

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO**  
**COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**  
**PROGRAMA DE ENERGÍA**

**Análisis Térmico en un Proceso de  
Sublimación a Distancia Corta dentro de un  
sistema CSVT (*Close Space Vapor Transport*)**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE LICENCIATURA EN:

**INGENIERÍA EN  
SISTEMAS ENERGÉTICOS**

P R E S E N T A

**CELESTE JEANETTE MONTAÑO ACEVEDO**

DIRECTOR DE TESIS

**Dr. José Joaquín Lizardi Del Angel**

Profesor-Investigador de la Academia de Física, UACM

CODIRECTOR DE TESIS

**Dr. Rogelio Mendoza Pérez**

Profesor-Investigador de la Academia de Matemáticas, UACM

Ciudad de México, junio de 2021

## SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



## UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

### RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

### DERECHOS RESERVADOS<sup>©</sup>

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

## **Integración del jurado:**

Presidente: Dr. Carlos Chávez Baeza, UACM  
Secretario: Dr. José Joaquín Lizardi Del Angel, UACM  
Vocal: Dr. Rogelio Mendoza Pérez, UACM  
1<sup>er</sup>. Suplente: Dr. José Alfredo Del Oso Acevedo, UACM  
2<sup>do</sup>. Suplente: Dr. Léster Augusto Alfonso Díaz, UACM

Lugar donde se realizó la carrera:

PLANTEL SAN LORENZO TEZONCO, UACM.

## **DIRECTOR DE TESIS:**

---

Dr. José Joaquín Lizardi Del Angel  
Universidad Autónoma de la Ciudad de México

# Índice

Agradecimientos.....	6
Resumen.....	8
Justificación.....	9
Objetivo general.....	10
Objetivos particulares.....	10
Capítulo 1. Introducción y antecedentes.....	11
Preliminar.....	11
Metodología.....	13
Laboratorio de Ciencias y Tecnologías Sustentables (LACyTES).....	14
Capítulo 2. Principios teóricos.....	16
Transporte de Vapor en Espacio Cercano.....	16
Sistema CSVT. Principio de funcionamiento y parámetro de depósito.....	17
Análisis térmico del sistema CSVT.....	22
Capítulo 3. Simulación.....	25
Elementos Finitos.....	25
FreeFem++.....	27
Desarrollo experimental acorde a la simulación.....	28
Análisis de unidades.....	31
Método numérico para la simulación del proceso.....	32
Capítulo 4. Análisis de resultados.....	36
Análisis de perfiles de temperatura.....	36
Comparación de los perfiles de temperatura experimentales más representativos vs la simulación numérica.....	39
Conclusiones.....	50
Posibles trabajos posteriores.....	51
Referencias bibliográficas.....	53
Anexos.....	56
Anexo 1. Mejor Eficiencia de las Celdas Solares.....	56
Anexo 2. Código de la Simulación.....	57
Anexo 3. Curvas de las temperaturas censadas por los termopares en el experimento real.....	65
Anexo 4. Curvas de la derivada de las temperaturas respecto al tiempo del depósito real.....	66

# Índice de figuras

Figura 1. Potencial Eléctrico Fotovoltaico en México .....	12
Figura 2. Bloques de grafito.....	17
Figura 3. Esquema básico del Sistema CSVT.....	18
Figura 4. Sistema CSVT.....	18
Figura 5. Bloques con lámparas .....	19
Figura 6. Vidrio entre los bloques.....	19
Figura 7. Sistema CSVT encendido .....	19
Figura 8. Foto de termopares en los bloques.....	20
Figura 9. Del lado izquierdo se aprecia la chalupa limpia, en el centro la chalupa con CdTe y del lado derecho el vidrio.....	20
Figura 10. A la izquierda el Sistema CSVT abierto, derecha: Ingreso del vidrio al sistema .....	21
Figura 11. Mallas hechas con FreeFem++, a) Malla sin agujero, b) Malla con agujero .....	26
Figura 12. Malla de los bloques del sistema CSVT .....	27
Figura 13. Etiquetas en el dominio y Perfiles de temperatura.....	33
Figura 14. Resultados obtenidos en la Simulación.....	37
Figura 15. Calentamiento de los bloques en el segundo 150 .....	38
Figura 16. Perfiles de temperatura en las orillas y en el centro del bloque.....	39
Figura 17. Curva proporcionada por LACyTES .....	40
Figura 18. Depósito de CdTe en LACyTES.....	41
Figura 19. Curva del depósito de CdTe completada .....	42
Figura 20. Curvas de Simulación vs Depósito en CSVT .....	43
Figura 21. Calentamiento de los bloques en el segundo 200 .....	44
Figura 22. Calentamiento de los bloques de grafito, manteniendo su temperatura constante en el segundo 315 .....	45
Figura 23. Derivada de la temperatura del sustrato en el depósito real hecho en LACyTES .....	46
Figura 24. Derivada de la temperatura de la fuente en el depósito real hecho en LACyTES .....	47
Figura 25. Derivada de la temperatura del sustrato en la Simulación.....	48
Figura 26. Derivada de la temperatura de la fuente en la Simulación.....	49

A mis padres

Por la herencia más valiosa que pudiera recibir, fruto del inmenso apoyo y confianza, para que los esfuerzos y sacrificios hechos por mí y por ellos, no fueran en vano, con admiración, amor y respeto.

-Celeste Jeanette Montaña Acevedo

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer principalmente a la Universidad Autónoma de la Ciudad de México por permitirme realizar mis estudios de licenciatura, al Programa de Becas UACM por brindarme un apoyo económico en la mayoría de los semestres cursados, así como el apoyo otorgado para la impresión y empastado de este trabajo, además de un servicio de internet en el periodo de clases a distancia, y a la Convocatoria Interna UACM Proyectos de Investigación del Colegio de Ciencia y Tecnología (CCyT)-2019.

Especialmente a mi director de tesis, el Dr. José Joaquín Lizardi del Angel, por su dedicación, tiempo, esfuerzo y paciencia para transmitirme parte de sus conocimientos.

Al Dr. Rogelio Mendoza Pérez, por abrirme las puertas del Laboratorio de Ciencias y Tecnología Sustentable donde realicé mi servicio social, comencé y terminé mi proyecto de tesis, por sus consejos y apoyo.

A mis padres Enrique y Eréndira, a mis hermanos Osmar y Jenni por su amor y apoyo a pesar de todo. A mis amigos Leslie y Adrián por su amistad y todo lo convivido en esta gran etapa y a Ricardo por su inigualable apoyo para ayudarme a crecer en mi formación académica.

“El mayor estímulo para esforzarnos en el estudio y en la vida es el placer del mismo trabajo, el placer de los resultados y la conciencia del valor de los resultados para esa comunidad”

-Albert Einstein

## Resumen

El presente trabajo se orienta en uno de los sistemas que hay en el Laboratorio de Ciencia y Tecnología Sustentable (LACyTES) en la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM) en el plantel San Lorenzo Tezonco. El laboratorio se enfoca en la elaboración de celdas fotovoltaicas, de película delgada, orgánicas e híbridas, para el depósito de materiales se utiliza el sistema CSVT (*Close Space Vapor Transport*), la principal problemática de este sistema es que las características del material depositado no son constantes, es decir, a veces el material es depositado a un mayor grosor, otras veces no ocurre así y algunas otras hay más material depositado en el centro del vidrio que a los alrededores. Para dar una próxima solución al problema, se hizo un análisis térmico del sistema, de manera que se pueda determinar la temperatura real a la que se hace el depósito y observar la diferencia de temperatura que hay entre lo que marcan los termopares y las temperaturas en el centro del sistema para que los próximos depósitos se hagan a las temperaturas correctas.

Se realizó una simulación en FreeFem++ para el análisis de los bloques de grafito del sistema y los resultados obtenidos se compararon con los resultados que se tienen de los experimentos en LACyTES. De esta manera, se apoya a que el laboratorio pueda obtener mejores resultados de eficiencia en las celdas fotovoltaicas, además de que se contribuye a que se pueda fomentar el uso de las energías renovables, en especial la energía solar fotovoltaica.

## Justificación

Dentro del campo de la producción y elaboración de paneles fotovoltaicos existe toda una serie de estudios que buscan realizar el depósito de materiales involucrados en la elaboración de estos de una forma óptima y buscando el mejor desempeño de las sustancias involucradas en el proceso. Conociendo el efecto que causa el no optimizar el proceso de depósito de material en el sistema CSVT, es evidente que es necesario llevar a cabo una metodología específica para que las celdas no tengan variaciones en las características del material sublimado. Puede asumirse que las temperaturas que están marcando los termopares sean menor que la temperatura real a la que se está sublimando el material, esto, por la posición de los termopares.

La información correspondiente que nos brinde la simulación ayudará a entender la transferencia de calor del proceso de depósito para el dispositivo que regula al intercambio de calor y masa basado en la sublimación de vapor en espacio corto. Para ello es necesario plantear y formular un sistema de ecuaciones diferenciales parciales que describe al fenómeno considerando en su entorno la conducción, radiación y convección.

## Objetivo general

Realizar el análisis de los perfiles de temperatura que se obtienen en un proceso de sublimación a distancia corta dentro de un sistema de Transporte de Vapor en Espacio Cercano (CSVT, por sus siglas en inglés *Close Space Vapor Transport*).

## Objetivos particulares

- Elaborar una simulación numérica del proceso del calentamiento del sistema de lámparas y los bloques de grafito dentro del sistema CSVT.
- Obtener los perfiles de temperatura considerando los efectos temporales del flujo de calor derivados de la dinámica del proceso de depósito en el sistema CSVT.
- Comparar los perfiles experimentales más representativos con los experimentos numéricos.
- Determinar las curvas de calentamiento más adecuadas en función de los datos obtenidos de los perfiles de temperatura experimentales.
- Analizar las tasas de cambio de temperatura con respecto al tiempo promedio que caractericen la cantidad de energía metida al sistema como función de los gradientes de temperatura a lo largo de todo el proceso de depósito.

# Capítulo 1. Introducción y antecedentes

## Preliminar

La energía renovable es aquella que se obtiene a partir de recursos naturales, como el agua, el Sol, el viento, las plantas, etc. Todos ellos se describen como inagotables a escala humana, hay muchas formas de aprovechar estos recursos y obtener grandes beneficios para la sociedad, en las cuales, está el utilizar la energía del Sol para generar energía eléctrica.

El principio fundamental se basa en convertir la energía solar en energía eléctrica mediante la absorción de radiación electromagnética proveniente del Sol. En 1921, con estudios anteriores de Becquerel y Hertz, Einstein ganó el premio Nobel de Física por el Efecto fotoeléctrico, el cual consiste en la absorción de un fotón que excita a un electrón ligado en un nivel cuántico del material con energía suficiente para extraerlo del mismo o para promoverlo a una banda conductora, de manera que se genere una corriente eléctrica.

El aprovechamiento de una fuente de energía que se encuentra en cualquier parte del mundo es una de las mejores técnicas para un lugar sostenible y sustentable. Es importante tanto el uso como las investigaciones de esta forma de generación de energía eléctrica, ya que como se sabe, es amigable con el medio ambiente y tiene un gran futuro por delante. Una gran ventaja que hay en México es que el potencial eléctrico fotovoltaico está entre el rango de 3.77 – 5.52 kWh/kWp (ESMAP, 2021), lo que indica que es un país con gran ventaja para aprovechar la energía del Sol para generar energía eléctrica. En la Figura 1 se observa el mapa de México con su potencial eléctrico fotovoltaico, la mayoría de los estados de la República tienen un promedio de 5 kWh/kWp total diario (esto en el periodo de 1999-2018), donde sin problema se podría aprovechar este recurso para la generación de energía eléctrica y disminuir el consumo de los combustibles fósiles.

# POTENCIAL ELÉCTRICO FOTOVOLTAICO MÉXICO

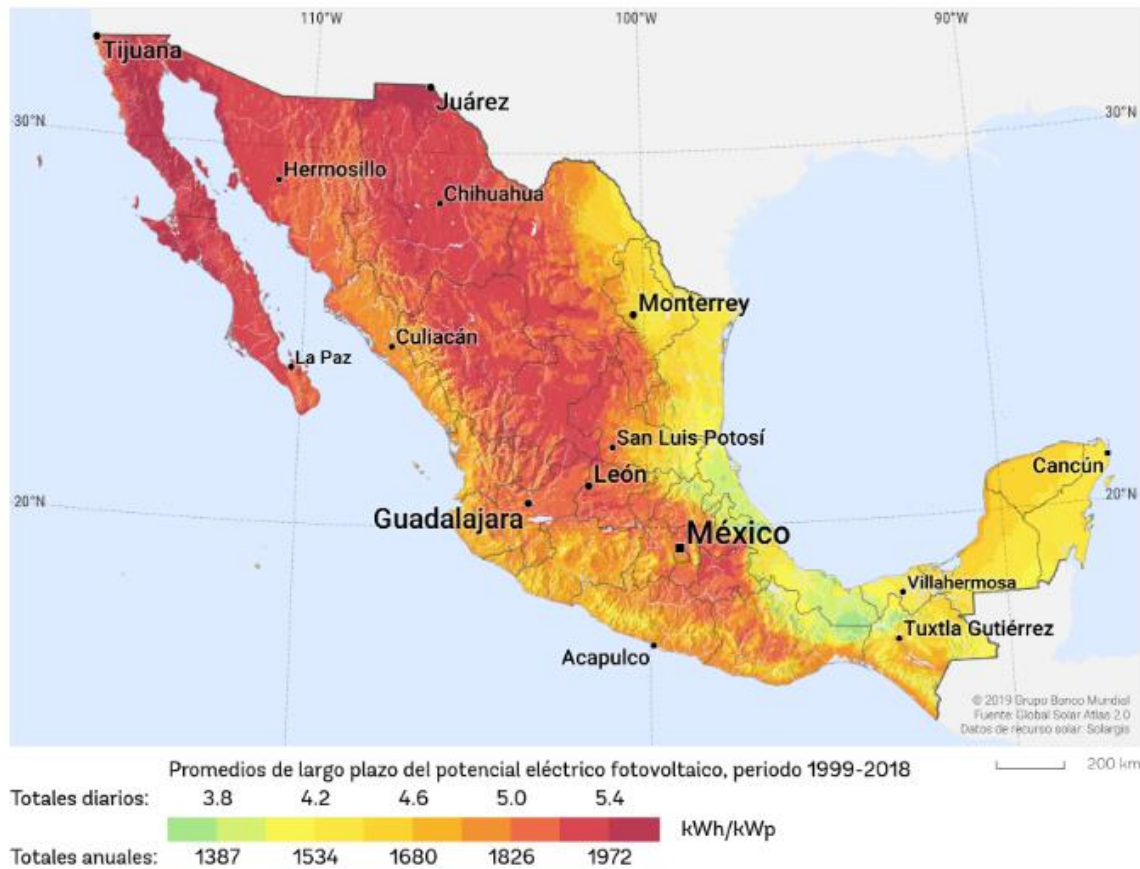


Figura 1. Potencial Eléctrico Fotovoltaico en México (ESMAP, 2021)

Una celda solar es un dispositivo que transforma la energía solar en energía eléctrica mediante el ya mencionado efecto fotoeléctrico, la luz incide sobre un dispositivo semiconductor que produce una diferencia de potencial y genera una corriente eléctrica. Las celdas solares más usadas y con mejores eficiencias están hechas con Silicio (Si), aunque para la investigación y la mejora de eficiencias usan otros materiales. El Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL, por sus siglas en inglés National Renewable Energy Laboratory), documenta un gráfico de eficiencias de celdas fotovoltaicas de investigación desde 1976 hasta el presente (Anexo 1), donde destacan las celdas de unión múltiple, ya que el uso de múltiples materiales semiconductores permite la absorción de un mayor rango de

longitudes de onda, obteniendo así, eficiencias de hasta 47.1 % (NREL Transforming Energy, 2020). Las celdas de Silicio (Si) cristalino tienen un promedio de 25% de eficiencia, teniendo en cuenta que son diferentes procesos, estructuras y pueden ser evaluadas a una concentración de luz solar muy alta.

En el presente trabajo se desarrollará un análisis del proceso termodinámico del depósito de Cloruro de Cadmio ( $\text{CdCl}_2$ ) en el sistema de Transporte de Vapor en Espacio Cercano (CSVT, por sus siglas en inglés Close Space Vapor Transport). Se mostrará en gráficas la variación de la temperatura a lo largo de los bloques cuando estén encendidas o apagadas las lámparas del sustrato o la fuente y se muestran resultados del calor que se le ingresa al sistema derivando e integrando los resultados.

Se hará mención del Laboratorio de Ciencias y Tecnologías Sustentables (LACyTES) ya que el equipo se encuentra trabajando en este espacio, ubicado en la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM), plantel San Lorenzo Tezonco, con dirección Prol. San Isidro 151, San Lorenzo Tezonco, Iztapalapa, 09790 Ciudad de México, CDMX. Así, continuando con la descripción de la técnica del procesamiento de transporte de vapor en espacio cercano y seguido de una específica descripción del sistema CSVT. En el Capítulo 3 se explica el Método de Elementos Finitos (MEF) y el software FreeFem++, y cómo fueron utilizados para poder facilitar la resolución del problema de transferencia de calor en los bloques del sistema, así como el desarrollo experimental acorde a la simulación. En el Capítulo 4 se muestra el análisis de los resultados obtenidos, y las gráficas realizadas con dichos resultados. Finalmente se muestran las conclusiones del trabajo de tesis realizado y el posible trabajo a futuro.

## **Metodología**

1. Revisión de bibliografía
2. Análisis térmico del sistema CSVT
  - Visualizar el proceso en el LACyTES

- Desarrollo de la hipótesis
3. Estudio de las ecuaciones de transferencia de calor a utilizar
    - Transferencia de calor por conducción
    - Transferencia de calor por convección
    - Transferencia de calor por radiación
    - Condiciones de frontera
  4. Definir variables y propiedades térmicas del material
  5. Solución numérica e implementación
  6. Comparación de los resultados con los datos experimentales
  7. Validación del código
  8. Análisis de resultados

### **Laboratorio de Ciencias y Tecnologías Sustentables (LACyTES)**

El laboratorio impulsa líneas de investigación como la modelación y desarrollo de celdas solares, abarcando campos de la ciencia y la tecnología sustentable. Con colaboradores de diferentes áreas, por ejemplo, investigación de nuevos materiales, modelación y estudio de materiales, simulación atmosférica, modelación matemática, control e instrumentación, certificación de calentadores solares y además contando con la valiosa participación de estudiantes de la UACM, de las diversas licenciaturas como: Ingeniería en Sistemas Energéticos, Ingeniería en Software y Modelación Matemática.

El laboratorio surge del impulso de profesores investigadores de la UACM de las siguientes líneas de investigación (UACM, sf):

- Modelado matemático
  - Estudios de modelación de procesos termodinámicos, materiales y fenómenos de la atmósfera.
- Control e instrumentación
  - Enfocado en los equipos para mejorar y automatizar procesos tecnológicos.

- Ciencia de los materiales
  - Materiales nano-estructurales
    - Estudio, diseño y síntesis de nanoestructuras aplicadas en almacenamiento de energía, tratamiento de agua y purificación del aire.
  - Celdas solares y dispositivos fotovoltaicos
    - Estudio, diseño y síntesis de nanoestructuras aplicadas en almacenamiento de energía, tratamiento de agua y purificación del aire.
  - Materiales catalizadores
    - Materiales con propiedades catalíticas y transferencia de calor, enfocados principalmente a la disminución de contaminantes en la atmósfera y transformación de la energía.

## Capítulo 2. Principios teóricos

La manufactura de paneles fotovoltaicos y más en específico de celdas fotovoltaicas son hoy en día procesos de mejora continua, se ha identificado que los efectos del ambiente modifican de forma considerable la forma en que se depositan los materiales dentro de la celda fotovoltaica, en este capítulo se abordarán las características de los procesos de depósito de materiales para las celdas fotovoltaicas, es importante hacer mención que dentro de los objetivos de esta tesis está el conocer el comportamiento de los perfiles de temperatura en el tiempo y cómo la sensibilidad de los sistemas de censo de temperatura podrían modificar los procesos de transferencia de calor que ocurre durante los fenómenos que se describirán en esta capítulo.

### Transporte de Vapor en Espacio Cercano

La técnica de procesamiento de transporte de vapor en espacio cercano se basa en la sublimación del material a depositar a partir de ciertas condiciones como temperatura y presión específicas, donde el transporte del material de la fuente al sustrato sea mediante un gas inerte. Las capas del material son depositadas a partir de la sublimación del compuesto con el menor volumen posible con el objetivo de facilitar el transporte de los vapores entre la fuente y el sustrato. En el modo tradicional de esta técnica, la fuente y el sustrato son colocados a una distancia muy pequeña, con la fuente a una temperatura más alta que el sustrato y es la diferencia de temperatura la fuerza motriz del transporte (Zayas, 2011).

Como se muestra en la Figura 2, las lámparas de la fuente van en el bloque de abajo y las lámparas del sustrato van en el bloque de arriba, en medio de estos bloques es colocado la chalupa con el material Teluro de Cadmio ( $\text{CdTe}$ ) o  $\text{CdCl}_2$  a depositar y el vidrio correspondiente, para después colocar los bloques a una distancia muy pequeña y meterlo al sistema. La distancia entre la fuente y el sustrato es de aproximadamente de 2mm y la razón

de crecimiento está entre 40 y 60 nm/min para el Sulfuro de Cadmio (CdS) (Mendoza, 2012), hay que recalcar que es diferente la distancia de separación entre la fuente y el sustrato, para cada material a depositar. Ambos bloques son de una aleación de grafito con otros materiales (no se sabe cuáles), además que es muy poroso, estas características fueron un impedimento a obtener datos totalmente exactos, ya que las propiedades térmicas son indispensables para el análisis de transferencia de calor.

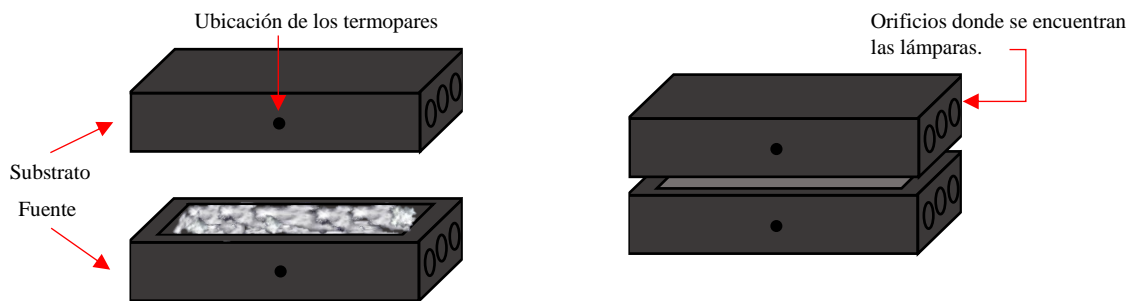


Figura 2. Bloques de grafito

Comúnmente el equipo debe alcanzar temperaturas de 650 K en la fuente y 500 K en el sustrato aproximadamente, de tal manera que el material se logre sublimar en el vidrio. Una de las incógnitas es que no se conoce la temperatura exacta a lo largo de los bloques, por lo que no existe una clara homogeneidad en el espesor del material sublimado.

### **Sistema CSVT. Principio de funcionamiento y parámetro de depósito**

Con el sistema CSVT se hacen depósitos de materiales como CdTe y CdCl<sub>2</sub>, en la Figura 3 se observa un esquema del sistema CSVT, donde ocurre la transferencia de calor entre las lámparas infrarrojas y los bloques. Los componentes del sistema CSVT son bomba de vacío, bomba turbomolecular, seis lámparas infrarrojas, un flujómetro, dos termopares, una válvula de venteo, dos sensores de alto vacío y una entrada de gas, en la Figura 4 se

puede observar una fotografía del sistema CSVT encendido y mostrando cómo las lámparas tienen gran potencia para iluminar y calentar el sistema.

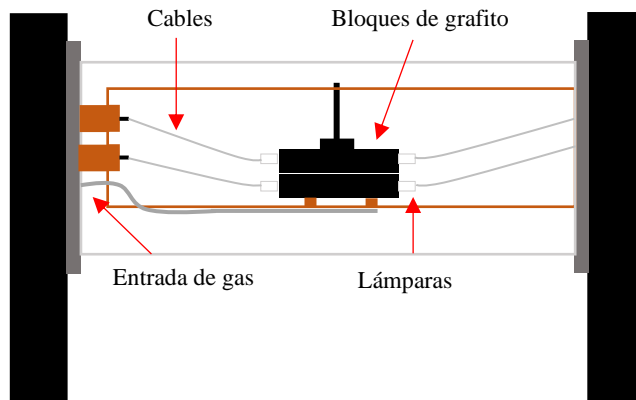


Figura 3. Esquema básico del Sistema CSVT



Figura 4. Sistema CSVT

En la parte interior del sistema se encuentran dos bloques de grafito con tres orificios (donde van las lámparas) (Figura 5), estas lámparas son infrarrojas, con una potencia de 1100 W,

según las especificaciones, trabajan al 95 %, es decir, la potencia es de 1045 W por cada una y se pierde eficiencia energética por flujo de calor de radiación a flujo de calor por conducción, además de la pérdida propia de calor por irradiación de los bloques de grafito por la alta temperatura de operación en el sistema, por lo que una de nuestras variables en el análisis del problema será justamente la absorción de calor por radiación en el proceso de depósito. En medio de estos bloques se encuentra la muestra (celda solar) a la que se le será depositado un material (Figura 6), hay que recalcar que se utilizan estos métodos de depósito ya que el grosor de la capa del material que se va a sublimar debe ser del grosor a escala de micrómetros.

En el momento del depósito no es recomendable observar el encendido de las lámparas ya que la luz que emiten es muy intensa y puede lastimar la vista (ver Figura 7), por lo que se utilizan lentes especiales para poder observar el proceso.



Figura 5. Bloques con lámparas



Figura 6. Vidrio entre los bloques

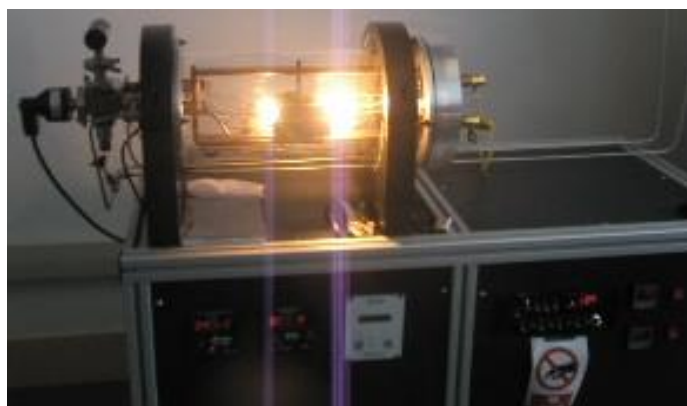


Figura 7. Sistema CSVT encendido

Los termopares están ubicados en los bloques (ver Figura 8) con ellos se controla la temperatura requerida, pero están ubicados muy a la orilla de los bloques, por lo que se infiere que la temperatura en el centro de los bloques es mayor a la temperatura donde están los termopares, ya que simplemente toman la temperatura a menos de un centímetro del bloque, el cual tienen las siguientes dimensiones 10.5 x 10.5 x 2.5 cm.



Figura 8. Foto de termopares en los bloques

#### *Descripción del proceso de depósito de materiales*

Para el depósito se prepara el equipo y la muestra a la que se le depositará el material, ya sea  $\text{CdCl}_2$  o  $\text{CdTe}$ . Para la preparación de la muestra, primero se tiene que lavar el vidrio al que se le depositará el material, muchas veces estos vidrios que se meten a este equipo ya pasaron por otros sistemas y ya tienen materiales depositados, por lo que es seguro que el vidrio debe de estar debidamente limpio, y con ayuda de una chalupa (Figura 9) se distribuye el  $\text{CdCl}_2$  o  $\text{CdTe}$  y encima se pone el vidrio.



Figura 9. Del lado izquierdo se aprecia la chalupa limpia, en el centro la chalupa con  $\text{CdCl}_2$  y del lado derecho el vidrio con  $\text{CdTe}$ .

Una vez puesto el vidrio en la chalupa, se ingresa al sistema CSVT. Primero se saca la parte interior del sistema que contiene los bloques de grafito (ver Figura 10, imagen de la izquierda) y en medio de los dos bloques se sitúa el vidrio (ver Figura 10, imagen de la derecha).

Una vez que el vidrio se encuentra dentro y cerrado el sistema, se enciende la bomba de vacío mecánica por 45 minutos, una vez pasado este periodo se enciende la bomba de vacío turbo por otros 45 minutos y cuando se cumple el tiempo se apaga sólo la bomba turbo. Cuando se llegan a presiones a escalas de miliTorr, es cuando comienza el encendido y apagado de las lámparas. Primero se encienden las tres lámparas de la fuente y a los 10 segundos se apagan y se encienden las lámparas del sustrato, a los 60 segundos se apagan las lámparas del sustrato y se encienden las de la fuente, finalmente a los 150 segundos, se apagan las de la fuente y se encienden las del sustrato programadas a los 493 K. En este proceso se le ingresa argón (Ar) ya que es el medio por el cual el material se sublima (es un medio de transporte), es por eso que se considera transferencia de calor por conducción y convección, como las lámparas están en contacto con el bloque y los bloques se calientan por conducción de calor, también se agregan estas ecuaciones.

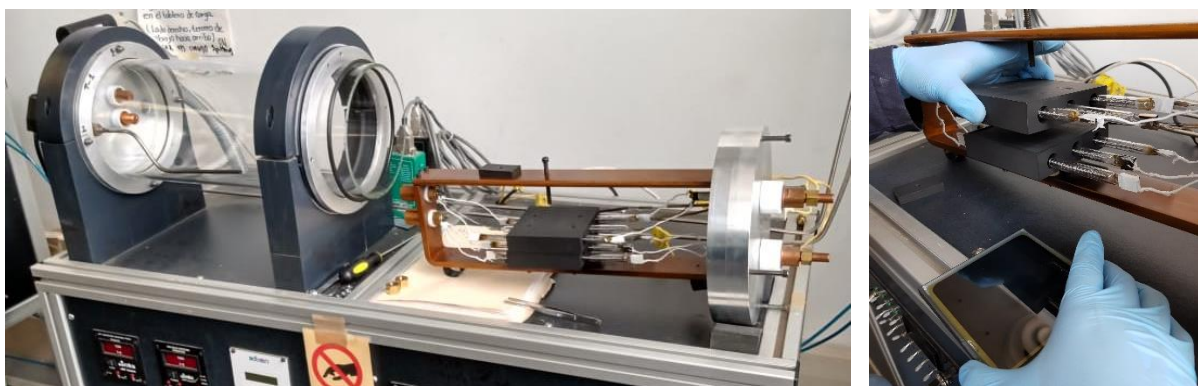


Figura 10. A la izquierda el Sistema CSVT abierto, derecha: Ingreso del vidrio al sistema

## Análisis térmico del sistema CSVT

El contacto entre dos cuerpos a diferentes temperaturas produce una transferencia de energía que se denomina transferencia de calor, esta transferencia de calor se produce desde el cuerpo que tiene mayor temperatura al de menor temperatura, haciendo así, que haya una pérdida de energía en el cuerpo de mayor temperatura, hasta que ambos lleguen a un equilibrio térmico, esta pérdida de energía se puede producir mediante dos mecanismos, conducción y convección. Sin embargo, existe un mecanismo más, radiación, este consiste en el transporte de energía calorífica en presencia o ausencia de materia entre los cuerpos, por ejemplo, la transferencia de calor por radiación puede ocurrir entre dos cuerpos separados por un medio más frío que ambos.

La conducción es el mecanismo de transferencia de calor entre sólidos, líquidos o gases que estén en contacto, y la razón de transferencia de calor por conducción dependerá de la geometría, espesor y material. La ecuación que describe la conductividad térmica es la siguiente:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx}$$

Donde:

k es la conductividad térmica del material

A es el área

$\frac{dT}{dx}$  es la razón de cambio de temperatura con respecto a la variable x.

La convección es el método de transferencia de calor entre un sólido y un fluido, ya sea líquido o gas, entre mayor sea el movimiento del fluido mayor será la transferencia de calor, hay dos tipos de convección, la convección forzada y convección natural, la primera es donde un medio externo influye sobre el fluido como un ventilador, por ejemplo, por el contrario,

en la convección natural el movimiento del fluido es inducido por variaciones en la densidad o temperatura. La ecuación de la transferencia de calor por convección se expresa:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty)$$

Donde:

$h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección

$A_s$  es el área superficial

$T_s$  es la temperatura de la superficie

$T_\infty$  es la temperatura del fluido

La radiación térmica es el resultado de las transiciones energéticas de las moléculas de una sustancia, es emitida en forma continua por toda la materia cuya temperatura es mayor al cero absoluto, específicamente se define como la parte del espectro electromagnético que se extienden alrededor de 0.1 hasta 100  $\mu\text{m}$ , por lo que la radiación térmica influye toda la radiación visible, la infrarroja y parte de la radiación ultravioleta. La siguiente ecuación muestra la razón de transferencia de calor por radiación:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon\sigma A_s(T_s^4 - T_{alred}^4)$$

Donde:

$\varepsilon$  es la emisividad de la superficie

$\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann, con un valor de  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}^4$

$A_s$  es el área superficial

$T_s$  es la temperatura de la superficie

$T_{alred}$  es la temperatura del medio

En ese proceso se presentan los tres métodos de transferencia de calor, conducción cuando las lámparas están encendidas y convección cuando están apagadas, pero es importante mencionar que un vacío satisface la condición de transferencia de calor por radiación a la perfección y como los gases que constan de moléculas monoatómicas, como el argón (Ar) y

el helio (He), y de moléculas biatómicas simétricas, como el nitrógeno ( $N_2$ ) y el oxígeno ( $O_2$ ), son bastante transparentes a la radiación, excepto a temperaturas extremadamente elevadas en las cuales ocurre la ionización (mayor a los 6000 K) (García, 2012). Por lo tanto, el aire atmosférico y el Ar, en este caso, se puede considerar como un medio no participante en los cálculos relativos a la radiación (Çengel, 2007).

## Capítulo 3. Simulación

La simulación numérica es una herramienta muy importante en la ingeniería ya que ayuda a resolver, diseñar, y optimizar procesos, su correcta aplicación hace que grandes problemas se resuelvan muy fácilmente, pero es necesario tener ciertos conocimientos y metodologías para obtener grandes resultados. En este caso, la resolución de un problema de control de temperatura con ecuaciones de transferencia de calor es con ecuaciones diferenciales parciales que describen el comportamiento y perfil de temperatura en el sistema CSVT, es por ello, que es necesario el uso de métodos numéricos y un software para llevar a cabo la resolución del problema. En el presente capítulo se describe como se llevó a cabo el método numérico para la solución del proceso.

### Elementos Finitos

El método de elementos finitos (MEF) es un método numérico para resolver diferentes problemas de ingeniería o física, utilizando ecuaciones diferenciales parciales u ordinarias. Se basa en dividir la geometría o el dominio en elementos más pequeños denominados subdominios, de los cuales, comúnmente son triángulos, y resolver las ecuaciones pertinentes que caracterizan el comportamiento físico de la estructura en cada uno de los vértices que se forman. En la Figura 11 se observa un ejemplo de la malla donde se usa el MEF que se puede realizar con el software FreeFem++. De una manera similar, se creará una malla para hacer el análisis térmico de los boques de grafito del sistema CSVT de la que se habla más adelante.

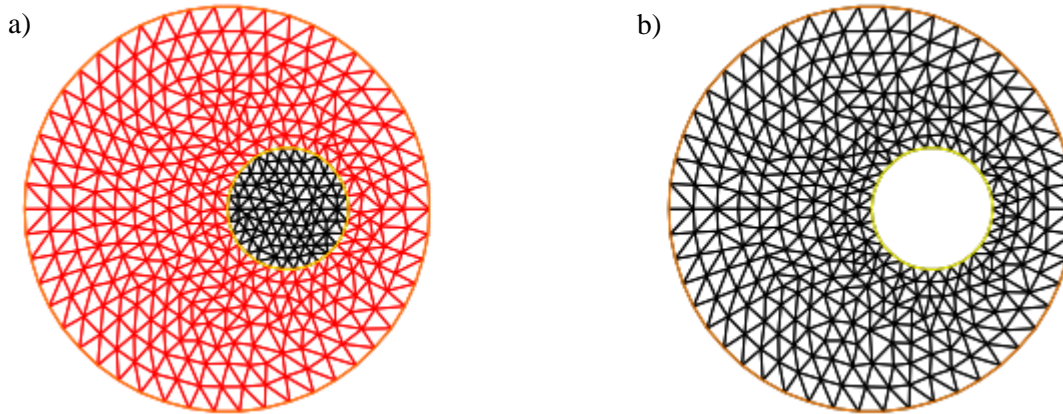


Figura 11. Mallas hechas con FreeFem++, a) Malla sin agujero, b) Malla con agujero

Fuente: Sadaka, 2012

Algunas de las ventajas de trabajar con este método son:

- Puede manejar elementos de geometría y restricciones complejas
- Puede trabajar con solicitudes complejas de carga desde cargas puntuales, uniformemente distribuidas y dinámicas.
- Puede resolver diversos problemas de ingeniería desde mecánica del sólido, dinámica, transferencia de calor, campos electrostáticos y problemas no lineales.

Así como hay grandes ventajas de trabajar con este método, además de que las soluciones a los problemas las hace más sencillas, también existen algunas limitaciones que se deben considerar:

- Las soluciones por este método son aproximadas. Es por ello que la malla debe ser más fina para que las soluciones tengan más exactitud.
- Las soluciones pueden contener errores si no se hace una correcta modelación de la geometría o de las condiciones de frontera (Nápoles, 2015).

Para este problema de transferencia de calor en el sistema CSVT se realizó un análisis de los bloques de grafito y se simuló una malla para poder hacer uso del MEF y facilitar los cálculos.

Debido a que se consideró un sistema adiabático entre los bloques, se diseñó una sola malla, es decir, no se hicieron por separado los bloques, es una misma figura, sólo con huecos que indican la separación de los bloques y los seis orificios donde van las lámparas infrarrojas. La malla se creó con 6,318 triángulos y 3,544 vértices, con 6 agujeros, 3 en cada bloque y un rectángulo en el centro que representa la división de los bloques (Figura 12).

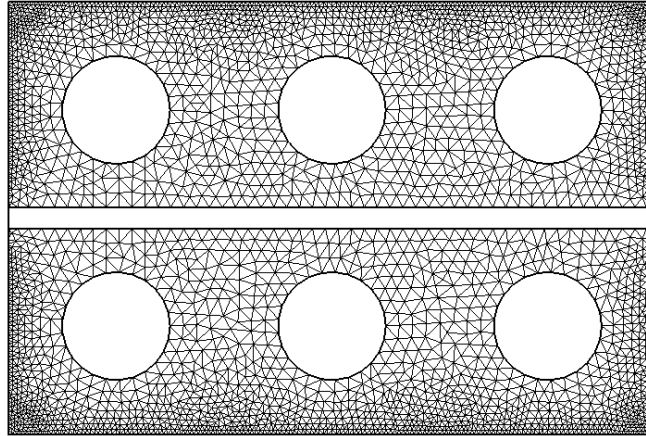


Figura 12. Malla de los bloques del sistema CSVT

## FreeFem++

FreeFem++ es un software libre escrito en C++ para la resolución de problemas de mecánica de fluidos, difusión de calor, elasticidad, entre otros, los resuelve utilizando el MEF a través de ecuaciones diferenciales parciales (EDP). Es un solucionador de EDP para sistemas multi-físicos no lineales en dominios 1D, 2D, 3D y 3D de frontera (superficie y curva). Los problemas que implican ecuaciones diferenciales parciales de varias ramas de la física, como las interacciones fluido-estructura, requieren interpolaciones de datos en varias mallas y su manipulación en un sólo programa. FreeFem++ incluye un rápido lenguaje para la manipulación de datos en múltiples mallas (Hecht, 2021).

Este software fue desarrollado desde 1987 en la Universidad Pierre y Marie Curie, en 1992 fue reescrito en C++ y ya era un software libre (Hecht, 2012). Su principal objetivo es facilitar la enseñanza y la investigación básica mediante la creación de prototipos.

### **Desarrollo experimental acorde a la simulación**

A partir de las ecuaciones de transferencia de calor por conducción y convección mencionadas en el capítulo anterior se adecuaron para poder ingresarlas a FreeFem++ y que este software las resolviera de una manera rápida.

La ecuación que rige la física del problema es la ecuación de conducción de calor, donde la solución de esta da el campo de temperatura a lo largo de todo el sistema de sublimación a distancia corta, en este caso se van a considerar los efectos temporales y longitudinales en el plano “x y”. Con respecto a la profundidad de “z”, esta se desprecia por simetría a lo largo de  $x^+$ . La ecuación de conducción de calor está regida por tres parámetros físicos, la densidad del material, la capacidad calorífica y la conductividad térmica. La combinación de estos parámetros dicta el desarrollo térmico a lo largo del sistema. Así mismo es necesario decir que la ecuación diferencial resultante es una ecuación diferencial parcial con un término temporal y términos espaciales, por lo que indaga su geometría compleja, es necesario establecer un método numérico para resolver la dinámica de la transferencia de calor. A continuación, se presenta el desarrollo de la ecuación en donde se determinará la forma final para poder definir la formulación débil del elemento finito y sus correspondientes condiciones de frontera.

Método de solución al problema de transferencia de calor con la ecuación de conducción de calor:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2)$$

Donde  $C_p$  el calor específico,  $\rho$  la densidad del material,  $k$  la conductividad térmica del material y  $\alpha$  es la difusividad térmica del grafito, la cual se define de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$$

Y se obtiene la ecuación 3

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \alpha \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3)$$

*Formulación débil de elemento finito.*

Se utiliza la formulación débil de elemento finito para poder bajar el orden de la ecuación y poder agregarla a FreeFem++, primero se integra en el volumen (ecuación 4).

$$\int \frac{\partial T}{\partial t} dV = \alpha \int \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) dV + \alpha \int \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) dV \quad (4)$$

Y se multiplica todo por una función auxiliar del elemento finito ( $\phi$ ) debido a que cuando se deriva una función de segundo orden para obtener una función de derivadas de primer orden hace que resolverla sea menos complejo, pero se pierde información, (información que contiene  $\phi$ ).

$$\int \frac{\partial T}{\partial t} \phi dV = \alpha \int \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) \phi dV + \alpha \int \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) \phi dV \quad (5)$$

Mediante el Teorema de Green que relaciona una integral de línea con una integral doble se obtiene:

$$\alpha \int \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) \phi dV = -\alpha \int \frac{\partial \phi}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) dV + \alpha \int \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right) \phi dA \quad (6)$$

$$\alpha \int \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) \phi dV = -\alpha \int \frac{\partial \phi}{\partial y} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) dV + \alpha \int \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right) \phi dA \quad (7)$$

Donde la integral de área con respecto a la normal  $n$ , se refiere las condiciones de frontera en los casos de ingreso de calor por radiación y pérdida de calor por convección.

Se sustituye en la ecuación de calor:

$$\int \frac{\partial T}{\partial t} \phi dV = -\alpha \int \frac{\partial \phi}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) dV - \alpha \int \frac{\partial \phi}{\partial y} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) dV \quad (8)$$

$$\int \frac{\partial T}{\partial t} \phi dV + \alpha \int \frac{\partial T}{\partial x} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dV + \alpha \int \frac{\partial T}{\partial y} \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dV = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T^n - T^{n-1}}{\Delta t} \quad (10)$$

Donde  $T^n$  es la temperatura que se calcula en el tiempo actual. La resolución de la ecuación se resuelve en todo  $T^n$ , lo que significa que el método es implícito (debe iterar para determinar la solución del problema), para poder resolver en tiempo actual, se necesita saber el tiempo anterior, es decir  $T^{n-1}$  dentro de una iteración y n es para determinar qué tiempo le corresponde su evaluación.

$$\int T^n \phi dV + \alpha \Delta t \int \frac{\partial T^n}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} dV + \alpha \Delta t \int \frac{\partial T^n}{\partial y} \frac{\partial \phi}{\partial y} dV - \int T^{n-1} \phi dV = 0 \quad (11)$$

Ecuación diferencial parcial del problema que se resuelve

$$\int \left( T^n \phi + \alpha \Delta t \left( \frac{\partial T^n}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial T^n}{\partial y} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \right) dV - \int T^{n-1} \phi dV = 0 \quad (12)$$

Se definieron condiciones de frontera, basados en la ecuación de frontera de convección, radiación y flujo de calor combinados

$$\dot{q}_0 A + hA(T_\infty - T_0) + \varepsilon \sigma A(T_{alred}^4 - T_0^4) + kA \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} + \dot{e}_0 (A \Delta x / 2) = 0 \quad (13) \text{(Çengel, 2007)}$$

Condición de frontera del contorno de los bloques (convección):

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{C1} = h(T|_{C1} - T_\infty) \quad (14)$$

Condición de frontera en las lámparas de la fuente (radiación por lámpara encendida):

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{c_2} = q_1 \quad (15)$$

Condición de frontera en las lámparas del sustrato (radiación por lámpara encendida):

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{c_3} = q_1 \quad (16)$$

Condición de frontera en la zona de la placa (conducción por continuidad):

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{c_4} = q_2 \quad (17)$$

En las ecuaciones 15 y 16 cuando las lámparas están apagadas se convierten en automático en condición de frontera por convección.

Las condiciones de frontera dependen de la variable  $\frac{h}{k}$ , la cual se relaciona con la convección forzada. Lo que significa que:

$$hA(T_\infty - T) + Ak \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = -\frac{h}{k}(T_\infty - T) \quad (19)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = -\frac{h}{k}T_\infty + \frac{h}{k}T \quad (20)$$

Donde:  $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ ; entonces,  $k = \rho C_p \alpha$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{h}{\rho C_p \alpha} T - \frac{h}{\rho C_p \alpha} T_\infty \quad (21)$$

Se define  $T_\infty$  como la temperatura ambiente,  $T$  la temperatura del bloque, y se debe considerar que  $T > T_\infty$ .

### **Análisis de unidades**

Las unidades que se ocuparon en la simulación fueron: para el tiempo [s], para la masa [g], para la longitud [cm] y para la temperatura [K]. Como se sabe, el Joule [J] se puede escribir de la siguiente manera:

$$J = \left[ \frac{Kgm^2}{s^2} \right] = kg \left( \frac{1000g}{Kg} \right) \frac{m^2}{s^2} \left( \frac{100cm}{1m} \right)^2 = 1 \times 10^7 \frac{gcm^2}{s^2}$$

Finalmente las unidades de las propiedades térmicas del material son:

Densidad:

$$\rho = \left[ \frac{g}{cm^3} \right]$$

Calor específico:

$$C_p = \left[ \frac{J}{gK} \right] = \left[ \frac{Kgm^2}{gs^2K} \right] = \left[ \frac{Kgm^2}{gs^2K} \right] \left( \frac{1000g}{Kg} \right) \left( \frac{100cm}{1m} \right)^2 = 1 \times 10^7 \frac{cm^2}{s^2K}$$

Coefficiente de transferencia de calor por convección:

$$h = \left[ \frac{W}{m^2K} \right] = \left[ \frac{J}{m^2sK} \right] = \left[ \frac{Kg}{s^3K} \right] = \left[ \frac{Kg}{s^3K} \right] \left( \frac{1000g}{Kg} \right) = 1 \times 10^3 \frac{g}{s^3K}$$

Difusividad:

$$\alpha = \left[ \frac{m^2}{s} \right] = \left[ \frac{m^2}{s} \right] \left( \frac{100cm}{1m} \right)^2 = 1 \times 10^4 \frac{cm^2}{s}$$

Se puede observar que en la ecuación (21) se utilizan estas cuatro propiedades del material:

$$\frac{h}{\rho C_p \alpha} = \frac{\frac{g}{s^3K}}{\left( \frac{g}{cm^3} \right) \left( \frac{cm^2}{s^2K} \right) \left( \frac{cm^2}{s} \right)} = \frac{1}{cm}$$

Entonces,

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \left[ \frac{K}{cm} \right]$$

## Método numérico para la simulación del proceso

Existen varios métodos numéricos utilizados para calcular de manera numérica las soluciones de ecuaciones diferenciales, como el Método de Diferencias Finitas (MDF), Método de los Volúmenes Finitos (MVF) y en este caso en particular se hará uso del Método de Elementos Finitos (MEF). El modelo fue codificado a través de FreeFem++, utilizando como editor

Geany (un editor de textos programado en C y C++) y ambos son softwares libres. Primero se crearon etiquetas para las fronteras del dominio, para el borde de los bloques se ocupó la etiqueta C1, en los bordes de los círculos donde van las lámparas se ocuparon las etiquetas C2 y C3, y para la separación de los bloques se ocupó la etiqueta C4 (ver Figura 13), como se muestra en la figura, los puntos rojos indican los perfiles de temperatura en esos puntos de la geometría, los puntos de arriba pertenecen al sustrato (Ps) y los puntos de abajo a la fuente (Pf).

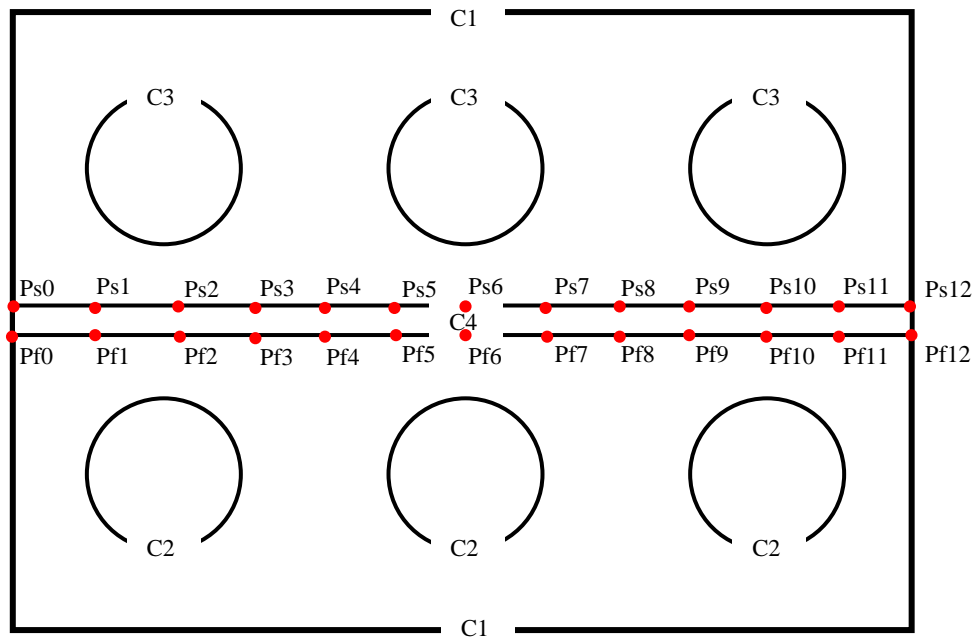


Figura 13. Etiquetas en el dominio y Perfiles de temperatura

Se definieron variables reales como  $dt$  (diferencial de tiempo),  $h$  (coeficiente de transferencia de calor por convección),  $T_0$  (temperatura inicial),  $T_s$  (temperatura del sustrato),  $T_f$  (temperatura de la fuente),  $\rho$  (densidad del grafito),  $q$  (flujo de calor),  $\phi$  (porcentaje de aire en el grafito),  $\alpha_a$  (difusividad del aire),  $l$  (largo de los bloques),  $H$  (altura de los bloques),  $r$  (radio de los círculos),  $edge$  (espacio entre el rectángulo de C4 y C1),  $dT$  (diferencia de temperatura),  $T$  (temperatura),  $v$  (variable auxiliar),  $T_{old}$  (temperatura anterior),  $dTdt$  (cambio en la temperatura respecto al tiempo), también se ocuparon funciones para calcular  $k$  (conductividad térmica del grafito), el  $C_p$  (calor específico del grafito) y

alphaeff ( $\alpha_{eff}$ , difusividad del grafito). Se definió la malla como Th y el espacio como Vh, posteriormente se adecuaron las ecuaciones para todo el bloque y para las condiciones de frontera. La composición de la ecuación diferencial parcial del problema se montó bajo la instrucción de “*problem bloq*”, es bajo este bloque de código en donde escribimos la ecuación diferencial con sus condiciones de frontera para la conformación de una matriz de datos algebraicos a resolver numéricamente, las ecuaciones que se resuelven con esta instrucción son la ecuación 12 (ecuación de transferencia de calor por conducción), 14 (ecuación de frontera en el borde de los bloques por convección), 15 y 16 (ecuaciones de frontera en las lámparas de substrato y fuente cuando están encendidas) y 17 (condición de frontera en la zona de la placa por conducción continua). La sentencia “*problem bloq*” utiliza el método de solución de descomposición LU (*Lower Upper Band Decomposition*). Todo esto se puede observar en el Anexo 2. Código de la Simulación.

Debido a que no se sabe con exactitud el tipo de material del que son los bloques, no se puede especificar las propiedades térmicas de ellos, sólo se sabe que es una aleación de grafito y que es muy poroso. Es por ello que se hizo una función de la conductividad térmica basada en el trabajo de T. Pavlov (2017) y se utilizó la función de calor específico que detalla Timothy D Burchell en su artículo titulado “*Graphite: Properties and Characteristics*” (Burchell, 2020). Se utilizó como densidad del grafito  $2.25 \text{ g/cm}^3$  obtenido de Thermtest Instruments (2021b), estos tres datos para obtener la difusividad térmica para la ecuación de conducción que resuelve el problema de transferencia de calor en los bloques, como se sabe la conductividad térmica puede expresarse de la siguiente manera:

$$k = \alpha C_p \rho \quad (22)$$

Donde  $\alpha$  es la difusividad térmica del grafito,  $C_p$  el calor específico y  $\rho$  la densidad del material. Despejando la difusividad se obtiene:

$$\alpha = \frac{k}{C_p \rho} \quad (23)$$

Como ya se había mencionado, se determina que el grafito es poroso, por lo tanto, se calcula una difusividad específica pensando que un 20% del bloque es aire, por lo tanto:

$$\alpha_{eff} = \alpha_g (1-\phi) + \alpha_a \phi \quad (24)$$

Donde  $\alpha_g$  es la difusividad del grafito con un valor de  $1.05 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $\phi$  el porcentaje de aire que hay en el grafito (se supone un 20%) y  $\alpha_a$  la difusividad del aire de  $0.00025 \text{ cm}^2/\text{s}$  (Thermtest Instruments, 2021a). Esta ecuación es calculada en el código para la resolución del problema.

Otro dato que no se conoce con exactitud es el coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$ , ya que no se sabe la velocidad ni la temperatura del flujo. Se conoce la convección del aire y se reduce este dato considerando que no se tenía aire dentro del sistema, si no que está a un cierto vacío, por lo que el flujo de calor convectivo, es decir la cantidad de calor que se le ingresa por contacto de aire hacia dentro del sistema de depósito es muy bajo y a priori se sabe que no es el aire. Inicialmente el sistema está al vacío por lo que se intuye que hay un poco de aire, pero después se le ingresa Ar, entonces, no se conoce con exactitud este número que es indispensable para el análisis ya que de eso depende el enfriamiento del sistema, por lo cual se propuso  $h = 0.002 \frac{\text{g}}{\text{s}^3 \text{K}}$  el número que más se apegó a la realidad que se tenía.

Se estableció que el depósito trabaja con un  $dT$  establecido, es decir, que la diferencia de temperatura de los bloques debe tener un valor establecido, por ejemplo,  $dT = T_f - T_s = 150 \text{ K}$  aproximadamente, entonces, si se tiene una temperatura de referencia como  $T_f$ , implica que  $T_s = T_f - dT$ .

Con el código se crean archivos con datos para graficar la temperatura en la ubicación de los termopares, las temperaturas en 24 puntos diferentes alrededor del rectángulo (ver Figura 13) con etiquetas C4 (12 arriba y 12 abajo), además que se crea un archivo Tecplot para obtener mejores imágenes.

## Capítulo 4. Análisis de resultados

En este capítulo describiremos los resultados obtenidos por la simulación con base en la comparación de los perfiles de temperatura obtenidos durante la simulación experimental. Para poder tener una mejor comparación se realizaron una gran cantidad de experimentos numéricos variando los parámetros tanto de flujo de calor por radiación, parámetro de convección y la difusividad térmica del grafito tomando en cuenta siempre que los valores se encuentren dentro de rangos físicos reales y adecuados para los experimentos.

### Análisis de perfiles de temperatura

En la Figura 14 se muestran los resultados obtenidos en la simulación, donde  $T_s$  es la temperatura del sustrato y  $T_f$  la temperatura de la fuente, ambos en la ubicación de los termopares. Se puede observar que el comportamiento de las curvas se asemeja al proceso real de depósito. El proceso por el cual se realiza el depósito fue el siguiente:

La fuente (bloque inferior) inicia primero su calentamiento por transferencia de calor con el encendido de las lámparas dentro de él y por inercia el sustrato (bloque superior) también se comienza a calentar. En las curvas se puede observar cuando la fuente se apaga y el sustrato se enciende, pues la curva de la fuente deja de aumentar pero la del sustrato rebasa su temperatura, nuevamente se nota que a los 60 segundos aproximadamente se apaga el sustrato y se enciende la fuente, y a los 150 segundos se apaga la fuente y se enciende el sustrato, obteniendo temperaturas de casi 500 K en el sustrato y 650 K en la fuente, en este tiempo se programa el sustrato para que mantenga su temperatura constante, al igual que la fuente. Los picos que se ven en las curvas son los encendidos y apagados de las lámparas para mantener las temperaturas que se le indican.

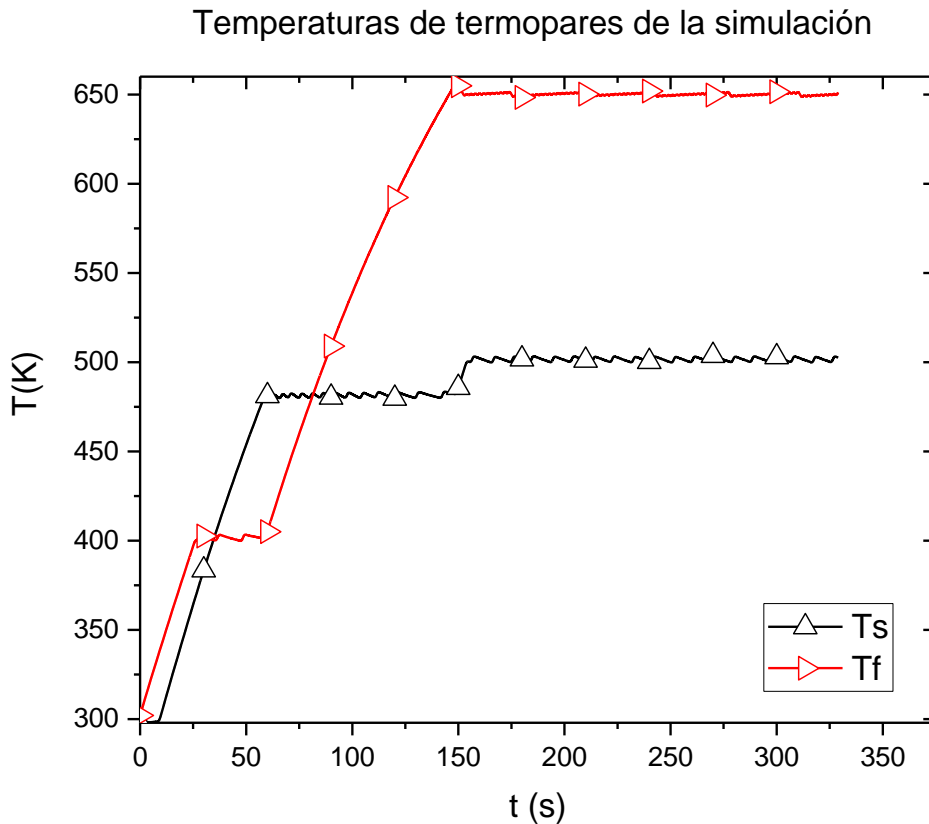


Figura 14. Resultados obtenidos en la Simulación

El código también muestra las temperaturas máximas en determinado tiempo, por ejemplo, en la Figura 15 se muestra el calentamiento de los bloques en el segundo 150 y se puede observar que la máxima temperatura siempre se encuentra en el centro de los bloques, por lo que el  $\Delta T \approx 5$  K está presente siempre entre la ubicación de los termopares y el centro de los bloques (donde se hace el depósito). En esta figura se muestra como los cambios de la temperatura no son muy notorios y que de hecho las temperaturas son iguales en algunos puntos, haciendo ver que la transferencia de calor es homogénea y que las variaciones de la temperatura en el centro de los bloques (donde se encuentra el vidrio con el material a depositar) sólo es notoria cuando el bloque está a temperaturas más altas, es decir, cuando las lámparas están encendidas.

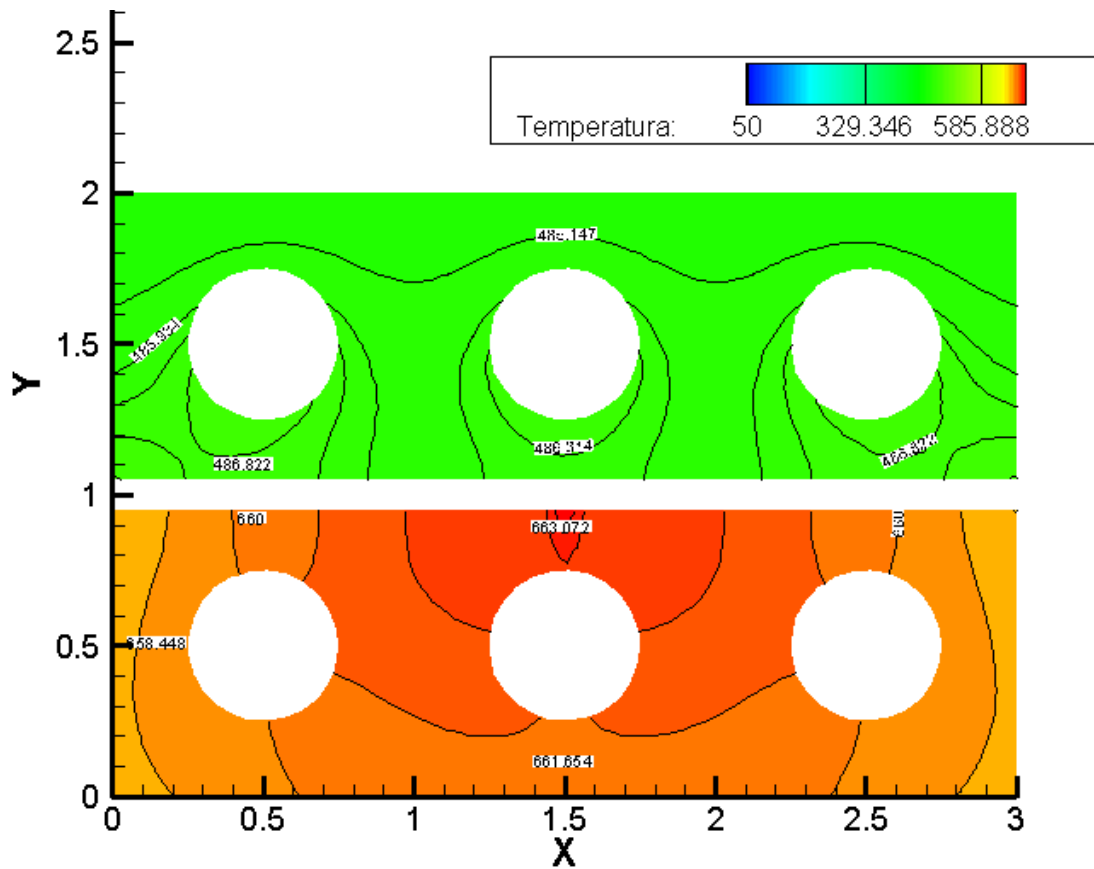


Figura 15. Calentamiento de los bloques en el segundo 150

Los perfiles de temperatura en los puntos donde se encuentra el vidrio son indispensables, pues en el laboratorio se ha visto que el depósito no es uniforme y esto se puede deber a que la temperatura en todo el bloque no es la misma o que el material no fue bien distribuido por la persona. Haciendo el análisis de las temperaturas en esta sección se observa que sí hay un pequeño cambio, pero no es muy notorio, en la Figura 16 se describen los comportamientos de la temperatura en los puntos Pf0, Pf6, Pf12, Ps0, Ps6 y Ps12, como ya se habían mencionado en la Figura 13, estos puntos se encuentran en las orillas y en el centro de los bloques. Observando la figura se concluye que la temperatura en el punto Pf6 y Ps6 (en el centro del bloque) es sólo un poco mayor a la temperatura de las orillas, haciendo así que en

ocasiones el material se sublima con un mayor grosor en el centro de la celda y con un menor grosor en las orillas de la celda.

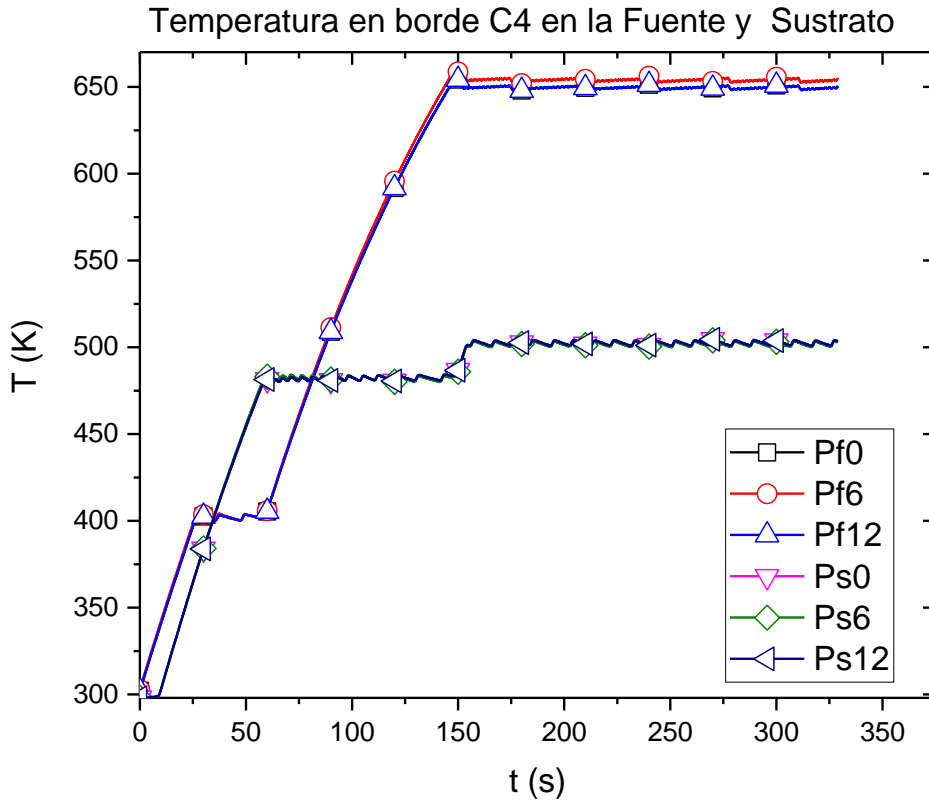


Figura 16. Perfiles de temperatura en las orillas y en el centro del bloque.

### Comparación de los perfiles de temperatura experimentales más representativos vs la simulación numérica

Inicialmente, el LACyTES proporcionó curvas de temperatura del proceso en el sistema CSVT para poder guiarnos del comportamiento del mismo (ver Figura 17), pero era muy poca la información que se muestra en la figura, dado que sólo hay 8 puntos de temperatura por cada curva, por lo que se decidió ir al laboratorio a visualizar de nuevo el sistema cuando se estaba haciendo un depósito y obtener todas las temperaturas cada segundo, un inconveniente es que en cuanto se apagan, ya sea el sustrato o la fuente, el termopar de este

mismo también se apaga y no se pudo visualizar la temperatura que marcan los termopares en esos pequeños periodos. Así la Figura 18 muestra las temperaturas que se lograron visualizar en el experimento real en el sistema CSVT.

Debido a que no están completas las curvas se decidió completar los datos faltantes y se agregaron puntos de manera que su seguimiento fuera el correcto, así se lograron obtener las curvas de la Figura 19 con 220 puntos en cada una y así visualizar el comportamiento más aproximado.

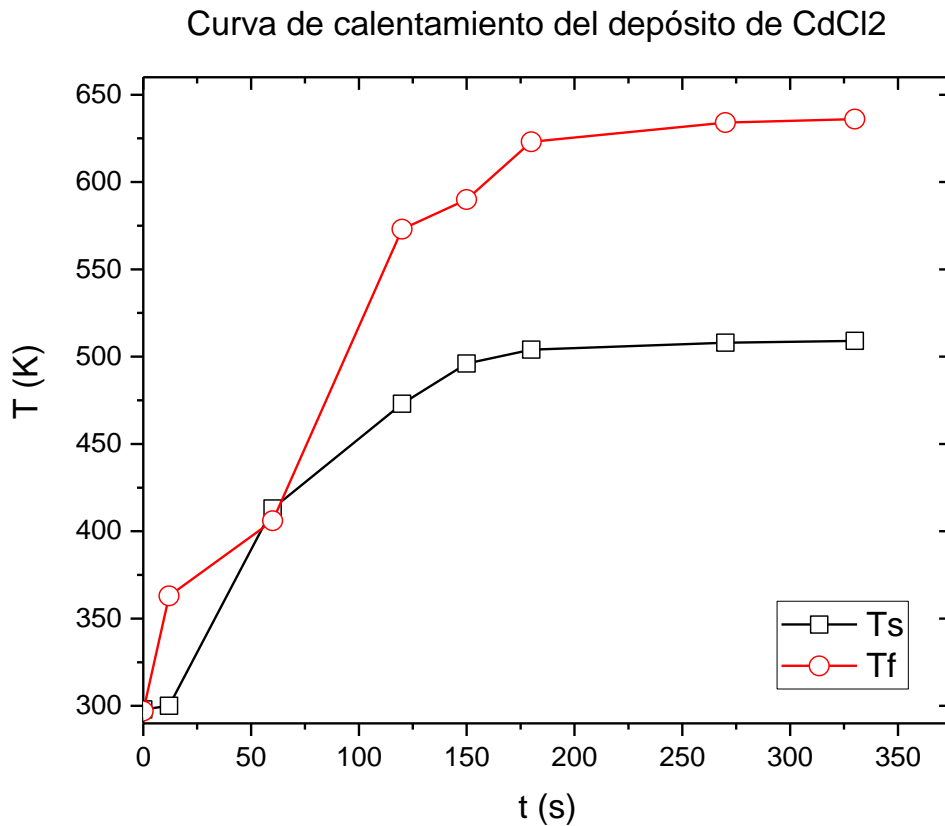


Figura 17. Curva proporcionada por LACyTES

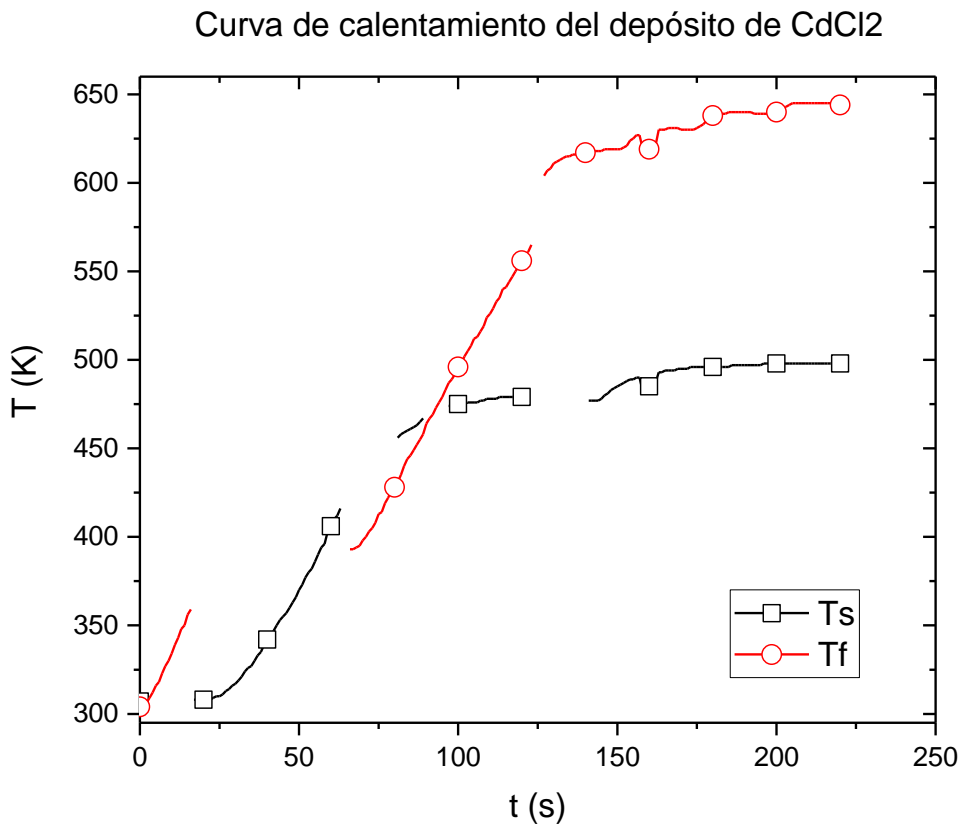


Figura 18. Depósito de CdCl<sub>2</sub> en LACyTES

Durante el proceso de depósito en el sistema CSVT el usuario puede manipular los termopares para obtener las temperaturas que se necesitan, en muchos de los depósitos se ha intentado variar las temperaturas para visualizar resultados y poder concluir cuál es el motivo por el cual el depósito no sale como se requiere. LACyTES tiene diversas curvas de calentamiento de este sistema variando la temperatura, ya sea la de la fuente o la del sustrato, además que pueden elegir la diferencia de temperatura entre los bloques, como se ve en Figura 19 al final del tiempo del depósito, los bloques están a 500 y 650 K aproximadamente, es decir a un  $\Delta T = 150$  K.

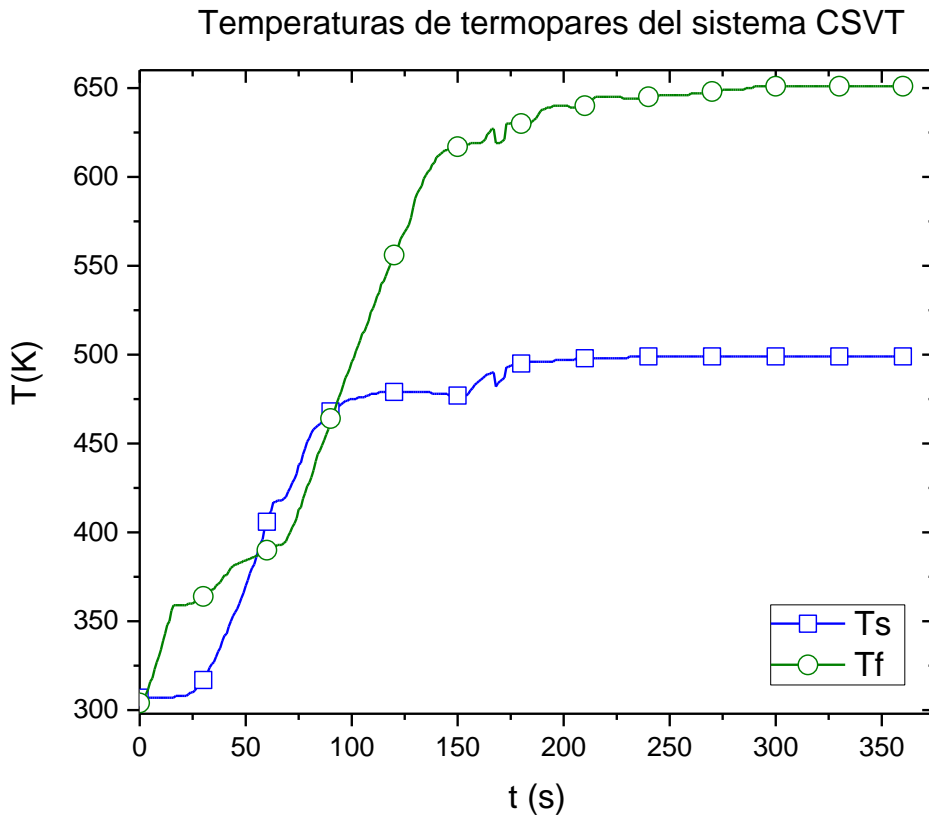


Figura 19. Curva del depósito de CdCl<sub>2</sub> completada

Los resultados obtenidos en la simulación se compararon con la gráfica que se obtuvo durante el depósito en LACyTES para verificar que el comportamiento de las curvas fuera el correcto. En la Figura 20 se muestran las curvas de la simulación y las curvas del depósito en el sistema CSVT, en el caso de la simulación son las temperaturas en la ubicación de los termopares y las curvas del depósito son las temperaturas que marcaron los termopares. Como se puede observar, las curvas de la simulación son muy similares a las del depósito, la solución numérica muestra mucho mayor continuidad y consistencia debido al efecto de la medición de intervalos de datos en tiempos pequeños y con ecuaciones consistentes, mientras que los datos obtenidos del experimento del laboratorio son mucho más variables debido a que los intervalos de tiempo son mucho más grandes y dependen de la observación de la persona que realiza la captura de la información. En los primeros segundos, la fuente en la simulación

llega hasta los 400 K y en el experimento real apenas sobrepasa los 350 K, en el caso del sustrato (cuando está apagado) la transferencia de calor hace que se vaya a más de 375 K en la simulación y en el experimento real no sobrepasa los 325 K. A los 60 segundos, los puntos de la fuente son bastante parecidos, sólo cambia por unos grados, pero en el caso del sustrato hay una diferencia de casi 75 grados y a los 120 s las temperaturas del sustrato se empatan y las de la fuente tienen una diferencia de casi 30 grados. Al final, las curvas se mantienen constantes tanto en la simulación, como en el depósito real.

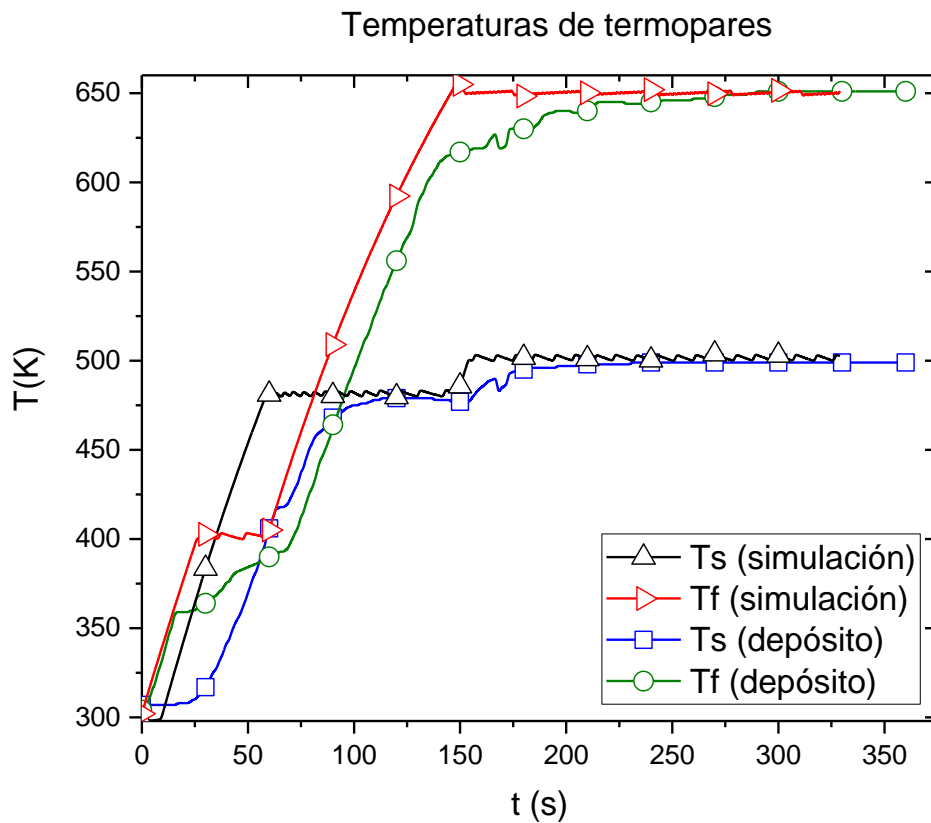


Figura 20. Curvas de Simulación vs Depósito en CSVT

Para visualizar mejor el calentamiento de los bloques se utilizó Tecplot un programa de visualización numérica. Con él se realizaron las Figura 21y Figura 22, en los segundos 200 y 315 respectivamente, en ellas se observa mejor la transferencia de calor en los bloques de grafito y permite poner etiquetas con las temperaturas a las que está la geometría.

Los colores en la figura muestran fácilmente qué área de la geometría está más caliente y se observa que la fuente está a una temperatura superior. El substrato está 150 grados más abajo que la fuente en ambas figuras.

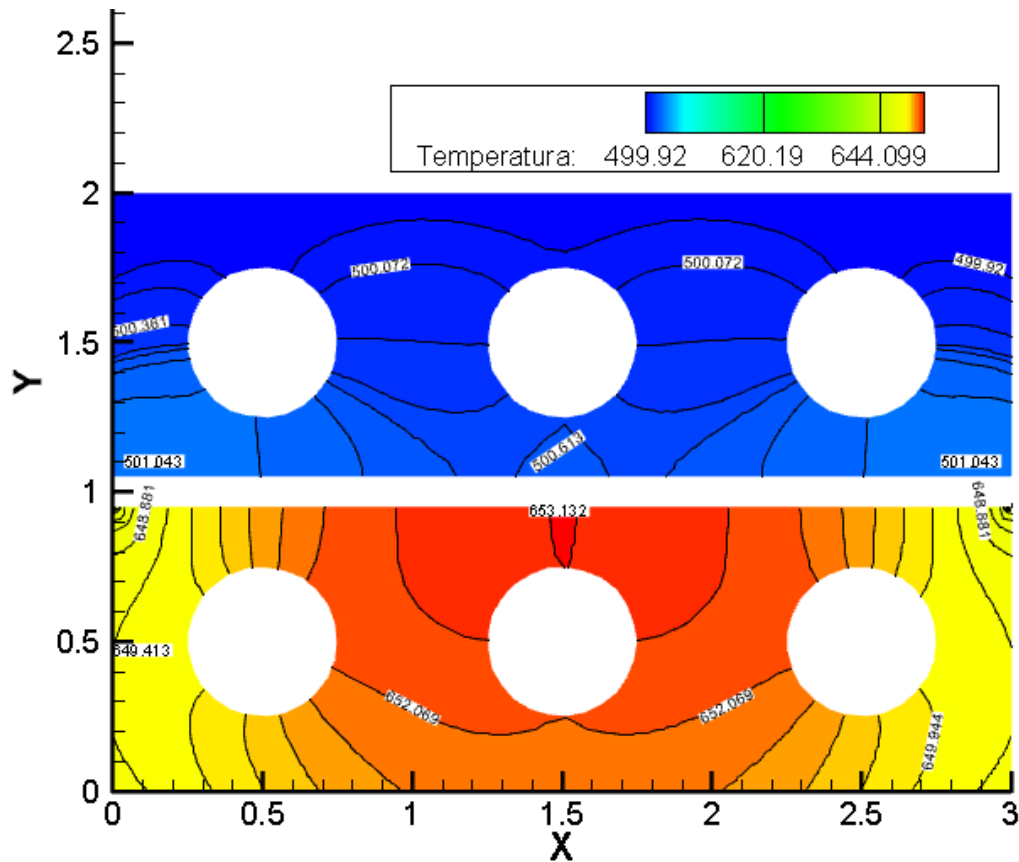


Figura 21. Calentamiento de los bloques en el segundo 200

Para el tiempo  $t = 200$  s se muestra una imagen con un  $\Delta T \approx 153$  K entre el substrato y la fuente, un  $\Delta T \approx 5$  K entre el centro y las orillas del substrato, y un  $\Delta T \approx 4$  K entre la temperatura en el centro y la ubicación del termopar. En el caso del bloque de la fuente se puede ver que la diferencia de temperatura entre el centro y las orillas es mínima pero que las orillas están a mayor temperatura, esto se debe a que en las orillas de los bloques hay contacto con la

chalupa y esta con el bloque del sustrato, por lo que hay transferencia de calor por conducción, y esto hace que aumente un poco su temperatura.

En el tiempo  $t = 315$  s también se muestra un  $\Delta T \approx 153$  K entre el sustrato y la fuente, pero la diferencia de temperaturas entre las orillas y el centro del bloque en el sustrato es mínima y en la fuente ya no hay diferencia, toda la parte inferior del bloque se encuentra a 500.75 K, esto indica que a este tiempo los bloques mantienen ya su temperatura constante.

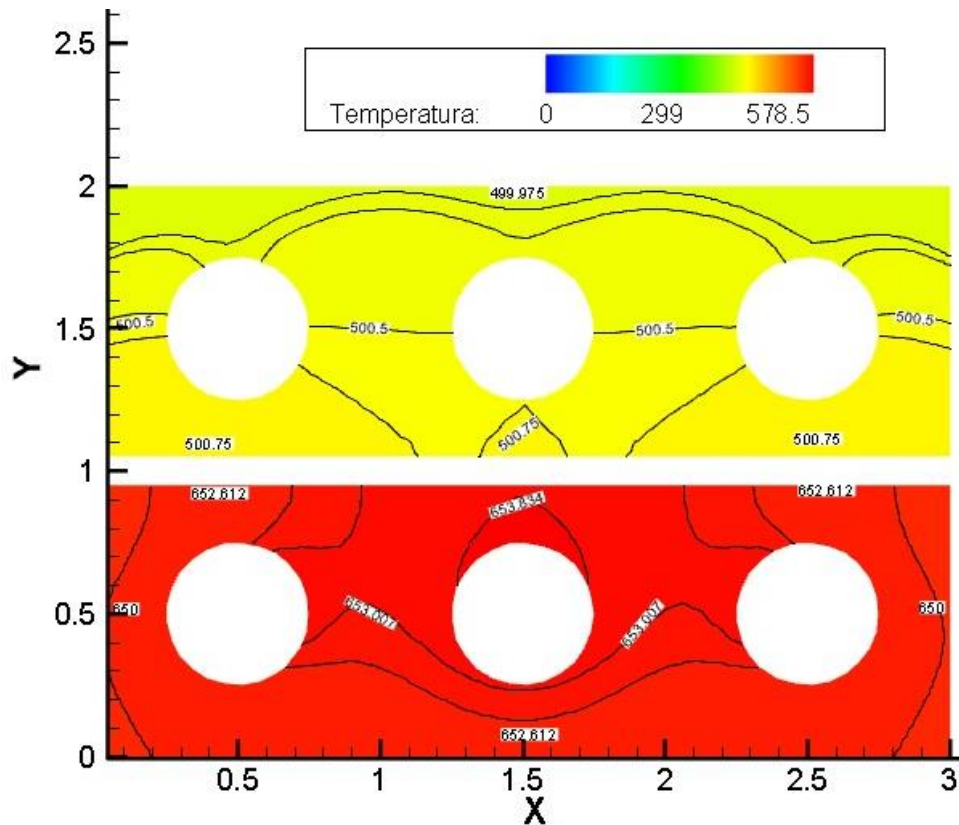


Figura 22. Calentamiento de los bloques de grafito, manteniendo su temperatura constante en el segundo 315

Se graficó  $\frac{dT}{dt}$  vs  $t$  y después de calculó la integral de  $\frac{dT}{dt}$  para determinar el calor que se suministra al sistema. En la Figura 23 se muestra la curva de la derivada de la temperatura respecto al tiempo vs tiempo, de la temperatura del sustrato del depósito real que se realizó

en el laboratorio, esta figura muestra cuanto calor es necesario suministrar al sistema de tal manera que ocurra el proceso de sublimación, de tal manera que las características del depósito sean similares, en caso contrario, si se suministra más o menos calor del que se indica es muy probable que el grosor del material depositado sea muy grande o cambiarla morfología o estructura del sistema. Entonces los análisis posteriores deberían tener, si no iguales, al menos el área bajo la curva (la cantidad de calor que se suministra) debería ser muy parecida para que el proceso se considere muy semejante y pueda compararse.

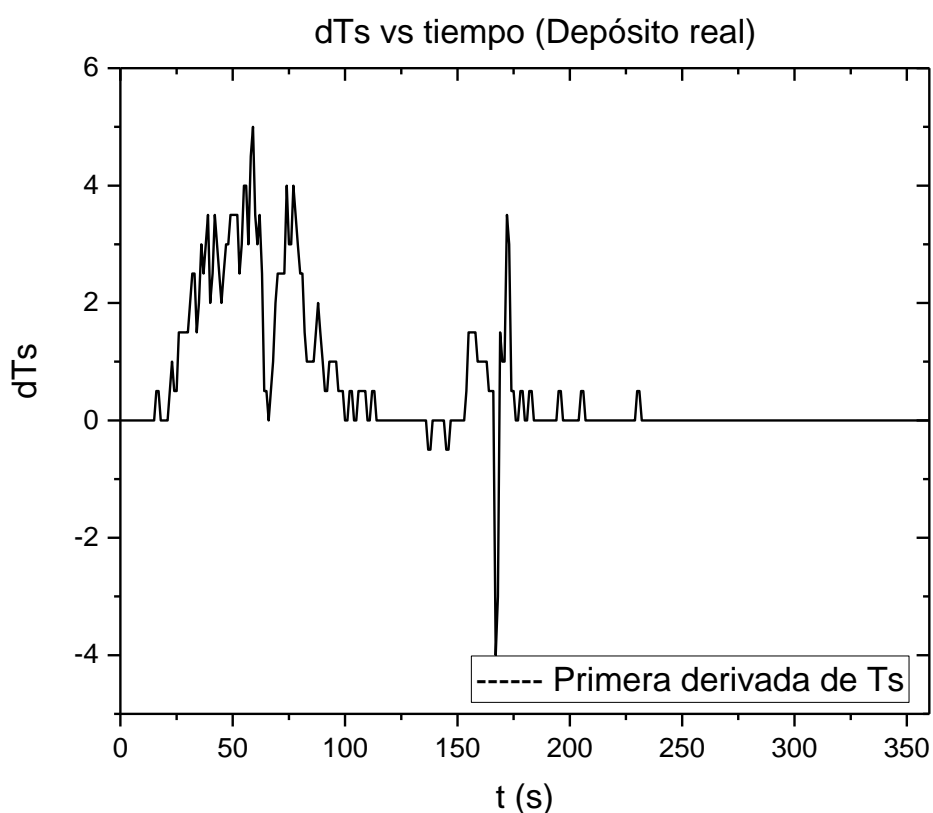


Figura 23. Derivada de la temperatura del sustrato en el depósito real hecho en LACyTES

Al integrar esta curva se obtiene el área debajo de la curva que se refiere al calor que recibe esta parte del bloque durante el proceso de depósito de material, con un resultado de 192 K/s.

Así mismo en la Figura 24 se muestra también esta curva, pero de la temperatura de la fuente y al integrarla da un resultado de 347 K/s. El área bajo la curva de esta derivada significa la cantidad de calor suministrado al sistema, es decir, para cuestiones de transferencia de calor, el flujo de calor es el parámetro que dice cómo debe de ocurrir el depósito (metodología del depósito).

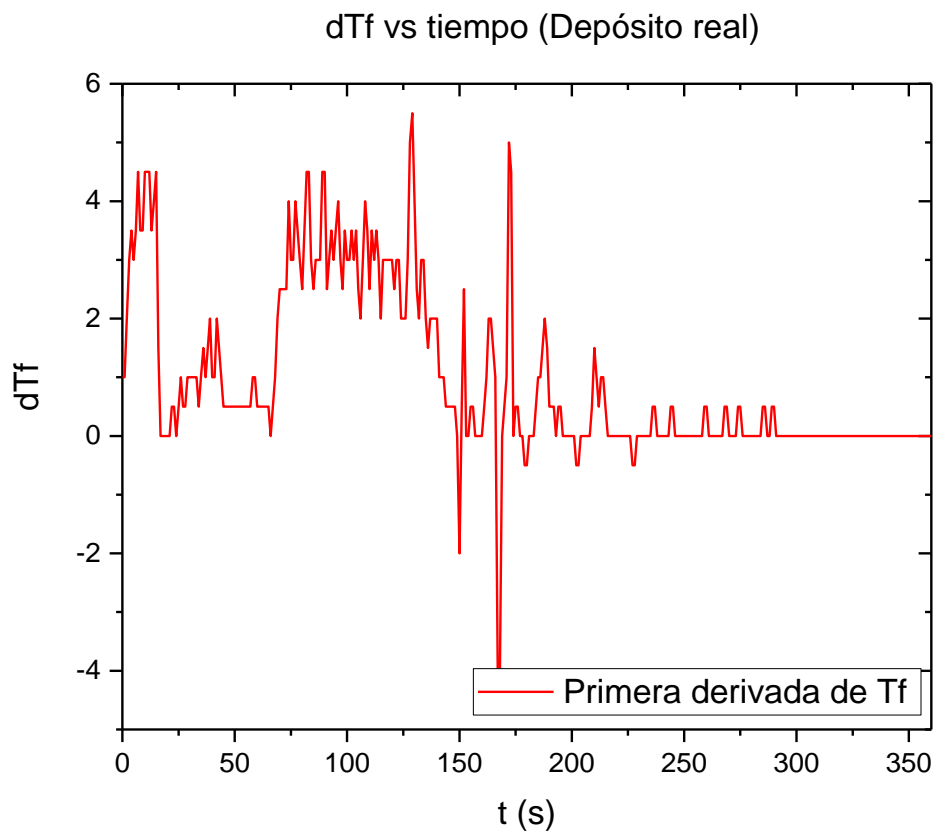


Figura 24. Derivada de la temperatura de la fuente en el depósito real hecho en LACyTES

También se realizaron las curvas de la primera derivada de la temperatura del sustrato respecto al tiempo (Figura 25), de los resultados que se obtuvieron de la simulación, se integró y el calor que se le suministra a este bloque es de 204.587 K/s. Para el bloque de la

fuerza se utilizó la misma metodología (ver Figura 26) y se obtuvo como resultado 349.085 K/s.

Al inicio se nota que se le está ingresando mucho calor y después muestra esos picos que significa cuando el sistema trata de mantener constante la temperatura (ingresa calor en instantes). Como se observa, la gráfica tiene valores menores que cero, lo que significa que cuando hay valores negativos el sistema pierde calor, y cuando son positivos, el sistema gana calor.

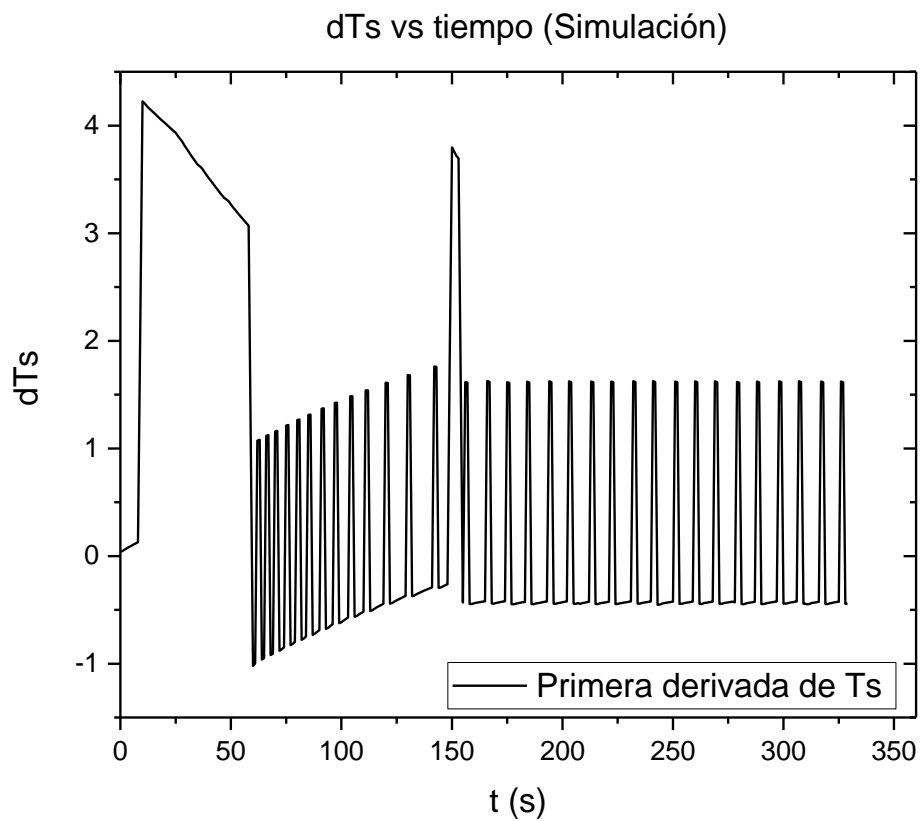


Figura 25. Derivada de la temperatura del sustrato en la Simulación

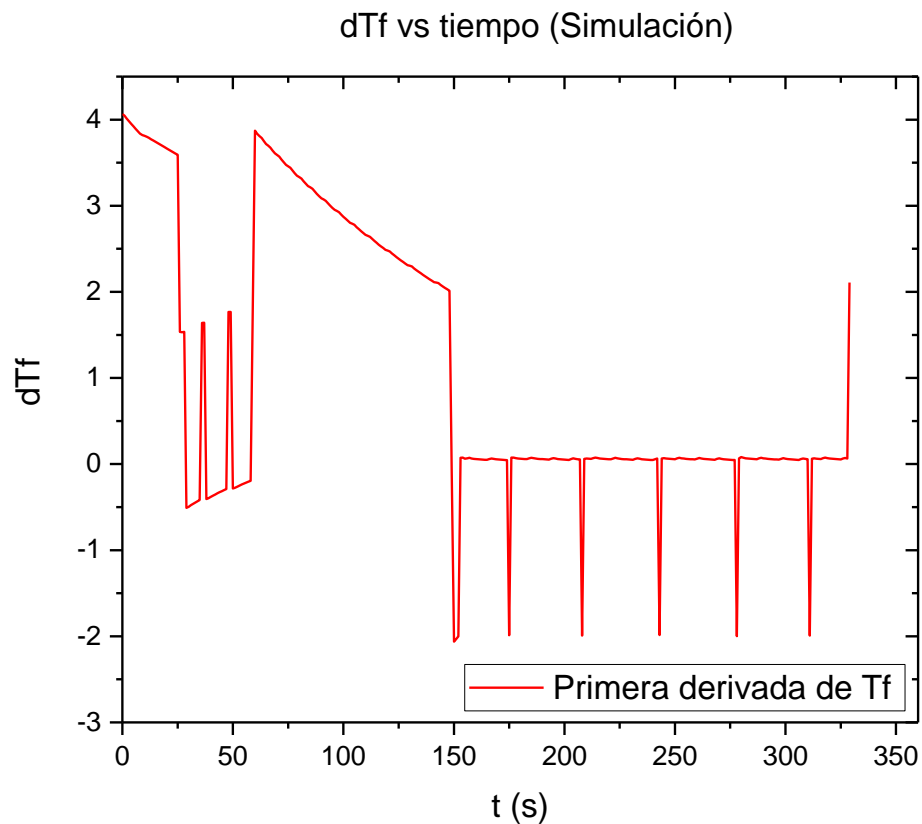


Figura 26. Derivada de la temperatura de la fuente en la Simulación

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos del área bajo la curva del experimento real y la simulación para el perfil de temperatura en el substrato y la fuente. Los resultados fueron bastante similares, en el caso del substrato se obtuvo un cociente de correlación del 93.84 % y en la fuente un 99.40 %.

Tabla 1. Comparación de resultados del área bajo la curva

	<b>Substrato</b>	<b>Fuente</b>
<b>Experimento Real</b>	192	347
<b>Simulación</b>	204.587	349.085
<b>Cociente de correlación</b>	0.9384	0.9940

## Conclusiones

A través del análisis numérico se obtuvieron los perfiles de temperatura a la que se encuentran los bloques (substrato y fuente) del sistema CSVT en un depósito de sublimación a distancia corta. Se encontraron los parámetros físicos ( $h = 0.002 \frac{g}{s^3 K}$  y  $\alpha = 1.05 \frac{cm^2}{s}$ ) adecuados que coinciden con el experimento real en el laboratorio. Con esta información se realizaron análisis de los experimentos numéricos que nos permitieron determinar la cantidad de energía que interviene a través de las lámparas hacia el sistema de depósito. Este resultado permitió esclarecer que el flujo de calor que se debe de ingresar cada vez que se haga el proceso deberá ser el mismo, si bien dentro del estudio solamente utilizamos el cambio de temperatura respecto al tiempo con una parametrización adecuada se podría obtener el flujo de calor adecuado, en esta ocasión se encontró que el área bajo de la curva del desempeño del cambio de la temperatura con respecto al tiempo es básicamente la misma que en el experimento real.

Los experimentos numéricos tienen la facilidad de poder incluir una gran precisión en el detalle de los puntos que se analizan, en este caso la evaluación en el tiempo fue de un dato por cada segundo, mientras que en el experimento real fue de uno cada 30 segundos, por lo que para conocer el desempeño del proceso de sublimación en distancia corta en el experimento real sí es necesario un sensor de temperatura que se encuentre conectado a algún equipo y que dé información en al menos de por lo menos un dato por segundo, dicha información podría ayudar a que los estudios posteriores nos permitan determinar también las temperaturas a las cuales ocurren los procesos de sublimación toda vez que se observen los efectos del calor latente de sublimación de los compuestos del depósito.

Se obtuvo el método numérico que describe el calentamiento de los bloques donde se encuentra la celda a la que se le deposita el material y con la simulación se obtuvieron curvas de las temperaturas en la ubicación de los termopares y entre los bloques para determinar los perfiles de temperatura. Se analizó la derivada de la temperatura con respecto al tiempo para obtener un término de intercambio de energía por unidad de tiempo dentro del sistema y saber el calor que fue suministrado a cada bloque.

Se obtuvieron los parámetros adecuados, tanto de transferencia de calor convectiva, como del calor de las lámparas y los resultados obtenidos en la simulación se compararon con los datos del experimento real elaborado en LACyTES de un depósito de  $\text{CdCl}_2$ , del cual también se analizó la derivada de la temperatura con respecto al tiempo y se encontró el área bajo la curva para conocer el calor suministrado al sistema. Al comparar los resultados se observó que las curvas de las temperaturas en los termopares son muy similares, el comportamiento se sigue adecuadamente y con ello se puede concluir que se debe considerar que la temperatura de los termopares está a cuatro o cinco grados debajo de la temperatura en el centro de los bloques. Es necesario estandarizar una metodología para llevar a cabo el proceso de manera que se logre que las celdas tengan características muy similares en su morfología, independientemente del usuario que realice el depósito.

## **Posibles trabajos posteriores**

En trabajos posteriores se debería realizar una metodología con este software formal, se debe utilizar más puntos para los datos experimentales, así como un análisis para saber cuánto calor se le suministró durante todo el proceso, y cuál fue la diferencia de calor que existió entre lo que se le suministró al substrato y a la fuente, esto permitiría estandarizar formalmente los procesos de depósito de los experimentos.

Uno de los problemas básicos del sistema es que todo el proceso es manual, es decir, lo controla la persona que realiza el depósito y es por ello, que el proceso puede salir diferente en varias ocasiones. Esto hace que el proceso no sea reproducible y que los depósitos no salgan igual.

Entender el proceso físico y térmico que ocurre dentro del sistema ayuda a que en futuros trabajos se pueda hacer un mecanismo para realizar el proceso automáticamente, es decir, una interfaz que sea controlable y que la persona no tenga que intervenir en el proceso.

Se espera que a un mediano plazo, se haga un control y automatización del sistema con base en lo que se presenta y se ha hecho en este trabajo.

“Nada en la vida debe ser temido, sólo entendido. Ahora es el momento de entender más, para  
temer menos.”

-Marie Sklodowska Curie

## Referencias bibliográficas

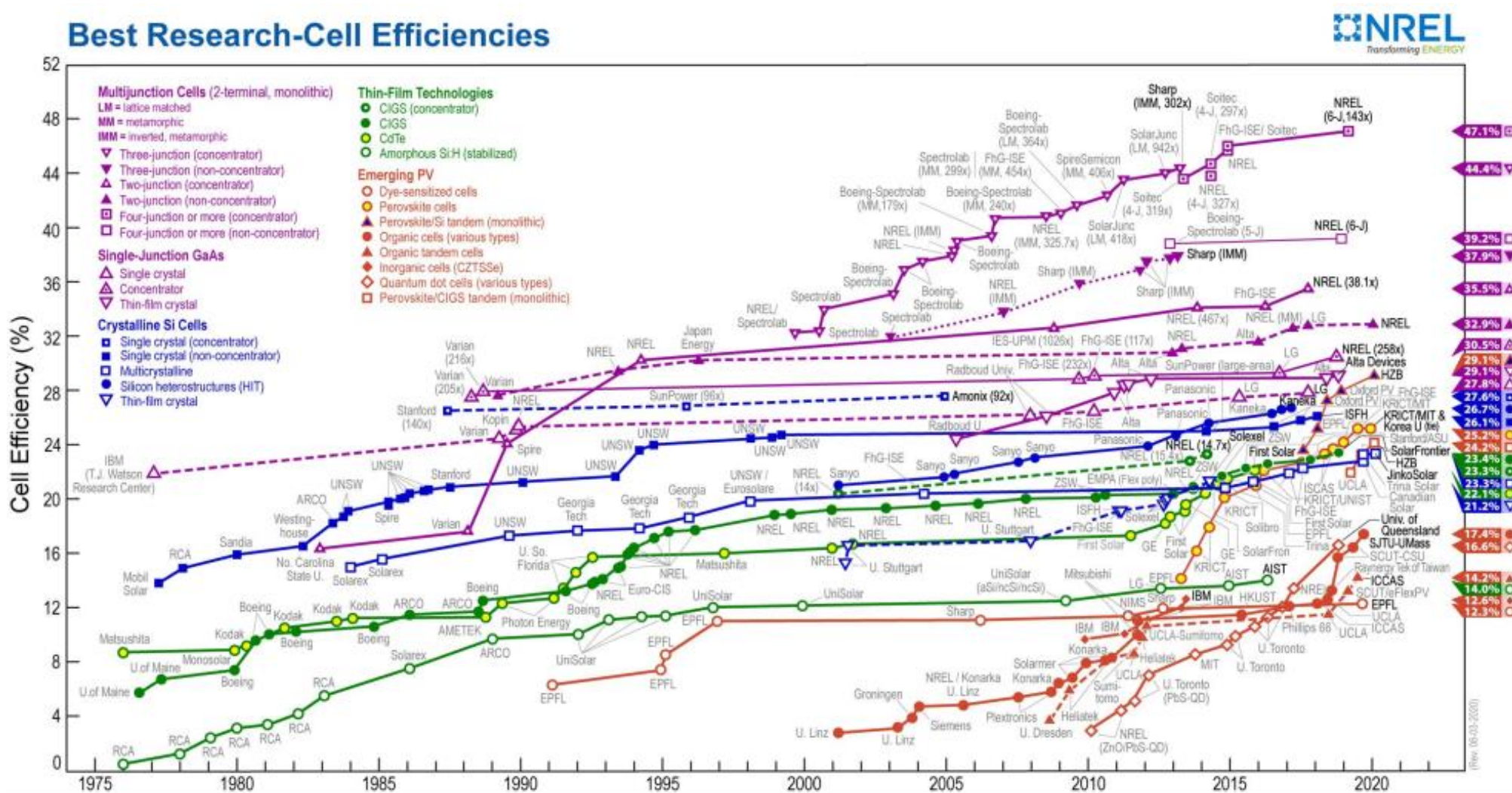
- Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) (2016). *Energías Renovables*. Revista Energías Renovables, 4(32), 20–24.
- Bernal-Correa, R., Morales-Acevedo, A., Montes-Monsalve, J., & Pulzara-Mora, A. (2016). *Design of the TCO (ZnO:Al) thickness for glass/TCO/CdS/CIGS/Mo solar cells*. Journal of Physics D: Applied Physics, 49(12). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/12/125601>
- Burchell, T. D., & Pavlov, T. R. (2020). *Graphite: Properties and Characteristics*. Comprehensive Nuclear Materials, 27. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.11777-1>
- Çengel, Y. (2007). *Transferencia de Calor y Masa*. In Biotechnology Letters (McGraw-Hil). <https://doi.org/10.1007/BF00129346>
- Chacón, E. (2010). *Notas sobre FreeFem ++ 2D y 3D: traducción del manual de F. Hecht*. 1–99.
- De Melo, O., Domínguez, A., Gutiérrez Z-B, K., Contreras-Puente, G., Gallardo-Hernández, S., Escobosa, A., González, J. C., Paniago, R., Ferraz Dias, J., & Behar, M. (2015). *Graded composition CdxZn1-xTe films grown by Isothermal Close Space Sublimation technique*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 138, 17–21. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.02.025>
- ESMAP (2021). *Global Solar Atlas*. <https://globalsolaratlas.info/map?c=22.22809,-103.886719,4&r=MEX>
- ESMAP. (2019). *Photovoltaic Power Potential México*. <https://globalsolaratlas.info/download/mexico>
- Ferreira A. (2013). *Método Dos Elemtos Finitos*. Faculdade de Engenharia da Univeridade do Porto. Portugal. [http://arquivoescolar.org/bitstream/arquivo-e/117/1/Livro\\_MEF.pdf](http://arquivoescolar.org/bitstream/arquivo-e/117/1/Livro_MEF.pdf)
- García A. (2012). *Energía de Ionización simple en la Soldadura con Electrodo Revestido*. Soldag. Insp. São Paulo, Vol. 18, Nº. 01, p.072-076 <https://doi.org/10.1590/S0104-92242013000100010>
- Hay, B., Anhalt, K., Chapman, L., Boboridis, K., Hameury, J., Krenek, S., Vlahovic, L., Fleurence, N., & Beneš, O. (2014). *Traceability Improvement of High Temperature Thermal Property Measurements of Materials for New Fission Reactors*. IEEE

- Transactions on Nuclear Science, 61(4), 2112–2119.  
<https://doi.org/10.1109/TNS.2014.2300552>
- Hecht, F. (2012). *New development in FreeFem++*. Journal of numerical mathematics, 20(3-4), 251-266. <https://freefem.org/>
- Hecht, F. (2021). *FreeFEM Documentation, Release 4.6*.  
<https://doc.freefem.org/pdf/FreeFEM-documentation.pdf>
- Jorge, M. (2017). *Estudio y análisis de la transferencia de calor en una ventana con cavidad interior*. Universidad Carlos III de Madrid.
- Mendoza-Pérez, R., Hernández, J. A., Contreras-Puente, G., & Sastre-Hernández, J. (2012). *Estudio comparativo de la degradación de celdas solares de CdTe con cds procesado por CBD y CSVT*. Revista Mexicana de Física, 58(5), 397–403.
- Mendoza-Pérez, R., Aguilar-Hernández, J. R., Sastré-Hernández, J., Tufiño-Velázquez, M., Vigil-Galán, O., Contreras-Puente, G. S., Morales Acevedo, A., Escamilla-Esquivel, A., Ortega-Nájera, B., Mathew, X., & Jean-Marc-Zisa. (2009). *Photovoltaic Modules Processing of CdS/CdTe by CSVT in 40 cm<sup>2</sup>*. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2, 002090–002095.  
<https://doi.org/10.1109/PVSC.2009.5411442>
- Nápoles, E., Raide, G., & Edenio, O. (2015). *Una introducción al Análisis por Elementos Finitos: aplicaciones y ejemplos*.
- NREL Transforming Energy. (2020). *Best Research-Cell Efficiencies*. In NREL Transforming Energy.
- Pavlov, T., Vlahovic, L., Staicu, D., Konings, R. J. M., Wenman, M. R., Van Uffelen, P., & Grimes, R. W. (2017). *A new numerical method and modified apparatus for the simultaneous evaluation of thermo-physical properties above 1500 K: A case study on isostatically pressed graphite*. Thermochimica Acta, 652, 48.  
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.03.004>
- Perpiñán, O. (2018). *Energía Solar Fotovoltaica* (Creative Commons (Ed.)).
- Sadaka, G. (2012). *FreeFem ++, a tool to solve PDEs numerically*. 1–32.
- Santana, G., de Melo, O., Aguilar-Hernández, J., Mendoza-Pérez, R., Marel Monroy, B., Escamilla-Esquivel, A., López-Sópez, M., de Moure, F., Hernández, L. A., & Contreras-Puente, G. (2013). *Photoluminescence Study of Gallium Nitride Thin Films Obtained by Infrared Close Space Vapor Transport*. Materials, 6(3), 1050–1060.  
<https://doi.org/10.3390/ma6031050>

- Suárez, J. L., Ardolfo, A., & Francisco, C. (2012). *La radiación infrarroja como mecanismo de transferencia de calor de alta calidad en procesos de calentamiento*. *Ingeniería y Ciencia*, 8(16), 97–127. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.8.16.5>
- Thermtest Instruments (2021a). *Materials Thermal Properties Database, search: air*. <https://thermtest.com/materials-database#air>
- Thermtest Instruments (2021b). *Materials Thermal Properties Database, search: graphite*. <https://thermtest.com/materials-database#graphite>
- UACM (s.f.). *Laboratorio de Ciencias y Tecnología Sustentables*. <https://www.uacm.edu.mx/lacytes/>
- UNAM (2011). *Celdas Fotovoltaicas*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Valdés, F. (2019). *Transferencia de Calor Notas de curso*. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Zayas P., Contreras G., Santana G, Hernández E., Calzadilla O., Gutiérrez K., Sastre J., D. M. O. (2011). *CdTe Depositado por sublimación isotérmica a corta distancia en celdas solares de CdS/CdTe*. *Revista Cubana de Física*, 28(1), 6.

# Anexos

## Anexo 1. Mejor Eficiencia de las Celdas Solares



## Anexo 2. Código de la Simulación

```
int C1=99, C2=98, C3=100,C4=101; // Etiquetas para fronteras
real dt=1, h=0.002, T0=298;
real Ts,Tf, ro=2.25, q=2., fi=0.2, alphaaire=0.00025;
real l=3., H=2., r=0.25,edge=0.0007,dT=150.;
string s1="Bloque";string s2=".plt";string archivo;
//Se definen las fronteras de los bloques con C1
border a1(t=0,l){x=t;y=0;label=C1;};
border b1(t=0,H){x=l;y=t;label=C1;};
border d1(t=0,l){x=l-t;y=H;label=C1;};
border f1(t=0,H){x=0;y=H-t;label=C1;};
//Se definen las fronteras de la placa con C4
border a4(t=edge,l-edge){x=t;y=0.95;label=C4;};
border b4(t=0.95,1.05){x=l-edge;y=t;label=C4;};
border d4(t=edge,l-edge){x=l-t;y=1.05;label=C4;};
border f4(t=0.95,1.05){x=edge;y=H-t;label=C4;};
//Se definen las lámparas inferiores (Fuente) con C2
border C21(t=0,2.*pi){x=0.5+r*cos(t); y=0.5+r*sin(t); label=C2;};
border C22(t=0,2.*pi){x=1.5+r*cos(t); y=0.5+r*sin(t); label=C2;};
border C23(t=0,2.*pi){x=2.5+r*cos(t); y=0.5+r*sin(t); label=C2;};
//Se definen las lámparas superiores (Sustrato) con C3
border C31(t=0.,2.*pi){x=0.5+r*cos(t); y=1.5+r*sin(t);label=C3;};
border C32(t=0.,2.*pi){x=1.5+r*cos(t); y=1.5+r*sin(t);label=C3;};
border C33(t=0.,2.*pi){x=2.5+r*cos(t); y=1.5+r*sin(t);label=C3;};
string s0x0="Temperatura.dat";
string archivo0x0;
string s0x1="PerfildeTemperatura.dat";
string archivo0x1;
// Se construye la malla
mesh Th = buildmesh (a1(150)+b1(100)+ d1(150)+f1(100)
+ C21(-25)+ C22(-25)+C23(-25)
+ C31(-25)+ C32(-25)+C33(-25)
+ a4(-50)+b4(-16)+ d4(-50)+f4(-16)); //
//Hasta aquí se definio la malla
plot(Th);
fespace Vh(Th,P1); Vh T,v,Told,dTdt;
T=T0;
plot(Th, wait=1);
int nbvertices=Th.nv;
int nbelement = Th.nt;
Vh Thx=x,Thy=y;
Vh k=((9*(10^-6))*(T^2))-(0.0544*(T))+107.37)*(10^5);
Vh Cp=(1.*(10^4))/(((11.07)*(T^-1.644))+(3.688*(10^-4))*(T^0.02191));
```

```

Vh alphaeff=(k/(Cp*ro))*(1-fi)+(alphaaire*fi);
T=T0;
Told=T0;
problem bloq(T,v)= int2d(Th) (T*v/dt+alphaeff*(dx(T)*dx(v)+dy(T)*dy(v)))
//Ecuación diferencial de conducción que se resuelve

                + int1d(Th,C1) (h*T*v)-int1d(Th,C1) (h*T0*v) //frontera
Robin convectiva externa
                -int1d(Th,C3) (Ts*q*v) // Condiciones de frontera Neumann
                -int1d(Th,C2) (Tf*q*v)
                - int2d(Th) ((Told)*v/dt);

//Usamos "1" para indicar que la lámpara está encendida y "0" apagada

Ts=0.;
Tf=1.;
archivo0x0=s0x0;
ofstream file0x0(archivo0x0);
archivo0x1=s0x1;
ofstream file0x1(archivo0x1);
//Aumentamos la teperatura de la fuente por 10 segundos
for(real t=0;t<10;t+=dt){
bloq;
plot(T,value=true,fill=true);
file0x0 << t << " " << T(r/3,1+2*r) << " " << T(r/3,2*r) << " " <<
dTdt(r/3,1+2*r) << " " << dTdt(r/3,2*r)<< endl;
cout << "termoparS = " << T(r/3,1+2*r) << " termoparF = " <<
T(r/3,2*r) << endl;
file0x1 << t << " " << T(0,(3*r)+(2/3)*r) << " " << T(r,(3*r)+(2/3)*r)
<<
" " << T(2*r,(3*r)+(2/3)*r) << " " << T(3*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
" " << T(4*r,(3*r)+(2/3)*r) << " " << T(5*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
" " << T(6*r,(3*r)+(2/3)*r) << " " << T(7*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
" " << T(8*r,(3*r)+(2/3)*r) << " " << T(9*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
" " << T(10*r,(3*r)+(2/3)*r) << " " << T(11*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
" " << T(12*r,(3*r)+(2/3)*r) << " " << T(0,(3*r)+(4/3)*r) <<
" " << T(r,(3*r)+(4/3)*r) << " " << T(2*r,(3*r)+(4/3)*r) <<
" " << T(3*r,(3*r)+(4/3)*r) << " " << T(4*r,(3*r)+(4/3)*r) <<
" " << T(5*r,(3*r)+(4/3)*r) << " " << T(6*r,(3*r)+(4/3)*r) <<
" " << T(7*r,(3*r)+(4/3)*r) << " " << T(8*r,(3*r)+(4/3)*r) <<
" " << T(9*r,(3*r)+(4/3)*r) << " " << T(10*r,(3*r)+(4/3)*r) <<
" " << T(11*r,(3*r)+(4/3)*r) << " " << T(12*r,(3*r)+(4/3)*r) << endl;
cout << "P10 = " << T(0,(3*r)+(2/3)*r) << "P11 = " << T(r,(3*r)+(2/3)*r)
<<

```

```

" P12 = " << T(2*r, (3*r)+(2/3)*r) << " P13 = " <<
T(3*r, (3*r)+(2/3)*r) <<
" P14 = " << T(4*r, (3*r)+(2/3)*r) << " P15 = " <<
T(5*r, (3*r)+(2/3)*r) <<
" P16 = " << T(6*r, (3*r)+(2/3)*r) << " P17 = " <<
T(7*r, (3*r)+(2/3)*r) <<
" P18 = " << T(8*r, (3*r)+(2/3)*r) << " P19 = " <<
T(9*r, (3*r)+(2/3)*r) <<
" P110 = " << T(10*r, (3*r)+(2/3)*r) << " P111 = " <<
T(11*r, (3*r)+(2/3)*r) <<
" P112 = " << T(12*r, (3*r)+(2/3)*r) << " P20 = " <<
T(0, (3*r)+(4/3)*r) <<
" P21 = " << T(r, (3*r)+(4/3)*r) << " P22 = " << T(2*r, (3*r)+(4/3)*r)
<<
" P23 = " << T(3*r, (3*r)+(4/3)*r) << " P24 = " << T(4*r, (3*r)+(4/3)*r)
<<
" P25 = " << T(5*r, (3*r)+(4/3)*r) << " P26 = " << T(6*r, (3*r)+(4/3)*r)
<<
" P27 = " << T(7*r, (3*r)+(4/3)*r) << " P28 = " << T(8*r, (3*r)+(4/3)*r)
<<
" P29 = " << T(9*r, (3*r)+(4/3)*r) << " P210 = " <<
T(10*r, (3*r)+(4/3)*r) << endl;
dTdt=(T-Told)/dt;
Told=T;
}

```

//~ Ahora se apaga la fuente y se enciende el sustrato hasta llegar a los 60 segundos

```

Ts=1.;
Tf=0.;
for(real t=10;t<60;t+=dt){
    //////////////////////////////////////// fijamos la fuente
    if( T(r/3,2*r) > 400.){
        Tf=0;
    }
    else if( T(r/3,2*r) < 400.){
        Tf=1.;
    }
    bloq;
    plot(T,value=true,fill=true);
    file0x0 << t << " " << T(r/3,1+2*r) << " " << T(r/3,2*r) << " " <<
dTdt(r/3,1+2*r) << " " << dTdt(r/3,2*r)<< endl;
    cout << "termoparS = " << T(r/3,1+2*r) << " termoparF = " <<
T(r/3,2*r) << endl;
}

```

```

file0x1 << t << " " << T(0,(3*r)+(2/3)*r) << " " << T(r,(3*r)+(2/3)*r)
<<
" " << T(2*r,(3*r)+(2/3)*r) << " " << T(3*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
" " << T(4*r,(3*r)+(2/3)*r) << " " << T(5*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
" " << T(6*r,(3*r)+(2/3)*r) << " " << T(7*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
" " << T(8*r,(3*r)+(2/3)*r) << " " << T(9*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
" " << T(10*r,(3*r)+(2/3)*r) << " " << T(11*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
" " << T(12*r,(3*r)+(2/3)*r) << " " << T(0,(3*r)+(4/3)*r) <<
" " << T(r,(3*r)+(4/3)*r) << " " << T(2*r,(3*r)+(4/3)*r) <<
" " << T(3*r,(3*r)+(4/3)*r) << " " << T(4*r,(3*r)+(4/3)*r) <<
" " << T(5*r,(3*r)+(4/3)*r) << " " << T(6*r,(3*r)+(4/3)*r) <<
" " << T(7*r,(3*r)+(4/3)*r) << " " << T(8*r,(3*r)+(4/3)*r) <<
" " << T(9*r,(3*r)+(4/3)*r) << " " << T(10*r,(3*r)+(4/3)*r) <<
" " << T(11*r,(3*r)+(4/3)*r) << " " << T(12*r,(3*r)+(4/3)*r) << endl;
cout << "P10 = " << T(0,(3*r)+(2/3)*r) << "P11 = " << T(r,(3*r)+(2/3)*r)
<<
" P12 = " << T(2*r,(3*r)+(2/3)*r) << " P13 = " <<
T(3*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
" P14 = " << T(4*r,(3*r)+(2/3)*r) << " P15 = " <<
T(5*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
" P16 = " << T(6*r,(3*r)+(2/3)*r) << " P17 = " <<
T(7*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
" P18 = " << T(8*r,(3*r)+(2/3)*r) << " P19 = " <<
T(9*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
" P110 = " << T(10*r,(3*r)+(2/3)*r) << " P111 = " <<
T(11*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
" P112 = " << T(12*r,(3*r)+(2/3)*r) << " P20 = " <<
T(0,(3*r)+(4/3)*r) <<
" P21 = " << T(r,(3*r)+(4/3)*r) << " P22 = " << T(2*r,(3*r)+(4/3)*r)
<<
" P23 = " << T(3*r,(3*r)+(4/3)*r) << " P24 = " << T(4*r,(3*r)+(4/3)*r)
<<
" P25 = " << T(5*r,(3*r)+(4/3)*r) << " P26 = " << T(6*r,(3*r)+(4/3)*r)
<<
" P27 = " << T(7*r,(3*r)+(4/3)*r) << " P28 = " << T(8*r,(3*r)+(4/3)*r)
<<
" P29 = " << T(9*r,(3*r)+(4/3)*r) << " P210 = " <<
T(10*r,(3*r)+(4/3)*r) <<
" P211 = " << T(11*r,(3*r)+(4/3)*r) << " P212 = " <<
T(12*r,(3*r)+(4/3)*r) <<endl;
dTdt=(T-Told)/dt;
Told=T;
}

Ts=0.;
Tf=1.;

```

```

for(real t=60;t<150;t+=dt){
    // Primero fija la temperatura del sustrato
    if( T(r/3,1+2*r) > 480.){ //Sustrato
Ts=0;
    }
    else if( T(r/3,1+2*r) < 480.){
Ts=1.;
    }

    }

    bloq;
    plot(T,value=true,fill=true);
    file0x0 << t << " " << T(r/3,1+2*r) << " " << T(r/3,2*r) << " " <<
dTdt(r/3,1+2*r) << " " << dTdt(r/3,2*r)<< endl;
    cout << "termoparS = " << T(r/3,1+2*r) << " termoparF = " <<
T(r/3,2*r) << endl;
    file0x1 << t << " " << T(0,(3*r)+(2/3)*r) << " " << T(r,(3*r)+(2/3)*r)
<<
    " " << T(2*r,(3*r)+(2/3)*r) << " " << T(3*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
    " " << T(4*r,(3*r)+(2/3)*r) << " " << T(5*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
    " " << T(6*r,(3*r)+(2/3)*r) << " " << T(7*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
    " " << T(8*r,(3*r)+(2/3)*r) << " " << T(9*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
    " " << T(10*r,(3*r)+(2/3)*r) << " " << T(11*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
    " " << T(12*r,(3*r)+(2/3)*r) << " " << T(0,(3*r)+(4/3)*r) <<
    " " << T(r,(3*r)+(4/3)*r) << " " << T(2*r,(3*r)+(4/3)*r) <<
    " " << T(3*r,(3*r)+(4/3)*r) << " " << T(4*r,(3*r)+(4/3)*r) <<
    " " << T(5*r,(3*r)+(4/3)*r) << " " << T(6*r,(3*r)+(4/3)*r) <<
    " " << T(7*r,(3*r)+(4/3)*r) << " " << T(8*r,(3*r)+(4/3)*r) <<
    " " << T(9*r,(3*r)+(4/3)*r) << " " << T(10*r,(3*r)+(4/3)*r) <<
    " " << T(11*r,(3*r)+(4/3)*r) << " " << T(12*r,(3*r)+(4/3)*r) << endl;
    cout << "P10 = " << T(0,(3*r)+(2/3)*r) << "P11 = " << T(r,(3*r)+(2/3)*r)
<<
    " P12 = " << T(2*r,(3*r)+(2/3)*r) << " P13 = " <<
T(3*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
    " P14 = " << T(4*r,(3*r)+(2/3)*r) << " P15 = " <<
T(5*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
    " P16 = " << T(6*r,(3*r)+(2/3)*r) << " P17 = " <<
T(7*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
    " P18 = " << T(8*r,(3*r)+(2/3)*r) << " P19 = " <<
T(9*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
    " P110 = " << T(10*r,(3*r)+(2/3)*r) << " P111 = " <<
T(11*r,(3*r)+(2/3)*r) <<
    " P112 = " << T(12*r,(3*r)+(2/3)*r) << " P20 = " <<
T(0,(3*r)+(4/3)*r) <<
    " P21 = " << T(r,(3*r)+(4/3)*r) << " P22 = " << T(2*r,(3*r)+(4/3)*r)
<<

```

```

" P23 = " << T(3*r, (3*r)+(4/3)*r) << " P24 = " << T(4*r, (3*r)+(4/3)*r)
<<
" P25 = " << T(5*r, (3*r)+(4/3)*r) << " P26 = " << T(6*r, (3*r)+(4/3)*r)
<<
" P27 = " << T(7*r, (3*r)+(4/3)*r) << " P28 = " << T(8*r, (3*r)+(4/3)*r)
<<
" P29 = " << T(9*r, (3*r)+(4/3)*r) << " P210 = " <<
T(10*r, (3*r)+(4/3)*r) <<
" P211 = " << T(11*r, (3*r)+(4/3)*r) << " P212 = " <<
T(12*r, (3*r)+(4/3)*r) << endl;
dTdt=(T-Told)/dt;
Told=T;
}

Ts=1;
Tf=1;
for(real t=150;t<330;t+=dt){

// Primero fijamos la temperatura del sustrato
if( T(r/3,1+2*r) > 500.){ //sustrato
Ts=0;
}
else if( T(r/3,1+2*r) < 500.){
Ts=1.;
}

////////// ahora fijamos la fuente
if( T(r/3,2*r) > (500.+dT)){
Tf=0.;
} else {Tf=1.;}
bloq;

plot(T,value=true,fill=true);
file0x0 << t << " " << T(r/3,1+2*r) << " " << T(r/3,2*r) << " " <<
dTdt(r/3,1+2*r) << " " << dTdt(r/3,2*r)<< endl;
cout << "termoparS = " << T(r/3,1+2*r) << " termoparF = " <<
T(r/3,2*r) << endl;
file0x1 << t << " " << T(0, (3*r)+(2/3)*r) << " " << T(r, (3*r)+(2/3)*r)
<<
" " << T(2*r, (3*r)+(2/3)*r) << " " << T(3*r, (3*r)+(2/3)*r) <<
" " << T(4*r, (3*r)+(2/3)*r) << " " << T(5*r, (3*r)+(2/3)*r) <<
" " << T(6*r, (3*r)+(2/3)*r) << " " << T(7*r, (3*r)+(2/3)*r) <<
" " << T(8*r, (3*r)+(2/3)*r) << " " << T(9*r, (3*r)+(2/3)*r) <<
" " << T(10*r, (3*r)+(2/3)*r) << " " << T(11*r, (3*r)+(2/3)*r) <<
" " << T(12*r, (3*r)+(2/3)*r) << " " << T(0, (3*r)+(4/3)*r) <<
" " << T(r, (3*r)+(4/3)*r) << " " << T(2*r, (3*r)+(4/3)*r) <<

```

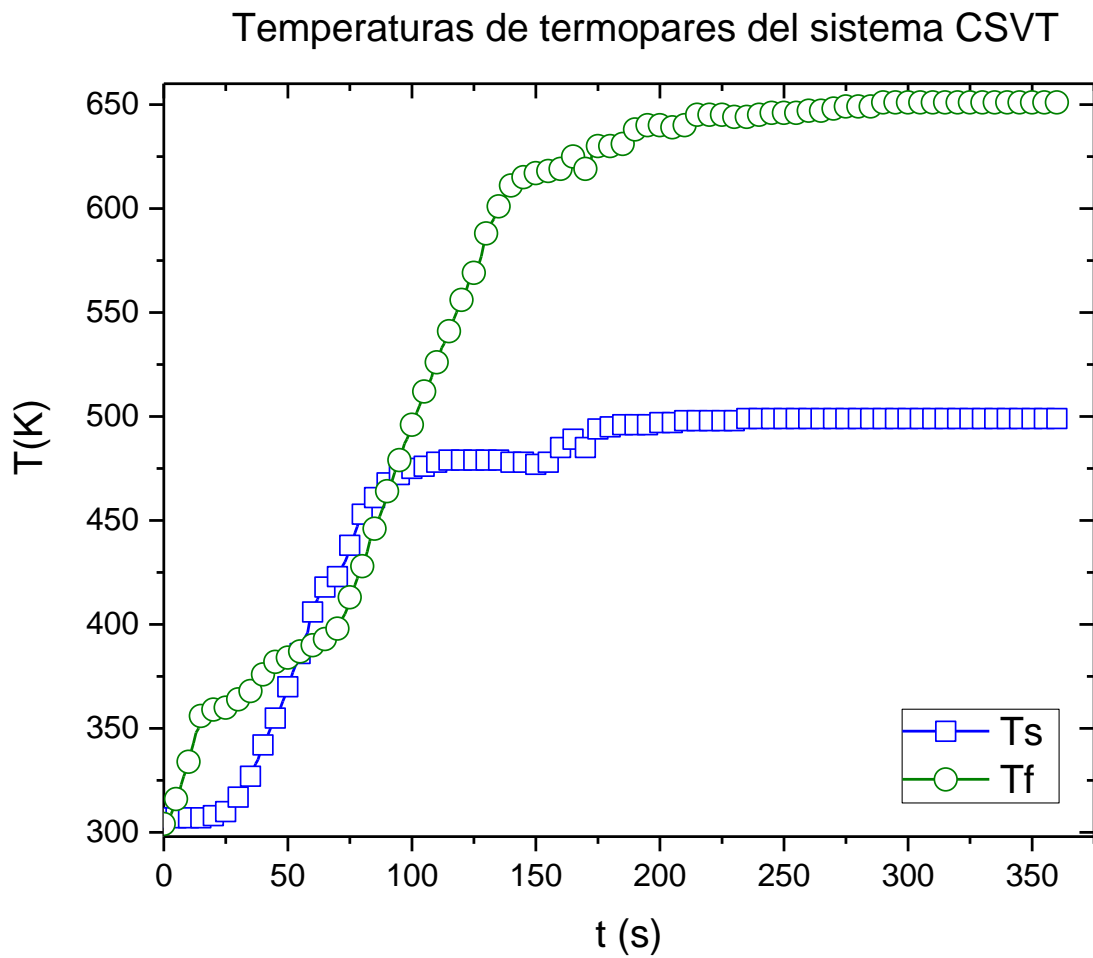
```

" " << T(3*r, (3*r)+(4/3)*r) << " " << T(4*r, (3*r)+(4/3)*r) <<
" " << T(5*r, (3*r)+(4/3)*r) << " " << T(6*r, (3*r)+(4/3)*r) <<
" " << T(7*r, (3*r)+(4/3)*r) << " " << T(8*r, (3*r)+(4/3)*r) <<
" " << T(9*r, (3*r)+(4/3)*r) << " " << T(10*r, (3*r)+(4/3)*r) <<
" " << T(11*r, (3*r)+(4/3)*r) << " " << T(12*r, (3*r)+(4/3)*r) << endl;
cout << "P10 = " << T(0, (3*r)+(2/3)*r) << "P11 = " << T(r, (3*r)+(2/3)*r)
<<
" P12 = " << T(2*r, (3*r)+(2/3)*r) << " P13 = " <<
T(3*r, (3*r)+(2/3)*r) <<
" P14 = " << T(4*r, (3*r)+(2/3)*r) << " P15 = " <<
T(5*r, (3*r)+(2/3)*r) <<
" P16 = " << T(6*r, (3*r)+(2/3)*r) << " P17 = " <<
T(7*r, (3*r)+(2/3)*r) <<
" P18 = " << T(8*r, (3*r)+(2/3)*r) << " P19 = " <<
T(9*r, (3*r)+(2/3)*r) <<
" P110 = " << T(10*r, (3*r)+(2/3)*r) << " P111 = " <<
T(11*r, (3*r)+(2/3)*r) <<
" P112 = " << T(12*r, (3*r)+(2/3)*r) << " P20 = " <<
T(0, (3*r)+(4/3)*r) <<
" P21 = " << T(r, (3*r)+(4/3)*r) << " P22 = " << T(2*r, (3*r)+(4/3)*r)
<<
" P23 = " << T(3*r, (3*r)+(4/3)*r) << " P24 = " << T(4*r, (3*r)+(4/3)*r)
<<
" P25 = " << T(5*r, (3*r)+(4/3)*r) << " P26 = " << T(6*r, (3*r)+(4/3)*r)
<<
" P27 = " << T(7*r, (3*r)+(4/3)*r) << " P28 = " << T(8*r, (3*r)+(4/3)*r)
<<
" P29 = " << T(9*r, (3*r)+(4/3)*r) << " P210 = " <<
T(10*r, (3*r)+(4/3)*r) <<
" P211 = " << T(11*r, (3*r)+(4/3)*r) << " P212 = " <<
T(12*r, (3*r)+(4/3)*r) << endl;
dTdt=(T-Told)/dt;
Told=T;
if(!(t % 200)){
archivo=s1+t+s2;
ofstream file(archivo);
file << " title = \" Dos Bloques\" " << endl;
file << " variables = \"X\", \"Y\" , \"Temperatura\" " << endl;
file << " zone n= " << nbvertices << ", e=" << nbelement << ",
f=fepoint, et=triangle" << endl;
file << " \n " << endl;
for (int i=0;i<nbvertices;i++)
file.fixed << Thx[][i] << " " << Thy[][i] << " " << T[][i] << endl;
file << " \n " << endl;
for (int k=0;k<nbelement;++k)

```

```
file << int(Th[k][0])+1 << " " << int(Th[k][1])+1 << " " <<
int(Th[k][2])+1 << endl;
}
}
```

Anexo 3. Curvas de las temperaturas censadas por los termopares en el experimento real.



**Anexo 4. Curvas de la derivada de las temperaturas respecto al tiempo del depósito real.**

