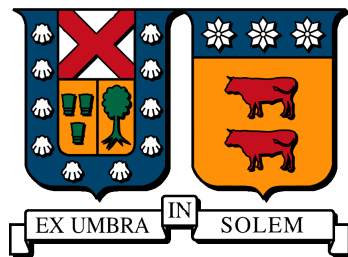


**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA  
MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
VALPARAÍSO-CHILE**



**CALIBRACIÓN TÉRMICA DE FENÓMENOS  
DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN  
LECHO EMPACADO PARA SU  
SIMULACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE  
ELEMENTOS DISCRETOS**

**BENJAMÍN NICOLÁS SOTO LOHAUS**

**TESIS DE GRADO PARA OPTAR AL GRADO DE: MAGISTER EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA Y AL TÍTULO DE:  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**PROFESOR GUÍA: Dr. DANILO ESTAY BARRIENTOS  
PROFESOR CORREFERENTE: Dr. OLIVIER SKURTYS  
PROFESOR EXTERNO: Dr. RODRIGO BARRAZA VICENCIO**

**Mayo 2026**



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

**Tipo de monografía (marcar una opción):** ☐ Memoria o trabajo de título ☒ Tesis de Postgrado

**Título del trabajo:** Calibración térmica de fenómenos de transferencia de calor en lecho empacado para su simulación mediante el método de elementos discretos

**Nombre del candidato(a):** Benjamín Nicolás Soto Lohaus

**Carrera / Grado:** Ingeniería Civil Mecánica / Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mecánica

**Campus:** Santiago San Joaquín

**Departamento:** Departamento de Ing. Mecánica

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, **Danilo Estay Barrientos**, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

**Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):**

---

---

---

### 4.- FIRMAS

**Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:**

**Fecha:** 02/07/2026

**Firma:**

**Estudiante o Candidato(a):**

**Fecha:** 02/07/2026

**Firma:**

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*



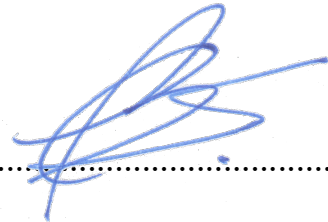
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

TITULO DE LA TESIS: CALIBRACIÓN TÉRMICA DE FENÓMENOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN LECHO EMPACADO PARA SU SIMULACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS

AUTOR: BENJAMÍN NICOLÁS SOTO LOHAUS

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el Grado de Magíster en Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Dr. Danilo Estay Barrientos



.....

Dr. Olivier Skurtys

.....

Dr. Rodrigo Barraza Vicencio



.....

Valparaíso, Chile. Mayo de 2026

## Agradecimientos

*Este largo camino no habría sido posible sin algunas personas en mi vida, que merecen mis infinitas gracias.*

*Primero a mi núcleo familiar que siempre ha estado incondicionalmente para mí: Vicky, madre querida, gracias por siempre tener ese cariño y ternura para endulzar los días amargos, Papá, por darme siempre esa mirada más racional y ayudarme a ordenar el caos, Pipe, por compartirme tu vocación y acompañarme bien de cerca cada paso que di agregando siempre una risa a cada momento y Conyta, a ti te debo un gracias especial, por estar ahí en los peores momentos, en mis puntos más bajo, fuiste y compartimos cariño, energía, risas, llantos, fuiste un brazo de fuerza cuando las energías no daban, un abrazo luminoso cuando solo veía negro, fuiste muchas veces lo que necesite para salir adelante, por esto y mucho más estaré infinitamente agradecido.*

*A mis amigos de toda la vida, la rojita de todos, Jota, Alfaro, Anibal, Chino, Mono, Alvarito y Copano, a lo largo de mi vida, no solo en la carrera, han sido ese grupo incondicional que sin importar la circunstancia, sé que siempre están. Me han dado una fortaleza enorme, me han hecho reír, me han sabido contener, me han sabido aconsejar y solo les puedo decir muchísimas gracias, espero ser lo mismo para ustedes y solo pido que nunca me falten.*

*También agradecer a mi amiga de siempre, Vale, que dirían esos 2 niños chicos que iban juntos a física en el preu si nos vieran ahora. Eres una amistad que cuando conocí jamás me vi venir la cantidad de recuerdos que compartiríamos y el enorme cariño que te tendría, a pesar de una que otra discusión, también te quiero dar las gracias por siempre estar ahí.*

*A mis profesores por supuesto, profe Rodrigo y profe Danilo, gracias por guiarme y exigirme en los buenos momentos y entenderme y darme espacio en mis momentos de tormenta, fueron unos excelentes mentores, agradezco cada enseñanza que me dieron y espero poder demostrar todo lo que aprendí de ustedes. También agradecer al profe Jose y la profe Cata, por permitirme trabajar en su espacio en la U para poder desarrollar mi tesis y recibirme siempre con un cálido buenos días.*

*Agradecer también espacialmente a mi tía Pabla, mi tío Ariel y mi primo Alex, quienes me dieron una mano gigante y me admitieron en su hogar para poder seguir adelante, es algo que estaré infinitamente agradecido y ese tiempo con ustedes lo guardo con mucho cariño. También al Mati y la Alexa, por aportar esas ganas y motivación, por darme una vista de lo lindo cuando solo veía lo feo y por tanto cariño que me dieron, tampoco me quedan palabras para agradecerles. Al Robertito por cada charla ñoña donde podíamos hablar horas y horas si no nos paraban, gracias también por ayudarme a mantener vivo ese interés por cosas nuevas.*

*Al team mec, Chiquitethan, Felipoto, Nico y Pastito, cuantas aventura que nos mandamos pero finalmente se logro, cuantos trabajos, informes, peleas y más, pero también cuantas historias, risas y buenos momentos, también les tengo mucho que agradecer. A cada persona que me dedico un momentito de su tiempo, un abrazo, una sonrisa, un consejo o lo que sea a lo largo de todos estos años y para toda persona que conocí en la U y compartimos en el cerrito, quienes estuvieron, quienes se mantuvieron y quienes se fueron, tod@s dejaron alguna cosita con la me quedo y guardo con mucho cariño, espero haberles dejado también algo a ustedes de mí.*

## Resumen

El almacenamiento de energía térmica en lechos empacados es crucial para la transición energética, requiriendo modelos precisos para optimizar su diseño. El Método de Elementos Discretos (DEM) permite simular la transferencia de calor a nivel de partícula, pero presenta el desafío de no contar con una calibración precisa para la resistencia térmica de contacto debido a factores limitantes como la rugosidad superficial. Este trabajo desarrolla una metodología de calibración térmica sistemática para la conducción partícula-partícula en lechos empacados. La metodología combina el uso de un modelo térmico numérico en una y tres dimensiones con rigurosa validación experimental. Para ello, se diseñó un montaje experimental con esferas de acero inoxidable instrumentadas con termocuplas, midiendo los perfiles axiales de temperatura en configuraciones ordenada (*Simple Cubic*) y aleatoria al aplicar calentamiento desde la base. Las simulaciones mediante DEM se ejecutaron en el software YADE, estableciendo primero el balance energético de los elementos de fluido discretizados para luego introducir las ecuaciones de los distintos mecanismos de transferencia de calor presentes: conducción directa e indirecta, radiación y convección. El proceso de calibración se basó en el ajuste iterativo del módulo de Young en la configuración ordenada para controlar el traslape mecánico, parámetro que actúa como una rigidez térmica equivalente. El valor calibrado obtenido, correspondiente a  $E = 1 \cdot 10^8$  Pa, se transfirió de manera exitosa a la configuración aleatoria, logrando un excelente acople predictivo con los perfiles térmicos experimentales. Los resultados demuestran que esta metodología ancla de forma robusta la conectividad térmica a la realidad física, demostrando que un parámetro calibrado en un medio ordenado mantiene su fidelidad predictiva en empaquetamientos estadísticamente caóticos.

**Palabras clave:** Almacenamiento de energía térmica; Lecho empacado; Método de elementos discretos (DEM); Transferencia de calor; Resistencia térmica de contacto; Calibración térmica.

# Abstract

Thermal energy storage in packed beds is crucial for the global energy transition, requiring accurate models to optimize their design and operation. The Discrete Element Method (DEM) provides a powerful tool for simulating heat transfer at the particle scale, yet it faces challenges regarding the precise calibration of thermal contact resistance caused by surface roughness. This work develops a systematic thermal calibration methodology for particle-particle conduction in packed beds. The methodology couples a one- and three-dimensional numerical thermal model with experimental validation. An experimental setup utilizing stainless steel spheres instrumented with thermocouples was designed to measure axial temperature profiles under both ordered (*Simple Cubic*) and random configurations during basal heating. DEM simulations were performed using the YADE software package, structuring the formulation by first defining the energy balance of the discrete fluid elements before introducing the governing equations for the heat transfer mechanisms, including direct and indirect conduction, convection, and radiation. The calibration procedure relied on the iterative adjustment of the Young's modulus within the ordered configuration to control mechanical overlap, effectively acting as an equivalent thermal stiffness. The successfully calibrated value of  $E = 1 \cdot 10^8$  Pa was subsequently transferred to the random configuration, yielding a high degree of agreement with the experimental thermal profiles. The findings demonstrate that this methodology robustly anchors thermal connectivity to physical reality, proving that a parameter calibrated in an ordered arrangement maintains its predictive fidelity when applied to statistically chaotic packings.

**Keywords:** Thermal energy storage; Packed bed; Discrete Element Method (DEM); Heat transfer; Thermal contact resistance; Thermal calibration.

# Índice general

|          |                                                                                                                  |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUCCIÓN</b>                                                                                              | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>ESTADO DEL ARTE</b>                                                                                           | <b>5</b>  |
| 2.1      | Revisión Bibliográfica . . . . .                                                                                 | 5         |
| 2.1.1    | Modelos de transferencia de calor en lecho empacado . . . . .                                                    | 5         |
| 2.1.2    | Experimentos de lechos empacados . . . . .                                                                       | 9         |
| 2.2      | Brechas en el conocimiento e hipótesis . . . . .                                                                 | 12        |
| <b>3</b> | <b>OBJETIVOS</b>                                                                                                 | <b>14</b> |
| 3.1      | Objetivo general . . . . .                                                                                       | 14        |
| 3.2      | Objetivos específicos . . . . .                                                                                  | 14        |
| <b>4</b> | <b>Metodología</b>                                                                                               | <b>16</b> |
| 4.1      | Modelo térmico unidimensional . . . . .                                                                          | 16        |
| 4.2      | Diseño experimental . . . . .                                                                                    | 24        |
| 4.3      | Modelo térmico tridimensional . . . . .                                                                          | 25        |
| 4.4      | Metodología de calibración y validación de la resistencia térmica partícula–<br>partícula mediante DEM . . . . . | 31        |
| <b>5</b> | <b>Modelo Térmico Unidimensional</b>                                                                             | <b>34</b> |
| <b>6</b> | <b>Diseño Experimental</b>                                                                                       | <b>39</b> |
| 6.1      | Instrumentación del setup experimental . . . . .                                                                 | 39        |
| 6.2      | Calibración de termocuplas . . . . .                                                                             | 43        |
| 6.3      | Montaje del setup experimental . . . . .                                                                         | 43        |

---

|          |                                                                        |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>7</b> | <b>Modelo Térmico Tridimensional</b>                                   | <b>48</b> |
| 7.1      | Generación de la geometría del lecho . . . . .                         | 49        |
| 7.2      | Modelo térmico acoplado a DEM . . . . .                                | 50        |
| 7.3      | Condiciones iniciales, condiciones de borde y métricas de comparación  | 51        |
| <b>8</b> | <b>Metodología de calibración y validación de la R. p-p</b>            | <b>54</b> |
| 8.1      | Validación térmica del parámetro calibrado . . . . .                   | 56        |
| 8.2      | Análisis de sensibilidad del modelo . . . . .                          | 59        |
| 8.3      | Análisis de consistencia mecánica y metodología de calibración . . . . | 67        |
| 8.3.1    | Estudio de consistencia entre configuraciones (NRMSE) . . . .          | 68        |
| 8.3.2    | Procedimiento propuesto para la calibración del modelo . . . .         | 68        |
| <b>9</b> | <b>Conclusiones</b>                                                    | <b>70</b> |
|          | <b>BIBLIOGRAFÍA</b>                                                    | <b>73</b> |

# Índice de figuras

|      |                                                                                                                                    |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1  | <i>Proceso de carga y descarga del lecho empacado.</i>                                                                             | 3  |
| 1.2  | <i>Fenómenos de transferencia de calor en una partícula.</i>                                                                       | 3  |
| 2.1  | <i>Balance energético de un elemento de fluido discretizado.</i>                                                                   | 7  |
| 2.2  | <i>a) Esquema del modelo de columnas paralelas; b) Red de resistencias de contacto del modelo de columnas paralelas.</i>           | 8  |
| 2.3  | <i>Experimento de almacenamiento térmico a alta temperatura por Meier et al [1].</i>                                               | 9  |
| 2.4  | <i>Esquema del setup experimental realizado por Siu &amp; Lee [2].</i>                                                             | 9  |
| 2.5  | <i>Esquema del setup experimental realizado por Mishra et al. [3].</i>                                                             | 10 |
| 2.6  | <i>Esquema del balance térmico del bloque de aluminio y la cama de partículas.</i>                                                 | 10 |
| 2.7  | <i>a) Coeficiente <math>h</math> para tres tamaños de partícula de vidrio; b) Comparación entre partícula rugosa y suave.</i>      | 11 |
| 2.8  | <i>Comparación entre experimentos y simulaciones CFD-DEM para partículas de vidrio y acero.</i>                                    | 11 |
| 2.9  | <i>Tasa de calor bajo condición isotérmica y no-isotérmica para: a) Vidrio; b) Acero.</i>                                          | 11 |
| 2.10 | <i>Diagrama esquemático del sistema de lecho empacado tipo spray [4].</i>                                                          | 12 |
| 4.1  | <i>Fenómeno de conducción a través del contacto entre partículas.</i>                                                              | 18 |
| 4.2  | <i>Conducción indirecta para el caso de contacto entre partículas (derecha) y contacto entre películas de fluidos (izquierda).</i> | 19 |

|     |                                                                                                                                                                |    |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.3 | <i>Balance energético para un elemento de fluido en el modelo 1D, mostrando los flujo energéticos. . . . .</i>                                                 | 21 |
| 4.4 | <i>Balance energético para un elemento de fluido en el modelo 3D, mostrando los flujo energéticos. . . . .</i>                                                 | 26 |
| 4.5 | <i>Definición del concepto de capa dentro del lecho empacado. . . . .</i>                                                                                      | 27 |
| 5.1 | <i>Distribución de traslapes mecánicos a lo largo del lecho axial. . . . .</i>                                                                                 | 36 |
| 5.2 | <i>Resistencias térmicas partícula–partícula calculadas para el modelo 1D. . . . .</i>                                                                         | 37 |
| 5.3 | <i>Resultados del modelo 1D (Acero): a) Evolución del perfil axial de temperatura; b) Contribución relativa de los mecanismos de transferencia. . . . .</i>    | 37 |
| 5.4 | <i>Resultados del modelo 1D (Aluminio): a) Evolución del perfil axial de temperatura; b) Contribución relativa de los mecanismos de transferencia. . . . .</i> | 38 |
| 6.1 | <i>Estructura del lecho empacado y equipo calentador del experimento. . . . .</i>                                                                              | 41 |
| 6.2 | <i>Detalle del montaje del sensor térmico en el núcleo de la esfera de acero. . . . .</i>                                                                      | 42 |
| 6.3 | <i>Analizador de redes utilizado para el monitoreo de potencia eléctrica. . . . .</i>                                                                          | 42 |
| 6.4 | <i>Primera capa de esferas correspondiente a la configuración ordenada con prisma guía. . . . .</i>                                                            | 45 |
| 6.5 | <i>Vista superior del montaje de la configuración ordenada, mostrando el prisma guía y las varillas de alineación. . . . .</i>                                 | 45 |
| 6.6 | <i>Montaje de medición eléctrica: instrumentación en el cable de alimentación del calentador. . . . .</i>                                                      | 47 |
| 7.1 | <i>Representación geométrica de la configuración ordenada SC (<math>5 \times 5 \times 21</math>). . . . .</i>                                                  | 49 |
| 7.2 | <i>Evolución del empaquetamiento en la configuración aleatoria mediante DEM. . . . .</i>                                                                       | 50 |

- 8.1 *Resultados del modelo ordenado utilizando  $E = 1 \cdot 10^8$  [Pa]: a) Comparación de perfiles de temperatura axial entre el modelo y los datos experimentales. b) Contribución relativa acumulada de los mecanismos de transferencia de calor durante la simulación. . . . . 56*
- 8.2 *Resultados del modelo ordenado utilizando  $E = 1 \cdot 10^8$  [Pa]: a) Valores de traslape mecánico. b) Valores de la resistencia de contacto. . . . . 57*
- 8.3 *Resultados del modelo aleatorio utilizando  $E = 1 \cdot 10^8$  [Pa]: a) Comparación de perfiles de temperatura axial entre el modelo y los datos experimentales. b) Contribución relativa acumulada de los mecanismos de transferencia de calor durante la simulación. . . . . 58*
- 8.4 *Resultados del modelo aleatorio utilizando  $E = 1 \cdot 10^8$  [Pa]: a) Valores de traslape mecánico. b) Valores de la resistencia de contacto. . . . . 58*
- 8.5 *Resultado análisis de sensibilidad de conducción indirecta utilizando  $E = 1 \cdot 10^8$  [Pa];  $\delta_{lens} = 1.08 \cdot r_{esfera}$ ;  $s = 2 \cdot 10^{-6}$ : a) Comparación de perfiles de temperatura axial entre el modelo y los datos experimentales (configuración ordenada). b) Contribución relativa acumulada de los mecanismos de transferencia de calor durante la simulación (configuración ordenada). c) Comparación de perfiles de temperatura axial entre el modelo y los datos experimentales (configuración aleatoria). d) Contribución relativa acumulada de los mecanismos de transferencia de calor durante la simulación (configuración aleatoria). . . . . 60*
- 8.6 *Resultado análisis de sensibilidad de módulo de Young para configuración ordenada: a) Valores de traslape mecánico con  $E = 1 \cdot 10^7$  [Pa]. b) Valores de traslape mecánico con  $E = 1 \cdot 10^9$  [Pa]. . . . . 62*
- 8.7 *Resultado análisis de sensibilidad de módulo de Young para configuración ordenada: a) Valores de Resistencia p-p con  $E = 1 \cdot 10^7$  [Pa]. b) Valores de Resistencia p-p con  $E = 1 \cdot 10^9$  [Pa]. . . . . 63*

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 8.8  | <i>Resultado análisis de sensibilidad de módulo de Young para configuración ordenada: a) Curvas de temperatura con <math>E = 1 \cdot 10^7 [Pa]</math>. b) Curvas de temperatura con <math>E = 1 \cdot 10^9 [Pa]</math>. . . . .</i>                                                                                                              | 64 |
| 8.9  | <i>Resultado análisis de sensibilidad de módulo de Young para configuración ordenada: a) Contribución relativa acumulada de los mecanismos de transferencia de calor con <math>E = 1 \cdot 10^7 [Pa]</math>. b) Contribución relativa acumulada de los mecanismos de transferencia de calor con <math>E = 1 \cdot 10^9 [Pa]</math>. . . . .</i>  | 64 |
| 8.10 | <i>Resultado análisis de sensibilidad de módulo de Young para configuración aleatoria: a) Valores de traslape mecánico con <math>E = 1 \cdot 10^7 [Pa]</math>. b) Valores de traslape mecánico con <math>E = 1 \cdot 10^9 [Pa]</math>. . . . .</i>                                                                                               | 65 |
| 8.11 | <i>Resultado análisis de sensibilidad de módulo de Young para configuración aleatorio: a) Valores de Resistencia p-p con <math>E = 1 \cdot 10^7 [Pa]</math>. b) Valores de Resistencia p-p con <math>E = 1 \cdot 10^9 [Pa]</math>. . . . .</i>                                                                                                   | 65 |
| 8.12 | <i>Resultado análisis de sensibilidad de módulo de Young para configuración aleatoria: a) Curvas de temperatura con <math>E = 1 \cdot 10^7 [Pa]</math>. b) Curvas de temperatura con <math>E = 1 \cdot 10^9 [Pa]</math>. . . . .</i>                                                                                                             | 66 |
| 8.13 | <i>Resultado análisis de sensibilidad de módulo de Young para configuración aleatoria: a) Contribución relativa acumulada de los mecanismos de transferencia de calor con <math>E = 1 \cdot 10^7 [Pa]</math>. b) Contribución relativa acumulada de los mecanismos de transferencia de calor con <math>E = 1 \cdot 10^9 [Pa]</math>. . . . .</i> | 67 |

## Lista de Tablas

|     |                                                                                                                                 |    |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 | Factores de visión partícula–capa. . . . .                                                                                      | 28 |
| 5.1 | <i>Propiedades de las esferas del lecho en el modelo unidimensional [5, 6].</i>                                                 | 34 |
| 5.2 | <i>Propiedades de las tapas del lecho en el modelo unidimensional [5, 6]. .</i>                                                 | 35 |
| 5.3 | <i>Propiedades termofísicas del aire [7]. . . . .</i>                                                                           | 35 |
| 6.1 | <i>Parámetros dimensionales y propiedades mecánicas del manto cilíndrico.</i>                                                   | 40 |
| 6.2 | <i>Posición axial de las termocuplas instaladas en la configuración aleatoria del lecho empacado. . . . .</i>                   | 44 |
| 6.3 | <i>Posición axial de las termocuplas instaladas en la configuración ordenada del lecho empacado. . . . .</i>                    | 46 |
| 7.1 | <i>Propiedades del acero inoxidable 304 utilizado en el lecho empacado para las simulaciones 3D [8]. . . . .</i>                | 52 |
| 8.1 | <i>Comparación entre temperatura experimental y modelada en la primera esfera instrumentada para distintos tiempos. . . . .</i> | 55 |

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

La transición energética global hacia fuentes renovables ha intensificado la necesidad de soluciones eficientes para el almacenamiento de energía. En países como Chile, el plan de descarbonización, sumado al alto potencial de generación renovable, convierte al desarrollo de tecnologías de almacenamiento en un pilar estratégico para la evolución de los sistemas eléctricos.

La naturaleza intermitente de fuentes como la solar y la eólica plantea desafíos críticos para garantizar un suministro eléctrico continuo y estable. En este contexto, los sistemas de almacenamiento térmico, particularmente los lechos empacados, emergen como alternativas prometedoras debido a su capacidad de almacenar grandes densidades de energía a bajo costo. Esta tecnología es clave para la transición energética, ya que permite absorber el exceso de generación en períodos de alta producción y liberarla cuando la demanda lo requiere. De esta manera, contribuye a balancear la oferta y la demanda eléctrica, evitando fallos en la red y entregando la flexibilidad necesaria para avanzar en la descarbonización, tal como se destaca en “The Energy Storage Global Conference 2024” [9], donde el almacenamiento se reconoce como un elemento central del futuro energético.

Desde una perspectiva económica, el mercado global de almacenamiento añadió 175,4 GWh de capacidad instalada en 2024, con China, América y Europa representando más

del 90 % de las nuevas instalaciones. Se proyectaba que para 2025 la capacidad alcance los 221,9 GWh, reflejando un crecimiento interanual del 26,5 % y una demanda creciente de soluciones que respalden la integración de energías renovables [10].

Además de su aplicación en el sector eléctrico, los lechos empacados constituyen una tecnología robusta para la recuperación de calor residual en industrias de alta temperatura, como la del acero y el hierro. Esta tecnología permite captar y reutilizar el calor excedente de los gases de escape industriales, incluso en condiciones desafiantes con presencia de partículas metálicas. Esto no solo mejora la eficiencia energética y reduce las emisiones, sino que ofrece una solución de bajo costo y mantenimiento para la valorización energética en la industria pesada [11].

Bajo este escenario, resulta fundamental avanzar en el desarrollo de modelos térmicos que permitan predecir y optimizar el comportamiento de estos sistemas. El enfoque de este estudio se centra en los lechos empacados, compuestos por recipientes sellados rellenos de partículas sólidas. Su operación comprende tres etapas fundamentales: carga, *stand-by* y descarga. Durante la carga, un fluido caliente eleva la temperatura de las partículas; en el *stand-by*, el lecho se sella para minimizar pérdidas; finalmente, en la descarga, un fluido frío recupera el calor almacenado (para su uso en procesos industriales por ejemplo). En la figura 1.1 se representa los procesos de carga y descarga donde se ilustra el comportamiento térmico del fluido de trabajo en cada caso.

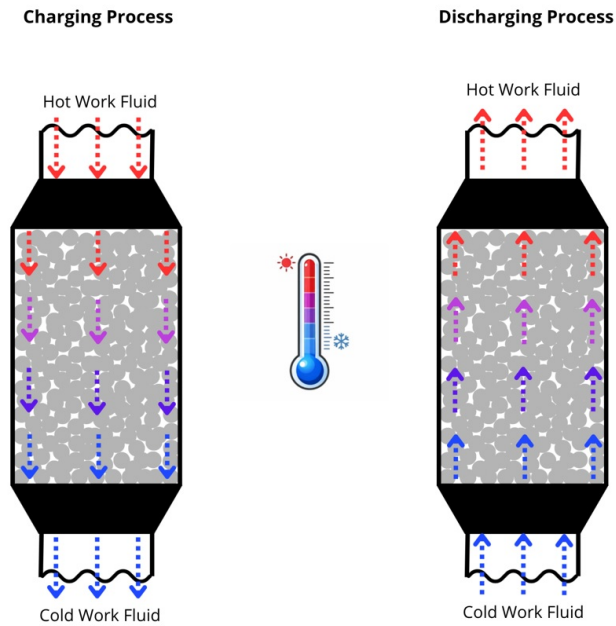


Figura 1.1: *Proceso de carga y descarga del lecho empacado.*

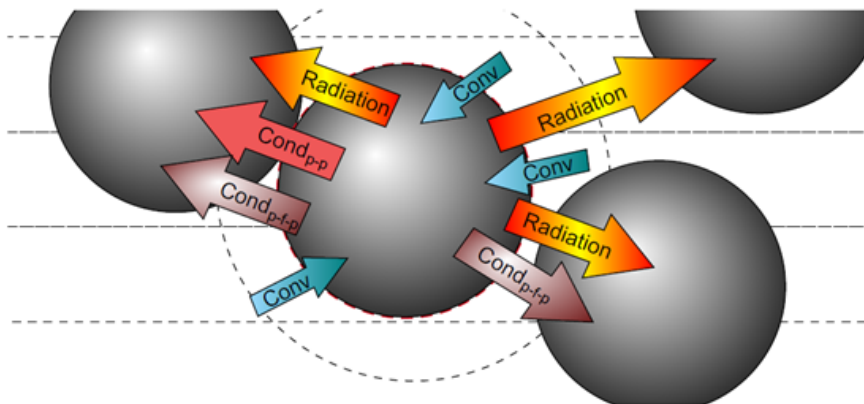


Figura 1.2: *Fenómenos de transferencia de calor en una partícula.*

Para optimizar el diseño de estos sistemas, es esencial modelar con precisión sus mecanismos de transferencia. En este sentido, el Método de Elementos Discretos (DEM) se presenta como una herramienta poderosa para simular fenómenos térmicos a nivel de partícula, ofreciendo una visión detallada que supera las limitaciones de los modelos continuos tradicionales.

Este trabajo aborda la calibración térmica de los mecanismos de transferencia en lechos empacados mediante simulaciones basadas en DEM. El objetivo principal es desarrollar modelos precisos que permitan predecir el desempeño térmico real, contribuyendo al diseño de soluciones de almacenamiento de energía más eficientes y sostenibles.

## Capítulo 2

# ESTADO DEL ARTE

Modelar térmicamente un lecho empacado representa un desafío multiescala considerable, debido a la coexistencia de diversos mecanismos de transferencia de calor que interactúan simultáneamente. Esta complejidad impide la existencia de un enfoque universalmente aceptado, dando lugar a diversas aproximaciones en la literatura que varían en complejidad y fidelidad física, algunas de las cuales se analizan a continuación.

### 2.1. Revisión Bibliográfica

#### 2.1.1. Modelos de transferencia de calor en lecho empacado

Uno de los pilares fundamentales es el modelo propuesto por Schumann [23], un enfoque continuo unidimensional analítico que describe la interacción térmica entre un fluido en movimiento y un medio poroso estacionario. Este modelo simplifica el fenómeno al considerar únicamente la convección entre fases, despreciando la difusión interna y las pérdidas ambientales. Aunque Schumann [23] constituye la base teórica para el diseño preliminar y la validación de códigos numéricos, su naturaleza continua ignora la física discreta de los contactos entre partículas sólidas.

Dado que en procesos de carga y descarga la convección es predominante, el modelo de Schumann ofrece resultados aceptables; no obstante, para un análisis de alta fidelidad, es imperativo recurrir al **Método de Elementos Discretos (DEM)**. El DEM permite realizar balances energéticos individuales por partícula, capturando explícitamente el flujo de calor a través de los contactos sólidos.

En esta línea, es fundamental citar el trabajo de Batchelor & O'Brien [12], quienes desarrollaron el modelo teórico dominante para estimar la conductancia térmica entre esferas en contacto. Su expresión generalizada para la conductividad en medios granulares permite realizar estimaciones sin parámetros empíricos. Sin embargo, aquí se identifica una brecha crítica: a pesar de ser la base de múltiples simulaciones DEM actuales, persiste la necesidad de una validación experimental directa que calibre específicamente la resistencia de contacto bajo condiciones de carga mecánica real.

Varios investigadores han integrado estos conceptos en entornos computacionales. Gaviño et al. [24] propusieron una metodología para acoplar simulaciones DEM con un modelo de transferencia de calor 1D para el fluido (ver Figura 2.1). Esta aproximación destaca por su eficiencia computacional frente a modelos acoplados CFD-DEM completos. No obstante, al igual que otros autores, Gaviño et al. asumen esferas isotérmicas y utilizan el modelo de Batchelor & O'Brien [12] sin ajustes adicionales en los parámetros de contacto.

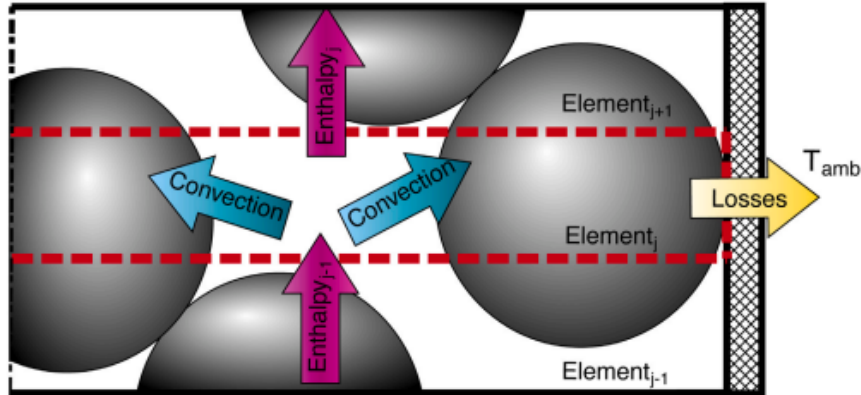


Figura 2.1: Balance energético de un elemento de fluido discretizado.

Otros estudios, como los de Alves & Heinrich [25] y Teixeira et al. [26], han explorado modificaciones al modelo de conducción, pero manteniendo resistencias equivalentes que no consideran una calibración iterativa de los parámetros mecánicos influyentes. En el trabajo realizado por Liang & Li [27] se propone un modelo novedoso de transferencia de calor a través de la red de contactos de un material granular empacado de manera aleatoria. Dentro de lo desarrollado en el modelo, se obtiene una expresión para la conductividad térmica efectiva de materiales granulares mediante un cálculo simple y riguroso. La expresión obtenida se valida de manera cuantitativa comparando la predicción teórica de esta conductividad térmica efectiva con la solución de referencia obtenida a partir de pruebas numéricas en muestras granulares con esferas de diferentes radios. Lo obtenido finalmente es una forma de tratar el flujo de calor a través de contactos entre esferas en una columna, generando una resistencia de contacto para esta red de esferas conectadas verticalmente, considerando un flujo de temperatura unidireccional (ver Figura 2.2).

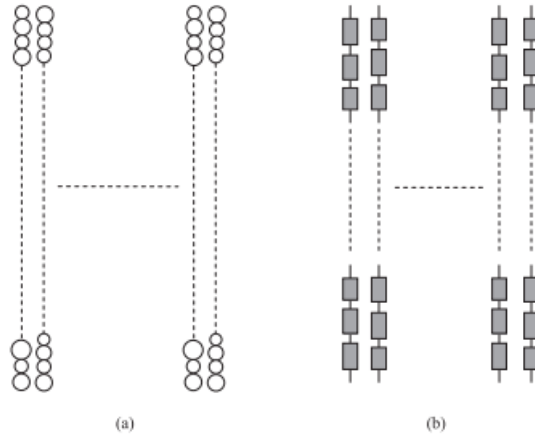


Figura 2.2: a) Esquema del modelo de columnas paralelas; b) Red de resistencias de contacto del modelo de columnas paralelas.

Por otro lado, la literatura reciente ha integrado herramientas de vanguardia para abordar la complejidad computacional. Wu & Hao [31] y Wu et al. [33] desarrollaron modelos basados en Redes Neuronales Profundas (DNN) y funciones de aproximación para predecir la radiación térmica con errores menores al 2 %, superando las limitaciones de métodos costosos como el trazado de rayos de Monte Carlo (MCRT) [22]. Estos avances se complementan con estudios sobre los efectos de la radiación en reactores de lecho delgado [29] y modelos integrales que acoplan conducción y radiación en flujos granulares [32], analizando la sensibilidad del número de Nusselt a la fracción de volumen sólido.

En el ámbito de la convección, se han analizado comportamientos de convección mixta evaluando los efectos de la flotabilidad y la geometría del lecho [34, 36]. Asimismo, Calderon-Vásquez et al. [37] propusieron soluciones analíticas para condiciones operacionales variables en sistemas PBTES, mientras que Jagtap & Mishra [35] exploraron el desempeño termo-hidráulico bajo condiciones de no equilibrio térmico local. Finalmente, la búsqueda de modelos unificados ha derivado en nuevas correlaciones universales para el número de Nusselt [38] y analogías robustas entre la transferencia de calor y la caída de presión [39].

### 2.1.2. Experimentos de lechos empacados

A pesar del avance numérico, la validación experimental sigue siendo la "piedra angular" para asegurar la fidelidad de los modelos. Meier et al. [1] fueron pioneros en demostrar la viabilidad de sistemas de alta temperatura (hasta 700°C) utilizando un setup de acero inoxidable para validar su modelo PACKBEDA (ver Figura 2.3).

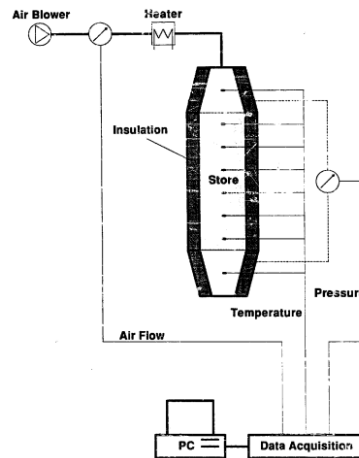


Figura 2.3: Experimento de almacenamiento térmico a alta temperatura por Meier et al [1].

Un estudio de particular relevancia es el de Siu & Lee [2], quienes aislaron la resistencia de contacto entre esferas mediante un sistema de pistones y transductores de fuerza (ver Figura 2.4), advirtiendo que errores en esta consideración pueden desviar el cálculo de la conductividad efectiva hasta en un 800 %.

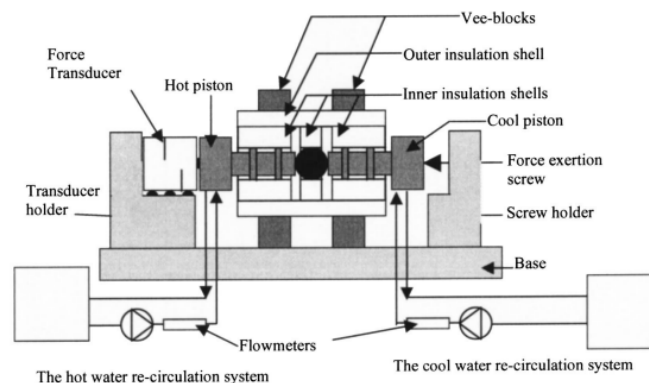


Figura 2.4: Esquema del setup experimental realizado por Siu & Lee [2].

Luego, el estudio de Mishra et al. [3] resulta fundamental para cuantificar los efectos de la rugosidad en la microescala sobre la transferencia partícula-pared. Previo al experimento, se realizó una caracterización rigurosa de las superficies en partículas de vidrio (suavizadas mediante grabado químico) y acero. El setup, ilustrado en la Figura 2.5, utiliza un bloque de aluminio instrumentado para medir la respuesta térmica transiente de las partículas.

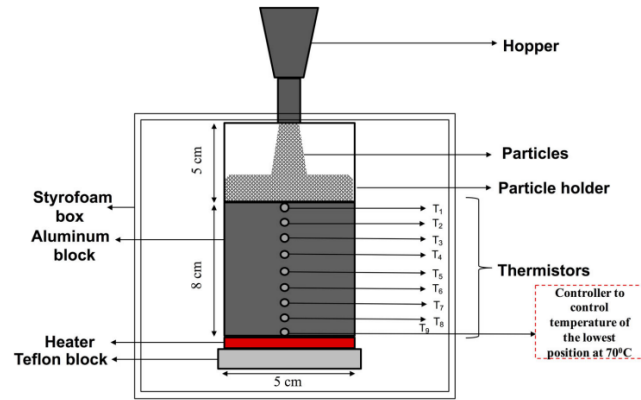


Figura 2.5: Esquema del setup experimental realizado por Mishra et al. [3].

Dada la naturaleza transiente del fenómeno, los autores introducen un balance energético (Figura 2.6) que permite extraer el coeficiente  $h$ . Los resultados (Figura 2.7) confirman que la rugosidad actúa como una resistencia térmica adicional. Además, al comparar con simulaciones CFD-DEM (Figura 2.8), se detectaron discrepancias en materiales con alto número de Biot como el vidrio (Figura 2.9), subrayando que la suposición de partícula isotérmica no siempre es válida.

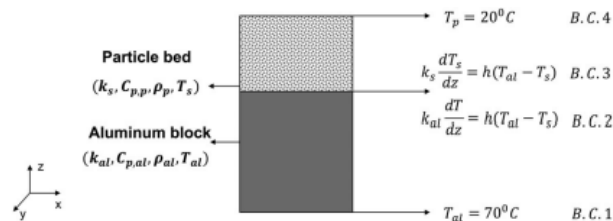


Figura 2.6: Esquema del balance térmico del bloque de aluminio y la cama de partículas.

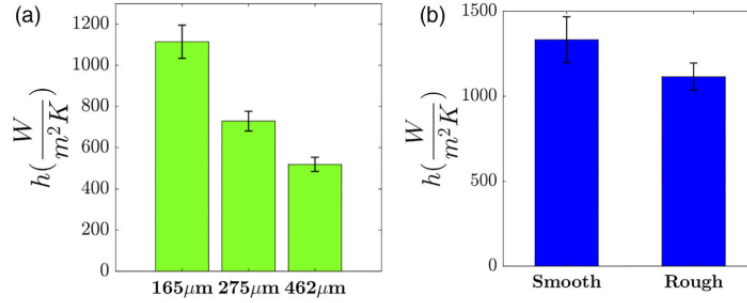


Figura 2.7: a) Coeficiente  $h$  para tres tamaños de partícula de vidrio; b) Comparación entre partícula rugosa y suave.

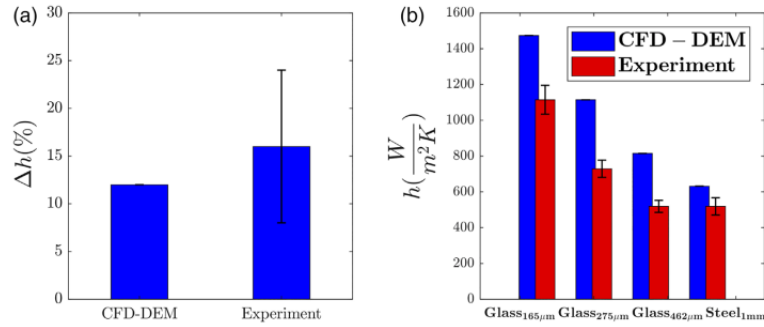


Figura 2.8: Comparación entre experimentos y simulaciones CFD-DEM para partículas de vidrio y acero.

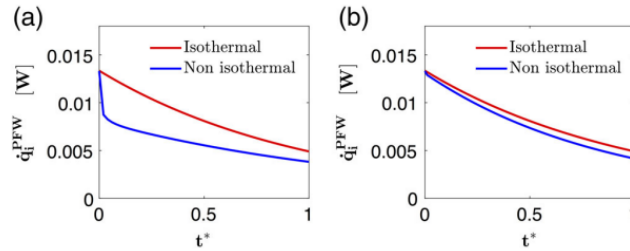


Figura 2.9: Tasa de calor bajo condición isotérmica y no-isotérmica para: a) Vidrio; b) Acero.

Complementando el análisis, Lin et al. [4] investigaron un sistema de tipo spray (Figura 2.10), demostrando que la aspersión de aceite térmico sobre esferas de alúmina instrumentadas logra eficiencias comparables a lechos inundados. Otros trabajos han explorado empaquetamientos binarios [40], analogías de transferencia de masa [41] y aplicaciones industriales como el precalentamiento de minerales [30].

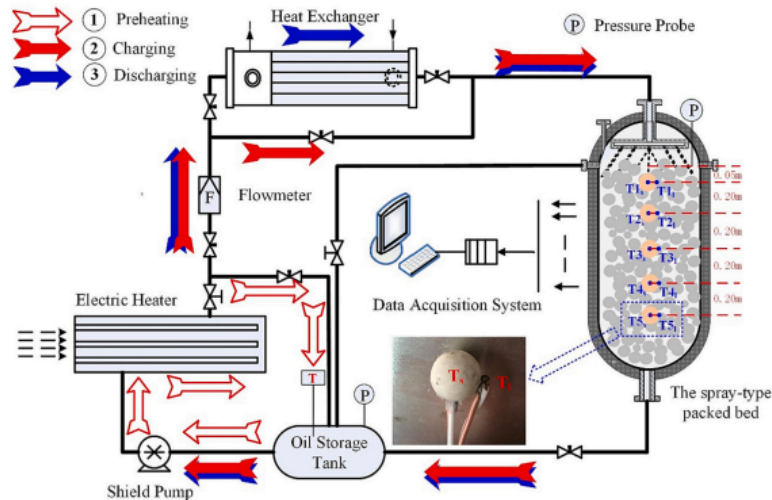


Figura 2.10: Diagrama esquemático del sistema de lecho empacado tipo spray [4].

## 2.2. Brechas en el conocimiento e hipótesis

A partir del análisis de la literatura, se identifican brechas persistentes: los modelos de conducción carecen de una calibración fina de los parámetros de resistencia de contacto, y existe una necesidad de validar el efecto de la rugosidad y el número de Biot en condiciones reales. En convección y radiación, la falta de datos experimentales locales limita la validación de modelos heterogéneos que suelen suponer empaquetamientos ideales. De manera transversal, se identifica una desconexión entre la teoría de la resistencia térmica y su implementación en simulaciones DEM mediante procesos de ajuste iterativo.

**Hipótesis:** En vista de estas brechas, este trabajo propone que es posible desarrollar una metodología de calibración sistemática para los parámetros del método de elementos discretos (DEM) mediante un proceso iterativo que minimice la discrepancia entre perfiles térmicos experimentales y simulados. A través de un experimento diseñado para aislar la conducción directa en un lecho axial, se busca ajustar la transferencia de calor

por contacto, permitiendo una representación más fiel de los fenómenos en sistemas reales de almacenamiento térmico.

## Capítulo 3

# OBJETIVOS

### 3.1. Objetivo general

Desarrollar una metodología de calibración térmica del método de elementos discretos de fenómenos de transferencia de calor por conducción partícula-partícula en un lecho empacado.

### 3.2. Objetivos específicos

Para cumplir con el objetivo general se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Elaborar un modelo matemático para la transferencia de calor por conducción partícula-partícula en lecho empacado e implementarlo usando elementos discretos.
- Diseñar y construir un experimento para estimar parámetros de fenómenos de transferencia de calor por conducción entre partículas.

- Proponer una metodología de calibración de efectos térmicos en el método de elementos discretos para aplicación en simulación de lechos empacados.

# Capítulo 4

## Metodología

Para poder analizar los contactos puntuales y sus respectivas resistencias, los flujos de calor se desarrollarán en base al método de elementos discretos y el posicionamiento de las esferas en cada uno de los modelos se logran mediante el uso del software de DEM llamado "YADE".

### 4.1. Modelo térmico unidimensional

Antes de armar un modelo complejo para resolver el problema planteado, se desarrolla inicialmente un modelo térmico unidimensional para observar y familiarizarse con los comportamientos de los mecanismo de transferencia de calor así como también de los perfiles de temperatura que se podría esperar. Este diseño 1D consiste en una columna de partículas esféricas dispuestas verticalmente, en contacto una con otra y apoyadas sobre una base rígida. Esta columna esta en contacto con aire estático y se considera que las esferas son isotérmicas. El modelo considera los siguientes mecanismos de transferencia de calor en el sistema:

- Conducción directa a través de los puntos de contacto entre partículas.
- Conducción directa a través de los puntos de contacto entre partícula y pared.
- Conducción indirecta, a través del gas intersticial entre superficies cercanas.

- Convección con el fluido circundante (aire estático).
- Radiación térmica entre las superficies de las partículas.

Para el cálculo de la transferencia de calor por conducción directa entre una partícula  $i$  y una partícula  $j$  se considera la ecuación 4.1 desarrollada por Batchelor & O'Brien [12]:

$$\dot{Q}_{cond\ pp} = \frac{4r_c}{\frac{1}{k_i} + \frac{1}{k_j}} (T_j - T_i) \quad (4.1)$$

Donde  $r_c$  representa el radio de contacto de las dos partículas y  $k_i$  y  $T_i$  representan la conductividad térmica y temperatura de la partícula  $i$  y se repite de igual manera para la partícula  $j$ . La conducción es directamente proporcional al radio de contacto que es determinado por el modelo de Hertz-Mindlin de partículas suaves aplicado en simulaciones DEM. Este lo calculamos con la siguiente ecuación:

$$r_c = \left( \frac{3F_n r^*}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.2)$$

Donde  $F_n$  es la fuerza normal,  $E^*$  es el modulo de Young equivalente y  $r^*$  el radio equivalente. La fuerza normal se calcula con las siguientes ecuaciones que vienen del modelo de Hertz-Mindlin antes mencionado:

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{r^*} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (4.3)$$

$$\frac{1}{r^*} = \frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_j} \quad (4.4)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_j^2}{E_j} \quad (4.5)$$

Donde  $\delta$  es el traslape que se genera entre las esferas en contactos,  $r_i$ ,  $E_i$ ,  $\nu_i$ ,  $r_j$ ,  $E_j$  y  $\nu_j$  son los radios, modulos de Young y coeficiente de Poisson de las partículas  $i$  y  $j$  respectivamente. Es el traslape entonces el parámetro ajustable a través de las simulaciones y por lo tanto el parámetro a calibrar para poder representar de la mejor manera posible el fenómeno de conducción a través de los contactos puntuales, donde se recomienda que el valor de este parámetro no supere al 5 % del radio de la partícula [13]. En la realidad, las esferas no se traspasan, sino que se deforman y tienen rugosidad y al ajustar el módulo de Young uno busca un traslape térmico equivalente que represente la rugosidad real que el software no ve. Este fenómeno se puede ver en la figura 4.1 y este set de ecuaciones intenta explicar el traspaso de calor de una partícula a la otra a través de estos pequeños contacto que se producen debido a la rugosidad que presentan las partículas.

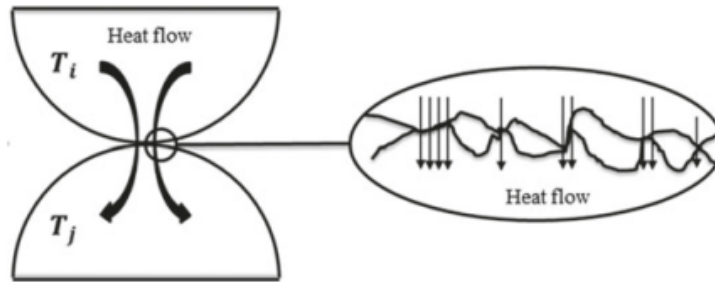


Figura 4.1: *Fenómeno de conducción a través del contacto entre partículas.*

Para la conducción entre partícula y pared se aplican las mismas ecuaciones descritas previamente con la consideración que para los calculos de radio equivalente, se considera que el radio de una pared es infinito, significando que el radio equivalente será igual al radio de la esfera y se deben considerar las propiedades mecánicas de la pared.

Para la conducción indirecta se considera el método propuesto por Rong & Horio [14] llamado *Surrounding layer method*. Este método propone que existe una película de gas con determinado grosor que rodea a las partículas. Cuando esta película entra en

contacto con otra película de gas o la superficie de otra partícula, la transferencia de calor se vuelve importante y debe ser tomada en consideración. La ecuación a utilizar es una modificación propuesta al modelo de Rong & Horio antes mencionado [15]. En la figura 4.2 podemos ver una representación del método descrito.

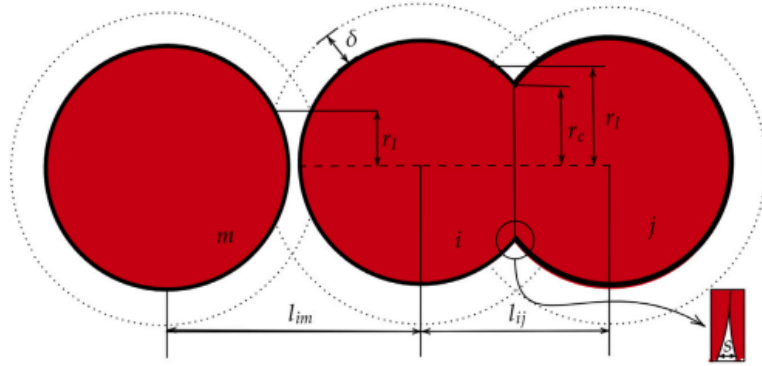


Figura 4.2: *Conducción indirecta para el caso de contacto entre partículas (derecha) y contacto entre películas de fluidos (izquierda).*

La ecuación 4.6 describe la transferencia de calor por conducción indirecta entre 2 partículas :

$$\dot{Q}_{cond\ pfp} = k_f(T_j - T_i) \int_{r_c}^{r_l} \frac{2\pi r}{l_{ij} - 2\sqrt{r_p^2 - r^2}} dr \quad l_{ij} \leq d_p + \delta_{lens} \quad (4.6)$$

Donde  $k_f$  es la conductividad del fluido,  $l_{ij}$  es la distancia entre centros de las partículas  $i, j$ ,  $r_p$  es el radio de la partícula y  $\delta_{lens}$  es la película de gas. Existen 2 casos para esta transferencia de calor, cuando todavía no existe contacto entre esferas pero está la interacción entre las capas de fluido como se ve a la izquierda de la figura 4.2 y cuando ya existe contacto entre las partículas como se ve a la derecha de la figura recién mencionada. Cabe destacar que para el primer caso mencionado, el límite inferior de la integral  $r_c$  toma el valor 0 y para el segundo caso, incorpora la consideración de la distancia mínima de conducción  $s$ . Los valores de  $\delta_{lens}$  y  $s$  se toman como 0.04 veces el radio de la partícula y  $1 \cdot 10^{-6}$  respectivamente, que son valores ocupados en la literatura [16].

La conducción indirecta entre partícula y pared ocurre de manera similar a lo descrito previamente entre partícula y partícula, pero esta ecuación previamente usada no va al caso dado al cambio en la integral por los parámetros geométricos. Por lo tanto para ver esta interacción es que utilizamos las ecuaciones desarrolladas por Morris [17], donde también se consideran 2 casos para la interacción, cuando existe contacto entre la esfera y la pared, es decir, existe un traslape en la simulación con un valor mayor a 0, y el caso en que no existe contacto pero la pared esta dentro de la película de gas al rededor de la esfera. Las ecuaciones siguientes calculan este coeficiente de transferencia de calor usando variables adimensionales las cuales se obtienen diviendo las originales por el radio de partícula utilizada en el modelo:

$$\dot{Q}_{cond\ pfw} = H_{cond\ pfw} (T_w - T_p) \quad (4.7)$$

$$\hat{H} = \frac{H_{cond\ pfw}}{k_f r_p} \quad (4.8)$$

$$\hat{H} = \begin{cases} \frac{\pi}{\hat{s}} \left[ (1 - \hat{\delta})^2 - A^2 \right] + 2\pi \left[ B - A + (1 - \hat{\delta}) \ln \left( \frac{1 - \hat{\delta} - B}{\hat{s}} \right) \right], & \hat{\delta} \geq 0, \\ 2\pi \left[ \frac{\hat{r}_s^2}{2\hat{s}} + B - C + (1 - \hat{\delta}) \ln \left( \frac{1 - \hat{\delta} - B}{1 - \hat{\delta} - C} \right) \right], & \hat{\delta} < 0. \end{cases} \quad (4.9)$$

$$A = 1 - \hat{\delta} - \hat{s}, \quad B = \sqrt{1 - \hat{r}_{out}^2}, \quad C = \sqrt{1 - \hat{r}_s^2}. \quad (4.10)$$

$$\hat{r}_{out} = \begin{cases} \sqrt{(1 + \hat{\delta}_{lens})^2 - (1 - \hat{\delta})^2}, & \hat{\delta} < 1 - \sqrt{(1 + \hat{\delta}_{lens})^2 - 1}, \\ 1, & \hat{\delta} \geq 1 - \sqrt{(1 + \hat{\delta}_{lens})^2 - 1}, \end{cases} \quad (4.11)$$

$$\hat{r}_s = \begin{cases} \sqrt{1 - A^2}, & \hat{\delta} > -\hat{s}, \\ 0, & \hat{\delta} \leq -\hat{s}, \end{cases} \quad (4.12)$$

Donde  $\hat{\delta}$ ,  $\hat{\delta}_{lens}$  y  $\hat{s}$  son el traslape, la película de gas alrededor de la partícula y la distancia mínima de conducción, respectivamente, todos de forma adimensional como se mencionó previamente.

Para la convección, se realiza una discretización del fluido en minicilindros como se muestra en la figura 4.3 en donde se considera que cada elemento de fluido discretizado interactúa con una esfera y con los elementos contiguos a este (a excepción del primero y el último que también interactúan con las tapas del lecho).

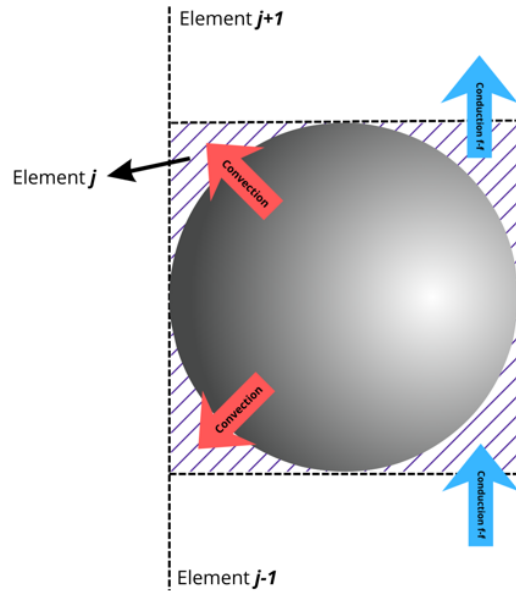


Figura 4.3: Balance energético para un elemento de fluido en el modelo 1D, mostrando los flujo energéticos.

Por la naturaleza del experimento a realizar, la convección es provocada de manera natural por lo que se tienen diferentes correlaciones para poder determinar el número de Nusselt dependiendo de la interacción que estemos tratando. La ecuación 4.13 es la correlación utilizada para un esfera que esta inmersa en un fluido [18], mientras que las ecuaciones 4.14 y 4.15 son las correlaciones para aplicar en las bases inferior y superior del lecho empacado [19], respectivamente:

$$Nu = 2 + \frac{0.589 Ra^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.469}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (Ra \leq 10^{11}, 0.7 \leq Pr) \quad (4.13)$$

$$Nu_L = \begin{cases} 0.54 Ra_L^{1/4}, & 10^5 \leq Ra_L \leq 2 \cdot 10^7, \\ 0.14 Ra_L^{1/3}, & 2 \cdot 10^7 \leq Ra_L \leq 10^{10}. \end{cases} \quad (4.14)$$

$$Nu_L = 0.27 Ra_L^{1/4} \quad (3 \cdot 10^5 \leq Ra_L \leq 3 \cdot 10^{10}) \quad (4.15)$$

Para el caso de la interacción entre fluidos discretizados, se considera solo conducción axial por lo que se toma que el valor del Nusselt es igual a 1. Con esto, las ecuaciones 4.16 y 4.17 nos permiten realizar los cálculos de los flujos convectivos en nuestro sistema:

$$Nu = \frac{h L_c}{k_f} \quad (4.16)$$

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_f - T_i) \quad (4.17)$$

Donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor convectivo buscado,  $L_c$  es el largo característico correspondiente,  $k_f$  es la conductividad del fluido y  $A$  es el área superficial.

Por último la ecuación 4.18 describe el flujo de calor por intercambio radiativo entre partículas:

$$\dot{Q}_{rad} = F_{ij} A \sigma (T_j^4 - T_i^4) \quad (4.18)$$

Donde  $F_{ij}$  es el factor de visión entre las partículas  $i, j$ ,  $A$  es el área superficial de la partícula y  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann. Las esferas son consideradas superficies opacas, negras y difusas y los factores de visión son fácilmente obtenidos dado que es una geometría conocida.

Finalmente el balance energético para una partícula queda descrito por la siguiente ecuación:

$$\rho_p V_p c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \sum_{k=1}^m \dot{Q}_{cond\ pp} + \sum_{k=1}^n \dot{Q}_{cond\ pfp} + \sum_{k=1}^r \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{conv} + \sum_{k=0}^o \dot{Q}_{cond\ pw} + \sum_{k=0}^p \dot{Q}_{cond\ pfw} \quad (4.19)$$

Donde  $\rho_p$ ,  $V_p$ ,  $c_p$  y  $T_p$  son la densidad, volumen, calor específico y temperatura de la partícula respectivamente. Los índices  $m$ ,  $n$ ,  $r$  corresponden al numero de partículas consideradas para la interacción de conducción directa, indirecta y radiación con la partícula respectivamente, mientras que los índices  $o$ ,  $p$  representan la conducción directa e indirecta con la pared en caso de existir. Notar que debido a la configuración establecida en este modelo 1D, solo existe un flujo convectivo para cada una de las 20 esferas.

Por otro lado el balance energético para cada fluido discretizado queda descrito por

la siguiente ecuación:

$$\rho_f V_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = \dot{Q}_{conv} + \sum_{k=1}^q \dot{Q}_{conv\ ff} + \sum_{k=0}^s \dot{Q}_{conv\ fw} \quad (4.20)$$

Donde  $\rho_f$ ,  $V_f$ ,  $c_f$  y  $T_f$  son la densidad, volumen, calor específico y temperatura del elemento de fluido discretizado respectivamente. Los índices  $q$ ,  $s$  corresponden al número de elementos discretizados y paredes con los que se interactúa respectivamente.

Este modelo se implementa con un esquema de integración temporal Euler explícito, y nos permite analizar la evolución de la temperatura en función del tiempo y la distribución de temperatura en la dirección axial. Su propósito es proporcionar información y familiarizarnos con los comportamientos del lecho a analizar para definir criterios de diseño para el experimento físico posterior, tales como dimensiones del sistema, tiempos de calentamiento, etc.

## 4.2. Diseño experimental

En el experimento a realizar, se busca que el fenómeno de transferencia de calor predominante en el lecho empacado sea la conducción directa, en el que se obtendrá el perfil de temperatura en la dirección axial midiendo temperatura de varias esferas distribuidas en esta dirección. Por otro lado, se medirá la potencia inyectada para poder así obtener una resistencia de contacto experimental, utilizando estos datos para poder estimar y separar el resto de mecanismos de transferencia de calor, obteniendo así la resistencia recién dicha.

El lecho en sí consistirá de un recipiente cilíndrico cerrado por tapas circulares y lleno de esferas en su interior para simular así lo que sería el almacenador térmico estudiado. El radio y la altura del cilindro así como también el radio de las esferas y su cantidad son variables a determinar dependiendo de lo obtenido en el modelo unidimensional,

el espacio disponible para poder montar el experimento y lo encontrado en el mercado. También se tomara mediciones de temperatura en la base del lecho para poder estimar flujos de calor hacia el ambiente.

Para provocar una presencia importante de la conducción directa en el experimento es que la forma de calentar las esferas no será a través de un fluido de trabajo caliente, sino que se hará un lecho empacado cerrado por abajo y se apoyará el experimento sobre la base de un calentador el cual le inyectara el calor al sistema.

La toma de temperatura se realizará mediante sensores los cuales estarán ubicado al centro de ciertas esferas que serán mecanizadas, haciendo un agujero hasta su centro donde se incorporará pasta térmica, siendo el volumen del agujero y la pasta térmica despreciable respecto del volumen de la esfera para no afectar el biot local, y luego se ubicará la termocupla para poder obtener una correcta lectura. Las medidas de los sensores serán corregidas mediante una estimación lineal, utilizando como base un sensor PT100 calibrado y realizando varias medidas a agua desmineralizada a diferentes temperatura.

Una vez armado el lecho y preparado es necesario comprobar la repitibilidad de este por lo que se harán varias tomas de datos. Una vez logrado esto es que procedemos a realizar la toma de datos de temperatura en conjunto con la potencia inyectada para poder así tener los datos necesarios para realizar los cálculos de la resistencia de contacto experimental.

### **4.3. Modelo térmico tridimensional**

Luego del diseño experimental, se desarrolla un modelo térmico 3D con partículas esféricas en dos configuraciones:

- Lecho empacado con esferas ordenadas.
- Lecho empacado con esferas puestas de manera aleatoria.

Para ambas configuración se utiliza el software YADE, una asegurando el posicionamiento aleatorio de partículas dentro de un lecho con las dimensiones a utilizar en el experimento, tanto del lecho empacado como de las esferas y la otra asegurando una configuración ordenada mediante una red *Simple Cubic*, la cual consiste basicamente en armar una red de cubos imaginarios posicionando las esferas en los vértices de estos cubos. En ambos casos, las partículas tienen propiedades térmicas conocidas y constantes.

Para los fenómenos conductivos se utilizan las mismas ecuaciones descritas previamente en el modelo unidimensional. Para la convección, también se utilizan las ecuaciones tanto para la base y tapa del lecho como para la convección natural de una esfera inmersa de un cilindro, pero también es necesario introducir otra relación para convección natural con tubo vertical, pues en el 3D consideramos la transferencia de calor a través del manto del lecho, como podemos observar en la figura 4.4.

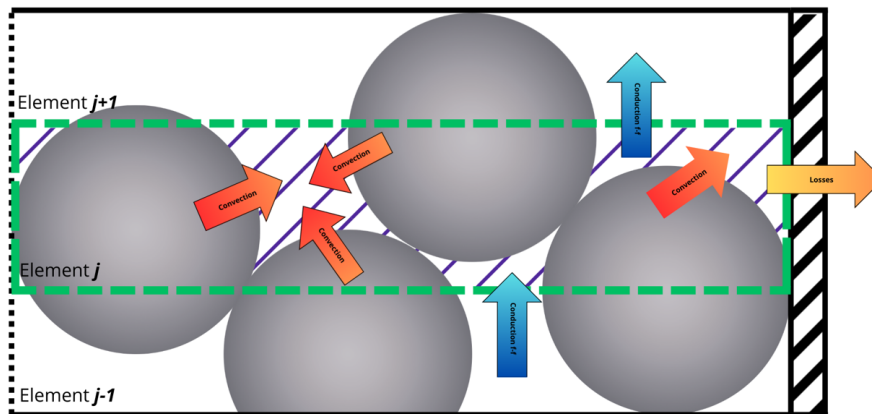


Figura 4.4: Balance energético para un elemento de fluido en el modelo 3D, mostrando los flujo energéticos.

Para esto se incorpora al modelo la ecuación 4.21 la cual introduce un número de Nusselt en convección natural para placa vertical [20]:

$$\text{Nu}_L = \left[ 0.825 + \frac{0.387 \text{Ra}_L^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{\text{Pr}}\right)^{9/16}\right)^{8/27}} \right]^2 \quad (10^{-1} \leq \text{Ra}_L \leq 10^{12}, 0.7 \leq \text{Pr}). \quad (4.21)$$

Para la fenómeno radiativo es necesario obtener los factores de visión para definir las transferencia de calor por radiación. Para esto se considera la interacción entre esferas, entre esfera y manto y finalmente entre esfera y tapa del lecho (inferior o superior). Para calcular estos factores, es que implementamos el trabajo hecho por Cortes et al. [21] que consiste en la aplicación del método llamado *Layer view factor* (LVF)[22] que nos sirve para estimar factores de visión con costo computacional muy bajo en comparación con el método *Monte carlo ray traicing* (MCRT). Consideramos las esferas opacas, difusas y negras, todas las esferas tienen el mismo diámetro. Se definen los dominios de interacción siendo 4 veces el diámetro de la esfera para interacción entre esferas y 3 veces el diámetro de la esfera para las interacciones entre esfera y manto y esfera y tapas. La idea del método es reemplazar el trazado de rayos por correlaciones y valores característicos por capas que se definen alrededor de la partícula analizada y respecto a paredes y tapas si es el caso, como se puede ver en la figura 4.5.

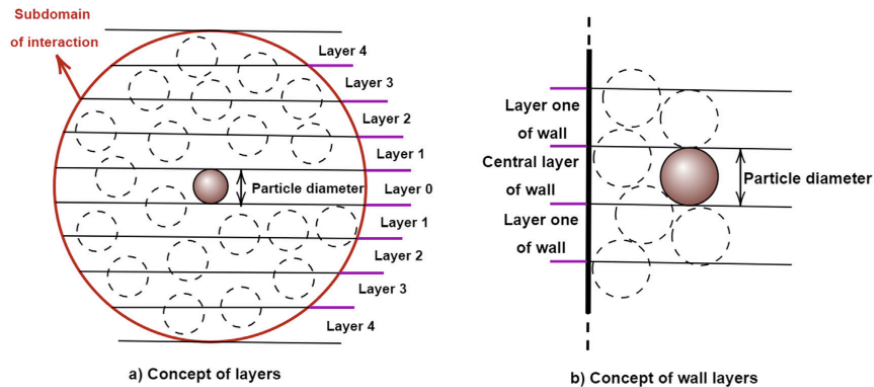


Figura 4.5: Definición del concepto de capa dentro del lecho empacado.

Para cada capa definida en la parte a) de la figura 4.5, la tabla 4.1 presenta los factores de visión característicos de cada una.

Tabla 4.1: Factores de visión partícula–capa.

| Capa | Factor de visión $F_{ply}$ |
|------|----------------------------|
| 0    | 0.4193                     |
| 1    | 0.2686                     |
| 2    | $1.8360 \times 10^{-2}$    |
| 3    | $1.3801 \times 10^{-3}$    |
| 4    | $1.0890 \times 10^{-4}$    |

Para el cálculo con paredes y tapas, utilizamos cuatro expresiones. La ecuación 4.22 entrega el factor de visión de la capa central respecto del manto, mientras que la ecuación 4.23 lo hace para la capa 1 respecto del manto. Análogamente, la ecuación 4.24 corresponde a la capa central respecto de una tapa y la ecuación 4.25 a la capa 1 respecto de una tapa.

$$F_{pl0}(r) = \begin{cases} (-0.2689r + 0.3660), & 0.5 < r \leq 1.2, \\ \text{máx}(13.51 e^{-4.838r}, 0), & 1.2 < r \leq 3.0. \end{cases} \quad (4.22)$$

$$F_{pl1}(r) = \begin{cases} 0.0969, & 0.5 < r \leq 0.5616, \\ -0.1925r^2 + 0.2163r + 0.0362, & 0.5616 < r \leq 1.2, \\ \text{máx}(0.1260 e^{-1.582r}, 0), & 1.2 < r \leq 3.0. \end{cases} \quad (4.23)$$

$$F_{pul}(v) = \begin{cases} -0.1078v^2 - 0.1287v + 0.5040, & 0.5 < v \leq 1.4, \\ \text{máx}(4.041 e^{-2.567v}, 0), & 1.4 < v \leq 3.5. \end{cases} \quad (4.24)$$

$$F_{pll}(v) = \begin{cases} 0.1330v^2 - 0.5963v + 0.5744, & 0.5 < v \leq 1.3, \\ \text{máx}(0.5403 e^{-2.327v}, 0), & 1.3 < v \leq 3.0. \end{cases} \quad (4.25)$$

donde  $r$  y  $v$  corresponden a la distancia radial adimensional desde la partícula hasta la pared, y la distancia vertical adimensional desde la partícula hasta la tapa, respectivamente. Estas distancias se definen como la relación entre la distancia de la partícula a una de las superficies y su diámetro.

Para la interacción entre partículas, ya la tabla 4.1 nos entrega los factores de visión característicos por capa, es necesario ahora llegar a los factores de visión de cada partícula respecto de la analizada y para esto es necesario realizar ciertas suposiciones. El método requiere negar el cambio de temperatura dentro de la partícula y el gradiente de temperatura en la dirección radial. Por lo tanto se tiene que cada capa esta compuesta por partículas isotérmicas y que todas las partículas en una capa tienen la misma temperatura. Dado que el modelo considera pérdidas a través del manto es que se toma una temperatura promedio de todas las partículas en la capa para cumplir con el método. Considerando esto entonces se determina el factor de visión entre partículas con la siguiente ecuación:

$$F_{pp} = \frac{F_{ply}}{N} \quad (4.26)$$

donde  $F_{ply}$  es el factor de visión característico de la capa y  $N$  es el total de partículas presente en dicha capa. Para partículas que estan cerca de las tapas o del manto es necesario realizar una pequeña modificación, donde se ven afectados los factores de visión para partículas pertenecientes a la capa 0 y 1, bajando su magnitud. Para estos caso entonces es que se usa la siguiente ecuación:

$$F_{pp} = \frac{F_{ply} - F_{pw}}{N} \quad (4.27)$$

donde  $F_{pw}$  representa el factor de visión con la capa de pared virtual. De esta manera entonces se definen todos los factores de visión entre partículas dentro del lecho empacado.

Para la aplicación de estos factores de forma hay un pequeño detalle a considerar. Los factores para partículas y para las tapas pueden ser directamente aplicados al modelo térmico, pero para los factores entre esferas y pared es necesario realizar un paso extra. Las capas virtuales de la pared que se generan dependen de la posición de la partícula, dado esto es muy complicado que esta capa quede exactamente en la posición del manto discretizado, por lo que es necesario adaptar estos factores de visión con la capas reales en el manto. Para esto es que las siguientes ecuaciones corrigen estos factores de visión, dependiendo del traslape vertical entre la capa virtual y la capa real:

$$F_{pr1} = \frac{F_{pwl} l_1}{d} \quad \wedge \quad F_{pr2} = \frac{F_{pwl} l_2}{d} \quad ; \quad l_1 + l_2 = d \quad (4.28)$$

donde  $F_{pr1}$  y  $F_{pr2}$  corresponden a los factores de visión entre la partícula y la primera y segunda capa real en la cual la capa virtual es proyectada, respectivamente. Respecto a los traslapes verticales,  $l_1$  y  $l_2$  representan la distancia del traslape entre la capa virtual y la primera y segunda capa real, respectivamente.

Finalmente, con las ecuaciones introducidas y la relación de reciprosidad es que se determinan todos los factores de forma dentro del lecho empacado.

De esta manera es que se tienen todas las ecuaciones necesarias para establecer el balance energético para cada esfera que queda descrito en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \rho_p V_p c_p \frac{\partial T}{\partial t} = & \sum_{k=1}^m \dot{Q}_{cond \, pp} + \sum_{k=1}^n \dot{Q}_{cond \, pfp} + \sum_{k=1}^r \dot{Q}_{rad \, pp} + \sum_{k=1}^o \dot{Q}_{conv} + \sum_{k=0}^p \dot{Q}_{cond \, pw} \\ & + \sum_{k=0}^q \dot{Q}_{cond \, pfw} + \sum_{k=1}^s \dot{Q}_{rad \, pw} \end{aligned} \quad (4.29)$$

donde  $\rho_p$ ,  $V_p$ ,  $c_p$  y  $T_p$  son la densidad, volumen, calor específico y temperatura de la partícula respectivamente. Los índices  $m$ ,  $n$ ,  $r$  representan las interacciones de conducción directa, conducción indirecta y radiativa con otras partículas, respectivamente. El índice  $o$  representa el número de fluidos discretizados con los que interactúa la partícula. Finalmente los índices  $p$ ,  $q$ ,  $s$  representan la cantidad de interacciones a través de conducción directa, conducción indirecta y radiación con las paredes.

Para concluir, el balance energético de cada elemento de fluido discretizado queda descrito por la siguiente ecuación:

$$\rho_f V_f c_f \epsilon \frac{\partial T_f}{\partial t} = \sum_{k=1}^t \dot{Q}_{conv} + \sum_{k=1}^u \dot{Q}_{conv\ ff} + \dot{Q}_{loss} \quad (4.30)$$

donde  $\rho_f$ ,  $V_f$ ,  $c_f$ ,  $\epsilon$  y  $T_f$  son la densidad, volumen, calor específico, porosidad local y temperatura del elemento de fluido discretizado respectivamente. Los índices  $t$ ,  $u$  indican el número de partículas y la cantidad de elementos de fluido con el que interactúa el fluido analizado respectivamente y  $\dot{Q}_{loss}$  representa las pérdidas hacia el ambiente que se tiene a través del manto del lecho.

El modelo 3D al igual que el modelo 1D se implementa con un esquema de integración temporal Euler explícito.

#### 4.4. Metodología de calibración y validación de la resistencia térmica partícula–partícula mediante DEM

La calibración de los parámetros asociados a la transferencia de calor en el lecho empacado se realiza utilizando el modelo térmico tridimensional en configuración ordenada. La disposición *Simple Cubic* del lecho empacado en el experimento permite, gracias al posicionamiento conocido de las esferas, identificar y cuantificar los distintos mecanis-

mos de transferencia de calor presentes en el sistema. En particular, esta configuración facilita el análisis de los aportes por conducción directa partícula-partícula y su dependencia con el traslape mecánico, manteniendo control geométrico sobre la red de contactos.

El procedimiento de calibración se desarrolla mediante un proceso iterativo entre el modelo térmico y simulaciones basadas en el Método de Elementos Discretos (DEM) implementadas en el software YADE. En cada iteración se ajusta el módulo de Young de las esferas, controlando los traslapes mecánicos obtenidos en la simulación y, por consiguiente, las condiciones de contacto relevantes para la transferencia de calor. De manera consistente, este mismo valor del módulo de Young es incorporado en la formulación del modelo térmico para representar el efecto del contacto mecánico en la conducción partícula-partícula.

El proceso iterativo continúa hasta alcanzar una concordancia satisfactoria entre la respuesta térmica del modelo y los datos experimentales. En particular, el criterio de ajuste se basa en que la evolución temporal y los perfiles axiales de temperatura calculados reproduzcan adecuadamente las tendencias y magnitudes observadas experimentalmente para la configuración ordenada. Una vez alcanzado dicho ajuste, el conjunto de parámetros calibrado se considera representativo para su uso en configuraciones geométricas más complejas.

Con los parámetros calibrados, se evalúa la validez del enfoque mediante su aplicación en el modelo térmico tridimensional con configuración aleatoria del lecho empacado. La geometría del lecho aleatorio se obtiene a partir de simulaciones DEM realizadas en YADE, donde las esferas son posicionadas de manera aleatoria. Sobre esta base geométrica se ejecuta el modelo térmico replicando las condiciones experimentales correspondientes, con el objetivo de obtener la evolución temporal de temperaturas y los perfiles en la dirección axial. Finalmente, los resultados del modelo térmico calibrado

se comparan con los datos experimentales medidos para la configuración aleatoria, permitiendo evaluar la capacidad predictiva de la metodología propuesta.

Adicionalmente, se realiza un análisis de sensibilidad con el fin de cuantificar la influencia de los parámetros con mayor incertidumbre o impacto físico en los resultados térmicos. En este análisis se varía el módulo de Young dentro de un rango representativo y, en paralelo, se exploran distintos valores asociados a la conducción indirecta a través de la fase gaseosa, particularmente el espesor efectivo de la película de gas y la distancia mínima de separación considerada entre superficies. La evaluación de sensibilidad se efectúa comparando la variación en los perfiles de temperatura, con el propósito de identificar la robustez de la calibración y las combinaciones de parámetros que dominan la respuesta térmica del lecho.

## Capítulo 5

### Modelo Térmico Unidimensional

El modelo 1D desarrollado representa un lecho empacado idealizado, diseñado para caracterizar la evolución temporal de la temperatura en la dirección axial bajo la premisa de gradientes radiales nulos. Esta aproximación permite aislar los mecanismos de transferencia fundamentales y despreciar las pérdidas laterales, facilitando el análisis de sensibilidad inicial. La columna de estudio se compone de 20 esferas, cuyas propiedades termofísicas para los casos de acero y aluminio se detallan en la Tabla 5.1.

| Parámetro                     | Acero             | Aluminio         |
|-------------------------------|-------------------|------------------|
| Diámetro [m]                  | 0.03              | 0.03             |
| Módulo de Young [Pa]          | $200 \times 10^9$ | $69 \times 10^9$ |
| Coeficiente de Poisson [-]    | 0.29              | 0.33             |
| Conductividad térmica [W/m·K] | 53                | 237              |
| Densidad [kg/m <sup>3</sup> ] | 7850              | 2700             |
| Calor específico [J/kg·K]     | 480               | 900              |

Tabla 5.1: *Propiedades de las esferas del lecho en el modelo unidimensional [5, 6].*

Asimismo, las Tablas 5.2 y 5.3 presentan las propiedades mecánicas y térmicas de los componentes estructurales (tapas de acero) y del fluido intersticial (aire), respectivamente.

Los factores de visión para el intercambio radiativo se calcularon mediante el software EES (*Engineering Equation Solver*), limitando la interacción a los elementos adyacen-

| Parámetro                     | Acero             |
|-------------------------------|-------------------|
| Espesor [m]                   | 0.012             |
| Módulo de Young [Pa]          | $200 \times 10^9$ |
| Coefficiente de Poisson [-]   | 0.29              |
| Conductividad térmica [W/m·K] | 53                |
| Densidad [kg/m <sup>3</sup> ] | 7850              |
| Calor específico [J/kg·K]     | 480               |

Tabla 5.2: *Propiedades de las tapas del lecho en el modelo unidimensional [5, 6].*

| Propiedad del Fluido (Aire)               | Valor                  |
|-------------------------------------------|------------------------|
| Conductividad térmica [W/m·K]             | 0.0257                 |
| Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]             | 1.225                  |
| Calor específico ( $c_p$ ) [J/kg·K]       | 1005                   |
| Coefficiente de expansión térmica [1/K]   | $3.365 \times 10^{-3}$ |
| Viscosidad cinemática [m <sup>2</sup> /s] | $1.557 \times 10^{-5}$ |

Tabla 5.3: *Propiedades termofísicas del aire [7].*

tes en el eje axial conforme a la naturaleza unidimensional del modelo.

En esta etapa, el traslape entre partículas se trata como una variable de análisis para estudiar el comportamiento de la resistencia térmica de contacto, previo a su uso como parámetro formal de calibración. Mediante simulaciones DEM en YADE, se modificó controladamente el módulo de Young para generar distintos niveles de traslape mecánico, mientras que el modelo térmico preservó las propiedades reales del material. Como se observa en la Figura 5.1, los valores de traslape obtenidos cumplen con el criterio de no superar el 5 % del radio de la esfera, operando dentro del régimen de deformaciones elásticas.

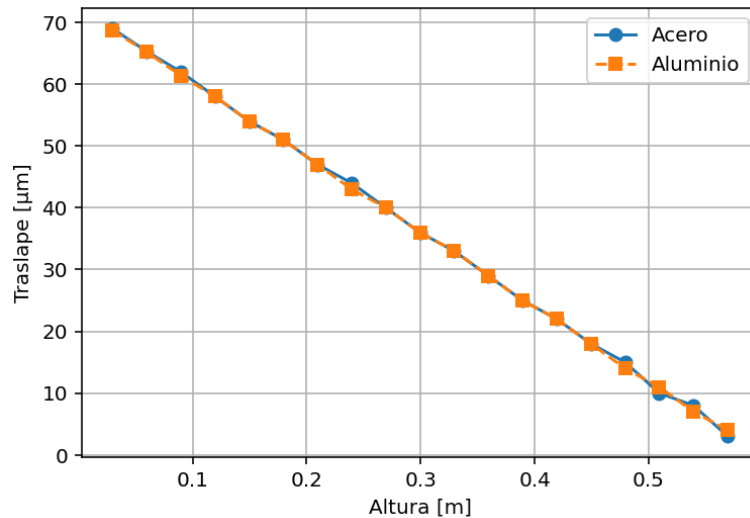


Figura 5.1: *Distribución de traslapes mecánicos a lo largo del lecho axial.*

La Figura 5.2 revela la influencia crítica de la materialidad en la resistencia térmica partícula–partícula. A pesar de presentar traslapes mecánicos similares, el aluminio exhibe una resistencia significativamente menor y una menor sensibilidad a la altura del lecho en comparación con el acero. Este fenómeno se atribuye a la elevada conductividad térmica del aluminio, que mitiga el efecto de constricción en los puntos de contacto. Por el contrario, el acero presenta una mayor dependencia del área efectiva de contacto, lo que incrementa la resistencia térmica de manera pronunciada hacia la parte superior del lecho.

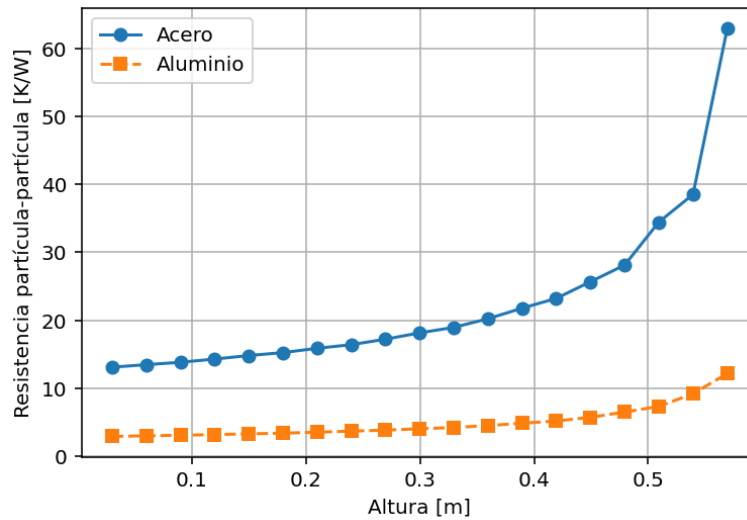


Figura 5.2: Resistencias térmicas partícula-partícula calculadas para el modelo 1D.

Para la simulación transitoria, se fijó la base del calentador a  $100^{\circ}\text{C}$  con una temperatura inicial y ambiente de  $20^{\circ}\text{C}$ , empleando un paso temporal de 0.1 s durante un periodo de 6 horas. Los resultados para acero y aluminio se presentan en las Figuras 5.3 y 5.4, respectivamente.

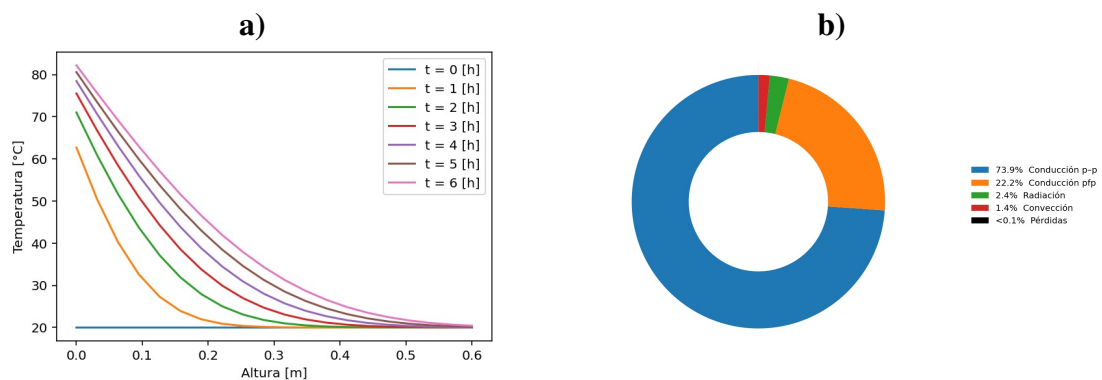


Figura 5.3: Resultados del modelo 1D (Acero): a) Evolución del perfil axial de temperatura; b) Contribución relativa de los mecanismos de transferencia.

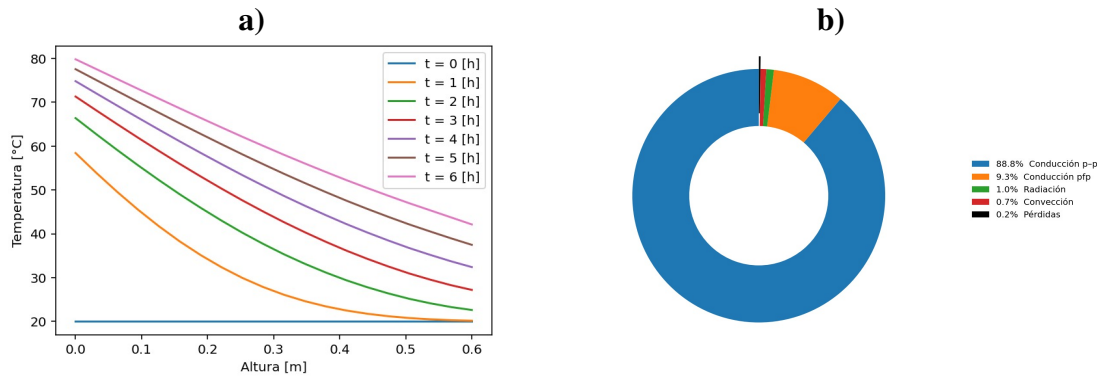


Figura 5.4: Resultados del modelo 1D (Aluminio): a) Evolución del perfil axial de temperatura; b) Contribución relativa de los mecanismos de transferencia.

El análisis de los resultados permite extraer tres conclusiones fundamentales para el diseño experimental:

1. **Ventana Temporal:** La mayor variación térmica ocurre durante la primera hora de simulación. Por lo tanto, una ventana experimental de 60 a 90 minutos es suficiente para capturar la dinámica dominante del sistema.
2. **Mecanismo Dominante:** Los gráficos de contribución acumulada confirman que la conducción directa partícula–partícula es el mecanismo predominante. Esto valida el enfoque de la tesis al identificar la resistencia de contacto como el parámetro de mayor impacto.
3. **Estrategia de Instrumentación:** Dado que los gradientes térmicos más pronunciados se localizan en la mitad inferior del lecho, se recomienda una mayor densidad de sensores en esta región para maximizar la resolución de los datos durante el proceso de calibración.

Este estudio preliminar proporciona los criterios de diseño y las bases físicas necesarias para proceder con el desarrollo del modelo tridimensional y la metodología de calibración DEM detallada en los capítulos posteriores.

## Capítulo 6

# Diseño Experimental

Este capítulo detalla el diseño y la implementación del montaje experimental destinado a la obtención de perfiles de temperatura y potencia eléctrica bajo condiciones controladas. Se describe exhaustivamente la instrumentación, el procedimiento de ensamblaje del lecho y los protocolos de calibración, con el fin de garantizar la reproducibilidad de los datos que servirán de base para la validación de los modelos tridimensionales presentados en secciones posteriores.

### 6.1. Instrumentación del setup experimental

El lecho empacado y su estructura de soporte se basan en el prototipo desarrollado inicialmente por Cabello [43]. Para los fines de esta investigación, dicho sistema se ha adaptado para operar bajo condiciones atmosféricas, centrando el análisis en la transferencia de calor por conducción axial.

La estructura principal consiste en un manto cilíndrico de acero instrumentado con un sistema de bridas. En la Tabla 6.1 se detallan las dimensiones y propiedades mecánicas del manto.

| Parámetro                   | Valor             |
|-----------------------------|-------------------|
| Módulo de Young [Pa]        | $200 \times 10^9$ |
| Coefficiente de Poisson [-] | 0.26              |
| Diámetro externo [m]        | 0.0887            |
| Espesor [m]                 | 0.006             |
| Altura [m]                  | 0.21              |

Tabla 6.1: *Parámetros dimensionales y propiedades mecánicas del manto cilíndrico.*

El sistema de cierre consta de bridas inferiores y superiores de 0.012 m de espesor. Para minimizar las pérdidas térmicas en la base y concentrar el flujo de calor hacia el lecho de esferas, se integró una manta de fibra cerámica de 0.010 m de espesor entre la brida ciega inferior y la brida abierta soldada al manto.

La fuente térmica consiste en un calentador digital ITECH HP-B100 (300 W), con un rango de operación de 0–400°C. El lecho se posiciona de manera concéntrica sobre la placa calefactora de  $0.120 \times 0.120 \text{ m}^2$ , asegurando un contacto térmico uniforme en la base. En la Figura 6.1 podemos observar el lecho al lado del calentador.

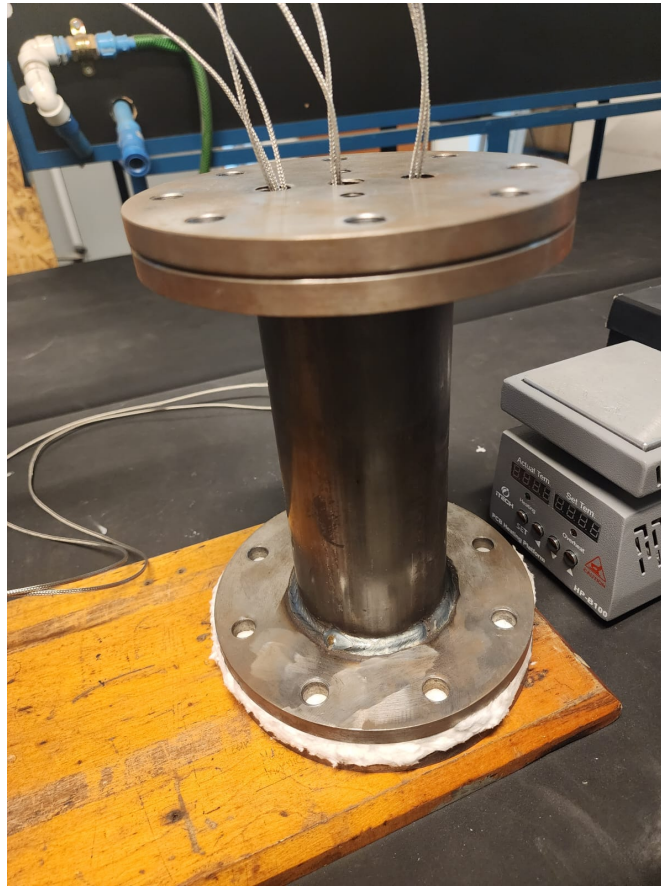


Figura 6.1: *Estructura del lecho empacado y equipo calentador del experimento.*

Para la medición de la temperatura intrínseca, se utilizaron esferas de acero inoxidable de 10 mm de diámetro, mecanizadas con una perforación de 2 mm de diámetro y 5 mm de profundidad. Se instalaron termocuplas tipo K en el centro geométrico de cada esfera, empleando pasta térmica para minimizar la resistencia de contacto sensor-sólido y silicona térmica para el sellado estructural (ver Figura 6.2).



Figura 6.2: *Detalle del montaje del sensor térmico en el núcleo de la esfera de acero.*

La adquisición de datos se realizó mediante módulos MAX6675 conectados a una placa de procesamiento Arduino Uno. Para la medición de la potencia eléctrica inyectada, se empleó un analizador de redes trifásico AEMC Instruments PowerPad® 3945-B (Figura 6.3), permitiendo el registro sincronizado de voltaje y corriente.

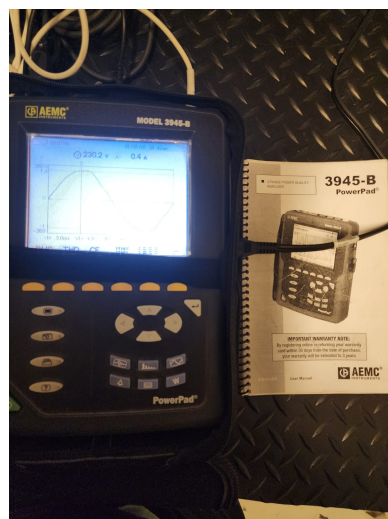


Figura 6.3: *Analizador de redes utilizado para el monitoreo de potencia eléctrica.*

## 6.2. Calibración de termocuplas

Dada la sensibilidad requerida para determinar la resistencia de contacto, se realizó una calibración sistemática de las termocuplas frente a un sensor PT100 de referencia (error instrumental de  $0.01^{\circ}\text{C}$ ). El procedimiento consistió en un ajuste lineal de dos puntos (ambiente y ebullición) mediante un baño de agua desmineralizada homogeneizado por agitación mecánica. La corrección se aplicó mediante la ecuación 6.1:

$$T_{\text{corregida}} = aT_{\text{medida}} + b \quad (6.1)$$

Se estableció como criterio de aceptación una desviación máxima de  $0.7^{\circ}\text{C}$  respecto al patrón de referencia tras el ajuste.

## 6.3. Montaje del setup experimental

Como se detalló anteriormente, se realizaron mediciones de temperatura para dos configuraciones del lecho empacado: (i) una configuración aleatoria y (ii) una configuración ordenada tipo *Simple Cubic* (SC), caracterizada por una red de esferas de  $5 \times 5$  por capa.

Para la **configuración aleatoria**, el llenado del lecho se ejecutó mediante un procedimiento por capas. Inicialmente, se posicionó una esfera instrumentada con una termocupla en el eje central para mitigar los efectos de pared. Posteriormente, se completó el volumen de la capa con esferas no instrumentadas hasta lograr un empaquetamiento estable. Este proceso se repitió alternando capas con y sin sensores hasta agotar la instrumentación disponible, finalizando el relleno con esferas convencionales hasta totalizar aproximadamente 1000 unidades de acero.

Durante el llenado de cada estrato, se aplicó una compactación manual suave y controlada para minimizar la formación de vacíos heterogéneos y asegurar una porosidad global uniforme y reproducible. Aunque originalmente se dispuso de 10 esferas instrumentadas, se descartaron tres mediciones debido a fallas técnicas en la adquisición. Las cotas axiales de las siete termocuplas válidas se detallan en la Tabla 6.2.

| Termocupla | Altura [m] |
|------------|------------|
| 1          | 0.005      |
| 2          | 0.030      |
| 3          | 0.060      |
| 4          | 0.080      |
| 5          | 0.105      |
| 6          | 0.122      |
| 7          | 0.173      |

Tabla 6.2: *Posición axial de las termocuplas instaladas en la configuración aleatoria del lecho empacado.*

La **configuración ordenada**, por su parte, exigió un protocolo de montaje de alta precisión para preservar la geometría *Simple Cubic*. Debido a la inestabilidad inherente de este arreglo durante el llenado, se utilizó un prisma cuadrado hueco de madera como elemento de confinamiento lateral y guía. La madera fue seleccionada por su baja conductividad térmica, garantizando que su presencia no introdujera alteraciones significativas en el comportamiento térmico global del sistema. El prisma posee un lado interno de 0.052 m, permitiendo absorber las tolerancias dimensionales de las esferas que, a pesar de tener un diámetro nominal de 0.010 m, presentan pequeñas variaciones que podrían comprometer el alineamiento perfecto.

En la primera capa, se posicionó la esfera instrumentada en el centro y se completó la red de  $5 \times 5$ , como se ilustra en la Figura 6.4.

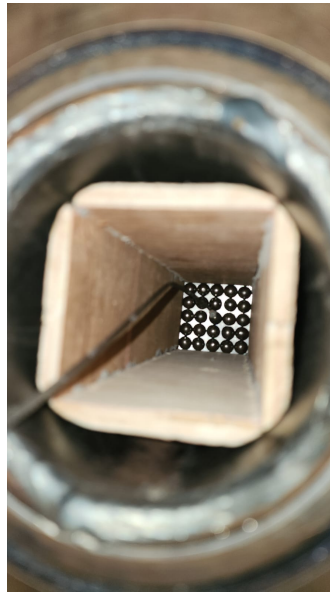


Figura 6.4: *Primera capa de esferas correspondiente a la configuración ordenada con prisma guía.*

Para asegurar la verticalidad del arreglo, se instalaron 16 varillas guía de madera en los intersticios generados entre los conjuntos de cuatro esferas (espacios de  $4 \times 4$ ). Estas varillas actúan como rieles verticales que conservan la geometría ordenada durante el ascenso de las capas. Se ubicaron esferas instrumentadas en las primeras tres capas y, posteriormente, se alternaron capas instrumentadas y no instrumentadas hasta alcanzar el límite superior del prisma guía (Figura 6.5). Las posiciones axiales definitivas para esta configuración se presentan en la Tabla 6.3.

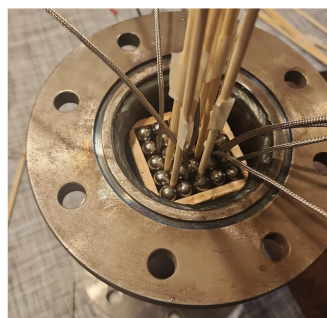


Figura 6.5: *Vista superior del montaje de la configuración ordenada, mostrando el prisma guía y las varillas de alineación.*

| Termocupla | Altura [m] |
|------------|------------|
| 1          | 0.005      |
| 2          | 0.015      |
| 3          | 0.025      |
| 4          | 0.045      |
| 5          | 0.065      |
| 6          | 0.085      |
| 7          | 0.105      |

Tabla 6.3: *Posición axial de las termocuplas instaladas en la configuración ordenada del lecho empacado.*

Con el propósito de cuantificar de forma independiente las pérdidas térmicas ambientales, se realizaron ensayos complementarios con el sistema en vacío. En estas instancias se registró la temperatura de la brida ciega inferior, por ser el componente de mayor temperatura y, por ende, el principal foco de pérdidas por convección y radiación hacia el entorno.

Durante toda la campaña experimental, se monitoreó la temperatura ambiente con una resolución de  $0.1^{\circ}\text{C}$ . El protocolo consistió en ensayos de una hora con el calentador seteado a  $100^{\circ}\text{C}$ , tiempo suficiente para el desarrollo de la curva térmica transitoria. La potencia eléctrica se registró mediante el analizador de redes, empleando pinzas de tensión y corriente en el conductor de alimentación (Figura 6.6).

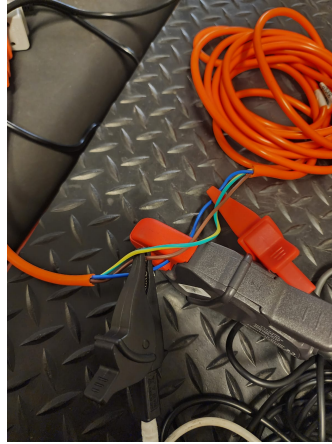


Figura 6.6: *Montaje de medición eléctrica: instrumentación en el cable de alimentación del calentador.*

En resumen, la adquisición de datos integró de manera sincronizada las temperaturas locales del lecho y la potencia eléctrica suministrada. La duración de una hora se fundamenta en los hallazgos del modelo unidimensional, el cual demostró que este intervalo captura la mayor parte de la dinámica transitoria y proporciona condiciones de operación robustas para el análisis y calibración posterior.

## Capítulo 7

# Modelo Térmico Tridimensional

Este capítulo presenta el desarrollo de los modelos térmicos tridimensionales diseñados para representar el comportamiento de un lecho empacado bajo dos configuraciones geométricas: ordenada y aleatoria. El modelo 3D ordenado constituye la herramienta principal de calibración; el control riguroso sobre la arquitectura de las esferas permite aislar y ajustar el efecto de la conducción directa partícula–partícula mediante los datos experimentales. Una vez calibrada la resistencia térmica de contacto, el modelo aleatorio actúa como protocolo de validación, utilizando geometrías generadas mediante simulaciones de Elementos Discretos (DEM) para contrastar su capacidad predictiva frente a mediciones reales.

Ambas configuraciones comparten un marco de hipótesis unificado. El fluido se representa mediante una discretización en celdas cilíndricas de altura equivalente al diámetro de partícula ( $d_p$ ), mientras que el manto se discretiza en anillos para capturar tanto el intercambio axial como las pérdidas ambientales. El modelo integra mecanismos de conducción (directa e indirecta), convección y radiación, reproduciendo fielmente las condiciones de contorno experimentales.

## 7.1. Generación de la geometría del lecho

Para la configuración ordenada, se replicó la disposición experimental *Simple Cubic* (SC) mediante un posicionamiento por capas de redes  $5 \times 5$ . Inicialmente, las partículas se sitúan con una separación vertical para prevenir contactos no deseados durante la inicialización. Al igual que en el setup físico, se incorpora un prisma cuadrado de confinamiento (lado interno de 50.6 mm). Se impone una separación inicial de 0.1 mm entre superficies para evitar traslapes artificiales en la etapa de pre-procesamiento. La Figura 7.1 ilustra el lecho final de 525 esferas (21 capas).

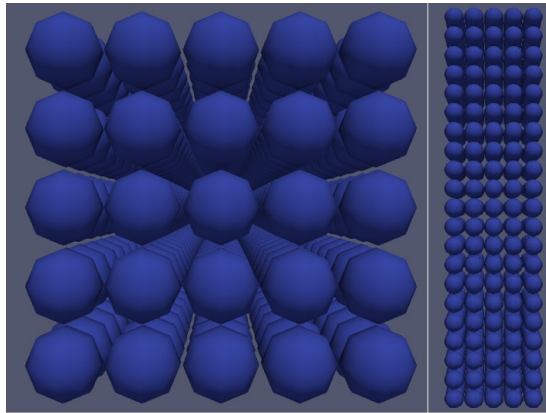


Figura 7.1: Representación geométrica de la configuración ordenada SC ( $5 \times 5 \times 21$ ).

En la configuración aleatoria, las partículas se generan en posiciones aleatorias dentro de la sección transversal del cilindro. Para cada esfera, se ejecutan hasta 500 intentos de muestreo bajo la condición de no-traslape. Una vez conformadas las capas (Figura 7.2a)), las partículas se liberan bajo un campo gravitatorio numérico, permitiendo su acomodación hasta alcanzar el empaquetamiento final (Figura 7.2b)).

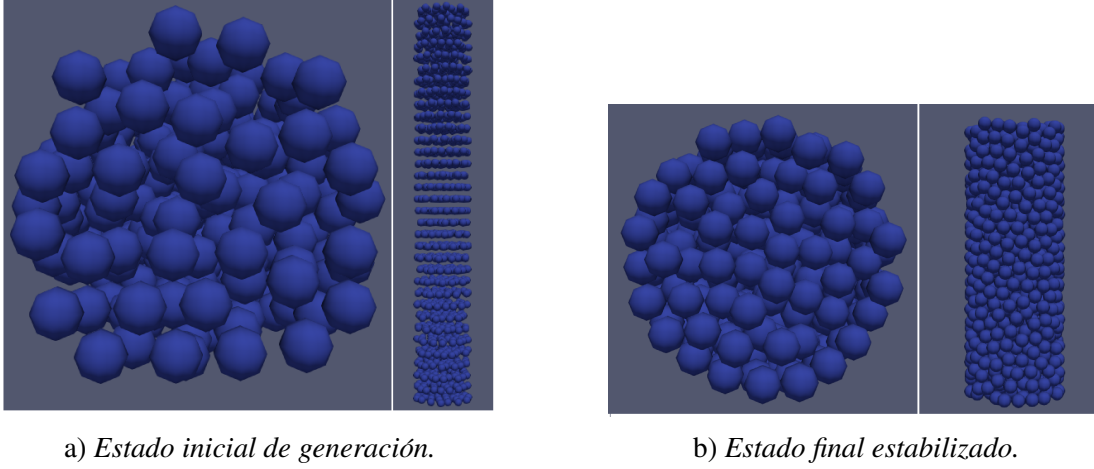


Figura 7.2: Evolución del empaquetamiento en la configuración aleatoria mediante DEM.

El equilibrio mecánico se garantiza mediante un paso temporal de  $\Delta t = 1 \times 10^{-6}$  s y un periodo de relajación de 1 s. El sistema se considera estabilizado cuando la velocidad de traslación de todas las partículas es inferior a  $1 \times 10^{-4}$  m/s, momento en el cual se exporta la microestructura en formato `.vtk`.

## 7.2. Modelo térmico acoplado a DEM

El modelo térmico opera de forma secuencial al DEM, utilizando la microestructura exportada como dominio computacional. A partir de los centros y radios de las esferas, se reconstruye la red de interacciones térmicas.

Para el fluido, se descuenta el volumen sólido ocupado por las partículas dentro de cada celda cilíndrica para el cálculo de su capacidad térmica y masa. El intercambio de calor por conducción directa se fundamenta en el traslape mecánico ( $\delta_{ij}$ ), calculado geométricamente como:

$$\delta_{ij} = \max(0, d_p - \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|) \quad (7.1)$$

Esta consistencia entre el traslape mecánico (ajustado mediante el módulo de Young) y la resistencia de contacto térmica es el núcleo del proceso de calibración. Se asume que todos los volúmenes de control (partículas, fluido, anillos del manto y bridas) son isotérmicos por elemento, actualizándose sus temperaturas dinámicamente mediante balances de energía transitorios.

### **7.3. Condiciones iniciales, condiciones de borde y métricas de comparación**

Las condiciones iniciales del modelo se definen a partir del estado térmico medido al inicio de cada ensayo, imponiendo una temperatura inicial uniforme  $T(t = 0) = T_{\text{amb}}$ . Esta hipótesis es coherente con el protocolo experimental, donde el sistema se estabiliza con el entorno antes de iniciar el calentamiento.

La condición de borde térmica en la base del lecho se establece en la brida inferior cerrada. La potencia térmica inyectada se estima como una fracción de la potencia eléctrica total suministrada, la cual es ajustada en función de la evolución térmica de la primera esfera (aquella en contacto directo con la base). Este ajuste es necesario para representar la resistencia de contacto térmica entre las superficies metálicas de la interfaz de apoyo, un fenómeno que presenta una alta complejidad técnica.

La literatura clásica en conductancia térmica de contacto muestra una dispersión experimental considerable y una marcada dependencia con la presión de la interfaz, especialmente en regímenes de baja presión como el de este montaje [44]. Debido a que las condiciones superficiales y la presión de contacto real poseen una incertidumbre significativa, no es factible seleccionar un único valor teórico representativo. En consecuencia, se adopta un rango de valores de resistencia de contacto dentro de los rangos

reportados, ajustándolos de forma consistente con las mediciones experimentales de la esfera base en diferentes instantes de tiempo. Este procedimiento permite asegurar que la potencia que efectivamente ingresa al lecho sea coherente con la realidad física del experimento.

Una vez determinada la potencia neta de entrada, se incorporan los términos de pérdidas en la brida inferior que representan: (i) la transferencia de calor desde la brida hacia el ambiente y (ii) el flujo hacia el conjunto manto-anillo inferior a través del aislante cerámico. El resto de los elementos expuestos intercambian calor con el entorno mediante convección natural y radiación, empleando las formulaciones descritas en la metodología.

En cuanto a las propiedades termofísicas, para las simulaciones 3D se actualizaron los valores correspondientes al acero inoxidable real utilizado en el laboratorio (Tabla 7.1), cuya conductividad es notablemente inferior a la del acero al carbono idealizado.

| <b>Propiedad (Acero Inoxidable)</b> | <b>Valor</b> |
|-------------------------------------|--------------|
| Conductividad térmica [W/m·K]       | 16.3         |
| Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]       | 7930         |
| Calor específico [J/kg·K]           | 500          |
| Coefficiente de Poisson [-]         | 0.29         |

Tabla 7.1: *Propiedades del acero inoxidable 304 utilizado en el lecho empacado para las simulaciones 3D [8].*

Las métricas de comparación consisten en la evolución temporal y los perfiles axiales  $T(z, t)$  generados cada 10 minutos. Para ello, se ordenan las partículas por altura con el fin de obtener una curva continua que se contrasta con los puntos discretos medidos experimentalmente. Finalmente, el modelo reporta variables mecánicas derivadas del

DEM, como el traslape  $\delta_{ij}$  y la resistencia calculada, para sustentar el análisis de la calibración que se presenta en el capítulo siguiente.

## Capítulo 8

# Metodología de calibración y validación de la resistencia térmica partícula–partícula mediante DEM

Dado que la potencia térmica efectivamente transferida desde el sistema de calentamiento hacia el lecho no puede determinarse de forma directa con precisión a partir de la señal eléctrica medida, se adopta un procedimiento de ajuste del nivel de potencia de entrada del modelo. Este ajuste se realiza con el objetivo de reproducir el nivel térmico observado experimentalmente en la región inferior del lecho, de modo que el modelo numérico represente de manera consistente las condiciones reales de operación.

Para ello, se utiliza como referencia la primera esfera instrumentada, correspondiente a la esfera en contacto con la brida inferior cerrada. La potencia aplicada en el modelo térmico se ajusta hasta lograr un buen acople entre la temperatura medida en dicha esfera y la temperatura predicha por el modelo bajo las mismas condiciones experimentales. Una vez obtenido este ajuste, la potencia resultante se mantiene fija para el resto de los análisis en configuración ordenada, permitiendo que las comparaciones posteriores reflejen principalmente el efecto de los mecanismos de transferencia de calor considerados y de los parámetros de contacto calibrados en etapas siguientes.

La calidad del ajuste de potencia se evalúa mediante la comparación directa entre la temperatura medida experimentalmente en la primera esfera instrumentada y la temperatura calculada por el modelo (esta esfera es la central de la primera capa de la red 5x5, la cual es asegurada su posición en ambos casos debido al orden de la configuración) para instantes discretos durante el calentamiento. La Tabla 8.1 podemos ver los resultados obtenidos para  $t = \{10, 20, 30, 40, 50, 60\}$  [min], donde podemos notar una mayor diferencia en la primeros tiempos debido a su condición transiente y luego cuando torna a una condición mas estacionario se reducen la diferencias de temperatura.

Tabla 8.1: Comparación entre temperatura experimental y modelada en la primera esfera instrumentada para distintos tiempos.

| Tiempo [min] | $\Delta T = T_{\text{mod}} - T_{\text{exp}} [^{\circ}\text{C}]$ |
|--------------|-----------------------------------------------------------------|
| 10           | -2.6                                                            |
| 20           | -1.5                                                            |
| 30           | -0.3                                                            |
| 40           | -0.1                                                            |
| 50           | 0.3                                                             |
| 60           | 0.1                                                             |

Una vez fijada la potencia de entrada, se realiza la calibración del módulo de Young que es el parámetro mecánico que gobierna el comportamiento de los traslapes en los contactos entre partículas en la simulación DEM y, por tanto, influye directamente en la conducción térmica partícula-partícula representada en el modelo.

## 8.1. Validación térmica del parámetro calibrado

La calibración se implementa mediante un procedimiento iterativo: para cada valor candidato de módulo de Young se obtiene la red de contactos y los traslapes generados a partir de DEM, se ejecuta el modelo térmico tridimensional bajo las mismas condiciones experimentales del caso ordenado y se comparan los perfiles axiales de temperatura calculados con los medidos. Se repite hasta lograr un acople satisfactorio entre la respuesta térmica teórica y los datos experimentales.

A partir de este procedimiento, se obtiene un valor de módulo de Young  $E = 1 \cdot 10^8$  [Pa], el cual entrega un buen ajuste para los perfiles de temperatura en la configuración ordenada. La figura 8.1 presenta la comparación entre el modelo y los datos experimentales, evidenciando el buen acuerdo alcanzado.

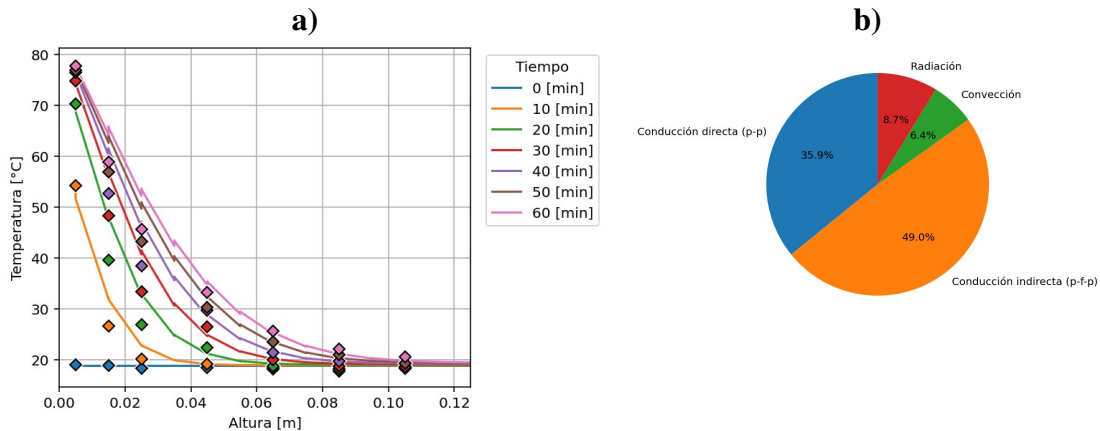


Figura 8.1: Resultados del modelo ordenado utilizando  $E = 1 \cdot 10^8$  [Pa]: a) Comparación de perfiles de temperatura axial entre el modelo y los datos experimentales. b) Contribución relativa acumulada de los mecanismos de transferencia de calor durante la simulación.

También en la figura 8.1 podemos cuantificar el peso de cada fenómeno de transferencia de calor dentro del lecho, donde aunque el fenómeno predominante es la conducción indirecta, la conducción directa también juega un rol importante en la transferencia de calor.

Con este valor del módulo de Young, se analiza la distribución de los traslapes mecánicos y su efecto sobre la resistencia de conducción directa. Este análisis permite verificar la coherencia física del parámetro calibrado y relacionar la respuesta térmica del término del lecho. En la figura 8.2 podemos apreciar los comportamientos de los traslapes y la resistencia partícula-partícula. En conjunto, se evidencia la relación inversa esperada entre traslape y resistencia de contacto, consistente con lo anticipado en el análisis unidimensional, dado que a mayor traslape implica una mayor área de contacto significando una mayor transferencia de calor y por lo tanto un menor valor de la resistencia.

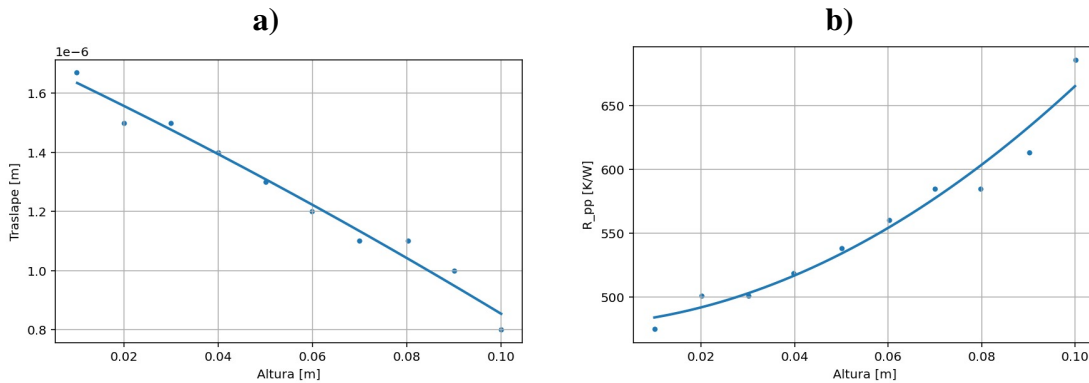


Figura 8.2: Resultados del modelo ordenado utilizando  $E = 1 \cdot 10^8$  [Pa]: a) Valores de traslape mecánico. b) Valores de la resistencia de contacto.

Una vez calibrado el módulo de Young en el lecho ordenado, se evalúa su validez al aplicar el mismo valor  $E = 1 \cdot 10^8$  [Pa] en la configuración aleatoria. Para ello, la geometría del lecho se obtiene desde simulaciones DEM, a partir de las cuales se construye la red de contactos y se ejecuta el modelo térmico bajo condiciones experimentales equivalentes. La figura 8.3 presenta la comparación entre perfiles de temperatura axial del modelo y los datos experimentales mostrando un buen acople de las curvas de temperatura, junto con la contribución relativa de los mecanismos de transferencia de calor donde podemos visualizar que se mantiene la predominancia del fenómeno de conducción indirecta, seguido por la conducción directa.

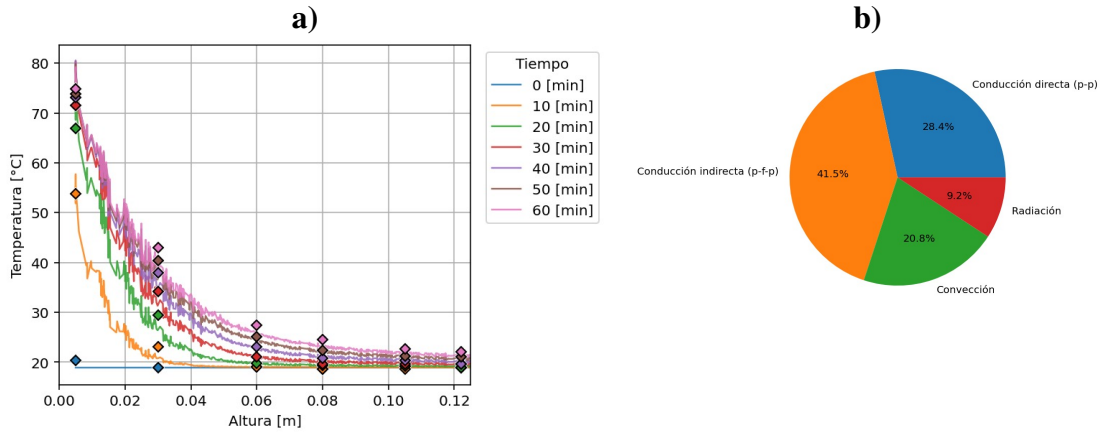


Figura 8.3: Resultados del modelo aleatorio utilizando  $E = 1 \cdot 10^8$  [Pa]: a) Comparación de perfiles de temperatura axial entre el modelo y los datos experimentales. b) Contribución relativa acumulada de los mecanismos de transferencia de calor durante la simulación.

Para esta configuración se tiene una dispersión para los traslapes mecánicos y la resistencia de contacto estudiada debido a la aleatoriedad de esta. En la figura 8.4 podemos ver como están distribuidos los valores obtenidos para la red contactos, donde si bien existe una dispersión de los datos, se aprecia una tendencia a la baja de los traslapes a medida que se avanza en la dirección  $z$  del lecho, mientras que la resistencia experimental lo contrario, es decir, un aumento a medida que aumenta la altura, siendo este comportamiento es consistente a lo obtenido previamente en la configuración ordenada.

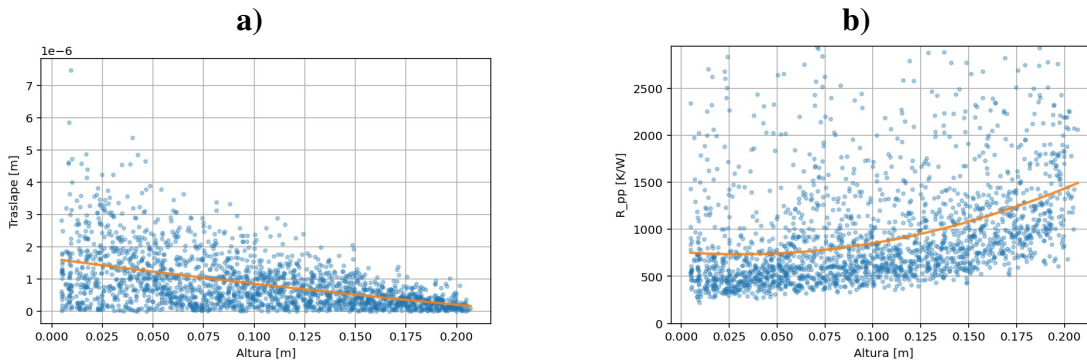


Figura 8.4: Resultados del modelo aleatorio utilizando  $E = 1 \cdot 10^8$  [Pa]: a) Valores de traslape mecánico. b) Valores de la resistencia de contacto.

## 8.2. Análisis de sensibilidad del modelo

Dado que la conducción indirecta a través de la fase gaseosa representa el mecanismo de mayor contribución relativa en las simulaciones, se realiza un análisis de sensibilidad respecto de los parámetros asociados a este fenómeno. En particular, se estudia el efecto del espesor de la película de aire alrededor de las esferas y de la distancia mínima de conducción considerada para la transferencia de calor entre superficies, evaluando su impacto en los perfiles de temperatura y en la partición de mecanismos. Para esto utilizamos un valor de espesor de 1.08 veces el radio de la partícula y  $2 \cdot 10^{-6}$  para la distancia mínima de conducción, obteniendo lo mostrado en la figura 8.5 para los casos aleatorio y ordenado.

Al incrementar los parámetros asociados a la conducción indirecta a través de la fase gaseosa (espesor efectivo de película y distancia mínima de transferencia), aumenta la contribución del mecanismo de conducción indirecta y, en consecuencia, se eleva la transferencia total predicha por el modelo. En la configuración ordenada, este incremento se traduce en un aumento sistemático leve de los perfiles de temperatura respecto del caso base, generando un mayor desacople con los datos experimentales. En contraste, en la configuración aleatoria el modelo presentaba una leve subestimación de temperatura en el caso base; por tanto, el aumento de la contribución p-f-p eleva los perfiles y produce un mejor acople entre curvas. Esta diferencia se atribuye a la microgeometría del empaquetamiento: el lecho aleatorio presenta una mayor proporción de pares de partículas con separaciones pequeñas sin contacto mecánico dominante (“casi contactos”), los cuales se ven directamente afectados por el alcance de la conducción indirecta, actuando como caminos adicionales que compensan limitaciones locales de conectividad térmica. En el lecho ordenado, la conectividad por contacto directo es más uniforme y las separaciones interparticulares fuera de contacto son más regulares, por lo que el incremento de conducción indirecta tiende a introducir una transferencia adicional global que sobreestima la respuesta térmica.

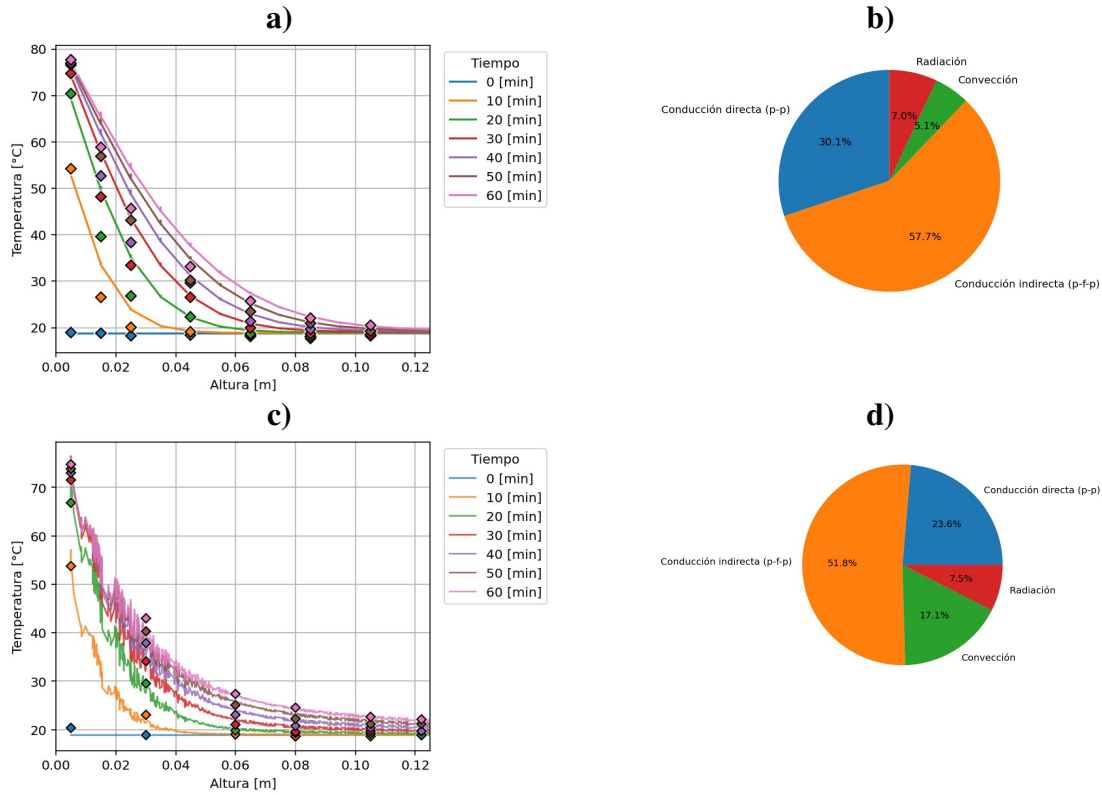


Figura 8.5: Resultado análisis de sensibilidad de conducción indirecta utilizando  $E = 1 \cdot 10^8$  [Pa];  $\delta_{lens} = 1.08 \cdot r_{esfera}$ ;  $s = 2 \cdot 10^{-6}$ : a) Comparación de perfiles de temperatura axial entre el modelo y los datos experimentales (configuración ordenada). b) Contribución relativa acumulada de los mecanismos de transferencia de calor durante la simulación (configuración ordenada). c) Comparación de perfiles de temperatura axial entre el modelo y los datos experimentales (configuración aleatoria). d) Contribución relativa acumulada de los mecanismos de transferencia de calor durante la simulación (configuración aleatoria).

En síntesis, el análisis de sensibilidad asociado a la conducción indirecta muestra que el espesor efectivo de película y la distancia mínima de conducción constituyen parámetros de alto impacto en la respuesta térmica del lecho, al modificar el alcance y la intensidad de las interacciones p-f-p. El aumento de estos parámetros incrementa la transferencia total predicha y eleva la fracción relativa atribuida a la conducción indirecta, afectando el acople modelo-experimento de manera distinta según la micro-geometría del empaquetamiento: mientras en la configuración ordenada tiende a introducir una sobreestimación global del nivel térmico, en la configuración aleatoria puede compensar déficits de conectividad térmica asociados a la presencia de “casi contactos”. En con-

secuencia, estos resultados justifican la necesidad de acotar dichos parámetros dentro de rangos físicamente consistentes y refuerzan la conveniencia de utilizar la configuración ordenada como base de calibración y la configuración aleatoria como instancia de validación del modelo.

Con el fin de evaluar la influencia del parámetro mecánico que gobierna el traslape normal en los contactos, se realiza un análisis de sensibilidad respecto del módulo de Young. El caso base  $E = 1 \cdot 10^8$  [Pa], calibrado a partir de la configuración ordenada, ya se presentó previamente. En esta sección se consideran dos valores,  $E = 1 \cdot 10^7$  [Pa] y  $E = 1 \cdot 10^9$  [Pa], manteniendo constantes el resto de parámetros del modelo (potencia de entrada ajustada, parámetros de conducción indirecta, propiedades térmicas y correlaciones de pérdidas).

En términos físicos, un aumento del modulo de Young reduce los traslapes mecánicos en los contactos, lo que tiende a incrementar la resistencia térmica de contacto  $R_{pp}$  y disminuir la contribución efectiva de la conducción directa partícula-partícula. Por el contrario, valores menores de  $E$  inducen traslapes mayores, reducen  $R_{pp}$  y favorecen la conducción directa. A continuación se presentan primero los resultados de la configuración ordenada, para luego verificar con la configuración aleatoria las tendencias obtenidas.

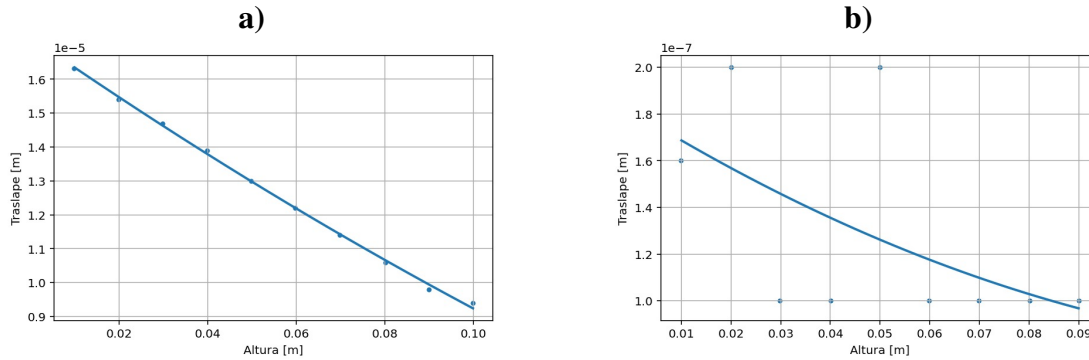


Figura 8.6: Resultado análisis de sensibilidad de módulo de Young para configuración ordenada: a) Valores de traslape mecánico con  $E = 1 \cdot 10^7 [Pa]$ . b) Valores de traslape mecánico con  $E = 1 \cdot 10^9 [Pa]$ .

En la figura 8.6 podemos apreciar el aumento del traslape inversamente proporcional a la disminución del módulo de Young, notándose una clara tendencia respecto de la altura del lecho como era de esperarse. Para el caso contrario, podemos ver como se invierten los papeles pero no solo ocurre esto, sino que se pierde toda tendencia predictiva del traslape a medida que aumenta la altura en el lecho, siendo esto resultado del aumento de la rigidez de las esferas en la simulación DEM.

Como era de esperarse la resistencia tiene un comportamiento inverso a los traslapes mecánicos como se puede ver en la figura 8.7. Se puede notar las mismas tendencias en cada caso pero también es importante notar que la magnitud disminución de la resistencia p-p en el caso de  $E = 1 \cdot 10^7 [Pa]$  respecto del caso original es menor que la magnitud del aumento de la resistencia en el caso de  $E = 1 \cdot 10^9 [Pa]$ , entonces mostrando la resistencia una mayor sensibilidad al aumento del módulo de Young.

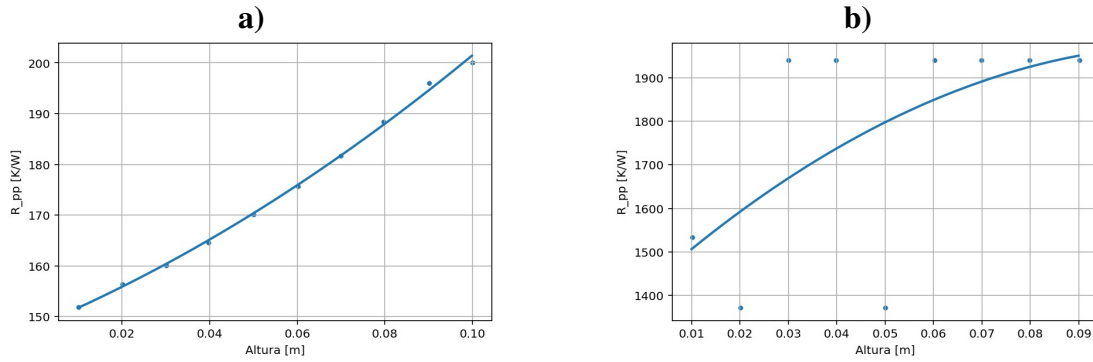


Figura 8.7: Resultado análisis de sensibilidad de módulo de Young para configuración ordenada: a) Valores de Resistencia p-p con  $E = 1 \cdot 10^7$  [Pa]. b) Valores de Resistencia p-p con  $E = 1 \cdot 10^9$  [Pa].

Las consecuencias térmicas de estas variaciones mecánicas se observan en la figura 8.8. Para  $E = 1 \cdot 10^7$  [Pa], el aumento de la conductancia efectiva del contacto se traduce en una mayor transferencia por conducción directa, lo que eleva las temperaturas predichas a lo largo del lecho respecto del caso base. En contraste, para  $E = 1 \cdot 10^9$  [Pa] la mayor rigidez reduce la intensidad de la interacción partícula-partícula, disminuyendo la contribución de la conducción directa y tendiendo a un perfil térmico menos pronunciado. Esta redistribución se refleja en la figura 8.9, donde se aprecia una disminución relativa del aporte de la conducción partícula-partícula al aumentar  $E$  y un incremento proporcional de los mecanismos restantes. En conjunto, los resultados confirman que el parámetro mecánico  $E$  controla indirectamente la respuesta térmica del lecho mediante la modificación del intercambio en los contactos, lo que motiva analizar si estas mismas tendencias se mantienen en una red de contactos heterogénea como la configuración aleatoria.

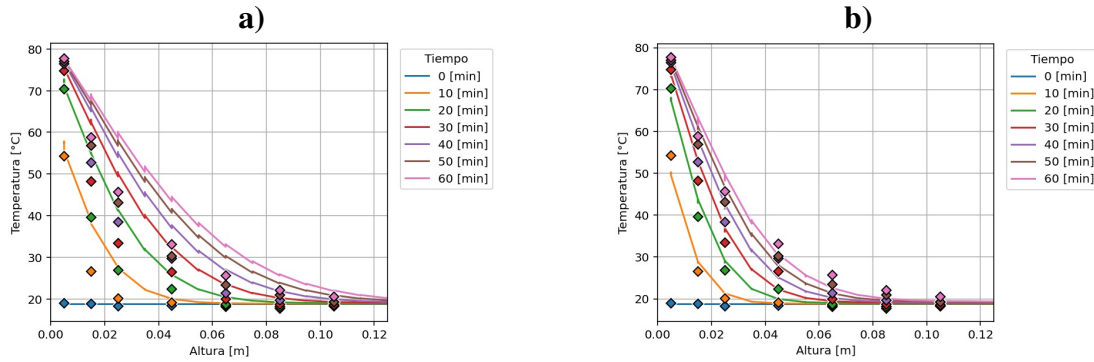


Figura 8.8: Resultado análisis de sensibilidad de módulo de Young para configuración ordenada: a) Curvas de temperatura con  $E = 1 \cdot 10^7$  [Pa]. b) Curvas de temperatura con  $E = 1 \cdot 10^9$  [Pa].

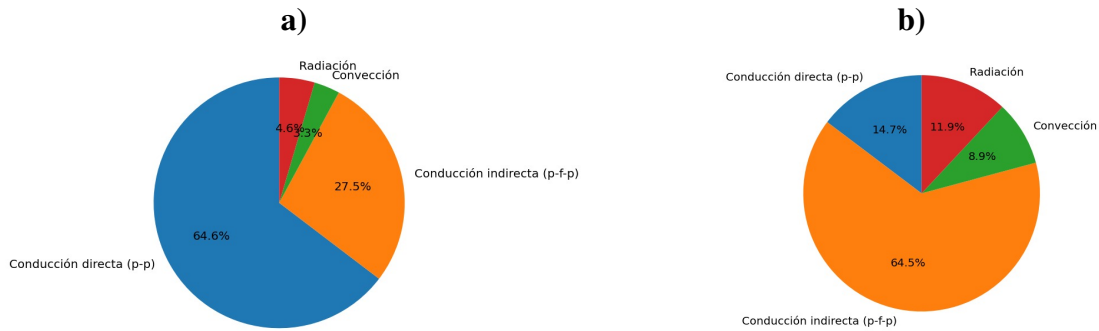


Figura 8.9: Resultado análisis de sensibilidad de módulo de Young para configuración ordenada: a) Contribución relativa acumulada de los mecanismos de transferencia de calor con  $E = 1 \cdot 10^7$  [Pa]. b) Contribución relativa acumulada de los mecanismos de transferencia de calor con  $E = 1 \cdot 10^9$  [Pa].

En la configuración aleatoria (Figura 8.10) se mantiene el efecto esperado del módulo de Young sobre el traslape mecánico. Para  $E = 1 \cdot 10^7$  [Pa] se observan traslapes mayores y una variación sistemática a lo largo de la altura del lecho, coherente con la distribución de cargas en el empaquetamiento. En cambio, al aumentar la rigidez a  $E = 1 \cdot 10^9$  [Pa], los traslapes disminuyen de forma marcada y la dependencia con la altura se atenúa, reflejando una respuesta más dominada por contactos de baja deformación y mayor dispersión local.

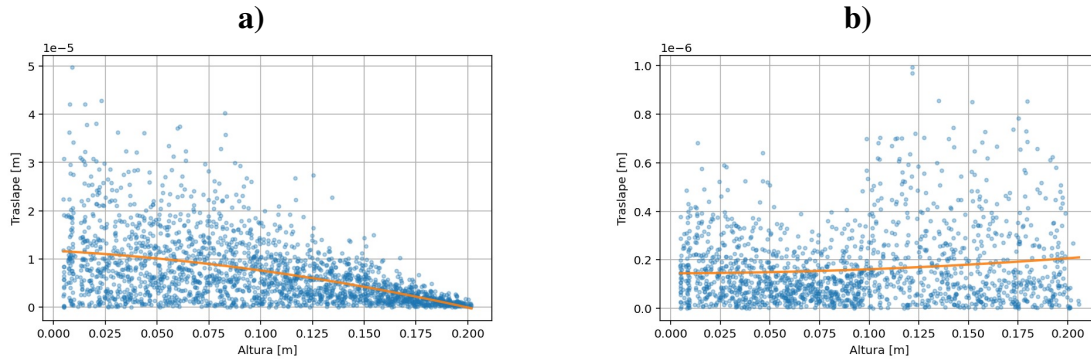


Figura 8.10: Resultado análisis de sensibilidad de módulo de Young para configuración aleatoria: a) Valores de traslape mecánico con  $E = 1 \cdot 10^7 [\text{Pa}]$ . b) Valores de traslape mecánico con  $E = 1 \cdot 10^9 [\text{Pa}]$ .

La respuesta de la resistencia térmica de contacto (Figura 8.11) es consistente con la modificación de los traslapes: el caso  $E = 1 \cdot 10^7 [\text{Pa}]$  presenta resistencias menores y con una tendencia espacial más definida, mientras que para  $E = 1 \cdot 10^9 [\text{Pa}]$  se registran incrementos significativos de  $R_{pp}$ . Adicionalmente, se aprecia que el aumento de resistencia al incrementar  $E$  es más pronunciado que la disminución obtenida al reducirlo, evidenciando una sensibilidad asimétrica del contacto térmico frente a cambios de rigidez y una pérdida de capacidad “predictiva” con la altura cuando la rigidez es elevada.

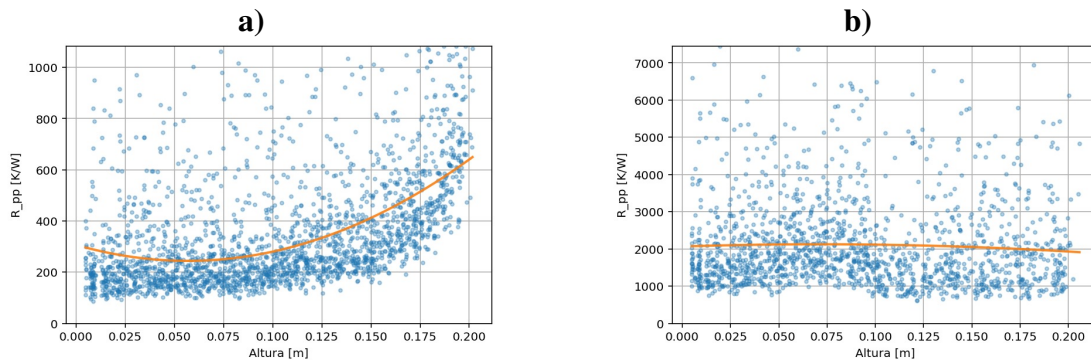


Figura 8.11: Resultado análisis de sensibilidad de módulo de Young para configuración aleatoria: a) Valores de Resistencia p-p con  $E = 1 \cdot 10^7 [\text{Pa}]$ . b) Valores de Resistencia p-p con  $E = 1 \cdot 10^9 [\text{Pa}]$ .

Estas diferencias a nivel de contacto se traducen en cambios en la respuesta térmica global (Figura 8.12). Para  $E = 1 \cdot 10^7$  [Pa] el modelo tiende a predecir perfiles de temperatura más altos, mientras que para  $E = 1 \cdot 10^9$  [Pa] la respuesta se atenúa. No obstante, en comparación con la configuración ordenada, el lecho aleatorio presenta una sensibilidad menor en los perfiles, lo cual es razonable dada la mayor cantidad de partículas y la mayor heterogeneidad de la red de contactos, que distribuye el efecto del parámetro mecánico a través de múltiples caminos de transferencia.

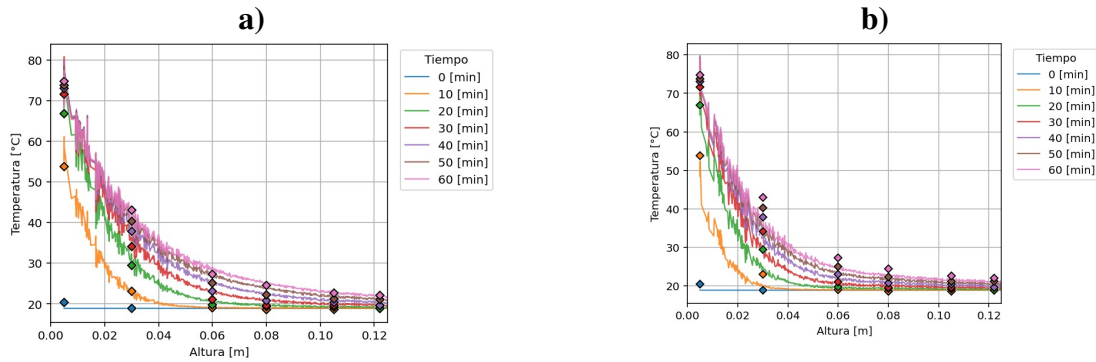


Figura 8.12: Resultado análisis de sensibilidad de módulo de Young para configuración aleatoria: a) Curvas de temperatura con  $E = 1 \cdot 10^7$  [Pa]. b) Curvas de temperatura con  $E = 1 \cdot 10^9$  [Pa].

Finalmente, la partición de mecanismos (Figura 8.13) confirma el impacto del módulo de Young sobre el peso relativo de la conducción directa partícula-partícula. En el caso de menor rigidez ( $E = 1 \cdot 10^7$  [Pa]) aumenta de forma notoria la contribución acumulada asociada a la transferencia p-p, mientras que para  $E = 1 \cdot 10^9$  [Pa] dicha contribución disminuye considerablemente, redistribuyendo el aporte hacia los mecanismos restantes. En conjunto, los resultados muestran que, aun en una geometría aleatoria, la variación de  $E$  modifica la conectividad térmica efectiva del lecho principalmente a través del intercambio en los contactos.

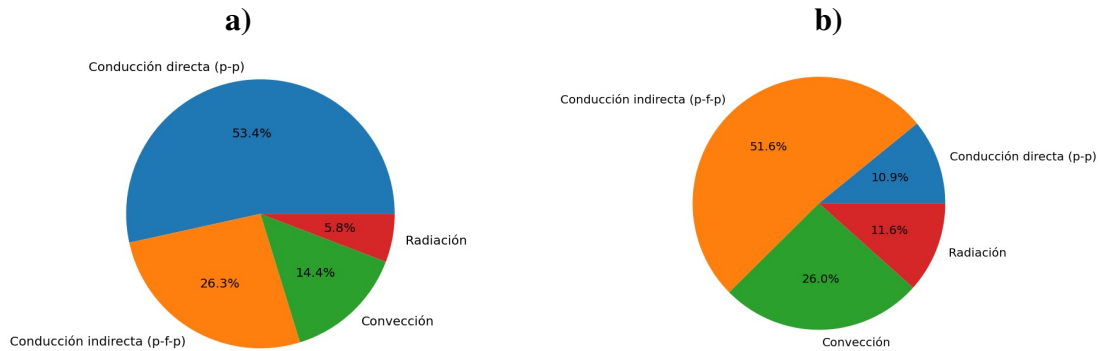


Figura 8.13: Resultado análisis de sensibilidad de módulo de Young para configuración aleatoria: a) Contribución relativa acumulada de los mecanismos de transferencia de calor con  $E = 1 \cdot 10^7 [Pa]$ . b) Contribución relativa acumulada de los mecanismos de transferencia de calor con  $E = 1 \cdot 10^9 [Pa]$ .

En síntesis, el análisis de sensibilidad evidencia que el módulo de Young controla la respuesta térmica del lecho principalmente a través de su efecto sobre los traslapes y, en consecuencia, sobre la resistencia de contacto  $R_{pp}$  y la contribución relativa de la conducción partícula–partícula. Además, se observa que la configuración aleatoria presenta una sensibilidad global menor que la ordenada, atribuible a la mayor heterogeneidad de su red de contactos. Estos resultados delimitan el rango de  $E$  compatible con un comportamiento térmico representativo y sirven como base para el análisis final de la influencia de los parámetros asociados a la conducción indirecta.

### 8.3. Análisis de consistencia mecánica y metodología de calibración

Una vez validado que el modelo numérico reproduce de manera consistente los perfiles de temperatura experimentales mediante el ajuste del módulo de Young ( $E$ ), es posible establecer un marco de trabajo para la transferencia de este parámetro. Es fundamental destacar que el valor de  $E$  obtenido actúa como una *rigidez térmica equivalente* que compensa efectos de rugosidad superficial; por lo tanto, la clave del éxito de este

modelo no radica en la universalidad del valor numérico de  $E$ , sino en la validez del procedimiento de anclaje y transferencia.

### 8.3.1. Estudio de consistencia entre configuraciones (NRMSE)

Como parte del estudio fenomenológico de este trabajo, se evaluó la consistencia de la red de contactos entre las configuraciones ordenada y aleatoria utilizando el error cuadrático medio normalizado (NRMSE) entre las tendencias de traslape mecánico ( $\delta(z)$ ). Para un conjunto de  $n$  puntos de evaluación en el rango axial, se define:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [\delta_{\text{al}}(z_k) - \delta_{\text{ord}}(z_k)]^2} \quad ; \quad \text{NRMSE}(\%) = \frac{\text{RMSE}}{\delta_{\text{máx}} - \delta_{\text{mín}}} \times 100 \quad (8.1)$$

En esta tesis, se obtuvo un valor de  $\text{NRMSE} = 8.56 \%$ . Este análisis permitió confirmar que la tendencia mecánica en el lecho aleatorio captura la física validada del lecho ordenado, presentándose aquí como una herramienta de verificación de la robustez del modelo. Si bien los investigadores son libres de realizar esta comparación para estudiar comportamientos entre curvas, se aclara que esta métrica queda fuera del protocolo de calibración práctico, ya que el criterio de éxito reside en la respuesta térmica del sistema.

### 8.3.2. Procedimiento propuesto para la calibración del modelo

A continuación, se propone un protocolo de cuatro etapas para investigadores que busquen caracterizar la conectividad térmica en sus propios sistemas discretos. El objetivo principal es asegurar que la resistencia térmica partícula-partícula esté anclada a la realidad física mediante comparaciones térmicas directas.

1. **Definición del sistema:** replicar la geometría del lecho y asignar las propiedades térmicas (conductividad  $k$ , densidad  $\rho$ , calor específico  $c_p$ ) según la materialidad

real de las partículas. El módulo de Young  $E$  se define como el único parámetro ajustable para representar la rigidez de contacto.

2. **Referencia experimental en configuración ordenada:** realizar un ensayo de calentamiento transitorio utilizando una configuración ordenada (*Simple Cubic*). Esta etapa es crítica, ya que al eliminar la incertidumbre geométrica del azar, se logra un entorno controlado para el anclaje térmico.
3. **Calibración por ajuste de curvas de temperatura:** desarrollar el modelo térmico–DEM que replique el experimento ordenado. El investigador debe ejecutar simulaciones variando el valor de  $E$  hasta alcanzar un **ajuste satisfactorio entre las curvas de temperatura axial modeladas y las experimentales**. Este ajuste térmico constituye el criterio de aceptabilidad para determinar el módulo de Young equivalente.
4. **Transferencia del parámetro:** una vez alcanzado el ajuste térmico en el caso ordenado, el valor de  $E$  resultante puede transferirse a configuraciones aleatorias o condiciones de operación más complejas. La validez de esta transferencia se fundamenta en los resultados de este trabajo, donde se demostró que un parámetro calibrado en ordenado mantiene su fidelidad térmica en el caos estadístico de un lecho aleatorio.

# Capítulo 9

## Conclusiones

En esta tesis se desarrolló y aplicó una metodología de calibración térmica para representar la conducción partícula–partícula en lechos empacados mediante DEM, apoyada en un modelo térmico (1D y 3D) y en evidencia experimental. El enfoque central consistió en vincular el comportamiento mecánico de los contactos con la transferencia de calor, de modo que la resistencia térmica p–p quede determinada por parámetros físicamente interpretables: (i) el área efectiva de contacto (vía radio de contacto, gobernado por el traslape) y (ii) la conductividad térmica del material (definida por la materialidad de las esferas). En consecuencia, la calibración que se controla mediante DEM se plantea sobre el traslape y su tendencia axial, manteniendo la conductividad acorde al material utilizado.

Se desarrolló un marco de modelación que representa explícitamente los mecanismos relevantes de transferencia de calor en el lecho, incorporando la red de contactos y la geometría obtenida desde DEM. La implementación permitió simular configuraciones ordenadas y aleatorias y cuantificar la contribución relativa de los mecanismos, además de evaluar la sensibilidad frente a parámetros mecánicos y de conducción indirecta.

Se diseñó y construyó un montaje experimental instrumentado para medir perfiles axiales de temperatura durante el calentamiento, proporcionando una base consistente para ajustar condiciones de entrada y contrastar la respuesta del modelo. La instrumentación

y el registro de potencia/temperatura permitieron disponer de datos suficientes para sostener la etapa de calibración y validación.

Se propuso una metodología de calibración transferible basada en el *anclaje térmico* del modelo numérico. El estudio demostró que el módulo de Young puede utilizarse como un parámetro de rigidez térmica equivalente, el cual, una vez calibrado para reproducir el comportamiento térmico en una configuración ordenada, permite predecir con precisión la respuesta transitoria en un lecho aleatorio. Para validar la robustez de esta transferencia desde una perspectiva mecánica, se utilizó el NRMSE entre las tendencias cuadráticas de traslape mecánico ( $\delta(z)$ ), obteniéndose un valor de 8.56 % para el caso base ( $E = 100$  MPa). Este análisis confirmó que la red de contactos en el empaquetamiento aleatorio mantiene la coherencia física con la referencia ordenada validada experimentalmente, a pesar de la dispersión estadística inherente a los medios desordenados. Asimismo, se concluyó que mientras el coeficiente  $R^2$  es altamente representativo en redes regulares (con valores superiores a 0.95), el NRMSE entre tendencias es una métrica que permite evaluar la consistencia global en sistemas aleatorios, donde la variabilidad local suele enmascarar la física promedio del lecho.

El aporte principal de este trabajo es una metodología práctica y reproducible para calibrar la conducción directa p–p en modelos DEM sin depender de un valor nominal de módulo de Young. Bajo este enfoque, la calibración se realiza mediante el ajuste de las curvas de temperatura axial en una configuración controlada (ordenada), permitiendo que el parámetro resultante sea transferible a distintos escenarios de empaquetamiento. Esto asegura que la conectividad térmica del modelo esté anclada a la realidad física, compensando de manera indirecta pero consistente los efectos de la rugosidad superficial.

Como trabajo futuro, se recomienda ampliar la validación experimental con distintos materiales y tamaños de partícula para consolidar los rangos de aplicabilidad del

método. Asimismo, resulta de interés incorporar la cuantificación de la incertidumbre experimental en el criterio de aceptación térmica y explorar extensiones donde la calibración considere simultáneamente variabilidad en las condiciones de carga mecánica y parámetros de conducción indirecta. Finalmente, se sugiere profundizar en el estudio de materiales de baja conductividad que invaliden la consideración de esfera isotérmica, así como investigar el impacto explícito de la rugosidad superficial y realizar ensayos en condiciones de vacío o gases de baja conductividad para aislar y caracterizar con mayor precisión el fenómeno de conducción sólida directa.

## Bibliografía

- [1] A. Meier, C. Winkler, and D. Wuillemin, “Experiment for modeling high temperature rock bed storage,” *Solar Energy Materials*, vol. 24, no. 1-4, pp. 255–264, 1991.
- [2] W. W. M. Siu and S. H.-K. Lee, “Contact resistance measurement and its effect on the thermal conductivity of packed sphere systems,” *Journal of Heat Transfer*, vol. 126, no. 6, pp. 886–895, Dec. 2004. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/1.1795231>
- [3] I. Mishra, A. M. Lattanzi, C. Q. LaMarche, and C. M. Hrenya, “Experimental validation of indirect conduction theory and effect of particle roughness on wall-to-particle heat transfer,” *AIChE Journal*, vol. 65, no. 10, p. e16703, 2019.
- [4] L. Lin, L. Wang, Y. Bai, X. Lin, S. Zhang, Z. Ge, and H. Chen, “Heat transfer characteristics of the innovative spray-type packed bed thermal energy storage: An experimental study,” *Journal of Energy Storage*, vol. 73, p. 108573, 2023.
- [5] Thermtest Inc., “Materials thermal properties database,” <https://thermtest.com/thermal-resources/materials-database/>, 2025, consultado el 15 de agosto de 2025.
- [6] Total Materia AG, “Propiedades del acero,” <https://www.totalmateria.com/es/propiedades/propiedades-del-acero/>, 2025, fragmento consultado: “Las propiedades del acero más importantes son la conformabilidad y durabilidad, resistencia a la tracción y su buena conductividad térmica...”; consultado el 15 de agosto de 2025.

- [7] AreaCiencias, “El aire y sus componentes o gases,” <https://www.areaciencias.com/meteorologia/componentes-del-aire/>, 2022, consultado el 15 de agosto de 2025.
- [8] Metalistería V3. (2021, Mar.) Acero inoxidable 304: Características y propiedades. [Online]. Available: <https://www.metalisteriav3.es/acero-inoxidable-304-caracteristicas-propiedades/>
- [9] European Association for Storage of Energy (EASE), “Energy leaders highlight the critical role of storage in the energy transition,” <https://ease-storage.eu/news/energy-leaders-highlight-the-critical-role-of-storage-in-the-energy-transition/>, 2024, accedido el 1 de mayo de 2025.
- [10] InfoLink, “Global energy storage market: review and outlook,” *InfoLink*, 2025. [Online]. Available: <https://www.infolink-group.com/energy-article/energy-storage-topic-global-energy-storage-market-review-outlook>
- [11] P. Schwarzmayer, F. Birkelbach, H. Walter, F. Javernik, M. Schwaiger, and R. Hofmann, “Packed bed thermal energy storage for waste heat recovery in the iron and steel industry: A cold model study on powder hold-up and pressure drop,” *Journal of Energy Storage*, vol. 75, p. 109735, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109735>
- [12] G. Batchelor and R. O’Brien, “Thermal or electrical conduction through a granular material,” *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 355, no. 1682, pp. 313–333, 1977.
- [13] S. J. Burns, P. T. Piiroinen, and K. J. Hanley, “Critical time step for dem simulations of dynamic systems using a hertzian contact model,” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 119, no. 5, pp. 432–451, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/nme.6056>

- [14] D. Rong and M. Horio, "Dem simulation of char combustion in a fluidized bed," in *Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*. Melbourne, Australia: CSIRO, 1999, pp. 65–70. [Online]. Available: [https://www.cfd.com.au/cfd\\_conf99/papers/016RONG.PDF](https://www.cfd.com.au/cfd_conf99/papers/016RONG.PDF)
- [15] J. M. H. Musser, "Modeling of heat transfer and reactive chemistry for particles in gas-solid flow utilizing continuum-discrete methodology (cdm)," Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports, West Virginia University, Morgantown, WV, 2011, recommended Citation. [Online]. Available: <https://researchrepository.wvu.edu/etd/4760>
- [16] L. Lu, A. Morris, T. Li, and S. Benyahia, "Extension of a coarse grained particle method to simulate heat transfer in fluidized beds," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 111, pp. 723–735, 2017.
- [17] A. B. Morris, S. Pannala, Z. Ma, and C. M. Hrenya, "A conductive heat transfer model for particle flows over immersed surfaces," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 89, pp. 1277–1289, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.06.004>
- [18] S. W. Churchill, "Free convection around immersed bodies," in *Heat Exchanger Design Handbook*, E. U. Schlunder, Ed. New York: Hemisphere Publishing, 1983, p. 500.
- [19] A.-J. N. Khalifa, "Natural convective heat transfer coefficient – a review: I. isolated vertical and horizontal surfaces," *Energy Conversion and Management*, vol. 42, no. 4, pp. 491–504, 2001. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689040000042X>
- [20] S. W. Churchill and H. H. S. Chu, "Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 18, no. 11, pp. 1323–1329, 1975.

- [21] E. Cortés, D. Gaviño, I. Calderón-Vásquez, J. García, D. Estay, J. M. Cardemil, and R. Barraza, “Application of layer view factor method in high temperature thermal storage packed bed,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 236, p. 121471, 2024.
- [22] E. Cortés, D. Gaviño, I. Calderón-Vásquez, J. García, D. Estay, J. M. Cardemil, and R. Barraza, “An enhanced and optimized monte carlo method to calculate view factors in packed beds,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 219, p. 119391, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431122013217>
- [23] T. E. W. SCHUMANN, “Heat transfer: A liquid flowing through a porous prism.” *Journal of the Franklin Institute*, vol. 208, no. 3, pp. 405–416, 1929.
- [24] D. Gaviño, E. Cortés, J. García, I. Calderón-Vásquez, J. Cardemil, D. Estay, and R. Barraza, “A discrete element approach to model packed bed thermal storage,” *Applied Energy*, vol. 325, p. 119821, 2022.
- [25] C. L. Alves and S. Heinrich, “Improving the analysis of heat transfer in packed beds: A comparative study between dem simulations and existing literature models,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 203, pp. 357–367, 2024.
- [26] M. H. P. Teixeira, V. Skorych, R. Janssen, S. Y. Gómez González, A. De Noni Jr, J. B. Rodrigues Neto, D. Hotza, and M. Dosta, “High heating rate sintering and microstructural evolution assessment using the discrete element method,” *Open Ceramics*, vol. 8, p. 100182, 2021.
- [27] Y. Liang and X. Li, “A new model for heat transfer through the contact network of randomly packed granular material,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 73, no. 1, pp. 984–992, 2014.

- [28] Z. Peng, E. Doroodchi, and B. Moghtaderi, “Heat transfer modelling in discrete element method (dem)-based simulations of thermal processes: Theory and model development,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 153, p. 119648, 2020.
- [29] G. D. Wehinger and F. Scharf, “Thermal radiation effects on heat transfer in slender packed-bed reactors: Particle-resolved cfd simulations and 2d modeling,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 184, pp. 24–38, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263876222002611>
- [30] S. N. Sambo, L. Hockaday, T. Seodigeng, and Q. G. Reynolds, “Numerical and experimental study of packed bed heat transfer on the preheating of manganese ore with air up to 600 °c,” *Metals*, vol. 15, no. 3, p. 269, 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2075-4701/15/3/269>
- [31] H. Wu and S. Hao, “A deep neural network model of particle thermal radiation in packed bed,” in *Proceedings of the Thirty-Fourth AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-20)*, 2020, pp. 1029–1036. [Online]. Available: <https://ojs.aaai.org/index.php/AAAI/article/view/5452>
- [32] B. Li, Z. Chen, and R. B. Chandran, “Conductive and radiative heat transfer mechanisms inform nusselt number dependence on solid volume fraction for granular flows,” *Powder Technology*, vol. 440, p. 119737, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591024003796>
- [33] H. Wu, N. Gui, X. Yang, J. Tu, and S. Jiang, “An approximation function model for solving effective radiative heat transfer in packed bed,” *Annals of Nuclear Energy*, vol. 135, p. 107000, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.107000>

- [34] S.-I. Baek, M.-S. Chae, and B.-J. Chung, “Numerical investigation on flow characteristics and heat transfer of mixed convection in a packed bed,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 159, p. 107994, 2024.
- [35] S. Jagtap and M. Mishra, “Numerical investigations of heat transfer and pressure drop in packed bed duct exposed to forced convection boundaries under local thermal non-equilibrium conditions,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 208, p. 109475, 2025.
- [36] Y. Qu, L. Wang, X. Lin, H. Chen, S. Zhang, H. Ling, and Y. Bai, “Mixed convective heat transfer characteristics and mechanisms in structured packed beds,” *Particuology*, vol. 82, pp. 122–133, 2023.
- [37] I. Calderón-Vásquez, F. Battisti, M. Rosales-Vera, J. M. Cardemil, and R. Escobar, “On the analytical solution of the one-dimensional convection–conduction equation for packed-bed thermal energy storage systems,” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 55, p. 102888, 2024.
- [38] X. Wu and T. Hibiki, “Particle-fluid heat transfer for laminar and turbulent flows in packed beds of spherical particles,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 236, p. 126257, 2025.
- [39] ———, “Analogy between the pressure drop coefficient and nusselt number for packed beds of spherical particles,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 162, p. 108651, 2025.
- [40] P. Kumar, S. K. Saha, and A. Sharma, “Experimental and cfd-dem study on local packing distribution and thermofluidic analysis of binary packed bed,” *Chemical Engineering Science*, vol. 282, p. 119372, 2023.
- [41] S.-I. Baek, H.-H. Ahn, and B.-J. Chung, “Experimental investigation on mixed convection heat transfer in a packed bed varying sphere diameter and bed height,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 224, p. 125332, 2024.

- 
- [42] E. Haselhoff, "Modeling the heat transfer of a packed bed with an effective thermal conductivity," 2017, internship Report, University of Twente. [Online]. Available: [https://essay.utwente.nl/73413/1/Haselhoff\\_InternshipReport.pdf](https://essay.utwente.nl/73413/1/Haselhoff_InternshipReport.pdf)
- [43] J. E. Cabello Moraga, "Diseño y evaluación de un prototipo de lecho empacado para la medición de temperatura como base para futuras investigaciones sobre resistencia térmica de contacto," Valparaíso, Chile, Aug. 2025, profesor guía: Danilo Estay Barrientos. Profesor correferente: Rodrigo Barraza Vicencio.
- [44] L. S. Fletcher and D. A. Gyorog, "Heat transfer between surfaces in contact: An analytical and experimental study of thermal contact resistance of metallic interfaces," Mechanical Engineering Department, Arizona State University, Tempe, Arizona, Tech. Rep. ME-TR-033-4, May 1971, research sponsored by Ames Research Center, National Aeronautics and Space Administration (NASA), under Grant NGR 03-001-003. Revised May 1971.