



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas

Estudio de telas con depósito de óxido de tungsteno bajo la
teoría de la ley de Stefan-Boltzmann, para el
aprovechamiento en energías renovables

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA

por

José Pablo Leija Chaires

asesorado por

Dra. Areli Montes Pérez

Dr. Gerardo Francisco Pérez Sánchez

Puebla Pue.
13 de noviembre de 2025



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas

Estudio de telas con depósito de óxido de tungsteno bajo la
teoría de la ley de Stefan-Boltzmann, para el
aprovechamiento en energías renovables

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA

por

José Pablo Leija Chaires

asesorado por

Dra. Areli Montes Pérez

Dr. Gerardo Francisco Pérez Sánchez

Puebla Pue.
13 de noviembre de 2025

Índice general

Índice general	III
Índice de figuras	V
Resumen	VII
1. Introducción	1
1.0.1. Objetivos de la tesis	1
1.0.2. Contexto del trabajo	2
1.0.3. Contenido de la tesis	2
2. Radiación de cuerpo negro	3
2.1. Propiedades del óxido de Tungsteno (WO_X)	4
2.2. Ley de Ohm	4
2.3. Radiación térmica	5
2.4. Cuerpo negro	5
2.5. Ley del cuadrado inverso	6
2.6. Intensidad específica o brillo	6
2.7. Flujo neto	7
2.8. Densidad de energía radiativa	8
2.9. Prueba de la ley del cuadrado inverso para una esfera uniformemente brillante	8
2.10. Ley de Stefan Boltzmann	9
3. Desarrollo Experimental	13
3.1. Configuración del Arreglo Experimental	14
3.2. Método para estimar la incertidumbre representativa	14
3.3. Etapa 1: Medición de los parámetros experimentales iniciales sin telas dopadas	15
3.4. Etapa 2: Medición con telas dopadas con WO_X	18
3.5. Etapa 3: Medición con telas dopadas con WO_X fuera del diámetro del depósito.	27
3.5.1. Comparativa de etapas	35
4. Conclusiones	39
A. Proceso de dopado de telas con óxido de tungsteno	43
A.1. Preparación y limpieza del sustrato	43
A.2. Montaje del sistema HFCVD	43

A.3. Condiciones de síntesis	44
A.4. Resultados	44
A.4.1. Caracterización por microscopia electrónica de barrido (SEM)	45
Bibliografía	49

Índice de figuras

2.1. Geometría para rayos incidentes normal a un área dA	6
2.2. Geometría para rayos incidentes oblicuos	7
2.3. Energía electromagnética dentro de un cilindro	8
2.4. Flujo de una esfera uniformemente brillante	9
2.5. Carcasa de cuerpo negro con pistón de un lado	10
3.1. Esquema del arreglo experimental utilizado.	14
3.2. a) Gráfica de radiación contra temperatura de la Etapa 1. b) Gráfica de radiación contra temperatura de la Etapa 1 para $T > 1773,15 K$. c) Gráfica de radiación contra T^4 de la Etapa 1.	17
3.3. Montaje experimental con una tela de algodón dopada con WO_X interpuesta usado para las mediciones experimentales.	18
3.4. Tela de poliéster dopada con WO_X	19
3.5. a) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela P_1 . b) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela P_1 para $T > 1773,15 K$. c) Gráfica de radiación contra T^4 de la Etapa 2 para la tela P_1	20
3.6. Tela de algodón dopada con WO_X	21
3.7. a) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_2 . b) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_2 para $T > 1773,15 K$. c) Gráfica de radiación contra T^4 de la Etapa 2 para la tela A_2	22
3.8. Tela de algodón dopada con WO_X	23
3.9. a) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_3 . b) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_3 para $T > 1773,15 K$. c) Gráfica de radiación contra T^4 de la Etapa 2 para la tela A_2	24
3.10. Tela de algodón dopada con WO_X	25
3.11. a) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_4 . b) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_4 para $T > 1773,15 K$. c) Gráfica de radiación contra T^4 de la Etapa 2 para la tela A_2	26
3.12. a) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela P_1 fuera del depósito de WO_X . b) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela P_1 fuera del depósito de WO_X para $T > 1773,15 K$. c) Gráfica de radiación contra T^4 de la Etapa 3 para la tela P_1 fuera del depósito de WO_X	28

3.13. a) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_2 fuera del depósito de WO_X . b) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_2 fuera del depósito de WO_X para $T > 1773,15 K$. c) Gráfica de radiación contra T^4 de la Etapa 3 para la tela A_2 fuera del depósito de WO_X	30
3.14. a) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_3 fuera del depósito de WO_X . b) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_3 fuera del depósito de WO_X para $T > 1773,15 K$. c) Gráfica de radiación contra T^4 de la Etapa 3 para la tela A_3 fuera del depósito de WO_X	32
3.15. a) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_4 fuera del depósito de WO_X . b) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_4 fuera del depósito de WO_X para $T > 1773,15 K$. c) Gráfica de radiación contra T^4 de la Etapa 3 para la tela A_4 fuera del depósito de WO_X	34
A.1. Esquema del sistema HFCVD.	44
A.2. Fotografía que muestra el recubrimiento de WO_x sobre el textil del Algodón sintetizado.	45
A.3. Imágenes SEM representativas del recubrimiento de WO_x sobre tela de poliéster.	46

Resumen

La transición hacia energías renovables representa uno de los principales retos y prioridades del contexto energético actual; siendo fundamental para reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar el cambio climático [1]. La mejora en la eficiencia de captación y transformación de energía demanda materiales con alta estabilidad térmica y emisividad controlada [2]. El tungsteno, con un punto de fusión de 3422°C y excelente conductividad térmica, resalta como un gran candidato para recubrimientos en materiales expuestos a altas temperaturas [3].

En esta tesis, se busca verificar la ley de Stefan-Boltzmann; al mismo tiempo se analiza la transmisión de radiación a través de telas de algodón dopadas con óxido de tungsteno. Se diseña un montaje experimental con una lámpara de Stefan-Boltzmann y un sensor de radiación para medir la potencia radiada de las telas a distintas temperaturas. Los resultados confirman que la potencia radiada sigue la dependencia $P \propto T^4$, especialmente para temperaturas mayores a 1500°C. Además, las telas dopadas muestran una atenuación significativa de la radiación, aunque el aporte adicional del recubrimiento de óxido de tungsteno fue mínimo bajo las condiciones estudiadas.

Estos resultados sugieren el potencial de este tipo de materiales para regular la transmisión de radiación y brindan orientación para futuras mejoras en el proceso de deposición y medición.

Capítulo 1

Introducción

La creciente demanda de energías renovables ha impulsado el desarrollo de materiales capaces de optimizar la captura y transmisión de radiación térmica, así como su capacidad de soportar altas temperaturas; esto para su aplicación en sistemas de captación de energía solar, eólica, entre otras aplicaciones industriales y tecnológicas. La ley de Stefan-Boltzmann describe la relación $P = \sigma T^4$ para emisores ideales; sin embargo, los cuerpos reales presentan desviaciones asociadas a su emisividad. El óxido de tungsteno, gracias a sus propiedades sobresalientes, se presenta como candidato ideal para recubrimientos que controlen la emisión de radiación.

La presente tesis investiga cómo el dopado de textiles con óxido de tungsteno (WO_x) afecta su emisión térmica, mediante la verificación de la ley de Stefan-Boltzmann. Para ello, se diseña un montaje experimental que utiliza una lámpara de Stefan-Boltzmann como fuente de calor y un sensor para medir la radiación emitida a distintas temperaturas dadas por la lámpara. El procedimiento se ejecuta en tres etapas: medición de la radiación emitida por la lámpara de Stefan-Boltzmann, medición de la radiación emitida con telas dopadas con óxido de tungsteno interpuestas y la misma medición con las telas desplazadas fuera del depósito de óxido de tungsteno, validando la relación $P = \sigma T^4$ y cuantificando la atenuación de la radiación.

1.0.1. Objetivos de la tesis

El objetivo general de la presente tesis es analizar experimentalmente las propiedades radiativas de telas de algodón dopadas con óxido de tungsteno, evaluando su potencial en aplicaciones de energía renovable y verificando su ajuste a la ley de Stefan-Boltzmann. Los objetivos específicos son los siguientes:

1. Revisar los fundamentos de la Ley de Stefan-Boltzmann, el concepto de cuerpo negro, y la ley de Ohm para medición de temperatura.
2. Diseñar y calibrar un montaje experimental para verificar la ley de Stefan-Boltzmann.
3. Implementar etapas con telas dopadas y desplazadas para cuantificar la atenuación de la radiación.
4. Analizar discrepancias experimentales y proponer mejoras.

1.0.2. Contexto del trabajo

La presente investigación forma parte de la línea de investigación de la Licenciatura en Física de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas (FCFM) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), del Cuerpo Académico de Óptica y el Laboratorio de Síntesis, caracterización y aplicación de óxidos metálicos nanoestructurados del ICUAP Val 3, Ecocampus de la BUAP. La presente tesis ha sido apoyada por el Proyecto VIEP 2025, **Codificación de estados de polarización con un modulador de luz espacial de luz de transmisión (ID del Proyecto: 00369-PV/2024)**.

El depósito de óxido de tungsteno en las telas fue realizado por investigadores del Eco-Campus BUAP mediante protocolos de impregnación propios de dicho centro [4].

1.0.3. Contenido de la tesis

El documento se organiza en cinco capítulos, abarcando desde los conceptos teóricos fundamentales, hasta la presentación de los resultados obtenidos y las conclusiones a las que se llegó a partir de estos. Se muestra un índice general, un índice de figuras y las citas bibliográficas se denotan con un número encerrado entre corchetes.

- **Capítulo 2: Marco Teórico** – Antecedentes, ley de Stefan–Boltzmann, cuerpo negro, ley de Ohm, propiedades del óxido de tungsteno.
- **Capítulo 3: Desarrollo Experimental** – Descripción del montaje, protocolo en tres etapas, calibración y consideraciones de incertidumbre.
- **Capítulo 4: Resultados y Discusión** – Tablas y gráficos de datos, ajuste a $P = \sigma AT^4$, efecto de las telas y factores experimentales.
- **Capítulo 5: Conclusiones** – Síntesis de hallazgos, implicaciones y recomendaciones para futuras investigaciones.

Capítulo 2

Radiación de cuerpo negro

Antecedentes

La Ley de Stefan-Boltzmann constituye uno de los pilares fundamentales en el estudio de la radiación térmica y la transferencia de energía en sistemas físicos. Formulada en el siglo XIX por Josef Stefan, quien en 1879 propuso la relación empírica basada en experimentos, y Ludwig Boltzmann, quien más tarde, en 1884, le otorgó una fundamentación teórica sólida utilizando la termodinámica y la teoría electromagnética. Esta ley describe cómo un cuerpo negro (un cuerpo teórico idealizado que absorbe y emite radiación electromagnética de manera óptima) emite radiación electromagnética en función de su temperatura. Esta ley permite comprender la relación entre la energía radiada y la temperatura, y proporciona una base sólida para diversas aplicaciones en la física teórica y experimental. Además, el concepto de cuerpo negro facilita modelar la radiación térmica como un fenómeno universal.

Desde que se formuló, la ley de Stefan-Boltzmann ha sido aplicada en diversas áreas, entre ellas la astrofísica, donde se utiliza para determinar temperaturas de las estrellas y calcular su luminosidad a partir de la energía que emiten. En el ámbito de la climatología, esta ley es clave para modelar el balance energético de la Tierra y comprender fenómenos relacionados con el efecto invernadero y la emisión térmica del planeta. De igual manera, en la ingeniería térmica, esta ley permite diseñar sistemas más eficientes de transferencia de calor, como paneles y calentadores solares, optimizando su capacidad para aprovechar la radiación. Esto resalta las implicaciones significativas que tiene esta ley en el desarrollo de nuevas tecnologías para el aprovechamiento en energías renovables, evidenciando cómo un principio físico general puede ser el punto de partida para innovaciones en campos diversos y cruciales para un desarrollo sostenible.

En este contexto, el estudio de materiales dopados, como telas con óxido de tungsteno, adquiere especial relevancia. La capacidad de modificar y optimizar las propiedades de absorción y emisión térmica de estos materiales en función de principios como la ley de Stefan-Boltzmann, abre nuevas posibilidades para mejorar la eficiencia en la utilización de fuentes de energía renovable. Esta línea de investigación no solo conecta la teoría con la práctica, también contribuye a abordar los retos actuales asociados con la transición hacia

fuentes de energía sostenible[5].

2.1. Propiedades del óxido de Tungsteno (WO_x)

En lugar de estudiar las propiedades del Tungsteno metálico, el presente trabajo se centra en recubrimientos de óxido de tungsteno (WO_x), obtenidos por HFCVD sobre sustratos textiles. El óxido de tungsteno es un material complejo cuya funcionalidad depende fuertemente de su estequiometría y microestructura. A continuación se presentan las características esenciales relevantes para esta tesis [4, 6].

Morfología y estructura. WO_x sintetizado por HFCVD (Hot-Filament Chemical Vapor Deposition) puede presentar morfologías controlables (nanopartículas, nanobarras, nanorods, nanofibras) en función de parámetros de depósito (temperatura del filamento, presión parcial de oxígeno, distancia filamento–sustrato). La porosidad y el área superficial suelen ser elevadas, lo que influye en la interacción con la radiación y con el sustrato.

Fases cristalinas y no estequiometría. Aunque con frecuencia se obtiene WO_3 (fase monoclinica), condiciones con déficit de oxígeno originan fases subestequiométricas (WO_{3-x} , por ejemplo: $WO_{2,9}$, $WO_{2,7}$). Estas fases contienen vacancias de oxígeno que actúan como defectos electrónicos y afectan tanto propiedades ópticas como conductivas.

Propiedades ópticas y electrónicas. WO_x presenta una banda prohibida en el rango aproximado 2,6–3,0 eV (absorción en visible). Las vacancias de oxígeno y la subestequiometría generan estados de carga y portadores que modifican la respuesta electrónica y la absorción en IR/NIR, con implicaciones en la emisividad efectiva del recubrimiento.

Propiedades superficiales y reactividad. La alta densidad de defectos superficiales favorece actividad fotocatalítica y generación de especies reactivas bajo iluminación; esto se ha explotado en aplicaciones antibacterianas y fotocatalíticas.

Compatibilidad y aplicación en textiles. La deposición por HFCVD permite obtener capas adherentes y conformes sobre tejidos sin dañar el sustrato. No obstante, la emisividad efectiva de la muestra recubierta es la propiedad del sistema compuesto (película WO_x + sustrato + porosidad + humedad), por lo que el tipo de tela (algodón versus poliéster), el espesor, la rugosidad y el contenido de agua ligada (en algodón) influyen decisivamente en las mediciones térmicas y en la transmisión en infrarrojo.

La información presentada es de carácter general y se basa en el marco general de la presente tesis; los detalles de manejo y otras propiedades más específicas quedan fuera del alcance de este estudio

2.2. Ley de Ohm

La Ley de Ohm es un principio fundamental en el análisis de circuitos eléctricos que establece la relación lineal entre la diferencia de potencial o voltaje (voltaje) aplicada a un conductor y la corriente eléctrica que circula a través de él, cuando la temperatura y otros

factores físicos permanecen constantes. Esta ley, publicada por Georg Simon Ohm en 1827, se expresa matemáticamente como:

$$V = RI \tag{2.1}$$

donde (V) es la diferencia de potencial en voltios (V), (I) es la corriente en amperios (A) y (R) es la resistencia eléctrica en ohms (Ω). La resistencia cuantifica la oposición del material al paso de la corriente y depende del material del conductor, la longitud del conductor, el área de la sección transversal del conductor y su temperatura [8].

La validación de la Ley de Ohm en conductores lineales y la identificación de desviaciones en materiales no lineales constituyen temas de estudio clave en la teoría de circuitos y la física de materiales.

2.3. Radiación térmica

La radiación térmica es la energía emitida por la materia, como resultado del movimiento aleatorio de las partículas que la comprenden. Este movimiento aleatorio hace que las partículas se exciten (de manera electrónica, vibratoria y rotacional) debido a colisiones entre ellas, seguido de un proceso por el cual las partículas excitadas regresan a estados de energía más bajos o al estado fundamental después de haber sido energizadas; a este proceso se le llama decadencia. Durante esta transición, las partículas liberan el exceso de energía en forma de radiación electromagnética. Esta transformación de energía genera emisiones dentro de un amplio rango espectral, debido a su naturaleza aleatoria [9]. La radiación térmica es emitida por todo cuerpo con temperatura mayor a la del cero absoluto (-273.15 °C).

2.4. Cuerpo negro

Un cuerpo negro es un objeto teórico idealizado que juega un papel crucial en el estudio de la radiación térmica. Se define como un cuerpo que absorbe completamente toda la radiación electromagnética incidente sobre su superficie, independientemente de la frecuencia o el ángulo de incidencia. Este comportamiento ideal implica que no refleja ni transmite radiación, sino que convierte toda la energía absorbida en radiación electromagnética que emite únicamente en proporción a su temperatura, reflejando así la relación directa entre la temperatura y la intensidad de la radiación emitida. Esta radiación de cuerpo negro constituye un espectro continuo ¹ que depende únicamente de la temperatura del cuerpo[5]. El concepto de cuerpo negro es fundamental porque proporciona un modelo teórico para comprender y analizar los procesos radiativos. Aunque los cuerpos reales no se comporten como verdaderos cuerpos negros, muchas aproximaciones experimentales permiten estudiar materiales bajo condiciones similares a las de un cuerpo negro.

¹Significa que el cuerpo negro emite radiación en todas las longitudes de onda posibles dentro del espectro electromagnético.

2.5. Ley del cuadrado inverso

La ley del cuadrado inverso es un principio fundamental en la física que describe cómo la intensidad de una cantidad física disminuye a medida que la distancia desde la fuente aumenta. Específicamente, establece que la intensidad de una onda o flujo de energía es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia desde la fuente emisora. Matemáticamente, se expresa como:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

donde I es la intensidad de la radiación en un punto a una distancia r de la fuente, P es la potencia total emitida por la fuente, y $4\pi r^2$ representa el área de una esfera de radio r alrededor de la fuente[10]. En el contexto de la radiación térmica y la ley de Stefan-Boltzmann, la ley del cuadrado inverso juega un papel importante en la determinación de la cantidad de energía que llega a una superficie en función de su distancia a la fuente emisora.

2.6. Intensidad específica o brillo

El flujo es una medida de la energía transportada por todos los rayos que pasan a través de un área determinada. Una descripción considerablemente más detallada de la radiación es dar la energía transportada por rayos individuales. Sin embargo, el primer punto que hay que tener en cuenta es que un solo rayo no transporta esencialmente energía, por lo que necesitamos considerar la energía transportada por conjuntos de rayos, que difieren infinitesimalmente del rayo dado. Se construye un área dA normal a la dirección del rayo dado y se consideran todos los rayos que pasan a través de dA cuya dirección está dentro de un ángulo sólido $d\Omega$ del rayo dado (ver Figura 2.1). La energía que cruza dA en el tiempo dt y en el rango de frecuencias $d\nu$ se define entonces por la relación

$$dE = I_\nu dA dt d\Omega d\nu, \quad (2.2)$$

donde I_ν es la intensidad específica o brillo. La intensidad específica tiene las dimensiones

$$\begin{aligned} I_\nu(\nu, \Omega) &= \text{energía}(\text{tiempo})^{-1}(\text{área})^{-1}(\text{ángulo sólido})^{-1}(\text{frecuencia})^{-1} \\ &= \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{ster}^{-1} \text{Hz}^{-1}. \end{aligned}$$

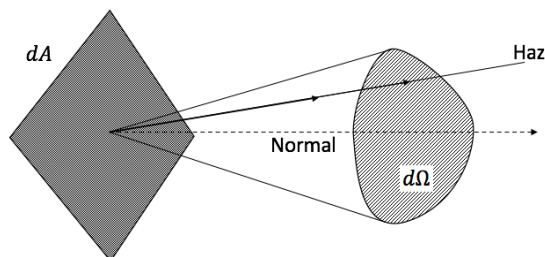


Figura 2.1: Geometría para rayos incidentes normal a un área dA

Nótese que I_ν depende de una ubicación en el espacio, en una dirección y una frecuencia.

2.7. Flujo neto

Supongamos ahora que tenemos un campo de radiación (rayos en todas las direcciones) y construimos un pequeño elemento de área dA en una orientación arbitraria \mathbf{n} (ver Figura 2.2). Entonces, la cantidad diferencial de flujo del ángulo sólido $d\Omega$ es (reducida por el área efectiva reducida $\cos\theta dA$)

$$dF_\nu(\text{erg s}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{Hz}^{-1}) = I_\nu \cos\theta d\Omega. \quad (2.3)$$

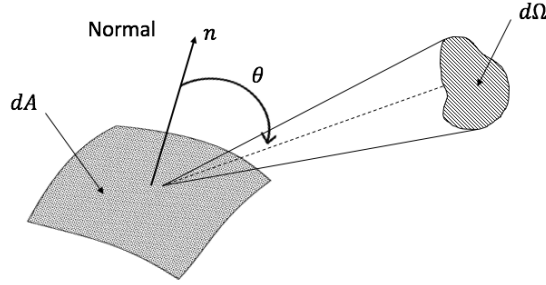


Figura 2.2: Geometría para rayos incidentes oblicuos

El flujo neto en la dirección \mathbf{n} , $F_\nu(\mathbf{n})$ se obtiene integrando dF sobre todos los ángulos sólidos:

$$F_\nu = \int I_\nu \cos\theta d\Omega. \quad (2.4)$$

Nótese que si I_ν es un campo de radiación isotrópico (no una función del ángulo), entonces el flujo neto es *cero*, ya que $\int \cos\theta d\Omega = 0$. Es decir, la cantidad de energía que pasa por dA en la dirección \mathbf{n} es la misma que pasa en la dirección $-\mathbf{n}$.

Para obtener el flujo de momento normal a dA (momento por unidad de tiempo por unidad de área = presión), hay que recordar que el momento de un fotón es E/c . Entonces, el flujo de momento a lo largo del rayo en el ángulo θ es dF_ν/c . Para obtener el componente del flujo de momento normal a dA , lo multiplicamos por otro factor de $\cos\theta$. Integrando, obtenemos

$$p_\nu(\text{dinas cm}^{-2}\text{ Hz}^{-1}) = \frac{1}{c} \int I_\nu \cos^2\theta d\Omega. \quad (2.5)$$

Nótese que F_ν y p_ν son *momentos* (multiplicaciones por potencias de $\cos\theta$ e integración sobre $d\Omega$) de la intensidad I_ν . Por supuesto, siempre podemos integrar sobre la frecuencia para obtener el flujo total (integrado) y similarmente para los demás valores.

$$F(\text{erg s}^{-1}\text{ cm}^{-2}) = \int F_\nu d\nu \quad (2.6)$$

$$p(\text{dinas cm}^{-2}) = \int p_\nu d\nu \quad (2.7)$$

$$I(\text{erg s}^{-1}\text{ cm}^{-2}\text{ ster}) = \int I_\nu d\nu \quad (2.8)$$

2.8. Densidad de energía radiativa

La densidad de energía específica u_ν , se define como la energía por unidad de volumen por unidad de rango de frecuencia. Para determinar esto, es conveniente considerar primero la densidad de energía por unidad de ángulo sólido $u_\nu(\Omega)$, dada por $dE = u_\nu(\Omega)dVd\Omega d\nu$, donde dV es un elemento de volumen. Consideremos un cilindro que envuelve un rayo de longitud ct (Figura 2.3). Dado que el volumen del cilindro es $dAc dt$,

$$dE = u_\nu(\Omega)dAc dt d\Omega d\nu.$$

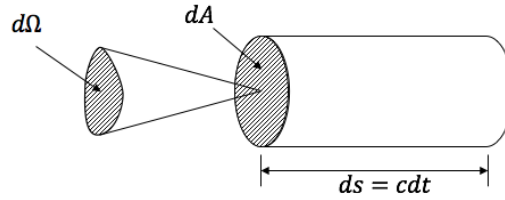


Figura 2.3: Energía electromagnética dentro de un cilindro

La radiación viaja a velocidad c , por lo que en un tiempo dt , toda la radiación del cilindro saldrá del mismo. Podemos entonces igualar esta ecuación con la ecuación (2.2) y se obtiene que

$$u_\nu(\Omega) = \frac{I_\nu}{c}. \quad (2.9)$$

Integrando sobre todos los ángulos sólidos, se obtiene

$$u_\nu = \int u_\nu(\Omega)d\Omega = \frac{1}{c} \int I_\nu d\Omega,$$

o

$$u_\nu = \frac{4\pi}{c} J_\nu \quad (2.10)$$

donde se ha definido la intensidad media J_ν como:

$$J_\nu = \frac{1}{4\pi} \int I_\nu d\Omega. \quad (2.11)$$

La densidad de radiación total (erg cm^{-3}) se obtiene integrando u_ν , sobre todas las frecuencias

$$u = \int u_\nu d\nu = \frac{4\pi}{c} \int J_\nu d\nu. \quad (2.12)$$

2.9. Prueba de la ley del cuadrado inverso para una esfera uniformemente brillante

Para demostrar que no hay conflicto entre la constancia de la intensidad específica y la ley del cuadrado inverso, calculemos el flujo (ecuación 2.4) a una distancia arbitraria

de una esfera de brillo uniforme B (es decir, todos los rayos que salen de la esfera tienen el mismo brillo). Una esfera de este tipo es claramente una fuente isotrópica. En el punto P , la intensidad específica es B si el rayo intersecta la esfera y cero en caso contrario (Ver Figura 2.4).

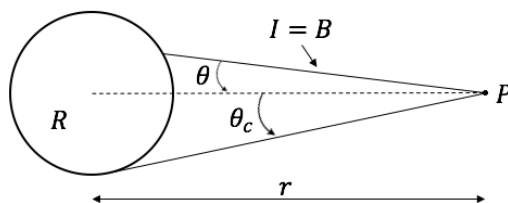


Figura 2.4: Flujo de una esfera uniformemente brillante

Entonces,

$$F = \int I \cos\theta d\Omega = B \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\theta_c} \sin\theta \cos\theta d\theta,$$

donde $\theta_c = \text{sen}^{-1}R/r$ es el ángulo al que un haz desde P es tangente a la esfera. Se sigue que

$$F = \pi B(1 - \cos^2\theta_c) = \pi B \text{sen}^2\theta_c$$

o

$$F = \pi B \left(\frac{R}{r}\right)^2. \quad (2.13)$$

Así, la intensidad específica es constante, pero el ángulo sólido subtendido por el objeto dado disminuye de forma que se cumple nuevamente la ley del cuadrado inverso.

Un resultado útil se obtiene igualando $r = R$:

$$F = \pi B. \quad (2.14)$$

Es decir, el flujo en una superficie de intensidad uniforme B es simplemente πB .

2.10. Ley de Stefan Boltzmann

Tratando la radiación de cuerpo negro como cualquier sistema termodinámico en equilibrio, se propone construir una carcasa de cuerpo negro con un pistón (área sombreada), de tal manera que se pueda realizar trabajo sobre la radiación o extraerla de ella, como se muestra en la Figura 2.5[9].

Ahora, de acuerdo a la primera ley de la termodinámica, se tiene que

$$dQ = dU + pdV, \quad (2.15)$$

donde Q es calor y U es la energía total, p es la presión y dV es el cambio de volumen. Por la segunda ley de la termodinámica:

$$dS = \frac{dQ}{T},$$

donde $S \equiv$ entropía. Pero $U = uV$ (donde u es la densidad de energía) y $p = u/3$, y u depende solo de T (Temperatura), ya que $u = (4\pi/c) \int J_\nu d\nu$ y $J_\nu = B_\nu(T)$. Entonces

$$dS = \frac{V}{T} \frac{du}{dT} dT + \frac{u}{T} dV + \frac{1}{3} \frac{u}{T} dV = \frac{V}{T} \frac{du}{dT} dT + \frac{4u}{3T} dV.$$

Ya que dS es un diferencial perfecto,

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_V = \frac{V}{T} \frac{du}{dT} \tag{2.16}$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)_T = \frac{4u}{3T}. \tag{2.17}$$

Así, obtenemos

$$\frac{\partial^2 S}{\partial T \partial V} = \frac{1}{T} \frac{du}{dT} = -\frac{4u}{3T^2} + \frac{4}{3T} \frac{du}{dT},$$

de modo que

$$\frac{du}{dT} = \frac{4u}{T}, \quad \frac{du}{u} = 4 \frac{dT}{T},$$

$$\log u = 4 \log T + \log a,$$

donde $\log a$ es una constante de integración. De este modo se obtiene la ley de Stefan-Boltzmann

$$u(t) = aT^4. \tag{2.18}$$

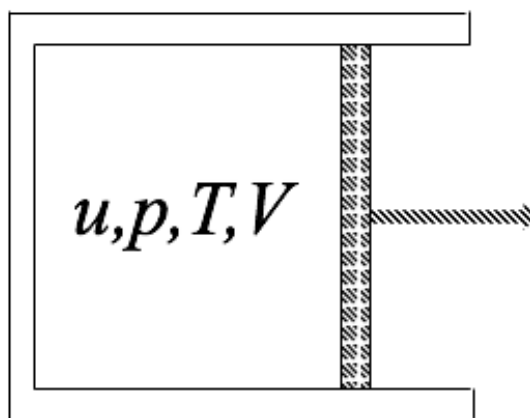


Figura 2.5: Carcasa de cuerpo negro con pistón de un lado

Esto puede ser relacionado con la función de Planck, ya que $I_\nu = J_\nu$ para radiación isotrópica (comparar con ecuación (2.10)).

$$u = \frac{4\pi}{c} \int B_\nu(T) d\nu = \frac{4\pi}{c} B(T),$$

donde la función integrada de Planck está definida por

$$B(T) = \int B_\nu(T) d\nu = \frac{ac}{4\pi} T^4. \quad (2.19)$$

El flujo emergente de una superficie isotrópica (como lo es un cuerpo negro) es $\pi \times B$ (ver ecuación (2.14)), tal que

$$F = \int F_\nu d\nu = \pi \int B_\nu d\nu = \pi B(T).$$

Lo que lleva a otra forma de la ley de Stefan-Boltzmann

$$F = \sigma T^4 \quad (2.20)$$

donde

$$\sigma \equiv \frac{ac}{4} = 5,67 \times 10^{-5} \text{ erg cm}^{-2} \text{ deg}^{-4} \text{ s}^{-1}, \quad (2.21)$$

$$a = \frac{4\sigma}{c} = 7,56 \times 10^{-15} \text{ erg cm}^{-3} \text{ deg}^{-4}. \quad (2.22)$$

Las constantes a y σ no pueden determinarse mediante argumentos termodinámicos macroscópicos, pero se derivan a continuación. La entropía de la radiación del cuerpo negro, S , está dada por

$$S = \frac{4}{3} a T^3 V, \quad (2.23)$$

Demostración. Ya que $u(T) = aT^4$, las ecuaciones (2.16) y (2.17) se pueden escribir como

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_V = 4aVT^2, \quad \left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)_T = \frac{4}{3} aT^3. \quad (2.24)$$

Se sigue que $S = (4/3)aVT^3 + \text{constante}$. La constante elegida debe ser cero, de modo que $S \rightarrow 0$ cuando $T \rightarrow 0$ (tercera ley de la termodinámica). □

De modo que la ley de expansión adiabática para la radiación del cuerpo negro es

$$TV^{1/3} = \text{constante}, \quad (2.25)$$

$$pV^{4/3} = \text{constante}. \quad (2.26)$$

Estas últimas ecuaciones son las conocidas leyes adiabáticas $pV^\gamma = \text{constante}$, con $\gamma = 4/3$.

Capítulo 3

Desarrollo Experimental

En este capítulo se desarrolla la parte experimental empleada para evaluar la radiación térmica emitida por un filamento incandescente y estudiar el efecto de telas de algodón dopadas con WO_X en la transmisión de dicha radiación siguiendo el siguiente protocolo: en la Etapa 1, se lleva a cabo un experimento preliminar para evaluar la radiación térmica emitida por un filamento incandescente sin interposición de telas, con la finalidad de verificar el correcto funcionamiento del equipo, establecer las condiciones de referencia en el ambiente de medición y justificar el método empleado. En la Etapa 2, se introduce el mismo arreglo con las telas dopadas con WO_X para evaluar la atenuación de la radiación térmica. En la Etapa 3, se repiten las mediciones con las telas de por medio, esta vez midiendo la radiación en un punto de la tela fuera del depósito de WO_X . Cabe señalar que el depósito de WO_X en las muestras textiles fue realizado por investigadores del Ecomcampus BUAP, siguiendo protocolos de impregnación desarrollados en dicho centro de investigación (Ver apéndice A)[4].

Para llevar a cabo la investigación, se siguió el siguiente plan de trabajo:

1. **Preparación y calibración del equipo:** Verificación del sensor TD-8553 y la lámpara TD-8555, medición de la resistencia del filamento a temperatura ambiente y alineación óptica.
2. **Etapa 1 (sin telas):** Registro de valores de voltaje, corriente y señal de radiación en un cuarto oscurecido para establecer la línea base de referencia.
3. **Etapa 2 (con telas dopadas):** Repetición del protocolo de la Etapa 1 introduciendo sucesivamente las cuatro muestras de tela de algodón dopadas con WO_X .
4. **Etapa 3 (con el sensor fuera del depósito de tungsteno):** Repetición del protocolo de la Etapa 2 tomando las mediciones en un punto de la tela alejado del depósito de WO_X .
5. **Análisis de datos y validación:** Ajuste a la ley de Stefan–Boltzmann, comparación de resultados y elaboración de tablas y gráficas.

3.1. Configuración del Arreglo Experimental

Este arreglo experimental está basado en el manual Thermal Radiation System de PASCO, [11]. La Figura 3.1 ilustra el arreglo experimental usado para realizar la presente tesis, el cual incluye:

- **Sensor de radiación PASCO TD-8553:** Termopila que genera un voltaje proporcional a la intensidad de radiación térmica incidente.
- **Lámpara de Stefan–Boltzmann PASCO TD-8555:** Fuente de radiación térmica de alta temperatura, cuyo filamento se calienta mediante paso de corriente.
- **Fuente de alimentación (0–13 V):** Ajuste del voltaje aplicado al filamento para controlar su temperatura.
- **Voltímetro (0–12 V) y amperímetro (0–3 A):** Monitoreo de la diferencia de potencial y la corriente en el circuito de la lámpara.
- **Soportes ajustables:** Aseguran la alineación constante entre fuente y sensor.

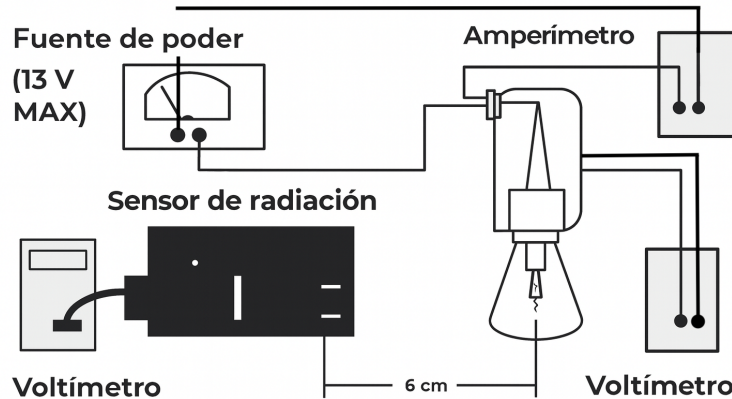


Figura 3.1: Esquema del arreglo experimental utilizado.

3.2. Método para estimar la incertidumbre representativa

Dado que no se dispone de incertidumbres instrumentales detalladas para cada lectura, se empleó un estimador empírico de incertidumbre basado en la dispersión observada en los datos con respecto a un ajuste representativo. Sea Rad_i la lectura del sensor para el punto i y $\text{Rad}_{\text{fit},i}$ el valor predicho por el ajuste de la etapa (por ejemplo, ajuste lineal de Rad vs T^4). Definimos los residuos

$$r_i = \text{Rad}_i - \text{Rad}_{\text{fit},i}, \quad (3.1)$$

y la raíz cuadrática media de los residuos

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i^2}. \quad (3.2)$$

El error relativo empírico se toma como

$$\text{err}_{\text{rel}} = \frac{\text{RMS}}{\overline{\text{Rad}}}, \quad (3.3)$$

donde

$$\overline{\text{Rad}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{Rad}_i.$$

Por robustez, se adopta un umbral mínimo por etapa:

$$\text{err}_{\text{rel,etapa}} = \text{máx}(\text{err}_{\text{rel}}, E_{\text{mín,etapa}}),$$

con $E_{\text{mín},1} = 0,03$ (Etapa 1, referencia) y $E_{\text{mín},2} = E_{\text{mín},3} = 0,05$ (Etapas con telas recubiertas). La incertidumbre absoluta de cada lectura se toma como

$$\sigma_{\text{Rad},i} = \text{err}_{\text{rel,etapa}} \cdot \text{Rad}_i. \quad (3.4)$$

Para comparar dos condiciones (p. ej. referencia y tela), la diferencia $\Delta = \text{Rad}_{\text{ref}} - \text{Rad}_{\text{tela}}$ tiene incertidumbre combinada

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\sigma_{\text{ref}}^2 + \sigma_{\text{tela}}^2}, \quad (3.5)$$

y se considera la reducción significativa si $\Delta > 2\sigma_{\Delta}$ (criterio aproximado).

3.3. Etapa 1: Medición de los parámetros experimentales iniciales sin telas dopadas

En primer lugar, el sensor de radiación y la lámpara de Stefan–Boltzmann se instalaron sobre soportes ajustables, asegurando una separación de 6 cm entre el filamento y el detector, con el fin de mantener un valor de radiación constante entre ambas componentes. El recinto experimental se oscureció completamente para evitar interferencias lumínicas. Con ayuda del voltímetro y amperímetro, se registraron la temperatura ambiente (T_{ref}) y la resistencia del filamento (R_{ref}) en reposo para establecer valores de referencia.

Acto seguido, se aplicó un voltaje inicial de 1,00 V al filamento y se incrementó en pasos de 1 V hasta 12,00 V. En cada nivel de voltaje se midieron simultáneamente la corriente (I), la tensión (V) en el filamento y el voltaje de salida del sensor, proporción directa de la intensidad radiada. Estas mediciones son esenciales para calcular la resistencia instantánea del filamento (R_T) (ecuación 2.1). La cual permite determinar la temperatura del filamento a través de curvas de calibración proporcionadas por el manual de PASCO, utilizando un valor de resistencia relativa (R_R), dada por:

$$R_R = \frac{R_T}{R_{\text{ref}}} \quad (3.6)$$

Desarrollo Experimental

3.3 Etapa 1: Medición de los parámetros experimentales iniciales sin telas dopadas

En el Cuadro 3.1 se presentan los datos registrados experimentalmente y los cálculos derivados: la resistencia del filamento (R_T), la resistencia relativa (R_R), la temperatura estimada (T) y su cuarta potencia (T^4). Se agrega también el error relativo para cada uno de estos datos calculados utilizando la ecuación (3.4). Estos resultados constituyen la base numérica para las figuras y los ajustes que se discuten a continuación.

V (Volts)	I (Amps)	Rad (mV)	R (Ω)	T (K)	T_{err} (K)	T^4 (K^4)	$(T^4)_{\text{err}}$ (K^4)
1.00	0.92	$0,26 \pm 0,01$	1.09	851.33	25.54	$5,25 \times 10^{11}$	$2,63 \times 10^{10}$
2.00	1.21	$1,22 \pm 0,06$	1.65	1165.86	34.98	$1,85 \times 10^{12}$	$9,24 \times 10^{10}$
3.00	1.45	$3,42 \pm 0,17$	2.07	1401.06	42.03	$3,85 \times 10^{12}$	$1,93 \times 10^{11}$
4.00	1.67	$6,36 \pm 0,32$	2.40	1586.11	47.58	$6,33 \times 10^{12}$	$3,16 \times 10^{11}$
5.00	1.86	$9,89 \pm 0,49$	2.68	1744.47	52.33	$9,26 \times 10^{12}$	$4,63 \times 10^{11}$
6.00	2.04	$13,85 \pm 0,69$	2.94	1889.33	56.68	$1,27 \times 10^{13}$	$6,37 \times 10^{11}$
7.00	2.21	$18,40 \pm 0,92$	3.17	2016.78	60.50	$1,65 \times 10^{13}$	$8,27 \times 10^{11}$
8.00	2.36	$23,10 \pm 1,16$	3.39	2142.10	64.26	$2,11 \times 10^{13}$	$1,05 \times 10^{12}$
9.00	2.51	$28,40 \pm 1,42$	3.58	2248.51	67.46	$2,56 \times 10^{13}$	$1,28 \times 10^{12}$
10.00	2.66	$33,70 \pm 1,69$	3.77	2350.54	70.52	$3,05 \times 10^{13}$	$1,22 \times 10^{12}$
11.00	2.79	$40,10 \pm 2,01$	3.95	2451.54	73.55	$3,61 \times 10^{13}$	$1,44 \times 10^{12}$
11.74	2.88	$43,90 \pm 2,20$	4.07	2523.24	75.70	$4,05 \times 10^{13}$	$1,52 \times 10^{12}$

Cuadro 3.1: Resultados experimentales de la Etapa 1.

Recordando lo expuesto en la sección 2.10, la ley de Stefan–Boltzmann establece que la potencia radiada por unidad de área de un emisor ideal cumple

$$P = \sigma T^4,$$

por lo que, a partir de los valores de temperatura del filamento obtenidos en cada medición (mostrados en el Cuadro 3.1), se calculó la cuarta potencia de la temperatura T^4 y se elaboraron las gráficas correspondientes. Se realizaron tres tipos de gráficas y se ajustó la ecuación de la curva representativa para cada caso; la ecuación del ajuste y su interpretación se muestran en la Figura 3.2.

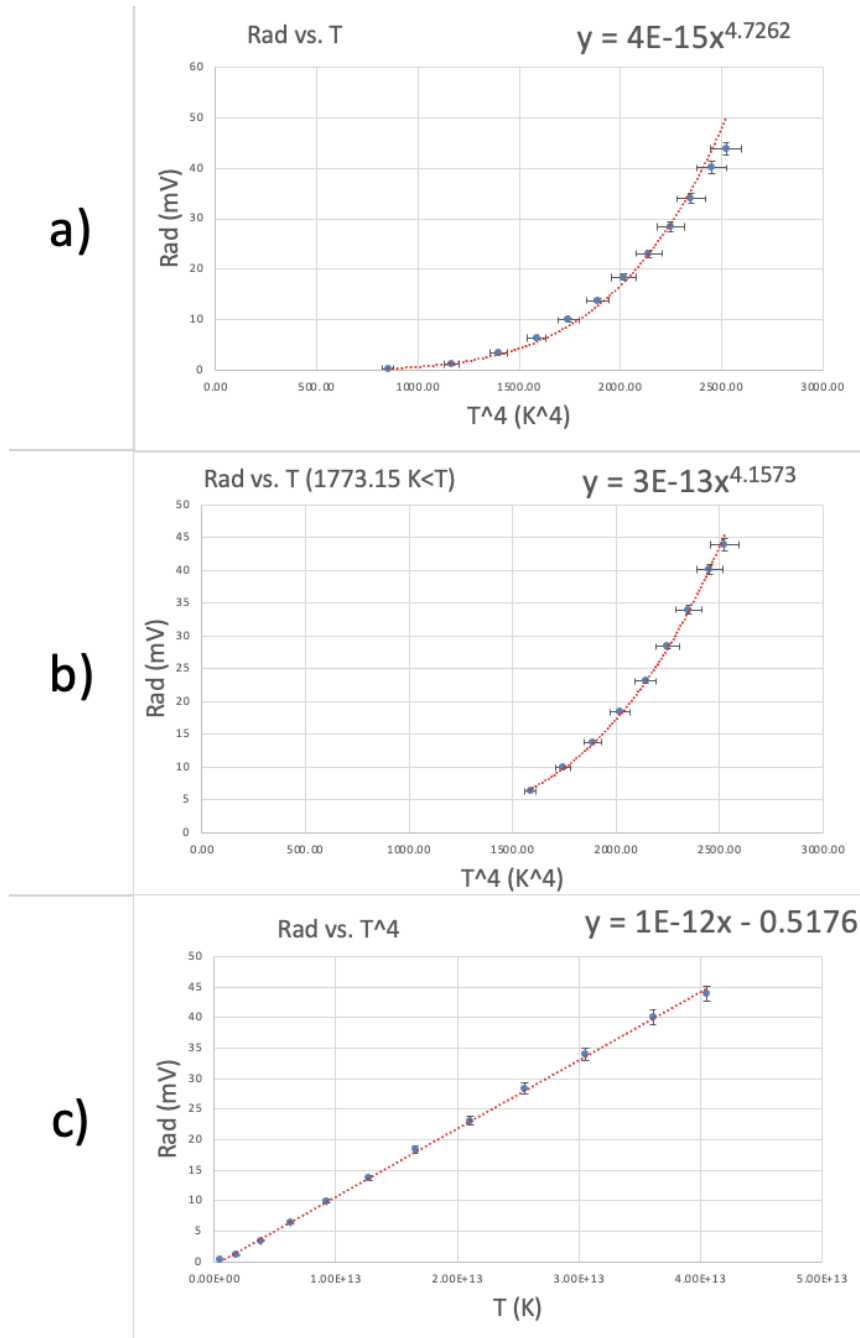


Figura 3.2: a) Gráfica de radiación contra temperatura de la Etapa 1.
 b) Gráfica de radiación contra temperatura de la Etapa 1 para $T > 1773,15 K$.
 c) Gráfica de radiación contra T^4 de la Etapa 1.

La Figura 3.2 a) es una gráfica de radiación contra T , b) es de la misma índole, pero considerando únicamente valores de temperatura mayores a 1773.15 K (1500°C), y la tercera c) es una gráfica de radiación contra T^4 . Esto se hace con el fin de verificar la relación entre la potencia radiada y la temperatura, de acuerdo con la ley de Stefan-Boltzmann.

Los puntos azules en las gráficas corresponden a los valores puntuales medidos; las barras sobre estos corresponden al error calculado para los valores de radiación y temperatura; mientras que la curva roja corresponde al ajuste potencial para cada grupo de resultados, y su ecuación se expone en cada una de las figuras.

El análisis de las tres etapas experimentales, junto con la incertidumbre representativa (sección 3.2), permite extraer conclusiones claras sobre el comportamiento de la radiación térmica medida y el efecto real de las telas dopadas con WO_X . En la Etapa 1, sin interposición de telas, se estableció la línea base de referencia. En estas primeras mediciones se obtuvo un exponente de $n = 4,1573$ para la curva de la figura 3.2, inciso b), es decir, una desviación pequeña de aproximadamente +3,9% respecto al valor teórico 4,00. Esta diferencia se considera moderadamente pequeña y puede explicarse por factores experimentales razonables: incertidumbres en la calibración R-T del filamento, estabilidad del suministro de corriente/voltaje durante las medidas, sensibilidad espectral del sensor de radiación, o efectos geométricos menores (alineación). En conjunto, los resultados de la etapa 1 verifican de forma satisfactoria la dependencia T^4 dentro de la incertidumbre experimental disponible.

3.4. Etapa 2: Medición con telas dopadas con WO_X

Para esta etapa, se siguió el mismo protocolo descrito en la sección anterior, con la diferencia de que se interpusieron sucesivamente las cuatro muestras de tela de algodón dopadas con WO_X entre la lámpara y el sensor (Figura 3.3). De esta forma, se obtuvo una serie de mediciones de voltaje, corriente e intensidad radiada para cada tela, permitiendo evaluar la atenuación de la radiación térmica inducida por el tratamiento con WO_X .

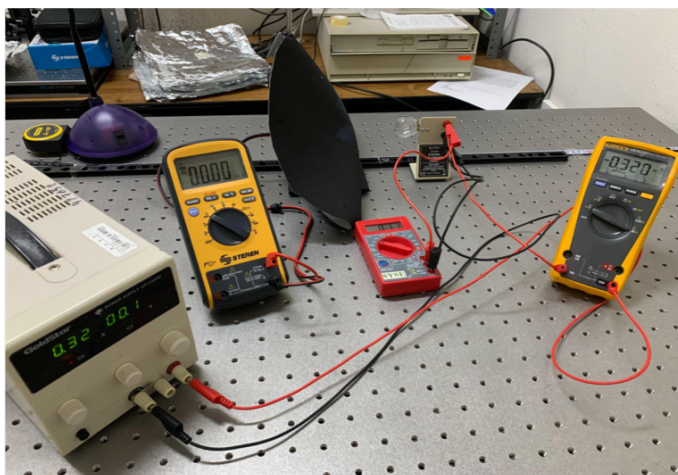


Figura 3.3: Montaje experimental con una tela de algodón dopada con WO_X interpuesta usado para las mediciones experimentales.

A continuación, se presenta cada tela dopada con WO_X utilizada, junto con su tabla de resultados y sus gráficas correspondientes, similar a como se presenta en la sección 3.3.

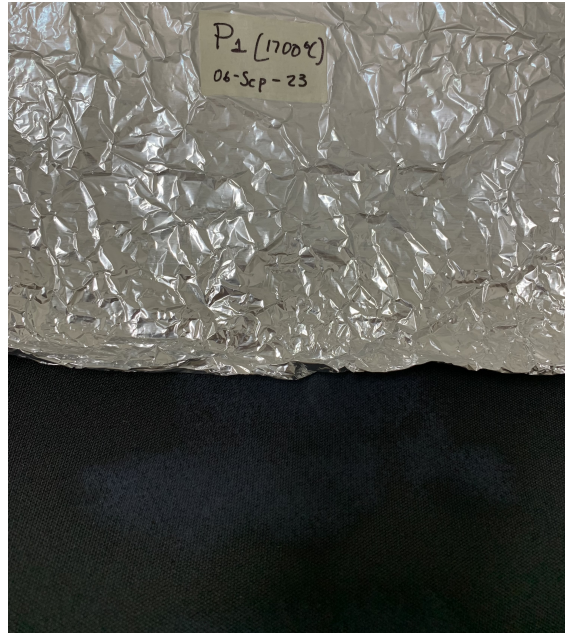


Figura 3.4: Tela de poliéster dopada con WO_X .

La figura 3.4 presenta la tela de poliéster (P_1) con recubrimiento de WO_X . El Cuadro 3.2 muestra los resultados obtenidos similarmente a la Etapa 1 y las respectivas gráficas generadas a partir de estos (Figura 3.5), esta vez, estudiando el caso con la tela P_1 de por medio.

V (Volts)	I (Amps)	Rad (mV)	R (Ω)	T (K)	T_{err} (K)	T^4 (K^4)	$(T^4)_{err}$ (K^4)
1.00	0.95	$-0,16 \pm 0,00$	1.05	830.26	24.91	$4,75 \times 10^{11}$	$2,38 \times 10^{10}$
2.00	1.22	$0,06 \pm 0,00$	1.64	1160.56	34.82	$1,81 \times 10^{12}$	$9,07 \times 10^{10}$
3.00	1.45	$0,17 \pm 0,01$	2.07	1398.67	41.96	$3,83 \times 10^{12}$	$1,91 \times 10^{11}$
4.00	1.66	$0,52 \pm 0,03$	2.41	1588.53	47.66	$6,37 \times 10^{12}$	$3,18 \times 10^{11}$
5.00	1.86	$0,95 \pm 0,05$	2.70	1746.08	52.38	$9,30 \times 10^{12}$	$4,65 \times 10^{11}$
6.00	2.03	$1,37 \pm 0,07$	2.96	1895.00	56.85	$1,29 \times 10^{13}$	$6,45 \times 10^{11}$
7.00	2.20	$1,83 \pm 0,09$	3.18	2022.42	60.67	$1,67 \times 10^{13}$	$8,36 \times 10^{11}$
8.00	2.36	$2,33 \pm 0,12$	3.39	2141.29	64.24	$2,10 \times 10^{13}$	$1,05 \times 10^{12}$
9.00	2.50	$2,91 \pm 0,15$	3.60	2255.72	67.67	$2,59 \times 10^{13}$	$1,04 \times 10^{12}$
10.00	2.65	$3,51 \pm 0,18$	3.77	2359.31	70.78	$3,10 \times 10^{13}$	$1,24 \times 10^{12}$
11.00	2.78	$4,13 \pm 0,21$	3.96	2458.69	73.76	$3,65 \times 10^{13}$	$1,46 \times 10^{12}$
11.70	2.88	$4,62 \pm 0,23$	4.06	2520.21	75.61	$4,03 \times 10^{13}$	$1,61 \times 10^{12}$

Cuadro 3.2: Resultados experimentales para tela P_1 .

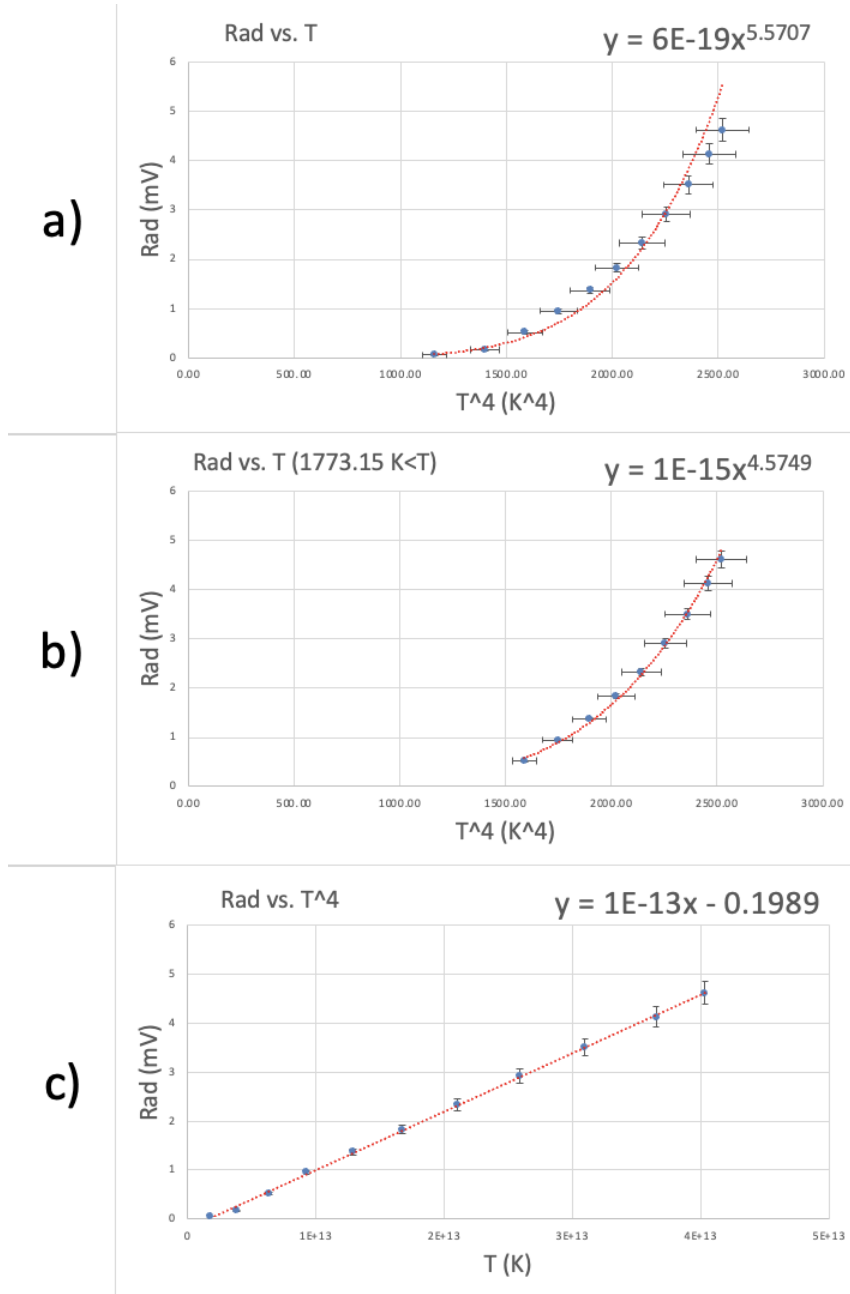


Figura 3.5: a) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela P_1 .
 b) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela P_1 para $T > 1773,15 K$.
 c) Gráfica de radiación contra T^4 de la Etapa 2 para la tela P_1 .

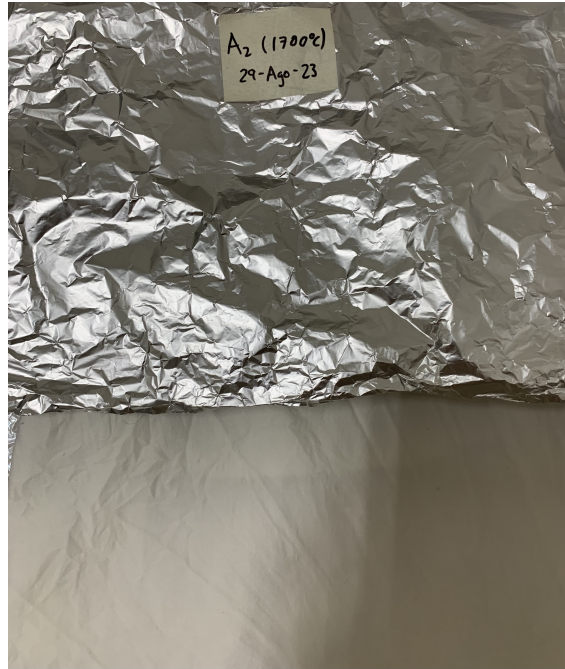


Figura 3.6: Tela de algodón dopada con WO_X .

La figura 3.6 presenta una de las telas de algodón, nombrada A_2 , con recubrimiento de WO_X . El Cuadro 3.3 muestra los resultados obtenidos similarmente a la Etapa 1 y las respectivas gráficas generadas a partir de estos (Figura 3.7), esta vez, estudiando el caso con la tela A_2 de por medio.

V (Volts)	I (Amps)	Rad (mV)	R (Ω)	T (K)	T_{err} (K)	T^4 (K^4)	$(T^4)_{err}$ (K^4)
1.00	0.92	$-0,20 \pm 0,01$	1.09	852.66	25.58	$5,29 \times 10^{11}$	$2,64 \times 10^{10}$
2.00	1.22	$0,00 \pm 0,00$	1.64	1162.07	34.86	$1,82 \times 10^{12}$	$9,12 \times 10^{10}$
3.00	1.45	$0,19 \pm 0,01$	2.07	1401.86	42.06	$3,86 \times 10^{12}$	$1,93 \times 10^{11}$
4.00	1.67	$0,60 \pm 0,03$	2.39	1582.89	47.49	$6,28 \times 10^{12}$	$3,11 \times 10^{11}$
5.00	1.86	$1,03 \pm 0,05$	2.69	1747.70	52.43	$9,33 \times 10^{12}$	$4,66 \times 10^{11}$
6.00	2.04	$1,60 \pm 0,08$	2.94	1889.33	56.68	$1,27 \times 10^{13}$	$6,37 \times 10^{11}$
7.00	2.21	$2,20 \pm 0,11$	3.17	2018.39	60.55	$1,66 \times 10^{13}$	$8,30 \times 10^{11}$
8.00	2.36	$2,81 \pm 0,14$	3.39	2139.68	64.19	$2,10 \times 10^{13}$	$1,02 \times 10^{12}$
9.00	2.51	$3,54 \pm 0,18$	3.59	2251.71	67.55	$2,57 \times 10^{13}$	$1,03 \times 10^{12}$
10.00	2.65	$4,29 \pm 0,21$	3.77	2354.52	70.64	$3,07 \times 10^{13}$	$1,12 \times 10^{12}$
11.00	2.78	$5,04 \pm 0,25$	3.95	2455.51	73.67	$3,64 \times 10^{13}$	$1,10 \times 10^{12}$
11.77	2.88	$5,62 \pm 0,28$	4.08	2529.07	75.87	$4,09 \times 10^{13}$	$1,21 \times 10^{12}$

Cuadro 3.3: Resultados experimentales para tela A_2 .

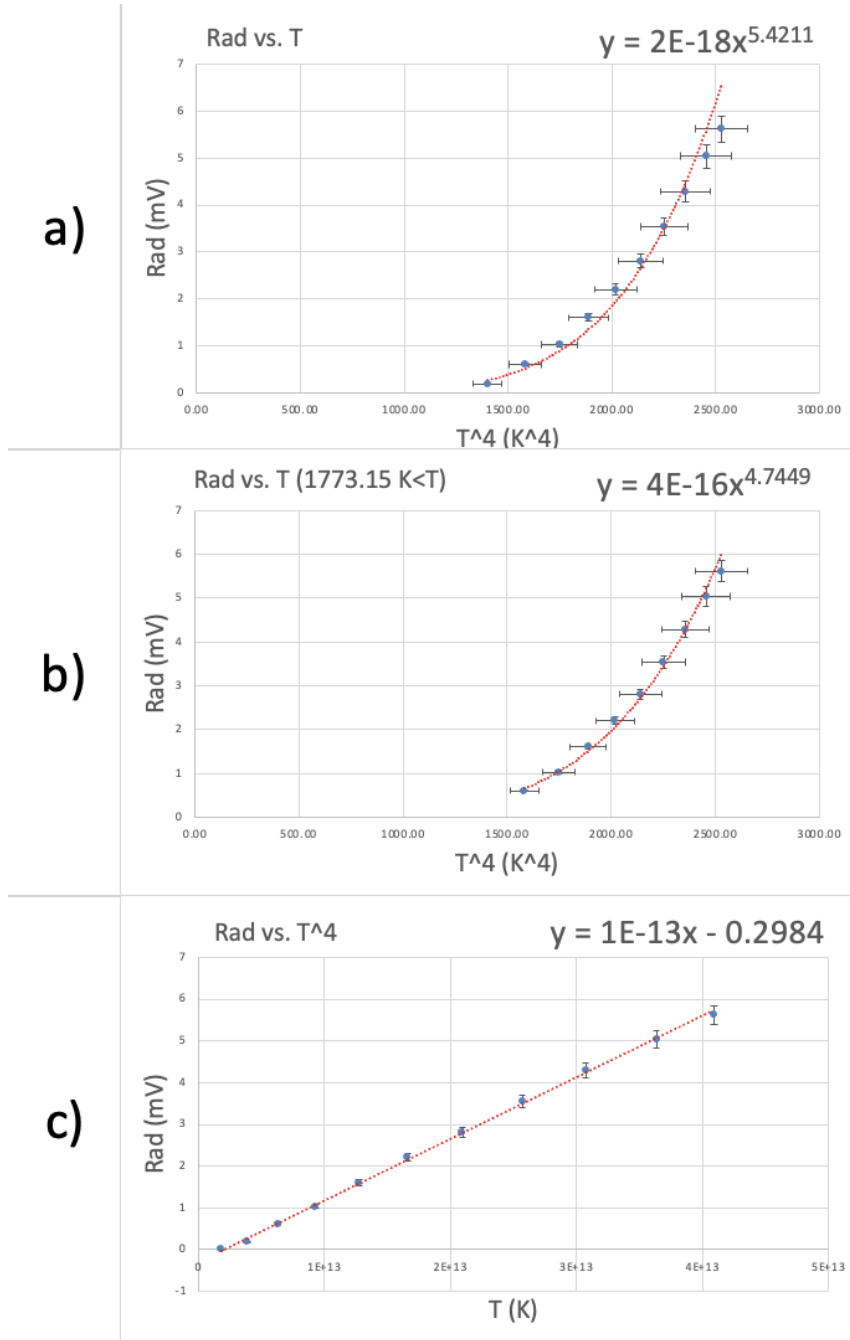


Figura 3.7: a) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_2 .
 b) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_2 para $T > 1773,15 K$.
 c) Gráfica de radiación contra T^4 de la Etapa 2 para la tela A_2 .

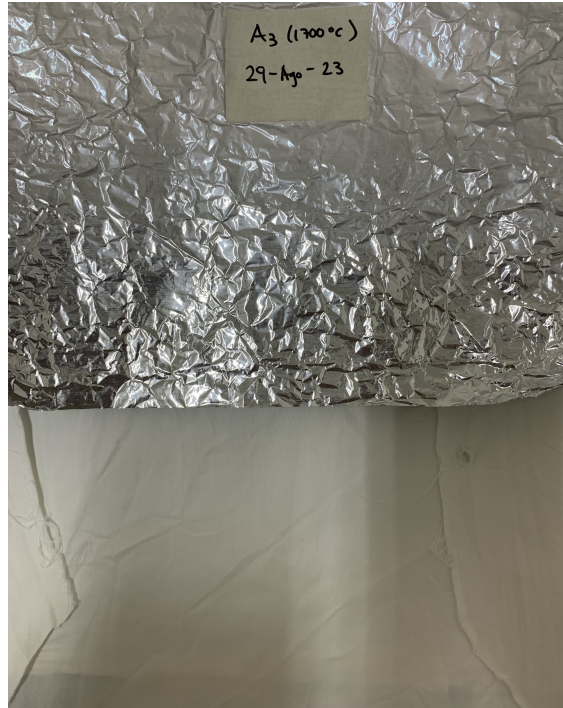


Figura 3.8: Tela de algodón dopada con WO_X .

La figura 3.8 presenta una de las telas de algodón, nombrada A_3 , con recubrimiento de WO_X . El Cuadro 3.4 muestra los resultados obtenidos similarmente a la Etapa 1 y las respectivas gráficas generadas a partir de estos (Figura 3.9), esta vez, estudiando el caso con la tela A_3 de por medio.

V (Volts)	I (Amps)	Rad (mV)	R (Ω)	T (K)	T_{err} (K)	T^4 (K^4)	$(T^4)_{err}$ (K^4)
1.00	0.93	$-0,31 \pm 0,01$	1.07	842.21	25.27	$5,03 \times 10^{11}$	$2,52 \times 10^{10}$
2.00	1.22	$-0,15 \pm 0,01$	1.64	1163.58	34.91	$1,83 \times 10^{12}$	$9,17 \times 10^{10}$
3.00	1.46	$0,06 \pm 0,00$	2.06	1397.08	41.91	$3,81 \times 10^{12}$	$1,90 \times 10^{11}$
4.00	1.67	$0,34 \pm 0,02$	2.40	1584.50	47.53	$6,30 \times 10^{12}$	$3,15 \times 10^{11}$
5.00	1.86	$0,65 \pm 0,03$	2.69	1747.70	52.43	$9,33 \times 10^{12}$	$4,66 \times 10^{11}$
6.00	2.03	$1,02 \pm 0,05$	2.95	1895.81	56.87	$1,29 \times 10^{13}$	$6,46 \times 10^{11}$
7.00	2.21	$1,44 \pm 0,07$	3.17	2019.20	60.58	$1,66 \times 10^{13}$	$8,31 \times 10^{11}$
8.00	2.36	$1,99 \pm 0,10$	3.39	2140.49	64.21	$2,10 \times 10^{13}$	$1,04 \times 10^{12}$
9.00	2.51	$2,42 \pm 0,12$	3.59	2251.71	67.55	$2,57 \times 10^{13}$	$1,03 \times 10^{12}$
10.00	2.65	$2,91 \pm 0,15$	3.78	2356.91	70.71	$3,09 \times 10^{13}$	$1,23 \times 10^{12}$
11.00	2.78	$3,47 \pm 0,17$	3.96	2457.10	73.71	$3,64 \times 10^{13}$	$1,46 \times 10^{12}$
11.59	2.86	$3,80 \pm 0,19$	4.06	2514.60	75.44	$3,99 \times 10^{13}$	$1,52 \times 10^{12}$

Cuadro 3.4: Resultados experimentales para tela A_3 .

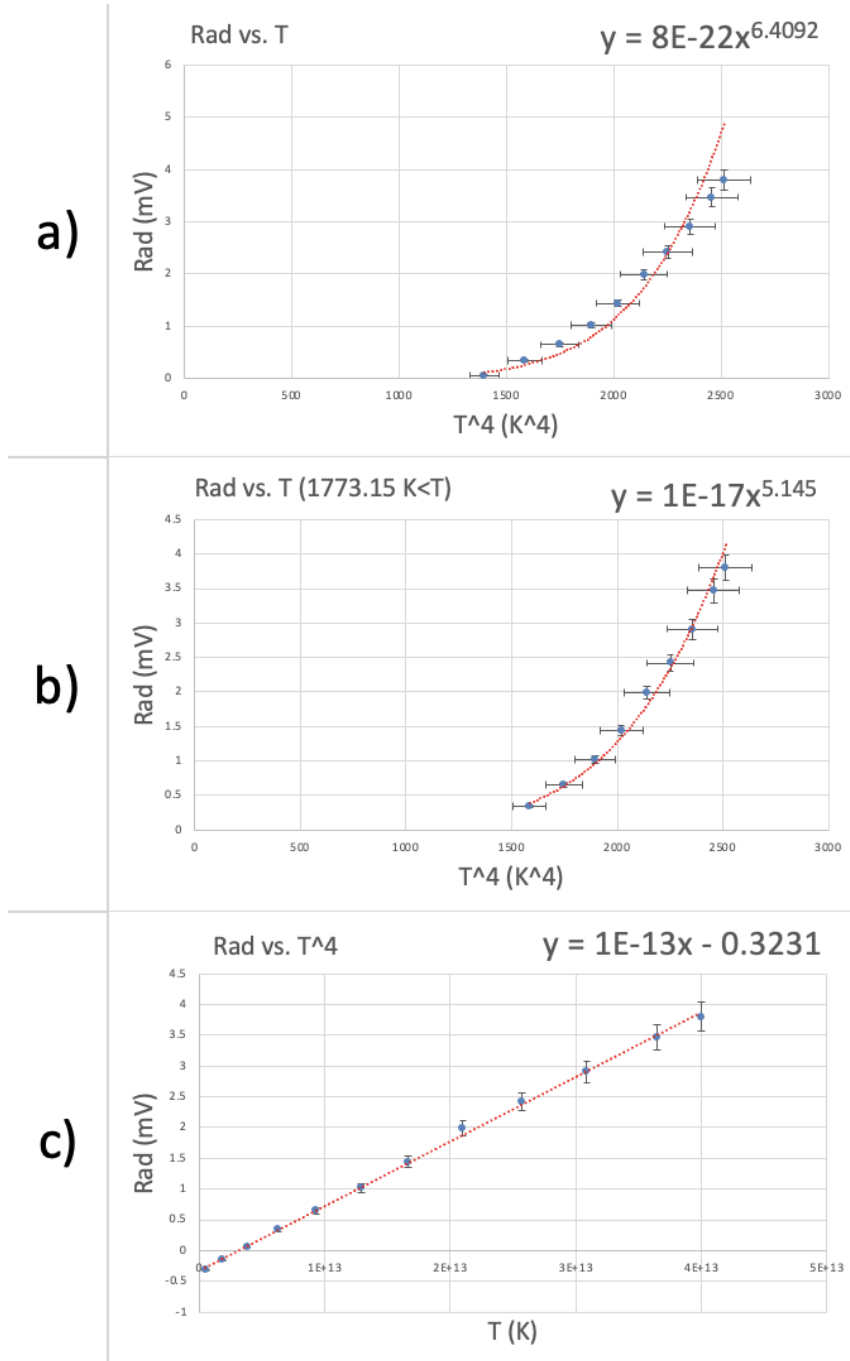


Figura 3.9: a) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_3 .
b) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_3 para $T > 1773,15 K$.
c) Gráfica de radiación contra T^4 de la Etapa 2 para la tela A_2 .

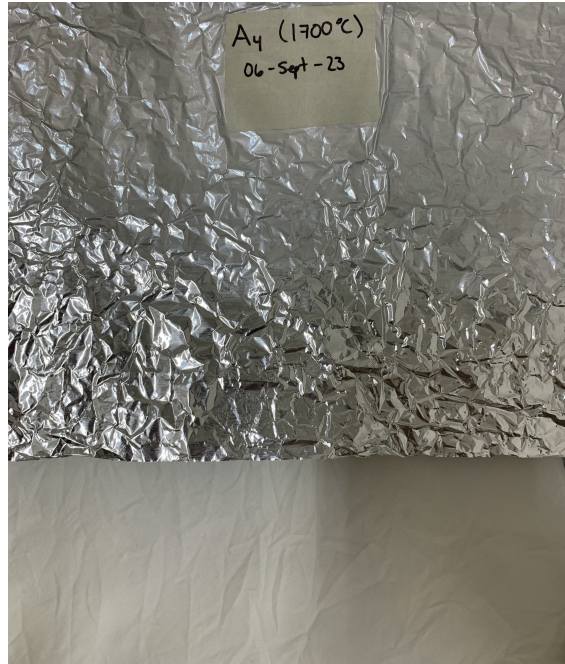


Figura 3.10: Tela de algodón dopada con WO_X .

La figura 3.10 presenta una de las telas de algodón, nombrada A_4 , con recubrimiento de WO_X . El Cuadro 3.5 muestra los resultados obtenidos similarmente a la Etapa 1 y las respectivas gráficas generadas a partir de estos (Figura 3.11), esta vez, estudiando el caso con la tela A_4 de por medio.

V (Volts)	I (Amps)	Rad (mV)	R (Ω)	T (K)	T_{err} (K)	T^4 (K^4)	$(T^4)_{err}$ (K^4)
1.00	0.93	$0,29 \pm 0,01$	1.07	843.50	25.31	$5,06 \times 10^{11}$	$2,53 \times 10^{10}$
2.00	1.22	$0,28 \pm 0,01$	1.64	1162.82	34.88	$1,83 \times 10^{12}$	$9,14 \times 10^{10}$
3.00	1.45	$0,49 \pm 0,02$	2.07	1401.86	42.06	$3,86 \times 10^{12}$	$1,93 \times 10^{11}$
4.00	1.66	$0,86 \pm 0,04$	2.41	1590.15	47.70	$6,39 \times 10^{12}$	$3,20 \times 10^{11}$
5.00	1.86	$1,27 \pm 0,06$	2.69	1746.89	52.41	$9,31 \times 10^{12}$	$4,66 \times 10^{11}$
6.00	2.03	$1,65 \pm 0,08$	2.95	1895.81	56.87	$1,29 \times 10^{13}$	$6,46 \times 10^{11}$
7.00	2.20	$2,24 \pm 0,11$	3.18	2022.42	60.67	$1,67 \times 10^{13}$	$8,36 \times 10^{11}$
8.00	2.46	$2,84 \pm 0,14$	3.25	2064.09	61.92	$1,82 \times 10^{13}$	$7,26 \times 10^{11}$
9.00	2.51	$3,36 \pm 0,17$	3.59	2252.51	67.58	$2,57 \times 10^{13}$	$1,03 \times 10^{12}$
10.00	2.65	$4,24 \pm 0,21$	3.77	2356.91	70.71	$3,09 \times 10^{13}$	$1,23 \times 10^{12}$
11.00	2.78	$4,94 \pm 0,25$	3.95	2456.30	73.69	$3,64 \times 10^{13}$	$1,46 \times 10^{12}$
12.00	2.91	$5,64 \pm 0,28$	4.12	2551.31	76.54	$4,24 \times 10^{13}$	$1,61 \times 10^{12}$

Cuadro 3.5: Resultados experimentales para tela A_4 .

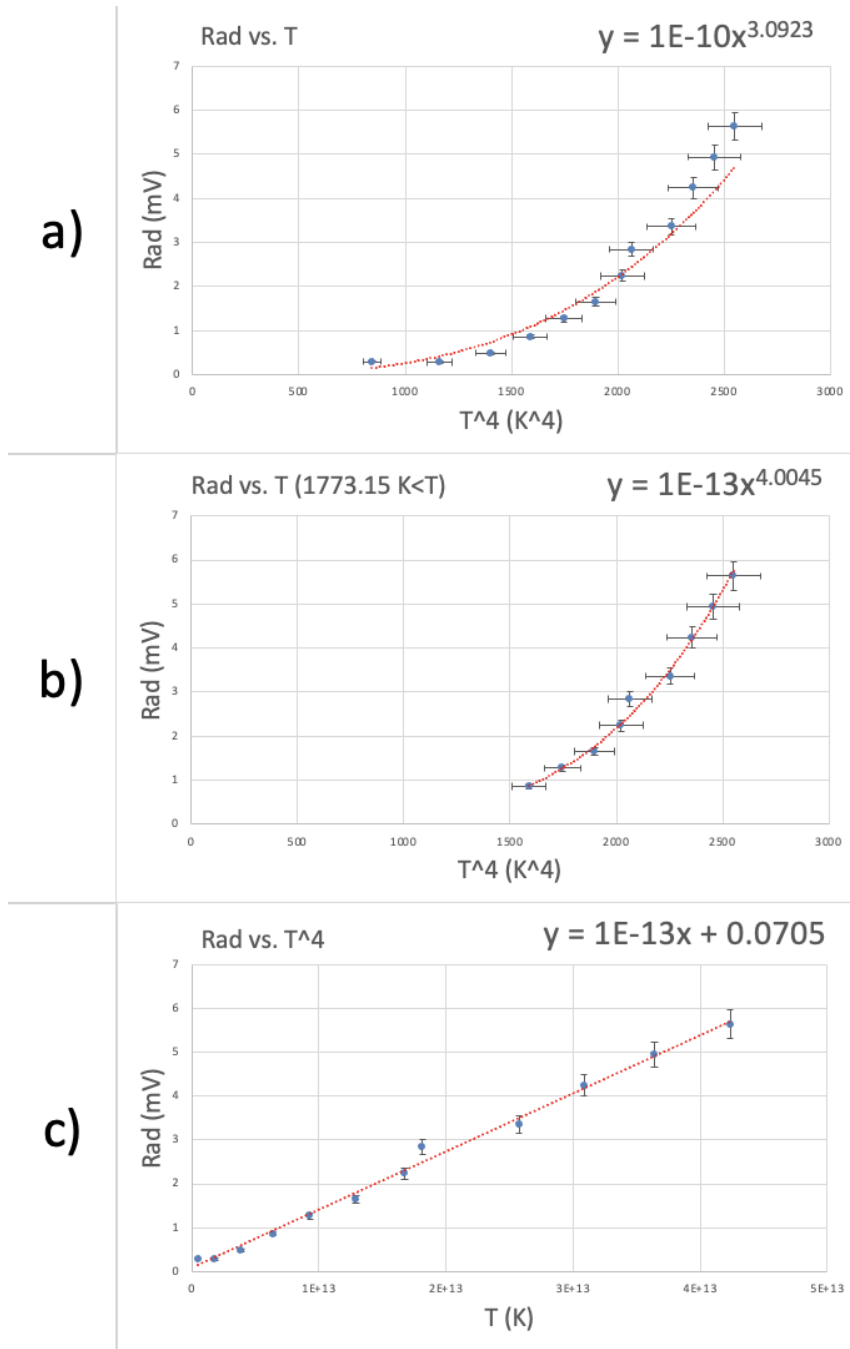


Figura 3.11: a) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_4 .
 b) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_4 para $T > 1773,15 K$.
 c) Gráfica de radiación contra T^4 de la Etapa 2 para la tela A_2 .

En la Etapa 2 se interpusieron las telas dopadas con WO_X y se observaron exponentes con una mayor dispersión:

- P1 (poliéster): $n = 4,5749 (+14,4 \%)$.

3.5 Etapa 3: Medición con telas dopadas con WO_X fuera del diámetro del depósito.

- **A2, A3, A4 (algodón):** $n = 4,7449$ (+18,6%), $n = 5,1450$ (+28,6%) y $n = 4,0045$ (+0,11%), respectivamente.

La presencia de la tela altera no solo la magnitud de la radiación registrada (se observó una atenuación global), sino también la dependencia con la temperatura. Exponentes mayores que 4 indican, de forma cualitativa, que la emisividad efectiva del sistema observado crece con la temperatura en el rango estudiado; equivalentemente, si se escribe $P \propto \varepsilon(T) T^4$, y localmente, $\varepsilon(T) \propto T^m$, entonces el exponente medido $n \approx 4 + m$ [9]. Valores como $n \approx 4,6-5,1$ corresponderían a una variación efectiva de la emisividad con m en el orden de 0,6-1,1. Tales comportamientos pueden surgir si el recubrimiento o la tela presentan cambios en su respuesta espectral al aumentar T (por ejemplo, una mayor emisividad en la banda donde el detector es más sensible a temperaturas altas). La variabilidad entre A2, A3 y A4 sugiere diferencias en el recubrimiento (espesor, uniformidad) o en la estructura del textil (porosidad, orientación de fibras) que hace que cada muestra responda de forma distinta.

3.5. Etapa 3: Medición con telas dopadas con WO_X fuera del diámetro del depósito.

En esta etapa se repitió el protocolo de la Etapa 2, con la diferencia de que la tela entre el sensor de radiación y la lámpara de Stefan-Boltzmann se centró en un punto fuera del diámetro central que corresponde al depósito de WO_X . Esto con el fin de poder evaluar la afectación del depósito de WO_X en la disminución de radiación transmitida y no únicamente por las telas. A continuación, se presentan las tablas (Cuadros 3.6-3.9) y gráficas correspondientes (Figuras 3.12-3.15) de mediciones y cálculos para cada tela, similarmente a la Etapa 2.

V (Volts)	I (Amps)	Rad (mV)	R (Ω)	T (K)	T_{err} (K)	T^4 (K ⁴)	$(T^4)_{err}$ (K ⁴)
1.00	0.94	0,08 ± 0,00	1.06	837.12	25.11	$4,91 \times 10^{11}$	$2,46 \times 10^{10}$
2.00	1.22	0,22 ± 0,01	1.64	1159.81	34.79	$1,81 \times 10^{12}$	$9,05 \times 10^{10}$
3.00	1.46	0,42 ± 0,01	2.05	1397.08	41.91	$3,81 \times 10^{12}$	$1,90 \times 10^{11}$
4.00	1.67	0,74 ± 0,04	2.40	1586.91	47.61	$6,34 \times 10^{12}$	$3,17 \times 10^{11}$
5.00	1.86	1,23 ± 0,06	2.70	1747.70	52.43	$9,33 \times 10^{12}$	$4,66 \times 10^{11}$
6.00	2.04	1,66 ± 0,08	2.94	1893.37	56.80	$1,29 \times 10^{13}$	$6,43 \times 10^{11}$
7.00	2.20	2,06 ± 0,10	3.18	2024.04	60.72	$1,68 \times 10^{13}$	$8,39 \times 10^{11}$
8.00	2.36	2,67 ± 0,13	3.39	2139.68	64.19	$2,10 \times 10^{13}$	$1,02 \times 10^{12}$
9.00	2.51	3,30 ± 0,16	3.60	2254.12	67.62	$2,58 \times 10^{13}$	$1,03 \times 10^{12}$
10.00	2.65	3,87 ± 0,19	3.77	2355.31	70.66	$3,08 \times 10^{13}$	$1,23 \times 10^{12}$
11.00	2.78	4,51 ± 0,23	3.96	2457.10	73.71	$3,64 \times 10^{13}$	$1,46 \times 10^{12}$
12.00	2.91	5,22 ± 0,26	4.12	2549.73	76.49	$4,23 \times 10^{13}$	$1,53 \times 10^{12}$

Cuadro 3.6: Resultados experimentales para tela P_1 fuera del depósito de WO_X .

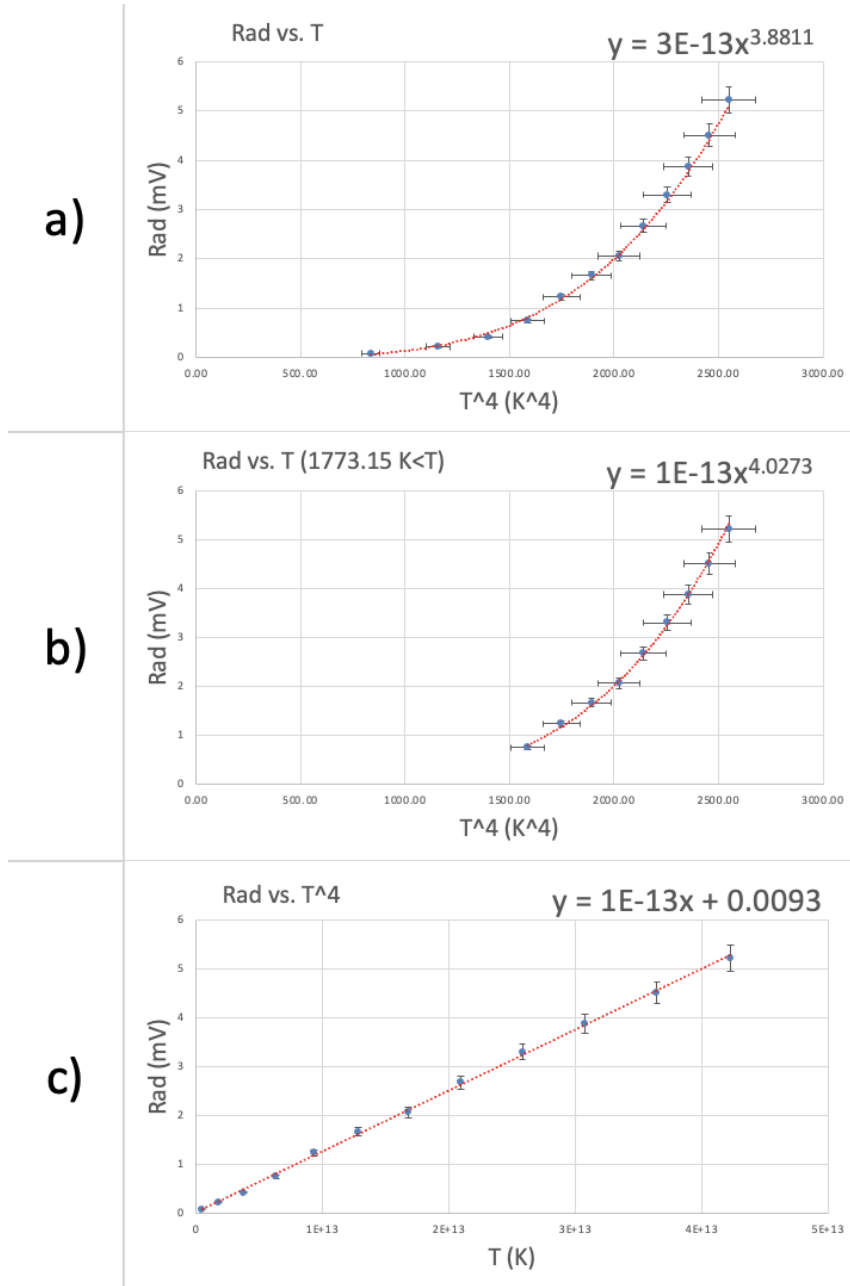


Figura 3.12: a) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela P_1 fuera del depósito de WO_X .
 b) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela P_1 fuera del depósito de WO_X para $T > 1773,15 K$.
 c) Gráfica de radiación contra T^4 de la Etapa 3 para la tela P_1 fuera del depósito de WO_X .

Desarrollo Experimental

3.5 Etapa 3: Medición con telas dopadas con WO_X fuera del diámetro del depósito.

V (Volts)	I (Amps)	Rad (mV)	R (Ω)	T (K)	T_{err} (K)	T^4 (K^4)	$(T^4)_{\text{err}}$ (K^4)
1.00	0.92	$0,16 \pm 0,01$	1.08	850.01	25.50	$5,22 \times 10^{11}$	$2,61 \times 10^{10}$
2.00	1.22	$0,26 \pm 0,01$	1.64	1159.06	34.77	$1,80 \times 10^{12}$	$9,02 \times 10^{10}$
3.00	1.46	$0,53 \pm 0,03$	2.05	1396.29	41.89	$3,80 \times 10^{12}$	$1,90 \times 10^{11}$
4.00	1.67	$0,84 \pm 0,04$	2.40	1586.91	47.61	$6,34 \times 10^{12}$	$3,17 \times 10^{11}$
5.00	1.87	$1,37 \pm 0,07$	2.67	1739.65	52.19	$9,16 \times 10^{12}$	$4,58 \times 10^{11}$
6.00	2.05	$1,70 \pm 0,10$	2.87	1882.90	56.49	$1,26 \times 10^{13}$	$6,34 \times 10^{11}$
7.00	2.20	$2,13 \pm 0,11$	3.19	2026.47	60.79	$1,69 \times 10^{13}$	$8,43 \times 10^{11}$
8.00	2.35	$2,46 \pm 0,12$	3.40	2145.32	64.36	$2,12 \times 10^{13}$	$1,05 \times 10^{12}$
9.00	2.52	$3,20 \pm 0,16$	3.57	2245.32	67.36	$2,54 \times 10^{13}$	$1,02 \times 10^{12}$
10.00	2.68	$3,34 \pm 0,17$	3.73	2332.45	69.97	$2,96 \times 10^{13}$	$1,18 \times 10^{12}$
11.00	2.78	$3,80 \pm 0,19$	3.97	2457.90	73.74	$3,65 \times 10^{13}$	$1,46 \times 10^{12}$
11.60	2.88	$4,15 \pm 0,21$	4.03	2494.48	74.83	$3,87 \times 10^{13}$	$1,55 \times 10^{12}$

Cuadro 3.7: Resultados experimentales para tela A_2 fuera del depósito de óxido de Tungsteno.

3.5 Etapa 3: Medición con telas dopadas con WO_X fuera del diámetro del depósito.

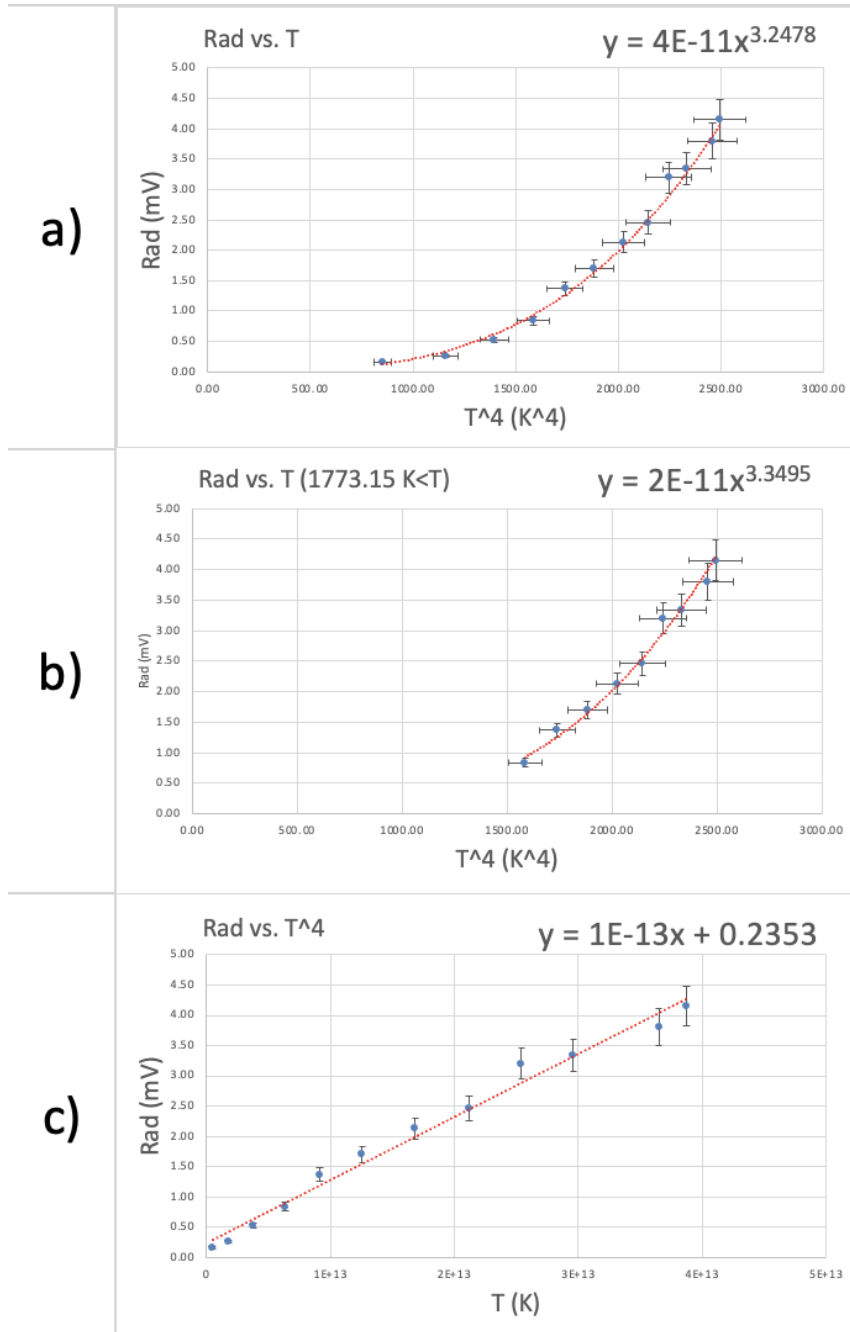


Figura 3.13: a) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_2 fuera del depósito de WO_X .
 b) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_2 fuera del depósito de WO_X para $T > 1773,15 K$.
 c) Gráfica de radiación contra T^4 de la Etapa 3 para la tela A_2 fuera del depósito de WO_X .

Desarrollo Experimental

3.5 Etapa 3: Medición con telas dopadas con WO_X fuera del diámetro del depósito.

V (Volts)	I (Amps)	Rad (mV)	R (Ω)	T (K)	T_{err} (K)	T^4 (K ⁴)	$(T^4)_{err}$ (K ⁴)
1.00	0.95	$-0,18 \pm 0,01$	1.05	833.36	25.00	$4,82 \times 10^{11}$	$2,41 \times 10^{10}$
2.00	1.22	$-0,13 \pm 0,01$	1.64	1158.31	34.75	$1,80 \times 10^{12}$	$9,00 \times 10^{10}$
3.00	1.46	$0,12 \pm 0,01$	2.05	1394.71	41.84	$3,78 \times 10^{12}$	$1,89 \times 10^{11}$
4.00	1.67	$0,65 \pm 0,03$	2.40	1582.89	47.49	$6,28 \times 10^{12}$	$3,11 \times 10^{11}$
5.00	1.86	$0,92 \pm 0,05$	2.68	1744.47	52.33	$9,26 \times 10^{12}$	$4,63 \times 10^{11}$
6.00	2.09	$1,78 \pm 0,09$	2.87	1849.94	55.50	$1,17 \times 10^{13}$	$5,86 \times 10^{11}$
7.00	2.21	$2,40 \pm 0,12$	3.15	2019.20	60.58	$1,66 \times 10^{13}$	$8,31 \times 10^{11}$
8.00	2.36	$3,19 \pm 0,16$	3.39	2138.88	64.17	$2,09 \times 10^{13}$	$1,04 \times 10^{12}$
9.00	2.51	$3,95 \pm 0,20$	3.58	2249.31	67.48	$2,56 \times 10^{13}$	$1,02 \times 10^{12}$
10.00	2.65	$4,72 \pm 0,24$	3.77	2353.72	70.61	$3,09 \times 10^{13}$	$1,23 \times 10^{12}$
11.00	2.78	$5,54 \pm 0,28$	3.96	2454.71	73.64	$3,63 \times 10^{13}$	$1,45 \times 10^{12}$
11.82	2.89	$6,30 \pm 0,32$	4.09	2531.63	75.95	$4,11 \times 10^{13}$	$1,52 \times 10^{12}$

Cuadro 3.8: Resultados experimentales para tela A_3 fuera del depósito de WO_X .

3.5 Etapa 3: Medición con telas dopadas con WO_X fuera del diámetro del depósito.

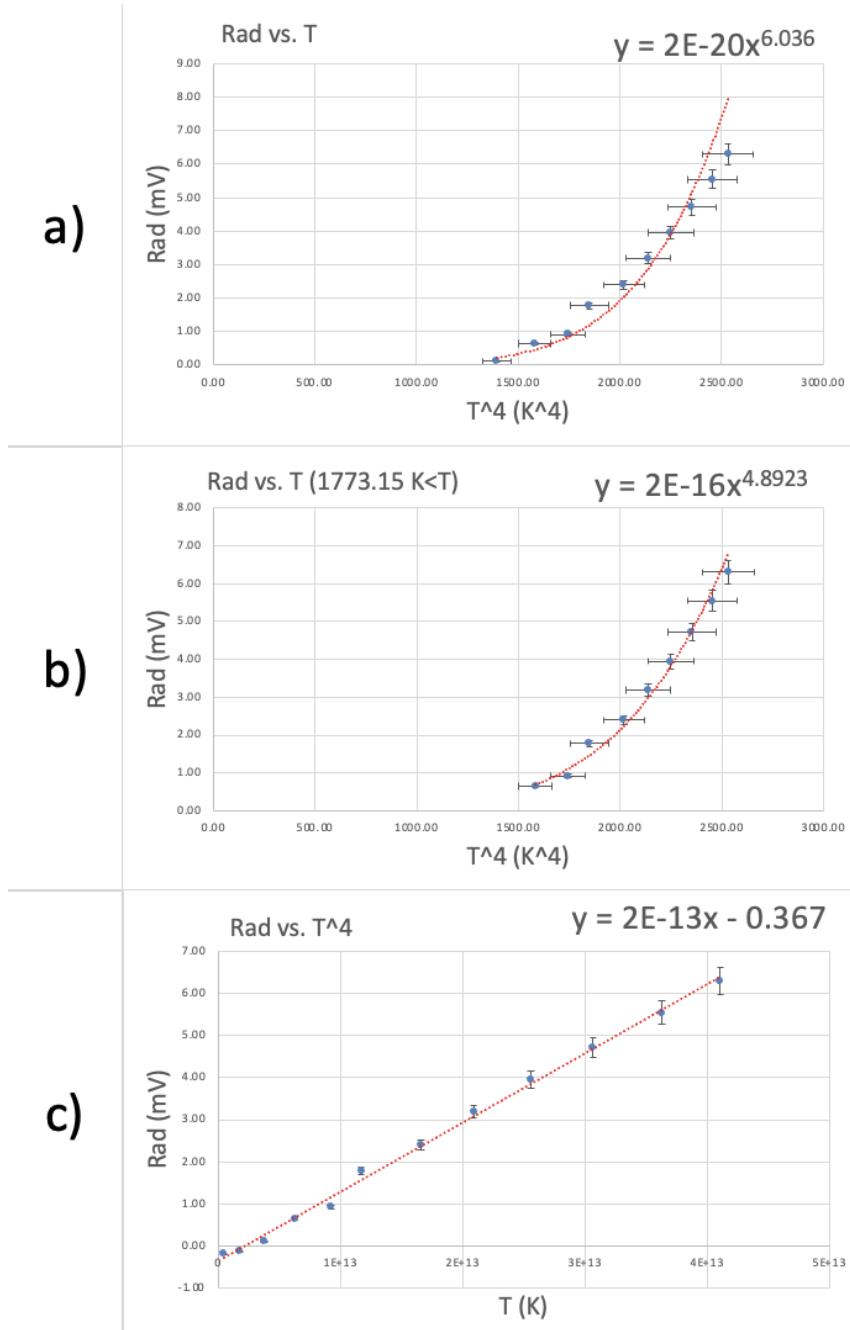


Figura 3.14: a) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_3 fuera del depósito de WO_X .
 b) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_3 fuera del depósito de WO_X para $T > 1773,15 K$.
 c) Gráfica de radiación contra T^4 de la Etapa 3 para la tela A_3 fuera del depósito de WO_X .

Desarrollo Experimental

3.5 Etapa 3: Medición con telas dopadas con WO_X fuera del diámetro del depósito.

V (Volts)	I (Amps)	Rad (mV)	R (Ω)	T (K)	T_{err} (K)	T^4 (K ⁴)	$(T^4)_{err}$ (K ⁴)
1.00	0.92	0,26 ± 0,01	1.09	851.33	25.54	$5,25 \times 10^{11}$	$2,63 \times 10^{10}$
2.00	1.21	1,22 ± 0,06	1.65	1165.86	34.98	$1,85 \times 10^{12}$	$9,24 \times 10^{10}$
3.00	1.45	3,42 ± 0,17	2.07	1401.06	42.03	$3,85 \times 10^{12}$	$1,93 \times 10^{11}$
4.00	1.67	6,36 ± 0,32	2.40	1586.11	47.58	$6,33 \times 10^{12}$	$3,16 \times 10^{11}$
5.00	1.86	9,89 ± 0,49	2.68	1744.47	52.33	$9,26 \times 10^{12}$	$4,63 \times 10^{11}$
6.00	2.04	13,85 ± 0,69	2.94	1889.33	56.68	$1,27 \times 10^{13}$	$6,37 \times 10^{11}$
7.00	2.21	18,40 ± 0,92	3.17	2016.78	60.50	$1,65 \times 10^{13}$	$8,27 \times 10^{11}$
8.00	2.36	23,10 ± 1,16	3.39	2142.10	64.26	$2,11 \times 10^{13}$	$1,05 \times 10^{12}$
9.00	2.51	28,40 ± 1,42	3.58	2248.51	67.46	$2,56 \times 10^{13}$	$1,28 \times 10^{12}$
10.00	2.66	33,70 ± 1,69	3.77	2350.54	70.52	$3,05 \times 10^{13}$	$1,22 \times 10^{12}$
11.00	2.79	40,10 ± 2,01	3.95	2451.54	73.55	$3,61 \times 10^{13}$	$1,44 \times 10^{12}$
11.74	2.88	43,90 ± 2,20	4.07	2523.24	75.70	$4,05 \times 10^{13}$	$1,52 \times 10^{12}$

Cuadro 3.9: Resultados experimentales para tela A_4 fuera del depósito de WO_X .

3.5 Etapa 3: Medición con telas dopadas con WO_X fuera del diámetro del depósito.

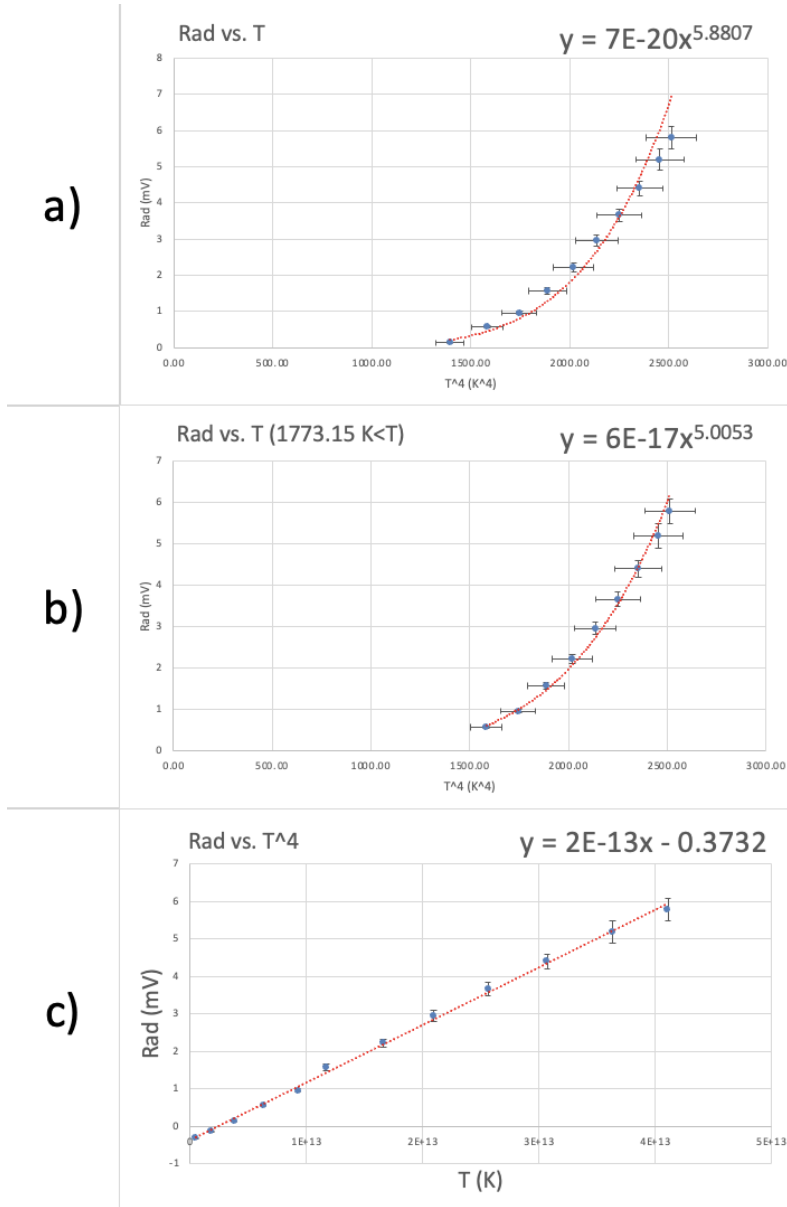


Figura 3.15: a) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_4 fuera del depósito de WO_X .

b) Gráfica de radiación contra temperatura de la tela A_4 fuera del depósito de WO_X para $T > 1773,15 K$.

c) Gráfica de radiación contra T^4 de la Etapa 3 para la tela A_4 fuera del depósito de WO_X .

3.5 Etapa 3: Medición con telas dopadas con WO_X fuera del diámetro del depósito.

En la Etapa 3 se repitieron las mediciones colocando las telas de modo que la medición verificara si el depósito tenía un efecto significativo, observándose:

- **P1:** $n = 4,0273$ (+0,68 %) — muy cercano a 4.
- **A2:** $n = 3,3495$ (−16,26 %).
- **A3:** $n = 4,8923$ (+22,31 %).
- **A4:** $n = 5,0053$ (+25,13 %).

El comportamiento de P1 vuelve a estar cerca del ideal, lo que sugiere que en la muestra de poliéster el efecto del depósito, tal como fue aplicado, no introdujo una variación persistente de la emisividad con T fuera del depósito (o bien la medición fuera del depósito minimiza el efecto del recubrimiento). En contraste, las telas de algodón muestran resultados variados: A2 presenta un exponente significativamente menor que 4, lo que sugiere una emisividad efectiva que decrece con la temperatura en esa configuración (o bien pérdidas no radiativas o filtrado espectral que atenúa la dependencia con T); A3 y A4 mantienen exponentes notablemente mayores que 4, indicando nuevamente un aumento efectivo de emisividad con T o efectos instrumentales fuertes en esas muestras.

3.5.1. Comparativa de etapas

A continuación se presentan el análisis e interpretación de los exponentes obtenidos al ajustar las dependencias experimentales Rad vs. T (para $T > 1773,15$ K). Recordando que, en el caso ideal de un emisor del tipo cuerpo negro, la ley de Stefan–Boltzmann predice

$$P \propto T^4,$$

un exponente experimental n tal que $\text{Rad} \propto T^n$ que difiera de 4 indica la presencia de efectos adicionales (variación de emisividad con la temperatura, efectos espectrales, problemas instrumentales, etc.). En la Tabla 3.10 se resumen los valores ajustados y su desviación relativa porcentual respecto a 4,00.

Condición	Exponente n	Desviación $(n - 4)/4 \times 100\%$
Etapa 1 (sin telas)	4,1573	+3,93 %
Etapa 2 — P1 (poliéster)	4,5749	+14,37 %
Etapa 2 — A2 (algodón)	4,7449	+18,62 %
Etapa 2 — A3 (algodón)	5,1450	+28,62 %
Etapa 2 — A4 (algodón)	4,0045	+0,11 %
Etapa 3 — P1 (fuera del depósito)	4,0273	+0,68 %
Etapa 3 — A2 (fuera del depósito)	3,3495	−16,26 %
Etapa 3 — A3 (fuera del depósito)	4,8923	+22,31 %
Etapa 3 — A4 (fuera del depósito)	5,0053	+25,13 %

Cuadro 3.10: Exponentes ajustados n para $\text{Rad} \propto T^n$ y desviación relativa respecto a $n = 4$.

Comparando las tres etapas se observa lo siguiente:

3.5 Etapa 3: Medición con telas dopadas con WO_x fuera del diámetro del depósito.

- **Etapa 1** (sin telas): constituye la línea base experimental y muestra concordancia razonable con la ley de Stefan-Boltzmann (desviación $\sim 4\%$). Esto indica que el montaje y el método reproducen la relación teórica.
- **Etapa 2** (telas interpuestas): evidencia que la inclusión del textil recubierto modifica tanto la magnitud como la dependencia con la temperatura. En varios casos se obtienen exponentes mayores que 4, lo que apunta a una emisividad efectiva creciente con T y a efectos espectrales/estructurales introducidos por la tela y su recubrimiento.
- **Etapa 3** (medición fuera del depósito) sirve como control: si el depósito fuera la causa dominante del cambio, esperaríamos una diferencia sistemática entre Etapa 2 y Etapa 3. Los resultados muestran que, para P_1 la diferencia es pequeña (vuelve cercano a 4), mientras que para algunas muestras de algodón la variación persiste o incluso se invierte (A_2 baja por debajo de 4, A_3/A_4 se mantienen altas). Esto sugiere que tanto la naturaleza del textil (poliéster vs. algodón) como la interacción del recubrimiento con la estructura del tejido determinan el efecto observado.

Relevancia de las desviaciones

- **Desviaciones pequeñas** (por ejemplo $\lesssim 5\%$) son compatibles con incertidumbres experimentales y no implican una refutación de la ley de Stefan–Boltzmann en condiciones prácticas. Tales desviaciones pueden atribuirse a calibración, estabilidad de la fuente y la alineación del sensor.
- **Desviaciones moderadas (10–20%)** indican efectos no triviales: variaciones de emisividad con temperatura, respuestas espectrales del detector y/o variaciones del recubrimiento. Requieren explicaciones adicionales y mediciones complementarias para identificar la causa dominante.
- **Desviaciones grandes (>20%)** implican que el sistema observado no puede describirse adecuadamente por un único factor de emisividad constante; la dependencia efectiva sugiere una variación considerable de la emisividad o la presencia de artefactos experimentales que deben ser investigados (por ejemplo, saturación del detector, errores sistemáticos en la estimación de T , o irregularidades en el recubrimiento).

Interpretación de la escasa contribución aparente del recubrimiento. Las mediciones muestran que la introducción de las telas reduce de forma clara la radiación detectada, pero que la contribución adicional del recubrimiento de óxido de Tungsteno (WO_x) resulta, bajo las condiciones de este experimento, relativamente pequeña. Esta observación puede explicarse por varias razones:

- Grosor del recubrimiento. Si la capa de WO_x es muy delgada, la señal térmica medida queda dominada por las propiedades del sustrato (algodón o poliéster) y no por el recubrimiento. Estudios sobre depósitos por HFCVD muestran que el espesor y el tiempo de depósito controlan de forma directa la respuesta final del recubrimiento. [4]

3.5 Etapa 3: Medición con telas dopadas con WO_X fuera del diámetro del depósito.

- Efecto combinado recubrimiento–sustrato. La emisividad efectiva que enfrenta el sensor es la del sistema compuesto (depósito más tela). En muchos casos, la tela —su porosidad, rugosidad y contenido de humedad— puede explicar la mayor parte de la atenuación observada, dejando un efecto marginal atribuible al recubrimiento. [12]
- Propiedades intrínsecas del WO_x . Los óxidos de tungsteno no son todos iguales: variaciones en la estequiometría y la presencia de vacancias de oxígeno pueden modificar la absorción en el infrarrojo. Sin embargo, dichas variaciones influyen de manera sensible con el espesor y la uniformidad del depósito; por ello, un recubrimiento poco grueso o no uniformemente distribuido mostrará un efecto limitado en las señales térmicas registradas.
- Factores experimentales y de medida. Fluctuaciones de voltaje, tiempos de estabilización del filamento, resolución y rango del sensor, así como variaciones en la humedad ambiental del tejido, introducen incertidumbres que pueden enmascarar efectos pequeños producidos por el recubrimiento. Estas fuentes de ruido y variabilidad se coinciden con las observadas en otros estudios y justifican una interpretación cautelosa. [4, 12]

En consecuencia, el resultado observado; la reducción marcada al interponer la tela, pero sólo una contribución marginal adicional atribuible al WO_x en las condiciones probadas, es coherente con un escenario en el que el recubrimiento existe pero su grosor, uniformidad o propiedades espectrales no bastan para dominar la respuesta radiativa del sistema.

Diferencias entre poliéster (P_1) y algodón (A_2-A_4)

Los resultados experimentales muestran que la muestra de poliéster (P_1) tiende a exhibir comportamiento más cercano al exponente teórico (especialmente en Etapa 3), mientras que las muestras de algodón presentan mayor dispersión entre ellas y en las distintas etapas. Esto puede explicarse por diferencias esperadas en las propiedades físicas:

- **Textura y porosidad:** el algodón es más poroso y de estructura más irregular, lo que favorece depósitos no uniformes del recubrimiento y mayores variaciones locales de emisividad.
- **Adhesión del recubrimiento:** la interacción entre el WO_X y las fibras naturales puede dar lugar a capas discontinuas o diferente penetración en la fibra que alteran la emisión. En materiales más lisos (poliéster) la capa puede ser más continua y homogénea.

En conjunto, por tanto, era razonable esperar una mayor variabilidad en las muestras de algodón frente a la muestra de poliéster y los resultados experimentales lo corroboran.

Áreas de mejora en futuros estudios.

Para consolidar las conclusiones y discriminar entre las posibles causas de desviación se recomiendan las siguientes acciones:

3.5 Etapa 3: Medición con telas dopadas con WO_x fuera del diámetro del depósito.

1. Repetir series de mediciones (replicabilidad) para estimar la dispersión real de los parámetros ajustados.
2. Medir la emisividad espectral o la transmitancia/reflectancia espectral de las telas recubiertas en el intervalo relevante (UV-Visible-IR) para relacionar cambios espectrales con las variaciones en el exponente.
3. Dado que la síntesis y caracterización del recubrimiento fueron realizadas por el equipo del EcoCampus, en este trabajo hemos priorizado la evaluación funcional (medida radiativa) del sistema textil recubierto. Para clarificar y cuantificar la contribución específica del WO_x en futuros trabajos convendría, en colaboración con el grupo depositante, realizar al menos una caracterización sencilla adicional: medir el espesor y la uniformidad del recubrimiento, obtener una estimación cualitativa de la estequiometría y registrar la respuesta espectral. Estas acciones permitirían vincular de forma más directa las propiedades del recubrimiento con los efectos radiativos observados.

Capítulo 4

Conclusiones

El presente trabajo logra verificar experimentalmente la validez de la Ley de Stefan–Boltzmann y evaluar el efecto de recubrimientos de óxido de tungsteno (WO_x) sobre telas de algodón y poliéster en la transmisión de radiación térmica. Los resultados y su análisis permiten extraer las siguientes conclusiones:

- Se confirma la dependencia de la potencia radiada con la cuarta potencia de la temperatura ($P \propto T^4$) para el emisor de referencia (Etapa 1), obteniéndose un exponente $n = 4,1573$, lo cual representa una desviación menor al 4 % respecto al valor teórico. Este resultado valida la calibración del montaje experimental y la precisión de las mediciones realizadas. En las etapas con telas dopadas con WO_x , se observa una atenuación significativa de la radiación, así como un incremento en el exponente efectivo ($n = 4,57-5,14$), lo cual sugiere una dependencia de la emisividad con la temperatura. Este comportamiento puede asociarse también a variaciones en el depósito de WO_x y a efectos debidos a las propiedades de cada textil.
- Las diferencias entre las telas A2, A3 y A4 indican que la uniformidad del recubrimiento y la morfología del textil son factores determinantes para la respuesta radiativa del sistema. En particular, la muestra A4 presentó el comportamiento más cercano al ideal ($n = 4,00$), sin embargo, este caso no que sugiere una mayor homogeneidad del recubrimiento, sino mayor variación en las mediciones debido a errores sistemáticos, tales como variaciones de voltaje de la fuente o el tiempo de estabilización de temperatura del filamento, lo que sugiere la necesidad de tiempos de espera más controlados, así como más eficiencia al momento de tomar las mediciones.
- Al comparar los resultados de la Etapa 2 y la Etapa 3 (mediciones hechas fuera del depósito de WO_x), se observa que la atenuación de la transmisión de la radiación gracias al recubrimiento es de entre 2.24 % y 6.52 %, exceptuando la tela A_4 , que muestra un incremento del 2.44 %. Estos resultados indican que la contribución mayoritaria en la atenuación de la radiación proviene de la tela y no del depósito de WO_x . Esto sugiere que el espesor o la homogeneidad del depósito fueron insuficientes para modificar de manera significativa una baja en la transmisión de radiación a través de las telas, lo que invita a una mayor atención u optimización en el método de dopado.

- El método empleado, basada en la medición simultánea de voltaje, corriente y señal radiada, se mostró efectivo para correlacionar propiedades térmicas con la ley de Stefan–Boltzmann, y constituye una herramienta didáctica útil para futuros trabajos sobre radiación térmica en materiales compuestos.
- Se tomaron imágenes de microscopía electrónica de la tela de poliéster en la zona del recubrimiento de WO_x para confirmar la presencia de este y apreciar su densidad.

Aplicaciones potenciales

Más allá de verificar una ley fundamental de la física, los resultados de este trabajo abren la puerta a materiales con un enorme potencial tecnológico. El óxido de tungsteno (WO_x) deja de ser aquí un simple recubrimiento experimental para convertirse en un puente tangible entre la ciencia de materiales y el desarrollo sostenible. Cada una de las siguientes aplicaciones representa una oportunidad real para transformar la manera en que aprovechamos y regulamos la energía.

- **Recubrimientos selectivos en energía solar térmica.** La implementación de superficies capaces de absorber con precisión la radiación solar y, al mismo tiempo, resistir las temperaturas más extremas sin degradarse puede ser posible con los recubrimientos de WO_x . Su emisividad dependiente de la temperatura los vuelve candidatos ideales para colectores solares de alta eficiencia, donde cada grado cuenta para mejorar la conversión térmica y reducir pérdidas energéticas. Integrar estos recubrimientos en sistemas de captación solar no solo optimiza la generación de calor, sino que abre paso a diseños más compactos, duraderos y rentables [13].
- **Textiles termo-reguladores e inteligentes.** La incorporación de WO_x en fibras textiles promete prendas capaces de reflejar o absorber radiación infrarroja según el entorno, funcionando como una segunda piel energética. Esta tecnología tiene aplicaciones en ropa para climas extremos, uniformes de protección térmica e incluso textiles urbanos que regulen la temperatura corporal sin depender de energía eléctrica. Más allá del confort, estos tejidos representan un paso hacia una nueva generación de materiales inteligentes y sostenibles [14].
- **Dispositivos de almacenamiento y conversión energética.** El mismo principio que regula su interacción con la radiación puede aplicarse a sistemas de almacenamiento. Los compuestos de WO_x han demostrado un desempeño sobresaliente en supercapacitores y dispositivos electrocrómicos, combinando estabilidad térmica, durabilidad y capacidad de modulación óptica. Desde ventanas inteligentes hasta baterías híbridas, estos materiales podrían formar parte de una infraestructura energética más flexible, eficiente y visualmente integrada en los entornos urbanos del futuro [15].

En conjunto, estas aplicaciones no solo muestran la versatilidad del óxido de tungsteno, sino que demuestran cómo un estudio experimental aparentemente simple puede alimentar toda una visión tecnológica: materiales que no solo soportan la radiación, sino que la controlan y la transforman en energía útil.

Perspectivas futuras

Se recomienda para trabajos posteriores controlar la estequiometría del WO_x durante el depósito para estudiar la influencia de las fases subestequiométricas ($\text{WO}_{2,7}$ – $\text{WO}_{2,9}$) en la emisividad térmica. También se aconseja la implementación de mediciones espectrales en el rango IR-Visible-UV para determinar la absorción y reflectancia como función de la temperatura. De igual manera, explorar el uso de otras técnicas de deposición para comparar la adherencia y uniformidad del recubrimiento sobre diferentes fibras podría complementar este estudio.

Conclusión general

En síntesis, este estudio demuestra que los recubrimientos de óxido de tungsteno sobre sustratos textiles permiten modificar las propiedades radiativas del sistema, manteniendo su estabilidad térmica y ofreciendo una vía prometedora para aplicaciones en energía solar, control térmico y materiales funcionales avanzados. La verificación experimental de la Ley de Stefan–Boltzmann y la caracterización de estos materiales constituyen una base sólida para investigaciones futuras en el aprovechamiento energético sostenible.

Apéndice A

Proceso de dopado de telas con óxido de tungsteno

En este apéndice se describen en detalle los pasos experimentales y las condiciones de síntesis empleadas para obtener recubrimientos de óxido de tungsteno (WO_x) sobre sustratos de algodón mediante el método de Deposición Química de Vapor por Filamento Caliente (HFCVD, 'Hot-Filament Chemical Vapor Deposition')

A.1. Preparación y limpieza del sustrato

La tela de algodón (100% algodón, densidad aproximada de 3600 hilos/cm², masa de 145 g/m²) se sometió a un blanqueamiento químico industrial para eliminar impurezas y compuestos celulósicos. A continuación, se lavó en un baño a 100 °C durante una hora con una solución alcalina y un detergente iónico estándar, seguido de un enjuague con ácido débil y secado en una campana de flujo laminar a temperatura ambiente.

A.2. Montaje del sistema HFCVD

El sustrato limpio se colocó en el interior de la cámara de HFCVD, debajo de un filamento de tungsteno que actúa como fuente de calefacción. El sistema, ilustrado en la figura A.1, incluye:

- Filamento de tungsteno conectado a una fuente de voltaje DC variable.
- Controlador de temperatura y medidores de vacío para mantener condiciones estables de presión.
- Válvulas de alimentación de precursores químicos en fase de vapor.
- Sensor de termopar y vidrio testigo para monitoreo.

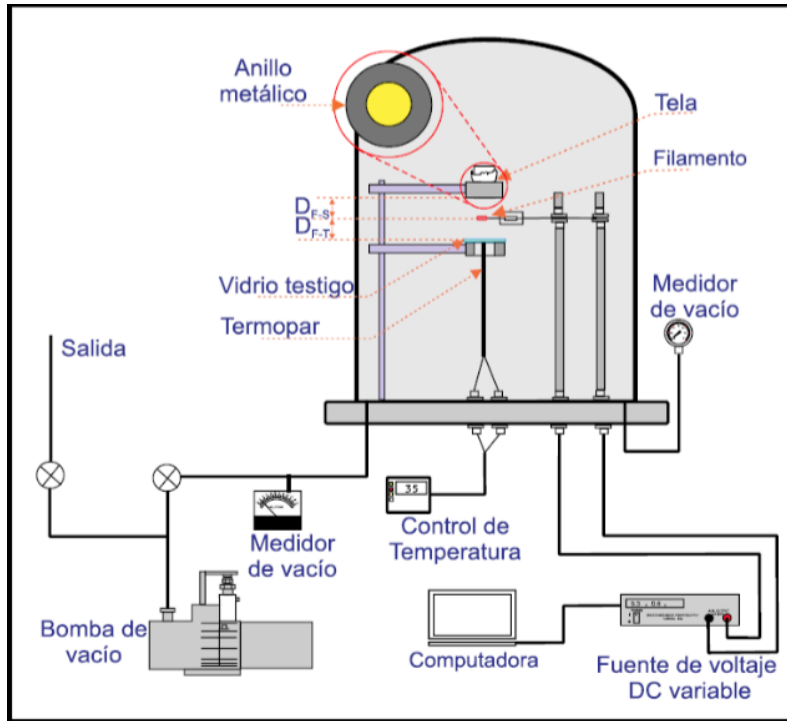


Figura A.1: Esquema del sistema HFCVD.

A.3. Condiciones de síntesis

Los parámetros principales de síntesis, optimizados para obtener una cobertura uniforme de WO_x , fueron:

- Temperatura del filamento (TF): 1200 °C.
- Temperatura del sustrato (TS): 30 °C (temperatura ambiente controlada).
- Tiempo de depósito (TD): 5 minutos
- Distancia filamento-sustrato (D_{F-S}): 7 cm.
- Presión en la cámara: 120 mTorr.

Bajo estas condiciones, la descomposición térmica de los precursores genera fragmentos reactivos que se depositan como óxido de tungsteno sobre la superficie del algodón, formando un recubrimiento continuo de diámetro efectivo aproximado de 20 cm.

A.4. Resultados

En la figura A.2 se muestra una fotografía del recubrimiento resultante, donde se aprecia la uniformidad del depósito sobre la superficie textil.

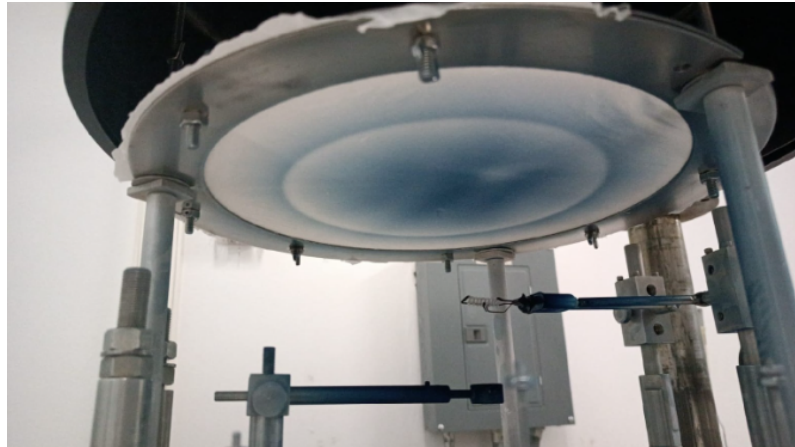
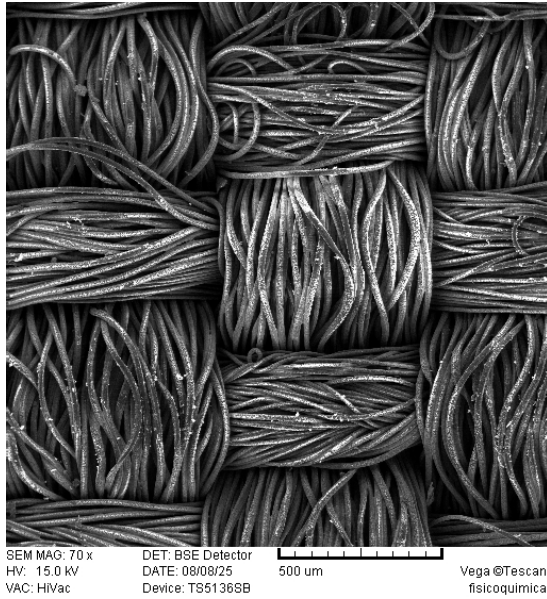


Figura A.2: Fotografía que muestra el recubrimiento de WO_x sobre el textil del Algodón sintetizado.

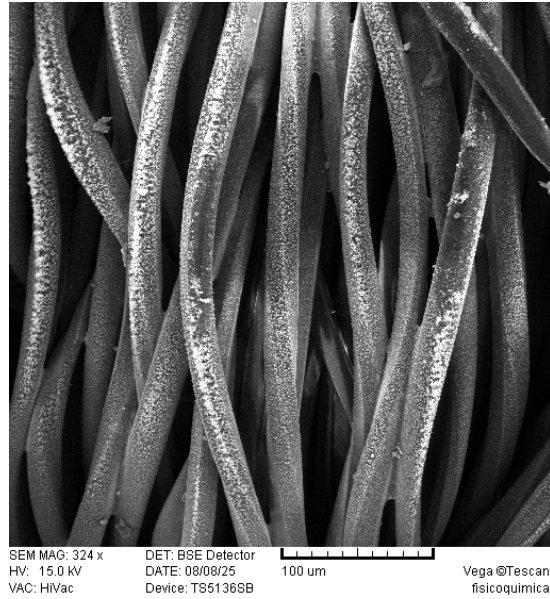
El método HFCVD permitió obtener recubrimientos conformes sin necesidad de altas temperaturas en el sustrato, preservando la integridad del tejido. No obstante, la uniformidad del recubrimiento depende críticamente de la geometría del filamento y del control de flujo de precursores.

A.4.1. Caracterización por microscopía electrónica de barrido (SEM)

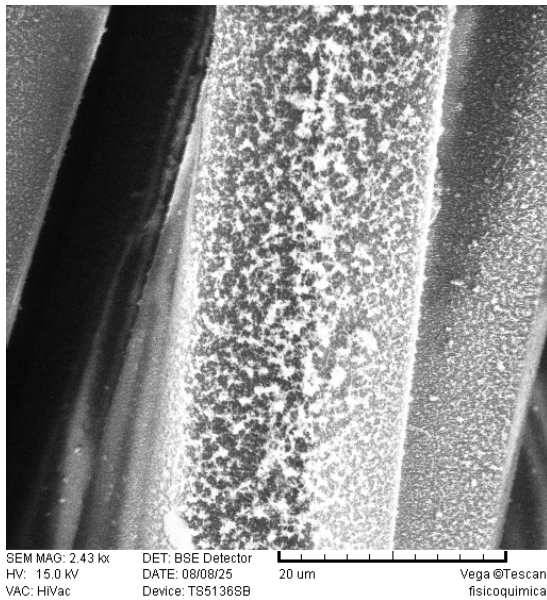
Con la finalidad de verificar la presencia y la morfología del recubrimiento de óxido de tungsteno (WO_x) sobre los tejidos, se realizaron imágenes por microscopía electrónica de barrido (SEM) sobre una muestra representativa. Las observaciones por SEM permiten evaluar la cobertura superficial, la adherencia del recubrimiento en las fibras y la presencia de agregados o partículas que evidencian la deposición.



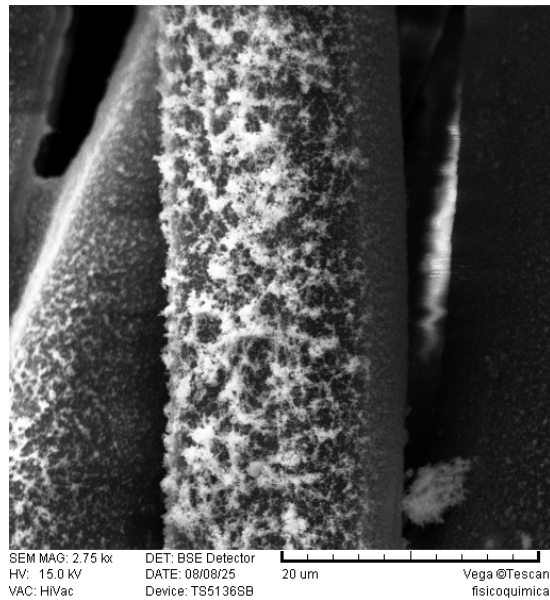
(a) Micrografía SEM — escala 500 μm (vista global del tejido).



(b) Micrografía SEM — escala 100 μm (detalle de agrupación de fibras).



(c) Micrografía SEM — escala 20 μm (detalle de recubrimiento en la fibra).



(d) Micrografía SEM — escala 10 μm (morfología de partículas/film).

Figura A.3: Imágenes SEM representativas del recubrimiento de WO_x sobre tela de poliéster.

Las micrografías permiten constatar que:

- El recubrimiento está presente en la superficie de las fibras y muestra cobertura general sobre el tejido (Fig. A.3a–A.3b).

- A mayores aumentos (Fig. A.3c–A.3d) se aprecia una morfología granular/particulada sobre la fibra, consistente con depósitos de WO_x en forma de pequeñas partículas o aglomerados adheridos a la superficie.
- Las imágenes confirman la presencia del compuesto, aunque no permiten por sí solas determinar con precisión el espesor absoluto del recubrimiento ni su composición química. Para cuantificar el espesor y la composición elemental se recomiendan técnicas complementarias.

Bibliografía

- [1] M. Z. Jacobson y M. A. Delucchi. Providing all global energy with wind, water, and solar power: Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials, Energy Policy, **39**(3): 1154-1169, 2011.
- [2] G. W. Crabtree, N. S. Lewis y Materials Science. Solar Energy Conversion, Physics Today, **60**(3): 37-42, 2011.
- [3] X. Wang, P. Wu, J. Yang y X. He. Properties and Applications of Tungsten-Based Materials, Journal of Materials Science, **47**(12): 4875-4884, 2012.
- [4] M. Cruz-Leal, O. Goiz, F. Chávez, G. F. Pérez-Sánchez, N. Hernández-Como, V. Santes y C. Felipe. Study of the Thermal Annealing on Structural and Morphological Properties of High-Porosity A-WO₃ Films Synthesized by HFCVD, Nanomaterials, **9**(9):1298, 2019.
- [5] M. Planck. The Theory of Heat Radiation, Dover Publications, 1914.
- [6] C. C. Mardare and A. W. Hassel. Review on the Versatility of Tungsten Oxide Coatings, Physica Status Solidi A, **216**(12):1900047, 2019.
- [7] W. D. Callister Jr. y D. G. Rethwisch. Materials Science and Engineering: An Introduction, 9^a edición, Wiley, 2013.
- [8] W. H. Hayt y J. E. Kemmerly. Análisis de circuitos en ingeniería, 8^a edición, McGraw-Hill, 2013.
- [9] G. B. Rybicki y A. P. Lightman. Radiative Processes in Astrophysics, Wiley-VCH, 1979.
- [10] D. Halliday, R. Resnick y J. Walker. Fundamentals of Physics, Wiley, 2013.
- [11] B. Lee. Thermal Radiation System Manual, PASCO scientific, 1988.
- [12] C. C. Mardare y A. W. Hassel. Review on the Versatility of Tungsten Oxide Coatings, Physica Status Solidi A: Applications and Materials Science, **216**:1900047, 2019.
- [13] Chung, C.-K., Tsai, C.-H. (2017). *Tungsten oxide films as solar selective absorbers for thermal energy systems.* Applied Surface Science, 425, 325–333.
- [14] Tang, K. H. D. “Advances in Thermoregulating Textiles: Materials, Mechanisms, and Applications.” Department of Environmental Science, The University of Arizona, 2025.

- [15] Dong, X., et al. "Nanostructured Tungsten Oxide as Photochromic Material." *Journal of Photochemistry and Photobiology* , 2022.