absorción al espectro solar y son colocados en la superficie del colector solar.
- Otras superficies selectivas usadas comúnmente en colectores térmicos solares son las superficies transparentes selectivas, las cuales presentan una alta transmitancia al espectro solar, y por el contrario, reflejan la radiación térmica de la superficie absorbedora; éstos son colocados en la cubierta de vidrio del colector.

## **2.2 Recubrimientos transparentes selectivos**

La principal importancia de los recubrimientos transparentes selectivos es que pueden mostrar una alta transparencia en un rango limitado y bien definido, normalmente abarcando la luz visible en el intervalo de longitud de onda de  $0.4 < \lambda < 0.7 \mu m$ . En el infrarrojo, sus propiedades metálicas provocan la reflectancia, y en longitudes de onda suficientemente cortas se vuelven absorbentes debido a las excitaciones a través de las bandas de energía. Si la reflectancia está en el rango de radiación térmica,  $3 < \lambda < 50 \mu m$  a temperatura normal, la emisión de calor es impedida (ver figura 2.2). Así, se logra combinar la transparencia en la región visible con la reflexión de la radiación térmica emitida por el tubo colector, obteniendo baja emisión de energía del colector en forma global. (*Granqvist\_2007*)



**Figura 2.2** Espectros de a) transmittancia y b) reflectancia de una recubrimiento transparente selectivo

Es obvio que los recubrimientos transparentes selectivos tienen diversas aplicaciones en el campo de la energía solar y de la eficiencia energética. Otras aplicaciones de estas superficies selectivas surgen a partir de sus propiedades eléctricas de conducción, como lo son en celdas solares, electrodos transparentes para cargar y descargar ventanas inteligentes, etc.

### 2.2.1 Síntesis

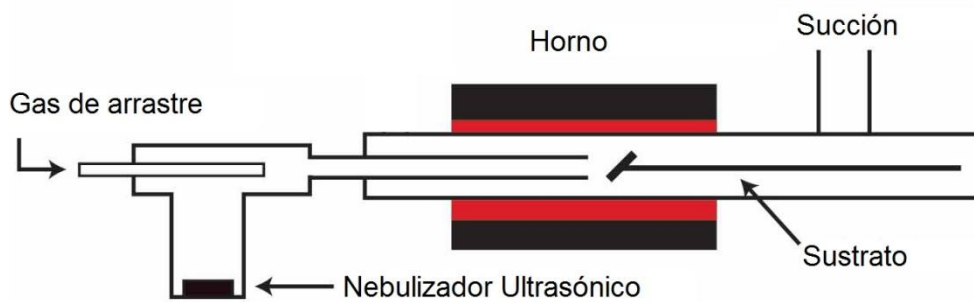
Las técnicas mayormente empleadas para la elaboración de recubrimientos transparentes selectivos son el depósito químico de vapor (*CVD, chemical vapor deposition*), recubrimiento por chisporroteo (*sputtering*) y la técnica de solgel. (Pierson, 1999)

La técnica *chemical vapor deposition* o *CVD* es actualmente la más usada para producir películas delgadas, consiste en de reaccionar químicamente el compuesto volátil del material a ser depositado con otros gases, para producir un sólido no volátil que se deposite atomísticamente en un sustrato colocado adecuadamente. (Ohring, 1992) Una variación de la técnica es el llamado depósito químico asistido

por aerosol (AACVD) también conocida como *aspersión pirolítica (spray pyrolysis)*; consiste principalmente en producir una nube de gotas muy finas de una solución conformada por el material precursor y un solvente apropiado a través de un nebulizador. Existen varios tipos de nebulizadores para producir la nube de gotas: neumáticos, ultrasónicos o electrostáticos. Entre los más eficientes se encuentran los nebulizadores ultrasónicos, que generan gotas con dimensiones de algunos micrómetros y con una distribución de tamaños cerrada.

En estos nebulizadores la nube de gotas, es producida por las vibraciones (algunos MHz) de un cristal piezoeléctrico, cuyas ondas ultrasónicas son concentradas en la superficie de la solución, la que por cavitación genera la nube de gotas micrométricas. El tamaño de gota depende principalmente de la frecuencia del piezoeléctrico (en relación inversa), de la viscosidad y densidad de la solución. El tamaño de gota y esencialmente su distribución de tamaños influye determinantemente en las condiciones (temperatura de sustrato, flujo de gas portador) del depósito y en la calidad del material obtenido. Una distribución de tamaño de gota muy extendida impide la optimización de las condiciones de síntesis, debido a que una gota grande necesita condiciones diferentes a las de una gota pequeña; dando como resultado un recubrimiento de mala calidad. Esta nube es introducida por medio de un gas de arrastre (aire o N<sub>2</sub>) en una cámara de temperatura controlada donde se encuentra el sustrato para la obtención de la película delgada. (Amézaga, 2003) (Miki, 1993)

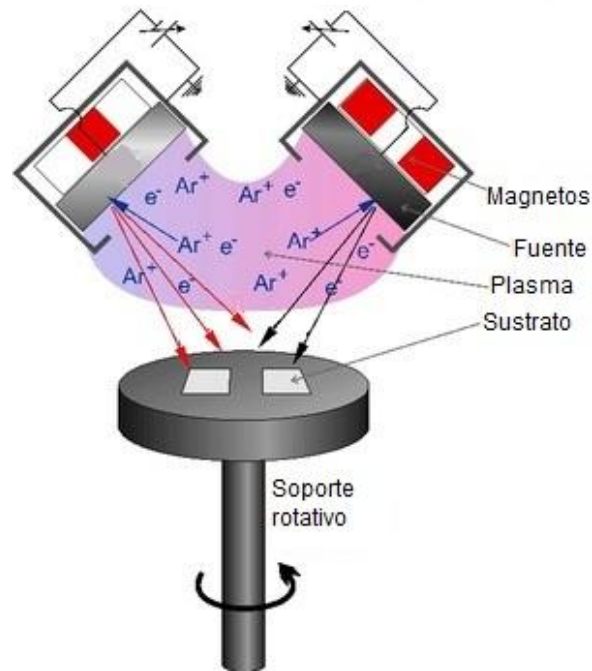
En este proceso, representado en la figura 2.3, el solvente se evapora a medida que las gotas se acercan al sustrato, los reactantes se difunden al sustrato y reacciones heterogéneas ocurren para dar lugar a la formación de películas delgadas sólidas (Patil, 1999)



**Figura 2.3:** Esquema de la técnica de AACVD

Entre las razones a las que se debe la creciente adopción de los métodos *CVD* es la habilidad de producir una gran variedad de películas y recubrimientos de metales, semiconductores y compuestos inorgánicos así como orgánicos tanto en forma cristalina como vítrea. Así mismo, la habilidad de crear películas de muy diversas estequiometrías de forma controlada hace que sea única entre las técnicas de depósito. (Ohring,2001)

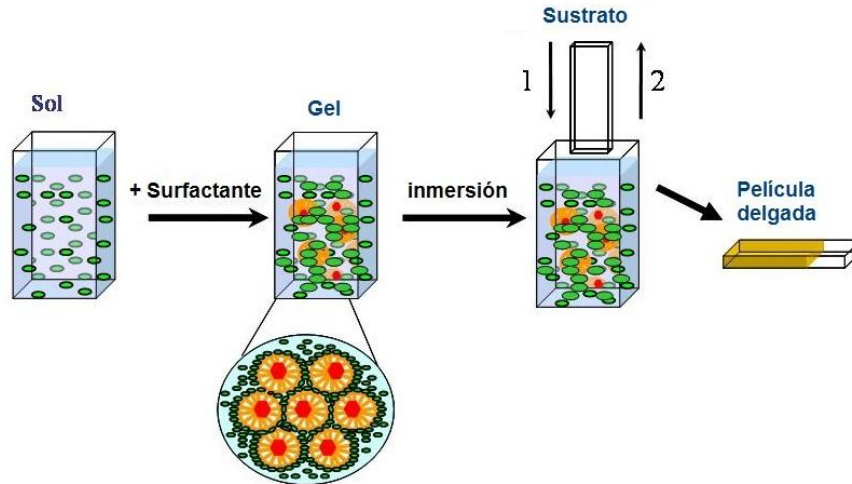
*Sputtering* es un proceso importante para la obtención de películas delgadas, es comúnmente usado en la industria de semiconductores y recubrimientos duros, además es usado en recubrimientos para joyería. Por medio de esta técnica, se obtienen recubrimientos de alta calidad de compuestos refractarios y metales, con buena adhesión y control de composición sin los requerimientos de alta temperatura de la técnica de *CVD*. Esta técnica consiste en colocar una fuente (objetivo) en una cámara de alto vacío y bombardearla con iones de gas (usualmente argón) los cuales se han acelerado con alto voltaje, produciendo una descarga luminiscente o plasma. Los átomos de la fuente son físicamente proyectados por transferencia de momento y se depositan en el sustrato a través de la cámara de vacío (ver Figura 2.4). A diferencia del *CVD*, este proceso no es activado por temperatura.



**Figura 2.4:** Esquema de la técnica de aspersion pirolítica

La técnica *Solgel* usa precursores líquidos que son convertidos en productos finales a través de medios térmicos y químicos. El precursor químico se prepara formando una suspensión coloidal (sol) que pasa por un estado coagulante (gel) seguido de secado y unión al sustrato. Este proceso sólo requiere de temperaturas moderadas y permite el control de la composición y estructura del depósito a nivel molecular. Esta técnica, representada en la figura 2.5, ha despertado gran interés in la industria de alta tecnología como la de semiconductores, optoelectrónica, óptica y cerámicos estructurados.





**Figura 2.5** Esquema de la técnica de Solgel

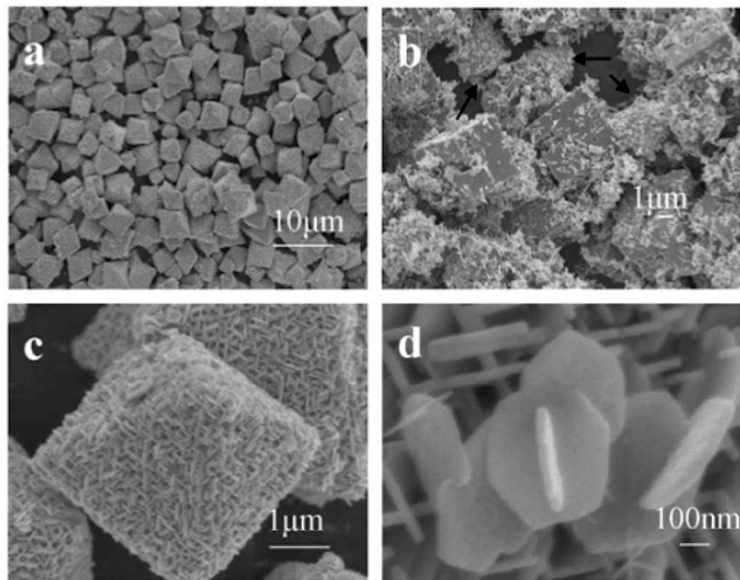
## 2.2.2 Caracterización microestructural

### 2.2.2.1 Microscopía electrónica de barrido, SEM

La microscopía electrónica de barrido (*Scanning Electron Microscopy, SEM*) es el estudio de microestructuras usando sus interacciones con la luz. Ésta técnica provee al investigador de una imagen altamente magnificada de la superficie del material, su resolución puede alcanzar los nanómetros y puede operar a magnificaciones que son ajustables de 10x a 300,000x.

En esta técnica, una fuente de electrones es enfocada por medio del vacío a una sonda fina que es barrida sobre la superficie de la muestra. A medida que los electrones penetran la superficie, las interacciones ocurren y éstas provocan una emisión de electrones o fotones desde la superficie. Una parte razonable de los electrones pueden ser recolectados por detectores apropiados y su respuesta de salida puede ser usada para modular la luminosidad de un tubo de rayos catódicos cuyos parámetros de entrada x-y son impulsados en sincronía con el voltaje x-y de barrido del haz de electrones (ver figura 2.6). Así se produce una imagen en el tubo de rayos catódicos, donde cada punto que el haz de electrones impacta en la

muestra es proyectado directamente en su punto correspondiente de la pantalla. (Brundle, 1992)



**Figura 2.6** Imágenes SEM de Óxido de estaño-zinc microestructurales: *a)* baja magnificación; *b)* cubos formados en la etapa inicial de reacción; *c)* octaedros; *d)* nanopartículas coalescentes

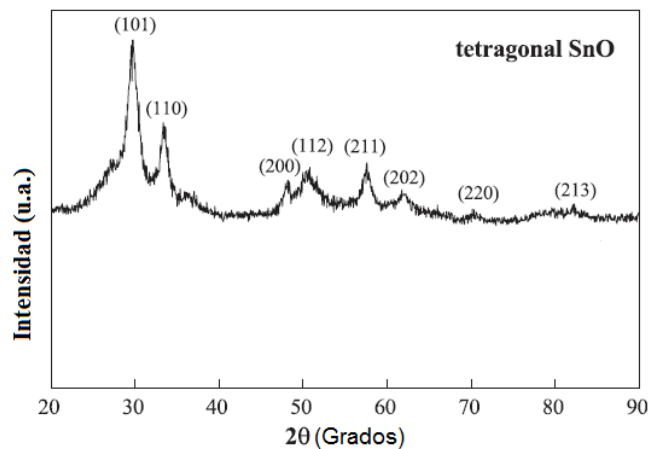
La espectroscopía de discriminación de energía (*Energy dispersive X-ray spectroscopy*, EDS) es una técnica analítica usada para el análisis elemental o caracterización química de una muestra. Se basa en la interacción de la energía con una muestra excitada por medio de una fuente de rayos X. Su capacidad de caracterización se debe en gran medida al principio fundamental de que cada elemento tiene una estructura atómica única, y ésta a su vez, presenta una emisión de rayos X característicos de cada estructura, permitiendo así la identificación de cada elemento gracias a esta propiedad inherente.

Hay cuatro componentes principales de la configuración de EDS: La fuente del haz, el detector de rayos X, el procesador de pulso, y el analizador. Los sistemas de EDS se encuentran comúnmente en microscopios electrónicos de barrido. Estos equipo cuentan con un cátodo y lentes magnéticos para crear y enfocar un haz de electrones. Un detector se utiliza para convertir energía de rayos X en señales de

tensión; esta información se envía a un procesador de pulso que mide y analiza los datos para su visualización. (Williams, 2009) (Brundle, 1992)

### 2.2.2.2 Difracción de rayos X

La orientación de una fase, su deformación y los defectos en el crecimiento epitaxial de una película delgada de un semiconductor, están ligados a las características de la fase cristalina del material, es por eso que la difracción de rayos X (*X-Ray Diffraction*, XRD) es la técnica más común utilizada para este tipo de análisis. Esta técnica es utilizada únicamente para identificar fases cristalinas presentes en los materiales y medir las propiedades estructurales (deformación, tamaño de grano, epitaxia, composición de fase, orientación preferida y defectos de estructura) de las fases (ver figura 2.7). Además es usada para determinar el espesor de películas delgadas y multicapas, arreglos atómicos en las interfases y en materiales amorfos. En el campo de películas delgadas, esta técnica es comúnmente usada sobre otras debido a que no es destructiva y no requiere preparación de muestra muy elaborada ni es necesario remover la película del sustrato. (Brundle, 1992) Esta técnica se basa en la ley de Bragg, la cual fundamenta que cuando se incide un haz monocromático de rayos X en la superficie de un cristal, éste es reflejado; siempre y cuando el ángulo de incidencia sea igual al de salida, estos valores dependen de la longitud de onda y de la red del cristal.



**Figura 2.7:** Difractograma XRD de un semiconductor óxido de estaño tetragonal

Así, un difractómetro produce rayos X que son dirigidos directamente a una muestra, la cual de acuerdo a su posición hace que los cristales cumplan o no la ley de Bragg. La intensidad de los rayos X difractados por la muestra son medidos directamente mediante un detector electrónico de rayos X, los cuales son convertidos en pulsos electromagnéticos controlados por computadoras para el procesamiento de datos.

### **2.2.2.3 Emisión, Reflexión y Absorción UV-vis e Ir**

La espectroscopía es un método utilizado para la obtención de un espectro óptico (reflectancia o transmittancia) de un material, esta técnica entrega una serie de señales con las características espectrales en la región de energía del fotón. Estas señales corresponden a la energía medida resultante del salto de electrones de un orbital en su estado basal a otro de energía mayor en un estado excitado. Así mismo, estos saltos o transiciones consisten en la excitación de un electrón de un orbital molecular ocupado hacia el siguiente orbital de energía mayor. La diferencia de energía entre la parte superior de la banda de valencia y la más baja de la banda de conducción es llamada banda prohibida.

En semiconductores estas bandas prohibidas son usualmente de 1 eV, y pueden ser determinadas con una precisión de unos pocos meV. Las energías y los anchos de línea de las transiciones electrónicas son características de cada material en particular o superficie. Estas energías son sensibles a factores internos y externos como composición química, temperatura, tensiones y campos magnéticos y eléctricos. Análogamente, los anchos de línea son función de la calidad del material, por ejemplo, cristalinidad o concentración de dopante. (*Brundle, 1992*)

### **2.2.3 Propiedades eléctricas**

La función de un conductor es unir eléctricamente cada uno de los componentes de un circuito. Éste puede ser considerado como otro componente más con

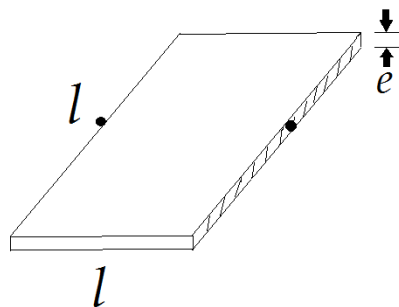
características similares a las de la resistencia eléctrica, debido a que tiene resistencia óhmica.

De este modo, la resistencia de un conductor eléctrico es la medida de la oposición que presenta al movimiento de los electrones, o sea la oposición que presenta al paso de la corriente eléctrica. Generalmente su valor es muy pequeño y por ello se suele despreciar, pero existen casos particulares en los que se debe tener en cuenta su resistencia.

La resistencia cuadrada de un conductor (o semiconductor) depende de la longitud del mismo ( $l$ ) en m, de su sección ( $S$ ) en  $m^2$  que a su vez depende de la longitud y del espesor de la muestra ( $e$ ), del tipo de material y de la temperatura (ver figura 2.8). Si consideramos la temperatura constante, la resistencia viene dada por la siguiente expresión:

$$R_{\square} = \rho \frac{l}{S} \Rightarrow R_{\square} = \rho \frac{l}{l \cdot e} \Rightarrow \rho = R_{\square} \cdot e$$

en la que  $\rho$  es la resistividad, una característica propia de cada material. De este modo, si se conoce su longitud y área de superficie por donde atraviesa la corriente eléctrica, y se mide su resistencia cuadrada, se puede calcular la resistividad de un material con facilidad.



**Figura 2.8:** Esquema de la técnica de resistencia cuadrada

## **Hipótesis**

La eficiencia de los colectores solares mejora con el uso de recubrimientos transparentes selectivos. Estos reducen las pérdidas por radiación del sistema ya que tienen la propiedad de ser transparentes a la radiación solar y en cambio reflejan la radiación infrarroja emitida por el tubo colector.

## **Objetivo**

Comprobar la factibilidad de mejorar la eficiencia de un colector foto-térmico de geometría cilíndrica mediante el uso de recubrimientos con propiedades transparentes selectivas.

## **Metas**

- Cálculo teórico de la eficiencia energética de un colector solar tubular con cubierta transparente selectiva.
- Diseño del colector solar de geometría cilíndrica con recubrimiento transparente selectivo.
- Construcción de un prototipo a nivel de laboratorio ( $\approx 50$  cm).
- Medición de la eficiencia energética del colector solar con y sin recubrimiento selectivo.

## Capítulo 3. Modelo teórico del colector solar cilíndrico

### 3.1 Planteamiento del problema físico

Un colector solar térmico consta básicamente de un tubo de cobre, cuya superficie esté tratada de forma que absorba la mayor parte de la radiación solar, rodeado por una cubierta de vidrio transparente a la radiación solar. La función de la cubierta es aislar térmicamente al colector y originar el efecto invernadero, el cual es el principio fundamental del aprovechamiento de la energía solar térmica.

En este trabajo se plantearán las ecuaciones del balance energético para los elementos principales del colector.

La radiación solar incide sobre la cubierta, la cual de acuerdo con sus propiedades ópticas, refleja parte de la radiación incidente, absorbe otra parte y otra parte la atraviesa. Esta última incide sobre el tubo absorbente, y éste a su vez refleja parte de la radiación y otra parte es absorbida.

La radiación solar total absorbida por el tubo de vidrio (cubierta) será

$$I_{S_c} = I_0 - I_{0r} - I_{0t} + I_{S_{ctc}} \quad (\text{e.1.1})$$

donde:  $I_{S_c}$  es la radiación solar total absorbida por la cubierta,  $I_0$  es la radiación solar incidente en la cubierta,  $I_{0r}$  es la radiación solar reflejada por la cubierta,  $I_{0t}$  es la radiación solar transmitida por la cubierta y  $I_{S_{ctc}}$  es la fracción de energía que al ser transmitida por la cubierta incide sobre el tubo de cobre y nuevamente es reflejada hacia la cubierta y absorbida.

Del mismo modo la radiación solar total absorbida por el tubo colector será:

$$I_{S_t} = I_{0t} - (I_{0t})_r + I_{S_{tct}} \quad (\text{e.1.2})$$

donde:  $I_{S_t}$  es la radiación solar total absorbida por el tubo colector,  $I_{0t}$  es la radiación solar transmitida por la cubierta,  $(I_{0t})_r$  es la radiación solar transmitida por la cubierta y reflejada por el tubo colector  $I_{S_{tct}}$  es la fracción de la energía que al ser reflejada por el tubo colector incide sobre la cubierta y nuevamente es reflejada hacia el tubo colector y absorbida.

La radiación solar total absorbida por la cubierta interviene en su balance energético, la cual podemos expresar por medio de la siguiente relación:

$$I_{S_c} - \dot{q}_{c/A} - \dot{q}_{Ic} + \dot{q}_{t/c} = 0 \quad (\text{e.1.3})$$

donde:  $\dot{q}_{c/A}$  es el intercambio de energía por unidad de área y tiempo, entre la cubierta y el ambiente (por radiación y convección),  $\dot{q}_{Ic}$  es el aumento de la energía interna de la cubierta (por unidad de área y tiempo).

$\dot{q}_{t/c}$  es la energía intercambiada entre el tubo colector y la cubierta (por unidad de área y tiempo).

Análogamente el balance energético para el tubo colector será:

$$I_{S_t} - \dot{q}_{It} + \dot{q}_{t/c} = \dot{q}_d \quad (\text{e.1.4})$$

donde:

$\dot{q}_{It}$  es el aumento de energía interna del tubo.



$\dot{q}_{t/c}$  es el aumento de energía intercambiada entre el tubo y la cubierta (por convección) y

$\dot{q}_d$  es la energía disponible transferida al fluido.

Estas ecuaciones del balance energético se plantearán en una forma global para toda la cubierta y para todo el tubo colector considerando cada elemento a una temperatura media  $\bar{T}_c$  y  $\bar{T}_t$  respectivamente. Además, se planteará la ecuación diferencial del balance energético para un elemento diferencial del tubo colector.

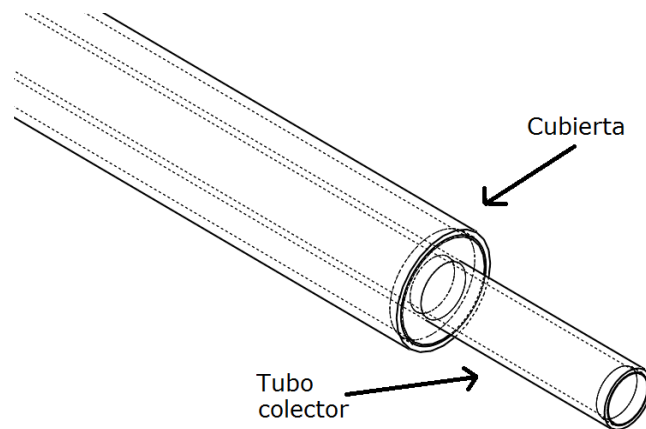
Estas ecuaciones nos permitirán evaluar las relaciones existentes entre cada término y la intensidad de radiación solar. Así mismo, por medio de la ecuación diferencial se puede calcular la distribución de temperaturas en el tubo colector, la temperatura media de la cubierta y la temperatura de fluido en la salida del colector.

Aunque las ecuaciones de balance se plantearán en el caso general, sólo se evaluará el régimen estacionario.

Además, suponemos conocido la intensidad de radiación solar ( $I_0$ ), la temperatura ambiente media ( $\bar{T}_a$ ), el flujo másico del fluido ( $\dot{m}$ ) y la temperatura del fluido a la entrada al colector, así como las propiedades de los materiales del colector y sus características de construcción.

## 3.2 Modelo Matemático del colector

La ecuación del balance de energía se planteó a un elemento diferencial del tubo colector que se encuentra a una temperatura  $T_t(x, y)$ , así se obtiene la ecuación diferencial que permita calcular la distribución de temperatura en el tubo colector, ver figura 3.1. El planteamiento de la ecuación global considerará una temperatura media para la cubierta y para todo el tubo colector.



**Figura 3.1:** Esquema representativo de la geometría del sistema

### 3.2.1 Aproximaciones y suposiciones

Dado que el problema real es demasiado complejo y no se justifica un análisis más exacto desde el punto de vista práctico, es necesario establecer ciertas aproximaciones para el planteamiento de la ecuación del balance de energía.

- a) Con respecto a la energía radiativa intercambiada entre el tubo colector y la cubierta consideramos:
  - Que la cubierta tiene una temperatura uniforme ( $\bar{T}_c$ ).
  - Que la temperatura de un punto del tubo colector no difiere mucho de la temperatura media  $\bar{T}_t$ , de manera que para considerar la energía

irradiada en algún punto del tubo podemos considerar indiferentemente  $T_t(x, y)$  o  $\bar{T}_t$ .

- Que ambas superficies son difusas, de tal manera que las propiedades radiativas no dependen de la dirección con que incide o emiten radiación.
- Que no existe aire encerrado entre el tubo colector y la cubierta, despreciando las pérdidas por convección y la absorción de radiación solar térmica.

b) Que el área del tubo absorbente es aproximadamente igual al área de la cubierta.

c) Que dadas las dimensiones del colector, las pérdidas por las paredes laterales del colector son despreciables.

d) Para calcular el coeficiente de transmisión de calor entre el tubo colector y la cubierta, suponemos ambas a una temperatura media  $\bar{T}_t$  y  $\bar{T}_c$ , respectivamente.

### **3.2.2 Formulación de la ecuación de balance energético**

#### **3.2.2.1 Radiación solar absorbida por los elementos del colector**

Según lo desarrollado en el planteamiento del problema físico, la intensidad de radiación solar absorbida por la cubierta es:

$$I_{S_c} = I_0 - I_{0r} - I_{0t} + I_{S_{ctc}} \quad (\text{e.2.1})$$

Considerando:

$$I_{0r} = \rho_c I_0$$

$$I_{0t} = \tau_c I_0 \quad \text{entonces}$$

$$I_0 \alpha_c = I_0 - I_0 \rho_c - I_0 \tau_c \quad \text{donde:}$$

$\alpha_c$  es la absorptividad hemisférica total para la radiación solar de la cubierta.

$\rho_c$  es la reflectividad hemisférica total para la radiación solar de la cubierta.

$\tau_c$  es la transmitividad hemisférica total para la radiación solar de la cubierta.

Según la definición de (e.1.1)  $I_{S_{ctc}}$  es la fracción de la energía que una vez transmitida por la cubierta incide sobre el tubo colector y éste nuevamente refleja parte hacia la cubierta, y parte es nuevamente absorbida por él. La parte que no es absorbida ni transmitida es reflejada por la cubierta hacia el tubo colector, la cual vuelve a reflejar una parte hacia la cubierta y parte nuevamente es absorbida por ella, este proceso se repite sucesivamente. Esta energía es calculada por recurrencia.

La cubierta transmite	$I_0 \tau_c$		
El tubo colector refleja	$I_0 \tau_c (1 - \alpha_t)$	absorbe	$I_0 \tau_c \alpha_t$
La cubierta absorbe	$I_0 \tau_c (1 - \alpha_t) \alpha_c$	refleja	$I_0 \tau_c (1 - \alpha_t) \rho_c$
El tubo colector refleja	$I_0 \tau_c (1 - \alpha_t)^2 \rho_c$	absorbe	$I_0 \tau_c (1 - \alpha_t) \alpha_t \rho_c$
La cubierta absorbe	$I_0 \tau_c \alpha_c (1 - \alpha_t)^2 \rho_c$	r.	$I_0 \tau_c (1 - \alpha_t)^2 \rho_c^2$
El tubo colector refleja	$I_0 \tau_c (1 - \alpha_t)^3 \rho_c^2$	a.	$I_0 \tau_c (1 - \alpha_t)^2 \alpha_t \rho_c^2$
La cubierta absorbe	$I_0 \tau_c \alpha_c (1 - \alpha_t)^3 \rho_c^2$	r.	$I_0 \tau_c (1 - \alpha_t)^3 \rho_c^3$
El tubo colector refleja	$I_0 \tau_c (1 - \alpha_t)^4 \rho_c^3$	a.	$I_0 \tau_c (1 - \alpha_t)^3 \alpha_t \rho_c^3$

y así sucesivamente, donde:

$\alpha_t$  es la absortividadad del tubo colector

Lo que absorbe la cubierta es:

$$I_0 \tau_c \alpha_c (1 - \alpha_t) (1 + (1 - \alpha_t) \rho_c + [(1 - \alpha_t) \rho_c]^2 + \dots)$$

$$\therefore I_{S_{ctc}} = \frac{I_0 \tau_c \alpha_c (1 - \alpha_t)}{1 - (1 - \alpha_t) \rho_c} \quad (\text{e.2.2})$$

luego:

$$I_{S_c} = \alpha_c I_0 + \frac{I_0 \tau_c \alpha_c (1 - \alpha_t)}{1 - (1 - \alpha_t) \rho_c} \quad (\text{e.2.3})$$

De la misma manera la intensidad de radiación solar absorbida por el tubo colector será:

$$I_{S_t} = I_{0t} - (I_{0t})_r + I_{S_{ctc}} \quad (\text{e.2.4})$$

considerando:

$$I_{0t} = I_0 \tau_c \quad \text{y}$$

$$(I_{0t})_r = I_0 \tau_c (1 - \alpha_t)$$

$$I_{0t} - (I_{0t})_r = I_0 \tau_c \alpha_t$$

Según la definición de e.1.1,  $I_{S_{ctc}}$  es la fracción de la energía reflejada por el tubo colector que al incidir sobre la cubierta parte es nuevamente reflejada hacia el tubo

colector y parte absorbida, la parte que no es absorbida es nuevamente reflejada hacia la cubierta y así sucesivamente se repite el proceso indefinidamente. De acuerdo a la recurrencia desarrollada anteriormente:

Lo que el tubo colector absorbe es:

$$I_0 \tau_c \alpha_t \left( (1 - \alpha_t) \rho_c + [(1 - \alpha_t) \rho_c]^2 + \dots \right)$$

de manera que:

$$I_{S_t} = I_0 \tau_c \alpha_t \left( (1 - \alpha_t) \rho_c + [(1 - \alpha_t) \rho_c]^2 + \dots \right)$$

$$I_{S_t} = \frac{I_0 \tau_c \alpha_t}{1 - (1 - \alpha_t) \rho_c}$$

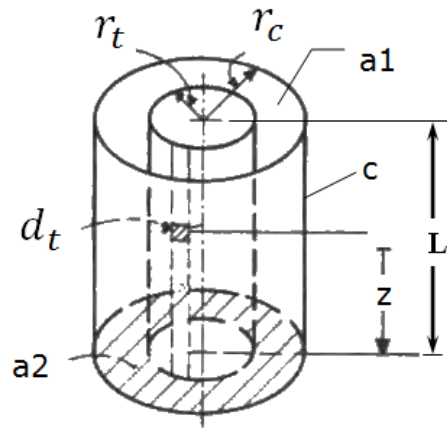
(e.2.5)

### 3.2.2.2 Intercambio de energía térmica entre los elementos del colector por radiación

Considerando únicamente el tubo colector y la cubierta, el intercambio de energía térmica se realiza por radiación debido al vacío dentro del colector. Para este intercambio radiativo se considera únicamente radiación infrarroja, o sea, la que es emitida por ambas superficies. Anteriormente ya se ha considerado el intercambio radiativo respecto a la radiación solar que es una longitud de onda más corta.

En el intercambio radiativo debemos considerar las sucesivas reflexiones entre el tubo colector y la cubierta. A diferencia de la radiación solar, el tubo colector y la cubierta son opacos para la radiación infrarroja.

Primero se planteará el intercambio radiativo entre el elemento diferencial del tubo colector y el elemento diferencial de la cubierta.



**Figura 3.2:** Esquema representativo del intercambio radiativo entre tubo y cubierta

La fracción de la intensidad de radiación emitida (solo emitida) por el elemento del tubo colector y que llega al elemento de la cubierta es:

$$dI_{dt \rightarrow dc} = \frac{\sigma \varepsilon_t T_t^4}{\pi} \frac{\cos \theta}{r^2} (dA_c \cos \theta)$$

(e.2.6)

Se denotará por  $d_t$  al elemento del tubo colector y por  $d_c$  al elemento de cubierta.

Se mantendrá la notación durante todo el trabajo.

La fracción de la intensidad emitida por el elemento de la cubierta y que llega al elemento del tubo colector es:

$$dI_{dc \rightarrow dt} = \frac{\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4}{\pi} \frac{\cos \theta}{r^2} (dA_t \cos \theta)$$

(e.2.7)

Así, el flujo total emitido por toda la cubierta y que llega al elemento del tubo colector será:

$$d\dot{Q}_{c \rightarrow dt} = \int_{A_c} \left( \frac{\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4}{\pi} \frac{\cos \theta}{r^2} dA_t \right) dA_c$$

(e.2.8)

y lo que llega a todo el tubo colector es:

$$d\dot{Q}_{c \rightarrow t} = \int_{A_t} \left( \int_{A_c} \left( \frac{\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4}{\pi} \frac{\cos \theta}{r^2} \right) dA_c \right) dA_t$$

(e.2.9)

Según la figura 3.2 la ecuación (e.2.8) queda:

$$d\dot{Q}_{c \rightarrow t} = \sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow dt} dA_t$$

El factor de vista  $F_{c \rightarrow dt}$  representa la fracción de la energía que es emitida por toda la cubierta y que incide sobre un elemento  $dA_t$  del tubo colector. De igual manera,



$F_{c \rightarrow t}$  es la fracción de la energía emitida por toda la cubierta y que llega a todo el tubo colector. Estos factores dependen solamente de la geometría del sistema, o sea de la forma y la posición relativa de ambas superficies.

Así, la ecuación que gobierna el factor de vista es:

$$F_{dt \rightarrow a2} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \cos^{-1} \left( \frac{C - 2R^2}{C - 2} \right) - \frac{ZC}{\sqrt{C^2 - 4R^2}} \cos^{-1} \left[ \frac{C - 2R^2}{R(C - 2)} \right] + Z \cos^{-1} \left( \frac{1}{R} \right) \right\}$$

(e.2.10)

definiendo

$$Z = z/r_t; R = r_c/r_t; C = Z^2 + R^2 + 1$$

Para  $F_{t \rightarrow a1}$  se reemplaza  $z$  por  $L - z$

así:

$$F_{dt \rightarrow c} + F_{dt \rightarrow a1} + F_{dt \rightarrow a2} = 1$$

$$dA_t F_{dt \rightarrow e} = A_e F_{e \rightarrow dt}$$

$$F_{c \rightarrow dt} = \frac{1 - F_{dt \rightarrow a1} - F_{dt \rightarrow a2}}{2\pi r_c L} \cdot r_t d\phi dz$$

$$F_{c \rightarrow \emptyset 1} = \int_0^{2\pi} \frac{1 - F_{dt \rightarrow a1} - F_{dt \rightarrow a2}}{2\pi r_c L} \cdot r_t d\phi dz = \frac{1 - F_{dt \rightarrow a1} - F_{dt \rightarrow a2}}{r_c L} \cdot r_t dz$$

La última expresión es el factor de vista de la cubierta (c) hacia el anillo diferencial en el tubo colector.

$$\frac{F_{c \rightarrow \emptyset 1}}{2\pi r_t dz} = \frac{F_{dt \rightarrow c}}{2\pi r_c L} = \frac{(1 - F_{dt \rightarrow a1} - F_{dt \rightarrow a2})}{2\pi r_c L}$$

(e.2.11)

Luego el flujo emitido por la cubierta que llega al elemento del tubo colector es:

$$d\dot{Q}_{c \rightarrow dt} = \sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow dt} dA_t$$

(e.2.12)

donde:  $\varepsilon_c$  es la emisividad de la cubierta

y por unidad de área de tubo colector:  $\dot{q}_{c \rightarrow dt} = \sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow dt}$

El flujo total emitido por la cubierta y que llega a todo el tubo colector será:

$$\dot{Q}_{c \rightarrow t} = \sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow t} A_t$$

(e.2.13)

y por unidad de área de tubo colector

$$\dot{q}_{c \rightarrow t} = \sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow t}$$

Así mismo se puede calcular el flujo total emitido por el tubo colector y que llega a toda la cubierta, pero considerando que el tubo colector tiene una temperatura

uniforme. Se utiliza esta aproximación solo para considerar el intercambio radiativo entre el tubo colector y la cubierta.

$$\dot{Q}_{t \rightarrow c} = \sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4 F_{c \rightarrow t} A_t$$

(e.2.14)

donde:  $\varepsilon_t$  es la emisividad del tubo colector

y por unidad de área de de la cubierta:  $\dot{q}_{t \rightarrow c} = \sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4 F_{t \rightarrow c}$

Para encontrar el flujo de energía intercambiada entre el elemento del tubo colector y la cubierta por unidad de área, se debe considerar además las sucesivas reflexiones entre el tubo colector y la cubierta de la radiación emitida por ambas superficies.

Se considerarán primero las reflexiones para la radiación emitida por la cubierta:

la cubierta	emite	
(C)	$e$	$\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4$
el elemento	absorbe	
(dt)	$a$	$\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow dt} \bar{\alpha}_t$
el tubo colector		
(T)	$a$	$\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow t} \bar{\alpha}_t$
	refleja	
T	$r$	$\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow t} (1 - \bar{\alpha}_t)$

$C$	$a$	$\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow t}^2 (1 - \bar{\alpha}_t) \bar{\alpha}_c$
$C$	$r$	$\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow t}^2 (1 - \bar{\alpha}_t) (1 - \bar{\alpha}_c)$
$dt$	$a$	$\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow dt} F_{c \rightarrow t}^2 (1 - \bar{\alpha}_t) (1 - \bar{\alpha}_c) \bar{\alpha}_t$
$T$	$a$	$\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow t}^3 (1 - \bar{\alpha}_t) (1 - \bar{\alpha}_c) \bar{\alpha}_t$
$T$	$r$	$\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow t}^3 (1 - \bar{\alpha}_t)^2 (1 - \bar{\alpha}_c)$
$C$	$a$	$\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow t}^4 (1 - \bar{\alpha}_t)^2 (1 - \bar{\alpha}_c) \bar{\alpha}_c$
$C$	$r$	$\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow t}^4 (1 - \bar{\alpha}_t)^2 (1 - \bar{\alpha}_c)^2$
$dt$	$a$	$\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow dt} F_{c \rightarrow t}^4 (1 - \bar{\alpha}_t)^2 (1 - \bar{\alpha}_c)^2 \bar{\alpha}_t$
$T$	$a$	$\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow t}^5 (1 - \bar{\alpha}_t)^2 (1 - \bar{\alpha}_c) \bar{\alpha}_t$

El proceso continúa indefinidamente.

En total de lo que emite la cubierta, el elemento del tubo colector absorbe por unidad de área.

$$\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow dt} \bar{\alpha}_t (1 + F_{c \rightarrow t}^2 (1 - \bar{\alpha}_t) (1 - \bar{\alpha}_c) + [F_{c \rightarrow t}^2 (1 - \bar{\alpha}_t) (1 - \bar{\alpha}_c)]^2 + \dots)$$

llamando:

$$f_R = F_{c \rightarrow t}^2 (1 - \bar{\alpha}_t) (1 - \bar{\alpha}_c)$$

esta energía es:

$$\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow dt} \bar{\alpha}_t (1 - f_R)^{-1}$$

(e.2.15)

De forma análoga, se calcula la energía absorbida por todo el tubo colector, por unidad de área.

$$\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow t} \bar{\alpha}_t (1 + F_{c \rightarrow t}^2 (1 - \bar{\alpha}_t)(1 - \bar{\alpha}_c) + [F_{c \rightarrow t}^2 (1 - \bar{\alpha}_t)(1 - \bar{\alpha}_c)]^2 + \dots)$$

que es igual a:

$$\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow t} \bar{\alpha}_t (1 - f_R)^{-1}$$

(e.2.16)

Por otra parte, lo que emite el tubo colector y que por sucesivas reflexiones es absorbido por él mismo o por el elemento  $dA_t$  se calculará de la misma forma según la siguiente recurrencia. Para ello se considera una temperatura media del tubo colector  $\bar{T}_t$ .

$T$	$e$	$\sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4$
$C$	$a$	$\sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4 F_{t \rightarrow c} \bar{\alpha}_c$
$C$	$r$	$\sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4 F_{t \rightarrow c} (1 - \bar{\alpha}_c)$
$dt$	$a$	$\sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4 F_{dt \rightarrow c} F_{t \rightarrow c} (1 - \bar{\alpha}_c) \bar{\alpha}_t$
$T$	$a$	$\sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4 F_{t \rightarrow c}^2 (1 - \bar{\alpha}_c) \bar{\alpha}_t$
$T$	$r$	$\sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4 F_{t \rightarrow c}^2 (1 - \bar{\alpha}_c)(1 - \bar{\alpha}_t)$
$C$	$a$	$\sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4 F_{t \rightarrow c}^3 (1 - \bar{\alpha}_c)(1 - \bar{\alpha}_t) \bar{\alpha}_c$
$C$	$r$	$\sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4 F_{t \rightarrow c}^3 (1 - \bar{\alpha}_c)^2 (1 - \bar{\alpha}_t)$

$$\begin{aligned}
dt \quad a \quad & \sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4 F_{dt \rightarrow c} F_{t \rightarrow c}^3 (1 - \bar{\alpha}_c)^2 (1 - \bar{\alpha}_t) \bar{\alpha}_t \\
T \quad a \quad & \sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4 F_{t \rightarrow c}^4 (1 - \bar{\alpha}_c)^2 (1 - \bar{\alpha}_t) \bar{\alpha}_t \\
T \quad r \quad & \sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4 F_{t \rightarrow c}^4 (1 - \bar{\alpha}_c)^2 (1 - \bar{\alpha}_t)^2
\end{aligned}$$

y así sucesivamente.

Así mismo, lo emitido por el tubo colector es absorbido por el elemento unidad de área:

$$\sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4 F_{dt \rightarrow c} (1 - \bar{\alpha}_t) F_{c \rightarrow dt} \bar{\alpha}_t (1 + F_{t \rightarrow c}^2 (1 - \bar{\alpha}_c) (1 - \bar{\alpha}_t) + \dots)$$

o sea

$$\sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4 F_{dt \rightarrow c} F_{c \rightarrow dt} (1 - \bar{\alpha}_c) \bar{\alpha}_t (1 - f_R)^{-1}$$

(e.2.17)

y el tubo colector absorberá:

$$\sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4 F_{t \rightarrow c}^2 (1 - \bar{\alpha}_c) \bar{\alpha}_t (1 - f_R)^{-1}$$

(e.2.18)

Por lo tanto, el balance radiativo para el elemento  $dA_t$  del tubo colector será:

$$-\sigma \varepsilon_t T_t^4 + \frac{\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow dt} \bar{\alpha}_t}{1 - f_R} + \frac{\sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4 (1 - \bar{\alpha}_c) \bar{\alpha}_t F_{dt \rightarrow c} F_{c \rightarrow dt}}{1 - f_R}$$

$$(e.2.19)$$

y para todo el tubo colector:

$$-\sigma\varepsilon_t T_t^4 + \frac{\sigma\varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow t} \bar{\alpha}_t}{1 - f_R} + \frac{\sigma\varepsilon_t \bar{T}_t^4 (1 - \bar{\alpha}_c) \bar{\alpha}_t F_{t \rightarrow c} F_{c \rightarrow t}}{1 - f_R}$$

$$(e.2.20)$$

De igual manera, analizando las relaciones para las múltiples reflexiones de la radiación emitida por el tubo colector y la cubierta se puede calcular la radiación total absorbida por la cubierta, de esta forma, de lo emitido por el tubo colector, la cubierta absorbe:

$$\sigma\varepsilon_t \bar{T}_t^4 F_{t \rightarrow c} \bar{\alpha}_c (1 + F_{t \rightarrow c}^2 (1 - \bar{\alpha}_c)(1 - \bar{\alpha}_t) + \dots)$$

o sea

$$\sigma\varepsilon_t \bar{T}_t^4 F_{t \rightarrow c} \bar{\alpha}_c (1 - f_R)^{-1}$$

$$(e.2.21)$$

y de lo que ella misma emite absorberá:

$$\sigma\varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{t \rightarrow c} F_{c \rightarrow t} \bar{\alpha}_c (1 - \bar{\alpha}_t) (1 - f_R)^{-1}$$

$$(e.2.22)$$

El balance radiativo de la cubierta, tomando en cuenta estas dos últimas ecuaciones será:

$$-\sigma\varepsilon_c\bar{T}_c^4 + \frac{\sigma\varepsilon_c\bar{T}_c^4 F_{c\rightarrow t} F_{t\rightarrow c} (1 - \bar{\alpha}_t) \bar{\alpha}_c}{1 - f_R} - \frac{\sigma\varepsilon_t\bar{T}_t^4 F_{t\rightarrow c} \bar{\alpha}_c}{1 - f_R}$$

(e.2.23)

En estas relaciones se debe tener en cuenta que las cantidades  $\bar{\alpha}_c$  y  $\bar{\alpha}_t$  son las absorptividades de la cubierta y del tubo colector respectivamente para la radiación infrarroja.

### 3.2.2.3 Pérdidas del colector al ambiente

En esta parte se considerarán las pérdidas por convección entre la cubierta y el ambiente, además del intercambio radiativo entre la cubierta y la atmósfera. Por otro lado, en base a las aproximaciones y suposiciones ya explicadas, se despreciarán las pérdidas a través de las paredes laterales del colector.

#### 3.2.2.3.1 Por convección entre la cubierta y el ambiente

De acuerdo con la ecuación para flujo laminar  $\bar{h}_{c\rightarrow a}$  Çengel en 2002 es igual a:

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \Rightarrow \bar{h}_{c\rightarrow a} = \frac{k_a Nu}{D_c}$$

(e.2.24)



donde:  $Ra$  es el número de Rayleigh,  $Pr$  es el número de Prandtl,  $Nu$  es el número de Nusselt,  $k_a$  es el coeficiente conductivo de transferencia de calor y  $D_c$  es el diámetro de la cubierta.

Para obtener la densidad de flujo que pierde la cubierta por convección forzada del aire ambiente, se debe multiplicar el coeficiente de transferencia  $\bar{h}_{c \rightarrow a}$  por la diferencia de temperaturas entre la cubierta y el aire ambiente ( $\bar{T}_c - \bar{T}_a$ ).

### 3.2.2.3.2 Por intercambio radiativo entre la cubierta y la atmósfera

Anteriormente se ha considerado un intercambio de radiación solar entre la cubierta y el tubo colector, así como un intercambio de radiación térmica entre estos dos elementos, en este punto se analizará el intercambio de radiación térmica entre la cubierta y la atmósfera. Se considerará a la atmósfera como una cavidad semiesférica a una temperatura media  $\bar{T}_A$ , la cual *Whillies* considera como:

$$\bar{T}_A = \bar{T}_a - 6 \quad [ \equiv ] \text{ } ^\circ\text{C}$$

(e.2.25)

Sin embargo, el análisis es más complejo pues la irradiancia atmosférica depende de muchos factores meteorológicos, así como la nubosidad, humedad relativa, etc.

En este trabajo se considerará a la atmósfera como un cuerpo negro a una temperatura  $\bar{T}_A$  que envuelve totalmente a la cubierta. De acuerdo a las suposiciones ya explicadas y considerando sólo el intercambio radiativo entre la cubierta y la atmósfera, la energía neta que por unidad de tiempo y de área abandona la cubierta será:

$$-\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 + \sigma \bar{T}_A^4 \bar{\alpha}_c$$

(e.2.26)

### 3.2.2.4 Variación de la energía interna de los elementos del colector

En el caso estacionario, cuando la temperatura de los elementos del colector esta variando, se produce también una variación en la energía interna de cada elemento. Así, si ésta aumenta, dicha energía es proveída por parte de la energía solar absorbida por el elemento, lo que significa una disminución de la energía útil disponible en ese instante. Sin embargo, para evaluaciones diarias del sistema su influencia es menor dado que necesariamente dicha energía absorbida es devuelta por el elemento debido a que podemos considerar que tanto al comenzar el día como al terminar los elementos del colector se van a encontrar a la misma temperatura.

Para el elemento diferencial  $dA_t$  del tubo colector, la variación de su energía interna por unidad de área y de tiempo es igual a:

$$\rho_t e_t c_{v_t} \frac{\partial T_t}{\partial t}$$

(e.2.27)

donde:  $\rho_t$  es la densidad del tubo colector,  
 $e_t$  su espesor,  
 $c_{v_t}$  su calor específico a volumen constante.

Análogamente, para todo el tubo colector la variación de su energía interna por unidad de tiempo es:

$$\rho_t e_t c_{v_t} \frac{\partial \bar{T}_t}{\partial t} A_t$$

(e.2.28)

donde:  $A_t$  es el área de la placa.

Por unidad de área será:

$$\rho_t e_t c_{v_t} \frac{\partial \bar{T}_t}{\partial t}$$

(e.2.29)

De la misma forma, la variación de energía interna por unidad de tiempo para toda la cubierta será:

$$\rho_c e_c A_c \frac{\partial \bar{T}_c}{\partial t}$$

y por unidad de área,

$$\rho_c e_c c_{v_c} \frac{\partial \bar{T}_c}{\partial t}$$

(e.2.30)

donde:  $\rho_c$  es la densidad de la cubierta,

$e_c$  su espesor,

$c_{v_c}$  su calor específico a volumen constante.

### 3.2.2.5 Ecuaciones totales del balance energético

Para sintetizar, se formulará la ecuación total del balance energético para los elementos del colector. Primero para el elemento diferencial del tubo colector considerando además el flujo neto de calor a través de sus secciones transversales y luego las ecuaciones globales para el tubo colector y la cubierta.

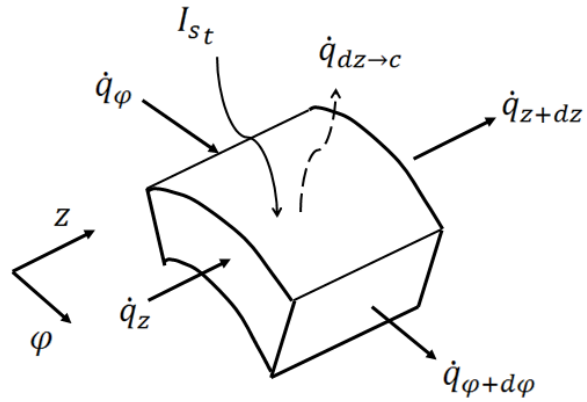
#### 3.2.2.5.1 Para el elemento diferencial del tubo colector

De acuerdo a las ecuaciones (2.5), (2.19), (2.24) y (2.27) la energía neta por unidad de área y de tiempo intercambiada por el elemento  $dA_t$  del tubo colector con sus alrededores es:

$$\frac{I_0 \tau_c \alpha_t}{1 - (1 - \alpha_t) \rho_c} - \sigma \varepsilon_t T_t^4 + \frac{\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow dt} \bar{\alpha}_t}{1 - f_R} + \frac{\sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4 (1 - \bar{\alpha}_c) \bar{\alpha}_t F_{dt \rightarrow c} F_{c \rightarrow dt}}{1 - f_R} - h_f (T_t - \bar{T}_f) - \rho_t e_t c_{v_t} \frac{\partial T_t}{\partial t}$$

(e.2.31)

Esta energía debe ser igual al elemento de la densidad de flujo a través de las secciones transversales del tubo colector. En la figura 3.3 se muestra esquemáticamente dichos flujos:



**Figura 3.3:** Esquema representativo de flujo de energía a través del tubo colector

Considerando simetría azimutal, el balance anterior debe ser igual a:

$$(\dot{q}_{z+dz} + \dot{q}_z)$$

(e.2.32)

Pero por la ley de Fourier de la conducción:

$$\dot{q}_z = -k_t \left. \frac{\partial T_t}{\partial z} \right|_z$$

(e.2.33)

y  $\dot{q}_{z+dz}$  lo podemos obtener por el desarrollo de Taylor de  $\dot{q}_z$  en el punto  $z$ .

$$\dot{q}_{z+dz} = \dot{q}_z + \frac{\partial \dot{q}_z}{\partial z} dz + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \dot{q}_z}{\partial z^2} (dz)^2 + \dots$$

(e.2.34)

según las ecuaciones (2.33) y (2.34) el flujo neto en la dirección  $z$  considerando solamente los dos primeros términos del desarrollo de Taylor es:

$$(\dot{q}_{z+dz} - \dot{q}_z)e_t dy = k_t \left. \frac{\partial^2 T_t}{\partial z^2} \right|_z e_t dz dy$$

Por lo tanto la densidad de flujo neta será:

$$k_t e_t \frac{\partial^2 T_t}{\partial z^2}$$

(e.2.35)

y la ecuación total del balance energético para el elemento  $dA_t$  la obtenemos sumando las ecuaciones (2.31) y (2.35) e igualando a cero:

$$\frac{I_0 \tau_c \alpha_t}{1 - (1 - \alpha_t) \rho_c} - \sigma \varepsilon_t T_t^4 + \frac{\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow dt} \bar{\alpha}_t}{1 - f_R} + \frac{\sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4 (1 - \bar{\alpha}_c) \bar{\alpha}_t F_{dt \rightarrow c} F_{c \rightarrow dt}}{1 - f_R} - h_f (T_t - \bar{T}_f) - \rho_t e_t c_{v_t} \frac{\partial T_t}{\partial t} + k_t e_t \frac{\partial^2 T_t}{\partial z^2} = 0$$

(e.2.36)

### 3.2.2.5.2 Para todo el tubo colector

En este caso la expresión es similar a la del elemento diferencial solo que se debe considerar una densidad de flujo total de energía disponible ( $\dot{q}_d$ ). De acuerdo a las

ecuaciones (2.5), (2.20) y (2.29), este flujo total de energía disponible por unidad de área será:

$$\dot{q}_d = \frac{I_0 \tau_c \alpha_t}{1 - (1 - \alpha_t) \rho_c} - \sigma \varepsilon_t T_t^4 + \frac{\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow t} \bar{\alpha}_t}{1 - f_R} + \frac{\sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4 (1 - \bar{\alpha}_c) \bar{\alpha}_t F_{t \rightarrow c} F_{c \rightarrow t}}{1 - f_R} - \rho_t e_t c_{v_t} \frac{\partial \bar{T}_t}{\partial t}$$

(e.2.37)

Este calor disponible ( $\dot{q}_d$ ) es la energía útil por unidad de área del tubo colector entregada al fluido, o sea:

$$\dot{q}_d = \frac{\dot{m}_f C_f}{A_t} (\bar{T}_{fs} - \bar{T}_{fe})$$

(e.2.38)

donde:  $\dot{m}_f$  es el flujo másico del fluido

$C_f$  es el calor específico del fluido

$\bar{T}_{fs}$  es la temperatura media de salida del fluido

$\bar{T}_{fe}$  es la temperatura media de entrada del fluido.

Así:

$$\frac{I_0 \tau_c \alpha_t}{1 - (1 - \alpha_t) \rho_c} - \sigma \varepsilon_t T_t^4 \left[ 1 - \frac{(1 - \bar{\alpha}_c) \bar{\alpha}_t F_{t \rightarrow c} F_{c \rightarrow t}}{1 - f_R} \right] + \sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 \frac{F_{c \rightarrow t} \bar{\alpha}_t}{1 - f_R}$$

$$- \rho_t e_t c_{vt} \frac{\partial \bar{T}_t}{\partial t} = \frac{\dot{m}_f C_f}{2 \pi r_t L} (\bar{T}_{fs} - \bar{T}_{fe})$$

(e.2.39)

### 3.2.2.5.3 Para toda cubierta

De acuerdo a las ecuaciones (2.3), (2.23), (2.24), (2.26) y (2.30) y a lo desarrollado en la sección 2.2.3.1, el balance energético para toda la cubierta será:

$$\frac{I_0 \alpha_c [1 + (1 - \alpha_t) (\tau_c - \rho_c)]}{1 - (1 - \alpha_t) \rho_c} - \sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 + \frac{\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow t} F_{t \rightarrow c} (1 - \bar{\alpha}_t) \bar{\alpha}_c}{1 - f_R}$$

$$- \frac{\sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4 F_{t \rightarrow c} \bar{\alpha}_c}{1 - f_R} - \sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 + \sigma \bar{T}_A^4 \bar{\alpha}_c - h_{c \rightarrow a} (\bar{T}_c - \bar{T}_a) = \rho_c e_c c_{vc} \frac{\partial \bar{T}_c}{\partial t}$$

ó

$$\frac{I_0 \alpha_c [1 + (1 - \alpha_t) (\tau_c - \rho_c)]}{1 - (1 - \alpha_t) \rho_c} - \sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 \left[ 2 - \frac{(1 - \bar{\alpha}_t) \bar{\alpha}_c F_{c \rightarrow t} F_{t \rightarrow c}}{1 - f_R} \right] - \sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4 \frac{F_{t \rightarrow c} \bar{\alpha}_c}{1 - f_R}$$

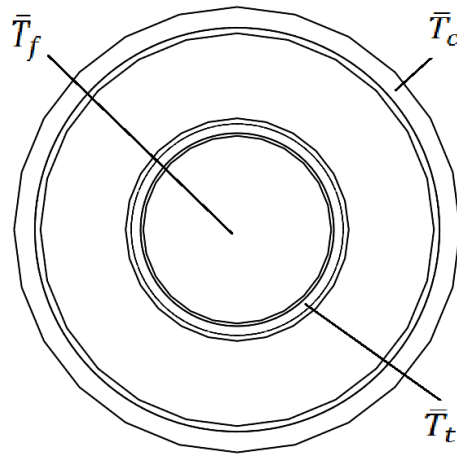
$$+ \sigma \bar{T}_A^4 \bar{\alpha}_c - h_{c \rightarrow a} (\bar{T}_c - \bar{T}_a) = \rho_c e_c c_{vc} \frac{\partial \bar{T}_c}{\partial t}$$

(e.2.40)



### 3.2.3 Transmisión del calor al fluido

La transferencia de calor hacia el fluido depende del coeficiente de transferencia entre la pared interior del tubo y el fluido.



**Figura 3.4:** Esquema geométrico del problema

En la figura 3.4 se muestra la geometría del problema. Se denota por  $\bar{T}_c$  la temperatura media de la cubierta,  $\bar{T}_t$  la temperatura media del tubo colector y  $\bar{T}_f$  la temperatura media del fluido.

El flujo de calor por unidad de longitud del tubo al fluido será:

$$\dot{q}_d = h_{t \rightarrow f}(\bar{T}_t - \bar{T}_f)$$

(e.2.41)

donde:  $h_{t \rightarrow f}$  es el coeficiente convectivo de transferencia de calor del tubo al fluido hallado en la sección.

La transferencia de calor del tubo al fluido no sólo se ve afectada por los aspectos fluido-mecánicos del fluido en el interior del tubo, sino que también, con el tiempo

sobre sus paredes interiores se depositan adherencias minerales que además de afectar el fluido, forman una capa de material con conductividad diferente a las paredes del tubo.

### **3.3 Análisis y solución de las ecuaciones del balance energético**

Hasta el momento se han planteado las ecuaciones del balance energético para un elemento diferencial  $dA_t$  del tubo colector, para todo el tubo colector y para toda la cubierta; además de la ecuación de transferencia de calor del tubo colector al fluido. En esta sección se planteará una ecuación adimensional para la ecuación diferencial del elemento del tubo colector, se definirán los parámetros adimensionales y se harán suposiciones que simplifiquen y permitan una solución práctica al análisis de los valores para cada término de la ecuación diferencial.

Los casos que se pueden presentar son fundamentalmente dos:

- Régimen estacionario
- Régimen no estacionario o transitorio

Además, en cada caso se puede considerar que:

- El flujo de calor en la dirección  $y$  es despreciable ó
- que dicho flujo es tomado en cuenta en el balance energético

En este trabajo solo se analizará la solución de la ecuación diferencial del elemento del tubo colector para el caso estacionario y con flujo despreciable en la dirección  $y$ .

#### **3.3.1 Planteamiento de la ecuación diferencial adimensional**

La ecuación diferencial para el balance energético de un elemento del tubo colector es:

$$\frac{I_0 \tau_c \alpha_t}{1 - (1 - \alpha_t) \rho_c} - \sigma \varepsilon_t T_t^4 + \frac{\sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 F_{c \rightarrow dt} \bar{\alpha}_t}{1 - f_R} + \frac{\sigma \varepsilon_t \bar{T}_t^4 (1 - \bar{\alpha}_c) \bar{\alpha}_t F_{dt \rightarrow c} F_{c \rightarrow dt}}{1 - f_R} - h_f (T_t - \bar{T}_f) - \rho_t e_t c_{v_t} \frac{\partial T_t}{\partial t} + k_t e_t \frac{\partial^2 T_t}{\partial Z^2} = 0$$

Para convertirla en una ecuación adimensional definimos las siguientes variables adimensionales:

$$Z = \frac{z}{L}; \Theta(Z) = \frac{T_t(Z)}{T_t(0)}; \Upsilon = \frac{t}{\frac{\rho_t c_{v_t} L^2}{k_t}}$$

(e.3.1)

donde:

La longitud  $L$ , así como los parámetros  $T_t$ ,  $\rho_t$ ,  $c_{v_t}$  y  $k_t$  ya han sido definidos anteriormente.

Reemplazando en la ecuación las variables  $z$ ,  $T_t$  y  $t$  en función de las adimensionales y multiplicando por  $\frac{L^2}{k_t e_t T_t(0)}$ , reordenando se obtiene:

$$\frac{\partial^2 \Theta(Z)}{\partial Z^2} - \frac{\sigma \varepsilon_t L^2 T_t^3}{k_t e_t} \left[ 1 - \frac{(1 - \bar{\alpha}_c) \bar{\alpha}_t \cdot F_{t \rightarrow c} \cdot F_{c \rightarrow t}}{1 - f_R} \right] \Theta^4(Z) - \frac{L^2 h_f}{k_t e_t} \Theta(Z) + \frac{I_0 \tau_c \alpha_t}{1 - (1 - \alpha_t) \rho_c} + \sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 \frac{F_{c \rightarrow dt} \bar{\alpha}_t}{1 - f_R} - h_f \bar{T}_f = \frac{\partial \Theta(Z)}{\partial \Upsilon}$$

(e.3.2)

Se definen los parámetros adimensionales:

$$A = \frac{\sigma \varepsilon_t L^2 T_t^3}{k_t e_t} \left[ 1 - \frac{(1 - \bar{\alpha}_c) \bar{\alpha}_t \cdot F_{t \rightarrow c} \cdot F_{c \rightarrow t}}{1 - f_R} \right]; B = \frac{L^2 h_f}{k_t e_t}$$

$$y \quad C = \frac{I_0 \tau_c \alpha_t}{1 - (1 - \alpha_t) \rho_c} + \sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 \frac{F_{c \rightarrow dt} \bar{\alpha}_t}{1 - f_R} - h_f \bar{T}_f$$

De acuerdo a lo desarrollado en la introducción de esta sección, de los casos posibles sólo se desarrollará el caso estacionario  $\left( \frac{\partial \Theta(Z)}{\partial Y} \right) = 0$ .

de manera que la ecuación queda:

$$\frac{\partial^2 \Theta(Z)}{\partial Z^2} - A \Theta^4(Z) - B \Theta(Z) + C = 0$$

(e.3.3)

Las condiciones de frontera de esta ecuación son:

$$T_t(0) = T_0 \quad \frac{dT_t(L)}{dz} = 0$$

$$\Theta(0) = 1 \quad \frac{d\Theta(1)}{dZ} = 0$$

Cada uno de los parámetros adimensionales de la ecuación general los podemos interpretar de la siguiente manera:

$$A = \frac{\sigma \varepsilon_t L^2 T_t^3}{k_t e_t} \left[ 1 - \frac{(1 - \bar{\alpha}_c) \bar{\alpha}_t \cdot F_{t \rightarrow c} \cdot F_{c \rightarrow t}}{1 - f_R} \right]$$

Es la relación de la energía emitida a la energía disponible.

$$B = \frac{L^2 h_f}{k_t e_t}$$

Es la relación de la energía perdida por conducción y convección a la energía disponible.

$$C = \frac{I_0 \tau_c \alpha_t}{1 - (1 - \alpha_t) \rho_c} + \sigma \varepsilon_c \bar{T}_c^4 \frac{F_{c \rightarrow dt} \bar{\alpha}_t}{1 - f_R} - h_f \bar{T}_f$$

Es la relación de la energía total que es absorbida por el tubo colector a la energía disponible.

### 3.3.2 Solución analítica aproximada de la ecuación diferencial y método de análisis

La ecuación (3.3) puede resolverse analíticamente si consideramos la función  $\Theta(Z)$  como:

$$\Theta(Z) = 1 + \psi(Z)$$

(e.3.4)

donde:  $\psi(Z) < 0.1$

Esta suposición se justifica experimentalmente, para muchas situaciones en las que trabaja un colector solar. En caso contrario, la solución puede obtenerse por métodos numéricos.

Desarrollando  $\Theta^4$  en función de  $\psi$  y despreciando los términos que contienen potencia mayores o iguales a dos, se obtiene:

$$\Theta^4(Z) = 1 + 4\psi(Z) + \delta(\psi^2)$$

(e.3.5)

donde:  $\delta(\psi^2)$  *error de aproximación*

Este error es  $|\delta(\psi^2)| \leq 0.0641$

La ecuación (3.3) queda en función de  $\psi$  como:

$$\frac{d^2\psi}{dZ^2} - (A + B)\psi + (C - A - B) = 0$$

(e.3.6)

Las condiciones frontera se transforman a:

$$\Theta(0) = 1 \quad \psi(Z = 0) = 0$$

$$\frac{d\theta(1)}{dZ} = 0 \quad \frac{d\psi(1)}{dZ} = 0$$

Por lo tanto, definiendo  $\psi_t$  como:

$$\psi_t = \frac{C - A - B}{4A + B}$$

se puede expresar la ecuación (3.6) en función de  $\psi_t^*(Z) = \psi(Z) - \psi_t$  obteniendo:

$$\frac{d^2\psi^*}{dZ^2} - (4A + B)\psi^* = 0$$

(e.3.7)

cuyas condiciones frontera son:

$$\psi^*(Z = 0) = -\psi_t \quad y \quad \left. \frac{d\psi_t^*(1)}{dZ} \right|_{Z=0} = 0$$

La solución general a la ecuación (3.7) será:

$$\psi^*(Z) = C_1 \cosh(\omega Z) + C_2 \sinh(\omega Z)$$

(e.3.8)

$$\frac{d\psi^*(Z)}{dZ} = C_1 \omega \sinh(\omega Z) + C_2 \omega \cosh(\omega Z)$$

(e.3.9)

donde:  $\omega = (4A + B)^{1/2}$

y las constantes  $C_1$  y  $C_2$  se obtienen de las condiciones frontera:

$$C_1 = -\psi_t \text{ y } C_2 = -C_1 \tanh \omega$$

así:  $C_2 = \psi_t \tanh \omega$

de manera que la solución general será:

$$\psi^*(Z) = -\psi_t \cosh(\omega Z) + \psi_t \tanh(\omega) \sinh(\omega Z)$$

$$\psi(Z) = -\psi_t [-1 + \cosh(\omega Z)] + \psi_t \tanh(\omega) \sinh(\omega Z)$$

$$\Theta(Z) = 1 - \psi_t [-1 + \cosh(\omega Z)] + \psi_t \tanh(\omega) \sinh(\omega Z)$$

$$T_t(Z = L) = T_t(Z = 0) \left[ 1 - \psi_t \left( -1 + \cosh(\omega) - \frac{\sinh^2(\omega)}{\cosh(\omega)} \right) \right]$$

$$T_t(Z) = T_t(Z = 0) \Theta\left(\frac{Z}{L}\right)$$



$$T_t(z) = T_0 \left[ 1 - \psi_t \left( -1 + \cosh \left( \omega \frac{z}{L} \right) \right) + \psi_t \tanh(\omega) \sinh \left( \omega \frac{z}{L} \right) \right]$$

(e.3.10)

A partir de esta distribución de temperatura se puede encontrar la temperatura media del tubo colector:

$$\bar{T}_t = \int_0^L \frac{T(z)}{L} dz$$

$$\bar{T}_t = T_0 \left( 1 - \psi_t \left( \frac{\sinh(\omega)}{\omega} - 1 \right) + \frac{\psi_t \tanh(\omega)}{\omega} (\cosh(\omega) - 1) \right)$$

(e.3.11)

Así mismo, podemos definir la eficiencia del colector  $\eta_c$  como la relación de la energía útil absorbida por el fluido a la recibida por el colector, ésta será:

$$\eta_c = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_s - T_e)}{I \cdot A}$$

(e.3.12)

donde  $\dot{m}$  es el flujo másico de agua

$c_p$  es el calor específico del agua

$T_s$  y  $T_e$  son las temperaturas de salida y entrada del agua

$I$  es la radiación solar

y  $A$  es el área de la cubierta del colector.

### 3.3.2.1 Método de Análisis

Hasta el momento se han encontrado expresiones para  $T_t(z)$  y  $\bar{T}_t$ , pero en ellas intervienen cantidades aún desconocidas, tales como  $\bar{T}_c$  y  $\bar{T}_f$ . Por lo tanto, para determinar la distribución de temperatura en todo el tubo colector se necesitarán métodos iterativos, teniendo que suponer inicialmente algunos valores desconocidos, los cuales al final de cada proceso serán comprobados y afinados repitiendo el proceso. Así, el análisis incluirá el desarrollo analítico obtenido y además métodos numéricos. A continuación se describe íntegramente el método a seguir para obtener la distribución de temperatura en todo el tubo colector y el incremento de temperatura en el fluido. Además, este método permitirá analizar la influencia de algunos parámetros climatológicos y otros de construcción y funcionamiento.

Las cantidades que se considerarán conocidos son:

a) Las condiciones climatológicas determinadas por  $I_0$  y  $\bar{T}_a$

b) Las características de construcción del colector:

– geométricas:  $L, r_t, r_c, e_t, e_c$

– propiedades físicas de los materiales:

conductivas térmicas  $k_t$

radiativas  $\alpha_c, \tau_c, \rho_c, \varepsilon_c, \bar{\alpha}_c, \alpha_t, \varepsilon_t, \bar{\alpha}_t$

calores específicos  $c_{v_t}, c_{v_c}$

c) Las condiciones de funcionamiento

– el flujo másico  $\dot{m}$

– la temperatura media de entrada del fluido  $\bar{T}_{fe}$

Por lo tanto, a partir de las condiciones conocidas, se pueden calcular los factores de visión  $F_{dz \rightarrow c}$ ,  $F_{c \rightarrow dz}$  y  $F_{t \rightarrow c}$ ,  $F_{c \rightarrow t}$ , de manera que las únicas cantidades desconocidas son:  $\bar{T}_c$ ,  $\bar{T}_t$  y  $\bar{T}_{fs}$ .

Para determinar estas cantidades se debe suponer conocido  $\bar{T}_{fs}$  y  $\bar{T}_c$ , asignándole un valor aproximado, así se obtiene un valor aproximado de  $\bar{T}_t$ , luego a partir de la ecuación (3.11) se puede evaluar  $\bar{T}_t$ . Conociendo este valor y basándose en la ecuación (2.40) se obtiene  $\bar{T}_c$  a través de un método iterativo, si el valor supuesto inicialmente  $\bar{T}_{c_{approx}}$  difiere en más de 0.001 del valor obtenido  $\bar{T}_c$  se debe repetir el procedimiento utilizando ahora este valor ( $\bar{T}_c$ ).

Así, cuando se conoce el valor apropiado de  $\bar{T}_c$ , a partir de la ecuación (2.39) se obtiene  $\bar{T}_{fs}$ .

## Capítulo 4. Métodos experimentales

### 4.1 Recubrimientos

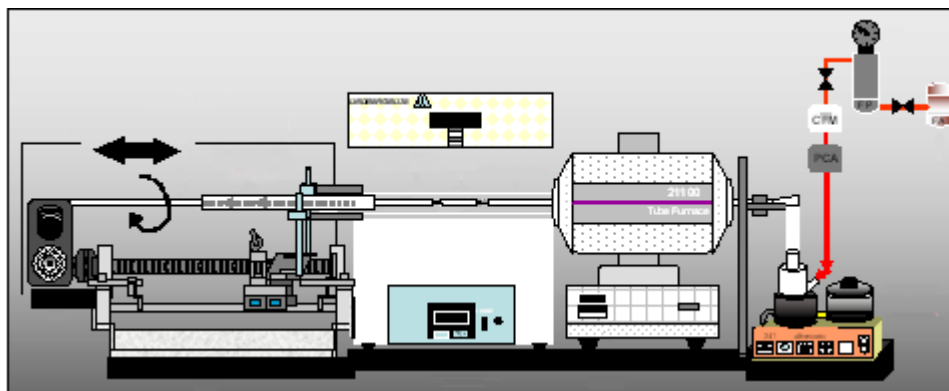
#### 4.1.1 Síntesis

Los recubrimientos transparentes selectivos fueron depositados inicialmente en sustratos planos ( $12 \times 3 \text{ cm}$ ) a una concentración de  $0.1 \text{ mol dm}^{-3}$  de cloruro estánico (J.T. Baker  $> 98\%$ ) en metanol absoluto, variando la temperatura de depósito: 573, 623, 673 y 273 K. Se utilizó el sistema reportado previamente en la literatura [Synthesis, structural characterization and optical properties of multilayered Yttria-stabilized ZrO<sub>2</sub> thin films obtained by aerosol assisted chemical vapour deposition. *Thin Solid Films* 516 (2008) 8282–8288]. Esta variación de temperatura se realizó con el fin de encontrar una temperatura óptima de depósito. Obtenida esta temperatura óptima, se depositaron recubrimientos a diversas concentraciones: 0.093, 0.095, 0.097 y 0.099  $\text{mol dm}^{-3}$  de cloruro estánico en metanol absoluto añadiéndoles un dopante, fluoruro de amonio (J.T. Baker  $> 98\%$ ), a concentraciones de 0.007, 0.005, 0.003 y 0.001  $\text{mol dm}^{-3}$  respectivamente. Estos recubrimientos en sustrato planos fueron utilizados para optimizar la concentración de la solución dopada, y así obtener un recubrimiento que cumpliera con las características ópticas necesarias.

Una vez optimizada la concentración de la solución precursora, se depositó al interior de tubos de vidrio pyrex por medio de la técnica de depósito de vapor químico asistido por aerosol en un sistema mejorado, similar al reportado con anterioridad [Thin films of photo-catalytic TiO<sub>2</sub> and ZnO inside a tubing obtained by spray pyrolysis. M. Miki-Yoshida, V. Collins-Martínez, P. Amézaga-Madrid, and A. Aguilar-Elguezabal. *Thin Solid Films* 419 (2002) 60 - 64.]. Las dimensiones de los tubos fueron diámetro interno de 13 mm y una longitud de 600 mm. El esquema de principio del sistema de depósito es ilustrado en la figura 4.1. El tubo de borosilicato se montó concéntricamente a una bayoneta fija, de inyección y succión, por medio de un soporte rotante y deslizante. La bayoneta fue conectada por el lado inyector a un nebulizador que actuó como atomizador. Dos hornos fueron

utilizados para calentar el tubo, un horno de precalentamiento tubular modelo 21100 de Thermolyne (Estados Unidos), y el horno de depósito Lindberg Blue modelo TF55030A (Estados Unidos) ambos con control de temperatura preciso ( $\pm 1\text{K}$ ). La temperatura de depósito fue fijada a 723 K mientras que la de precalentamiento fue de 423 K.

El proceso empezó con la generación del aerosol de la solución precursora en el nebulizador. Las soluciones usadas fueron diluciones de  $0.097\text{ mol dm}^{-3}$  de cloruro estánico y  $0.003\text{ mol dm}^{-3}$  de fluoruro de amonio en metanol absoluto. Posteriormente, el aerosol fue transmitido por medio del gas de arrastre hacia la bayoneta de inyección, pasando por el horno de precalentamiento, y suministrado directamente al tubo caliente dentro del horno de depósito.



**Figura 4.1:** Esquema ilustrativo del sistema de depósito

El gas de arrastre fue aire microfiltrado; la presión de succión y el flujo de aire fueron mantenidos a  $34.5\text{ kPa}$  y  $50\text{ cm}^3\text{ s}^{-1}$ , respectivamente. Así mismo, la temperatura del horno de precalentamiento fue mantenida a  $373\text{ K}$ , mientras que la del horno de depósito fue de  $723\text{ K}$ . Estas condiciones de operación, temperatura, parámetros químicos, gas de arrastre y velocidad son necesarias para asegurar la reacción de depósito y el desarrollo de la película. Además, el tubo de borosilicato se puso en un soporte móvil que le da tanto un desplazamiento axial, como rotatorio, con el propósito de obtener depósitos homogéneos a través de todo el tubo. La velocidad de desplazamiento del tubo fue de aproximadamente  $13.7\text{ mm min}^{-1}$ .

**Tabla 4.1.** Condiciones de síntesis de las muestras analizadas.

MUESTRA	Sustrato plano								Tubo	
	A	B	C	D	E	F	G	H	1	2
Concentración Sn ( $\text{mol dm}^{-3}$ )	0.1	0.1	0.1	0.1	0.093	0.095	0.097	0.099	0.097	0.097
Concentración F ( $\text{mol dm}^{-3}$ )	-	-	-	-	0.007	0.005	0.003	0.001	0.003	0.003
Temperatura (K)	573	623	673	723	723	723	723	723	723	723

#### 4.1.2 Caracterización

Para determinar contaminantes potenciales y para establecer la morfología de la superficie y la microestructura de la sección transversal de los recubrimientos, las muestras fueron analizadas por SEM. Este análisis se llevó a cabo en un microscopio electrónico de barrido JSM7401F de Jeol (Japón), acoplado con un espectrómetro de discriminación de energía de rayos X modelo Inca Oxford.

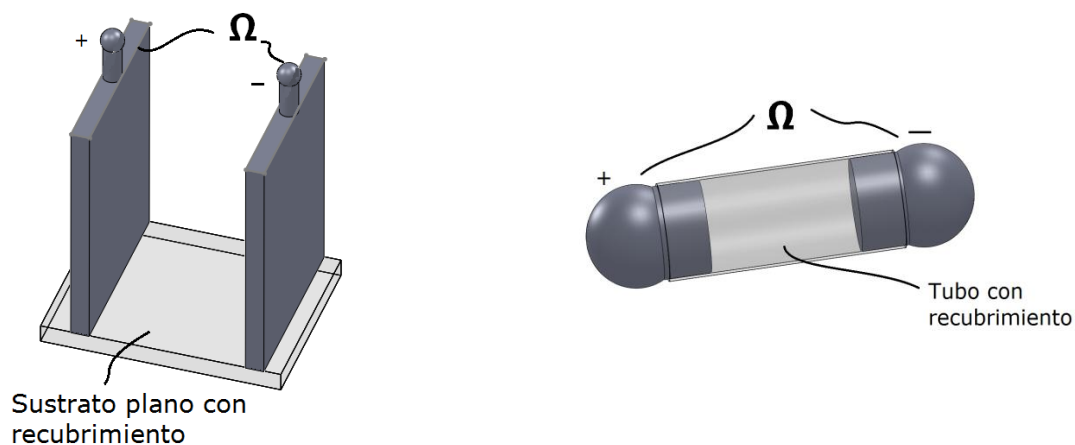
Así mismo, se obtuvieron espectros UV-visible e infrarrojo cercano (300-3300 nm) de transmitancia y reflectancia en un espectrofotómetro modelo Cary 5000 (Estados Unidos). Los recubrimientos depositados en sustratos planos fueron analizados para obtener la concentración que presentó mejor reflectancia a la radiación infrarroja.

Una vez obtenida esta concentración óptima, fue depositada en tubos; muestras fueron cortadas azimutal y axialmente para analizar sólo una fase del recubrimiento. Así mismo, se cortó un tubo sin recubrimiento para usarlo como blanco. Estas mismas piezas fueron utilizadas en el análisis por SEM.

Patrones de difracción de rayos X se obtuvieron usando un difractómetro de rayos modelo X'pertPRO de Panalytical (Estados Unidos) a 40 kV y 35 mA. A partir de estos espectros se evaluó la estructura, la distancia interplanar y la intensidad de difracción de rayos X.

Por otro lado, fueron medidas las resistencias cuadradas para los recubrimientos depositados en sustratos planos y en tubos. Estas resistencias fueron medidas,

como se representa en la figura 4.2, colocando electrodos conectados a un multímetro de banco modelo 2000 de Keithley en cada lado de la muestra. A partir de éstas, y de los espesores de la película, se calcularon las resistividades para cada película.

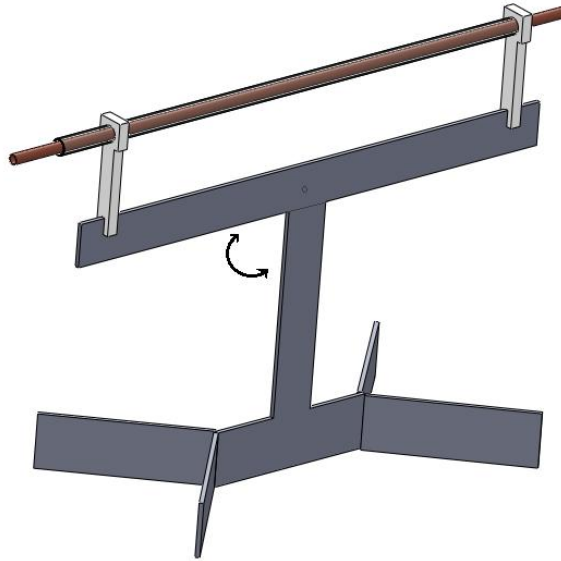


**Figura 4.2:** Esquema representativo de la técnica de resistencias cuadradas, *iqz.* para recubrimientos en sustrato plano y *der.* para recubrimientos en tubo.

## 4.2 Colector

### 4.2.1 Descripción

El prototipo de dispositivo fue fabricado con un tubo colector de cobre de 9.5 mm de diámetro exterior, 1.5 mm de espesor y 600 mm de longitud. La cubierta consistió de un tubo de borosilicato de 15 mm de diámetro exterior, espesor de 1 mm y 500 mm de longitud, ver figura 4.2. El colector fue montado en un soporte ajustable al ángulo de inclinación deseado. Así mismo, fueron fabricados tapones de teflón para soportar la cubierta de vidrio sobre el tubo colector, así como uniones entre ambos tubos y el soporte declinable.

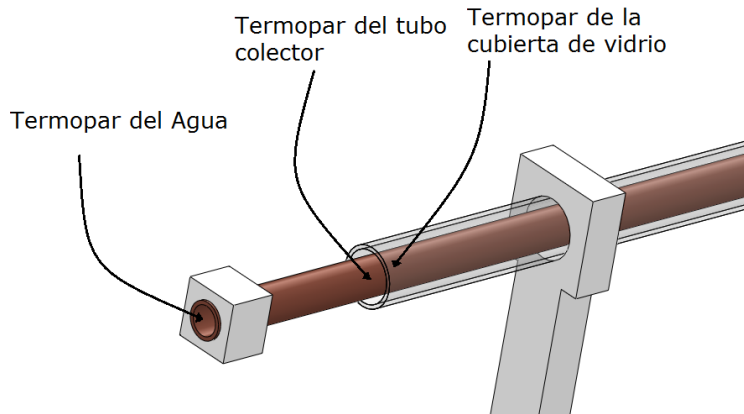


**Figura 4.2** Esquema representativo del prototipo del colector

#### **4.2.2 Mediciones**

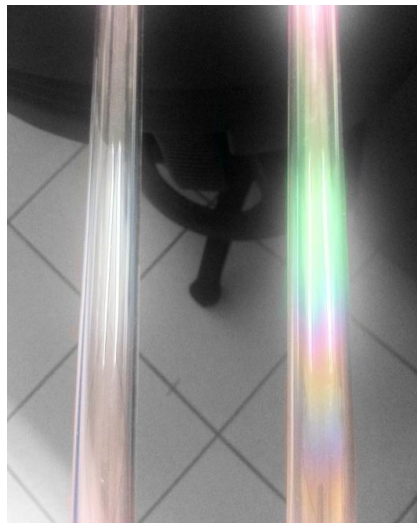
El colector fue puesto en operación usando agua como fluido de transporte, orientado hacia el sur con una declinación de  $13.8^\circ$  calculada usando la ecuación de Cooper para los días del año durante la medición (Duffie, 2006). Se utilizó una bomba peristáltica con controlador digital modelo Masterflex de Cole-Parmer (Estados Unidos) para asegurar el flujo controlado de agua a través del tubo. De la misma forma, se utilizó un registrador de datos modelo TC-08 de Pico Technology (Estados Unidos) con ocho canales para medición de temperaturas simultáneas. Se colocaron termopares tipo K, con precisión de centésimas de grado Celsius, en el colector para medir la temperatura a la entrada y salida del agua, temperatura del tubo colector a la entrada y a la salida, y la temperatura de la cubierta de vidrio a la entrada y a salida. Además, se utilizaron termopares para monitorear la temperatura del suministro de agua y la temperatura ambiente. La figura 4.3 muestra las posiciones de los termopares utilizados para monitorear las temperaturas. Los termopares del lado opuesto del colector tuvieron una configuración similar.





**Figura 4.3:** Configuración de las posiciones de los termopares usados en la medición.

El estudio consistió en obtener la variación de temperaturas de todo el sistema, con y sin recubrimiento selectivo en la cubierta, ver figura 4.4. Estas mediciones fueron hechas de manera transitoria con intervalos de medición de 1 segundo durante las dos horas de mayor incidencia solar de los días del estudio. Para cada caso se varió el flujo a través del tubo colector, transportando cada minuto el 30, 80, 160 y 180% de la capacidad total del tubo colector. Así, se obtuvieron ocho curvas de variación de las temperaturas del agua, tubo y cubierta, en función del tiempo.



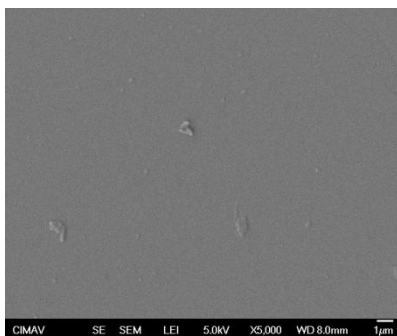
**Figura 4.4:** Fotografía de las cubiertas del colector: *izq.* sin recubrimiento, *der.* con recubrimiento selectivo.

## Capítulo 5. Presentación y discusión de resultados

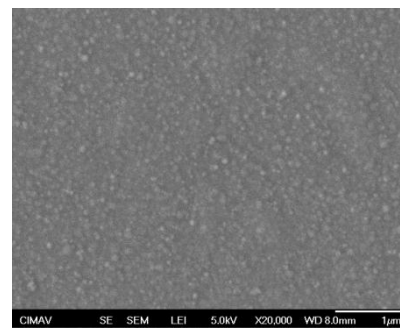
En la primera parte de este capítulo se presentan los resultados de la caracterización de las propiedades microestructurales, para los depósitos en sustrato plano y en tubo. Para continuar, se presenta la evaluación de las propiedades eléctricas para ambos tipos de depósito; y para finalizar, los resultados del estudio de eficiencia para el colector construido, sin recubrimiento y con recubrimiento selectivo.

### 5.1 Evaluación de las propiedades microestructurales

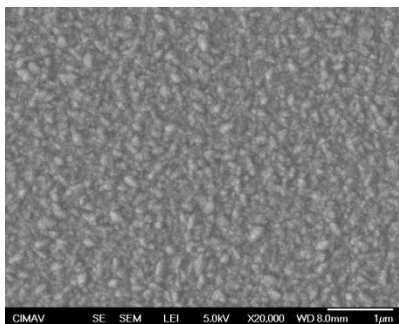
Los recubrimientos transparentes selectivos utilizados en este trabajo resultan interesantes debido a la propiedad de ser transparentes a la radiación solar y de reflejar la radiación infrarroja; este comportamiento es atribuido a las propiedades conductoras del material. Un aspecto vital para que este comportamiento se presente es el depósito del recubrimiento con buenas características, como son buena adherencia y uniformidad. En las micrografías de la figura 5.1 se puede observar como a bajas temperaturas de depósito se obtiene poca adherencia en el recubrimiento así como una topografía poco homogénea en la superficie; conforme se aumenta la temperatura de depósito, mejora a su vez la calidad del recubrimiento



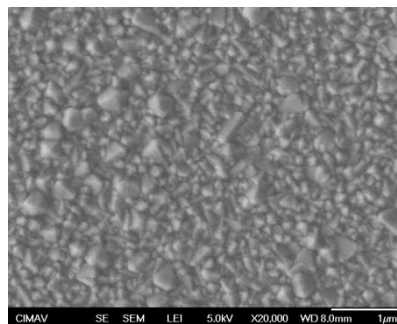
a)



b)



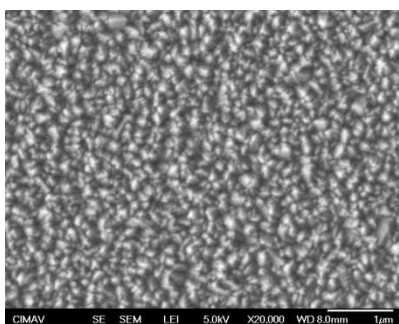
c)



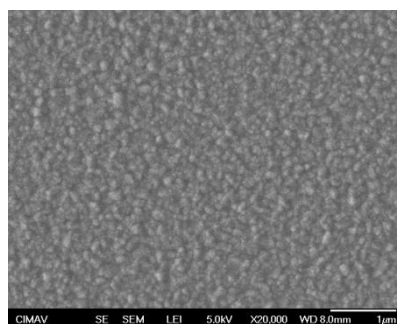
d)

**Figura 5.1:** Micrografías de morfología de la superficie a diferentes concentraciones de solución precursora, a) 573 K, b) 623 K, c) 673 K y d) 723 K.

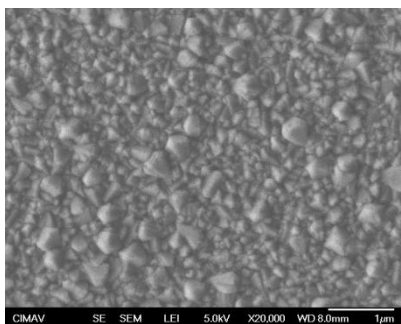
Al ser el depósito de mayor temperatura el de mejores características, y teniendo como limitante para el depósito la temperatura de ignición del solvente en la solución, para el metanol de 743 K, se optó por depositar los recubrimientos con dopante a 723 K. A estos recubrimientos se les varió la concentración con el fin de obtener un recubrimiento con características ópticas óptimas. Las micrografías de la figura 5.2 muestran depósitos de buena calidad, con una microestructura uniforme conformada por granos nanométricos compactos que cubren la totalidad de la superficie del sustrato.



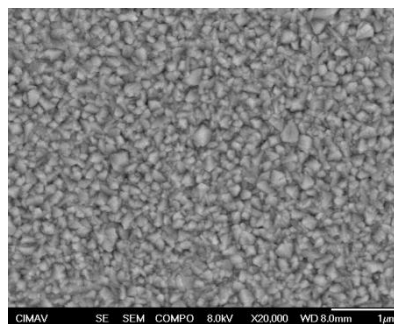
a)



b)



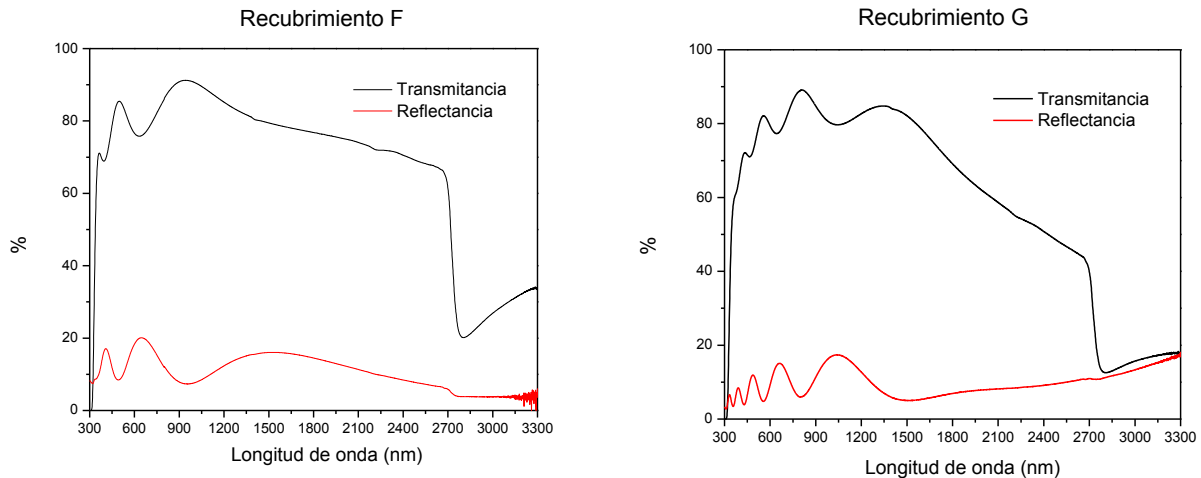
c)



d)

**Figura 5.2:** Micrografías de morfología de la superficie a diferentes concentraciones de F de la solución precursora, a)  $0.007 \text{ mol L}^{-1}$ , b)  $0.005 \text{ mol L}^{-1}$ , c)  $0.003 \text{ mol L}^{-1}$  y d)  $0.001 \text{ mol L}^{-1}$ .

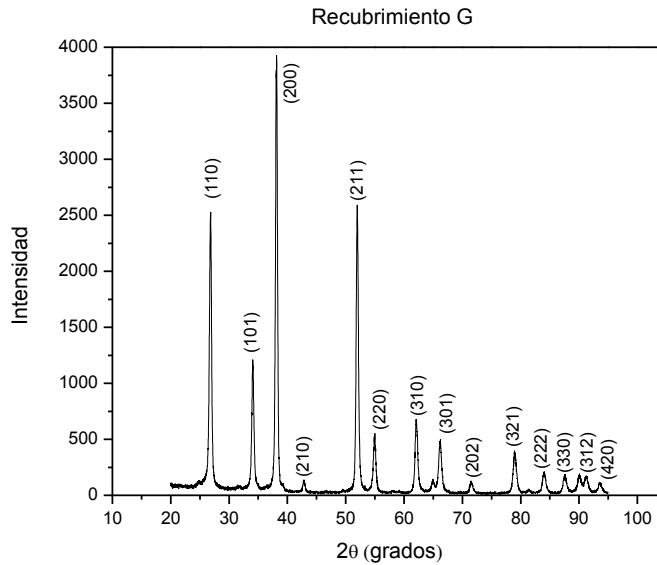
La característica de mayor interés de estos materiales es la capacidad de reflejar la radiación infrarroja. En este contexto, los resultados del estudio de transmitancia y reflectancia en espectro UV-vis -NIR nos permitió elegir una concentración de solución precursora que tuviera una reflectancia de la radiación IR cercana que mostrara una tendencia de incremento hacia las longitudes de onda mayores (alrededor de  $10 \mu\text{m}$ ). Es importante mencionar que no todos las películas sintetizadas en sustrato plano mostraron el comportamiento selectivo de interés. Por ejemplo, la figura 5.3 muestra el patrón de reflectancia y transmitancia de los recubrimientos F y G. Como se observa, el recubrimiento F no presenta un comportamiento reflectivo a la radiación infrarroja. Por el contrario, el mismo estudio óptico para el recubrimiento G hace evidente la alta transmitancia en el rango visible del espectro electromagnético, así como porcentajes de reflectancia aceptables y una tendencia a incrementarla hacia la radiación infrarroja. Este recubrimiento fue el que presentó una mayor reflectancia en el infrarrojo cercano, con tendencia a incrementarse hacia longitudes de onda mayores, por lo que es de esperarse un mejor comportamiento selectivo a la radiación infrarroja.



**Figura 5.3:** Patrón óptico de transmitancia y reflectancia, *izq.* para el recubrimiento F en sustrato plano y *der.* para el recubrimiento G.

Es por este comportamiento, que esta solución fue la elegida para depositarse en los tubos para posteriormente ser utilizada como cubierta en el colector solar térmico.

Es así que el patrón de difracción de rayos X realizado al recubrimiento transparente selectivo G en sustrato plano, ver figura 5.4, muestra intensidades reflejadas en los ángulos  $2\theta$  26, 33, 51, entre otros, que corresponden a la fase tetragonal de óxido de estaño reportada en la carta 01-077-0453, confirmando la formación de película de  $\text{SnO}_2$ . Es importante señalar que los picos coinciden con los reportados en la carta, y demuestran que no existe otra fase. Así mismo, las señales agudas con alta intensidad sugieren un material bien cristalino y con tamaño de grano grande. El tamaño de grano promedio fue calculado usando la fórmula de *Scherrer*, asumiendo que las microtensiones son despreciables como lo muestra el análisis MEB (ausencia de micro-fracturas).

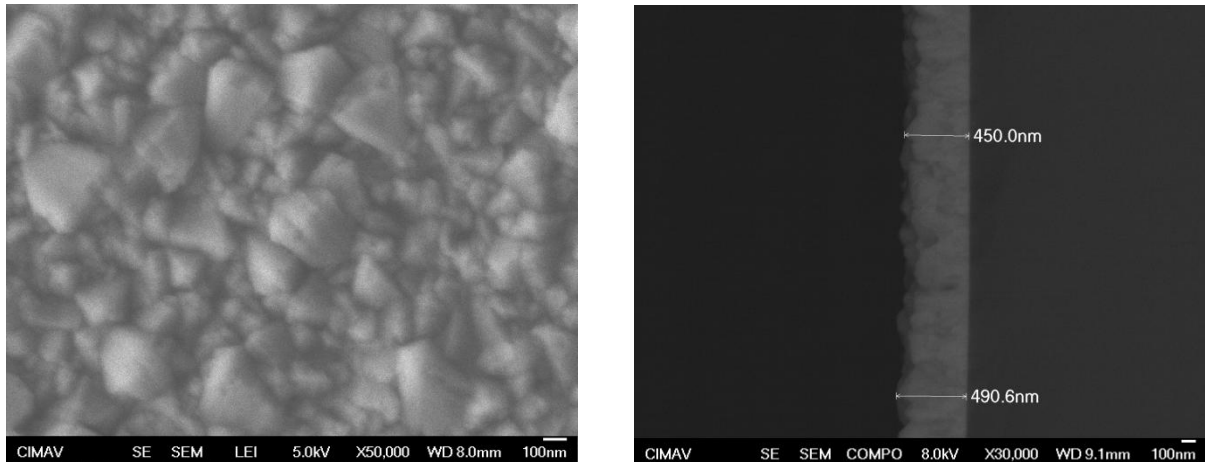


**Figura 5.4:** Patrón de difracción del recubrimiento G en sustrato plano

El tamaño de grano promedio se define como la dimensión media de cristalita perpendicular a la familia de plano de difracción. Según esta definición, la constante en la fórmula de *Scherrer* es tomado como 0.9; una muestra estándar de material de referencia, constituida por polvo de silicio 640c (NIST > 99.8% pureza) fue usada como estándar para la determinación del ancho instrumental. Esta medida fue tomada como el ancho de la mitad del pico máximo de cada reflexión en el patrón estándar. Se calculó el tamaño de grano para las reflexiones (110), (101), (200) y (211) del difractograma de rayos X, dando como resultado un promedio de tamaño de 74 nm.

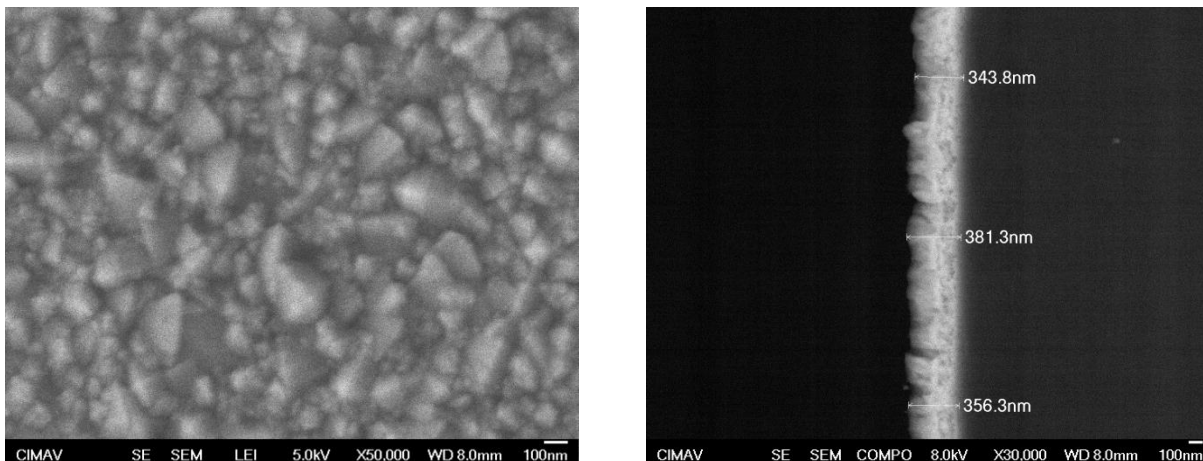
Esta morfología fue confirmada por las micrografías MEB; además de la morfología de la superficie, la microestructura de sección transversal fue analizada por medio de esta técnica. En la figura 5.5 se puede observar que los tamaños de grano calculados por difracción de rayos X son mayores a los obtenidos por MEB, como era de esperarse. Esta discrepancia puede atribuirse a la heterogeneidad de la película, en la cual los granos más grandes están expuestos a la superficie. Adicionalmente, la técnica MEB no siempre permite la observación de las cristalitas,

las cuales componen los granos observados. El espesor de la película fue obtenido gracias a la técnica MEB, resultando un grosor de 470 nm.



**Figura 5.5:** Micrografías MEB: *izq.* morfología de la superficie y *der.* microestructura de sección transversal en sustrato plano.

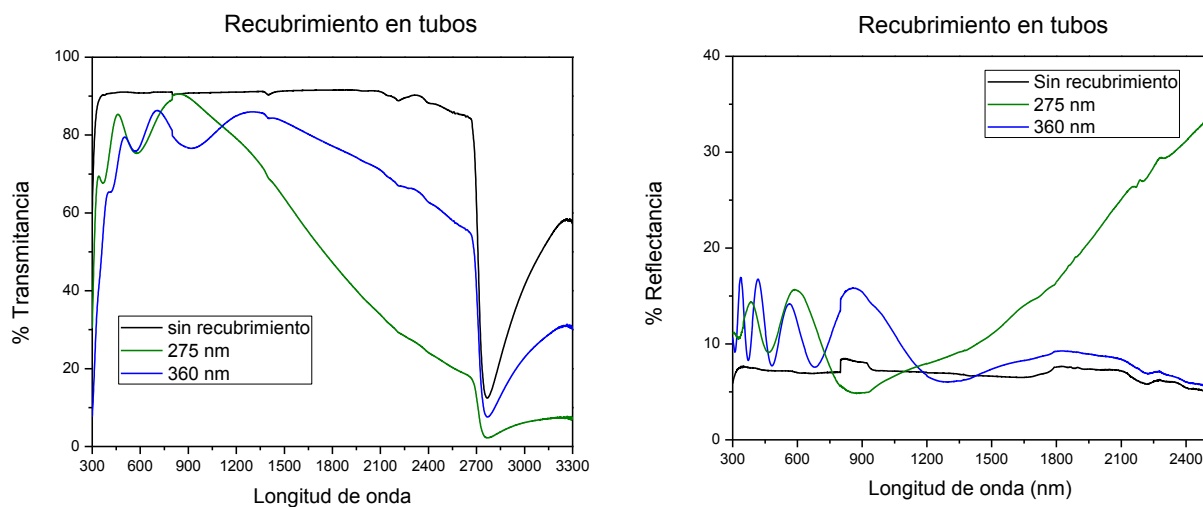
Una vez caracterizado el recubrimiento ideal, se analizó la morfología de la superficie y la microestructura de sección transversal para los recubrimientos en tubos de la misma manera que se realizó para los depósitos en sustratos planos, como se muestra en la figura 5.6. Se puede observar cómo el tamaño de grano es variado en la superficie de la película, de la misma manera que se observó en los depósitos en sustrato plano. Además, las micrografías de sección transversal permitieron obtener el espesor de la película depositada en los tubos, resultando alrededor de los 360 nm. Este espesor es ligeramente menor al obtenido en sustratos planos.



**Figura 5.6:** Micrografías MEB: *izq.* morfología de la superficie y *der.* microestructura de sección transversal en tubo.

Comparando las figuras 5.5 y 5.6 es evidente que los depósitos en sustratos planos y en tubos son homólogos como era de esperarse, la morfología de la superficie es muy similar tanto en forma como en tamaño, así como el espesor de película.

Así mismo, fueron evaluadas la transmitancia y reflectancia en espectro UV-vis – NIR de los recubrimientos depositados en los tubos. La figura 5.7 muestra los resultados del estudio óptico realizado a los recubrimientos depositados en tubos.



**Figural 5.7:** Espectros de *izq.* transmitancia y *der.* reflectancia, para los



recubrimientos 1 y 2 (360 y 275 nm respectivamente) en tubos.

Es interesante resaltar cómo el recubrimiento 2 en tubo (de 275 nm de espesor) muestra un comportamiento óptimo, haciendo evidente una alta transparencia en el rango de luz visible de  $0.4 < \lambda < 0.7 \mu m$ , y disminuyendo considerablemente esta transparencia hacia la radiación infrarroja del espectro electromagnético. Además, en el patrón óptico de reflectancia, manifiesta poca reflexión en el rango visible del espectro electromagnético y una tendencia ascendente marcada a reflejar la radiación infrarroja.

Por el contrario, el recubrimiento 1 en tubo (de 360 nm de espesor) mostró muy buena transmitancia en el rango de luz visible pero no se obtuvo el comportamiento esperado al irradiársele luz infrarroja. Ésto debido a que su transmitancia no decayó tan evidentemente como la de homólogo de espesor más delgado, mientras que su patrón de reflectancia nunca sugirió reflexión considerable a la luz infrarroja.

**Tabla 5.1:** Análisis óptico de transmitancia y reflectancia en infrarrojo cercano y solar según la norma ISO/DIS 13837.

	<b>ISO/DIS 13837</b>	<b>ISO/DIS 13837</b>	<b>T Promedio 3000-3300</b>	<b>R Promedio 3000-3300</b>
	<b>T solar</b>	<b>R solar</b>	<b>NIR</b>	<b>NIR</b>
<b>Muestra</b>				
A	77	9	15	4
B	81	13	31	4
C	78	10	17	15
D	80	11	29	10
Tubo sin rec.	91	7.2	52	7.5
1	78	10.9	7	11.9
2	78	10.7	28	13.1

Es importante señalar la alta reflexión infrarroja de la muestra C, así como la alta transparencia del recubrimiento 2 en tubo para la radiación infrarroja cercana. Así mismo, es importante resaltar que estos resultados de transmitancia obtenidos por medio de la norma ISO/DIS 13837 serán usados como referencia y tomados como parámetros de transmitancia para cálculos del modelo teórico.

## 5.2 Evaluación de las propiedades eléctricas

El comportamiento reflectivo a radiación infrarroja se debe a la propiedad conductora del recubrimiento selectivo. Una forma de evaluar esta propiedad es midiendo su resistividad. La tabla 5.2 muestra las resistividades calculadas a partir de las resistencias y los espesores medidos para cada recubrimiento depositado en sustrato plano y en tubo.

**Tabla 5.2:** Resistividad de los recubrimientos en sustrato plano y tubo.

MUESTRA	Sustrato plano				Tubo	
	E	F	G	H	1	2
<b>Espesor (nm)</b>	525	297	470	440	360	275
<b>Resistencia (ohm)</b>	49.2	311.7	64.5	162.5	200.0	17.0
<b>Resistividad (ohm cm<sup>-1</sup>)</b>	0.0026	0.0093	0.0030	0.0072	0.0720	0.0047

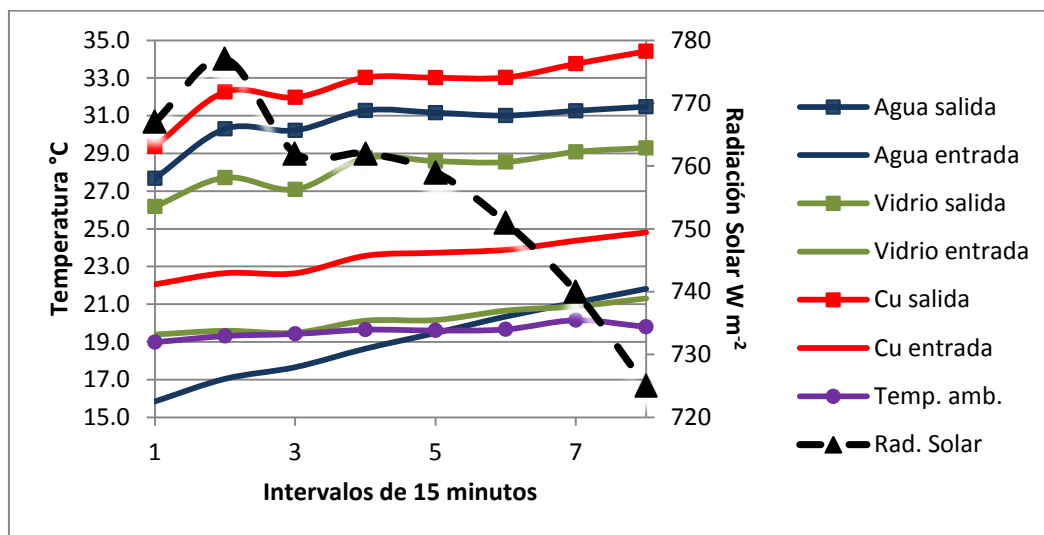
Es importante señalar que la resistividad obtenida en el tubo 2 confirma la buena reflexión a la radiación infrarroja. Este valor describe el comportamiento de un material frente al paso de corriente eléctrica, por lo que da una idea de lo buen o mal conductor que es. Un valor alto de resistividad indica que el material es mal conductor mientras que uno bajo indicará que es un buen conductor. El comportamiento conductivo del recubrimiento es el causante de la reflexión infrarroja.

### 5.3 Evaluación de la eficiencia

Es importante resaltar que el estudio de la evaluación de la eficiencia en el colector es de gran importancia, ya que permite medir de manera cuantitativa la interacción del recubrimiento transparente selectivo con el funcionamiento básico del colector.

En la primera parte del estudio se presentan los resultados de la evaluación de la eficiencia del colector sin el recubrimiento en la cubierta de vidrio. En la segunda parte, los resultados son discutidos en términos de los cambios observados en el comportamiento del colector al usar la cubierta de vidrio con el depósito del recubrimiento selectivo.

La figura 5.8 muestra un ejemplo gráfico representativo de las mediciones de las temperaturas en el colector (agua, cubierta vidrio, colector Cu). Estas mediciones se comenzaron a obtener a las 11:00 am el día 11 de noviembre del presente año durante dos horas en el colector sin recubrimiento, a un flujo másico de 30% respecto al volumen interior del tubo colector. Posteriormente fueron promediadas en intervalos de 15 minutos para su posterior análisis.



**Figura 5.8:** Gráfico representativo de mediciones promediadas en intervalos de 15 minutos.

#### 5.3.1 Colector sin recubrimiento

De las mediciones de temperatura adquiridas se puede obtener la eficiencia del colector. Este cálculo se realizó obteniendo un promedio de temperaturas medidas por intervalos de tiempo para poder utilizar éstos con los datos meteorológicos de radiación solar en condiciones similares y así calcular la eficiencia del colector para esos rangos de operación. La ecuación utilizada para calcular esta eficiencia fue:

$$\eta_c = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_s - T_e)}{I \cdot A}$$

definida en el capítulo 3 de este trabajo.

La tabla 5.3 muestra los resultados obtenidos de la eficiencia del colector solar sin recubrimiento selectivo en función de la diferencia de la diferencia entre la temperatura media del agua en el colector y la temperatura ambiente, la radiación solar y el porcentaje de flujo másico en un minuto con respecto al volumen interior del tubo colector.

**Tabla 5.3** Eficiencias obtenidas por el colector sin recubrimiento.

<b>Colector sin recubrimiento</b>			
$\Delta T$	<b>Rad. Solar (W m<sup>-2</sup>)</b>	<b>Flujo/Vol. Int.</b>	<b>Eficiencia</b>
5	755	30%	45%
8	710	160%	38%
12	693	180%	31%

De acuerdo a estos resultados, la eficiencia máxima alcanzada fue de 45% con un flujo másico de agua del 30% respecto al volumen interior del tubo colector, obteniendo una diferencia de 5 grados entre la temperatura media del agua en el tubo colector y la temperatura ambiente. Esta diferencia de temperaturas es sumamente importante ya que las pérdidas de energía del colector dependen de ella; mientras esta diferencia de temperaturas sea mayor, mayor serán las pérdidas, y por consecuencia, menor será la eficiencia del colector.

### 5.3.2 Colector con recubrimiento

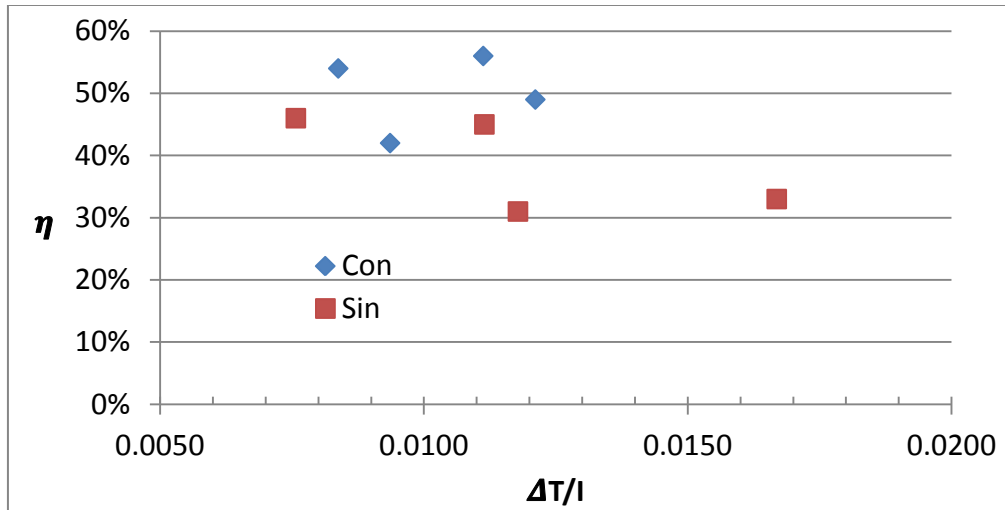
De la misma forma fueron calculadas las eficiencias para el colector con el recubrimiento selectivo depositado en la cubierta. Se siguió el mismo procedimiento para obtener los promedios de temperaturas para los intervalos de medición y así poder calcular las eficiencias obtenidas.

**Tabla 5.4:** Eficiencias obtenidas por el colector con recubrimiento.

<b>Colector con recubrimiento</b>			
$\Delta T$	<b>Rad. Solar (W m<sup>-2</sup>)</b>	<b>Flujo/Vol. Int.</b>	<b>Eficiencia</b>
7	710	30%	42%
7	686	80%	55%
8	656	180%	50%

Es interesante resaltar que la máxima eficiencia obtenida fue de 55% con un flujo másico de agua del 80% respecto al volumen interior del tubo colector, con una diferencia de 7 grados entre la temperatura media del agua en el tubo colector y la temperatura ambiente, recibiendo una radiación solar de 686 W m<sup>-2</sup> en ese intervalo de tiempo. En comparación con la máxima eficiencia obtenida por el colector sin recubrimiento (de 45%) es evidente una mejora sustancial. Además, es importante mencionar que la máxima eficiencia alcanzada por el colector sin recubrimiento se obtuvo con una diferencia de 5 grados entre la temperatura media del agua en el tubo colector y la temperatura ambiente, así como un flujo másico de 30%, mientras que para el colector con recubrimiento fue de 7 grados con un flujo másico de 80%.

De acuerdo a los resultados anteriores, las eficiencias alcanzadas por el colector con recubrimiento selectivo depositado en la cubierta fueron mayores que las de su homólogo sin recubrimiento. La figura 5.9 muestra un gráfico comparativo de las eficiencias alcanzadas por ambos colectores en función de las diferencias entre la temperatura media del agua en el tubo colector y la temperatura ambiente, dividida entre la radiación solar.



**Figura 5.9:** Comparación gráfica de las eficiencias alcanzadas por el colector, con recubrimiento y sin recubrimiento transparente selectivo.

Esta figura hace evidente la optimización de la eficiencia del colector al usar el recubrimiento transparente selectivo en la cubierta del tubo colector, resaltando que la diferencia de las máximas eficiencias obtenidas fue de 10% y de las mínimas eficiencias obtenidas fue de 11%, en ambos casos la del colector con recubrimiento fue la mayor.

### 5.3.3 Validación del modelo teórico

En esta parte del trabajo se realizó una comparación de los datos obtenidos experimentalmente y los calculados mediante el modelo teórico desarrollado en el capítulo 3. Esta comparación con la intención de hacer válido el modelo teórico y conocer su exactitud y confianza en la predicción de datos.

A continuación se muestra la tabla comparativa de las temperaturas del agua, del tubo colector, de la cubierta y la eficiencia alcanzada, usando los datos medidos experimentalmente y los datos obtenidos mediante cálculos del modelo teórico.

**Tabla 5.5:** Comparación de datos experimentales y cálculos del modelo teórico.

Recubrimiento	Flujo/vol. Int		$T_e$	$T_s$	$\bar{T}_c$	$T_{t(0)}$	$T_{t(z=L)}$	$\bar{T}_{amb}$	Rad. Solar	EFICIENCIA
Sin	30%	Medida	19.5	31.2	24.4	23.7	33.0	19.6	759	46%
		Calculada	19.5	21.5	27.7	20.1	27.2			46%
Con	30%	Medida	17.0	27.6	21.8	20.8	28.1	15.4	737	42%
		Calculada	17.0	27.6	23.1	17.5	27.1			42%
Sin	160%	Medida	20.1	21.4	20.3	21.2	22.6	12.5	700	31%
		Calculada	20.1	21.7	22.8	20.7	27.1			41%
Con	80%	Medida	23.6	28.4	24.5	25.6	28.9	18.4	683	56%
		Calculada	23.6	33.7	25.1	24.3	27.1			44%
Sin	180%	Medida	25.8	27.1	24.3	26.4	27.0	14.7	704	33%
		Calculada	25.8	27.5	24.5	26.6	27.2			42%
Con	180%	Medida	23.8	25.7	24.4	25.4	26.6	16.5	681	49%
		Calculada	23.8	33.6	23.8	24.5	27.1			42%

De acuerdo a estos resultados, es posible afirmar que el modelo teórico es confiable. Es importante resaltar que para flujos bajos, como es el caso de 30%, el modelo fue más preciso que para flujos mayores.

## Capítulo 6. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos del estudio de la eficiencia de un colector térmico solar con dos tipos de cubierta, una con un recubrimiento transparente selectivo a base de óxido de estaño ( $\text{SnO}_2$ ) dopado con fluor, y otra sin este recubrimiento se puede concluir que:

- Existe concordancia entre los datos obtenidos experimentalmente y los calculados por medio del modelo teórico.
- El cálculo teórico de la eficiencia energética del colector solar tubular con cubierta transparente selectiva resultó ser confiable y preciso.
- En cuando al recubrimiento transparente selectivo se determinó que se debe usar una concentración de  $0.097 \text{ mol dm}^{-3}$  de cloruro de estaño ( $\text{SnCl}_4$ ) y  $0.003 \text{ mol dm}^{-3}$  de fluoruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{F}$ ) para la solución precursora y una temperatura de depósito de 723 K para maximizar el comportamiento reflejante al infrarrojo del material selectivo.
- Se mejoró el sistema de depósito de precursores para la síntesis de películas, consiguiendo depositar recubrimientos en tubos con características microestructurales similares a las de sustrato plano.
- Se comprobó que el material depositado al interior de los tubos es similar al obtenido en sustratos planos.



## Referencias

1. Amézaga Madrid, P. Tesis de doctorado Evaluación de la capacidad antibacterial de películas delgadas de dióxido de titanio sobre *Pseudomonas aeruginosa*, conocer el sitio del daño y proponer un mecanismo de inhibición, CIMAV S.C., Chihuahua, **2003**.
2. Assilzadeh, F., Kalogirou, S. A., "*Simulation and optimization of a LiBr solar absorption cooling system with evacuated tube collectors*", Renewable energy, **2005**, 30, 1143-1159.
3. Batzill, M., Diebold U., "*The surface and materials science of tin oxide*", Progress in surface science, **2005**, 79, 47-154.
4. Brundle, C. R., Evans Jr, C. A., Wilson, S., "*Encyclopedia of materials characterization*", 1ra edición, Butterworth-Heineman, **1992**.
5. Joint Committee on Powder Diffraction Standards, Powder Diffraction File, International Center for Diffraction Data, Swarthmore, PA (2006), Ficha PDF 01-077-0453
6. Çengel, Y. A., "*Heat transfer: A practical approach*", 2nda edición, Mcgraw-Hill, **2002**.
7. Duffie, J. A., Beckman, W. A., "*Solar Engineering of thermal processes*", 3era edición, John Wiley & sons inc, **2006**.
8. Fernández Díez, P., "*Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura*", Universidad de Cantabria, **2008**.
9. Granqvist, C. G., "*Transparent conductors as solar energy materials: A panoramic review*", Solar energy materials and solar cells, **2007**, 91, 1529-1598
10. Jiménez, B. E., "*La contaminación ambiental en México*", Limusa, **2002**.
11. Kalogirou, S. A., "*Solar energy engineering: processes and systems*", 1era edición, Elsevier , **2009**.
12. Kalogirou, S. A., "*Solar thermal collectors and applications*", Progress in energy and combustion science, **2004**, 30, 231-295.

13. López, J. M., "*Energía solar térmica*", Instituto para la diversificación y ahorro de energía, **2006**.
14. Miki Yoshida, M., Andrade, E., "*Growth and structure of thin films obtained by an improved spray pyrohydrolysis technique*", Thin solid films, **1993**, 224, 87-96.
15. Miki Yoshida, M., Collins-Martínez, V., Amézaga Madrid, P., Aguilar Elguezabal, A. "*Thin films of photo-catalytic TiO<sub>2</sub> and ZnO inside a tubing obtained by spray pyrolysis*", Thin Solid Films, **2002**, 419, 60-64.
16. Miki Yoshida, M., "*Synthesis, structural characterization and optical properties of multilayered Yttria-stabilized ZrO<sub>2</sub> thin films obtained by aerosol assisted chemical vapour deposition*", Thin Solid Films, **2008**, 516, 8282-8288.
17. Norma ASHRAE 93-2003
18. Norma ISO/DIS 13837
19. Ohring, M., "*Materials science of thin films, Deposition & structure*", 2da edición, Academic Press, **2001**.
20. Patil, P. S., "*Versatility of chemical spray pyrolysis technique*", Materials chemistry and physics, **1999**, 59, 185-198.
21. Pierson, H. O., "*Handbook of chemical vapor deposition (CVD) Principles, technology, and applications*", 2da edición, William Andrew, **1999**.
22. Quintanilla Montoya, A. L., Wayne, D., "*La energía eléctrica en Baja California y el futuro del as renovables: una visión multidisciplinaria*", UABC. **2003**.
23. Williams, D. B., Carter, C. B., "*Transmission Electron Microscopy a textbook for materials science*", 1era edición, Springer, **2009**.
24. Zhu, G., Li, S., "*Separation and preconcentration of chromium species by selective absorption on Lemna minor and determination by slurry atomisation electrothermal atomic absorption spectrometry*", The analyst, **2001**, 126, 1453-1455.

## **Trabajo a futuro**

Algunas perspectivas de trabajo que dan continuidad a esta investigación son:

- 1.** Utilizar otros materiales o dopantes para el recubrimiento transparente selectivo, por ejemplo Indio o Antimonio que mantenga la reflexión a la radiación infrarroja y evaluar sus propiedades ópticas, eléctricas y estructurales.
- 2.** Utilizar mediciones simultáneas en los colectores con y sin recubrimiento, y así minimizar factores que aporten porcentajes de error en la medición
- 3.** Evaluar el impacto de los parámetros de construcción del colector (dimensiones, tipo de superficie colectora, con evacuación interna) y de las condiciones ambientales (intensidad de radiación solar, velocidad de viento, temperatura ambiente) en el modelo teórico.