

# Estudio CFD del efecto de las condiciones de frontera en la irradiancia recibida y la temperatura de las paredes en fotobiorreactores

Jorge Mario Ceballos-Zuluaga<sup>1</sup>, Juan Sebastián García-Bustamante<sup>2</sup>, Francisco Javier Ramírez-Gil<sup>3</sup>,  
Andrés David Morales-Rojas<sup>4</sup>

<sup>1</sup>GIEN, Facultad de Ingeniería, Institución Universitaria Pascual Bravo, Colombia. Email:

[j.cebaldos728@pascualbravo.edu.co](mailto:j.cebaldos728@pascualbravo.edu.co)

<sup>2</sup>GIEN, Facultad de Ingeniería, Institución Universitaria Pascual Bravo, Colombia. Email:

[juan.garcia5198@pascualbravo.edu.co](mailto:juan.garcia5198@pascualbravo.edu.co)

<sup>3</sup>GIAM, Facultad de Ingeniería, Institución Universitaria Pascual Bravo, Colombia. Email:

[francisco.ramirez@pascualbravo.edu.co](mailto:francisco.ramirez@pascualbravo.edu.co)

<sup>4</sup>GIEN, Facultad de Ingeniería, Institución Universitaria Pascual Bravo, Colombia. Email:

[andres.morales@pascualbravo.edu.co](mailto:andres.morales@pascualbravo.edu.co)

## Resumen

Este estudio analiza la influencia de diferentes condiciones de frontera, incluyendo *slip*, *Far-Field*, y variaciones en las propiedades ópticas de las superficies, en la irradiancia y la temperatura de las paredes de fotobiorreactores (FBRs) utilizando simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) en AcuSolve®. Se evaluaron varias configuraciones de frontera para entender su impacto en la distribución de la radiación solar y el comportamiento térmico de los FBRs. Los resultados muestran que la elección de las condiciones de frontera puede afectar significativamente la distribución de temperatura e irradiancia. Las simulaciones con condiciones *slip* y el uso de PMMA mostraron una mejor uniformidad térmica. Sin embargo, la irradiancia se mantuvo constante siempre que las condiciones de radiación solar fueran las mismas. Estos resultados permiten optimizar el diseño y la operación de granjas de FBRs, mejorando la eficiencia en la producción de biomasa microalgal y contribuyendo a la captura y secuestro de CO<sub>2</sub>.

**Palabras clave:** cultivo de microalgas, dinámica de fluidos computacional, granja de fotobiorreactores, luz solar, radiación solar, simulación numérica.

## Abstract

This study analyzes the influence of different boundary conditions, including slip, far-field, and variations in surface optical properties, on the irradiance and wall temperature of photobioreactors (PBRs) using computational fluid dynamics (CFD) simulations in Altair AcuSolve. Various boundary configurations were evaluated to understand their impact on solar radiation distribution and the thermal behavior of PBRs. The results show that the choice of boundary conditions can significantly affect temperature and irradiance distribution. Simulations with slip conditions and the use of PMMA showed better thermal uniformity. However, irradiance remained constant as long as solar radiation conditions were the same. These results allow for the optimization of PBR farm design and operation, enhancing the efficiency of microalgal biomass production and contributing to CO<sub>2</sub> capture and sequestration.

**Keywords:** microalgae cultivation, computational fluid dynamics, photobioreactor farm, sunlight, solar radiation, numerical simulation.

## 1. Introducción

Un fotobiorreactor (FBR) es un dispositivo diseñado para el cultivo de microalgas, organismos que requieren luz solar, CO<sub>2</sub>, agua y nutrientes para crecer

[1]. Los FBRs se utilizan en biocombustibles, productos farmacéuticos y alimenticios [2]. La eficiencia del cultivo en FBRs está influenciada por varios factores, siendo la irradiancia solar y la temperatura de las paredes dos de los más críticos [1]. La irradiancia afecta la fotosíntesis y el crecimiento de las microalgas, mientras que la temperatura influye en la eficiencia fotosintética y la viabilidad celular.

La importancia de la irradiancia y la temperatura en las paredes de los FBRs radica en su impacto directo en los procesos biológicos y físicos dentro del reactor. Una irradiancia adecuada asegura suficiente luz para la fotosíntesis, mientras que una temperatura controlada previene condiciones adversas que pueden afectar el crecimiento [3]. En este contexto, Las condiciones de frontera son cruciales, ya que representan las interacciones del sistema con su entorno. Estas determinan cómo se modelan los flujos de aire, el intercambio de calor y la radiación solar en el dominio de simulación, siendo esenciales para obtener resultados precisos en simulaciones CFD [4].

Varios estudios han analizado la transferencia de calor y la distribución de temperatura en los FBRs mediante CFD. Cho y Pott [5] realizaron un análisis de la distribución de temperatura en un fotobiorreactor de termosifón (TPBR), destacando la importancia de la convección natural y forzada en diferentes secciones del reactor. Asimismo, Zhang et al. [6] investigaron la distribución de temperatura en un biorreactor de biohidrógeno, mostrando que la velocidad de entrada del fluido influía directamente en la distribución térmica. Deb et al. [7] utilizaron COMSOL Multiphysics® para estudiar cómo las fluctuaciones de temperatura afectan el crecimiento de *Chlorella vulgaris*, encontrando que la temperatura óptima es de 298 K. Sus simulaciones subrayan la importancia de mantener la temperatura del caldo de cultivo dentro de un rango estrecho para maximizar la productividad de las microalgas.

Los trabajos anteriores abordan simulaciones CFD al interior de los FBRs para determinar el desempeño hidrodinámico de estos. No obstante, según la revisión de la literatura, la investigación sobre flujo externo alrededor de un sistema de FBRs ha sido menos aplicada, a pesar de su importancia. Este estudio aborda esta brecha en el estado del arte, proporcionando una contribución significativa al analizar el flujo externo y su impacto en la eficiencia de los FBRs.

En estudios relacionados, se ha utilizado CFD para evaluar sistemas de ventilación pasiva, como chimeneas solares, para mejorar la eficiencia térmica en viviendas bioclimáticas. Por ejemplo, Martínez y Kurbán [8] evaluaron la aplicación de una chimenea solar en una vivienda bioclimática, mostrando que la

ventilación pasiva puede mejorar significativamente las condiciones de confort térmico a través de la convección natural y forzada del aire. Rodríguez-Sánchez [9] simuló olas de calor en Madrid, usando modelos de superficie terrestre para mitigar el calor urbano. Aunque estos estudios no se centran directamente en fotobiorreactores, proporcionan valiosos conocimientos sobre la simulación de transferencia de calor y flujos de aire en sistemas cerrados. Además, estudios recientes optimizan la disipación de calor en disipadores mediante diseños avanzados [10], [11]. Estos enfoques pueden aplicarse a FBRs para mejorar la gestión térmica, crucial para mantener condiciones óptimas de operación y una distribución uniforme de la temperatura, mejorando así la eficiencia de producción de biomasa microalgal.

La elección adecuada de las condiciones de frontera en las simulaciones CFD es fundamental para obtener resultados precisos y fiables [4]. Este estudio investiga cómo diferentes configuraciones de frontera afectan la irradiancia y la temperatura en las paredes de los FBRs, optimizando su diseño y operación para mejorar la eficiencia del cultivo de microalgas y la producción de biomasa y otros productos derivados. El estudio se enfoca en la simulación CFD de FBRs, analizando la irradiancia y la temperatura de las paredes bajo diferentes condiciones de frontera. Estas simulaciones buscan determinar cómo las distintas configuraciones afectan la distribución de la radiación solar y el comportamiento térmico, factores que influyen directamente en la producción de biomasa microalgal.

## 2. Metodología

Se analiza el comportamiento transitorio de un grupo de FBRs sometidos a radiación solar en varios intervalos de tiempo, cada uno correspondiente a una hora específica de un día determinado mediante simulación CFD utilizando el software Altair AcuSolve®, el cual es un software comercial basado en el método de los elementos finitos. Los objetivos principales son determinar la temperatura superficial de los FBRs y la cantidad de radiación recibida por estos.

### 2.1. Ecuaciones gobernantes y modelos numéricos

En el presente trabajo, se emplean las ecuaciones de Navier-Stokes junto con el modelo de turbulencia Spalart-Allmaras para describir el flujo turbulento de una sola fase, destacando su eficacia en la simulación de flujos con gradientes de presión adversos y capas límite [12]. Para modelar la radiación solar en los FBRs, se utiliza el método de trazado de rayos de Monte Carlo (MCRT) implementado en AcuSolve® [13], que emplea un enfoque estadístico para modelar la interacción de la radiación solar con las superficies

del dominio [14]. Este método es ideal para simulaciones de radiación por su capacidad de manejar geometrías complejas y múltiples interacciones de rayos con superficies.

### 2.1.1. Flujo Turbulento con el Modelo Spalart-Allmaras

Por lo tanto, además de la ecuación (1) de continuidad y la ecuación de momentum (2) [15], se considera la ecuación (3) de transporte para la viscosidad turbulenta modificada [16] y la ecuación (4) de energía. En estas ecuaciones, la densidad ( $\rho$ ) y la viscosidad ( $\mu$ ) son propiedades del fluido, mientras que el campo de velocidad ( $v$ ) y la presión del fluido ( $p$ ) son compartidos en todo el dominio de flujo. En consecuencia, las variables de solución son el balance de masa del fluido, las tres componentes del vector de velocidad ( $v_x$ ,  $v_y$ , y  $v_z$ ), y la viscosidad turbulenta modificada ( $u_t$ ). La ecuación (4) de energía se resuelve para obtener la temperatura de la superficie de las placas.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

Donde:

- $\rho$  Es la densidad del fluido.
- $t$  Es el tiempo.
- $\vec{u}$  Es el vector de flujo de la velocidad

$$\rho \frac{\partial (\vec{u})}{\partial t} + (\rho \vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \rho b + \nabla \cdot \tau \quad (2)$$

Donde:

- $p$  Es la presión.
- $b$  Es el termino fuente (generalmente gravedad).
- $\tau$  Es la fuerza cortante viscosa

$$\frac{\partial(\rho \hat{v})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \hat{v} \vec{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{1}{\sigma} \left( \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \rho \hat{v}) \frac{\partial \hat{v}}{\partial x_j} \right] + \rho C_{b2} \frac{\partial \hat{v}}{\partial x_j} \frac{\partial \hat{v}}{\partial x_j} \right) + P + D \quad (3)$$

Donde:

- $\hat{v}$  Es la viscosidad turbulenta modificad.
- $\vec{u}_j$  Es la componente j-ésima del vector de velocidad promedio del flujo.
- $x_j$  Es la coordenada espacial en la dirección j-ésima.
- $\sigma$  Es una constante que representa la relación entre la viscosidad molecular y la viscosidad turbulenta modificada.
- $C_{b2}$  Es una constante que afecta la difusión de la viscosidad turbulenta modificada ( $\hat{v}$ ) a través de su gradiente espacial.

- $P$  Es el término que representa la producción de viscosidad turbulenta modificada debido a la rotación y la deformación del fluido.
- $D$  Es el término que representa la destrucción de viscosidad turbulenta modificada debido a la disipación de energía en el flujo turbulento.

Para la ecuación de energía, se considera:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E \vec{u}) = \nabla \cdot (k \nabla T) - \nabla \cdot (\rho \vec{u}) + \vec{u} \cdot (\nabla \cdot \tau) + \nabla \vec{u} : \tau + \rho b \cdot \vec{u} + S \quad (4)$$

Donde:

- $E$  Es la energía total (interna + cinética).
- $k$  Es la conductividad térmica.
- $k \nabla T$  Es el flujo de calor dado por la Ley de Fourier.
- $S$  Es la fuente de calor, que incluye la radiación solar incidente.

### 2.1.2. Trazado de rayos de Monte-Carlo

En AcuSolve®, el cálculo del flujo de calor solar se realiza utilizando un modelo de radiación solar de superficie gris ideal. Este modelo simplifica la caracterización de las superficies al asumir que las propiedades ópticas (absorción, transmisión y reflexión) son independientes de la longitud de onda. Los flujos de calores solares se calculan utilizando el MCRT y cinco propiedades ópticas de la superficie, las cuales están restringidas por la relación en la ecuación (5):

$$\tau_s(\theta) + \tau_d(\theta) + \rho_s(\theta) + \rho_d(\theta) + \alpha(\theta) = 1 \quad (5)$$

Donde:

- $\tau_s$  Es la transmisión especular.
- $\tau_d$  Es la transmisión difusa.
- $\rho_s$  Es la reflexión especular.
- $\rho_d$  Es la reflexión difusa.
- $\alpha$  Es la absorptividad.

Los rayos se siguen hasta que: (i) alcanzan el número máximo de reflexiones, (ii) su energía cae por debajo de un umbral mínimo, o (iii) abandonan el dominio. La energía absorbida por las superficies se acumula y se usa para calcular el flujo de calor solar en cada superficie. La redistribución de la energía de los rayos terminados se realiza según las propiedades de absorptividad de las superficies encontradas en su trayectoria, como se describe en la ecuación (5).

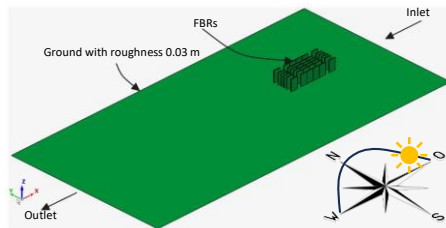
### 2.1.3. Parámetros principales del MCRT

AcuSolve® define los siguientes parámetros predeterminados para la simulación, que pueden ajustarse si los resultados no son satisfactorios [13]:

- **NumRays:** Número de rayos utilizados. Se recomienda 1,000,000 para mayor precisión.
- **NumSubRays:** Sub-rayos para modelar reflexiones y transmisiones difusas. Se recomienda 4.
- **MaxReflections:** Número máximo de reflexiones antes de que un rayo se termine. Se recomienda 10.
- **MinRayEnergy:** Energía mínima relativa para terminar un rayo. Se recomienda 0.001.
- **RedistributionFactor:** Factor para redistribuir la energía restante de un rayo terminado. Se recomienda un valor de 1.
- **Smoothing:** Parámetro para suavizar el flujo de calor solar calculado. Valor por defecto de 1.0.

## 2.2. Preparación del modelo y configuración de la simulación

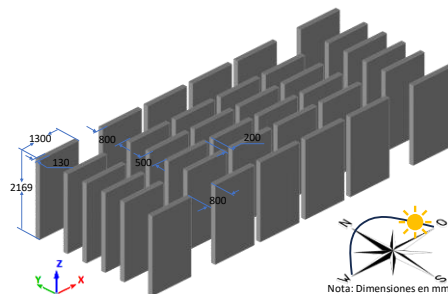
El sólido en la **Figura 1** representa un módulo de una granja de FBRs, compuesto por 16 FBRs en una configuración de 4x4. Este modelo simula un módulo rodeado por otros FBRs para incluir las sombras proyectadas por módulos vecinos.



**Figura 1.** Descripción general del problema.

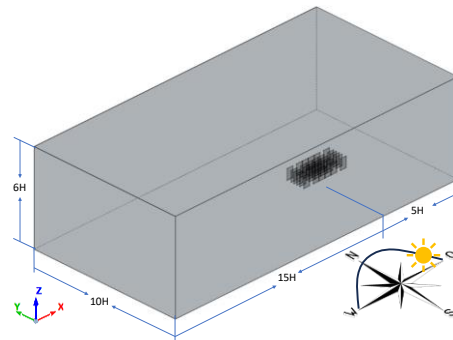
### 2.2.1. Modelamiento geométrico

Las dimensiones de los FBRs se muestran en la **Figura 2**, donde se especifica que la altura total del FBR es de 2169 mm. En la **Figura 3**, detalla el dominio de flujo utilizado para la simulación, cuyo dimensionamiento se basa en la altura del FBR y los soportes, sumando 3169 mm (H) en total. Aunque los soportes no se representan en el modelo, su influencia en el dominio es relevante para la fluidodinámica.



**Figura 2.** Dimensiones de los FBRs (mm).

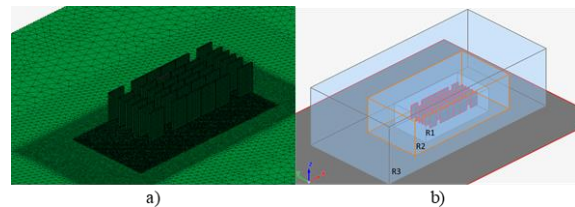
Este dimensionamiento sigue las recomendaciones de Franke et al [17], donde la longitud aguas arriba del dominio es 5 veces la altura del objeto (5H) y la longitud aguas abajo es 15 veces la altura (15H). Además, el ancho total del dominio es 10 veces la altura del objeto (10H) y la altura total del dominio es 6 veces la altura del objeto (6H). Estas dimensiones aseguran espacio suficiente para que el flujo se vuelva laminar después de interactuar con los FBRs y para evitar la influencia de las paredes laterales y superior e inferior en la dinámica del flujo.



**Figura 3.** Dimensiones del dominio de flujo.

### 2.2.2. Configuración del mallado

Para el mallado del modelo, se utiliza un tamaño de elemento mayor en la región exterior y se realizan 3 zonas de refinación cerca de los FBRs. La **Figura 6a** muestra el mallado del modelo y la **Figura 4b** muestra el mallado del modelo y la **Figura 6b** las zonas de refinación (R1, R2, R3). Este enfoque busca reducir el costo computacional. Las zonas de refinación se dimensionaron usando 20%, 30% y 50% del dominio de flujo, con tamaños de elementos de 10%, 20% y 60% del tamaño de los elementos exteriores, respectivamente. Esto asegura una proporcionalidad en las medidas y permite un análisis de independencia de malla.

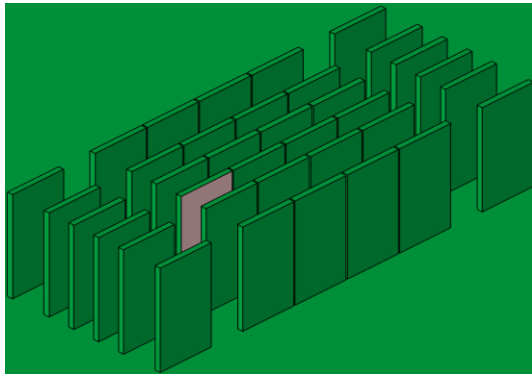


**Figura 4.** Discretización espacial del modelo geométrico.  
a) Mallado superficial, b) Zonas de refinación.

### 2.2.3. Análisis de independencia de malla

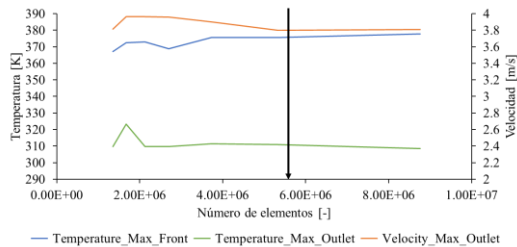
Para seleccionar el tamaño de los elementos y verificar la calidad de los resultados, se realiza un análisis de independencia de malla. En este análisis, se obtienen los valores máximos de temperatura y velocidad en dos superficies: la superficie “front”, mostrada en la

**Figura 5**, y la superficie de salida (outlet), visible en la **Figura 7b**.



**Figura 5.** Selección de superficie en un FBR para análisis de dependencia de malla.

Los resultados del análisis de independencia de malla, presentados en la **Figura 6**, muestran que, a partir de los 5 millones de elementos, los valores se estabilizan. Esta estabilización indica que los resultados no varían significativamente con un mayor refinamiento de la malla. Por ello, se elige un tamaño de elemento de 0.65 m, que produce aproximadamente 5 millones de elementos en el dominio. Este tamaño asegura precisión y confiabilidad sin aumentar innecesariamente el costo computacional.



**Figura 6.** Análisis de independencia de malla.

Se aclara que las curvas de temperatura se tomaron a los 21,600 segundos y las de velocidad a los 43,200 segundos, ya que en esos momentos se alcanzan los valores máximos de cada variable. La velocidad en la superficie "front" no se muestra debido a la capa límite que reduce la velocidad a casi cero. La irradiancia es independiente de la malla, por lo que no se realiza un análisis de dependencia de malla para ella.

La configuración del mallado se presenta en la **Tabla 1**, que incluye una capa límite alrededor de los FBR y la estadística del mallado utilizado.

**Tabla 1.** Configuración de mallado.

Controles de malla	Parámetros
Tipo de elemento	Tetraedro de 4 nodos
Tamaño del elemento	0.65 m
Tamaño de refinación 1 (R1)	0.065 m
Tamaño de refinación 2 (R2)	0.13 m
Tamaño de refinación 3 (R3)	0.39 m
Capa límite	
Espesor de primera capa	1.5 mm
Número de capas límite	5
Radio de crecimiento	1.2
Estadística del mallado	
No de Elementos	5,331,245
No de Nodos	935,576

#### 2.2.4. Definición de las condiciones de fronteras

La **Tabla 2** presenta cuatro simulaciones y sus condiciones de frontera para evaluar el impacto en la temperatura e irradiancia. En las simulaciones 1 y 3, los FBRs se modelan como cajas huecas, mientras que en las simulaciones 2 y 4 se consideran como thin solid. En estas últimas, se asigna un espesor y características del material (conductividad térmica y capacidad calorífica) para asegurar la precisión de la simulación.

**Tabla 2.** Condiciones de frontera en cada simulación.

	Superficie	Simulación 1	Simulación 2	Simulación 3	Simulación 4
Condiciones de frontera de fluidos	<b>Figura 7a</b>	Inlet	Inlet	Inlet	Inlet
	<b>Figura 7b</b>	Outlet	Outlet	Outlet	Outlet
	<b>Figura 7c</b>	Slip	Slip	Far-Field	Far-Field
	<b>Figura 7d</b>	Ground	Ground	Ground	Ground
	<b>Figura 7e</b>	FBR_Wall	FBR_Convection	FBR_Wall	FBR_Convection
Condiciones de frontera de radiación solar	<b>Figura 8a</b>	air_Surface	air_Surface	air_Surface	air_Surface
	<b>Figura 8b</b>	Ground_Surface	Ground_Surface	Ground_Surface	Ground_Surface
	<b>Figura 8c</b>	Ground_Surface	Ground_Surface	Ground_Surface	Ground_Surface
	<b>Figura 8d</b>	FBR_Surface	FBR- PMMA	FBR_Surface	FBR- PMMA

##### 2.2.4.1. Condiciones de fronteras de fluidos

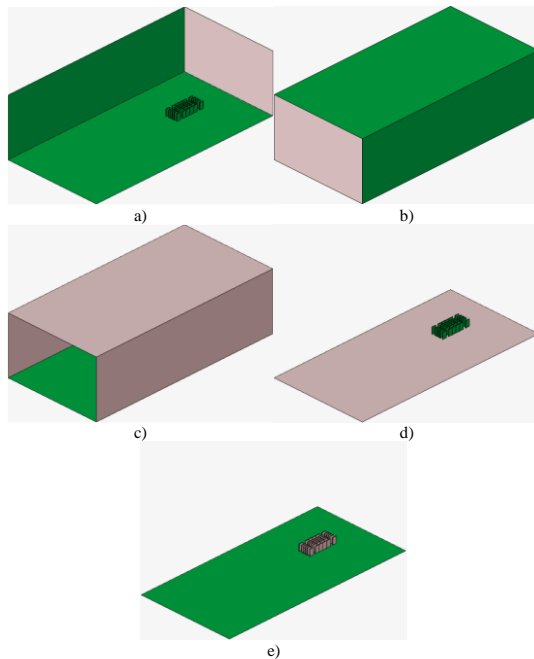
La **Figura 7** muestra las superficies con las condiciones de frontera del fluido (color gris). En la

**Figura 7c** y **Figura 7f**, el tipo de condición de frontera varía según la simulación. Estas superficies se seleccionaron porque permiten cambiar las condiciones de frontera manteniendo fijas las

condiciones de *Inlet* y *Outlet*, asegurando resultados consistentes.

**Tabla 3.** Condiciones de frontera de fluidos.

Condiciones de frontera	Tipo	Valor	Características adicionales
<i>Inlet</i> (Figura 7a)	Atmosférica	Tipo de rugosidad: <i>Suburb</i> Altura de la rugosidad: 0.3 m Velocidad de fricción: $0.389 \frac{m}{s}$	
<i>Outlet</i> (Figura 7b) <i>Slip</i> (Figura 7c)	Presión de salida Deslizamiento	Temperatura: 298.65 K Presión estática: 0 Pa	
<i>Far-Field</i> (Figura 7c)	Campo lejano	Velocidad en X: $1.49 \frac{m}{s}$ Velocidad en Y: $3.58 \frac{m}{s}$ Velocidad en Z: $0 \frac{m}{s}$ Temperatura: 298.65 K	
<i>FBR_Wall</i> (Figura 7d)	Pared no deslizamiento, flujo aplicado	Flujo de calor: $0 \frac{W}{m^2}$	En la salida de superficie ( <i>Surface Output</i> ), asigne la frecuencia de salida nodal ( <i>Nodal output frequency</i> ) a 1.0 Necesita crear un nuevo sólido delgado llamado " <i>FBR_Thin_Solid</i> " con las siguientes opciones:
<i>FBR_Convection</i> (Figura 7d)	Pared no deslizamiento, convección	Coefficiente de transferencia de calor convectivo: $6 \frac{W}{m^2 K}$ [18] Temperatura de referencia: 298.65 K	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espesor: 3 mm</li> <li>• Material: PMMA [19]</li> </ul> En la salida de superficie ( <i>Surface output</i> ), asigne la frecuencia de salida nodal ( <i>Nodal output frequency</i> ) a 1.0 Tipo de pared de turbulencia: Función de pared
<i>Ground</i> (Figura 7f)	Pared no deslizamiento, flujo aplicado	Flujo de calor: $0 \frac{W}{m^2}$	Tipo de rugosidad: 0.03 m Factor de flujo de calor de la función de pared: 1.0



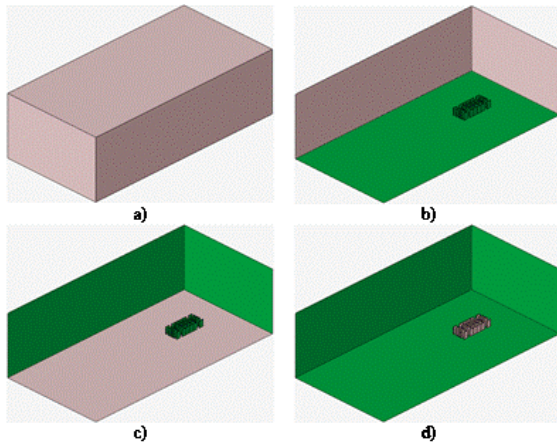
**Figura 7.** Asignación de condiciones de frontera de fluidos (superficie resaltada en gris). a) *Inlet*, b) *Outlet*, c) *slip* o *Far-field*, d) *Ground*, f) *FBR\_Wall* o *FBR\_Convection*.

Los datos para el *Inlet* y *Far-field* se asignaron según las condiciones ambientales de Cartagena [20] para el día 21 de diciembre de 2023 a las 5 am. Este horario se seleccionó para realizar una simulación transitoria que abarca todo el día. La velocidad del viento registrada fue de 14 km/h en dirección E-NE (Este-Noreste), la cual se descompone en componentes X (este) y Y (norte). La temperatura ambiental inicial fue de 25.5 °C, estableciendo así las condiciones iniciales para la simulación.

#### 2.2.4.2. Condiciones de fronteras de radiación solar

Las superficies de radiación solar están representadas en la Figura 8 y se detallan en la Tabla 4. En esta tabla, "*Side of the Surface*" se refiere al lado en donde la radiación solar está activa dentro del modelo: interior (*inward*), exterior (*outward*) o ambos lados (*both surface*). "*Solar Radiation Model*" se refiere a las interacciones de la radiación solar presentes en la simulación, como se detalla en la Tabla 5.





**Figura 8.** Asignación de condiciones de fronteras de radiación solar resaltadas en color gris. a) *Air\_Surface*, parte frontal, b) *Air\_Surface*, parte trasera, c) *Ground\_Surface*, d) *FBRs\_Surface* o *FBRs\_PMMA*.

En la **Tabla 5**, se asume que el aire está en condiciones ambientales, con una transmisividad especular igual a 1, dado que es prácticamente transparente a la radiación solar, permitiendo que toda la radiación incidente pase sin absorción ni reflexión significativa. Para el Polimetilmetacrilato (PMMA), aunque la ficha técnica [19] no proporciona detalles específicos sobre estas interacciones, se asignan valores basados en sus propiedades ópticas. Una transmisividad luminosa del

92% sugiere una alta transmisión especular ( $\sim 0.92$ ) debido a la baja dispersión (haze de 0.5). El índice de refracción de 1.49 indica una reflectividad especular baja ( $\sim 0.05$ ). Tanto la reflectividad como la transmisividad difusa son bajas ( $\sim 0.01$  cada una), y la absorptividad es baja ( $\sim 0.01$ ), derivada de la conservación de energía.

Para cuantificar la cantidad de irradiancia que incide en los FBRs, se debe configurar el sólido de manera que absorba la irradiancia. Esto permite observar la cantidad de radiación sobre el FBR y no su transmisión al interior, como sucedería en la realidad. Por lo tanto, toda la transmitancia se sumará a la absorptividad para reflejar esta configuración.

**Tabla 4.** Configuración de las superficies de radiación solar.

	Side of the surface	Solar radiation model
<i>Air_Surface</i> (Figura 8a y Figura 8b)	Both surface	<i>Air_Model</i>
<i>Ground_Surface</i> (Figura 8c)	Inward	<i>Black_Body</i>
<i>FBRs_Black_Body</i> (Figura 8d)	Outward	<i>Black_Body</i>
<i>FBRs_PMMA</i> (Figura 8d)	Both surface	<i>Plexiglass</i>

**Tabla 5.** Propiedades para el modelo de radiación.

	Transmisividad especular	Transmisividad difusa	Reflectividad especular	Reflectividad difusa	Absorptividad
<i>Air_Model</i>	1	0	0	0	0
<i>Black_Body</i>	0	0	0	0	1
<i>PMMA</i>	0	0	0.05	0.01	0.94

Las condiciones variables en las superficies (**Figura 7c** y **Figura 7f**) son cruciales para evaluar cómo diferentes escenarios de frontera afectan el comportamiento del fluido y la transferencia de calor. El cambio entre *Slip* y *Far-field* permite estudiar el impacto de un deslizamiento perfecto versus un campo lejano en el flujo alrededor del FBR, lo que es esencial para comprender la dinámica de los fluidos en distintas condiciones y asegurar resultados consistentes y representativos.

Para las condiciones de radiación, el uso de diferentes modelos en las superficies del FBR (*Black\_Body* vs. *PMMA*) permite evaluar cómo distintas propiedades ópticas afectan la distribución de la irradiancia y la temperatura en el FBR. Estas variaciones son clave para optimizar el diseño del FBR y mejorar la eficiencia del cultivo de microalgas.

### 2.3. Configuración de la simulación

Las coordenadas geográficas para calcular los flujos solares se ubican en la zona franca de Argos en Cartagena ( $10.33452310^\circ$ ,  $-75.50088894^\circ$ ), con la simulación realizada el 21 de diciembre de 2023. La simulación transitoria tiene 14 pasos de tiempo, con intervalos de 1 hora, comenzando a las 5 am. *AcuSolve®* genera un archivo con los flujos solares basado en estos parámetros, utilizado por el modelo MCRT para los cálculos. La configuración detallada de la solución se presenta en la **Tabla 6**.

**Tabla 6.** Configuración de la solución.

Característica	Variable
<i>Solver</i>	<i>AcuSolve</i>
Tipo de solución	Transitorio
Tipo de fluido	Aire a condiciones ambientales
Tamaño de paso de tiempo [s]	3600
Tiempo de simulación [s]	46800
Numero de pasos de tiempo	14
Tipo de flujo	Turbulento
Modelo de turbulencia	<i>Spalart-Allmaras</i>

### 3. Resultados y discusión

En esta sección se discuten los resultados de la simulación CFD realizada al módulo de FBRs, los cuales fueron obtenidos en SimLab® 2024 como pre y post-procesador, con AcuSolve® como solucionador.

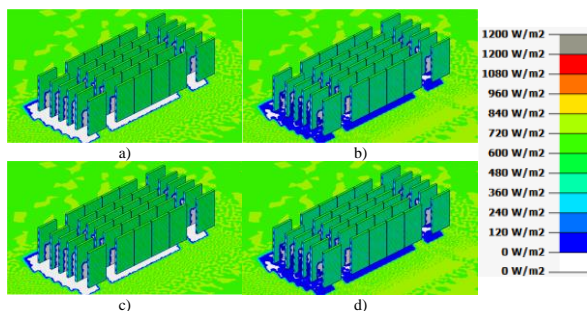
En la **Tabla 7**, se muestra como está compuesta las simulaciones según las condiciones de frontera que varían.

**Tabla 7.** Esquema de simulaciones.

Condiciones de frontera	FBR_Black_Body	FBR_PMMA
<i>Slip</i>	Simulación 1	Simulación 2
<i>Far-Field</i>	Simulación 3	Simulación 4

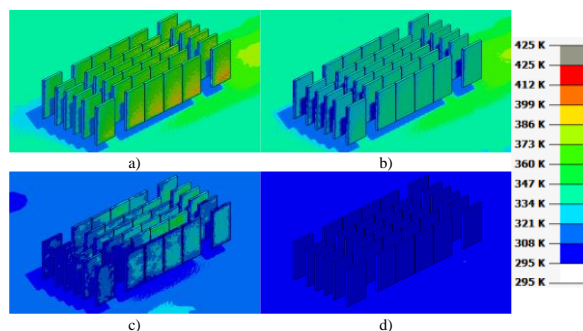
#### 3.1. Distribución de irradiancia y temperatura

Para estudiar el impacto de las condiciones de frontera en las diferentes simulaciones, se presentan los resultados a las 25200 s (12:00 pm), ya que la radiación solar es más intensa a esa hora. En la **Figura 9** y **Figura 10** muestran los contornos de irradiancia y temperatura en las superficies de los FBRs. Según la **Tabla 7**, las simulaciones 1 y 2 tienen la condición de "slip", mientras que las simulaciones 3 y 4 tienen la condición de "Far-Field". Además, las simulaciones 1 y 3 utilizan FBR\_Black\_Body para la radiación solar, mientras que las simulaciones 2 y 4 utilizan FBR\_PMMA.



**Figura 9.** Distribución de irradiancia a las 12 m. a) Simulación 1, b) Simulación 2, c) Simulación 3, d) Simulación 4.

A partir de la **Figura 9**, se observa que la distribución de irradiancia es consistente cuando las condiciones de radiación solar son iguales, como en la simulación 1 (**Figura 9a**) y 3 (**Figura 9c**). Esto indica que no hay una diferencia significativa en la irradiancia entre las simulaciones con condiciones de radiación solar similares, a pesar de cambiar las condiciones para el fluido.



**Figura 10.** Distribución de temperatura a las 12 m. a) Simulación 1, b) Simulación 2, c) Simulación 3, d) Simulación 4.

En la **Figura 10**, se notan diferencias significativas en la distribución de temperatura entre las simulaciones. Las simulaciones con condición de "slip" (la simulación 1, **Figura 10a** y simulación 2 **Figura 10b**) han dado resultados más estables y uniformes en comparación con las que tienen condición de "Far-Field" (Simulación 3, **Figura 10c** y Simulación 4, **Figura 10d**). Además, en la **Figura 10b** se aprecia una superficie con contornos de temperatura más uniformes que en la **Figura 10a**, lo que sugiere que la condición de radiación solar FBR\_PMMA contribuye a una mejor distribución térmica en comparación con FBR\_Black\_Body.

Esto indica que el cambio en las condiciones de radiación afecta tanto la distribución de la irradiancia como de la temperatura, mientras que las condiciones de frontera del fluido solo afectan la distribución de la temperatura.

#### 3.2. Irradiancia a lo largo del día

En la **Figura 11**, se observa que las curvas de irradiancia de las simulaciones 1 y 3 están superpuestas, al igual que las de las simulaciones 2 y 4. Estas curvas se obtuvieron calculando la irradiancia promedio de la superficie señalada en la **Figura 5**. Al final del día, la irradiación total se calculó como el área bajo la curva, obteniendo  $1.48 \frac{kWh}{m^2}$  para las simulaciones 1 y 3, y  $1.39 \frac{kWh}{m^2}$  para las simulaciones 2 y 4.

Por lo tanto, al considerar los FBRs con PMMA o como cuerpos negros, se observa una ganancia del 6.08% en el valor de la irradiación total diaria. Esto sugiere que los valores obtenidos con PMMA son más realistas para la irradiancia e irradiación a lo largo del día.



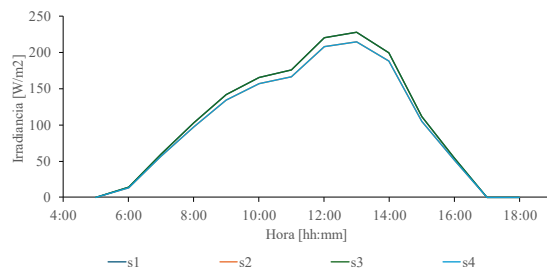


Figura 11. Irradiancia a lo largo del día.

### 3.3. Temperatura a lo largo del día

La **Figura 12** muestra la temperatura promedio en la cara *front* de uno de los FBR (ver **Figura 5**) a lo largo del día. Las simulaciones con condición de "slip" tienden a mostrar temperaturas más estables y uniformes en comparación con las condiciones de "Far-Field". Además, el uso de *FBR\_PMMA* en la simulación 2 muestra un comportamiento térmico más favorable, con menores picos de temperatura y una mejor distribución térmica a lo largo del día.

La curva de temperatura de la simulación 4 indica que no hubo variación de temperatura en todo el día, lo cual sugiere que esta simulación no sería útil para este tipo de análisis. Una posible hipótesis para esto podría ser que la configuración de condiciones de frontera "Far-Field" con *FBR\_PMMA* no captura adecuadamente la interacción térmica del sistema, resultando en una simulación que no refleja las variaciones térmicas esperadas.

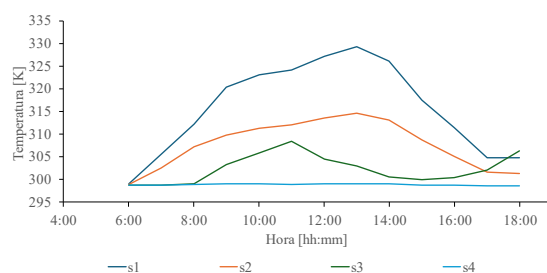


Figura 12. Temperatura a lo largo del día.

### 4. Conclusiones

Las condiciones de frontera seleccionadas en las simulaciones CFD tienen un impacto significativo en la distribución de temperatura e irradiancia en los FBRs. La irradiancia se mantuvo constante siempre y cuando las condiciones de radiación solar eran iguales, a pesar de cambiar los comediones del fluido. Mientras que las condiciones *slip* mostraron mejores resultados en términos de uniformidad térmica comparadas con las condiciones de *Far-Field*. Esto indica que la selección adecuada de las condiciones de frontera es crucial para obtener resultados precisos en las

simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) aplicadas a los FBRs.

Por su parte, El uso de polimetilmetacrilato (PMMA) como material para las paredes de los FBRs resultó en una distribución más uniforme de la temperatura. Las simulaciones demostraron que el PMMA, con sus propiedades ópticas y térmicas específicas, contribuye a una mejor gestión térmica en comparación con un cuerpo negro, lo que sugiere que es recomendable utilizar este material para los FBRs en la simulación, en vez de considerarlo como cuerpo negro.

Este trabajo sirve de referencia para el diseño y posterior optimización de la disposición de los paneles en granjas de FBRs, de tal forma que se pueda incrementar la producción de biomasa microalgal por metro cuadrado disponible de terreno para el cultivo. Esto, además, aseguraría una mayor captura de CO<sub>2</sub> producido en la planta de cementos de Argos Colombia, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y la eficiencia energética de la producción de cemento.

### 5. Referencias

- [1] K. Chowdury, N. Nahar, y U. Deb, "The Growth Factors Involved in Microalgae Cultivation for Biofuel Production: A Review", *Comput. Water Energy Environ. Eng.*, vol. 9, pp. 185–215, 2020, doi: 10.4236/cweee.2020.94012.
- [2] A. M. Miranda, F. Hernandez-Tenorio, D. Ocampo, G. J. Vargas, y A. A. Sáez, "Trends on CO<sub>2</sub> Capture with Microalgae: A Bibliometric Analysis", *Molecules*, vol. 27, núm. 15, Art. núm. 15, ene. 2022, doi: 10.3390/molecules27154669.
- [3] Y. Maltsev, K. Maltseva, M. Kulikovskiy, y S. Maltseva, "Influence of Light Conditions on Microalgae Growth and Content of Lipids, Carotenoids, and Fatty Acid Composition", *Biology*, vol. 10, núm. 10, p. 1060, oct. 2021, doi: 10.3390/biology10101060.
- [4] H. K. Versteeg y W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education Limited, 2007.
- [5] B. A. Cho y R. W. M. Pott, "The development of a thermosiphon photobioreactor and analysis using Computational Fluid Dynamics (CFD)", *Chem. Eng. J.*, vol. 363, pp. 141–154, may 2019, doi: 10.1016/j.cej.2019.01.104.
- [6] Z. Zhang, Q. Wu, C. Zhang, Y. Wang, Y. Li, y Q. Zhang, "Effect of Inlet Velocity on Heat Transfer Process in a Novel Photo-Fermentation Biohydrogen Production Bioreactor using Computational Fluid Dynamics Simulation", *BioResources*, vol. 10, nov. 2014, doi: 10.15376/biores.10.1.469-481.

- [7] U. K. Deb, M. Shahriar, J. Bhowmik, y M. K. H. Chowdury, “The Effect of Irradiance Related Temperature on Microalgae Growth in a Tubular Photo Bioreactor for Cleaner Energy”, *Am. J. Comput. Math.*, vol. 7, núm. 3, Art. núm. 3, ago. 2017, doi: 10.4236/ajcm.2017.73026.
- [8] C. Martínez y A. S. Kurban, “Simulación de chimenea solar aplicada a vivienda bioclimática”, dic. 2015, Consultado: el 17 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/69507>
- [9] A. Rodríguez-Sánchez, “Simulación de olas de calor en la ciudad de Madrid”, 2020.
- [10] M. Hajialibabaei, M. Z. Saghir, I. Dincer, y Y. Bicer, “Optimization of heat dissipation in novel design wavy channel heat sinks for better performance”, *Energy*, vol. 297, p. 131155, jun. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.131155.
- [11] B. Salim *et al.*, “Three-dimensional transient CFD modeling of multiple finned aluminum foam heat sinks in a horizontal channel”, *Alex. Eng. J.*, vol. 78, pp. 426–437, sep. 2023, doi: 10.1016/j.aej.2023.07.074.
- [12] H. P. Burbridge, A. E. Scarabino, y A. M. Awruch, “Implementación del Modelo de Turbulencia de Spalart-Allmaras en un Esquema Explícito de Taylor-Galerkin para Flujos Compresibles”, *Mecánica Comput.*, vol. 36, núm. 25, Art. núm. 25, nov. 2018.
- [13] Altair Engineering, Inc., “SOLAR\_RADIATION”. Consultado: el 29 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://help.altair.com/hwcfdsolvers/acusolve/topics/acusolve/solar\\_radiation\\_acusolve\\_com\\_ref.htm](https://help.altair.com/hwcfdsolvers/acusolve/topics/acusolve/solar_radiation_acusolve_com_ref.htm)
- [14] Altair Engineering, Inc., “Heat Transfer”. Consultado: el 19 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://help.altair.com/hwcfdsolvers/acusolve/topics/acusolve/training\\_manual/heat\\_transfer\\_ref.htm](https://help.altair.com/hwcfdsolvers/acusolve/topics/acusolve/training_manual/heat_transfer_ref.htm)
- [15] Altair Engineering, Inc., “Governing Equations”. Consultado: el 19 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://help.altair.com/hwcfdsolvers/acusolve/topics/acusolve/training\\_manual/governing\\_equations\\_ref.htm](https://help.altair.com/hwcfdsolvers/acusolve/topics/acusolve/training_manual/governing_equations_ref.htm)
- [16] Altair Engineering, Inc., “One Equation Eddy Viscosity Models”. Consultado: el 19 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://help.altair.com/hwcfdsolvers/acusolve/topics/acusolve/training\\_manual/one\\_eq\\_eddy\\_visc\\_models\\_ref.htm](https://help.altair.com/hwcfdsolvers/acusolve/topics/acusolve/training_manual/one_eq_eddy_visc_models_ref.htm)
- [17] J. Franke y A. Baklanov, *Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment: COST Action 732 Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models*. 2007. Consultado: el 14 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/257762102\\_Best\\_Practice\\_Guideline\\_for\\_the\\_CFD\\_Simulation\\_of\\_Flows\\_in\\_the\\_Urban\\_Environment\\_COST\\_Action\\_732\\_Quality\\_Assurance\\_and\\_Improvement\\_of\\_Microscale\\_Meteorological\\_Models](https://www.researchgate.net/publication/257762102_Best_Practice_Guideline_for_the_CFD_Simulation_of_Flows_in_the_Urban_Environment_COST_Action_732_Quality_Assurance_and_Improvement_of_Microscale_Meteorological_Models)
- [18] Ertex Solar, “Heat transfer coefficient”, bipv.ch. Consultado: el 24 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.bipv.ch/index.php/en/technology-top-en/thermal-aspects/heat-transfer-coefficient>
- [19] Evonik Industries AG, “Product information Plexiglass 8N”. el 5 de febrero de 2013. Consultado: el 24 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.pp-evonik.com/assets/img/uploads/PLEXIGLAS%208N\\_E.pdf](https://www.pp-evonik.com/assets/img/uploads/PLEXIGLAS%208N_E.pdf)
- [20] “Clima histórico de Cartagena”, tiempo3.com. Consultado: el 24 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.tiempo3.com/south-america/colombia/cartagena?page=past-weather#day=21&month=12>