

DISEÑO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN PARA
ALIMENTAR UNA GRANJA DE FOTOBIORREACTORES EN LA PLANTA DE CEMENTOS
ARGOS EN CARTAGENA

JORGE MARIO CEBALLOS ZULUAGA



INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA
PASCUAL BRAVO®

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN ENERGÍA
MEDELLÍN
2025

Diseño de un sistema de distribución de gases de combustión para alimentar una granja de fotobiorreactores en la planta de cementos argos en Cartagena

Jorge Mario Ceballos Zuluaga

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Magister en Energía

Asesor:

Andrés David Morales Rojas
Magister en Ingeniería Mecánica

Co- Asesor:

Francisco Javier Ramírez Gil
Doctor en Ingeniería Mecánica

Evaluaadores:

PhD. Luigi Antonio de Araujo Passos
Investigador asociado en Wilgenhaege Innovations BV, países Bajos
Dr. Saulo Alfredo Gómez Salcedo
Profesor asistente, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción


Institución Universitaria Pascual Bravo

Facultad de Ingeniería

Maestría en Energía

Medellín

2025

	ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO EN DEFENSA PÚBLICA	Código:
		Versión: x
		Fecha de Aprobación: XX/XX/XXXX
		Página 1 de 4

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO DE POSGRADO

Considerando el reglamento de posgrados vigente de la Institución Universitaria Pascual Bravo, en el [ACUERDO DEL CONSEJO DIRECTIVO](#) 021 del 19 de noviembre del 2020, se define:

Artículo 48. De la evaluación del trabajo de grado o tesis. El trabajo de grado o tesis será evaluado por dos jurados designados por el Consejo de Facultad respectivo. Los jurados podrán ser docentes y/o investigadores adscritos a la Institución Universitaria Pascual Bravo, o docentes y/o investigadores externos a la Institución, los cuales deberán acreditar un título equivalente o superior al del posgrado evaluado. El Consejo de Facultad respectivo elegirá a los jurados y el estudiante realizará una presentación pública de su trabajo de grado o tesis, en lugar y fecha que indique el Consejo de Facultad respectivo. Del evento de sustentación o defensa se levantará acta, cuya copia se entregará a la Facultad respectiva y, a la oficina de Admisiones, Registro y Control Académico, para que se registre la novedad respectiva.

PARÁGRAFO 2. En caso de que el trabajo final no obtenga calificación aprobatoria definida en el presente reglamento, el estudiante podrá volver a presentarlo con las debidas correcciones, dentro de los plazos fijados para la permanencia en el programa.


PARÁGRAFO 3. Si la calificación en la segunda sustentación es reprobatoria, el estudiante deberá inscribir nuevamente el trabajo de grado o tesis.

PARÁGRAFO 4. Si el trabajo de grado o tesis es sobresaliente, los jurados deliberarán acerca de la posibilidad de recomendar, al Consejo de Facultad respectivo, el otorgamiento la mención Meritoria o Laureada al trabajo evaluado. Dichas menciones serán otorgadas por el Consejo de Facultad respectivo previa solicitud realizada por los jurados de manera unánime, dirigida al Consejo de Facultad respectivo, quien decidirá sobre la solicitud, dicha decisión quedará consignada en Acta respectiva.

PARÁGRAFO 6. El otorgamiento de cualquier mención para trabajos de grado, de investigación o tesis, será a criterio del Consejo de Facultad respectivo, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- a) **Mención meritoria.** Será otorgado al trabajo de grado, de investigación o tesis, que evidencie el cumplimiento pleno de los resultados propuestos para el mismo en un nivel superior al planteado en la propuesta del trabajo de grado aprobado.
- b) **Mención laureada.** Será otorgado al trabajo de grado, de investigación o tesis, que evidencie además del cumplimiento pleno de los resultados propuestos el mismo en un nivel superior al planteado en la propuesta del trabajo de grado aprobado, más de una (1) publicación

Elaboró	Revisó	Aprobó
Nombre:	Nombre:	Nombre:
Cargo:	Cargo:	Cargo:
Fecha:	Fecha:	Fecha:

	ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO EN DEFENSA PÚBLICA	Código:
		Versión: x
		Fecha de Aprobación: XX/XX/XXXX
		Página 2 de 4

del más alto nivel investigativo, según clasificación Publindex, o su equivalente en igual categoría o superior según categorización internacional ISI o SCOPUS, publicadas en el momento de la sustentación o, el desarrollo de una patente de invención derivada directamente de los resultados obtenidos de su trabajo de grado o tesis, la fecha de registro de la patente debe ser anterior a la fecha de sustentación o defensa del mismo.

PARÁGRAFO 7. Para el caso de las maestrías en investigación y doctorados, para la evaluación del trabajo de grado, trabajos de investigación o tesis, se deberá contar con al menos un (1) evaluador externo a la Institución Universitaria Pascual Bravo, el cual deberá cumplir con el requisito de nivel de formación planteado en este artículo.

IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO					
Fecha:	09/06/2025				
Hora:	14:00				
Modalidad de la sustentación:	Presencial		Virtual	x	
Nombre del estudiante:	Jorge Mario Ceballos Zuluaga				
Número de documento de identidad:	1.041.204.685				
Programa académico:	Maestría en Energía				
Título de trabajo de grado:	DISEÑO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN PARA ALIMENTAR UNA GRANJA DE FOTOBIOREACTORES EN LA PLANTA DE CEMENTOS ARGOS EN CARTAGENA				
Director(a):	Andrés David Morales Rojas				
Codirector(a):	Francisco Javier Ramírez Gil				


RESULTADO DE LA EVALUACIÓN:

El Trabajo de Grado se evalúa en una escala numérica de 0.0 a 5.0, cuya nota mínima aprobatoria es 3.5, por lo que:

- Aprobado: La nota se ubica entre 3.5 y 5.0
- Reprobado: La nota se ubica entre 3.49 y 0.0

Concepto	Peso	Jurado 1	Jurado 2	Jurado 3 (si aplica)	Promedio
Nota del trabajo escrito	60%	4.1	4.6	-	4.35
Nota de la sustentación oral	40%	4	4	-	4

Elaboró	Revisó	Aprobó
Nombre:	Nombre:	Nombre:
Cargo:	Cargo:	Cargo:
Fecha:	Fecha:	Fecha:

	ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO EN DEFENSA PÚBLICA	Código:
		Versión: x
		Fecha de Aprobación: XX/XX/XXXX
		Página 3 de 4

Notal final	4.17
--------------------	-------------

MENCIONES

Recomendación de otorgamiento de mención para trabajos de grado, de investigación o tesis de manera unánime por los jurados evaluadores.

Por favor argumente en la fila respectiva la recomendación de mención		Marque con una x
Laureada		
Meritoria		
No otorgar distinción	No cumple con los requisitos establecidos para el otorgamiento de menciones	x




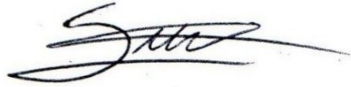
Luigi Antonio de Araujo Passos
Jurado 1



Saulo Alfredo Gómez Salcedo
Jurado 2

Elaboró	Revisó	Aprobó
Nombre:	Nombre:	Nombre:
Cargo:	Cargo:	Cargo:
Fecha:	Fecha:	Fecha:

	ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO EN DEFENSA PÚBLICA	Código:
		Versión: x
		Fecha de Aprobación: XX/XX/XXXX
		Página 4 de 4



Santiago Bustamante Mesa
Presidente sustentación

Elaboró	Revisó	Aprobó
Nombre: Cargo: Fecha:	Nombre: Cargo: Fecha:	Nombre: Cargo: Fecha:

Dedicatoria y Agradecimientos

Con profunda gratitud, dedico este trabajo a mis padres, quienes con su amor, esfuerzo y valores han sido el pilar fundamental de mi vida académica y personal. A mis hermanos y a mi abuela, cuyo apoyo incondicional y aliento constante han sido una fuente inagotable de motivación para alcanzar mis metas.

Extiendo mi más sincero agradecimiento a mis compañeros de la universidad, quienes, con su colaboración y amistad, hicieron de este camino un proceso enriquecedor. En especial, quiero expresar mi reconocimiento a Sebastián y Santiago, cuyo apoyo en la obtención y análisis de resultados fue invaluable para la culminación de esta tesis. Asimismo, agradezco a los profesores Héctor García, Daniel de la Rosa y Santos, de la Universidad Autónoma de Nuevo León (México), por su colaboración en la validación del modelo CFD desarrollado en este trabajo.

Agradezco también a la Institución Universitaria Pascual Bravo y a mis tutores de tesis, Andrés Morales y Francisco Ramírez, por su orientación, conocimiento y constante apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

Asimismo, deseo agradecer a Minciencias (Colombia) y a Cementos Argos S.A. por la financiación del proyecto “Biofactoría precomercial para la obtención de bioproductos de microalgas a partir de la valoración de CO₂ de fuentes industriales BIOFACO₂”, contrato No. 80740-440-2021.

Finalmente, agradezco a Gabriel Jaime Vargas, líder de Investigación y Desarrollo en Cementos Argos S.A., por la lectura crítica del documento y sus valiosas sugerencias, que contribuyeron a mejorar la calidad de esta tesis. También expreso mi agradecimiento a los evaluadores Saulo Alfredo Gómez Salcedo y Luigi Antonio de Araujo Passos por la minuciosa y valiosa revisión de este trabajo, cuyas observaciones y comentarios enriquecieron significativamente su contenido.

Resumen ejecutivo

La industria cementera contribuye de forma significativa a las emisiones globales de dióxido de carbono (CO_2) a nivel global, debido tanto al uso intensivo de energía térmica como al proceso de calcinación del carbonato de calcio en la producción de clinker. Estas emisiones representan un desafío ambiental significativo, impulsando la necesidad de estrategias innovadoras para la captura y aprovechamiento del CO_2 generado. Una de las soluciones propuestas en este estudio es el uso de fotobiorreactores (FBRs) como una tecnología biotecnológica viable para mitigar el impacto ambiental del sector cementero. Los FBRs permiten cultivar microalgas que, a través de la fotosíntesis, capturan CO_2 y lo convierten en biomasa con aplicaciones en biocombustibles, biofertilizantes y productos de alto valor agregado.

El presente trabajo desarrolla un sistema de distribución de gases de combustión para alimentar una granja de FBRs en la planta de Cementos Argos en Cartagena, optimizando tanto la disposición espacial de los reactores como la red de transporte de gases desde el horno de Clinker hasta los FBRs. Para lograr este objetivo, se empleó un enfoque basado en simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) acopladas a un modelo de radiación solar mediante el método Monte Carlo, lo que permitió evaluar la captación de irradiancia solar en los FBRs y su impacto en la producción de biomasa. Además, se diseñó y optimizó la red de distribución de gases de combustión, considerando factores como la caída de presión, la eficiencia de los sopladores y las condiciones de operación del sistema.

El estudio incluyó una evaluación detallada del impacto del espaciamiento y la alineación de los FBRs en la captación de radiación solar. Se analizaron diversas configuraciones en las que se variaron el espaciamiento entre reactores dentro de los módulos y el ángulo de alineación respecto al norte geográfico. Los resultados indicaron que un espaciamiento de $0.5m$ y un ángulo de alineación de 16.2° respecto al norte en dirección este maximiza la captación de irradiancia y, en consecuencia, la producción de biomasa para la zona geográfica de estudio. Esta disposición permite minimizar las sombras proyectadas entre los FBRs, optimizando el aprovechamiento de la luz solar durante el día, asegurando una mayor eficiencia fotosintética para la captura de CO_2 , y consecuentemente, incrementando la producción de biomasa microalgal a lo largo del año.

En términos de la red de distribución de gases, se evaluaron diferentes configuraciones de tuberías y sopladores para garantizar un suministro eficiente y estable de CO_2 a la granja de FBRs. Se determinó que una red con tuberías de 2" en los módulos y 4" en la red principal es la más adecuada para minimizar pérdidas de presión y garantizar un flujo uniforme. Asimismo, se encontró que una configuración de

sopladores en paralelo es la más eficiente, permitiendo una distribución homogénea del gas sin comprometer el rendimiento energético del sistema.

La integración de estos elementos permitió desarrollar un sistema eficiente y optimizado para la captura y valorización de CO_2 en la industria cementera. Los resultados obtenidos muestran que la implementación de FBRs en la planta de Cementos Argos podría reducir significativamente las emisiones de CO_2 , con una captura estimada de 254.49ton de CO_2 por hectárea al año. Además, se estimó teóricamente una producción de biomasa generada de $173.52 \frac{ton}{ha \cdot año}$, que podría ser utilizada para la producción de biocombustibles y otros productos con potencial comercial, lo que representa una estrategia sostenible para el aprovechamiento de los gases de combustión industriales.

Este trabajo no solo demuestra la viabilidad técnica y operativa de la implementación de FBRs en la industria cementera, sino que también establece un marco metodológico para la optimización de su diseño y operación. La combinación de modelos CFD con simulaciones de radiación solar y optimización paramétrica permite mejorar la eficiencia del sistema y reducir los costos operativos. Adicionalmente, la metodología desarrollada puede aplicarse a otras industrias que buscan reducir su huella de carbono mediante estrategias biotecnológicas, lo que abre nuevas posibilidades para la integración de energías renovables y la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero en diferentes sectores.

Finalmente, este estudio contribuye a la consolidación de estrategias sostenibles en la industria cementera, alineándose con los compromisos internacionales de reducción de emisiones de CO_2 y la transición hacia una economía circular. La optimización del diseño de la granja de FBRs y la red de distribución de gases sienta las bases para futuras investigaciones en la captura y aprovechamiento de CO_2 , promoviendo el desarrollo de soluciones innovadoras para la descarbonización de procesos industriales.

Palabras claves: Captura de CO_2 ; Diseño de redes de transporte de gases; Dinámica de fluidos computacional; Flujo de gases en tuberías; Microalgas; Optimización paramétrica; Radiación Solar.

Executive summary

The cement industry contributes significantly to global carbon dioxide (CO_2) emissions due to both the intensive use of thermal energy and the calcination process of calcium carbonate during clinker production. These emissions represent a major environmental challenge, driving the need for innovative strategies for CO_2 capture and utilization. One of the solutions proposed in this study is the use of photobioreactors (PBRs) as a viable biotechnological technology to mitigate the environmental impact of the cement sector. PBRs allow the cultivation of microalgae that, through photosynthesis, capture CO_2 and convert it into biomass with applications in biofuels, biofertilizers, and high-value products.

This work develops a combustion gas distribution system to supply a PBR farm at the Cementos Argos plant in Cartagena, optimizing both the spatial arrangement of the reactors and the gas transport network from the clinker kiln to the PBRs. To achieve this objective, an approach based on computational fluid dynamics (CFD) simulations coupled with a solar radiation model using the Monte Carlo method was employed, allowing the evaluation of solar irradiance capture in the PBRs and its impact on biomass production. Additionally, the combustion gas distribution network was designed and optimized, considering factors such as pressure drop, blower efficiency, and system operating conditions.

The study included a detailed evaluation of the impact of PBR spacing and alignment on solar radiation capture. Various configurations were analyzed by varying the reactor spacing within the modules and the alignment angle relative to geographic north. The results indicated that a spacing of 0.5m and an alignment angle of 16.2° east of north maximizes irradiance capture and, consequently, biomass production for the study region. This arrangement minimizes shading between PBRs, optimizing solar light utilization during the day, ensuring greater photosynthetic efficiency for CO_2 capture, and consequently increasing microalgal biomass production throughout the year.

Regarding the gas distribution network, different pipe and blower configurations were evaluated to ensure an efficient and stable CO_2 supply to the PBR farm. It was determined that a network with 2" pipes within the modules and 4" pipes in the main network is most suitable to minimize pressure losses and ensure uniform flow. Additionally, parallel blower configuration was found to be the most efficient, allowing homogeneous gas distribution without compromising the energy performance of the system.

The integration of these elements enabled the development of an efficient and optimized system for CO_2 capture and valorization in the cement industry. The results show that the implementation of PBRs at the

Cementos Argos plant could significantly reduce CO_2 emissions, with an estimated capture of 254.49ton of CO_2 per hectare per year. Furthermore, theoretical biomass production of $173.52 \frac{ton}{ha \cdot año}$ was estimated, which could be used to produce biofuels and other commercially valuable products, representing a sustainable strategy for the utilization of industrial combustion gases.

This study not only demonstrates the technical and operational feasibility of implementing PBRs in the cement industry but also establishes a methodological framework for optimizing their design and operation. The combination of CFD models with solar radiation simulations and parametric optimization improves system efficiency and reduces operating costs. Additionally, the developed methodology can be applied to other industries seeking to reduce their carbon footprint through biotechnological strategies, opening new possibilities for the integration of renewable energies and the mitigation of greenhouse gas emissions across various sectors.

Finally, this work contributes to the consolidation of sustainable strategies within the cement industry, aligning with international commitments to reduce CO_2 emissions and advancing towards a circular economy. The optimization of the PBR farm design and the gas distribution network lays the groundwork for future research in CO_2 capture and utilization, promoting the development of innovative solutions for the decarbonization of industrial processes.

Keywords: CO_2 capture; Design of Gas Transport Networks; Computational Fluid Dynamics; Gas Flow in Pipelines; Microalgae; Parametric Optimization; Solar Radiation.

Tabla de contenido

Lista de tablas.....	15
Lista de figuras.....	16
Lista de símbolos.....	19
Lista de símbolos de la sección 3.1.1.....	19
Lista de símbolos de la sección 3.1.3.....	21
Lista de símbolos de la sección 3.2.1.....	23
Lista de símbolos de la sección 3.2.3.....	25
Lista de símbolos de la sección 3.3.1.....	25
Lista de acrónimos.....	27
Lista de productos.....	28
1. INTRODUCCIÓN.....	30
1.1. Planteamiento del problema de investigación.....	31
1.1.1. Contextualización de la problemática.....	31
1.1.2. Planteamiento del problema.....	33
1.1.3. Propuesta de solución.....	34
1.1.4. Justificación.....	35
2. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	37
2.1. Objetivo general.....	37
2.2. Objetivos específicos.....	37
2.3. Revisión de literatura.....	37
3. METODOLOGÍA.....	42
3.1. Fase 1: Identificación de condiciones de operación.....	42
3.1.1. Balance de masa en la producción de cemento.....	42
3.1.2. Factores que afectan el crecimiento y la productividad de las microalgas.....	49
3.1.3. Cálculo teórico de la productividad de la biomasa algal y el consumo de CO ₂	50

3.1.4.	Selección de la configuración de la distribución de los FBRs	55
3.2.	Fase 2: Distribución espacial de los FBRs	55
3.2.1.	Simulación CFD	56
3.2.2.	Estudio paramétrico para la distribución de la granja de FBRs	69
3.2.3.	Optimización paramétrica de la distribución de módulos de FBRs	75
3.3.	Etapa 3: Diseño de red de distribución de gases de combustión	80
3.3.1.	Mecánica de fluidos aplicada al diseño de tuberías	82
4.	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	90
4.1.	Cálculos relacionados con las condiciones de operación de los gases de combustión y la red de tubería	90
4.1.1.	Condiciones de operación de los FBRs.....	90
4.1.2.	Composición de los gases de combustión.....	90
4.2.	Resultados de la simulación CFD con radiación solar	92
4.2.1.	Irradiancia y temperatura a lo largo del día	93
4.2.2.	Distribución superficial de la irradiancia y la temperatura	93
4.3.	Resultados del DOE.....	94
4.3.1.	Descripción de los resultados del ANOVA	94
4.3.2.	Análisis del efecto del espaciamiento y la alineación en la captación de irradiación ...	94
4.3.3.	Análisis de la irradiancia y temperatura en función de la hora, alineación y espaciamiento entre FBRs	95
4.3.4.	Análisis de la producción de biomasa algal y captura de CO2 diaria en un módulo de FBRs en función del espaciamiento y la alineación	97
4.3.5.	Análisis de la producción de biomasa algal y captura de CO2 en la granja de FBRs en función del espaciamiento y la alineación.....	98
4.3.6.	Selección del espaciamiento y la alineación adecuados para los FBRs.....	100
4.4.	Resultado de la optimización paramétrica de la granja de FBRs	102
4.4.1.	Superficie de ajuste para el cálculo de la biomasa.....	102

4.4.2.	Optimización paramétrica en Python.....	103
4.5.	Cálculos relacionados con la granja de FBRs.....	105
4.6.	Diseño de la red de distribución de gases.....	106
4.6.1.	Efecto de la configuración de los módulos de FBRs	107
4.6.2.	Efecto de las cargas de presión, flujo y fricción	110
4.6.3.	Cálculos para la granja de FBRs.....	111
4.6.1.	Costos de operación de la red	118
5.	CONCLUSIONES.....	119
6.	TRABAJOS FUTUROS	121
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	122

Lista de tablas

Tabla 1. Resumen de estudios previos sobre distribución de gases y disposición de FBRs. Fuente: Elaboración propia.	41
Tabla 2. Controles de malla. Fuente: Elaboración propia.	65
Tabla 3. Estadística del mallado. Fuente: Elaboración propia.	65
Tabla 4. Condiciones de frontera de fluidos aplicadas en la simulación. Fuente: Elaboración propia.	66
Tabla 5. Configuración de las superficies de radiación solar. Fuente: Elaboración propia.	67
Tabla 6. Propiedades ópticas de los modelos de radiación solar. Fuente: Elaboración propia.	68
Tabla 7. Configuración de la solución. Fuente: Elaboración propia.	69
Tabla 8. Librerías de Python utilizadas para resolver el problema de optimización. Fuente: Elaboración propia.	80
Tabla 9. Coeficientes de fricción (K) para reducciones. Fuente: [67].	86
Tabla 10. Tipos de sopladores. Fuente: Elaboración propia.	88
Tabla 11. Configuración de sopladores. Fuente: Elaboración propia.	89
Tabla 12. Mediciones en chimenea y composición del carbón. Fuente: Elaboración propia.	91
Tabla 13. Variables de gases de combustión en chimenea. Fuente: Elaboración propia.	92
Tabla 14. Flujo másico de especies de interés en chimenea. Fuente: Elaboración propia.	92
Tabla 15. Resultados del ANOVA para espaciamiento y alineación. Fuente: Elaboración propia.	94
Tabla 16. Número total de módulos y FBRs para distintos espaciamientos. Fuente: Elaboración propia.	99
Tabla 17. Ecuaciones de ajuste para la superficie de ajuste. Fuente: Elaboración propia.	102
Tabla 18. Flujo másico de especies de interés por hectárea. Fuente: Elaboración propia.	106
Tabla 19. Caídas de presión en el sistema de tuberías. Fuente: Elaboración propia.	115
Tabla 20. Resumen de tuberías de PVC y accesorios necesarios para un módulo de FBRs. Fuente: Elaboración propia.	116
Tabla 21. Costos de tuberías de PVC para la granja. Fuente: Elaboración propia.	117
Tabla 22. Costos de accesorios para la granja. Fuente: Elaboración propia.	117

Lista de figuras

Figura 1. Terreno dispuesto para la ubicación del proyecto y la chimenea de la planta de Cementos en Argos, Cartagena. Fuente: Adaptación propia.	32
Figura 2. Principales configuraciones de fotobiorreactores para cultivos de microalgas. Fuente: [9].	32
Figura 3. Metodología propuesta. Fuente: Elaboración propia.....	42
Figura 4. Configuración de la distribución de los FBRs. Fuente: Fuente: Elaboración propia.	55
Figura 5. Descripción del problema de la simulación. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 6. Propiedades opticas de las superficies. Fuente: Adaptado de [52].....	59
Figura 7. Modelo CAD del dominio de fluido para la simulación CFD y de un módulo de FBRs: FBRs objetivos (gris) y circundantes (verdes). a) Dominio de fluido; b) FBRs. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 8. Diagrama de flujo de la simulación CFD. Fuente: Elaboración propia.....	62
Figura 9. Equinoccios y solsticios. Adaptado de [55].	63
Figura 10. Discretización espacial del modelo geométrico. a) Zonas de refinación; b) Mallado superficial. Fuente: Elaboración propia.....	64
Figura 11. Análisis de independencia. a) Malla; b) rayos solares. Fuente: Elaboración propia.	65
Figura 12. Asignación de condiciones de frontera al modelo CFD (superficie resaltada en gris). a) Inlet; b) Outlet; c) Far-field; b) Ground; e) WallFBRs. Fuente: Elaboración propia.	67
Figura 13. Asignación de condiciones de frontera al modelo de radiación solar (superficies resaltadas en gris). a) SRSurfaceAir, parte frontal; b) SRSurfaceAir, parte trasera; c) SRSurfaceGround; d) SRSurfacePMMA. Fuente: Elaboración propia.	68
Figura 14. Modelo de radiación solar ideal. Fuente: Elaboración propia.	68
Figura 15. Alineación de los módulos de FBRs entre el eje X+ y el norte. Fuente: Elaboración propia.	70
Figura 16. Irradiancia según el ángulo de alineación. Fuente: Elaboración propia.	71
Figura 17. Alineación de los módulos de FBRs. a) 0 °; b) 30 °; c) 60 °; d) 90 °. Fuente: Elaboración propia.....	71
Figura 18. Esquema general de la red de distribución de gases. Fuente: Elaboración propia.	81
Figura 19. Ejemplo para el coeficiente de pérdidas por accesorios. Fuente: [65].	85
Figura 20. Diagrama de flujo de cálculos realizados en MATLAB. Fuente: Elaboración propia.	86
Figura 21. Curva característica de sopladores. a) en serie; b) en paralelo. Fuente: Adaptado de [69].	88
Figura 22. Resultados en la superficie del módulo objetivo a lo largo del día 21/12/2023: Irradiancia G y temperatura T promedio para la alineación 90 ° y espaciado 0.5m. Fuente: Elaboración propia.	93

- Figura 23.** Distribución en el módulo objetivo a las 11:00 a.m. para la alineación 90° y espaciado 0.5m. a) Irradiancia G ; b) Temperatura superficial T . Fuente: Elaboración propia. 94
- Figura 24.** Efecto del espaciamiento sY y ángulo de alineación φ en la irradiación H captada en la granja. Fuente: Elaboración propia. 95
- Figura 25.** Irradiancia promedio G para los 4 días analizados captada en función de la hora del día para diferentes espaciamientos entre FBRs sY y ángulo de alineación φ . a) 0° ; b) 30° ; c) 60° ; d) 90° . Fuente: Elaboración propia. 96
- Figura 26.** Temperatura promedio T para los días analizados en función de la del espaciamiento sY y ángulos de alineación φ . Fuente: Elaboración propia. 97
- Figura 27.** Producción diaria de biomasa algal BaM y captura de CO_2 FCO_2M diaria por un módulo de FBR en función del espaciamiento y el ángulo de alineación. Fuente: Elaboración propia. 98
- Figura 28.** Diferencias de sombras a la 1 pm. a) Día 21/06/2025 (Solsticio de verano); b) 21/12/2025 (Solsticio de invierno). Fuente: Elaboración propia usando 3D Sun-Path [45]. 98
- Figura 29.** Producción de biomasa algal BaF y captura de CO_2 FCO_2F diaria en la granja de FBRs en función del espaciamiento y el ángulo de alineación. Fuente: Elaboración propia. 99
- Figura 30.** Producción de biomasa algal $BaFy$ y captura de CO_2 FCO_2Fy anual promedio en la granja de FBRs en función del espaciamiento y el ángulo de alineación. Fuente: Elaboración propia. 100
- Figura 31.** Superficie de ajuste con el polinomio de grado 3 para el cálculo de la producción de biomasa $BaFa$ en un módulo de FBRs. Fuente: Elaboración propia. 103
- Figura 32.** Superficie resultante de la función objetivo con el polinomio de grado 3 para el cálculo de la producción de biomasa BaF en la granja de FBRs. Fuente: Elaboración propia. 104
- Figura 33.** Vista de planta de la distribución espacial de los módulos y de la red de gases. Fuente: Elaboración propia. 106
- Figura 34.** Red de tubería de configuración abierta. a) simple; b) simple con reducción; c) ramificado; d) ramificado con reducción. Fuente: Elaboración propia. 107
- Figura 35.** Red de tubería de configuración cerrada. a) simple; b) simple con reducción; c) ramificado; d) ramificado con reducción. Fuente: Elaboración propia. 107
- Figura 36.** Resultados de caudal vs caída de presión para la red de tubería en configuración abierta. a) simple; b) ramificada. Fuente: Elaboración propia. 108
- Figura 37.** Resultados de caudal vs caída de presión para la red de tubería en configuración cerrada. a) simple; b) ramificada. Fuente: Elaboración propia. 109

Figura 38. Caudal vs potencia para la red de tubería de 2" en configuración abierta. Fuente: Elaboración propia..... 109

Figura 39. Configuración ramificada abierta. a) 1"; b) 2"; c) 2 1/2". Fuente: Elaboración propia. 110

Figura 40. Configuración ramificada abierta. a) 2 1/2" a 1"; b) 2 1/2" a 1 1/2"; c) 2 1/2" a 2". Fuente: Elaboración propia. 111

Figura 41. Distribución de FBRs en un módulo. Fuente: Elaboración propia..... 113

Figura 42. Red de distribución de gases en la granja de FBRs. Fuente: Elaboración propia. 114

Figura 43. Caída de presión en tuberías. a) Tubería principal; b) tubería secundaria. Fuente: Elaboración propia..... 114

Lista de símbolos

A continuación, se presentan los símbolos utilizados en este trabajo, organizados de acuerdo con las secciones donde son aplicados.

Lista de símbolos de la sección 3.1.1

Símbolo	Unidad	Descripción
$\%EA$	[%]	Porcentaje de exceso de aire.
A_A	[-]	Constante de Antoine para el agua, $A_A = 8.07131$.
a	[-]	Valores empíricos para estimar la temperatura de rocío en los gases de combustión, $a = 17.67$.
a_r	$\left[\frac{kg_{aire}}{kg_{coal}}\right]$	Factor de aireación real.
a_{th}	$\left[\frac{kg_{aire}}{kg_{coal}}\right]$	Factor de aireación teórico del carbón.
B_A	[-]	Constante de Antoine para el agua, $B_A = 1730.63$.
b	[°C]	Valores empíricos para estimar la temperatura de rocío en los gases de combustión, $b = 243.5^\circ C$.
C_A	[-]	Constante de Antoine para el agua, $C_A = 233.426$.
EA	[-]	Exceso de aire.
F_r	$\left[\frac{kg_{O_2seco}}{kg_{coal}}\right]$	Fracción volumétrica real de O_2 base seca, medido en chimenea.
HR_{H_2O}	[-]	Humedad relativa del agua.
h_{rm}	$\left[\frac{kg_{H_2O}}{kg_{rm}}\right]$	Humedad del <i>raw meal</i> .
m_{gehum}	$[kg_{gehum}]$	Masa de los gases de combustión.
\dot{m}_i	$\left[\frac{kg_i}{s}\right]$	Flujo másico de cada compuesto (i) de los gases de combustión.
\dot{m}_{chim}	$\left[\frac{kg_{gehum}}{s}\right]$	Flujo másico de los gases de combustión en la chimenea.
M_{air}	$\left[\frac{kg_{air}}{kmol_{air}}\right]$	Masa molar del aire.
M_i	$\left[\frac{kg_i}{kmol_i}\right]$	Masa molar de la especie (i).

$O_{2nec\ coal}$	$\left[\frac{kg_{O_2}}{kg_{coal}} \right]$	Oxígeno necesario para quemar el carbón.
p	$\left[\frac{kg_{H_2O}}{kg_{coal}} \right]$	H_2O en los gases de combustión.
p_{chim}	$[kPa]$	Presión absoluta de los gases de combustión en la chimenea.
$p_{sat_{H_2O}}$	$[kPa]$	Presión de saturación del agua.
p_{vapor}	$[kPa]$	Presión de vapor del agua.
q	$\left[\frac{kg_{CaO}}{kg_{coal}} \right]$	CaO producido.
R_{rm}	$\left[\frac{kg_{rm}}{kg_{coal}} \right]$	Razón <i>raw meal</i> / carbón.
r	$\left[\frac{kg_{O_2}}{kg_{coal}} \right]$	O_2 en los gases de combustión.
T_{air}	$[^{\circ}C]$	Temperatura del aire.
T_{chim}	$[^{\circ}C]$	Temperatura de los gases de combustión en la chimenea.
T_{rocio}	$[^{\circ}C]$	Temperatura de rocío.
\dot{V}_{chim}	$\left[\frac{m^3_{g_{e_{hum}}}}{s} \right]$	Flujo volumétrico de los gases de combustión en la chimenea.
W_{air}	$[-]$	Relación de mezcla del aire húmedo.
x	$\left[\frac{kg_{CO_2}}{kg_{coal}} \right]$	CO_2 en los gases de combustión.
y	$\left[\frac{kg_{SO_2}}{kg_{coal}} \right]$	SO_2 en los gases de combustión.
y_C	$\left[\frac{kg_C}{kg_{coal}} \right]$	Fracción másica del C en el carbón.
$y_{CaCO_3\ rm}$	$\left[\frac{kg_{CaCO_3}}{kg_{rm}} \right]$	Fracción másica del $CaCO_3$ en el <i>raw meal</i> .
y_H	$\left[\frac{kg_H}{kmol_{coal}} \right]$	Fracción másica del H en el carbón.
$y_{H_2O\ coal}$ $= CZ$	$\left[\frac{kg_{H_2O}}{kg_{coal}} \right]$	Fracción másica de la humedad en el carbón.
$y_{H_2O\ rm}$	$\left[\frac{kg_{H_2O}}{kg_{coal}} \right]$	Fracción másica de la humedad en el <i>raw meal</i> .

$y_{H_2O_{air}}$	$\left[\frac{kg_{H_2O}}{kg_{coal}} \right]$	Fracción másica de la humedad en el aire.
y_i	$\left[\frac{kg_i}{kg_{ge_{hum}}} \right]$	Fracción másica de la especie (i) en los gases de combustión húmedos (ge_{hum}).
y_N	$\left[\frac{kg_N}{kg_{coal}} \right]$	Fracción másica del N en el carbón.
y_O	$\left[\frac{kg_O}{kg_{coal}} \right]$	Fracción másica del O en el carbón.
y_S	$\left[\frac{kg_S}{kg_{coal}} \right]$	Fracción másica del S en el carbón.
z	$\left[\frac{kg_{N_2}}{kg_{coal}} \right]$	N_2 en los gases de combustión.
γ	$[-]$	Función auxiliar que combina el contenido de humedad en el aire con la temperatura.
$\rho_{ge_{hum}}$	$\left[\frac{kg_{ge_{hum}}}{m^3_{ge_{hum}}} \right]$	Densidad de los gases de combustión.

Lista de símbolos de la sección 3.1.3

Símbolo	Unidad	Descripción
A	$[m^2]$	Área superficial de los FBRs en el módulo.
Ba	$\left[\frac{kg_{CH_2O}}{m^2 \cdot día} \right]$	Biomasa algal producida según la irradiación en un día.
Ba_F	$\left[\frac{ton_{CH_2O}}{ha \cdot día} \right]$	Biomasa algal por la granja.
$Ba_{F_{avg}}$	$\left[\frac{ton_{CH_2O}}{ha \cdot día} \right]$	Producción de biomasa en la granja promedio de los días simulados.
Ba_{F_y}	$\left[\frac{ton_{CH_2O}}{ha \cdot anual} \right]$	Producción de biomasa en la granja promedio de los días simulados.
Ba_M	$\left[\frac{kg_{CH_2O}}{modulo \cdot día} \right]$	Biomasa algal producida por el módulo.
c	$\left[\frac{m}{s} \right]$	Velocidad de la luz en el vacío, $c = 3.00 \times 10^8 \frac{m}{s}$.
E_{ba}	$\left[\frac{kJ}{g_{CH_2O}} \right]$	Energía en kJ utilizada para generar un gramo de biomasa algal.
E_{CO_2}	$\left[\frac{kJ}{g_{CO_2}} \right]$	Energía en kJ utilizada para capturar una unidad de CO_2 .

E_{in}	$\left[\frac{kJ}{mol} \right]$	Energía asociada a un mol de fotones.
$E_{in_{ba}}$	$\left[\frac{mol}{g_{CH_2O}} \right]$	Energía en Einsteins requerida para generar un gramo de biomasa algal.
$E_{in_{CO_2}}$	$\left[\frac{mol}{g_{CO_2}} \right]$	Energía en Einsteins requerida para generar un gramo de CO_2 .
F_{CO_2}	$\left[\frac{kg_{CO_2}}{m^2 \cdot día} \right]$	CO_2 fijado según la irradiación en un día.
$F_{CO_2F_{avg}}$	$\left[\frac{ton_{CO_2}}{ha \cdot día} \right]$	CO_2 en la granja promedio de los días simulados.
F_{CO_2F}	$\left[\frac{ton_{CO_2}}{ha \cdot día} \right]$	CO_2 fijado total por la granja.
$F_{CO_2F_y}$	$\left[\frac{ton_{CO_2}}{ha \cdot anual} \right]$	CO_2 fijado total por la granja promedio de los días simulados.
F_{CO_2M}	$\left[\frac{kg_{CO_2}}{módulo \cdot día} \right]$	CO_2 fijado por el módulo.
G_j	$\left[\frac{W}{m^2} \right]$	Irradiancia promedio en el intervalo j .
h	$[J \cdot s]$	Constante de Planck, $h = 6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$.
H_F	$\left[\frac{kJ}{m^2 \cdot día} \right]$	Irradiación diaria recibida en la granja.
LT_X	$[m]$	Longitud del terreno en el eje X .
LT_Y	$[m]$	Longitud del terreno en el eje Y .
N_A	$\left[\frac{1}{mol} \right]$	Número de Avogadro, $N_A = 6.022 \times 10^{23} \frac{1}{mol}$.
N_{FBR_X}	$[m]$	Número de FBRs por módulo en el eje X .
N_{FBR_Y}	$[m]$	Número de FBRs por módulo en el eje Y .
N_{M_T}	$[-]$	Números de módulos en la granja.
N_{M_X}	$[-]$	Cantidad de módulos en el eje X .
N_{M_Y}	$[-]$	Cantidad de módulos en el eje Y .
M_{CH_2O}	$\left[\frac{g}{mol} \right]$	Masa molar de la biomasa algal.
R_u	$\left[\frac{kJ}{kmol \cdot K} \right]$	Constante de los gases ideales.
Δt	$[s]$	Duración del intervalo.
η_{CO_2}	$\left[\frac{g_{CO_2}}{g_{CH_2O}} \right]$	Eficiencia de conversión de biomasa algal en consumo de CO_2 .
λ	$[m]$	Longitud de onda, $\lambda = 575 nm$.

[·] [-] Función piso, o parte entera inferior.

Lista de símbolos de la sección 3.2.1

Símbolo	Unidad	Descripción
\vec{b}	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Termino fuente por unidad de masa.
C_{b2}	[-]	Constante de difusión adicional de \hat{v}
D	$\left[\frac{m^2}{s^2}\right]$	Termino de destrucción de \hat{v} .
E	$\left[\frac{J}{kg}\right]$	Energía total por unidad de masa (energía interna + cinética)
h_{FBR}	[m]	Altura del FBR.
h_s	[m]	Altura del soporte del FBR, no representado en el CAD.
h_T	[m]	Altura total del FBR y los soportes.
k	$\left[\frac{W}{m K}\right]$	Conductividad térmica del fluido.
k_s	[m]	Altura de rugosidad.
L_Y	[m]	Distancia del dominio en Y.
L_Z	[m]	Distancia del dominio en Z.
LD_X	[m]	Distancia de la frontera de salida al origen del CAD en X.
LU_X	[m]	Distancia de la frontera de entrada al origen del CAD en X.
\vec{n}	[-]	Vector normal unitario de la superficie.
P	$\left[\frac{m^2}{s^2}\right]$	Termino de producción de \hat{v} .
p	[Pa]	Presión del fluido.
p_{out}	[Pa]	Presión de salida.
q''	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	Flujo de calor.
\vec{s}	[-]	Vector unitario de dirección del rayo solar incidente.
S	$\left[\frac{W}{m^3}\right]$	Fuente de energía térmica (incluye radiación solar)
s_{M_X}	[m]	Separación de módulos en el eje X.
s_{M_Y}	[m]	Separación de módulos en el eje Y.
s_X	[m]	Separación de los FBRs dentro del módulo en el eje X.

s_Y	[m]	Separación de los FBRs objetivos en el eje Y.
t	[s]	Tiempo.
t_{FBR}	[m]	Espesor del FBR.
t_{TS}	[mm]	Espesor del material en el <i>thin solid</i> .
T	[°C o K]	Temperatura del fluido.
\vec{u}	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Vector de velocidad del fluido.
\bar{u}_j	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Componente promedio de la velocidad en j
u_X	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Componente X de \vec{u} .
u_Y	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Componente Y de \vec{u} .
u_Z	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Componente Z de \vec{u} .
u^*	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Velocidad de fricción.
$\hat{\nu}$	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$	Viscosidad turbulenta modificada.
V	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Velocidad del viento.
V_X	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Componente X de la velocidad de Far-Field.
V_Y	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Componente Y de la velocidad de Far-Field.
V_Z	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Componente Z de la velocidad de Far-Field.
w_{FBR}	[m]	Ancho del FBR.
x_j	[m]	Coordenada espacial en dirección j
$\alpha(\theta)$	[-]	Absortividad. Fracción de la energía que se absorbe por el material.
ρ	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Densidad del fluido.
$\rho_d(\theta)$	[-]	Reflexión difusa.
$\rho_s(\theta)$	[-]	Reflexión especular.
σ	[-]	Constante que representa la relación entre la viscosidad molecular y la viscosidad turbulenta modificada.
τ	[Pa]	Tensor de esfuerzos viscosos.

$\tau_d(\theta)$	[-]	Transmisión difusa.
$\tau_s(\theta)$	[-]	Transmisión especular.
θ	[°]	Ángulo de incidencia de la radiación solar sobre la superficie.
θ_{wind}	[°]	Ángulo de viento.
μ	[Pa s]	Viscosidad dinámica del fluido.

Lista de símbolos de la sección 3.2.3

Símbolo	Unidad	Descripción
Ba_{Fa}	$\left[\frac{kg_{CH_2O}}{m^2 \cdot día}\right]$	Producción de biomasa algal de la granja ajustada
Ba_{Fo}	$\left[\frac{kg_{CH_2O}}{m^2 \cdot día}\right]$	Producción de biomasa algal de la granja observada.
$\overline{Ba_{Fo}}$	$\left[\frac{kg_{CH_2O}}{m^2 \cdot día}\right]$	Promedio de la producción de biomasa algal de la granja ajustada.
j	[-]	Grado total del término (suma de los exponentes de ambas variables).
$j - k$	[-]	Exponente aplicado al ángulo de alineación (α).
k	[-]	Exponente aplicado al espaciamiento (s_y).
LT_{max}	[m]	Longitud máxima del terreno disponible
n	[-]	Grado del polinomio
p_{jk}	[-]	Coefficientes del modelo, determinados a través de un ajuste por mínimos cuadrados
R^2	[-]	Coefficiente de determinación
φ	[°]	Ángulo de alineación de los FBRs respecto al norte geográfico.

Lista de símbolos de la sección 3.3.1

Símbolo	Unidad	Descripción
$D = D_h$	[m]	Díámetro interno hidráulico de la tubería.
f	[-]	Coefficiente de fricción., [-].
g	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Aceleración de la gravedad.
H_A	[m]	Energía añadida por bomba o soplador.
H_L	[m]	Pérdidas mayores o por longitud.
H_{LT}	[m]	Pérdidas totales del sistema.

H_M	[m]	Pérdidas menores o por accesorios.
H_R	[m]	Energía retirada (por turbina).
K	[-]	Coefficiente de pérdidas por accesorios.
L	[m]	Longitud de la tubería.
p_1, p_2	[Pa]	Presión estática en los puntos 1 y 2.
Re	[-]	Número de Reynolds.
v	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Velocidad del fluido.
v_1, v_2	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Velocidad del fluido en los puntos 1 y 2.
\dot{V}	$\left[\frac{m^3}{s}\right]$	Caudal volumétrico del fluido.
W	[W]	Potencia requerida del soplador
z_1, z_2	[m]	Altura de los puntos 1 y 2 desde una referencia común.
γ_1, γ_2	$\left[\frac{N}{m^3}\right]$	Peso específico del fluido ($\gamma = \rho \cdot g$).
ε	[-]	Rugosidad relativa de la tubería.

Lista de acrónimos

Acrónimo	Definición
ANOVA	Análisis de varianza.
C	Carbono.
$CaCO_3$	Carbonato de calcio.
CaO	Óxido de calcio.
CCUS	Captura, Uso y Almacenamiento de Carbono.
CFD	Dinámica de Fluidos Computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>).
CH_2O	Biomasa equivalente o biomasa algal.
CO_2	Dióxido de carbono.
CO_{2eq}	Unidad de medida que calcula la emisión de los gases de efecto invernadero.
$CO(NH_2)_2$	Urea o carbamida.
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística.
DOE	Diseño de experimentos.
FAC	Corrosión acelerada por flujo.
FBR	Fotobiorreactor.
GIEN	Grupo de Investigación e Innovación en energía.
GIAM	Grupo de Investigación e Innovación Ambiental.
H_2O	Agua.
MCRT	Método de trazado de rayos de Monte Carlo.
N	Nitrógeno.
N_2	Nitrógeno molecular.
NO_3^-	Nitrato.
NH_4^+	Amonio.
O_2	Oxígeno molecular.
ODS	Objetivos de desarrollo sostenible.
OpEx	Costo de operación de la granja.
PAR	Radiación fotosintéticamente activa.
PBR	Photobioreactor
ROS	Especies reactivas de oxígeno.
SO_2	Dióxido de azufre.
UE	Unión Europea.

Lista de productos

A continuación, se presenta la lista de productos académicos y tecnológicos que se lograron durante el tiempo de desarrollo de la presente tesis de maestría, los cuales tienen relación directa con los temas tratados en el presente manuscrito.

Ponencias

J. M. Ceballos-Zuluaga, A. D. Morales-Rojas, y F. J. Ramírez-Gil, “Simulación CFD de la radiación solar en Fotobiorreactores tipo panel para el cultivo de microalgas”, en *Expotecnológica 2023*, Colombia: Institución Universitaria Pascual Bravo, oct. 2023. [En línea]. Disponible en: https://expotecnologica.pascualbravo.edu.co/wp-content/uploads/2024/08/memorias_2023.pdf

J. M. Ceballos-Zuluaga, J. S. García-Bustamante, F. J. Ramírez-Gil, y A. D. Morales-Rojas, “Estudio CFD del efecto de las condiciones de frontera en la irradiancia recibida y la temperatura de las paredes en fotobiorreactores”, en *Congreso internacional de ingeniería y biotecnología de microalgas (CIBIM)*, Chile: Federación Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, oct. 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.cibim.cl/wp-content/uploads/2024/10/R6_Sesion-8.pdf

F. S. Giraldo-Montes, J. M. Ceballos-Zuluaga, F. J. Ramírez-Gil, y A. D. Morales-Rojas, “Optimización energética en el diseño de tubería para la distribución de gases con la finalidad de alimentar una granja de fotobiorreactores”, en *Expotecnológica 2024*, Colombia: Institución Universitaria Pascual Bravo, oct. 2024. [En línea]. Disponible en: https://expotecnologica.pascualbravo.edu.co/wp-content/uploads/2025/01/memorias_2024.pdf

J. S. García-Bustamante, J. M. Ceballos-Zuluaga, F. J. Ramírez-Gil, y A. D. Morales-Rojas, “Optimización de la distribución de fotobiorreactores mediante diseño de experimentos y simulación CFD”, en *Expotecnológica 2024*, Colombia: Institución Universitaria Pascual Bravo, oct. 2024. [En línea]. Disponible en: https://expotecnologica.pascualbravo.edu.co/wp-content/uploads/2025/01/memorias_2024.pdf

Ceballos Zuluaga, J. M., García Bustamante, J. S., Giraldo Montes, F. S., Ramírez Gil, F. J., & Morales Rojas, A. D. (2023). *Diseño de un sistema de distribución de gases de combustión para alimentar una granja de fotobiorreactores en la planta de Cementos Argos en Cartagena* [Póster]. Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia.

Artículo de congreso

J. M. Ceballos-Zuluaga, J. S. García-Bustamante, F. J. Ramírez-Gil, y A. D. Morales-Rojas, “Estudio CFD del efecto de las condiciones de frontera en la irradiancia recibida y la temperatura de las paredes en fotobiorreactores”, en *Congreso internacional de ingeniería y biotecnología de microalgas (CIBIM)*, Chile: Federación Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, oct. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://e-spacio.uned.es/entities/publication/e097695c-18c0-4460-aab6-0b7643cca876>

Pasantía

J. M. Ceballos-Zuluaga, “Estancia corta de investigación en el Laboratorio de Termosolar bajo la tutoría de los profesores Héctor García Lara, Daniel de la Rosa Urbalejo y Óscar Alejandro de la Garza de León”. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México, noviembre de 2023.

Reporte

J. M. Ceballos-Zuluaga, F. S. Giraldo-Montes, J. S. García-Bustamante, F. J. Ramírez-Gil, y A. D. Morales-Rojas, “Evaluación de sistemas de captura de CO_2 generado en procesos industriales para la obtención de biomasa microalgal”, Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia, Informe Técnico, nov. 2024.

Software

J. M. Ceballos-Zuluaga, F. J. Ramírez-Gil y A. D. Morales-Rojas, Software de Optimización Paramétrica de Granjas de Fotobiorreactores para Captura de CO_2 , Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia, [En desarrollo].

1. INTRODUCCIÓN

En un mundo en constante evolución, la creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de mitigar sus efectos se han convertido en imperativos innegables. La industria del cemento, esencial para la construcción y el desarrollo de los países, genera emisiones considerables de dióxido de carbono (CO_2), debido al uso intensivo en energía térmica y a la calcinación de la piedra caliza. Este contexto ha dado lugar a una búsqueda activa de enfoques que no solo reduzcan las emisiones de CO_2 , sino que también exploren alternativas de aprovechamiento de estas emisiones.

Este proyecto se desarrolla como una solución a este problema, enfocándose en la captura de gases de combustión a través de un sistema innovador que alimenta a una granja de fotobiorreactores (FBRs). Estos sistemas biotecnológicos, al cultivar microalgas utilizando CO_2 como recurso, no solo contribuyen a la sostenibilidad ambiental, sino que también generan, productos tales como biocombustibles, fertilizantes, biopolímeros y/o productos de alto valor agregado [1].

El presente documento detalla el diseño de un sistema de distribución de gases de combustión en la planta de Cementos Argos en Cartagena. Este diseño incluye la optimización de la disposición de los FBRs para maximizar la captación de radiación solar y la creación de una red eficiente para transportar los gases desde el horno de Clinker hasta los reactores. Este enfoque combina simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) con técnicas de optimización paramétrica para asegurar la máxima eficiencia.

En las siguientes secciones del trabajo, el lector encontrará un planteamiento detallado del problema, incluyendo su contexto global y local, y una pregunta de investigación que guía la solución propuesta. También se exponen los objetivos del proyecto, el marco teórico y el estado del arte relacionados con los FBRs, la captura de CO_2 y las redes de distribución de gases. La metodología describe los métodos empleados para diseñar y simular el sistema, así como los criterios de selección de parámetros y las técnicas de optimización utilizadas. Finalmente, se presentan los resultados y discusión derivados de las simulaciones CFD y del análisis del diseño, seguidos por las conclusiones y recomendaciones que resumen los aportes del trabajo y plantean propuestas para investigaciones futuras. Con esta estructura, el documento no solo busca plantear una solución técnica al problema de las emisiones de CO_2 en la industria del cemento, sino también servir como una referencia para proyectos similares en otros sectores industriales.

1.1. Planteamiento del problema de investigación

Esta sección inicia con una contextualización general del problema, para luego definirlo claramente, y finaliza con la propuesta de solución abordada con el proyecto y su respectiva justificación.

1.1.1. Contextualización de la problemática

Cementos Argos es una multinacional colombiana productora y comercializadora de cemento y concreto. El cemento es el producto más representativo de esta empresa, seguido por el concreto y otros materiales de construcción. Según datos del DANE [2], en el periodo comprendido entre febrero 2022 y enero 2023 hubo una producción de 14.6 millones de toneladas de cemento en Colombia. En contraste, la producción de cemento en China fue de 2,210 millones de toneladas para el 2022 [3]. Cementos Argos aportó aproximadamente el 35% de producción de cemento en Colombia para el año 2023 [4]. El cemento es el material más utilizado en el sector de la construcción, puesto que permite satisfacer las necesidades de obras civiles, tales como vivienda, puentes, centros comerciales, entre otros, perdurando significativamente en el tiempo y su uso sólo es superado por el agua [5].

Actualmente, Cementos Argos y los grupos GIEN y GIAM de la I.U. Pascual Bravo están trabajando en un proyecto de investigación financiado por Minciencias llamado: “Evaluación de sistemas de captura de CO₂ generado en procesos industriales para la obtención de biomasa microalgal”. El cual se enfoca en establecer la viabilidad técnico-económica de diferentes sistemas precomerciales de cultivo de microalgas para obtener altos niveles de captura del CO₂ generado en procesos industriales y operados bajo condiciones reales. En la **Figura 1** se representa el área de referencia utilizada para proyectar la producción de microalgas (granja de FBRs tipo panel). Estos FBRs son reactores biológicos donde se cultivan las microalgas, proceso en el cual se suministra CO₂ y nutrientes, en el cual la luz solar se encarga de favorecer la fotosíntesis de las microalgas, creando una biomasa que se puede transformar en diferentes productos de valor agregado, tales como: suplementos de alimentación animal, biopolímeros, vitaminas o biocombustibles [6], los cuales son el producto final deseado en dicho proyecto.

Un fotobiorreactor (FBR), que puede ser de tipo abierto o cerrado, es un sistema utilizado para el cultivo de microorganismos fotosintéticos en medio líquido bajo condiciones controladas de luz, mezcla y transferencia de masa y calor [7]. Los FBRs cerrados ofrecen ventajas significativas frente a los sistemas abiertos, especialmente en cuanto al control de las condiciones de cultivo, lo cual es fundamental para optimizar la productividad y calidad de la biomasa. Aunque los sistemas abiertos suelen requerir una menor

inversión inicial, presentan limitaciones en eficiencia de captación de luz, control de temperatura y mayor riesgo de contaminación. En contraste, los FBRs cerrados permiten una mayor eficiencia en el uso del área, un mejor aprovechamiento de la irradiancia y una producción más consistente, lo que los hace competitivos desde el punto de vista técnico y, en muchos casos, también económico [8]. Estos dispositivos pueden tener diseños planos o tubulares, y ofrecen una amplia variedad de configuraciones y modos de operación, permitiendo obtener una mayor productividad y calidad de la biomasa generada. En la **Figura 2** se observan las diferentes configuraciones de los FBRs.

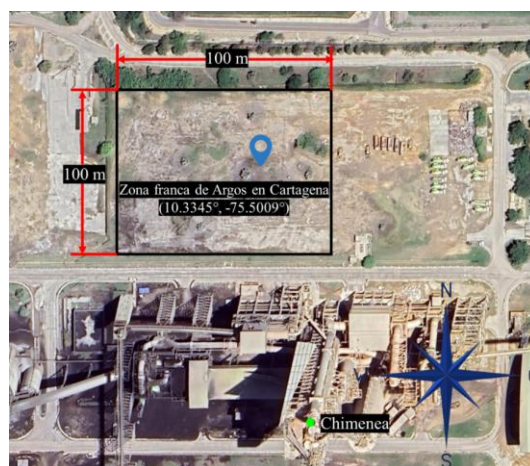


Figura 1. Terreno dispuesto para la ubicación del proyecto y la chimenea de la planta de Cementos en Argos, Cartagena. Fuente: Adaptación propia.

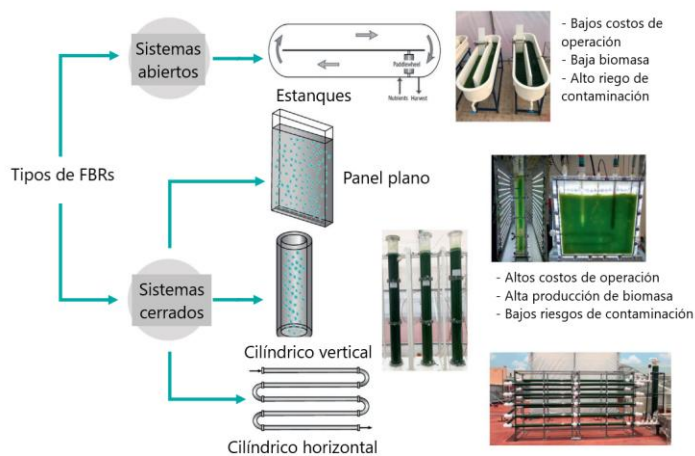


Figura 2. Principales configuraciones de fotobiorreactores para cultivos de microalgas. Fuente: [9].

Existen diversas variables que afectan el crecimiento de las microalgas. Entre los principales factores que influyen en los cultivos de microalgas se encuentran la cantidad de luz, que es un elemento crucial para el crecimiento fotosintético, y los nutrientes, los cuales son esenciales para su desarrollo. Entre los nutrientes esenciales se incluyen el carbono (C), suministrado generalmente en forma de dióxido de carbono (CO₂),

fundamental para la fotosíntesis. El nitrógeno (N) es otro nutriente clave, requerido para la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos, el cual puede encontrarse en formas como nitrato (NO_3^-), amonio (NH_4^+) o urea ($CO(NH_2)_2$). A medida que las microalgas consumen carbono, liberan oxígeno (O_2) a través de la fotólisis del agua, el cual se diluye en el medio de cultivo [10]. Las microalgas pueden tolerar ambientes con altas concentraciones de dióxido de carbono, lo que les permite utilizar este gas de efecto invernadero como fuente de carbono para su crecimiento. Además, pueden asimilar otros compuestos presentes en la atmósfera, lo que las hace una alternativa viable para la mitigación de emisiones contaminantes [11]. Otro factor determinante en su crecimiento es la temperatura, ya que cada cepa presenta un rango óptimo dentro del cual su tasa de multiplicación celular es máxima. Fuera de este rango, el metabolismo de las microalgas se ve afectado, reduciendo su eficiencia fotosintética y, en casos extremos, comprometiendo su viabilidad. Los sistemas fotosintéticos generan calor debido a la ineficiencia en la conversión de la energía lumínica en energía química. En condiciones ideales, la conversión teórica de la luz roja alcanza un 31%, mientras que el 69% restante se disipa en forma de calor [12]. Esta generación de calor puede elevar la temperatura del medio de cultivo, afectando el equilibrio térmico del sistema y, por ende, la productividad del cultivo.

1.1.2. Planteamiento del problema

La producción de cemento, que se encuentra dentro del sector industrial, aportó el 5.2% de emisiones de CO_{2eq} ¹ (3.06 billones de toneladas de CO_{2eq}) a nivel mundial en 2019 [6]. Estas emisiones provienen de dos fuentes principales: las reacciones químicas del proceso de calcinación y la combustión de combustibles fósiles. Aproximadamente 60 – 65% de las emisiones son inherentes a la calcinación del carbonato de calcio ($CaCO_3$), proceso en el que se libera CO_2 al transformarse en óxido de calcio (CaO) bajo altas temperaturas. El 35 – 40% restante proviene de la combustión de combustibles fósiles utilizados para generar el calor requerido en los hornos de clinkerización [13]. En el 2022, Cementos Argos produjo 14 millones de toneladas de CO_2 [14], teniendo en cuenta las emisiones generadas en todos los países en que opera la compañía. De acuerdo a los datos registrados en la página Our World Data [15], Colombia emitió 91 millones de toneladas de CO_2 en el 2021, y el sector del cemento produjo 6% de CO_2 en el mismo año.

¹ El CO_{2eq} es una unidad de medida que calcula la emisión de los gases de efecto invernadero.

Este panorama ha llevado a las empresas del sector a buscar tecnologías que les permitan mantener su competitividad sin reducir su producción, con la meta de disminuir entre el 20% y el 30% de sus emisiones de CO_2 hacia el año 2030 [16]. Esta estrategia responde al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 9 (industria, innovación e infraestructura) y el ODS 13 (acción por el clima). Dentro de este panorama, la captura, el almacenamiento y el uso del carbono (CCUS, por sus siglas en inglés) se presenta como una tecnología que ayuda a mitigar las emisiones producto de los gases de combustión.

De acuerdo con la literatura científica sobre fotobiorreactores, se ha prestado poca atención a la distribución espacial de estos dispositivos en el terreno. Mientras se han abordado temas como la orientación norte-sur o este-oeste [17], existen incertidumbres en otros aspectos cruciales. Por ejemplo, se desconoce cómo el número de paneles por área afecta la productividad de la biomasa en los fotobiorreactores [18]. Si bien algunos estudios han analizado el comportamiento de fotobiorreactores en zonas tropicales, como investigaciones en la Universidad Nacional de Colombia sobre producción de biomasa en fotobiorreactores tubulares [19], la información disponible sigue siendo limitada en comparación con regiones de latitudes mayores. En Venezuela, también se han evaluado respuestas fotosintéticas en condiciones tropicales, aunque con menos enfoque en la distribución de fotobiorreactores [20]. Esto sugiere que, aunque existe investigación en estas regiones, aún hay incertidumbre sobre la influencia de la latitud en la optimización de la captación de radiación solar.

En cuanto a la distribución de gases de combustión, que depende de la organización de los FBRs dentro de la granja, hay interrogantes sobre los procesos y las interacciones físicas, químicas y termodinámicas que ocurren entre los gases de combustión y la tubería. Se requiere mayor comprensión y atención a factores como la presión, la temperatura, la composición del gas y la rugosidad de la tubería; y cómo afecta el rendimiento en el transporte de los gases de combustión. Con base en lo anterior, se propone la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es la distribución óptima de los FBRs que maximiza la producción de microalgas en la planta de cementos Argos en Cartagena y minimiza el consumo de energía en su operación?

1.1.3. Propuesta de solución

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar el sistema de distribución de gases de combustión, abarcando la ubicación espacial de los reactores en el terreno disponible y el diseño de la red de distribución

de gases desde la chimenea del horno de Clinker hasta la granja de FBRs. Dentro de este sistema, la disposición óptima de los FBRs tipo panel es un aspecto clave, ya que debe maximizar la captación de luz sin exceder los límites de intensidad lumínica de las microalgas [21]. Además de la eficiencia en la captación solar, el diseño debe garantizar condiciones adecuadas de accesibilidad operativa, permitiendo a los trabajadores realizar tareas de mantenimiento de manera segura y ergonómica, minimizando riesgos laborales y asegurando el cumplimiento de estándares de seguridad y salud en el trabajo [22]. Por otro lado, para llevar los gases de combustión a la granja de FBRs, se propone el diseño de una red de distribución de gases de combustión, donde se tendrá en cuenta variables de operación del sistema tales como el flujo de gases, la presión de suministro a los FBRs y las pérdidas de presión y masa generadas por la corrosión y las fugas [23], lo que afectaría el costo de operación de la granja (OpEx). El flujo y la presión de suministro de los gases de combustión debe permanecer estable para mantener la productividad en los FBRs.

1.1.4. Justificación

El desarrollo de este proyecto tiene beneficios directos para Cementos Argos S.A., ya que permite la reducción de emisiones de CO_2 en su proceso de producción de cemento a través de la captura y valorización de los gases de combustión mediante cultivos de microalgas en FBRs. Esta estrategia contribuye a la mitigación del impacto ambiental del sector cementero y al cumplimiento de regulaciones ambientales más estrictas, lo que fortalece el compromiso de la empresa con la sostenibilidad y mejora su competitividad en el mercado. Además, la implementación de este sistema podría optimizar el uso de recursos dentro de la planta, aprovechando los gases residuales [24] y minimizando su impacto. La biomasa generada podrá ser analizada para su posible aplicación en distintos sectores, abriendo la posibilidad de desarrollar bioproductos con valor agregado, lo que podría representar nuevas oportunidades de negocio para Argos en el futuro.

En términos más amplios, este proyecto contribuye al desarrollo de tecnologías sostenibles en Colombia, en línea con los ODS. En particular, al promover la captura de CO_2 y reducir la huella de carbono del sector industrial, se fortalece el cumplimiento del ODS 13. De manera indirecta, la producción de microalgas podría vincularse al tratamiento de aguas residuales, aportando al ODS 6 (agua limpia y saneamiento).

Además, es importante destacar que Colombia ha asumido compromisos internacionales significativos en materia de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. El país se ha comprometido a reducir sus emisiones en un 51% para el año 2030 y a alcanzar la carbono-neutralidad para 2050. Estos objetivos están en línea con la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono y Resiliente al Clima, que busca

orientar al país hacia un desarrollo sostenible y resiliente frente al cambio climático. La implementación de proyectos como el presente no solo contribuye al cumplimiento de estos compromisos internacionales, sino que también posiciona a Colombia como un referente en la adopción de tecnologías innovadoras para la mitigación del cambio climático.

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

A continuación, se presentan las metas que el proyecto pretende alcanzar, distribuidos en un objetivo general y tres específicos.

2.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de distribución de gases de combustión para alimentar una granja de fotobiorreactores en la planta de Cementos Argos en Cartagena.

2.2. Objetivos específicos

- Identificar las condiciones de operación de los fotobiorreactores tipo panel para que la producción de biomasa sea alta.
- Definir la disposición espacial de los fotobiorreactores a través de optimización paramétrica maximizando su número en el terreno.
- Proyectar la red de distribución de gases de combustión para la granja de fotobiorreactores garantizando las condiciones óptimas de operación del sistema.

2.3. Revisión de literatura

De acuerdo con el planteamiento del problema se plantean tres ecuaciones de búsqueda usando la base de datos Scopus, debido a que es la principal fuente de artículos científicos, técnicos y de ingeniería disponible institucionalmente. Scopus ofrece una cobertura multidisciplinaria extensa y rigurosa, abarcando revistas indexadas y documentos revisados por pares, lo que garantiza la calidad y actualidad de los trabajos analizados. Además, permite aplicar filtros especializados por área temática y tipo de documento, lo que asegura la relevancia y precisión de los resultados obtenidos. Por tanto, Scopus se consideró adecuada para respaldar el estado del arte de esta tesis.

La primera ecuación se enfoca en la producción de microalgas usando gases de combustión de fuentes industriales:

TITLE-ABS-KEY (photobioreactor OR microalga* OR "plate-type reactor" AND "flue gas" OR "distribution network") AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENER") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")).

Se encontraron 276 resultados el día 25/01/2024, de los cuales se presentan 5 trabajos significativos para la tesis. El estudio de Dickinson et al [25] investiga la utilización de microalgas para capturar y reciclar el CO_2 emitido por hornos de cemento. Los investigadores llevaron a cabo un proceso de selección de cepas, evaluando 28 aislados de microalgas obtenidos en las proximidades de una planta cementera comercial. El objetivo fue identificar cepas capaces de utilizar eficazmente el CO_2 y generar biomasa significativa. Este enfoque propone una solución biotecnológica para mitigar las emisiones de CO_2 en la industria cementera mediante la producción de biomasa de microalgas.

Por otro lado, Mohler et al. [26] analiza la viabilidad de reutilizar las emisiones industriales de CO_2 mediante un fotobiorreactor de microalgas, centrándose en la evaluación del uso del calor residual. Se diseñó y desplegó un fotobiorreactor en una planta de energía de carbón para estudiar la posibilidad de utilizar el calor residual del proceso industrial para mantener las condiciones óptimas de cultivo de las microalgas durante períodos fríos. Los resultados indicaron que, aunque el uso del calor residual es termodinámicamente factible, conlleva penalizaciones energéticas significativas, aumentando el consumo de energía entre un 18% y un 103% y reduciendo la captura de CO_2 entre un 22% y un 70%. Además, el análisis tecno-económico mostró que los costos de los equipos de integración térmica incrementaron los gastos de capital en un factor de nueve y los costos de producción de biomasa en un factor de tres.

En un enfoque más amplio, Onyeaka et al. [27] revisa el potencial de las microalgas como agentes biológicos para la captura de carbono, destacando su capacidad para reducir la huella de carbono. Se analizan diversas estrategias de cultivo y las ventajas de utilizar microalgas en la captura de CO_2 , incluyendo su alta eficiencia fotosintética y la producción de biomasa valiosa que puede ser utilizada en biocombustibles y otros productos. El estudio enfatiza la necesidad de optimizar las condiciones de cultivo y los sistemas de fotobiorreactores para maximizar la eficiencia de captura de carbono. Zieliński et al. [28] analiza la captura y utilización de CO_2 mediante microalgas desde la perspectiva de la Unión Europea. Se discuten las políticas actuales, las tecnologías disponibles y los desafíos asociados con la implementación de sistemas de captura de carbono basados en microalgas. Los autores destacan el potencial de las microalgas para contribuir a los objetivos de reducción de emisiones de la UE (Unión Europea) y señalan la necesidad de investigación adicional para superar las barreras técnicas y económicas.

Finalmente, Branco-Vieira et al. [29] evalúa la producción de bioenergía a partir de algas como una tecnología de mitigación de carbono que se alinea con los objetivos del Acuerdo de París. Se analizan las ventajas de las algas en términos de captura de CO_2 y producción de energía renovable, así como los desafíos técnicos y económicos que deben abordarse para su implementación a gran escala. Los autores concluyen

que, con el desarrollo adecuado, la bioenergía basada en algas puede desempeñar un papel significativo en la reducción de emisiones globales de carbono.

En esta segunda ecuación se enfoca en la búsqueda de trabajos de investigación relacionados con la distribución de los FBRs:

TITLE-ABS-KEY (("reactor layout" OR "reactor positioning" OR "spatial distribution" OR "array design") AND ("photobioreactor" OR "microalgae farm")) AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENER") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")).

Se encontraron 7 resultados el día 25/01/2024, de los cuales se presentan 2 trabajos significativos para la tesis. Carone et al [30], introduce un fotobiorreactor de panel plano innovador, equipado con un sistema de iluminación LED personalizable. El diseño permite ajustar la intensidad y el espectro de la luz, optimizando las condiciones de cultivo para diferentes cepas de microalgas. Los autores realizaron una caracterización detallada del sistema, evaluando parámetros como la distribución de la luz, la eficiencia energética y la productividad de biomasa. Los resultados demostraron que la personalización de la iluminación mejora significativamente el rendimiento del cultivo, ofreciendo una herramienta versátil para la investigación y producción de microalgas en aplicaciones sostenibles.

Por otro lado, Sledgers et al [31] presenta un modelo desarrollado para predecir la producción de biomasa de algas en fotobiorreactores de panel plano, considerando la interacción entre la luz y el crecimiento de las algas para las especies *Phaeodactylum tricornutum* y *Thalassiosira pseudonana*. El estudio analiza el efecto de la ubicación geográfica, la variabilidad de la luz solar y la disposición del reactor en la producción de biomasa, evaluando tres latitudes representativas de los Países Bajos, Francia y Argelia. Los hallazgos indican que la orientación y el espaciado de los paneles influyen significativamente en la productividad, y que la producción de biomasa varía con la latitud, siendo más constante en regiones cercanas al ecuador. Este trabajo proporciona información valiosa para el diseño y la optimización de fotobiorreactores en diferentes condiciones climáticas.

Por último, la tercera ecuación se enfoca en la red de distribución de gases de combustión:

TITLE-ABS-KEY (("flue gas pipeline" OR "gas distribution network" OR "piping system" OR "combustion gases transport" OR "flue gas injection") AND ("corrosion" OR "leakage control" OR "pressure stability" OR "flow optimization" OR "pipeline materials")) AND PUBYEAR > 2009 AND

PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENER") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")).

Se encontraron 290 resultados el día 25/01/2024, de las cuales se presentan 4 trabajos significativos para la tesis. Aryai et al [32], proponen un enfoque de elementos finitos para evaluar la confiabilidad de tuberías de hierro fundido sometidas a procesos de corrosión que varían en el tiempo y el espacio. El modelo desarrollado considera la correlación espacial y temporal de la corrosión, permitiendo predecir la resistencia residual de las tuberías a lo largo del tiempo. Los resultados destacan la importancia de incorporar la variabilidad espacial de la corrosión en las evaluaciones de confiabilidad, proporcionando una herramienta valiosa para la gestión y mantenimiento de infraestructuras de tuberías envejecidas. Xiao and Xiong [33], desarrollan un modelo predictivo para analizar las causas y consecuencias de fallos en tuberías de transmisión de gas. Utilizando técnicas de modelado estadístico y análisis de datos históricos, el estudio identifica factores clave que contribuyen a fallos en las tuberías y evalúa las posibles consecuencias de dichos eventos. Los hallazgos proporcionan una base para estrategias de mitigación de riesgos y mejoras en la seguridad operativa de las redes de distribución de gas.

Ahmed et al [34], investigan el efecto de los parámetros locales de flujo y transferencia de masa en la corrosión acelerada por flujo (FAC) aguas abajo de una placa de orificio. Mediante experimentos y modelado, los autores analizan cómo las características del flujo turbulento y la distribución de velocidades influyen en las tasas de corrosión en sistemas de tuberías. Los hallazgos proporcionan información valiosa para el diseño y mantenimiento de sistemas de tuberías en industrias donde la FAC es una preocupación, como en plantas nucleares y de generación de energía. Por último, Klimanek et al [35], presentan un modelo de CFD en 3D de una torre de enfriamiento húmeda de tiro natural con inyección de gases de combustión. El modelo simula la interacción entre el flujo de aire, el agua de enfriamiento y los gases de combustión inyectados, evaluando el impacto en la eficiencia de enfriamiento y la dispersión de contaminantes. Los resultados ofrecen perspectivas sobre el diseño óptimo y las condiciones operativas para minimizar los efectos ambientales y mejorar el rendimiento de las torres de enfriamiento en plantas industriales.

De la revisión del estado del arte presentada se destaca que no se han publicado trabajos en los que se estudie el efecto de la ubicación, distribución espacial y la orientación de los FBRs en la cantidad de luz que reciben, tal vez el trabajo que puede aportar a esto es el del modelo de simulación. Por otro lado, no se identificaron trabajos en los que se describa la metodología de diseño de estas granjas, especialmente de la red de distribución de gases.

En la **Tabla 1** se presenta un resumen de literatura consultada:

Tabla 1. Resumen de estudios previos sobre distribución de gases y disposición de FBRs. Fuente: Elaboración propia.

Referencia	Tema principal	Metodología	Conclusiones / Resultados clave
Dickinson et al. [25]	Captura de CO ₂ de hornos cementeros con microalgas	Selección de cepas y producción de biomasa	Identificación de cepas efectivas para captura de CO ₂
Mohler et al. [26]	Uso de calor residual en FBR con microalgas	Evaluación energética y económica	Penalización energética significativa y aumento de costos
Onyeaka et al. [27]	Potencial de microalgas en captura de carbono	Revisión general	Alta eficiencia fotosintética y productos valiosos
Zieliński et al. [28]	Políticas de la UE sobre captura con microalgas	Análisis de políticas y barreras	Necesidad de superar desafíos técnicos y económicos
Branco-Vieira et al. [29]	Bioenergía con microalgas y Acuerdo de París	Evaluación del potencial energético	Importancia futura en mitigación de carbono
Carone et al. [30]	Diseño de FBR con iluminación LED ajustable	Evaluación experimental	Mayor rendimiento del cultivo con luz personalizada
Sledgers et al. [31]	Modelo de predicción de biomasa en FBRs	Simulación con tres latitudes	Producción influida por orientación y localización
Aryai et al. [32]	Confiabilidad de tuberías corroídas	Modelo de elementos finitos	Importancia de la variabilidad espacial en corrosión
Ahmed et al. [33]	FAC en tuberías por flujo turbulento	Experimentos y modelado	Diseño para minimizar corrosión por flujo
Klimanek et al. [34]	CFD en torre de enfriamiento con gases	Simulación 3D	Diseño óptimo para eficiencia y baja contaminación
Xiao & Xiong [35]	Modelado de fallas en redes de gas	Estadística y datos históricos	Estrategias de mitigación y seguridad

3. METODOLOGÍA

En la **Figura 3**, se presenta un resumen de la metodología propuesta para lograr cada uno de los objetivos específicos y con esto, alcanzar el objetivo general.

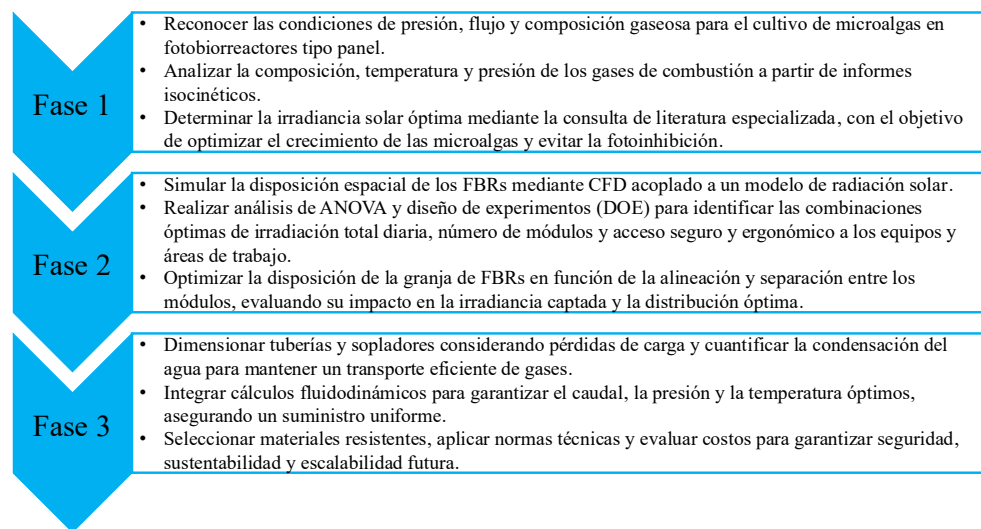


Figura 3. Metodología propuesta. Fuente: Elaboración propia.

3.1. Fase 1: Identificación de condiciones de operación

En la etapa inicial de este proyecto se procede a la identificación de las condiciones de operación destinadas al cultivo de microalgas en FBRs tipo panel, así como el análisis de los gases que pasarán por la red de distribución. Este proceso implica una evaluación de la presión y el flujo de trabajo en los FBRs para garantizar un entorno propicio y controlado. Además, se efectuará un análisis de la composición, temperatura y presión de los gases de combustión, mediante la revisión de un informe isocinético proporcionado por Cementos Argos relacionado con la chimenea que serían potencialmente utilizados para el cultivo de microalgas. Paralelamente, se consultará en literatura especializada, la intensidad lumínica de especies de microalgas que serán definidas por Cementos Argos, debido a que este factor incide en el crecimiento y la productividad de las microalgas. Este factor se interviene a través de la radiación solar como restricción para no fotoinhibir el crecimiento y productividad de las microalgas.

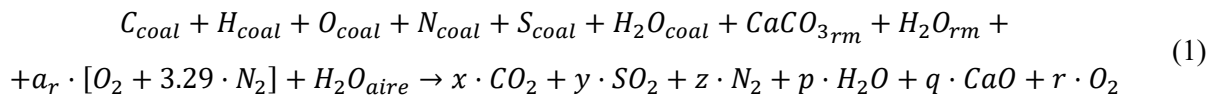
3.1.1. Balance de masa en la producción de cemento

Para estimar la fracción másica de CO_2 en los gases de combustión emitidos en una planta cementera, se desarrolló un balance de masa que considera las reacciones de combustión del combustible (carbón bituminoso) y la calcinación de la materia prima (*raw meal*) del cemento. En este estudio, la calcinación se

modela suponiendo que el *raw meal* está compuesto únicamente por $CaCO_3$, dado que este es el componente mayoritario de la mezcla y su consideración exclusiva permite simplificar los cálculos sin afectar significativamente la estimación de emisiones.

El modelo incluye el aporte de gases desde el aire de combustión, el carbono presente en el combustible y el $CaCO_3$ de la materia prima. Los productos principales del proceso incluyen: CO_2 , dióxido de azufre (SO_2), vapor de agua (H_2O), oxígeno residual (O_2), nitrógeno (N_2) y CaO . El SO_2 proviene de la oxidación del azufre contenido en el combustible. El H_2O incluye tanto el agua formada por la combustión del hidrógeno como la humedad presente en los reactivos. El O_2 se considera en exceso, como residuo en la chimenea, mientras que el N_2 proviene del aire de combustión y de la fracción nitrogenada del combustible. El CaO resulta de la descomposición térmica del $CaCO_3$.

El primer paso para caracterizar los gases de combustión es realizar un balance de combustión real que se fundamenta en la conservación de la masa a nivel de elementos y que incluye los componentes del combustible, el *raw meal* y el aire de la combustión. Dicho balance se expresa como:



A partir de este planteamiento, se derivan las fracciones másicas de cada producto. Por ejemplo, la fracción másica de CO_2 , considerando el carbono del combustible y el CO_2 generado en la calcinación del $CaCO_3$, por lo tanto, el balance de CO_2 se obtiene:

$$x = \left(\frac{y_C}{M_C} + \frac{R_{rm} \cdot y_{CaCO_3}}{M_{CaCO_3}} \right) \cdot M_{CO_2} \quad (2)$$

Donde:

x	Fracción másica de CO_2 en los gases de combustión.
y_C	Fracción másica del C en el carbón.
M_C	Masa molar del C .
R_{rm}	Razón del <i>raw meal</i> / carbón.
$y_{CaCO_{3rm}}$	Fracción másica del $CaCO_3$ en el <i>raw meal</i> .
M_{CaCO_3}	Masa molar del $CaCO_3$.
M_{CO_2}	Masa molar del CO_2 .

Un procedimiento similar se aplica al balance de SO_2 :

$$y = \frac{y_S}{M_S} \cdot M_{SO_2} \quad (3)$$

Donde:

y Fracción másica de SO_2 en los gases de combustión.

y_S Fracción másica del S en el carbón.

M_S Masa molar del S.

M_{SO_2} Masa molar del SO_2 .

El balance de N_2 en los productos es:

$$z = \frac{y_N}{M_N} \cdot M_{N_2} + a_r \cdot 0.768 \quad (4)$$

Donde:

z Fracción másica de N_2 en los gases de combustión.

y_N Fracción másica del N en el carbón.

M_N Masa molar del N.

M_{N_2} Masa molar del N_2 .

0.768 Fracción másica de N_2 en el aire seco.

El balance de CaO producido en la calcinación del $CaCO_3$ es:

$$q = \frac{R_{rm} \cdot y_{CaCO_{3rm}}}{M_{CaCO_3}} \cdot M_{CaO} \quad (5)$$

Donde:

q Fracción másica de CaO producido.

M_{CaO} Masa molar del CaO .

Para el balance del O_2 , se calcula primero el O_2 necesario para quemar el carbón ($O_{2nec\ coal}$):

$$O_{2nec\ coal} = \left(\frac{y_C}{M_C} + \frac{y_S}{M_S} + \frac{y_H}{2M_H} - \frac{y_O}{2M_O} \right) \cdot M_{O_2} \quad (6)$$

A partir de $O_{2nec\ coal}$, se calcula el factor de aireación teórico del carbón (a_{th}):

$$a_{th} = \frac{O_{2nec\ coal}}{0.232} \quad (7)$$

Donde:

y_O Fracción másica del O en el carbón.

M_O Masa molar del O .

M_{O_2} Masa molar del O_2 .

0.232 Fracción másica del O_2 en el aire seco

Luego, se calcula, el exceso de aire (EA), que se determina mediante la fracción de oxígeno en la chimenea:

$$EA = \frac{0.21}{0.21 - F_r} - 1 \quad (8)$$

Donde:

0.21 Fracción volumétrica de O_2 en aire seco.

F_r Fracción volumétrica real de O_2 base seca, medido en chimenea.

A partir de EA , se calcula el factor de aireación real del carbón (a_r):

$$a_r = a_{th} (1 + EA) \quad (9)$$

Y el porcentaje de exceso de aire ($\%EA$) se expresa como:

$$\%EA = 100 \cdot EA \quad (10)$$

Finalmente, el oxígeno residual en la chimenea (r) se obtiene como:

$$r = a_r \cdot 0.232 - O_{2nec\ coal} \quad (11)$$

Para el balance de H_2O total en los productos, se incluyen: agua generada por la combustión del hidrógeno, la humedad del combustible, del *raw meal* y del aire de entrada:

$$p = \frac{y_H}{2M_H} \cdot M_{H_2O} + y_{H_2O\ coal} + y_{H_2O\ rm} + y_{H_2O\ air} \quad (12)$$

Donde:

p Fracción másica de H_2O en los gases de combustión.

y_H	Fracción másica del H en el carbón.
M_H	Masa molar del H .
M_{H_2O}	Masa molar del H_2O .
$y_{H_2O_{coal}}$	Fracción másica de la humedad en el carbón.
$y_{H_2O_{rm}}$	Fracción másica de la humedad en el <i>raw meal</i> .
$y_{H_2O_{air}}$	Fracción másica de la humedad en el aire.

La fracción másica de la humedad del carbón es:

$$y_{H_2O_{coal}} = Cz$$

Donde Cz , corresponde a la fracción másica de la humedad en el aire.

La fracción másica de la humedad del *raw meal* es:

$$y_{H_2O_{rm}} = R_{rm} \cdot h_{rm}$$

Donde h_{rm} , corresponde a la humedad del *raw meal*.

Para calcular $y_{H_2O_{aire}}$, se calcula primero la presión de saturación del agua ($p_{sat_{H_2O}}$) a partir de la ecuación de Antoine con temperatura del aire (T_{air}) en ($^{\circ}C$):

$$p_{sat_{H_2O}} = 10^{A_A - \frac{B_A}{T_{air} + C_A}} \times 0.133322 \quad (13)$$

Donde:

$A_A = 8.07131$ Constante de Antoine para el agua.

$B_A = 1730.63$ Constante de Antoine para el agua.

$C_A = 233.426$ Constante de Antoine para el agua.

Luego se calcula la presión de vapor (p_{vapor}):

$$p_{vapor} = HR_{H_2O} \cdot p_{sat_{H_2O}} \quad (14)$$

Donde HR_{H_2O} corresponde a la humedad relativa del agua.

Luego, se calcula la relación de mezcla del aire húmedo (W_{air}):

$$W_{aire} = \frac{M_{H_2O} \cdot p_{vapor}}{M_{air}(p_{chim} - p_{vapor})} \quad (15)$$

Donde:

M_{air} Masa molar del aire.

p_{chim} Presión absoluta de los gases de combustión en la chimenea.

Por último, la fracción másica de la humedad del aire ($y_{H_2O_{air}}$) se calcula como:

$$y_{H_2O_{air}} = a_r \cdot W_{air} \quad (16)$$

La información dada por la **ecuación (1)** y en la **Tabla 12** permiten estimar variables de relevancia relacionadas con los gases de combustión en la chimenea, entre las que se destacan:

- Masa de los gases de combustión (m_{gehum}):

$$m_{gehum} = x + y + z + p + r \quad (17)$$

- Composición másica de los compuestos (i) de los gases húmedos (y_i):

$$y_{CO_2} = \frac{x}{m_{gehum}} \quad (18)$$

$$y_{SO_2} = \frac{y}{m_{gehum}} \quad (19)$$

$$y_{N_2} = \frac{z}{m_{gehum}} \quad (20)$$

$$y_{H_2O} = \frac{p}{m_{gehum}} \quad (21)$$

$$y_{O_2} = \frac{O_{2chim}}{m_{gehum}} \quad (22)$$

Donde:

y_{CO_2} Fracción másica de CO_2 en los gases de combustión.

y_{SO_2} Fracción másica de SO_2 en los gases de combustión.

y_{N_2} Fracción másica de N_2 en los gases de combustión.

y_{H_2O} Fracción másica de H_2O en los gases de combustión.

y_{O_2} Fracción másica de O_2 en los gases de combustión.

- Masa molar de los gases húmedos (M_{gehum}):

$$M_{gehum} = \frac{1}{\frac{y_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{y_{SO_2}}{M_{SO_2}} + \frac{y_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{y_{H_2O}}{M_{H_2O}} + \frac{y_{O_2}}{M_{O_2}}} \quad (23)$$

- Densidad (ρ_{gehum}):

$$\rho_{gehumedos} = \frac{p_{chim} \cdot M_{gehum}}{R_u \cdot (T_{chim} + 273.15)} \quad (24)$$

Donde:

T_{chim} Temperatura de los gases de combustión en la chimenea.

R_u Constante de los gases ideales, $R_u = 8.31 \frac{kJ}{kmol \cdot K}$

273.15 Conversión de °C a K

- Flujo másico (\dot{m}_{chim}):

$$\dot{m}_{chim} = \dot{V}_{chim} \cdot \rho_{gehum} \quad (25)$$

Donde \dot{V}_{chim} , es el flujo volumétrico de los gases de combustión.

- Flujo másico de cada compuesto de los gases de combustión (\dot{m}_i):

$$\dot{m}_i = \dot{m}_{chim} \cdot y_i \quad (26)$$

Además, a partir de la p_{vapor} , la $p_{sat_{H_2O}}$ y la T_{air} , se aplica una forma empírica de la ecuación de Magnus-Tetens para calcular la temperatura de rocío en los gases de escape (T_{rocio}):

$$T_{rocio} = \frac{b \cdot \gamma}{a - \gamma} \quad (27)$$

Donde:

$a = 17.67$ Valores empíricos para estimar la temperatura de rocío en los gases de combustión.

$b = 243.5$ Valores empíricos para estimar la temperatura de rocío en los gases de combustión.

Y la función auxiliar que combina el contenido de humedad en el aire con la temperatura (γ) se calcula:

$$\gamma = \ln\left(\frac{p_{vapor}}{p_{sat_{H_2O}}}\right) + \frac{a \cdot T_{air}}{b + T_{air}} \quad (28)$$

3.1.2. Factores que afectan el crecimiento y la productividad de las microalgas

Para el desarrollo del proyecto, se han seleccionado cepas de microalgas caracterizadas por su alta productividad y tolerancia a diversas condiciones ambientales. Estas cepas presentan propiedades relevantes como:

- Alta eficiencia en la captación de CO_2 y rápido crecimiento, lo que las hace aptas para aplicaciones en la producción de biocombustibles y el tratamiento de aguas residuales.
- Capacidad de crecer en condiciones de alta irradiancia y temperatura, con alto contenido proteico, lo que favorece su uso en bioproductos y biofertilizantes.
- Adaptabilidad a medios alcalinos y riqueza en compuestos antioxidantes y proteínas, lo que las convierte en candidatas idóneas para aplicaciones en la industria alimentaria y la biotecnología.

Desde el punto de vista de la ingeniería, se ha identificado que la concentración de CO_2 , la temperatura del medio y la iluminación son factores clave que afectan la productividad de biomasa en el cultivo de microalgas en FBRs [1].

3.1.2.1. CO_2

El CO_2 es el sustrato principal en la fotosíntesis de las microalgas. La suplementación controlada de CO_2 en los cultivos puede incrementar significativamente la tasa de crecimiento y la productividad de biomasa. Sin embargo, una adición excesiva puede disminuir el pH del medio de cultivo, afectando negativamente la fisiología celular. Investigaciones recientes sugieren que la concentración óptima de CO_2 varía según la especie y las condiciones del fotobiorreactor, generalmente entre 0.5% y 5% [36]. Por otro lado, los gases de combustión de fuentes industriales como las cementeras presentan concentraciones de CO_2 mucho más elevadas, típicamente en el rango de 14% a 33% en volumen [37]. Esta diferencia sugiere que existe un potencial considerable para instalar granjas de fotobiorreactores que utilicen directamente los gases de combustión como fuente de carbono, mediante un diseño adecuado que permita el aprovechamiento eficiente del CO_2 residual industrial. Además, la utilización de fuentes de CO_2 industriales, como emisiones de plantas de combustión, ha sido explorada como una estrategia para reducir costos y emisiones de gases de efecto invernadero, proporcionando simultáneamente una fuente de carbono para el cultivo de microalgas [36].

3.1.2.2. *Temperatura*

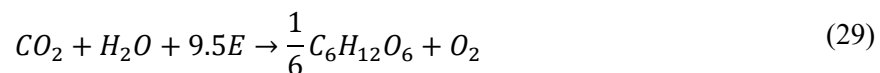
La temperatura afecta la actividad enzimática y las tasas metabólicas de las microalgas. La mayoría de las especies presentan un rango óptimo de crecimiento entre 20°C y 30°C. Temperaturas por encima o por debajo de este rango pueden inducir estrés térmico, afectando la fotosíntesis y promoviendo la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), lo que disminuye la viabilidad celular. Estudios han demostrado que el control preciso de la temperatura en los fotobiorreactores es crucial para mantener condiciones óptimas de crecimiento y maximizar la productividad [38], [39].

3.1.2.3. *Iluminación*

La intensidad y calidad de la luz son determinantes clave en la fotosíntesis de las microalgas, afectando directamente su tasa de crecimiento y acumulación de biomasa. Estudios recientes han demostrado que una mayor intensidad lumínica puede aumentar la productividad hasta un punto óptimo; sin embargo, intensidades excesivas pueden provocar fotoinhibición, reduciendo la eficiencia fotosintética y, por ende, el crecimiento de las microalgas. Por ejemplo, investigaciones han evidenciado que la distribución uniforme de la luz en fotobiorreactores es esencial para maximizar la producción de biomasa, evitando zonas de sombra que limitan el crecimiento celular [40], [41].

3.1.3. *Cálculo teórico de la productividad de la biomasa algal y el consumo de CO₂*

Teniendo en cuenta estos factores que afectan la producción de biomasa en el cultivo de microalgas, la productividad teórica máxima de la fotosíntesis se calculó con base en la reacción global de fijación y reducción del CO₂ con la siguiente ecuación [42]:



Donde 9.5E representa el número de moles de fotones requeridos para la conversión de 1 mol_{CO₂} en 30 g de biomasa equivalente (CH₂O). Las microalgas absorben luz en el rango de 300 a 700 nm, correspondiente a la radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés), que constituye aproximadamente el 43% de la radiación solar total. La energía asociada a esta fracción del espectro es equivalente a la de la luz monocromática de 575 nm [43].

Para cuantificar la energía disponible, se emplea el Einstein (E), una unidad utilizada en fotónica y fotoquímica para medir la cantidad de moles de fotones. La conversión de Einstein a kilojulios requiere

conocer la energía de los fotones involucrados, la cual depende de su longitud de onda (λ), conforme a la ecuación siguiente:

$$Ein = \frac{N_A \cdot h \cdot c}{\lambda \cdot 10^3} \quad (30)$$

Donde:

Ein Energía asociada a un mol de fotones.

N_A Número de Avogadro.

h Constante de Planck.

c Velocidad de la luz en el vacío.

λ Longitud de onda.

10^3 Conversión de J a kJ .

Por el PAR, se considera una longitud de onda media igual a $\lambda = 575 \text{ nm}$. Con esta longitud de onda, la energía de un mol de fotones es aproximadamente $Ein = 208.25 \frac{kJ}{mol}$, ya que $N_A = 6.022e^{23} \frac{1}{mol}$, $h = 6.626e^{-34} J \cdot s$ y $c = 3.00 \times 10^8 \frac{m}{s}$.

3.1.3.1.1. Cálculo teórico de la producción de biomasa algal

La biomasa algal tiene una composición molecular aproximada de CH_2O , cuya masa molar (M_{CH_2O}) es de $30 \frac{g}{mol}$. Con esta relación, la biomasa generada se calcula a partir de la irradiación disponible y la eficiencia de conversión de luz en biomasa. La energía utilizada por unidad de biomasa generada (Ein_{ba}) se expresa como:

$$Ein_{ba} = \frac{9.5E}{M_{CH_2O}} \quad (31)$$

Luego, multiplicando por la energía de los fotones (Ein), se calcula la energía en kJ utilizada para generar un gramo de biomasa algal (E_{ba}):

$$E_{ba} = Ein_{ba} \cdot Ein \quad (32)$$

La biomasa algal producida por unidad de área (Ba) se calcula como:

$$Ba = \frac{0.43 \cdot H_F}{1000 \cdot E_{ba}} \quad (33)$$

Donde:

0.43 Corresponde a la fracción de PAR respecto a la irradiación diaria recibida en la granja.

H_F Irradiación diaria recibida en la granja.

1000 Conversión de g a kg .

La irradiación (H_F) se calcula a partir de la ecuación:

$$H_F \approx \sum_{j=1}^n \frac{G_j \cdot \Delta t}{1000} \quad (34)$$

Donde:

G_j Irradiancia promedio en el intervalo j

Δt Duración del intervalo

1000 Conversión de W a kW .

n Número de medidas de la irradiancia

A partir de este valor, la biomasa producida por el módulo (Ba_M) se calcula como:

$$Ba_M = Ba \cdot A \quad (35)$$

Donde $A = 104.66144 \text{ m}^2$ es el área superficial del módulo. Finalmente, la producción de biomasa en la granja (Ba_F) se obtiene mediante en la siguiente ecuación:

$$Ba_F = \frac{Ba_M \cdot N_{M_T}}{1000} \quad (36)$$

Donde:

N_{M_T} Cantidad total de módulos en la granja de FBRs.

1000 Conversión de kg a ton .

N_{M_T} se calcula como:

$$N_{M_T} = N_{M_X} \cdot N_{M_Y} \quad (37)$$

Donde:

N_{M_X} Es la cantidad de módulos en el eje X , constante, ecuación (38).

N_{M_Y} Es la cantidad de módulos en el eje Y , que depende del espaciado (s_Y) y del área disponible en el terreno, ecuación (39).

La cantidad de módulos en el X (N_{M_X}) y eje Y (N_{M_Y}) se definen en las siguientes ecuaciones:

$$N_{M_X} = \left\lfloor \frac{LT_X - S_{M_X}}{w_{FBR} \cdot N_{FBR_X} + S_X \cdot (N_{FBR_X} - 1) + S_{M_X}} \right\rfloor \quad (38)$$

$$N_{M_Y} = \left\lfloor \frac{LT_Y - S_{M_Y}}{w_{FBR} \cdot N_{FBR_Y} + S_Y \cdot (N_{FBR_Y} - 1) + S_{M_Y}} \right\rfloor \quad (39)$$

Donde:

- $\lfloor \cdot \rfloor$ Función piso, o parte entera inferior.
- LT_X Longitud del terreno en el eje X (ver **Figura 1**).
- LT_Y Longitud del terreno en el eje Y (ver **Figura 1**).
- N_{FBR_X} Número de FBRs por módulo en el eje X (ver **Figura 1**).
- N_{FBR_Y} Número de FBRs por módulo en el eje Y (ver **Figura 1**).
- S_{M_X} Separación de módulos en el eje X (ver **Figura 1**).
- S_{M_Y} Separación de módulos en el eje Y (ver **Figura 1**).
- w_{FBR} Ancho del FBR (ver **Figura 1**).
- S_X Espaciamiento de los FBRS dentro del módulo en el eje X (ver **Figura 1**).
- S_Y Espaciamiento de los FBRS dentro del módulo en el eje Y (ver **Figura 1**).

Por último, la producción de biomasa algal de la granja anual ($Ba_{F,y}$) se calcula como:

$$Ba_{F,y} = Ba_{F,avg} \cdot 365 \quad (40)$$

Donde:

- $Ba_{F,avg}$ Producción de biomasa en la granja promedio de los días simulados.
- 365 Días del año.

3.1.3.1.2. Cálculo teórico de la captura de CO_2

Para estimar la captura de CO_2 en el cultivo de microalgas, se parte de la masa molar del CO_2 , (M_{CO_2}).

Con el fin de cuantificar la eficiencia de conversión de biomasa algal en consumo de CO_2 , se define el parámetro (η_{CO_2}), como:

$$\eta_{CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{M_{CH_2O}} \quad (41)$$

Por lo tanto, la cantidad de energía utilizada por unidad de CO_2 fijado (Ein_{CO_2}) se calcula como:

$$Ein_{CO_2} = \frac{Ein_{ba}}{\eta_{CO_2}} \quad (42)$$

Multiplicando por la energía de los fotones, se calcula la energía en kJ utilizada para capturar una unidad de CO_2 (E_{CO_2}).

$$E_{CO_2} = \frac{E_{ba}}{\eta_{CO_2}} \quad (43)$$

La cantidad de CO_2 fijado por unidad de área en un día (F_{CO_2}) se obtiene con la ecuación (44):

$$F_{CO_2} = Ba \cdot \eta_{CO_2} \quad (44)$$

A partir de este valor, el CO_2 fijado por módulo (F_{CO_2M}) se determina como:

$$F_{CO_2M} = Ba_M \cdot \eta_{CO_2} \quad (45)$$

Finalmente, la captura total de CO_2 en la granja (F_{CO_2F}) se calcula como sigue:

$$F_{CO_2F} = Ba_F \cdot \eta_{CO_2} \quad (46)$$

Por último, la CO_2 en la granja anual (F_{CO_2Fy}) se calcula como:

$$F_{CO_2Fy} = F_{CO_2F_{avg}} \cdot 365 \quad (47)$$

Donde ($F_{CO_2F_{avg}}$), es el CO_2 en la granja promedio de los días simulados.

Se aclara que los cálculos teóricos anteriores sobre la producción de biomasa y la captura de CO_2 se realizaron sin considerar los efectos del fotoperiodo, los procesos de mantenimiento celular ni la saturación lumínica, lo cual sobreestima tanto la captura de CO_2 como la producción de biomasa, siendo una aproximación ideal.

Un cálculo similar fue realizado por Serrano Bermúdez en su tesis de maestría [44], en la cual se evalúa la productividad teórica de cepas nativas de microalgas considerando variables como irradiancia, concentración de CO₂ y fotoperiodo, para estimar su potencial en la acumulación de biomasa y lípidos.

3.1.4. Selección de la configuración de la distribución de los FBRs

Por otro lado, para hacer la configuración de la distribución de los FBRs, se ha tenido en cuenta la fácil accesibilidad a los FBRs, por lo cual se opta por crear grupos de 16 FBRs (4 FBRs en el eje X y 4 en el eje Y) los cuales se refieren como módulos, y a su vez cada módulo se va a duplicar tantas veces sea necesario en el eje X y en el eje Y , como se muestra en la **Figura 4**.

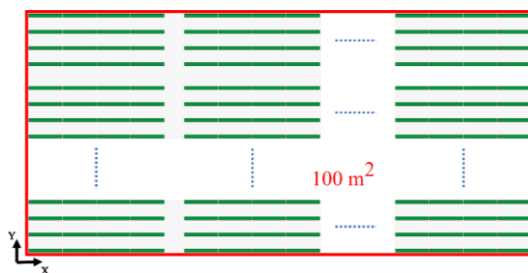


Figura 4. Configuración de la distribución de los FBRs. Fuente: Fuente: Elaboración propia.

3.2. Fase 2: Distribución espacial de los FBRs

En esta fase se abordará la optimización de la ubicación espacial de los FBRs en el terreno dispuesto (ver **Figura 1**), lo cual comprenderá un modelado paramétrico, una simulación CFD de los FBRs, y su posterior optimización paramétrica.

Respecto a la simulación CFD, inicialmente se evaluaron alternativas más simples para modelar la incidencia de radiación solar sobre los FBRs, como Revit®, Rhino® y 3D Sun-Path de Andrew Marsh [45]. Sin embargo, Revit® está más orientado a aplicaciones arquitectónicas y no permite cuantificar adecuadamente la irradiancia sobre superficies de interés técnico. Por otro lado, Rhino® no estaba disponible institucionalmente, y 3D Sun-Path carece de herramientas para cuantificación detallada de la radiación o modelado preciso de sombras.

Por ello, se optó por utilizar Altair® SimLab® debido a que se cuenta con una licencia institucional. Este software permite realizar simulaciones transitorias de radiación solar, configurar múltiples escenarios geométricos mediante programación en Python®, y automatizar el proceso de simulación. Esta integración

posibilitó la implementación de un Diseño de Experimentos (DOE) y la aplicación de un algoritmo de Evolución Diferencial para la optimización de la distribución de los FBRs.

Cabe destacar que, aunque el uso de un modelo de capacidad térmica lumped (*Dynamic Lumped Capacitance Model*) podría haber sido adecuado para estimaciones de temperatura promedio, dicho modelo no permite capturar fenómenos locales como la distribución de irradiancia, el sombreado o la variabilidad espacial, los cuales son críticos para evaluar correctamente la captación solar y la producción de biomasa. Por este motivo, el enfoque basado en CFD acoplado con radiación solar resultó más adecuado para los objetivos de este estudio.

3.2.1. Simulación CFD

En la **Figura 5**, se observa el problema que se aborda en la simulación atmosférica con capa límite y radiación solar, este se hace con el fin de obtener valores de irradiancia y temperatura en los FBRs. Luego de tener la geometría, se pasa a la simulación CFD, que se realiza en el software Altair® SimLab® [46], en estado transitorio, considerando 15 pasos temporales de una hora, desde las 5 a.m. hasta las 7 p.m., con el objetivo de cubrir desde el amanecer hasta el atardecer en diferentes días del año, debido a que la duración de los días va cambiando en el transcurrir del año, así como la incidencia del sol en el terreno. Teniendo en cuenta esos pasos, se creará un archivo que tendrá el modelo de la radiación solar para la hectárea delimitada.

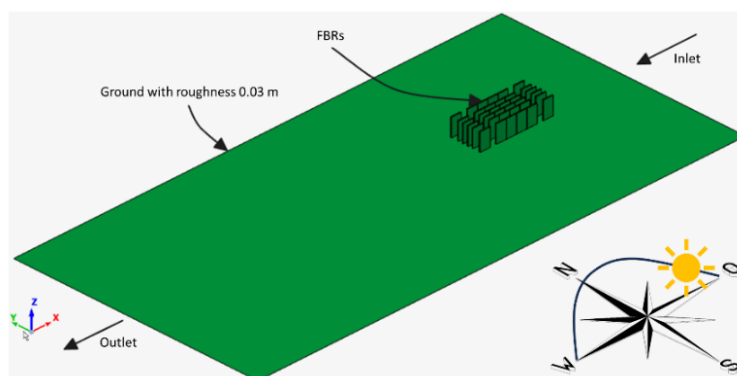


Figura 5. Descripción del problema de la simulación. Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.1. Ecuaciones gobernantes y modelos numéricos para la simulación CFD acoplada a la radiación solar

En el presente trabajo, se emplearon las ecuaciones de *Navier-Stokes* para flujo incompresible junto con el modelo de turbulencia de una ecuación propuesto por Spalart y Allmaras [47], diseñado específicamente

para aplicaciones aerodinámicas en flujos con gradientes de presión adversos y capas límite delgadas. Este modelo ha demostrado ser eficiente y robusto en simulaciones CFD que requieren una relación favorable entre precisión y costo computacional, lo que lo hace adecuado para flujos incompresibles como el que se presenta en este estudio. Para modelar la radiación solar en los FBRs, se utiliza el método de trazado de rayos de Monte Carlo (MCRT) implementado en AcuSolve® [48], que emplea un enfoque estadístico para modelar la interacción de la radiación solar con las superficies del dominio [49]. Este método es ideal para simulaciones de radiación por su capacidad de manejar geometrías complejas y múltiples interacciones de rayos con superficies.

3.2.1.1.1. *Flujo turbulento con el modelo Spalart-Allmaras*

Además de la ecuación (48) de continuidad y la ecuación (49) de momentum [50], se considera la ecuación (50) de transporte para la viscosidad turbulenta modificada [51] y la ecuación (51) de energía. En estas ecuaciones, la densidad (ρ) y la viscosidad dinámica (μ) son propiedades del fluido, mientras que el campo de velocidad (\vec{u}) 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 (u_x , u_y , y u_z), temperatura (T), presión y la viscosidad turbulenta modificada (\hat{v}).

La ecuación de continuidad se calcula como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \vec{u}) = 0 \quad (48)$$

La ecuación de momentum se formula como:

$$\rho \frac{\partial(\vec{u})}{\partial t} + (\rho \vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \rho \vec{b} + \nabla \cdot \tau \quad (49)$$

Donde:

\vec{b} Término fuente por unidad de masa.

τ Tensor de esfuerzos viscosos.

La ecuación de transporte para la viscosidad turbulenta modificada se calcula como:

$$\frac{\partial(\rho \hat{v})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \hat{v} u_j)}{\partial x_j} = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \rho \hat{v}) \frac{\partial \hat{v}}{\partial x_j} \right] + \rho C_{b2} \frac{\partial \hat{v}}{\partial x_j} \frac{\partial \hat{v}}{\partial x_j} \right) + P + D \quad (50)$$

Donde:

- $\hat{\nu}$ Viscosidad turbulenta modificada.
- \bar{u}_j Componente promedio de la velocidad en j
- x_j Coordenada espacial en dirección j
- σ Constante de difusión cruzada.
- C_{b2} Constante de difusión adicional de $\hat{\nu}$.
- P Término de producción de $\hat{\nu}$.
- D Término de destrucción de $\hat{\nu}$.

La ecuación de energía se resuelve para obtener la temperatura de la superficie de los FBRs:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E \vec{u}) = \nabla \cdot (k \nabla T) - \nabla \cdot (\rho \vec{u}) + \vec{u} \cdot (\nabla \cdot \tau) + \nabla \vec{u} : \tau + \rho \vec{b} \cdot \vec{u} + S \quad (51)$$

Donde:

- E Energía total por unidad de masa (energía interna + cinética)
- k Conductividad térmica del fluido.
- S Fuente de energía térmica (incluye radiación solar)

3.2.1.1.2. Trazado de rayos de Monte-Carlo (MCRT)

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 (ver **Figura 6**), las cuales están restringidas por la relación siguiente:

$$\tau_s(\theta) + \tau_d(\theta) + \rho_s(\theta) + \rho_d(\theta) + \alpha(\theta) = 1 \quad (52)$$

Donde:

- θ Ángulo de incidencia de la radiación solar sobre la superficie
- τ_s Transmisión especular.
- τ_d Transmisión difusa.
- ρ_s Reflexión especular.

ρ_d Reflexión difusa.

α Absortividad. Fracción de la energía que se absorbe por el material.

El ángulo de incidencia (θ) se calcula como el ángulo entre el vector normal unitario de la superficie (\vec{n}) y el vector unitario de dirección del rayo solar incidente (\vec{s}), mediante la siguiente ecuación:

$$\theta = \cos^{-1}(|\vec{n} \cdot \vec{s}|) \quad (53)$$

Este valor es esencial para aplicar correctamente la ecuación (52), ya que las propiedades ópticas dependen del ángulo con el que incide el rayo sobre la superficie. La energía absorbida por las superficies se acumula y se emplea 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 sus trayectorias, conforme a la ecuación (52).

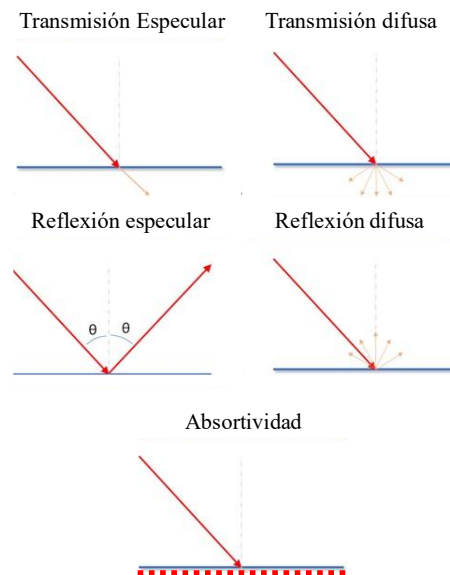


Figura 6. Propiedades ópticas de las superficies. Fuente: Adaptado de [52].

3.2.1.1.3. *Parámetros principales del MCRT*

AcuSolve® define los siguientes parámetros predeterminados para la simulación, que pueden ajustarse si los resultados no son satisfactorios [48]:

- **NumRays:** Número de rayos utilizados. Valor por defecto: 1,000,000.
- **NumSubRays:** Sub-rayos para modelar reflexiones y transmisiones difusas. Se recomienda 4.

- **MaxReflections:** Número máximo de reflexiones antes de que un rayo 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. Un valor recomendado de 1 garantiza que el 100% de esa energía se transfiera a los rayos activos, asegurando la conservación energética y evitando errores numéricos en el balance.
- **Smoothing:** Parámetro para suavizar el flujo de calor solar calculado. Valor por defecto de 1.0. Este valor indica que no se aplica suavizado adicional, preservando los gradientes locales tal como fueron calculados por el trazado de rayos.

3.2.1.2. Modelado paramétrico

El modelo CAD de los FBRs se parametriza en Altair® Inspire™ [53] de modo que las dimensiones del modelo pueden ajustarse automáticamente, además de que sirve para una optimización posterior. En el CAD se representa el dominio de fluido y un módulo formado por una matriz de 4×4 FBRs, el cual se denomina como FBRs objetivos, sombreados en gris en la **Figura 7**.

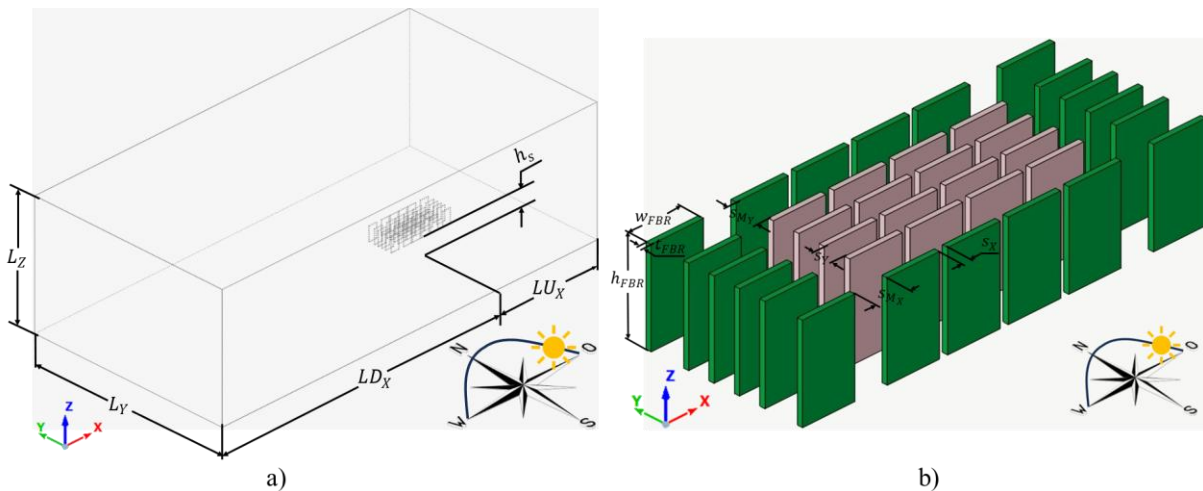


Figura 7. Modelo CAD del dominio de fluido para la simulación CFD y de un módulo de FBRs: FBRs objetivos (gris) y circundantes (verdes). a) Dominio de fluido; b) FBRs. Fuente: Elaboración propia.

Los FBRs sombreados en verde son réplicas idénticas dispuestas alrededor para evaluar las sombras proyectadas por módulos vecinos. Este modelo representa una porción significativa de FBRs de una granja de FBRs que tendría un tamaño de 1 ha. Aunque los soportes de los FBRs no están representados en el

modelo para simplificar el modelo, su influencia en la dinámica de fluidos puede ser relevante y solo se tiene en cuenta la altura que dan a los FBRs.

Donde:

w_{FBR}	Ancho del FBR, $w_{FBR} = 1.3 \text{ m}$.
h_{FBR}	Altura del FBR, $H_{FBR} = 2.169 \text{ m}$.
t_{FBR}	Espesor del FBR, $t_{FBR} = 0.13 \text{ m}$.
s_X	Espaciamiento de los FBRs dentro del módulo en el eje X, $s_X = 0.2 \text{ m}$.
s_Y	Espaciamiento de los FBRs dentro del módulo en el eje Y.
s_{M_X}	Separación de módulos en el eje X, $s_{M_X} = 0.8 \text{ m}$.
s_{M_Y}	Separación de módulos en el eje Y, $s_{M_Y} = 0.8 \text{ m}$.
h_s	Altura del soporte del FBR, no representado en el CAD, $h_s = 1 \text{ m}$.
LU_X	Longitud del dominio de fluido desde el <i>inlet</i> al origen del CAD en X.
LD_X	Longitud del dominio de fluido desde el <i>outlet</i> al origen del CAD en X.
L_Y	Longitud del dominio de fluido en Y.
L_Z	Longitud del dominio de fluido en Z.

El modelo queda encerrado en un dominio de fluido que se dimensiona a partir de la altura total del FBR (h_T), definida como:

$$h_T = h_{FBR} + h_s \quad (54)$$

Y siguiendo las recomendaciones de Franke et al. [54]:

$$LU_X = 5 \cdot h_T \quad (55)$$

$$LD_X = 15 \cdot h_T \quad (56)$$

$$L_Y = 10 \cdot h_T \quad (57)$$

$$L_Z = 6 \cdot h_T \quad (58)$$

Con ello se garantiza espacio suficiente para que el flujo alcance régimen plenamente desarrollado antes de interactuar con los FBRs y se disipen recirculaciones tras ellos, sin que las paredes del dominio interfieran en la capa límite.

3.2.1.3. Simulación CFD con radiación solar

En la **Figura 8**, se presenta un diagrama de flujo de cómo se realiza la simulación CFD.

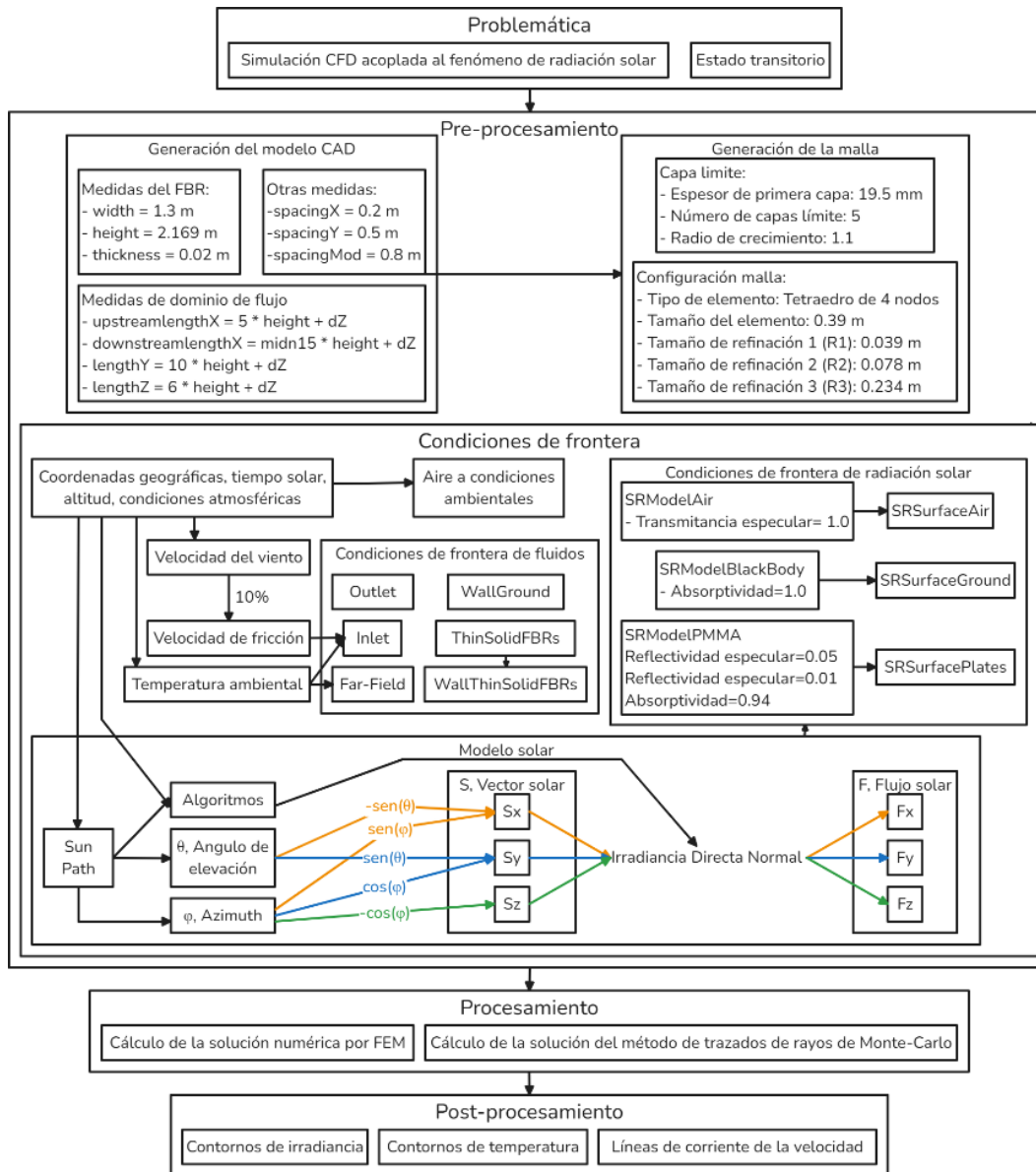


Figura 8. Diagrama de flujo de la simulación CFD. Fuente: Elaboración propia.

Esta simulación se realizará en cuatro días representativos del año: los dos solsticios y los dos equinoccios, como se observa en la **Figura 9**, ya que estos periodos proporcionan una visión global de la variabilidad de la radiación solar a lo largo del año en la zona de estudio.

Durante los equinoccios (alrededor del 20 de marzo y el 22 de septiembre), el sol pasa directamente sobre el ecuador, alcanzando su máxima altura aparente en el cielo al mediodía. En estos días, la duración del día y la noche es aproximadamente igual, y la irradiancia solar sobre los FBRs es relativamente uniforme a lo largo de las horas diurnas.

En contraste, durante los solsticios (alrededor del 21 de junio y el 21 de diciembre), el sol alcanza su máxima declinación norte o sur. En el solsticio de junio, el sol está más inclinado hacia el norte, resultando en trayectorias solares más altas y días más largos en el hemisferio norte. Aunque Cartagena se encuentra cerca del ecuador, esta inclinación todavía produce cambios apreciables en la trayectoria solar y la distribución de la irradiancia sobre la granja de FBRs. En el solsticio de diciembre, la situación se invierte, con el sol desplazándose hacia el sur y generando trayectorias solares más bajas, días ligeramente más cortos, y ángulos de incidencia de la radiación más oblicuos.

Estas variaciones en la posición solar afectan no solo la cantidad total de irradiancia que los FBRs reciben, sino también la distribución angular de la luz, lo que puede inducir sombreados y diferencias en la eficiencia de captura de CO₂ y producción de biomasa. Por tanto, analizar estas cuatro fechas específicas permite capturar los extremos estacionales de la radiación solar en la región de estudio y evaluar el impacto de la variabilidad solar en el diseño y operación de la granja de FBRs.

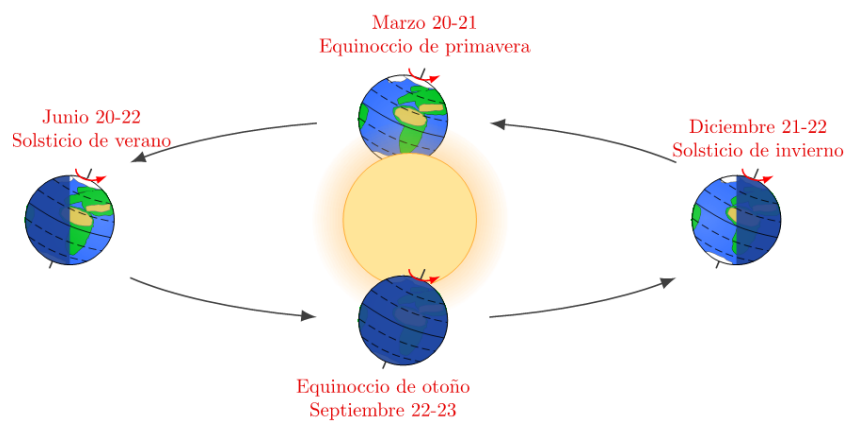


Figura 9. Equinoccios y solsticios. Adaptado de [55].

Para el mallado del modelo, se utiliza tetraedros de 4 nodos (Tet4) con un tamaño de elemento mayor en la región exterior y se realizan tres zonas de refinamiento cerca de los FBRs. La **Figura 10a** muestra las zonas de refinamiento (R1, R2, R3) y la **Figura 10b** muestra el mallado del modelo. Este enfoque busca reducir el costo computacional. Las zonas de refinamiento se dimensionaron usando 20 %, 30 % y 50 % del dominio de flujo, con tamaños de elementos de 20 %, 30 % y 60 % del tamaño de los elementos exteriores, respectivamente. Esto asegura una proporcionalidad en las medidas y permite un análisis de independencia de malla.

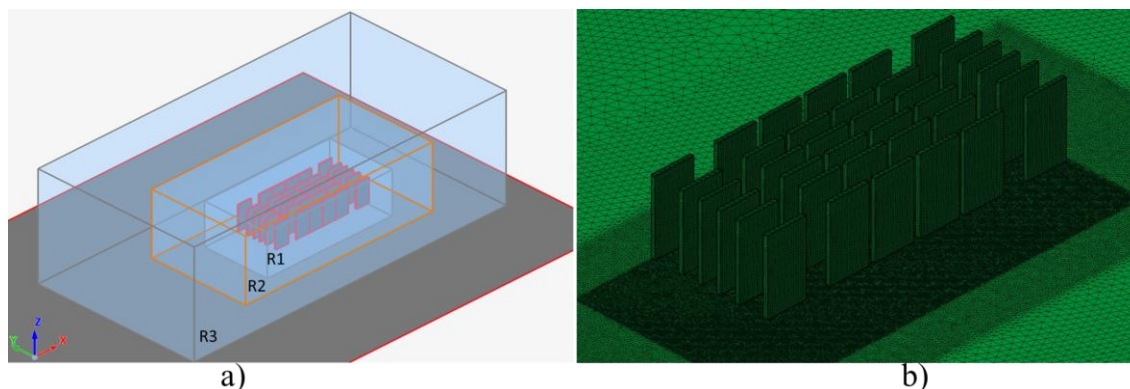


Figura 10. Discretización espacial del modelo geométrico. a) Zonas de refinación; b) Mallado superficial. Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.4. *Análisis de independencia de malla*

El análisis de independencia de malla se lleva a cabo para seleccionar el tamaño de los elementos y verificar la calidad de los resultados. En este análisis, se obtienen los valores máximos de temperatura, presión y velocidad en la superficie de salida (outlet), como se muestra en la **Figura 12b**. Los resultados del análisis, presentados en la **Figura 11a**, muestran que, a partir de los 9.4 millones de elementos, los valores se estabilizan. Esta estabilización sugiere que los resultados no varían significativamente con mayor refinamiento de la malla. Aunque pueden presentarse fluctuaciones en los valores de presión y velocidad, esto se debe a que la medición de estas variables se realiza a una escala más pequeña. Por lo tanto, se considera adecuado un tamaño de elemento exterior de 0.39 m, lo que equivale a aproximadamente 9.4 millones de elementos en el dominio de simulación. Este tamaño de malla ofrece un equilibrio aceptable entre precisión y costo computacional. Además, como se destaca en la curva de porcentaje de fallos (*relación de aspecto* ≥ 5), a partir de los 5 millones de elementos prácticamente no se reportan fallos en los elementos Tet4, lo que confirma la solidez de la configuración de malla seleccionada. Las curvas de temperatura, presión y velocidad se capturaron a los 1,600; 3,600 y 10,800 s, respectivamente, coincidiendo con los valores máximos alcanzados en cada variable.

Es importante aclarar que el análisis de independencia de malla mostrado en la **Figura 11a**, se realizó con $NumRays = 15$ millones; ya que este parámetro afecta la calidad de los resultados de radiación solar a medida que la malla se vuelve más densa. Una vez seleccionada la malla adecuada, se realizó un análisis de independencia de rayos solares, cuyos resultados se presentan en la **Figura 11b** utilizando los "FBRs objetivos" para comparar los valores máximos de temperatura e irradiancia. Los resultados muestran que, a partir de 16 millones de rayos solares, los valores de irradiancia máxima se estabilizan. Aunque la temperatura máxima sigue variando ligeramente, la diferencia no supera los 2 °C, lo cual es aceptable para

las simulaciones. Las curvas de temperatura e irradiancia se capturaron a los 14,400 y 21,600 s, respectivamente, coincidiendo con los valores máximos de cada variable.

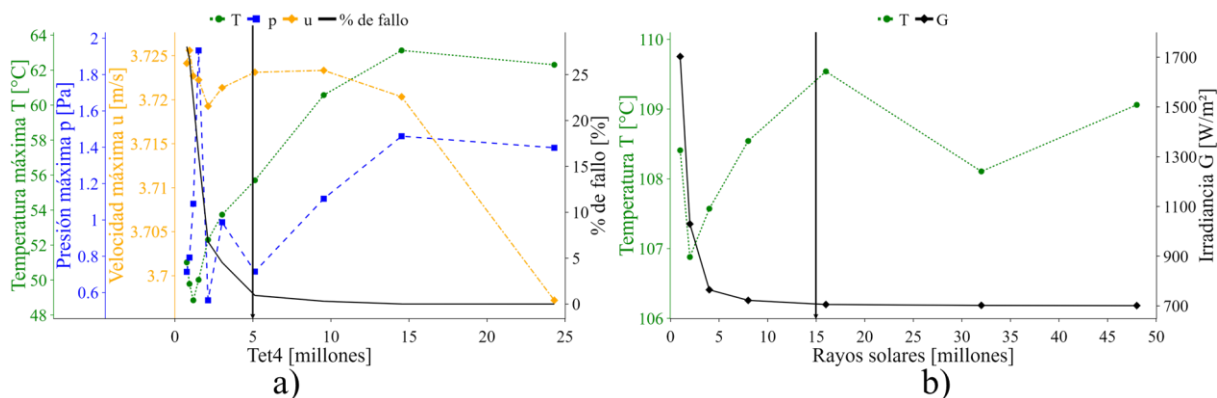


Figura 11. Análisis de independencia. a) Malla; b) rayos solares. Fuente: Elaboración propia.

La configuración final del mallado se presenta en la **Tabla 2** y **Tabla 3**, que incluye una capa límite alrededor de los FBRs y la estadística del mallado utilizado.

Tabla 2. Controles de malla. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Valor
Tipo de elemento	Tet4
Tamaño del elemento exterior	0.39 m
Tamaño de refinamiento 1 (R1)	0.039 m
Tamaño de refinamiento 2 (R2)	0.078 m
Tamaño de refinamiento 3 (R3)	0.234 m
Espesor de primera capa	19.5 mm
Número de capas límite	5
Radio de crecimiento	1.1

Tabla 3. Estadística del mallado. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Valor
No de Elementos	9,432,243
No de Nodos	1,697,674

3.2.1.5. Definición de las condiciones de fronteras

La simulación CFD con el modelo de radiación acoplada requiere la definición tanto de condiciones de frontera para el fluido, como para los rayos solares.

3.2.1.5.1. Condiciones de fronteras del modelo CFD

La **Tabla 4** muestra las condiciones de frontera impuestas en cada región del dominio fluido.

Tabla 4. Condiciones de frontera de fluidos aplicadas en la simulación. Fuente: Elaboración propia.

Condiciones de frontera	Tipo	Descripción	Valor
<i>Inlet</i> (Figura 12a)	Atmosférica	Tipo de rugosidad	<i>Suburb</i>
		k_s	0.3
		u^*	0.3889
<i>Outlet</i> (Figura 12b)	Presión de salida	T	25.5
		P_{out}	0
		V_x	2.1425
<i>Far-Field</i> (Figura 12c)	Campo lejano	V_y	1.4315
		V_z	0.7878
		T	25.5
<i>WallFBRsThinSolid</i> (Figura 12d)	Pared no deslizamiento	q''	0
<i>WallGround</i> (Figura 12f)	Pared no deslizamiento	q''	0

La **Tabla 4** presenta las condiciones de frontera de fluidos aplicadas en la simulación. Para interpretar correctamente la tabla, deben considerarse las siguientes aclaraciones:

- La velocidad de fricción (u^*) se calcula como $u^* = 0.1 * V_{air}$, donde V_{air} es la velocidad del viento obtenidas de IDEAM [56] y complementadas en tiempo3.com [57] para el 21 de diciembre de 2023, 5:00 a.m., en Cartagena.
- Las componentes de las velocidades del Far-Field (V_x , V_y y V_z) se calcula a partir de los datos de dirección y magnitud del viento en esa fecha y hora, con una magnitud de $V = 14$, y un ángulo de viento $\theta_{viento} = 69^\circ$ en la dirección en X (este) y Y (norte).
- La condición de frontera *WallFBRsThinSolid* requiere la creación de una superficie delgada adicional ("*FBRThinSolid*") utilizando PMMA [58] como material con un espesor de ($t_{TS} = 3$). Además, se asigna una frecuencia de salida nodal = 1.0 en la superficie de salida para mostrar los resultados de irradiancia.
- La condición de frontera *WallGround* emplea una función de pared como modelo de turbulencia, con un $k_s = 30$ y un factor de flujo de calor (1.0). Este factor indica que el flujo de calor aplicado en la condición de frontera se toma directamente del modelo de simulación, sin correcciones adicionales, representando fielmente la transferencia térmica natural del flujo.

- El parámetro k_s representa la altura de rugosidad equivalente, utilizada para ajustar el perfil de velocidad cerca de las superficies sólidas en el modelo de turbulencia. En esta simulación, se usó $k_s = 0.3\text{ m}$ en *Inlet* y $k_s = 30\text{ m}$ en *WallGround*.

Además, la **Figura 12** muestra las superficies del dominio donde se aplicaron las condiciones de frontera para el fluido, destacadas en color gris.

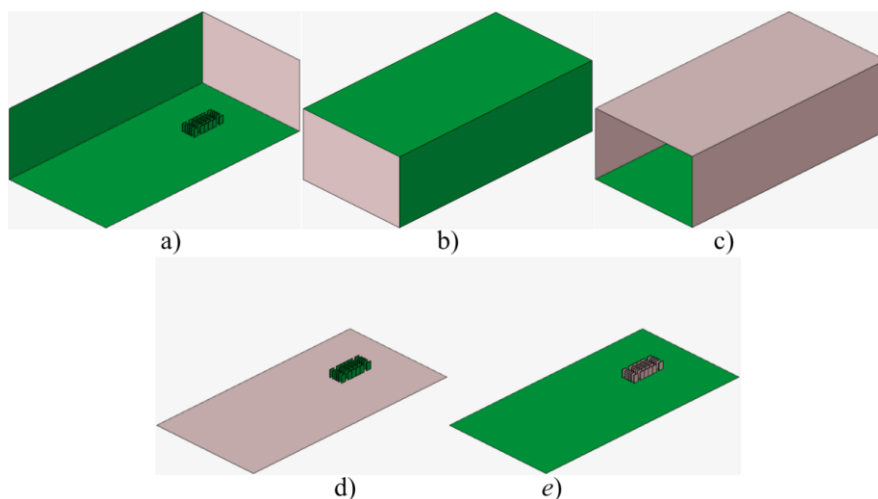


Figura 12. Asignación de condiciones de frontera al modelo CFD (superficie resaltada en gris). a) *Inlet*; b) *Outlet*; c) *Far-field*; d) *Ground*; e) *WallFBRs*. Fuente: *Elaboración propia*.

3.2.1.5.2. Condiciones de fronteras del modelo de radiación solar

Las superficies de radiación solar están detallan en la **Tabla 5** y representadas en la **Figura 13**. 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 6**.

Tabla 5. Configuración de las superficies de radiación solar. Fuente: *Elaboración propia*.

	<i>Side of the surface</i>	<i>Solar radiation model</i>
<i>SRSurfaceAir</i> (Figura 13a y Figura 13b)	<i>Both surface</i>	<i>SRModelAir</i>
<i>SRSurfaceGround</i> (Figura 13c)	<i>Inward</i>	<i>SRModelBlackBody</i>
<i>SRSurfacePMMA</i> (Figura 13d)	<i>Both surface</i>	<i>PMMA</i>

En la **Tabla 6**, se asume que el aire está en condiciones ambientales, con una transmisividad especular igual a 1. Esto implica que, en este modelo ideal de radiación solar, el aire es prácticamente transparente, permitiendo que toda la radiación incidente atravesase el medio sin absorción ni reflexión significativa. Asimismo, no se consideran los efectos de la humedad ambiental ni la presencia de nubes, por lo que la

única componente de la radiación solar que alcanza el sólido es la radiación directa normal, como se ilustra en la **Figura 14**.

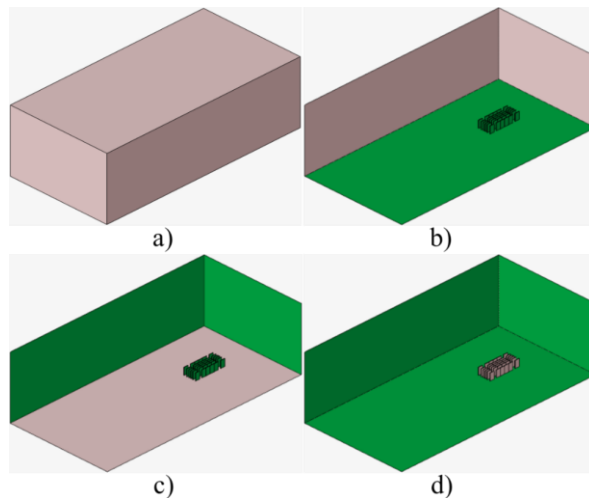


Figura 13. Asignación de condiciones de frontera al modelo de radiación solar (superficies resaltadas en gris). a) SRSurfaceAir, parte frontal; b) SRSurfaceAir, parte trasera; c) SRSurfaceGround; d) SRSurfacePMMA. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Propiedades ópticas de los modelos de radiación solar. Fuente: Elaboración propia.

	Transmisividad	Transmisividad	Reflectividad	Reflectividad	Absortividad
	especular	difusa	especular	difusa	
SRModelAir	1	0	0	0	0
SRModelBlackBody	0	0	0	0	1
SRModelPMMA	0	0	0.05	0.01	0.94

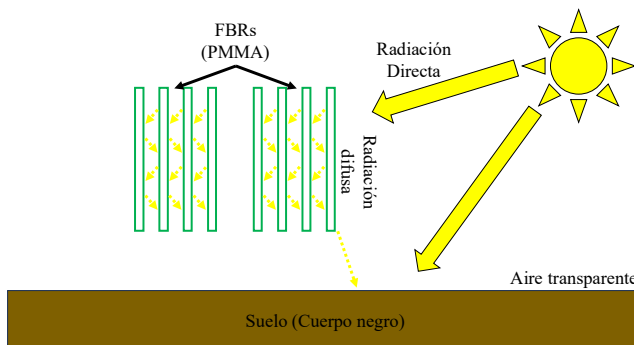


Figura 14. Modelo de radiación solar ideal. Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.6. Configuración final de la simulación

La configuración detallada de la solución se presenta en la **Tabla 7**. Para validar la simulación CFD acoplada a radiación solar realizada en Altair SimLab, se realizó un montaje experimental en la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) replicando un módulo simplificado de fotobiorreactores tipo panel

plano. Dado que este trabajo experimental se encuentra actualmente en proceso de revisión por pares para su publicación en una revista científica, los resultados no se incluyen en este documento.

Tabla 7. Configuración de la solución. Fuente: Elaboración propia.

Característica	Variable
Solver	<i>AcuSolve</i>
Tipo de solución	Transitorio
Tipo de fluido	Aire a condiciones ambientales
Tamaño de paso de tiempo [s]	3,600
Tiempo de simulación [s]	50,400
Número de pasos de tiempo	15
Tipo de flujo	Turbulento
Modelo de turbulencia	<i>Spalart-Allmaras</i>
Transferencia de calor	Radiación solar

La simulación CFD se configuró como un proceso transitorio, resolviendo las ecuaciones de conservación con dependencia explícita del tiempo. La simulación, se definió un paso de tiempo de 3,600s (1h), ejecutando 15 pasos de tiempo que permiten cubrir un intervalo de 15 horas desde el amanecer hasta el atardecer. Esta configuración garantiza que se obtengan valores de irradiancia para cada hora del día, permitiendo posteriormente calcular la irradiación diaria total, una variable fundamental para la estimación de la producción de biomasa algal y la captura de CO₂.

La simulación tuvo una duración promedio de 55.58min. La selección de un paso de una hora representó un compromiso entre la resolución temporal suficiente para describir los cambios de irradiancia a lo largo del día y el tiempo de cómputo requerido. Además, se realizó una simulación adicional utilizando un paso de 1,800s ($\frac{1}{2}h$) mostraron que el tiempo computacional promedio por simulación aumentaba a 88.97min, incrementando el costo computacional casi al doble.

3.2.2. Estudio paramétrico para la distribución de la granja de FBRs

Esta sección presenta un estudio paramétrico realizado mediante simulaciones computacionales en Altair® SimLab®, cuyo objetivo es identificar la distribución adecuada y alineación de los FBRs para maximizar la captación de energía lumínica y su correspondiente producción de biomasa algal, lo que a su vez mejora la captura de CO₂. Además, se debe asegurar un acceso seguro y ergonómico para el mantenimiento de los módulos. Este estudio implementó un Diseño de Experimentos (DOE) utilizando CFD como herramienta de evaluación, donde se analizaron distintas combinaciones de espaciado, alineación y

condiciones estacionales. Las simulaciones se ejecutaron de manera automatizada para cada configuración, permitiendo analizar el desempeño energético de la granja bajo distintas condiciones solares.

La distribución seleccionada debe lograr un uso eficiente del terreno disponible y reducir el sombreado entre los FBRs, considerando tanto el espaciamiento de los FBRs en el eje Y (s_Y) como la alineación (φ) entre el eje X + del módulo de FBRs y el norte geográfico (ver **Figura 15**). Una correcta combinación de estos parámetros permite reducir las sombras proyectadas entre los FBRs, asegurando una captación uniforme de irradiancia durante el día y, en consecuencia, una mayor producción de biomasa algal.

En la **Figura 16** se presentan resultados obtenidos el 21 de junio de 2023 para ángulos de alineación (φ) entre 0° y 180° , con incrementos de 30° . Se observa que los ángulos de alineación suplementarios, como 30° y 150° o 60° y 120° , generan valores de irradiancia muy similares, pero en las superficies opuestas del FBR. Aunque el ángulo de incidencia varía a lo largo del día para cada orientación, la integral bajo la curva (irradiación diaria total) es prácticamente igual entre ángulos suplementarios. Este comportamiento permite simplificar el análisis, por lo que se limita el rango de simulaciones a ángulos de alineación entre 0° y 90° .

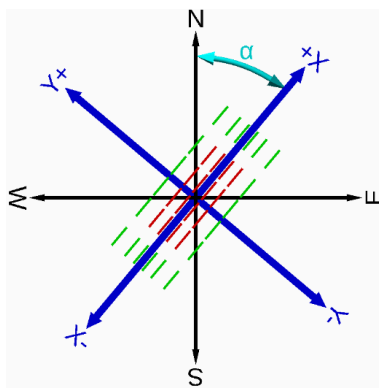


Figura 15. Alineación de los módulos de FBRs entre el eje $X+$ y el norte. Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 17**, se puede apreciar cómo se va moviendo el módulo de FBRs según progresa el ángulo de alineación (φ). Cuando φ es 0° (ver **Figura 17a**) el sol incide perpendicularmente sobre la superficie más larga del FBR (longitudinal), y a medida que el ángulo de alineación aumenta a 90° (ver **Figura 17d**) el recorrido del sol incide paralelamente sobre la superficie longitudinal del FBR. Estas configuraciones permiten analizar cómo el ángulo de alineación y el espaciamiento afectan la captación de radiación solar y, por ende, el desempeño general de la granja.

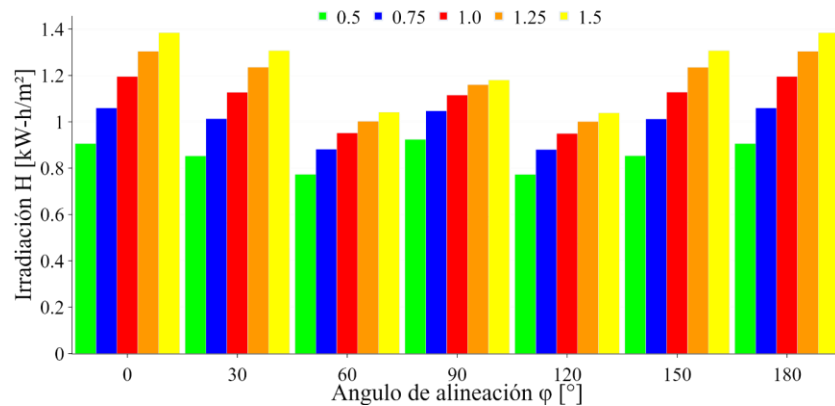


Figura 16. Irradiancia según el ángulo de alineación. Fuente: Elaboración propia.

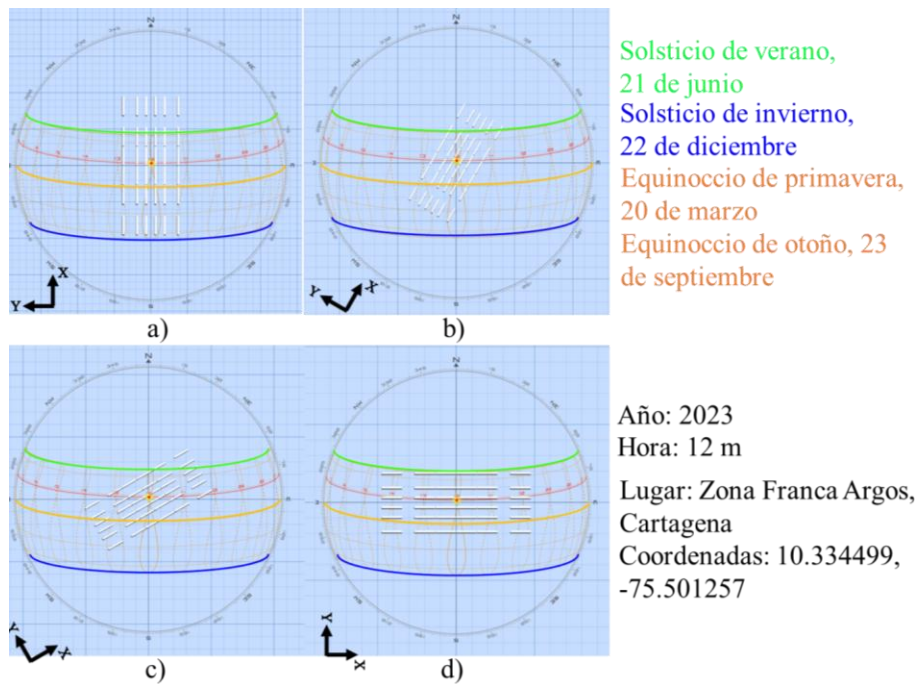


Figura 17. Alineación de los módulos de FBRs. a) 0 °; b) 30 °; c) 60 °; d) 90 °. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.1. Identificación de factores y niveles del DOE

En este diseño paramétrico simulado, se consideran tres factores principales que influyen en los resultados:

- **Espaciado entre FBRs dentro del módulo en el eje Y (s_Y):** Este factor afecta la captación de irradiación debido que aumenta o disminuye según la separación de los FBRs dentro del módulo y el acceso entre los módulos para realizar mantenimiento. Los niveles considerados para el espaciado varían de 0.5 a 1.5, con incrementos de 0.25.

- **Ángulo de alineación de los FBRs (φ):** La alineación afecta la captación de irradiancia a lo largo del día, debido a que los FBRs estaría recibiendo radiación solar en diferentes ángulos. Los niveles del ángulo de alineación considerados varían de 0° a 90° , con incrementos de 15° .
- **Días de recolección de datos:** Para capturar las variaciones estacionales en la irradiancia, se seleccionan cuatro días representativos del año: los dos solsticios y los dos equinoccios. Estos días permiten analizar el efecto de la posición solar a lo largo del año sobre la captación de irradiancia en los módulos.

Las variables de respuesta del DOE son:

- **Número de módulos (N_{Mx}):** Cantidad de módulos que pueden instalarse en la hectárea en cada configuración de espaciado. Se define la densidad o relación entre número de FBRs y el área.
- **Producción de biomasa algal diaria (Ba_F) y captura de CO_2 (F_{CO_2F}) en toda la granja:** Estas variables se obtienen a partir del área bajo la curva de irradiancia diaria acumulada sobre los FBRs objetivo (irradiación), multiplicada por el número total de módulos en la granja. Ambas están directamente relacionadas con la eficiencia fotosintética vista en la **sección 3.1.3**.

3.2.2.2. Selección del tipo de diseño experimental

Dado el número de factores y niveles considerados, se opta por un diseño factorial completo, que permite evaluar tanto los efectos principales de cada factor como las posibles interacciones entre ellos. Este enfoque asegura una exploración exhaustiva del espacio experimental. El diseño factorial completo incluye:

- 5 niveles para el espaciado entre FBRs en el eje Y (s_Y)
- 7 niveles para el ángulo de alineación (φ)
- 4 días representativos del año (dos equinoccios y dos solsticios)

Lo que resultó en 140 ($5 \cdot 7 \cdot 4$) combinaciones simuladas. Estas simulaciones transitorias permitieron analizar el efecto combinado de la configuración geométrica y la estacionalidad sobre la captación de irradiancia, aportando datos clave para el análisis y la optimización.

La duración total de las simulaciones, considerando un esquema de 15 pasos de tiempo (con una duración promedio de 55.58 *min* por simulación), fue de 7,781.67 *min* (129.69 *h*, equivalentes a aproximadamente 5.40 *días*) para completar todas las combinaciones evaluadas. En comparación, al utilizar 30 pasos de tiempo (reduciendo el tamaño del paso a 1,800 segundos y aumentando la duración promedio de 88.97 *min* por simulación), el tiempo total de cómputo se incrementaría a 12,455.33 *min* (207.59 *h* o 8.65 *días*), aumentado un 60% el tiempo de cómputo requerido.

Dado el elevado número de escenarios analizados en el DOE, la selección de un paso de tiempo de una hora resultó fundamental para garantizar la viabilidad computacional del estudio y permitir la finalización del análisis en tiempos razonables.

3.2.2.3. Planificación del DOE

Cada combinación de espaciamiento de los FBRs en el eje Y (s_Y) y el ángulo de alineación (φ) se aplicará en una disposición de FBRs dentro de una hectárea de terreno, en intervalos de una hora. Todas las combinaciones fueron evaluadas mediante simulaciones numéricas implementadas en Altair® SimLab®, sin necesidad de realizar prototipos físicos. Estas simulaciones permiten obtener de forma precisa los valores de irradiancia sobre los FBRs para cada configuración, considerando variables solares representativas del año. El software de Altair® SimLab® calcula la irradiancia en cada FBR a lo largo del día, lo cual permite analizar la producción de biomasa algal y captura de CO_2 en cada configuración de espaciado y alineación.

Además, se documentará el número máximo de módulos que pueden instalarse en cada configuración, considerando tanto la densidad de FBRs como las condiciones de acceso seguro y ergonómico al área de trabajo. Para ello, se evaluará si el espaciado entre módulos garantiza una movilidad adecuada para las labores de mantenimiento, alineándose con los principios de seguridad y salud en el trabajo (SST). Esto permitirá identificar las configuraciones óptimas no solo en términos de captación de irradiancia, sino también en términos de operabilidad y seguridad, asegurando que los trabajadores puedan realizar intervenciones sin obstáculos ni riesgos innecesarios.

3.2.2.4. Recolección de datos

Para cada configuración evaluada, se implementa un flujo de trabajo automatizado en Altair® SimLab® que permite la simulación eficiente de los casos definidos. Este proceso se lleva a cabo mediante la ejecución de scripts que generan las mallas y condiciones de frontera para cada escenario de espaciado y alineación de los FBRs. Una vez finalizadas las simulaciones, los resultados son extraídos del archivo .log generado

por Altair® SimLab®. Este archivo contiene información clave sobre la irradiancia promedio diaria recibida por los módulos, así como la distribución de temperatura en la superficie de los módulos. La extracción de datos se realiza mediante scripts en Python, que analizan el contenido del archivo, filtran la información relevante y estructuran los resultados en un DataFrame de Pandas [59] para su posterior análisis. El procesamiento en Python permite calcular métricas adicionales, tales como:

- Promedio y variabilidad de la irradiancia en los FBRs, evaluando el impacto del espaciado y la orientación.
- Calcular la irradiación de los FBRs, la producción de biomasa algal y captura de CO_2 diaria en el módulo y en la granja según la combinación de simulación, además de calcular la producción anual de biomasa algal y captura de CO_2 en la granja.
- Distribución de temperatura en la superficie de los FBRs, correlacionada con la captación solar.
- Número total de módulos posibles en una hectárea, basado en la disposición y el espaciado seleccionado.

Toda la información procesada en esta etapa es fundamental para determinar la influencia del diseño geométrico en la eficiencia de captación solar y optimizar la configuración de los FBRs para maximizar la producción de biomasa.

3.2.2.5. *Análisis estadístico y selección de la distribución espacial*

Para interpretar los datos obtenidos en el DOE mediante las simulaciones CFD, se emplea un análisis de varianza (ANOVA), una herramienta estadística que permite determinar la influencia de cada factor y sus interacciones en la captación de irradiancia y temperatura de los FBRs. Mediante este análisis, se cuantifica la significancia de cada variable, identificando configuraciones óptimas y descartando aquellas con efectos negativos o insignificantes en la eficiencia del sistema.

El ANOVA también permite detectar interacciones significativas entre factores, como el impacto combinado del espaciado y la alineación, lo cual es clave para entender cómo ciertos ajustes pueden potenciar o limitar la eficiencia de captación solar.

Para visualizar los resultados, se elaboran gráficos como:

- Curvas de irradiancia a lo largo del día, que permiten analizar los patrones de captación solar según la configuración.
- Boxplots de temperatura y espaciado, que facilitan la comparación entre configuraciones y su estabilidad térmica.
- Boxplots de producción de biomasa algal diaria, que muestran la relación entre la producción de biomasa algal y la densidad de módulos en el área disponible.

Además del análisis estadístico, para seleccionar la configuración adecuada de espaciado y alineación se consideran criterios prácticos, como maximizar la irradiación total diaria acumulada en toda la granja, lo que permite evaluar de manera global la captación de energía solar. Estos análisis permiten definir restricciones y objetivos dentro de la optimización paramétrica, garantizando que la configuración final maximice la eficiencia en la producción de biomasa, sin comprometer la accesibilidad ni la estabilidad térmica del sistema.

3.2.3. Optimización paramétrica de la distribución de módulos de FBRs

Se realiza una optimización paramétrica en Python [60], para maximizar la captación de irradiación solar en los FBRs, optimizando así la producción de microalgas y la captura de CO₂. Las siguientes subsecciones indican la función objetivo, restricciones y variables de diseño para la definición del problema de optimización.

3.2.3.1. Variables de diseño

Para la optimización de la distribución de los módulos de fotobiorreactores tipo panel (FBRs), se han definido dos variables clave:

- Espaciado (s_y): Se considera una variable continua para realizar optimización, representa la distancia entre los módulos en la dirección del eje Y . Un espaciado adecuado permite maximizar la captación de irradiación solar, minimizando el sombreado entre módulos y asegurando un acceso óptimo para el mantenimiento. No obstante, una mayor separación provoca que menos FBRs quepan dentro del terreno disponible, y por consiguiente menos captación de luz solar total en la granja, con su respectivo efecto negativo en la producción fotosintética de las microalgas. Es por ello por lo que se requiere de un proceso de optimización para equilibrar estos efectos.

- Ángulo de alineación (φ): Se considera una variable continua, define la orientación de los FBRs respecto al eje X . La alineación óptima se selecciona con el objetivo de maximizar la irradiancia recibida en función de la posición solar y la latitud del sitio de estudio.

3.2.3.2. Definición de la función objetivo

La función objetivo está orientada a maximizar la irradiación captada por la granja de FBRs en el terreno disponible, específicamente para la planta de producción de Argos en Cartagena, buscando una configuración que equilibre el espaciado (s_Y), y el ángulo de alineación de los módulos (φ). Para su construcción, se realizan simulaciones con distintas configuraciones de espaciado y alineación, calculando la irradiancia diaria captada por módulo mediante la integración de la curva de irradiancia. Este análisis se repite para diferentes días del año para considerar variaciones estacionales. Los datos obtenidos permiten ajustar una superficie de respuesta que modela la relación entre espaciado, alineación e irradiancia captada, utilizando un modelo matemático cuyos coeficientes se incorporan en la función objetivo de la optimización. Para obtener una fórmula matemática para el cálculo de la producción de biomasa (Ba_F) en función de los parámetros s_Y (espaciamiento) y φ (ángulo de alineación de los FBRs), es decir $Ba_F(s_Y, \varphi)$, se utiliza una superficie de ajuste. Para su cálculo, primero se obtiene el valor promedio de la producción de biomasa algal de la granja durante los cuatro días dependiendo del valor del espaciamiento (s_Y) y el ángulo de alineación (φ), y luego se implementa un modelo de ajuste basado en polinomios de grado variable. Teniendo en cuenta que el modelo polinómico considera la combinación de potencias de ambas variables, se definen los siguientes componentes: el grado total del término polinómico (j), el exponente aplicado a s_Y (k) y el exponente aplicado a φ ($j - k$), con esta notación, el modelo de ajuste se expresa como:

$$Ba_{M_a}(s_Y, \varphi) = \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^j p_{jk} \varphi^{j-k} s_Y^k \quad (59)$$

Donde:

Ba_{M_a}	Producción ajustada de biomasa algal en el módulo.
p_{jk}	Coefficientes del modelo, determinados a través de un ajuste por mínimos cuadrados.
n	Grado del polinomio.

El ajuste del modelo se llevó a cabo utilizando el método de mínimos cuadrados no lineales implementado en la función `least_squares()` de SciPy en Python 3.12.4. Los pasos específicos fueron:

1. Definición de parámetros iniciales: Se estableció un conjunto inicial de coeficientes igual a 1 para todos los términos del polinomio.
2. Cálculo de la superficie: El modelo fue ajustado a los resultados de las simulaciones CFD, y los coeficientes del polinomio se determinaron iterativamente para minimizar la suma de los errores cuadráticos.

La calidad del ajuste se evaluó mediante el coeficiente de determinación (R^2), definido como:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Ba_{M_o} - Ba_{M_a})^2}{\sum (Ba_{M_o} - \overline{Ba_{M_o}})^2} \quad (60)$$

Donde:

Ba_{M_o}	Producción observada de biomasa algal por el módulo obtenida mediante CFD.
$\overline{Ba_{M_o}}$	Promedio de la producción de biomasa algal observada en el módulo.

El modelo final se expresó como una combinación lineal de términos polinómicos, con coeficientes específicos calculados durante el ajuste. La ecuación resultante y su respectivo R^2 fueron almacenados y presentados como parte de los resultados del ajuste. Por lo tanto, la función objetivo se define como:

$$Ba_f(s_Y, \varphi) = \frac{Ba_{M_a}(s_Y, \varphi) \cdot N_{M_T}(s_Y)}{1000} \quad (61)$$

3.2.3.3. Restricciones

El modelo de optimización considera las siguientes restricciones para garantizar la factibilidad y realismo de las soluciones obtenidas:

3.2.3.3.1. Restricciones de las variables de decisión

- Espaciado de los FBRs dentro del módulo en el eje Y (s_Y):

El rango permitido está definido como ($0.5 \leq s_Y \leq 1.5$), debido a dos razones principales:

- Límite inferior ($s_Y = 0.5$): Un espaciado menor a este valor dificultaría el acceso a los FBRs para mantenimiento y operación.
- Límite superior ($s_Y = 1.5$): Más allá de este valor, el incremento en espaciado ya no mejora significativamente la irradiancia captada, ya que los efectos de sombreado entre módulos se reducen de manera insignificante para $s_Y \geq 1.5$.

Este rango garantiza un equilibrio entre la eficiencia en la captación de irradiancia, la distribución espacial óptima y la accesibilidad operativa.

- Ángulo de alineación (α):

El ángulo de alineación está restringido a ($0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$), ya que los demás valores no aportan configuraciones únicas, sino que generan resultados equivalentes debido a simetría geométrica y propiedades trigonométricas como se mostró anteriormente (ver **Sección 0**) y más específicamente en la **Figura 16**.

Como se observa en la **Figura 16**, las configuraciones de alineación dentro del rango definido maximizan la captación de luz solar, evitando análisis innecesarios de ángulos redundantes.

3.2.3.3.2. Restricciones geométricas

- La cantidad de módulos en el eje Y ($N_{M_Y}(s_Y)$) está limitada por la longitud máxima del terreno disponible en el eje Y ($LT_Y = 100$).
- La cantidad de módulos en el eje X (N_{M_X}) es constante y predefinida como ($N_{M_X} = 15$), determinada por la longitud máxima del terreno disponible en el eje X ($LT_X = 100$).

3.2.3.4. Formulación del problema de optimización

Con base al problema descrito, la formulación matemática del problema de optimización es la siguiente:

$$\max_{s_Y, \varphi} Ba_F(s_Y, \varphi) \quad (62)$$

Sujeto a:

1. Restricciones de variables de decisión:

$$0.5m \leq s_Y \leq 1.5m$$

$$0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$$

2. Restricciones geométricas, ver ecuaciones (37), (38) y (39), que se repiten por claridad:

$$N_{M_T}(s_Y) = N_{M_X} \cdot N_{M_Y}(s_Y)$$

$$N_{M_X} = \left\lfloor \frac{LT_X - s_{M_X}}{w_{FBR} \cdot N_{FBR_X} + s_X \cdot (N_{FBR_X} - 1) + s_{M_X}} \right\rfloor = 15$$

$$N_{M_Y} = \left\lfloor \frac{LT_Y - s_{M_Y}}{w_{FBR} \cdot N_{FBR_Y} + s_Y \cdot (N_{FBR_Y} - 1) + s_{M_Y}} \right\rfloor$$

3.2.3.5. *Solución del método de optimización*

Dado que los efectos de la posición solar y la variabilidad atmosférica pueden influir en la captación de irradiancia de manera no lineal, es necesario emplear un método de optimización que permita determinar la combinación óptima de espaciado y alineación. Esto garantizaría un equilibrio entre eficiencia en el uso del terreno y maximización de la irradiancia captada, evitando configuraciones subóptimas que puedan reducir la productividad del sistema de FBRs. Por lo tanto, el método seleccionado para la optimización es la evolución diferencial, una técnica robusta y eficiente para resolver problemas de optimización global con variables continuas [61]. Este enfoque permite explorar un amplio espacio de soluciones y encontrar configuraciones óptimas que maximicen la captación de irradiancia y la eficiencia de la granja de FBRs. La elección de este método se basa en su capacidad para abordar problemas no lineales, manejar restricciones geométricas y operativas, y adaptarse a diferentes configuraciones del sistema.

Seudocódigo:

1. Inicializar una población de soluciones aleatorias para s_Y y φ dentro de los límites definidos ($s_Y \in [0.5m, 1.5m]$, $\varphi \in [0^\circ, 90^\circ]$), utilizando como valores por defecto $s_Y = 0.5m$ y $\varphi = 0^\circ$.
2. Evaluar la función objetivo $Ba_F(s_Y, \varphi)$ para cada solución en la población.
3. Mientras no se cumpla el criterio de convergencia (máximo 1,000 iteraciones o tolerancia 10^{-6} en el cambio de la función objetivo)
 - 3.1. Seleccionar tres soluciones aleatorias de la población.
 - 3.2. Generar una nueva solución candidata combinando las tres soluciones seleccionadas.

- 3.3. Aplicar restricciones de límite para mantener valores en el rango permitido.
 - 3.4. Evaluar la función objetivo para la nueva solución.
 - 3.5. Si la nueva solución mejora la peor solución de la población, reemplazarla.
 - 3.6. Verificar criterio de convergencia: si la diferencia entre valores de la función objetivo en iteraciones consecutivas es menor que 10^{-6} , detener la optimización.
4. Retornar la mejor solución encontrada para s_Y y φ .

Para la resolución del problema de optimización, se ha utilizado Python junto con un conjunto de librerías especializadas en optimización numérica y análisis de datos. Estas herramientas permiten la implementación eficiente del método de Evolución Diferencial y la validación de los resultados obtenidos (ver **Tabla 8**).

Tabla 8. Librerías de Python utilizadas para resolver el problema de optimización. *Fuente: Elaboración propia.*

Herramienta	Descripción	Referencia
Python 3.12	Lenguaje de programación utilizado para implementar y ejecutar el modelo de optimización.	[60]
NumPy (numpy)	Librería para el manejo eficiente de arreglos y operaciones matemáticas de alto rendimiento.	[62]
SciPy (scipy.optimize)	Módulo que proporciona funciones para la optimización numérica, incluyendo <code>differential_evolution</code> .	[63]
Pandas (pandas)	Librería para manipulación y análisis de datos tabulares, facilitando el procesamiento de la irradiancia captada.	[59]
Plotly (plotly.graph_objects)	Creación de gráficos 3D interactivos para analizar la superficie de respuesta.	[64]

3.3. Etapa 3: Diseño de red de distribución de gases de combustión

En la última fase, se aborda el diseño de la red de suministro de gases de combustión, un componente esencial para el funcionamiento eficiente y sostenible de la granja de FBRs. El proceso inicia con el análisis de requerimientos operativos, considerando la composición de los gases, las condiciones óptimas de cultivo, y los datos de producción de microalgas. Se establecerán los valores de presión y caudal necesarios para mantener un ambiente adecuado en los fotobiorreactores.

A partir de estos requerimientos, se desarrollará el diseño detallado de la red, aplicando técnicas de diseño de sistemas de distribución que aseguren una conexión eficiente entre la fuente de gases y los módulos de FBRs. La red deberá garantizar una distribución uniforme y estable, adaptándose a variaciones locales de demanda, y buscando minimizar las pérdidas de energía en el transporte.

En la **Figura 18** se representa un esquema general de la red de distribución de gases.

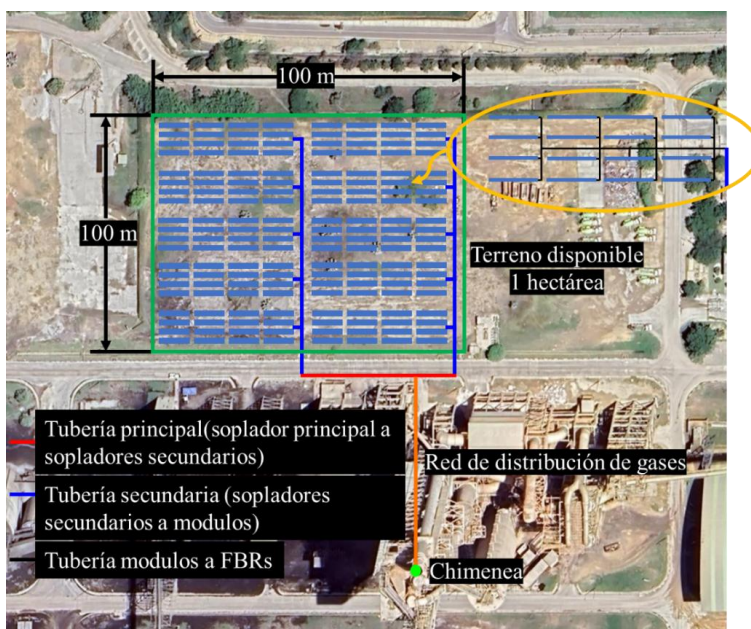


Figura 18. Esquema general de la red de distribución de gases. Fuente: Elaboración propia.

El diseño de la red debe contemplar los siguientes aspectos:

- Pérdidas de carga en tuberías y accesorios.
- Selección de materiales compatibles y resistentes a la corrosión.
- Análisis hidráulico que asegure una distribución eficiente y estable.
- Cálculo de presión de trabajo y caudal requerido del sistema de soplado.

Finalmente, la disposición de los módulos en la hectárea fue optimizada para maximizar la captación solar y permitir la integración eficiente del sistema de distribución. Cada módulo contiene 16 FBRs, distribuidos estratégicamente para garantizar el rendimiento del cultivo y facilitar la conexión a la red de gases.

3.3.1. *Mecánica de fluidos aplicada al diseño de tuberías*

Para la descripción de mecánica de fluidos necesaria en este proyecto, se elaboró una guía basada en el capítulo 8 del libro Mecánica de fluidos, fundamentos y aplicaciones, de Cengel y Cimbala [65].

3.3.1.1. *Ecuación de Bernoulli*

La ecuación de Bernoulli es una herramienta fundamental en la dinámica de fluidos, que permite relacionar la presión, la velocidad y la altura de un fluido en movimiento. Su aplicación se limita a fluidos ideales que cumplan las siguientes condiciones: flujo estacionario (velocidad, presión y densidad constantes en el tiempo), sin viscosidad (sin fricción interna), sin trabajo de flecha (las únicas fuerzas que actúan son la presión y la gravedad), y aplicado a lo largo de una línea de corriente (flujo laminar).

En cuanto a la condición de incompresibilidad, aunque los gases son por naturaleza compresibles, pueden ser tratados como incompresibles cuando la variación de densidad es despreciable, lo cual ocurre generalmente cuando el número de Mach es menor a 0.3 (velocidades bajas). En esos casos, la ecuación de Bernoulli puede aplicarse a gases como una buena aproximación:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + z_1 \cdot g = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + z_2 \cdot g \quad (63)$$

Donde:

- p_1 Presión estática en los puntos 1.
- p_2 Presión estática en los puntos 2.
- z_1 Altura de los puntos 1 desde una referencia común.
- z_2 Altura de los puntos 2 desde una referencia común.
- v_1 Velocidad del fluido en los puntos 1.
- v_2 Velocidad del fluido en los puntos 2.
- g Aceleración de la gravedad.

3.3.1.2. *Número de Reynolds*

En el ámbito del transporte a través de tuberías, un fluido puede exhibir características de flujo turbulento o laminar. Estas propiedades dependen del caudal y del diámetro de la tubería por la cual el fluido es conducido. La ecuación utilizada para determinar el estado del flujo del fluido es la siguiente:

$$Re = \frac{v \cdot D_h \cdot \rho}{\mu} \quad (64)$$

Donde:

- Re Número de Reynolds.
 v Velocidad del fluido.
 D_h Diámetro interno hidráulico de la tubería.

La ecuación previamente presentada ofrece un método para clasificar un fluido en términos de su régimen de flujo, ya sea laminar o turbulento. Este procedimiento se fundamenta en el siguiente criterio basado en el número de Reynolds [66]:

- **Flujo laminar:** Cuando Re es inferior a 2,300 ($Re < 2,300$).
- **Flujo turbulento:** Cuando Re es superior a 2,900 ($Re > 2,900$).

3.3.1.3. Ecuación de energía

La ecuación de energía es una extensión de la ecuación de Bernoulli que incorpora tres términos adicionales para considerar las irreversibilidades del sistema, como pérdidas por fricción y accesorios. Esto la hace más adecuada para representar condiciones reales. Su forma general es la siguiente:

$$\frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1 + H_A - H_R - H_{LT} = \frac{p_2}{\gamma_2} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + z_2 \quad (65)$$

Donde:

- γ_1 Peso específico del fluido ($\gamma = \rho \cdot g$) en el punto 1.
 γ_2 Peso específico del fluido en el punto 2.
 H_A Energía añadida por bomba o soplador.
 H_R Energía retirada (por turbina).
 H_{LT} Pérdidas totales del sistema.

Las pérdidas se dividen en dos categorías principales donde la sumatoria de las dos pérdidas sería H_{LT} (Total):

$$H_{LT} = H_L + H_M \quad (66)$$

Donde:

H_L Pérdidas mayores o por longitud.

H_M Pérdidas menores o por accesorios.

3.3.1.4. *Perdidas por longitud (H_L)*

Las pérdidas por fricción constituyen irreversibilidades que se atribuyen fundamentalmente a la longitud de las tuberías. La magnitud de dichas pérdidas depende de una serie de características que se representan en la ecuación siguiente:

$$H_L = \sum f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (67)$$

Donde:

f Coeficiente de fricción.

L Longitud de la tubería.

D Diámetro interno de la tubería ($D = D_h$).

3.3.1.4.1. *Coefficiente de fricción (f)*

Este término posee una importancia significativa, dado que esta variable puede adoptar dos ecuaciones características, según el número de Reynolds. Por lo tanto, resulta esencial determinar si el flujo es turbulento o laminar, aunque en la mayoría de los casos dentro de la industria, los fluidos generalmente se encuentran en una fase de flujo turbulento. Para calcular el coeficiente de fricción en estado laminar, se utiliza la siguiente fórmula:

$$f = \frac{Re}{64} \quad (68)$$

En cambio, para abordar un flujo turbulento, es necesario realizar iteraciones utilizando la ecuación de Colebrook.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{3.7 \cdot D} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (69)$$

Donde:

ε Rugosidad relativa de la tubería.

La determinación del coeficiente de fricción se lleva a cabo seleccionando diversos valores en ambos lados con el fin de lograr la igualdad dentro de la ecuación (iteración de punto fijo). Una vez alcanzada esta igualdad, se habrá obtenido el coeficiente de fricción correspondiente a un flujo turbulento.

3.3.1.5. Pérdidas por accesorios (H_M)

Estas son pérdidas por fricción que se originan principalmente por la cantidad de accesorios en la tubería. La magnitud de estas pérdidas está determinada por la ecuación siguiente:

$$H_M = \sum K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \tag{70}$$

Donde K es el coeficiente de pérdidas por accesorios, el cual se determina habitualmente mediante tablas, en consideración del tipo de accesorio correspondiente (ver **Figura 19**).

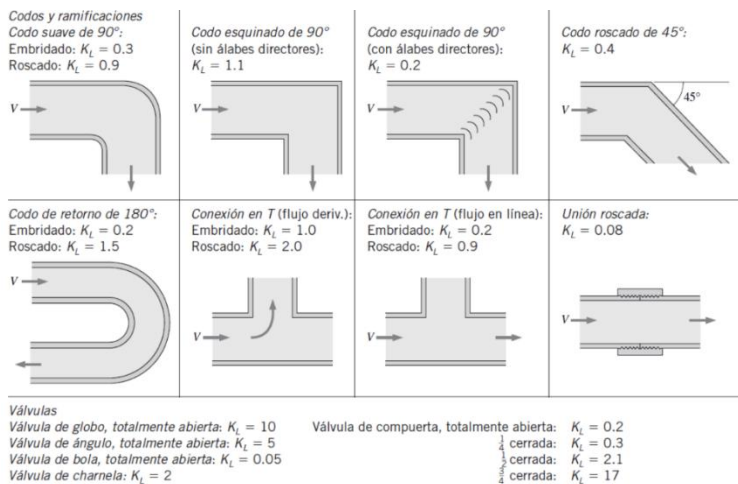


Figura 19. Ejemplo para el coeficiente de pérdidas por accesorios. Fuente: [65].

Para calcular las pérdidas de presión causadas por accesorios (secundarias), se emplean K específicos para cada tipo de accesorio.

- ‘T’: $K = 2$.
- Codo 90°: $K = 0.9$.

- **Reducciones:** En algunos casos hay reducciones, por lo que se utilizó una tabla de valores que relaciona los cambios de diámetro en la tubería, como se ilustra en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Coeficientes de fricción (K) para reducciones. Fuente: [67].

$\frac{D_1}{D_2}$	Velocidad, v_2								
	0.6m/s 2ft/s	1.2m/s 4ft/s	1.8m/s 6ft/s	2.4m/s 8ft/s	3m/s 10ft/s	4.5m/s 15ft/s	6m/s 20ft/s	9m/s 30ft/s	12m/s 40ft/s
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.10	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06
1.20	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11
1.40	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18	0.19	0.20
1.60	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.25	0.25	0.25	0.24
1.80	0.34	0.34	0.34	0.33	0.33	0.32	0.31	0.29	0.27
2.00	0.38	0.37	0.37	0.36	0.36	0.34	0.33	0.31	0.29
2.20	0.40	0.40	0.39	0.39	0.38	0.37	0.35	0.33	0.30
2.50	0.42	0.42	0.41	0.40	0.40	0.38	0.37	0.34	0.31
3.00	0.44	0.44	0.43	0.42	0.42	0.40	0.49	0.36	0.33
4.00	0.47	0.46	0.45	0.45	0.44	0.42	0.41	0.37	0.34
5.00	0.48	0.47	0.47	0.46	0.45	0.44	0.42	0.38	0.35
10.00	0.49	0.48	0.48	0.47	0.46	0.45	0.43	0.40	0.36
∞	0.49	0.48	0.48	0.47	0.47	0.45	0.44	0.41	0.38

3.3.1.6. Cálculo de la potencia del soplador

Las pérdidas por fricción y la potencia del soplador se calcularon en MATLAB® [68]. La **Figura 20** muestra el diagrama de flujo de la secuencia lógica utilizada.

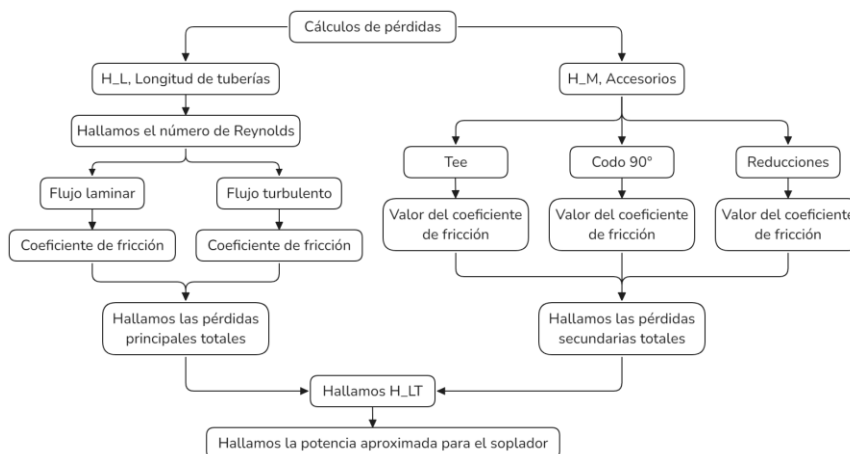


Figura 20. Diagrama de flujo de cálculos realizados en MATLAB. Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.6.1. *Cálculo de pérdidas en tuberías*

Para calcular las pérdidas de presión a lo largo del sistema de distribución, se consideran las siguientes variables:

- Densidad (ρ): calculada con base en la ecuación (24), considerando temperatura y composición del gas.
- Gravedad (g): valor utilizado de $9.78 \frac{m}{s^2}$ correspondiente a Cartagena al nivel del mar.
- Diámetro de la tubería (D): puede variar según el tramo y es un parámetro ajustable en el modelo.
- Longitud de la tubería (L): definida de acuerdo con el tramo específico de red considerado.

3.3.1.6.2. *Pérdidas totales en la red de distribución*

La energía añadida por el soplador se determina a partir de la ecuación de energía extendida, reorganizada para despejar H_A :

$$H_A = \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + H_{LT} \quad (71)$$

Posteriormente, la potencia requerida del soplador (W) se calcula mediante:

$$W = H_A \cdot \dot{V} \cdot \gamma \quad (72)$$

Donde:

\dot{V} Caudal volumétrico del fluido.

3.3.1.7. *Selección del soplador*

En esta sección se analizan los distintos tipos de sopladores disponibles, sus características técnicas, criterios de selección y su aplicabilidad según las condiciones del sistema.

3.3.1.7.1. *Tipos de sopladores*

En la **Tabla 10**, resume las características más relevantes de los sopladores centrífugos y axiales.

Tabla 10. Tipos de sopladores. Fuente: Elaboración propia.

Característica	Soplador centrífugo	Soplador axial
Dirección del flujo	Entrada: Paralela al eje de rotación. Salida: Perpendicular al eje de rotación.	Entrada y salida: En la misma dirección del eje, con trayectoria rectilínea.
Componentes principales	Rotor o impulsor: Disco con álabes que mueve el aire. Carcasa: Envuelve el rotor y dirige el flujo.	Hélice: Número variable de álabes. Núcleo o cubo: Donde se anclan los álabes. Eje: Gira la hélice.
Funcionamiento	1. El rotor crea una zona de baja presión en el centro. 2. El aire es succionado y acelerado. 3. Los álabes lanzan el aire hacia la periferia y la carcasa lo dirige hacia la salida.	1. El eje hace rotar la hélice. 2. Los álabes generan diferencias de presión, impulsando el aire paralelamente al eje.
Ventajas	- Genera presiones altas. - Eficiente contra resistencias considerables. - Maneja aire con partículas o impurezas.	- Diseño compacto. - Mueve grandes volúmenes de aire.

3.3.1.7.2. Configuración de los sopladores

Se pueden utilizar sopladores en serie o en paralelo, dependiendo de los requerimientos de presión o caudal del sistema:

- En la **Figura 21a**, se muestra la curva característica de una configuración en serie.
- En la **Figura 21b**, se presenta la curva característica para una configuración en paralelo.

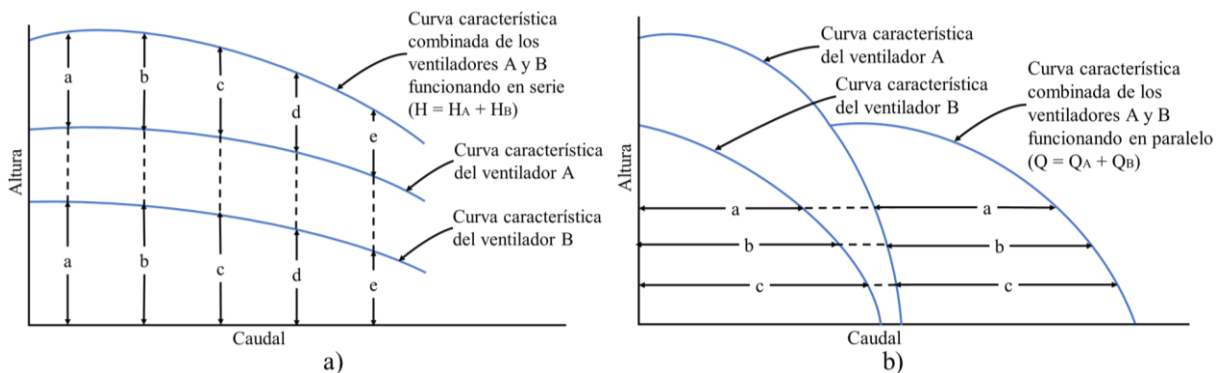


Figura 21. Curva característica de sopladores. a) en serie; b) en paralelo. Fuente: Adaptado de [69].

Estas configuraciones ofrecen distintas respuestas hidráulicas. En la **Tabla 11** se puede ver un resumen de las características de cada sistema.

Tabla 11. Configuración de sopladores. Fuente: Elaboración propia.

Característica	Configuración en serie	Configuración en paralelo
Presión	Aumento significativo (se suman las presiones).	Presión constante (limitada al soplador individual).
Caudal	Constante (limitado por el soplador de menor capacidad).	Aumento considerable (suma de los caudales individuales).
Consumo energético	Mayor (ambos sopladores operando simultáneamente).	Similar al de sopladores individuales.
Requerimientos	El segundo soplador debe soportar la presión del primero.	Requiere balance entre ambos sopladores.
Aplicaciones	Ideal para vencer grandes pérdidas por fricción.	Útil en redes que requieren alto caudal a presión constante.

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos en el presente trabajo.

4.1. Cálculos relacionados con las condiciones de operación de los gases de combustión y la red de tubería

4.1.1. Condiciones de operación de los FBRs

El diseño y la operación eficiente de los fotobiorreactores requieren el cumplimiento de condiciones específicas de presión, flujo y temperatura, las cuales han sido definidas con base en las recomendaciones del desarrollador de los paneles y los requerimientos del sistema. Estas condiciones son esenciales para garantizar la operación adecuada y optimizar la producción de microalgas.

- Presión de operación: Según el fabricante, los FBRs están diseñados para operar con una presión manométrica de ingreso igual a 7 *psi*, garantizando un funcionamiento adecuado. Sin embargo, con base a mediciones realizadas en la Universidad Eafit en condiciones locales, se ha demostrado un desempeño satisfactorio hasta una presión mínima de 6 *psi*. Por debajo de 4 *psi*, los paneles no funcionan correctamente, ya que el gas no supera la columna de agua requerida.
- Flujo de gases: Cada FBR necesita un flujo de gases de combustión de $0.01 \frac{m^3}{min} \left(10 \frac{l}{min}\right)$ a condiciones estándar. En un módulo compuesto por 16 FBRs, esto equivale a un flujo total de $0.16 \frac{m^3}{min} \left(2.67 \frac{l}{s}\right)$. Este suministro debe mantenerse constante para asegurar una distribución homogénea en todos los reactores.

Los FBRs están fabricados en Plexiglás® (PMMA virgen) con una transmitancia del 92%, un material que combina durabilidad y transparencia óptica, facilitando la captación de luz solar. Las dimensiones de cada FBR y del módulo de 16 FBRs se muestran en la **Figura 7**.

4.1.2. Composición de los gases de combustión

La información base para estos cálculos se obtuvo a partir de información cedida por Cementos Argos, junto con datos complementarios sobre la composición del carbón reportados en la literatura específica para los carbones de Bolívar [70]. La **Tabla 12** resume las variables relevantes.

Tabla 12. Mediciones en chimenea y composición del carbón. Fuente: Elaboración propia.

Categoría	Variable	Sigla	Valor	Unidad
Variables en chimenea	Temperatura	T_{chim}	152.972	°C
	Presión absoluta	p_{chim}	99.05	kPa
	Flujo de gases	\dot{V}_{chim}	334.03	$\frac{m^3}{s}$
	Temperatura del aire	T_{air}	30	°C
	Humedad relativa del aire	HR_{air}	80	%
Composición volumétrica de los gases	Dióxido de carbono	CO_2	15.5	%
	Oxígeno	O_2	13.5	%
	Exceso de aire	%EA	180	%
Composición másica del carbón	Carbono	C	75.9	%
	Hidrógeno	H	5.43	%
	Oxígeno	O	17.3	%
	Nitrógeno	N	0.16	%
	Azufre	S	1.19	%
	Humedad	Cz	9.81	%
Composición del raw meal	Humedad	h_{rm}	0.08	$\frac{kg_{H_2O}}{kg_{rm}}$
	Razón	R_{rm}	12.2	$\frac{kg_{rm}}{kg_{coal}}$
	Fracción másica de $CaCO_3$	y_{CaCO_3}	0.78 ²	$\frac{kg_{CaCO_3}}{kg_{rm}}$

A partir de la ecuación (1) se realizar el balance real, dando como resultado:

$$\begin{aligned}
 &0.759C_{coal} + 0.054H_{coal} + 0.173O_{coal} + 0.002N_{coal} + 0.012S_{coal} + 0.098H_2O_{coal} \\
 &\quad + 0.780CaCO_{3_{rm}} + 0.976H_2O_{rm} + 11.771 \cdot [0.232O_2 + 0.768N_2] \\
 &\quad + 0.725H_2O_{aire} \rightarrow 6.969CO_2 \\
 &\quad + 0.024SO_2 + 25.315N_2 + 2.287H_2O + 5.329CaO + 4.915O_2
 \end{aligned} \tag{73}$$

² La fracción másica de $CaCO_3$, se calcula a partir de la tabla 31.27 del libro *Industrial Combustion Testing* [71]. Para ello, se suma la composición completa del clinker y se determina la fracción correspondiente de $CaCO_3$, Este es el único componente del raw meal que se considera, ya que representa el elemento predominante.

Esta información es importante puesto que permite hacer estimaciones del flujo de las especies de interés en los gases de combustión, por ejemplo, la fracción molar de CO_2 presente en los gases de combustión, ver **Tabla 13**, y se calculan a partir de las ecuaciones (24), (25) y (18). Considerando el flujo másico de los gases de combustión y las fracciones de cada una de las especies de interés, es posible estimar la cantidad de cada sustancia que se emite por unidad de tiempo, ecuación (51), en este caso, en un segundo, ver **Tabla 14**, lo cual se puede expresar también en ton/día, asumiendo una operación continua (24 h/día).

Tabla 13. Variables de gases de combustión en chimenea. Fuente: Elaboración propia.

Descripción	Sigla	Valor	Unidad
Densidad	d_{chim}	0.8226	$\frac{kg}{m^3}$
Flujo másico	\dot{m}_{chim}	279.68	$\frac{kg}{s}$
Fracción molar de CO_2	x_{CO_2}	0.1178	[-]
Fracción molar de SO_2	x_{SO_2}	0.0028	[-]
Fracción molar de H_2O	x_{H_2O}	0.0946	[-]

Tabla 14. Flujo másico de especies de interés en chimenea. Fuente: Elaboración propia.

Descripción	Sigla	Valor	Unidad	Valor	Unidad
Flujo másico de CO_2	\dot{m}_{CO_2}	49.335	$\frac{kg}{s}$	4262.5	$\frac{ton}{día}$
Flujo másico de SO_2	\dot{m}_{SO_2}	0.1685	$\frac{kg}{s}$	14.558	$\frac{ton}{día}$
Flujo másico de H_2O	\dot{m}_{H_2O}	16.192	$\frac{kg}{s}$	1399.0	$\frac{ton}{día}$

Una consideración importante para tener en cuenta en el dimensionamiento de la red de distribución de gases de combustión es que, dada la fracción másica del agua en los gases y_{H_2O} , la temperatura de condensación de esta ronda los $24.08^\circ C$; es decir, el enfriamiento de los gases a una temperatura menor podría generar la condensación de hasta $16.19kg$ de agua por cada segundo.

4.2. Resultados de la simulación CFD con radiación solar

Para los resultados de la simulación CFD con radiación, se van a mostrar los resultados de un solo día, debido a que son muchas simulaciones, la simulación que se va a mostrar es la del día 21/12/2023, con alineación de 90° y separación de $0.5m$.

4.2.1. Irradiancia y temperatura a lo largo del día

A lo largo del día, la irradiancia y la temperatura promedio de los módulos objetivos en los FBRs siguen un patrón predecible (ver **Figura 22**). La irradiancia comienza en niveles bajos temprano en la mañana, aumentando rápidamente hasta alcanzar su punto máximo al mediodía, cerca de los 120 W/m², y luego disminuye progresivamente hacia la tarde. La temperatura de los FBRs refleja esta tendencia, incrementándose con el aumento de irradiancia. A las 5:00 a.m., la temperatura inicia en torno a los 25.5 °C, aumentando hasta un máximo de 29.5 °C al mediodía, cuando la irradiancia también es máxima. Después de este punto, la temperatura desciende a medida que la irradiancia disminuye, alcanzando aproximadamente 26.0 °C a las 6:00 p.m. Este comportamiento conjunto indica cómo los FBRs absorben la energía solar durante las horas de alta irradiancia. Esta tendencia es crucial para la operación de los FBRs, ya que permite optimizar la captación de energía sin exceder temperaturas que puedan afectar negativamente el cultivo de microalgas.

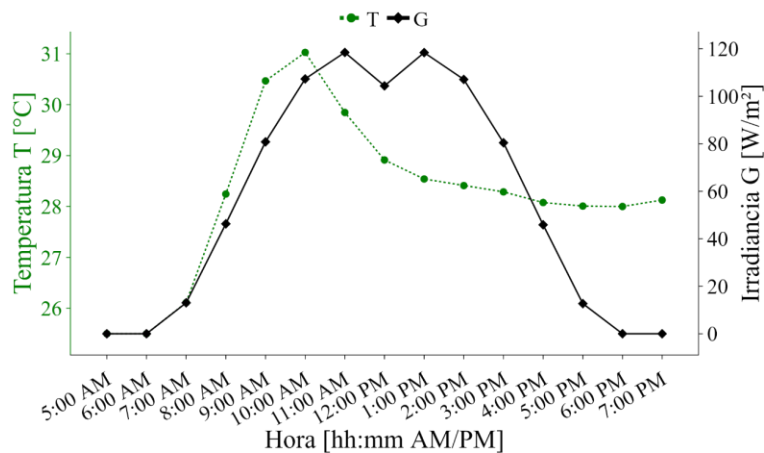


Figura 22. Resultados en la superficie del módulo objetivo a lo largo del día 21/12/2023: Irradiancia (G) y temperatura (T) promedio para la alineación 90 ° y espaciado 0.5m. Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Distribución superficial de la irradiancia y la temperatura

En la **Figura 23a**, se muestra el contorno de irradiancia en las superficies de los FBRs objetivo a las 11:00 a.m., donde la radiación solar alcanza su punto máximo. Se observa una distribución homogénea de la irradiancia en las superficies superiores de los FBRs, con valores que oscilan entre 0 W/m² (mínimo) y 663.4 W/m² (máximo). La **Figura 23b** presenta el contorno de temperatura en los FBRs a las 11:00 a.m. Los valores de temperatura varían entre 26.15 °C (mínimo) y 66.6 °C (máximo). La mayor temperatura se localiza en las esquinas superiores de los paneles expuestos a la radiación solar directa, mientras que las zonas sombreadas presentan valores significativamente menores.

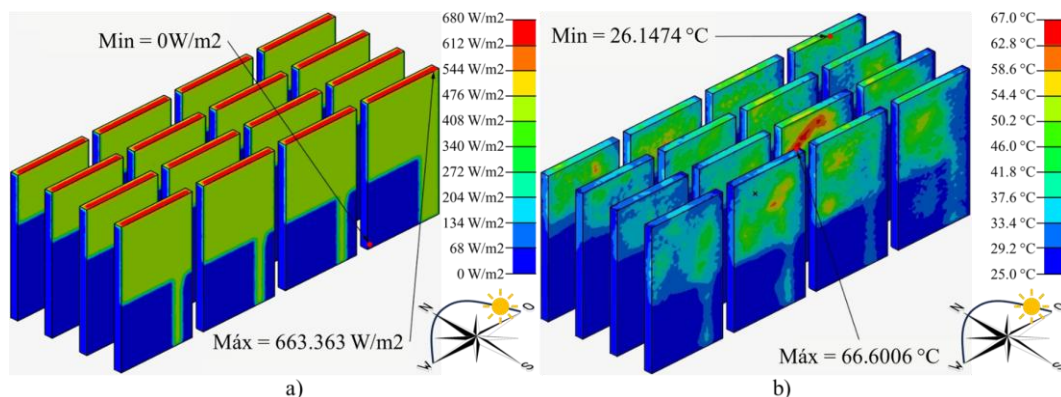


Figura 23. Distribución en el módulo objetivo a las 11:00 a.m. para la alineación 90 ° y espaciado 0.5m. a) Irradiancia (G); b) Temperatura superficial (T). Fuente: Elaboración propia.

4.3. Resultados del DOE

4.3.1. Descripción de los resultados del ANOVA

Los resultados del ANOVA se presenta un análisis para los factores de espaciado (s_Y) y ángulo de alineación (φ) teniendo en cuenta todos los valores de irradiancia, **Tabla 15**.

Tabla 15. Resultados del ANOVA para espaciamiento y alineación. Fuente: Elaboración propia.

Factor	Suma de cuadrados	Grados de libertad	F	p-valor (PR(>F))
Espaciamiento	171,403.3	4.0	13.25	1.17×10^{-10}
Alineación	43,797.76	6.0	2.26	3.56×10^{-2}
Espaciamiento *Alineación	8,604.95	24.0	0.11	1.00
Residual	6,680,053.0	2,065.0	--	--

Los resultados de la **Tabla 15** indican que el espaciado tiene un efecto significativo sobre la captación de irradiancia en los fotobiorreactores (FBRs), con un valor de $p = 1.17 \times 10^{-10}$. Esto evidencia que las diferencias en el espaciado afectan directamente la cantidad de irradiancia captada. De manera similar, la alineación presenta un efecto significativo sobre la captación de irradiancia, con $p = 3.56 \times 10^{-2}$, lo que sugiere que la orientación de los FBRs influye en la eficiencia con la que captan irradiancia. Sin embargo, la interacción entre espaciado y alineación no es significativa $p = 1.00$, lo que indica que el efecto del espaciado sobre la captación de irradiancia es independiente de la alineación de los FBRs según este análisis.

4.3.2. Análisis del efecto del espaciamiento y la alineación en la captación de irradiancia

La **Figura 24** muestra un boxplot que detalla la distribución de la irradiancia captada en función del espaciado y la alineación de los FBRs, considerando alineaciones desde 0° hasta 90° con incrementos de

15°. Este análisis revela patrones importantes que permiten comprender cómo estos factores influyen en la captación de la luz solar. A medida que el espaciado entre los FBRs incrementa, se observa una tendencia general de aumento en la irradiación captada. Esto sugiere que mayores distancias entre los FBRs reducen las interferencias de sombra, permitiendo a cada módulo captar más radiación solar. Este efecto es especialmente evidente en alineaciones cercanas a 90°, donde las sombras tienen menor superposición.

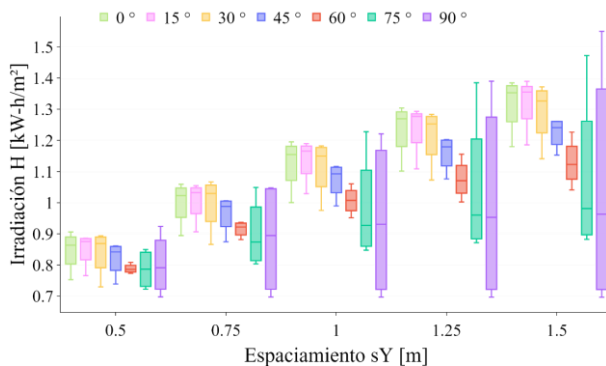


Figura 24. Efecto del espaciamento (s_Y) y ángulo de alineación (φ) en la irradiación (H) captada en la granja. Fuente: Elaboración propia.

Entre las diferentes alineaciones, se destaca un aumento significativo en la irradiación captada en los ángulos bajos (0°, 15° y 30°). Esto indica que estas alineaciones permiten aprovechar mejor la incidencia directa de los rayos solares, especialmente en configuraciones con mayores espaciamientos. El boxplot también muestra una notable dispersión en los datos, particularmente en mayores niveles de espaciado. Esto es evidente en los espaciamientos de 1.0m, 1.25m y 1.5m, donde la variabilidad en la irradiación captada es considerable. Este comportamiento puede explicarse por cambios en la posición solar a lo largo del día y la consecuente diferencia en la dinámica de sombras dependiendo de cada configuración.

La combinación de espaciado y alineación tiene un efecto significativo en la captación de irradiación en los FBRs. El aumento del espaciado optimiza la captación al minimizar las sombras, mientras que las alineaciones más cercanas a 15° maximizan la incidencia solar directa. Sin embargo, la dispersión observada en mayores niveles de espaciamento destaca la necesidad de realizar análisis más detallados considerando factores dinámicos como la posición solar y la variabilidad atmosférica.

4.3.3. Análisis de la irradiancia y temperatura en función de la hora, alineación y espaciamento entre FBRs

La **Figura 25** muestra la irradiancia promedio para los cuatro días analizados captada en función de la hora del día para diferentes espaciamientos entre FBRs y ángulos de alineación. Las barras en cada punto

indican la variación de la irradiancia en el promedio de los 4 días del año seleccionados para el análisis. Se observa que la irradiancia alcanza picos más pronunciados durante las horas cercanas al mediodía, específicamente entre las 12:00 p. m. y 2:00 p. m., con valores máximos registrados en alineaciones de 0° (**Figura 25a**), y 30° (**Figura 25b**). A medida que incrementa el espaciamiento entre los FBRs, los valores de irradiancia también tienden a aumentar. Este comportamiento sugiere que configuraciones con mayores espaciamientos y alineaciones cercanas a 0° optimizan la captación de irradiancia, aprovechando mejor la posición solar en estas horas. En contraste, los ángulos de 60° (**Figura 25c**), y 90° (**Figura 25d**) muestran un comportamiento más estable, con menores picos de irradiancia. Esto se debe a una menor incidencia directa de la radiación solar en estas configuraciones, lo que reduce la captación máxima en comparación con las otras alineaciones.

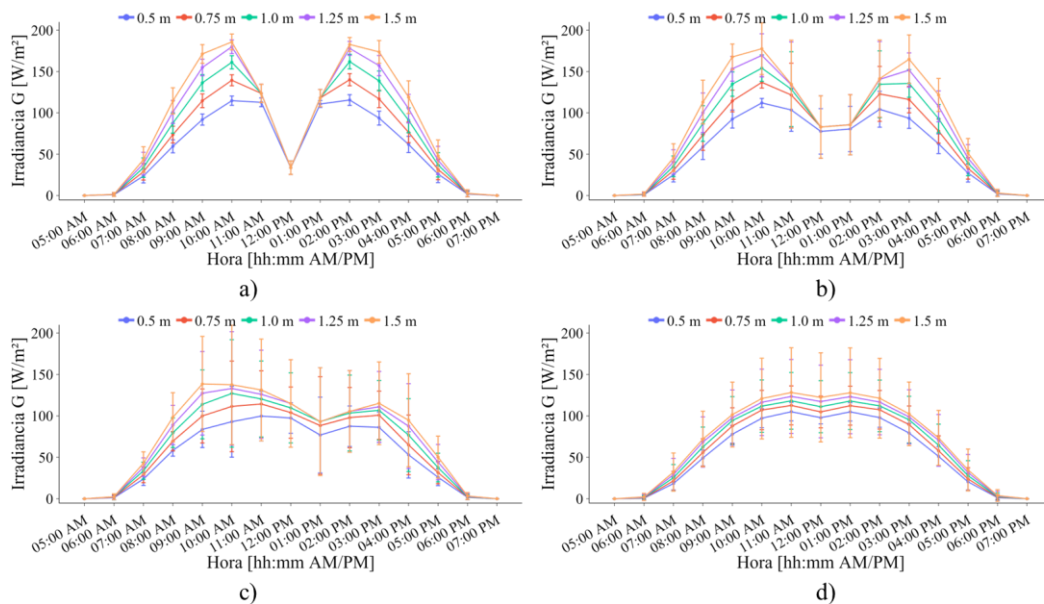


Figura 25. Irradiancia promedio (G) para los 4 días analizados captada en función de la hora del día para diferentes espaciamientos entre FBRs (s_f) y ángulo de alineación (φ). a) 0° ; b) 30° ; c) 60° ; d) 90° . Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 26**, por otro lado, presenta la temperatura promedio para los días analizados en función del espaciamiento y el ángulo de alineación de los FBRs. Se puede observar que la temperatura es más estable a lo largo de todas las alineaciones, con una dispersión de datos mayor a medida que se aumenta el espaciamiento. Además, en las alineaciones con φ más alto hay valores de temperatura que se salen del rango típico de la muestra, lo que indica, que, en algunos casos, la temperatura ha superado significativamente el intervalo en el que se encuentra la mayoría de las mediciones.

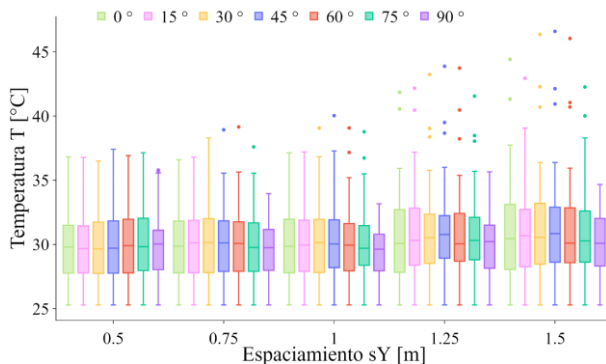


Figura 26. Temperatura promedio (T) para los días analizados en función de la del espaciamiento (s_Y) y ángulos de alineación (φ). Fuente: Elaboración propia.

4.3.4. Análisis de la producción de biomasa algal y captura de CO_2 diaria en un módulo de FBRs en función del espaciamiento y la alineación

La **Figura 27** se muestra la producción de biomasa algal y captura de carbono para un módulo con distintos valores de espaciado y alineación de los FBRs según las ecuaciones (35) y (45). Se observa que, a medida que aumenta el espaciamiento entre los FBRs, la producción de biomasa y la captura de CO_2 , cuyos valores son equivalentes en distintas escalas, tienden a incrementarse de manera global para los espaciamientos de $1.0m$, $1.25m$ y $1.5m$. Este comportamiento se atribuye principalmente a la reducción de interferencias de sombra, permitiendo que el módulo de FBRs reciba una mayor proporción de radiación solar directa. El efecto del ángulo de alineación es especialmente notable en configuraciones cercanas a 75° y 90° , donde se observa un incremento en la producción de biomasa algal. Sin embargo, estas alineaciones más elevadas al igual que en los espaciamientos más elevados ($1.0m$, $1.25m$ y $1.5m$) también presentan una mayor dispersión en los datos, lo que indica una variabilidad significativa en la producción de biomasa algal en un módulo.

En contraste, para alineaciones menores (0° , 15° y 30°), y espaciamientos reducidos ($0.5m$, $0.75m$ y $1.0m$), muestran una menor variabilidad en la producción de biomasa. La elevada variabilidad sugiere que, para una orientación específica, un día puede resultar muy propicio, permitiendo la captura de grandes cantidades de radiación solar (por ejemplo, durante el solsticio de verano), mientras que el rendimiento puede ser deficiente en el día opuesto (por ejemplo, en el solsticio de invierno), ver **Figura 28**. Por otro lado, existen orientaciones con menor rendimiento diario, pero que ofrecen un promedio de captación de luz solar significativamente superior. Asimismo, la biomasa algal promedio calculada en los cuatro días analizados muestra un comportamiento más estable en alineaciones bajas (0° , 15° y 30°), con el valor máximo registrado en la alineación de 15° .

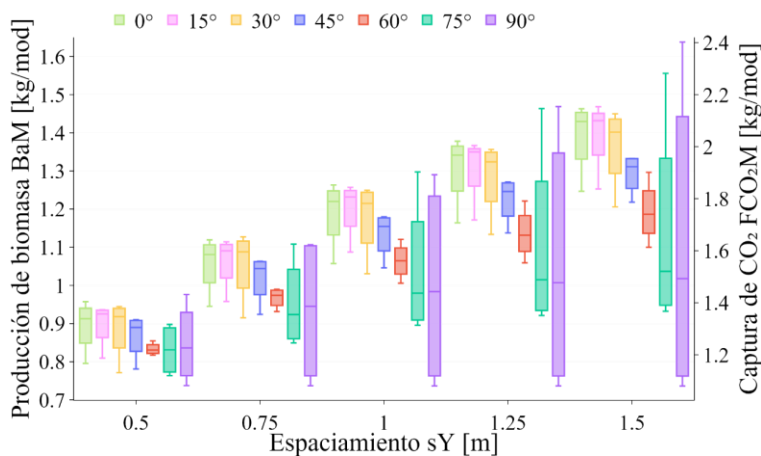


Figura 27. Producción diaria de biomasa algal (Ba_M) y captura de CO_2 (F_{CO_2M}) diaria por un módulo de FBR en función del espaciamiento y el ángulo de alineación. Fuente: Elaboración propia.

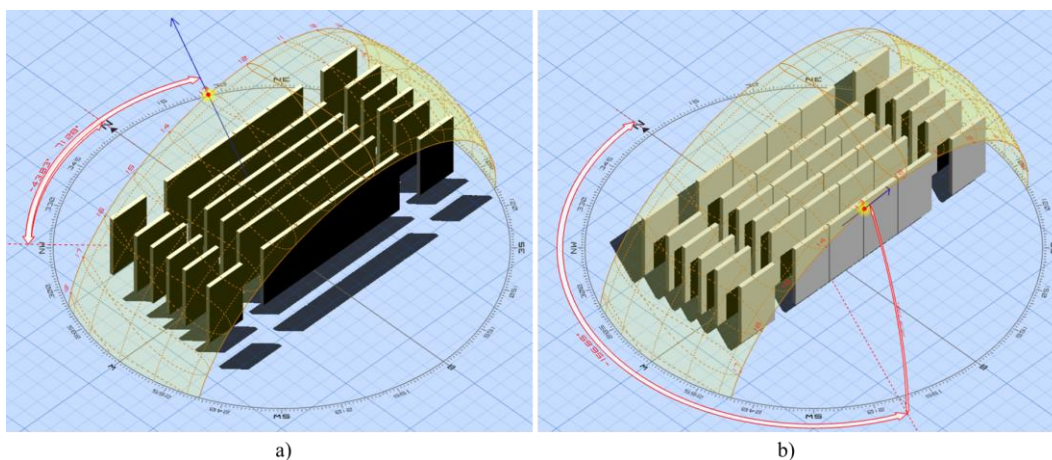


Figura 28. Diferencias de sombras a la 1 pm. a) Día 21/06/2025 (Solsticio de verano); b) 21/12/2025 (Solsticio de invierno). Fuente: Elaboración propia usando 3D Sun-Path [45].

4.3.5. Análisis de la producción de biomasa algal y captura de CO_2 en la granja de FBRs en función del espaciamiento y la alineación

La **Tabla 16** resume el número total de módulos y FBRs que pueden instalarse para distintos espaciamientos en la granja de FBRs. La **Figura 29** ilustra la producción diaria de biomasa algal y la captura de CO_2 en la granja de FBRs en función del espaciamiento y el ángulo de alineación según las ecuaciones (36) y (46). En contraste con los resultados observados a nivel de módulo, en la escala de la granja se evidencia que los valores más altos de producción total de biomasa algal se alcanzan con un espaciamiento de $0.5m$. Esto se debe al mayor número de FBRs que pueden instalarse en la hectárea disponible (ver **Tabla 16**), lo que compensa la menor irradiancia captada por cada módulo individual debido a la presencia de sombras. Con este espaciamiento, es posible instalar hasta $8,400FBRs$, maximizando la producción total

de biomasa algal en la granja. No obstante, al aumentar el espaciamiento entre los módulos, el número total de FBRs disminuye significativamente, lo que reduce la producción global de biomasa en la granja. Aunque un mayor espaciamiento mejora la captación de irradiancia por módulo debido a la menor interferencia de sombras, la reducción en el número de unidades instaladas impide compensar esta ventaja. Por ejemplo, con un espaciamiento de $1.5m$, la producción total se ve limitada, ya que solo pueden instalarse $4,080$ FBRs, resultando en una menor producción de biomasa a escala global. Además, la configuración de alineación a 15° con un espaciado de $0.5m$ presenta la mediana más elevada en términos de captura de CO_2 ($0.718ton$) y producción de biomasa ($0.489ton$), superada solo por 3 valores máximos (para $s_Y = 0.5m$ y $\varphi = 0^\circ$ y $\varphi = 90^\circ$). Esto indica que dicha combinación es la más apropiada para la región geográfica del proyecto.

Tabla 16. Número total de módulos y FBRs para distintos espaciamentos. Fuente: Elaboración propia.

s_Y	N_{M_T}	FBRs Totales
0.5	525	8,400
0.75	420	6,720
1	345	5,520
1.25	300	4,800
1.5	255	4,080

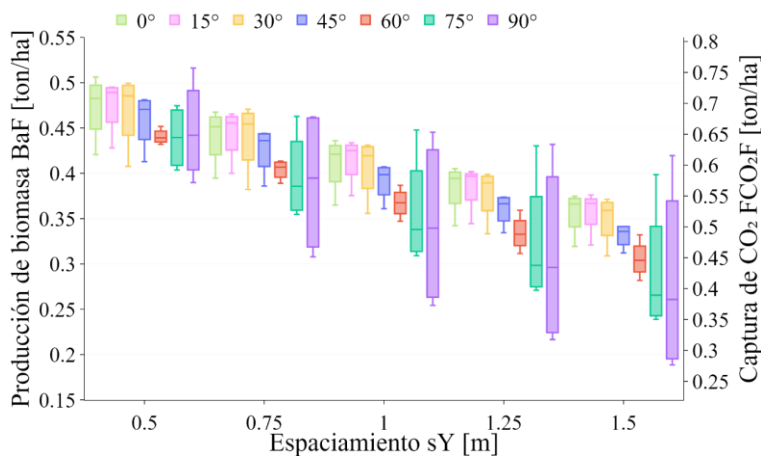


Figura 29. Producción de biomasa algal (Ba_F) y captura de CO_2 (FCO_{2F}) diaria en la granja de FBRs en función del espaciamiento y el ángulo de alineación. Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados destacan la importancia de considerar el balance entre la eficiencia individual de cada módulo y la capacidad total de producción de la granja. Aunque mayores espaciamentos permiten optimizar la producción de biomasa por módulo al reducir la interferencia de sombras, espaciamentos más reducidos, como $0.5 m$, resultan más efectivos para maximizar la producción total de biomasa algal, al aprovechar el mayor número de FBRs instalados.

La **Figura 30** presenta un gráfico de barras que muestra la producción anual de biomasa algal y la captura de CO_2 anual en función del espaciamiento y la alineación de los FBRs según las ecuaciones (40) y (47). El análisis indica que el espaciamiento de $0.5m$, es el que permite alcanzar la mayor producción de biomasa algal, independiente de la orientación del FBR. Asimismo, los ángulos de alineación de 0° y 15° registran los valores más altos de producción y captura. La diferencia en la producción anual entre estos dos ángulos es de $0.88ton$, lo que representa una variación del 0.5% con respecto al valor obtenido a 15° . Por otro lado, la diferencia entre la producción de biomasa algal a 15° y 45° es de $6.07ton$, lo que equivale a una variación del 3.6% . Aunque esta reducción es más significativa, no resulta tan pronunciada en comparación con la disminución observada en ángulos de alineación más elevados.

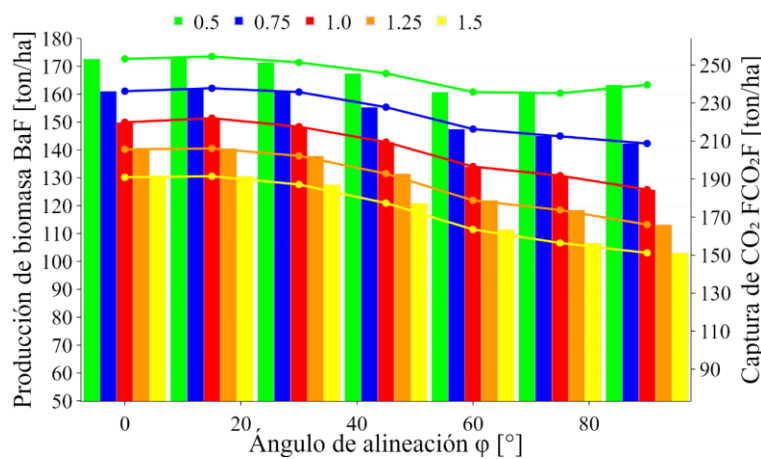


Figura 30. Producción de biomasa algal ($Ba_{F,y}$) y captura de CO_2 ($F_{CO_2F,y}$) anual promedio en la granja de FBRs en función del espaciamiento y el ángulo de alineación. Fuente: Elaboración propia.

4.3.6. Selección del espaciamiento y la alineación adecuados para los FBRs

La selección de la configuración óptima de espaciamiento y el ángulo de alineación para los fotobiorreactores se realizó considerando tanto los resultados obtenidos en el análisis de ANOVA como los datos de captación de irradiancia y producción total de energía. Este análisis permitió evaluar cómo los factores de espaciamiento, alineación y hora del día influyen en la eficiencia y operatividad de los FBRs. Los resultados del ANOVA evidenciaron que el espaciamiento y la alineación tienen efectos significativos sobre la captación de irradiancia, con interacciones notables entre alineación y horario. Esto sugiere que la captación de irradiancia varía según la alineación de los módulos a lo largo del día. Por ejemplo, ángulos cercanos a 90° presentan incrementos significativos en la irradiancia captada durante las horas centrales del día, especialmente entre las $12:00p.m.$ y las $2:00p.m.$ (ver **Figura 25**). Este comportamiento ocurre debido a la posición solar más perpendicular en estas horas, maximizando la radiación directa. En cambio,

ángulos menores, como 0° y 30° , muestran una captación de irradiancia más estable a lo largo del día, pero con valores absolutos inferiores.

El análisis gráfico (**Figura 24**) mostró que mayores espaciamentos entre módulos tienden a incrementar la captación de irradiancia al reducir las sombras entre los FBRs. Sin embargo, este beneficio debe ser equilibrado con el número de módulos que pueden instalarse en el terreno disponible. La **Tabla 16** y la **Figura 29** muestran que un espaciamiento de $0.5m$ permite instalar un mayor número de FBRs, con hasta $8,400 \frac{ud}{ha}$. Esto maximiza la producción total de energía en la granja, compensando las limitaciones en la captación de irradiancia individual con una mayor densidad de módulos. No obstante, este espaciamiento también presenta restricciones para el mantenimiento de los FBRs, lo que podría comprometer la operatividad a largo plazo.

Los datos de irradiación promedio del 21/06/2023 (ver **Figura 27**) muestran que, para un espaciamiento de $0.5m$, la producción de biomasa por módulo, Ba_M alcanza $0.836 \frac{kg_{CH_2O}}{modulo \cdot día}$ cuando los FBRs están alineados a 90° . Esta configuración permite obtener una producción total de $0.442 \frac{ton_{CH_2O}}{ha \cdot día}$ en toda la granja. En comparación, las configuraciones con alineaciones cercanas a 0° producen ligeramente menos biomasa, con $0.913 \frac{kg_{CH_2O}}{modulo \cdot día}$ y una producción total de $0.483 \frac{ton_{CH_2O}}{ha \cdot día}$. Cuando el espaciamiento se incrementa a $1m$ con un ángulo de alineación de 0° , la captación de irradiancia por módulo mejora, alcanzando $1.22 \frac{kg_{CH_2O}}{modulo \cdot día}$. Sin embargo, la producción total de biomasa por hectárea disminuye a $0.421 \frac{ton_{CH_2O}}{ha \cdot día}$, debido a la reducción en la cantidad de FBRs instalados por unidad de área.

Esto evidencia que, aunque aumentar el espaciamiento mejora la captación individual de irradiancia en cada FBR, también disminuye la densidad de módulos en la granja, afectando negativamente la producción total de biomasa a escala de terreno.

En términos operativos, un ángulo de alineación de 15° combinada con un espaciamiento de $0.5m$ es ideal para maximizar la densidad de módulos y garantizar una producción energética constante en la granja. Aunque esta configuración puede no alcanzar los picos de irradiancia observados en ángulos de alineaciones cercanas a 90° , su estabilidad y eficiencia durante todo el día hacen que sea una opción robusta para optimizar el rendimiento del sistema, especialmente en sitios donde las variaciones en la posición solar puedan ser un desafío. Este enfoque asegura una operación segura, eficiente y balanceada, maximizando el aprovechamiento del área disponible.

4.4. Resultado de la optimización paramétrica de la granja de FBRs

La combinación de espaciado y alineación tiene un impacto significativo en la captación de irradiancia en los FBRs. Si bien un aumento del espaciado mejora la captación al reducir las sombras y alineaciones cercanas a 15° optimizan la incidencia solar directa, los valores discretos considerados en el DOE para s_y y φ sugieren que quizás otros valores intermedios a los analizados posean mejor desempeño en cuanto a la captación de luz solar, favoreciendo la fotosíntesis en las microalgas y su consecuente incremento en la captura de CO₂ y producción de biomasa.

4.4.1. Superficie de ajuste para el cálculo de la biomasa

La **Tabla 17** muestra las ecuaciones de ajuste para el cálculo de la biomasa dependiendo del grado de polinomio del ajuste, a partir del R^2 . Se puede decir que la precisión de los resultados es muy alta, por lo que no es necesario utilizar un polinomio de grado superior para mejorar la calidad del ajuste. Aunque el polinomio de grado 2 mostró un buen desempeño ($R^2 = 0.988$), se realizaron pruebas comparativas utilizando las ecuaciones de la **Tabla 17** para construir las superficies de ajuste, y se observó que el polinomio de grado 3 proporcionó una superficie más definida y suave, capturando mejor las tendencias locales del comportamiento de la biomasa en función del espaciamiento y la alineación. Por este motivo, se seleccionó el polinomio de grado 3 como base para la construcción de la superficie final utilizada en el proceso de optimización paramétrica, buscando un compromiso adecuado entre simplicidad, precisión y definición de la respuesta. La gráfica de la superficie de ajuste se observa en la **Figura 31**, en donde los puntos azules son los valores discretos obtenidos mediante el DOE.

Tabla 17. Ecuaciones de ajuste para la superficie de ajuste. Fuente: Elaboración propia.

Grado del Polinomio	R^2	Ecuación de Ajuste
2	0.988	$z = 0.48 + 1.698e^{-03} \cdot x + 0.92 \cdot y - 1.232e^{-05} \cdot x^2 - 2.922e^{-03} \cdot x \cdot y - 0.194y^2$
3	0.9978	$z = 0.418 + 3.839e^{-03} \cdot x + 1.115 \cdot y - 9.647e^{-05} \cdot x^2 - 2.281e^{-03} \cdot x \cdot y - 0.395 \cdot y^2$ $+ 7.877e^{-07} \cdot x^3 - 2.219e^{-05} \cdot x^2 \cdot y + 6.781e^{-04} \cdot x \cdot y^2 + 0.59 \cdot y^3$
4	0.9985	$z = 0.384 - 1.268e^{-03} \cdot x + 1.422 \cdot y - 2.426e^{-05} \cdot x^2 + 7.970e^{-03} \cdot x \cdot y - 1.058 \cdot y^2$ $+ 8.125e^{-07} \cdot x^3 - 1.605e^{-04} \cdot x^2 \cdot y - 4.351e^{-03} \cdot x \cdot y^2 + 0.58 \cdot y^3 - 3.309e^{-09} \cdot x^4$ $+ 5.481e^{-07} \cdot x^3 \cdot y + 3.212e^{-05} \cdot x^2 \cdot y^2 + 7.063e^{-04} \cdot x \cdot y^3 - 0.138 \cdot y^4$

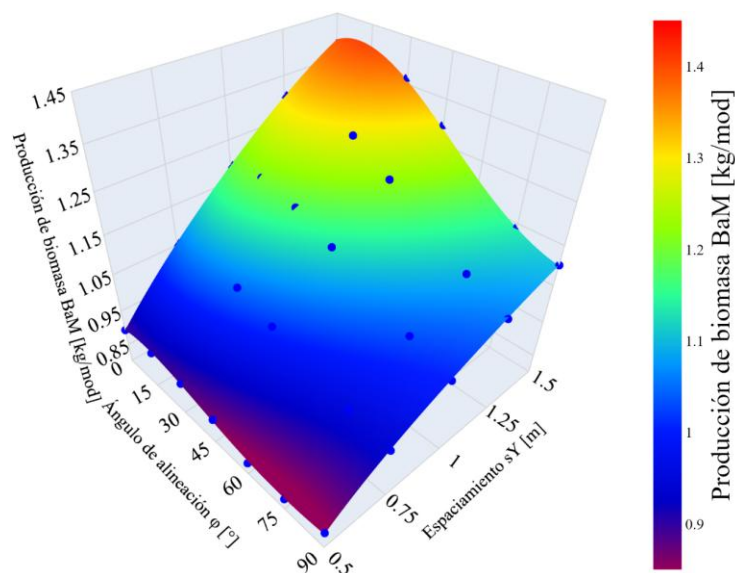


Figura 31. Superficie de ajuste con el polinomio de grado 3 para el cálculo de la producción de biomasa ajustada (Ba_{Ma}) en un módulo de FBRs. Fuente: Elaboración propia.

4.4.2. Optimización paramétrica en Python

El algoritmo de optimización mediante Evolución Diferencial [72] se ejecutó con un límite de 1,000 iteraciones para garantizar una exploración amplia del espacio de búsqueda y evitar convergencias prematuras. Sin embargo, el proceso alcanzó la convergencia en apenas 5 iteraciones, mucho antes del límite establecido. Esto evidencia que el problema planteado presentó una superficie de respuesta bien definida y una función objetivo de baja complejidad relativa, lo que permitió al algoritmo encontrar rápidamente una solución óptima. Se utilizó una tolerancia de 10^{-6} en la variación relativa de la función objetivo como criterio de convergencia, asegurando que el proceso de optimización se detuviera únicamente cuando las mejoras entre iteraciones consecutivas fueran insignificantes, lo que confirma la rápida estabilización de la solución. El tiempo computacional total de la optimización fue alrededor de 2 segundos, demostrando la eficiencia del enfoque adoptado. Estos resultados reflejan la efectividad del método de Evolución Diferencial en problemas de optimización geométrica y operacional como el planteado, logrando una alta calidad de solución con un bajo costo computacional. Los resultados de la optimización paramétrica resultante en Python, ha dado que:

- El ángulo de alineación óptimo es 16.13° , aunque este varía ligeramente según el grado del polinomio del ajuste.
- El espaciado óptimo de los FBRs dentro de un módulo es de $0.5m$, esta variable es más clara y no hay diferencia si se cambia el polinomio de ajuste.

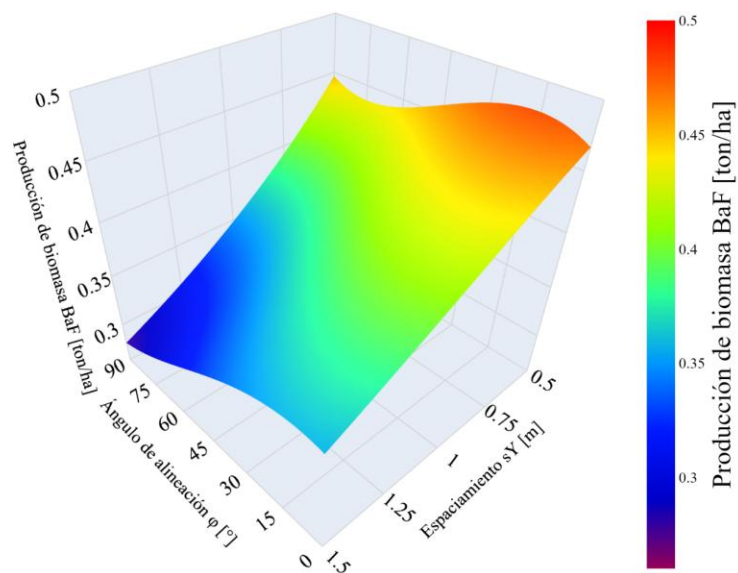


Figura 32. Superficie resultante de la función objetivo con el polinomio de grado 3 para el cálculo de la producción de biomasa (Ba_F) en la granja de FBRs. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la disposición definitiva de la granja de FBRs se establece de la siguiente manera:

- El ángulo de alineación de la granja de FBRs es 16.13°.
- Separación de los FBRs en el eje X es 0.2m.
- La longitud del módulo de FBRs en el eje X es 5.8m.
- La longitud de total de la granja en el eje X es 98.2m.
- La cantidad de módulos en el eje X es de 15módulos.
- Separación de los FBRs en el eje Y es 0.5m.
- La longitud del módulo de FBRs en el eje Y es 2.02m.
- La longitud de total de la granja en el eje X es 97.9m.
- La cantidad de módulos en el eje Y es de 35módulos.
- La cantidad total de módulos en la granja de FBRs es de 525módulos.
- La cantidad total de FBRs en la granja es de 8,400FBRs.

4.5. Cálculos relacionados con la granja de FBRs

Todos los valores presentados en la **sección 4.1.2** tienen como referencia la cantidad total de gases de combustión que fluyen por la chimenea; no obstante, la cantidad de módulos que se pueden instalar en una hectárea es de 525, lo que supone un flujo másico de $2.4556 \frac{kg}{s} \left(212.16 \frac{ton}{día} \right)$. Viéndolo de otra manera, se requerirían 113 hectáreas de módulos de FBRs para procesar la cantidad total de gases de combustión emitidos actualmente por la chimenea. Este número de hectáreas se calculó dividiendo el flujo másico total de gases de combustión de la chimenea entre el flujo másico procesado por una hectárea de FBRs, considerando un espaciamiento de $0.5m$ entre FBRs y una capacidad instalada de 525 módulos por hectárea.

Por otro lado, si se realiza el mismo cálculo utilizando la captura de CO_2 promedio correspondiente del espaciamiento de $0.5m$ y el ángulo de alineación de 15° , el flujo másico de CO_2 capturado es de $0.043 \frac{kg}{s} \left(3.724 \frac{ton}{día} \right)$ por hectárea. Bajo estas condiciones, se requerirían aproximadamente 6490 hectáreas de módulos de FBRs para procesar la totalidad del flujo másico de los gases de combustión emitidos por la chimenea.

En ambos casos, los cálculos consideran:

- El flujo másico de gases de escape calculado a partir de su densidad y volumen de emisión.
- La cantidad de gases procesados o CO_2 capturado por hectárea.
- La relación entre la cantidad total emitida y la capacidad de tratamiento o captura de una hectárea de granja de FBRs.

En la **Tabla 18**, se presenta un resumen del flujo másico para las especies de interés que se procesarían en una hectárea de FBRs. Se debe tener en cuenta que la cantidad de CO_2 procesado es tan solo de un 0.66% de la total emitida por la chimenea [73]. La cantidad de agua líquida que se puede generar al día en el sistema de tuberías es aproximadamente igual a 6 metros cúbicos. Lo anterior da cuenta de la necesidad de instalar sistemas de evacuación del agua para evitar un mal funcionamiento del sistema de distribución de gases y para aumentar la concentración del CO_2 en los gases de combustión que ingresarían a los FBRs. Otra forma de aumentar la fracción de CO_2 en los gases es disminuir el %EA, el cual, según la **Tabla 12**, alcanza niveles de hasta 180%. Para este tipo de hornos, son recomendados %EA entre 40 y 60 [74].

Tabla 18. Flujo másico de especies de interés por hectárea. Fuente: Elaboración propia.

Descripción	Sigla	Valor	Unidad	Valor	Unidad
Flujo másico de CO_2	\dot{m}_{CO_2}	0.43315	$\frac{kg}{s}$	37.42	$\frac{ton}{día}$
Flujo másico de SO_2	\dot{m}_{SO_2}	1.48×10^{-3}	$\frac{kg}{s}$	0.13	$\frac{ton}{día}$
Flujo másico de H_2O	\dot{m}_{H_2O}	0.14216	$\frac{kg}{s}$	12.28	$\frac{ton}{día}$

4.6. Diseño de la red de distribución de gases

A partir de la selección del espaciamiento óptimo ($s_{Y_{opt}}$) de $0.5m$ y el ángulo de alineación óptimo (φ_{opt}) de 16.13° (obtenidos mediante la optimización paramétrica explicada en la **sección 4.4**), se define la organización espacial de los módulos de FBRs dentro del área disponible de una hectárea.

Cada módulo está compuesto por 16FBRs, y la distribución propuesta contempla la organización de los módulos de la siguiente manera:

- 15módulos de FBRs en sentido este-oeste por fila.
- 35módulos de FBRs en sentido norte-sur por columna.

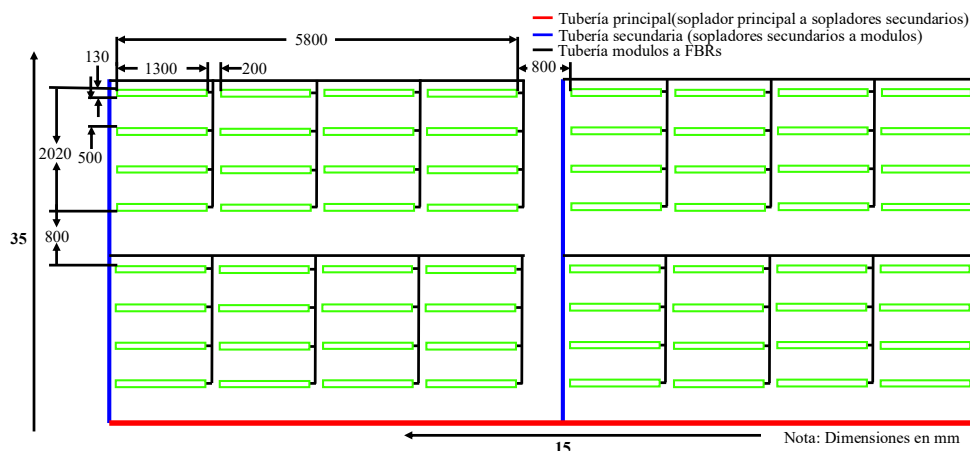


Figura 33. Vista de planta de la distribución espacial de los módulos y de la red de gases. Fuente: Elaboración propia.

La distribución espacial se puede apreciar en la **Figura 33**. Esto resulta en un total de 525módulos y 8,400FBRs instalados en la granja. La densidad obtenida es de 0.84FBRs por metro cuadrado; esta se calculó con base en el número total de FBRs y el área disponible para su instalación. Esta densidad asegura que el terreno se utiliza de manera eficiente, maximizando el espacio sin comprometer la captación de luz solar, lo cual es esencial para el crecimiento de las microalgas. Cabe aclarar que esta distribución se propone

a partir de los resultados de las simulaciones y al diseño de experimentos (DOE), los cuales se explicaron en la **sección 4.4**.

4.6.1. Efecto de la configuración de los módulos de FBRs

La influencia de la distribución de los FBRs es fundamental, dado que, dependiendo de la configuración de un módulo, se pueden observar diversas variaciones, tales como aumentos en las pérdidas, así como variaciones en los costos de construcción. El propósito de esta sección es analizar el comportamiento de las pérdidas de presión de cada configuración en función del flujo de gases. Para ello, se elaboraron gráficos que facilitan la comparación de las diversas configuraciones, lo que finalmente ayudará a determinar la potencia del soplador requerida para cada módulo.

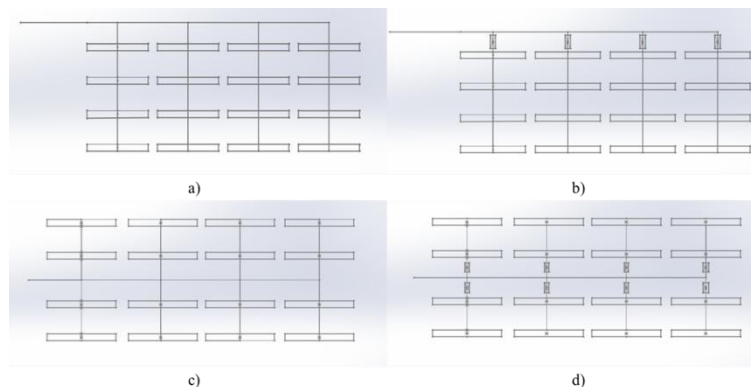


Figura 34. Red de tubería de configuración abierta. a) simple; b) simple con reducción; c) ramificado; d) ramificado con reducción. Fuente: Elaboración propia.

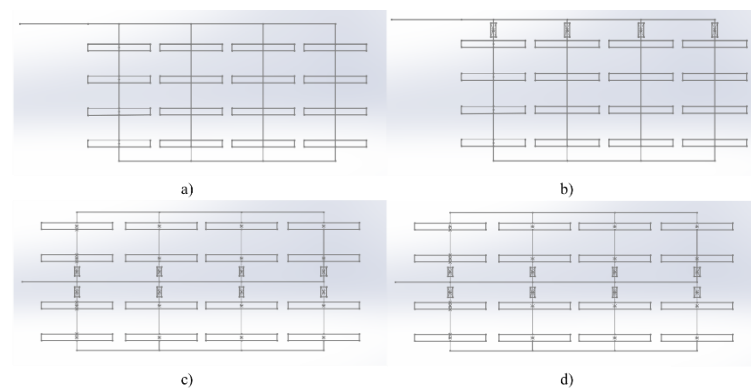


Figura 35. Red de tubería de configuración cerrada. a) simple; b) simple con reducción; c) ramificado; d) ramificado con reducción. Fuente: Elaboración propia.

Las configuraciones analizadas para una red abierta, **Figura 34** y cerrada, **Figura 35** son las siguientes:

- Tubería de $2\frac{1}{2}$ in con reducción a 2 in.

- Tubería de $2\frac{1}{2}in$ con reducción a $1\frac{1}{2}in$.
- Tubería de $2\frac{1}{2}in$ con reducción a $1in$.
- Tubería de $2\frac{1}{2}in$.
- Tubería de $2in$.
- Tubería de $1in$.

Tras realizar los cálculos pertinentes, se obtienen las gráficas correspondientes de caída de presión en función del caudal para cada módulo. Tal como se muestra en la **Figura 36a**, la pérdida de presión en la tubería de $1in$ incrementa significativamente a medida que aumenta el flujo de gases. Este fenómeno sugiere que dicha tubería debería ser descartada, puesto que la potencia del soplador necesaria para mitigar esta pérdida sería considerablemente alta comparada con otros tamaños de tuberías o con aquellas que presentan reducciones. Se debe tener en cuenta que, aunque el flujo de gases necesario para cada módulo es de $2.67\frac{l}{s}$, en operación real, el flujo suministrado por el soplador debe ser ligeramente superior, a fin de garantizar la presión de trabajo ($7psi_g$) para cada FBR.

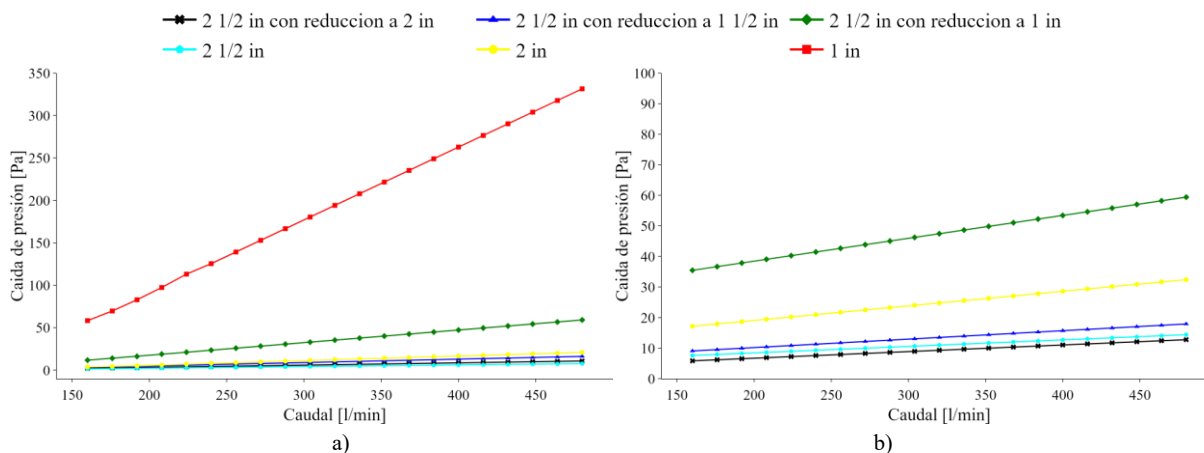


Figura 36. Resultados de caudal vs caída de presión para la red de tubería en configuración abierta. a) simple; b) ramificada. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se puede observar que, aunque la tubería de $2\frac{1}{2}in$, con reducción a $1in$, muestra una diferencia con relación a los demás diámetros usados, esta se mantiene dentro en niveles fácilmente manejables. Al comparar los resultados de la configuración abierta con la configuración cerrada, se observan

comportamientos muy similares, lo que sugiere que el tipo de configuración no condiciona significativamente los resultados. Sin embargo, se nota que cuando el módulo tiene una configuración cerrada, los valores de las pérdidas de presión disminuyen ligeramente.

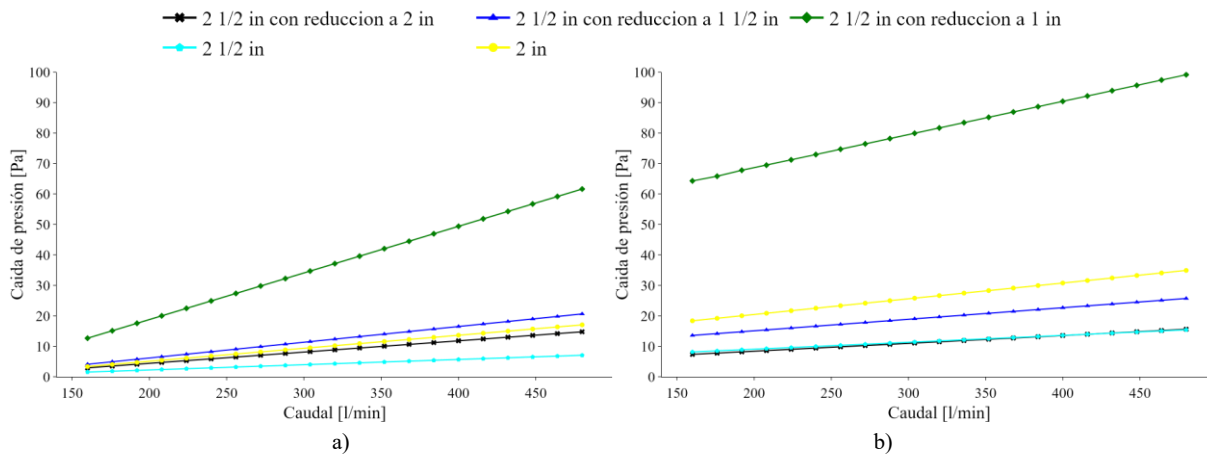


Figura 37. Resultados de caudal vs caída de presión para la red de tubería en configuración cerrada. a) simple; b) ramificada. Fuente: Elaboración propia.

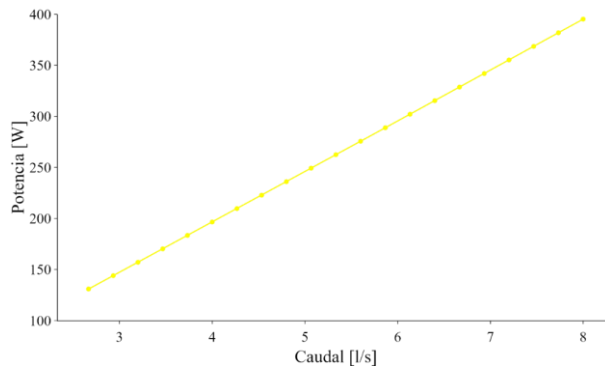


Figura 38. Caudal vs potencia para la red de tubería de 2" en configuración abierta. Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 38**, se observa que el comportamiento hidráulico es prácticamente idéntico entre las distintas configuraciones, sin una variación significativa atribuible a los diferentes diámetros de tubería analizados. Por esta razón, y dado que las curvas correspondientes se superponen casi por completo, en la figura se presenta únicamente la curva para una de las configuraciones ($\varnothing = 2''$), con el fin de facilitar la visualización. Para suministrar el caudal necesario para cada módulo ($2.67 \frac{l}{s}$), la caída de presión es, para todas las configuraciones y para la mayoría de los diámetros, alrededor de $15 Pa$; mientras que la potencia necesaria es cercana a los $150W$.

4.6.2. Efecto de las cargas de presión, flujo y fricción

Tal como se indicó previamente, la **Figura 38** exhibe un comportamiento muy similar entre sí. En consecuencia, se llevó a cabo un análisis comparativo de cada una de las cargas que intervienen en el cálculo de la potencia requerida por el soplador. Se hicieron diferentes gráficas donde se compararon las cargas debidas a la presión estática ($\frac{p}{\gamma}$), al flujo ($\frac{v^2}{2g}$) y a la fricción (H_{LT}) en las diferentes configuraciones de los módulos.

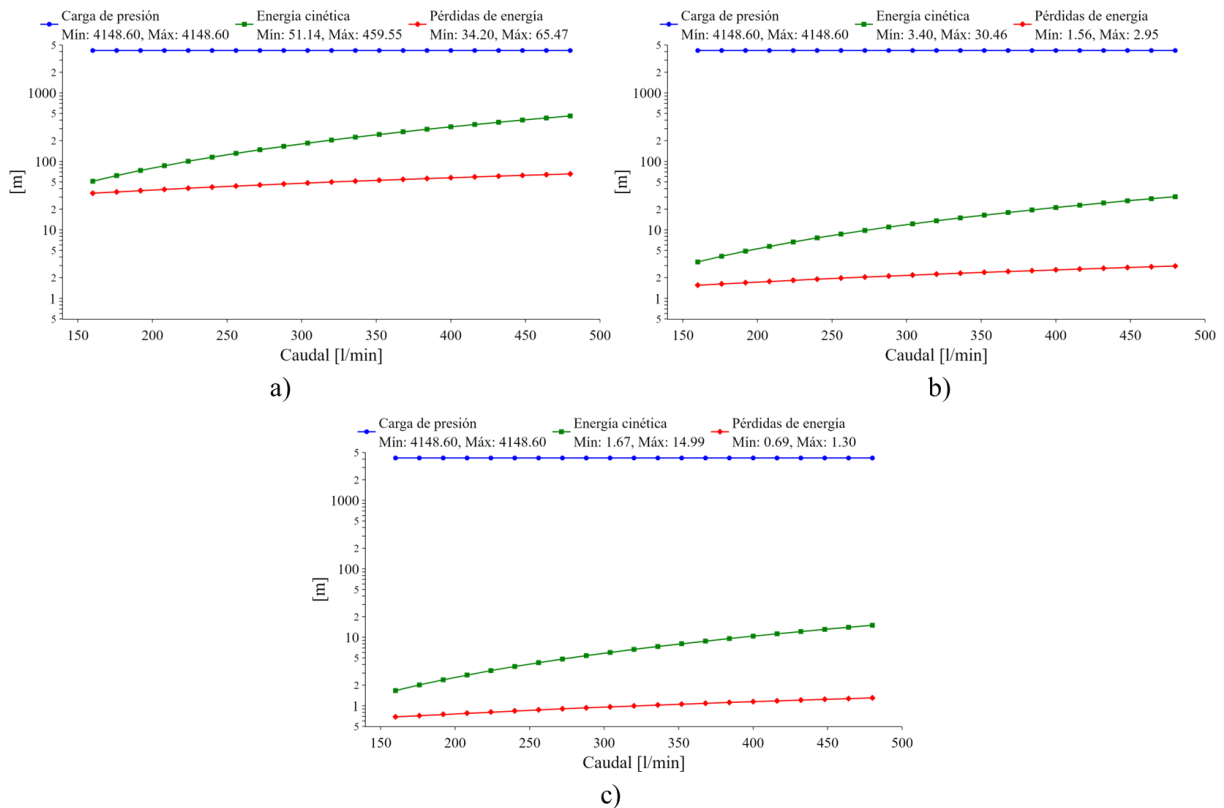


Figura 39. Configuración ramificada abierta. a) 1"; b) 2"; c) 2 1/2". Fuente: Elaboración propia.

. Comparando las diferentes gráficas, véase la **Figura 39** y **Figura 40**, se puede ver que la carga debida a la presión es indiferente del flujo, de la configuración y del diámetro de la tubería utilizado. Para casi todos los diámetros y configuraciones representa la máxima carga que debe suplir el soplador, alrededor de 4000 metros de altura de gases.

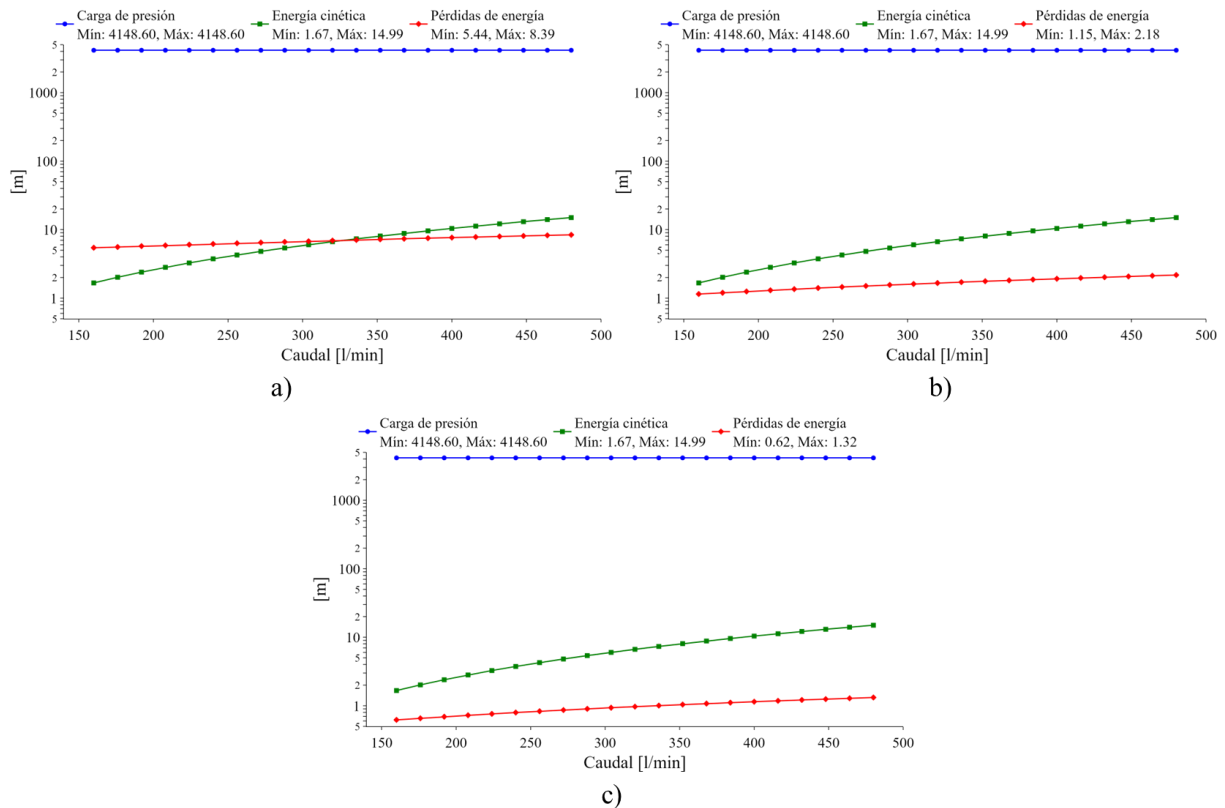


Figura 40. Configuración ramificada abierta. a) 2 1/2" a 1"; b) 2 1/2" a 1 1/2"; c) 2 1/2" a 2". Fuente: Elaboración propia.

Tanto la carga por flujo y por fricción son dependientes del caudal, de la configuración y del diámetro de la tubería. En general se tiene que a mayor caudal mayor es la carga, a mayor diámetro menor es la carga por flujo y por fricción, siendo, casi siempre, mayor la carga por flujo. Y cuando se tiene una configuración que considera reducciones en tamaño, la carga por flujo se mantiene constante mientras que la carga por fricción aumenta. Esto último debido a los menores tamaños de tubería y a la adición de un accesorio de reducción más. Considerando el análisis anterior, se puede decir que una configuración abierta con un diámetro constante de 2 in logra un compromiso entre rendimiento energético y tamaño de tubería (gasto de inversión).

4.6.3. Cálculos para la granja de FBRs

Tomando en consideración las especificaciones técnicas referentes a las distancias de los FBRs, así como los requisitos operacionales previamente establecidos, el cálculo para el proyecto completo se presenta en esta sección, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Número total de módulos: 525.

- Número de FBRs por módulo: 16.
- Flujo mínimo requerido por un FBR: $10 \frac{l}{min}$.
- Presión de operación: $7psi$
- Temperatura de operación: $36^{\circ}C$.

Con base en estos datos, es posible establecer los requerimientos específicos del sistema, los cuales se presentan a continuación.

4.6.3.1. *Flujo total requerido en la granja*

A partir del flujo mínimo requerido por un FBR, el número de FBRs por módulo y el número total de módulos, el flujo total requerido es:

$$16 * 10 \frac{l}{min} * 525 \text{ modulos} = 84,000 \frac{l}{min}$$

4.6.3.2. *Dimensión de la tubería*

- **Tubería principal:** Es la tubería que lleva los gases de combustión desde el soplador hasta cada una de las redes secundarias. El diámetro propuesto es de 6 in.
- **Tubería secundaria:** Esta tubería se desvía de la tubería principal, donde adopta distintos caminos o ramificaciones, proporcionando así los gases de combustión a los módulos. Para estas tuberías se propone un diámetro de 4 “.
- **Tubería terciaria (del módulo):** La red de tuberías en cada módulo tienen un diámetro de 2 in.

4.6.3.3. *Pérdidas de presión consideradas*

- Pérdidas de presión en tubería principal.
- Pérdidas de presión en tubería secundaria.
- Perdidas de presión en el módulo.

4.6.3.4. *Análisis de pérdidas de presión*

El cálculo de la caída de presión que debe soportar el soplador para toda la granja se realiza considerando distintos diámetros de tubería para la red principal y la secundaria. El diseño de la red asegura que los gases de combustión provenientes del cuarto de sopladores ingresen a la tubería principal en la octava ramificación (ver **Figura 41**), garantizando así que la presión y el flujo sean suficientes para satisfacer las necesidades de todos los módulos de FBRs en el sistema.

El esquema para la red de distribución de gases en un módulo de FBRs y para toda la granja se presenta en la **Figura 41** y **Figura 42**, respectivamente. Con base en esta configuración, se realizan los cálculos de caídas de presión y costos de materiales. El análisis para la caída de presión dentro del módulo se presentó en la **Figura 36**, mientras que la potencia necesaria para el módulo, determinada por el suministro adicional requerido por el soplador, se detalló en la **Figura 38** para el caso de la tubería de 2".

En la **Figura 43a** presenta la caída de presión generada en la red principal a lo largo de las 15 ramificaciones (tuberías principales), considerando distintos diámetros propuestos para esta sección de la red. En este caso, el soplador está ubicado en la octava ramificación de la red principal, lo que explica el comportamiento de las presiones en los extremos. Cualquier modificación a esta propuesta, requiere la realización de nuevos cálculos para validar su aplicabilidad.

Por otro lado, en la **Figura 43b**, se muestra la caída de presión a lo largo de las 35 ramificaciones (tuberías secundarias), considerando las pérdidas provocadas por los módulos instalados en cada ramificación y evaluando diferentes diámetros de tubería.

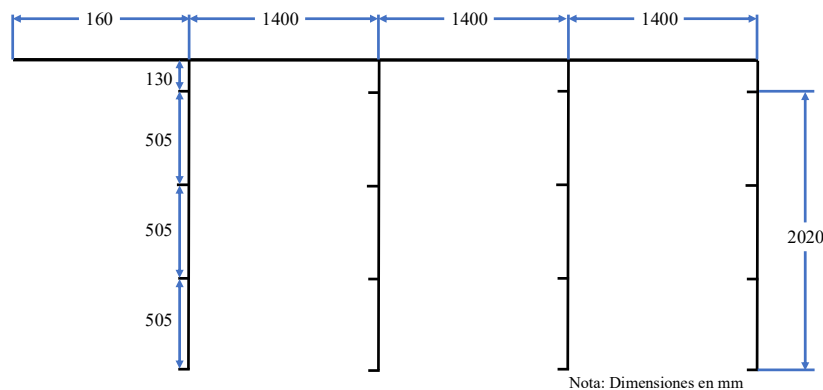


Figura 41. Distribución de FBRs en un módulo. Fuente: Elaboración propia.

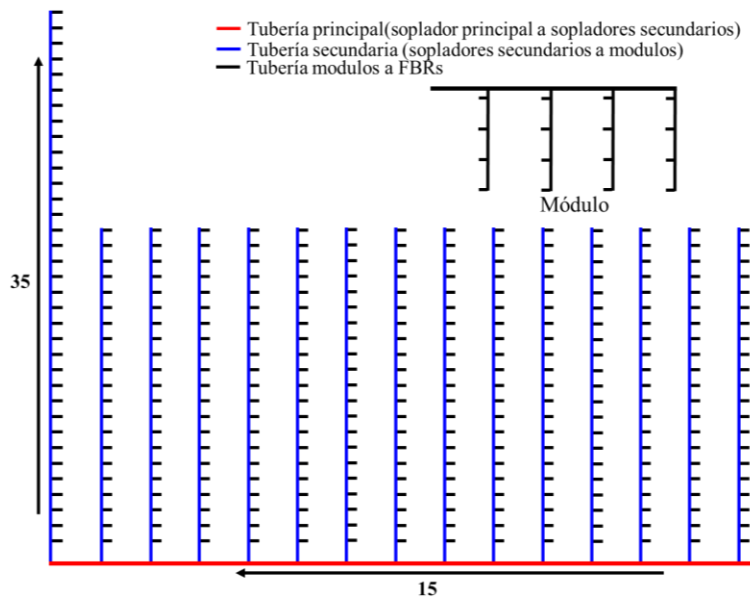


Figura 42. Red de distribución de gases en la granja de FBRs. Fuente: Elaboración propia.

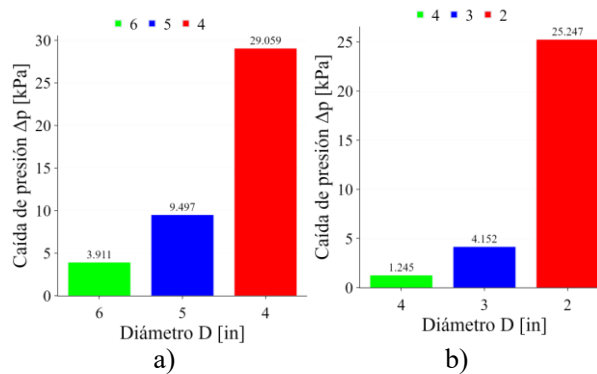


Figura 43. Caída de presión en tuberías. a) Tubería principal; b) tubería secundaria. Fuente: Elaboración propia.

La diferencia de presiones en las redes principal y secundaria se calcula con la siguiente ecuación:

$$\Delta p = p_i - p_f \tag{74}$$

La presión inicial (p_i) considerada para los cálculos de la red primaria y secundaria es de 48,000 Pa (7 psi_g).

La elección de los diámetros de tubería para las redes principal y secundaria se realizó con base en criterios de eficiencia hidráulica y viabilidad económica. Se seleccionaron dimensiones que permitieran minimizar las pérdidas de presión, garantizar un flujo adecuado para el suministro de gases de combustión a todos los módulos de FBRs y optimizar los costos asociados a materiales y operación del sistema.

4.6.3.5. *Justificación de la selección de diámetros*

- Tubería de 6 pulgadas (red principal):
 - Este diámetro fue seleccionado para la red principal, ya que transporta el flujo desde el soplador hacia las ramificaciones secundarias.
 - Un diámetro más pequeño generaría caídas de presión significativas debido al alto flujo que se maneja en esta sección.
 - Un diámetro mayor reduciría las caídas de presión, pero incrementaría de forma significativa el costo de los materiales, resultando económicamente inviable para el proyecto.
- Tubería de 4 pulgadas (red secundaria):
 - Este diámetro intermedio permite distribuir el flujo hacia los módulos de FBRs en cada ramificación, reduciendo las pérdidas de presión en comparación con un diámetro más pequeño.
 - Se garantiza que el flujo se mantenga constante en cada ramificación, balanceando la eficiencia hidráulica y el costo de implementación.
- Tubería de 2 pulgadas (dentro de cada módulo):
 - Dentro de los módulos de FBRs, los caudales son menores y las tuberías de menor diámetro resultan adecuadas para mantener la presión necesaria en cada módulo, optimizando los costos.
- Además, la **Tabla 19** se muestra la caída de presión totales para la red principal, las redes secundarias y las tuberías dentro del módulo según los diámetros seleccionados:

Tabla 19. Caídas de presión en el sistema de tuberías. Fuente: Elaboración propia.

Elemento	Numero de redes de transporte	Caída de presión	Caída de presión total
Tubería principal	1	3.911	3.911
Tubería secundaria	15	1.245	18.675
Tubería del módulo	525	0.003	1.575
Sumatoria	—	—	24.161 (3.5 psi)

4.6.3.6. *Relación entre presión y cantidad de módulos*

La presión en la red de distribución aumenta a medida que se incrementa el número de módulos debido a los siguientes factores:

- **Resistencia adicional al flujo:** Cada módulo añade resistencia al flujo en forma de pérdidas de presión (locales y por fricción), lo que incrementa el esfuerzo requerido por el soplador para mantener el flujo. Las pérdidas acumuladas a lo largo de la red se suman, provocando una caída de presión mayor en los tramos finales.
- **Demanda de flujo creciente:** A medida que se añaden más módulos, aumenta el caudal requerido para satisfacer las necesidades de todos los módulos de FBRs, generando un mayor diferencial de presión en la red.
- **Impacto de los diámetros seleccionados:** Aunque los diámetros seleccionados minimizan las caídas de presión dentro de los límites establecidos, un aumento significativo en el número de módulos incrementa la longitud efectiva de la red y, por ende, las pérdidas de carga totales.

4.6.3.7. *Costos de fabricación de la red*

A partir de los análisis anteriores, se determinan los materiales específicos necesarios para la construcción de la red de distribución, comenzando con el costo de fabricación de cada módulo. En la **Tabla 20**, se presenta el inventario general de la tubería y los accesorios requeridos para construir la red para un módulo de FBRs, con sus respectivos costos, teniendo en cuenta que estos precios comerciales estimados corresponden al 2024 e incluye únicamente materiales, sin mano de obra ni transporte.

Tabla 20. *Resumen de tuberías de PVC y accesorios necesarios para un módulo de FBRs. Fuente: Elaboración propia.*

Elemento	Metros de Tubería	Accesorios	Valor Unitario (COP)	Valor Total (COP)
Tuberías	14.4	-	\$ 99,802	\$ 199,604
Codos	-	5	\$ 4,434	\$ 22,170
"T"	-	15	\$ 9,045	\$ 135,675
Total				\$ 357,449

Posteriormente, los cálculos se amplían a toda la granja, cuyos resultados se presentan en la **Tabla 21** y **Tabla 22**.

Tabla 21. Costos de tuberías de PVC para la granja. Fuente: Elaboración propia.

Descripción	Valor unitario (COP)	Longitud total	Cantidad	Costo total (COP)
Tubería de 6"	\$439,926	100	17	\$7,478,742
Tubería de 4"	\$209,648	1500	250	\$52,412,000
Tubería de 2"	\$99,802	7560	1,260	\$125,750,520

Notas: Las tuberías se venden por tramos de 6m.

Tabla 22. Costos de accesorios para la granja. Fuente: Elaboración propia.

Descripción	Valor unitario (COP)	Cantidad	Costo total (COP)
Codo 6 in	\$151,167	2	\$302,334
Codo 4 in	\$22,017	15	\$330,255
Codo 2 in	\$4,434	2625	\$11,634,750
T 6 in	\$214,802	13	\$2,792,426
T 4 in	\$23,655	480	\$11,354,400
T 2 in	\$9,045	7875	\$71,229,375
Reducción de 6" a 4"	\$40,500	15	\$607,500
Reducción de 4" a 2"	\$17,600	525	\$9,240,000

El costo total estimado para la red, teniendo en cuenta las tuberías y los accesorios es de: \$293,489,751COP

4.6.3.8. *Soplador seleccionado*

Para determinar el tipo de soplador necesario, es esencial considerar la caída de presión en todo el sistema de distribución. Esto requiere realizar una suma de las pérdidas en toda la granja, asumiendo las pérdidas menores para las tuberías de 6" (red principal), de 4" (red secundaria) y de 2" (red de cada módulo). Esto se presentó en la **Tabla 19**. Con base en el presente análisis, se pueden establecer las características requeridas para el soplador de la siguiente manera:

- Una presión de 10.5 psi_g es requerida, considerando los 7 psi_g necesarios inicialmente más los 3.5 psi_g adicionales que deben ser suministrados para mantener la presión en 7 psi_g en todos los FBRs. En otras palabras, estos 3.5 psi_g representan las pérdidas de presión a lo largo de toda la hectárea. Se pueden considerar otros 3 psi_g por factor de seguridad.
- Suministro de un caudal de 84,000 l/min .
- Se recomienda la instalación de dos sopladores en paralelo. Esta configuración estratégica permitirá aumentar el caudal total mientras se mantiene la presión de los 10.5 psi_g . Al operar en paralelo,

cada soplador contribuirá a movilizar el fluido requerido sin sobrecargar uno solo, facilitando el manejo de grandes volúmenes de flujo.

4.6.1. *Costos de operación de la red*

En cuanto a los costos operativos, los cálculos efectuados permiten asegurar la cantidad de potencia necesaria para alimentar un módulo de FBRs:

A modo de ilustración, para un módulo abierto que transporta un caudal de $2.67 \frac{l}{s}$ con un diámetro de 2", y de acuerdo con los cálculos realizados, se ha determinado que la potencia requerida para dicho módulo es de 180 W. Así, se puede estimar un gasto mensual aproximado por módulo, de la siguiente manera:

$$\text{Costo (COP)} = \text{Potencia [kW]} * \text{horas [h]} * \text{Valor energía} \left[\frac{\text{COP}}{\text{kWh}} \right] \quad (75)$$

Por lo tanto, considerando una operación de $24 \frac{\text{horas}}{\text{día}}$, $30 \frac{\text{días}}{\text{mes}}$ y el precio de la energía eléctrica de $\$ 1,095 \frac{\text{COP}}{\text{kWh}}$, el costo mensual sería:

$$\text{Costo} = 0.180 * (24h * 30) * \$ 1,095 = \$ 141,912 \frac{\text{COP}}{\text{mensual} * \text{módulo}}$$

Al expandir esto a una escala mayor, específicamente en la granja de FBRs, en donde es posible ubicar hasta 525 módulos de FBRs en la hectárea disponible, se puede inferir que el gasto mensual puede ascender hasta los $\$ 74,503,800 \frac{\text{COP}}{\text{mensuales}}$

5. CONCLUSIONES

El estudio permitió diseñar y optimizar un sistema de distribución de gases de combustión para una granja de fotobiorreactores (FBRs) en la planta de Cementos Argos en Cartagena, asegurando su eficiencia tanto en la captación de CO_2 como en la producción de biomasa microalgal.

La metodología implementada, basada en simulaciones CFD acopladas a radiación solar y optimización paramétrica mediante Evolución Diferencial, demostró ser eficaz para alcanzar este objetivo con alta precisión y bajo costo computacional.

La optimización del diseño de la granja de FBRs determinó que un espaciamiento de $0.5m$ y una alineación de 16.13° respecto al norte geográfico maximizan la captación de irradiancia, aumentando así la eficiencia fotosintética de las microalgas.

Con esta configuración, se logra una producción teórica de biomasa de aproximadamente $173.52ton$ por hectárea al año, y una captura de CO_2 estimada de alrededor de $254.49ton$ de CO_2 por hectárea al año.

En cuanto a la infraestructura, la distribución espacial propuesta contempla $15módulos$ de FBRs en sentido este-oeste y $35módulos$ en sentido norte-sur, totalizando $525módulos$ y $8,400FBRs$ en la granja. La densidad obtenida de $0.84FBRs/m^2$ maximiza el uso del terreno disponible sin comprometer la captación solar.

Respecto al diseño de la red de distribución de gases, se estableció que una configuración con tuberías de $2''$ en los módulos y $4''$ en la red principal minimiza las pérdidas de presión y garantiza un flujo de CO_2 estable y eficiente.

La evaluación de alternativas de sopladores indicó que una configuración en paralelo es la más adecuada, permitiendo una distribución homogénea del gas sin comprometer la eficiencia energética.

En términos económicos, se estimó que el costo total de la red de distribución de gases (incluyendo solo tuberías y accesorios) para una hectárea de cultivo asciende a aproximadamente $\$293,489,751COP$, según precios comerciales estimados para el año 2024. Este valor considera únicamente los materiales, sin incluir mano de obra ni transporte.

Por otro lado, en cuanto a los costos de operación, el análisis del consumo eléctrico para $525módulos$ de FBRs operando de forma continua (24 horas al día) con una potencia de $180W$ por módulo, y un costo

unitario de energía de $\$1,095 \frac{COP}{kWh}$, permite estimar un gasto mensual de $\$74,503,800COP$, equivalente a un costo anual de $\$894,045,600COP$ solo en energía eléctrica.

A una tasa de cambio de referencia de $1USD = 4,000COP$, esto representa aproximadamente:

- $\$73,372USD$ por la inversión en la red de distribución.
- $\$223,511USD$ por consumo energético anual.

Estos valores reflejan que, además de su viabilidad técnica, la implementación de FBRs representa una estrategia económicamente factible para la valorización de gases residuales en la industria cementera.

El análisis de la influencia de la radiación solar confirmó que la distribución óptima de los FBRs depende de la variabilidad estacional. Se observó que las alineaciones cercanas a 0° y 15° proporcionan una distribución más uniforme de la luz solar a lo largo del día, favoreciendo la eficiencia fotosintética.

La metodología desarrollada en este trabajo no solo es aplicable a la industria cementera, sino que puede extenderse a otros sectores que busquen integrar tecnologías biotecnológicas para la captura de carbono y producción de bioproductos.

La combinación de estrategias de optimización geométrica, modelado CFD, y energías renovables constituye un paso importante hacia la sostenibilidad ambiental y la transición hacia una economía circular.

Finalmente, este proyecto demuestra que la captura de CO_2 mediante fotobiorreactores es una alternativa viable, eficiente y replicable para reducir emisiones industriales, contribuyendo de forma significativa a la mitigación del cambio climático.

6. TRABAJOS FUTUROS

A partir de la metodología desarrollada, se identifican varias líneas de trabajo que permitirían ampliar el alcance de este estudio y mejorar su aplicabilidad práctica:

- Inclusión de algoritmos de inteligencia artificial (IA) para predecir el comportamiento del sistema CFD, con el objetivo de reducir significativamente los tiempos de simulación en las fases de diseño y optimización.
- Implementación de un software o interfaz computacional que sistematice toda la metodología presentada en esta tesis, facilitando su uso en otros proyectos académicos o industriales.
- Aplicación de la metodología en otras regiones geográficas alejadas de la línea ecuatorial, con el propósito de evaluar el impacto de la variabilidad solar estacional sobre la captación de irradiancia y la productividad algal.
- Una línea de investigación con gran potencial consiste en desarrollar simulaciones CFD del interior de los FBRs, que complementen el análisis externo realizado. Este enfoque permitiría estudiar con mayor detalle los procesos internos que afectan el crecimiento de microalgas:
 - La hidrodinámica del flujo, para identificar zonas muertas o de mezcla insuficiente y optimizar el diseño del sistema de agitación o circulación.
 - La transferencia de masa y calor, con el objetivo de garantizar una distribución homogénea de nutrientes y temperatura dentro del medio de cultivo.
 - La distribución de luz en el medio líquido, considerando la atenuación por biomasa y el índice de refracción del material, factores clave para la eficiencia fotosintética.

Para abordar esta línea, se propone utilizar herramientas como Altair® SimLab®, integrando modelos acoplados de radiación, turbulencia, transferencia de calor y crecimiento biológico, con el fin de obtener una visión integral del comportamiento de los FBRs y establecer estrategias de optimización más precisas bajo condiciones reales de operación.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. M. Miranda, F. Hernandez-Tenorio, D. Ocampo, G. J. Vargas, y A. A. Sáez, “Trends on CO2 Capture with Microalgae: A Bibliometric Analysis”, *Molecules*, vol. 27, núm. 15, Art. núm. 15, ene. 2022, doi: 10.3390/molecules27154669.
- [2] DANE, *Boletín Técnico Estadísticas de Cemento Gris (ECG) Enero 2023*.
- [3] “Hydraulic Cement Production by Country (Thousand metric tons)”. Consultado: el 9 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.indexmundi.com/minerals/?product=cement&graph=production>
- [4] “Fitch Affirms Cements Argos Ratings in ‘AA(col)’; Outlook Positive”. Consultado: el 30 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.fitchratings.com/research/es/corporate-finance/fitch-affirms-cements-argos-ratings-in-aa-col-outlook-positive-09-05-2023>
- [5] L. Rodgers, “La enorme fuente de emisiones de CO2 que está por todas partes y que quizás no conocías”, <https://www.bbc.com/>. Consultado: el 9 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783>
- [6] A. M. Miranda, F. Hernandez-Tenorio, D. Ocampo, G. J. Vargas, y A. A. Sáez, “Trends on CO2 Capture with Microalgae: A Bibliometric Analysis”, *Molecules*, vol. 27, núm. 15, Art. núm. 15, ene. 2022, doi: 10.3390/molecules27154669.
- [7] O. Pulz, “Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms”, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 57, núm. 3, pp. 287–293, oct. 2001, doi: 10.1007/s002530100702.
- [8] Y. Chisti, “Biodiesel from microalgae”, *Biotechnol. Adv.*, vol. 25, núm. 3, pp. 294–306, 2007, doi: 10.1016/j.biotechadv.2007.02.001.
- [9] P. Ruiz-Ruiz, A. Estrada, y M. Morales, “Chapter 8 - Carbon dioxide capture and utilization using microalgae”, en *Handbook of Microalgae-Based Processes and Products*, E. Jacob-Lopes, M. M. Maroneze, M. I. Queiroz, y L. Q. Zepka, Eds., Academic Press, 2020, pp. 185–206. doi: 10.1016/B978-0-12-818536-0.00008-7.
- [10] E. M. Grima, F. G. Acien Fernandez, F. Garcia Camacho, y Y. Chisti, “Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup”, *J. Biotechnol.*, 1999, Consultado: el 30 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Photobioreactors%3A+light+regime%2C+mass+transfer%2C+and+scaleup&author=Grima%2C+E.M.&publication_year=1999
- [11] J. van Beilen, “Why microalgae won’t save the internal combustion machine”, *Biofuels Bioprod. Biorefining*, vol. 4, pp. 41–52, ene. 2010, doi: 10.1002/bbb.193.
- [12] P. Bhosale, “Environmental and cultural stimulants in the production of carotenoids from microorganisms”, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 63, núm. 4, pp. 351–361, ene. 2004, doi: 10.1007/s00253-003-1441-1.
- [13] S. Turrado Fernández, “Desarrollos de nuevos procesos de captura de CO2 con CaO en cementeras”, 2019, Consultado: el 9 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/226902>
- [14] Grupo Argos, “ARGOS-Reporte TCFD 2022”. [En línea]. Disponible en: <https://argos.co/wp-content/uploads/2022/05/CDP-Cambio-Climatico-Argos-2021-1.pdf>
- [15] H. Ritchie, M. Roser, y P. Rosado, “CO2 and Greenhouse Gas Emissions”, *Our World Data*, may 2020, Consultado: el 21 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>
- [16] FICEM y PROCEMCO, *Hoja de Ruta Colombia Industria del Cemento*. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://procem.co/pdf/hoja-de-ruta/hr-colombia-final-11032021.pdf>

- [17] E. Sierra, F. G. Ación, J. M. Fernández, J. L. García, C. González, y E. Molina, “Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae”, *Chem. Eng. J.*, vol. 138, núm. 1, pp. 136–147, may 2008, doi: 10.1016/j.cej.2007.06.004.
- [18] J.-W. Zijffers, M. Janssen, J. Tramper, y R. Wijffels, “Design Process of an Area-Efficient Photobioreactor”, *Mar. Biotechnol. N. Y. N.*, vol. 10, pp. 404–15, jul. 2008, doi: 10.1007/s10126-007-9077-2.
- [19] J. A. Guayara Artunduaga, “Producción de biomasa microalgal en fotobiorreactores tubulares al aire libre utilizando fertilizantes como medio de cultivo.”, may 2019, Consultado: el 14 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76275>
- [20] A. Herrera, M. D. Fernández, E. Rengifo, y W. Tezara, “Efecto de la concentración elevada de co2 sobre la fotosíntesis en especies tropicales”, *Interciencia*, vol. 26, núm. 10, pp. 469–471, oct. 2001.
- [21] L. Martínez García, “Eliminación de CO2 con microalgas autóctonas”, <http://purl.org/dc/dcmitype/Text>, Universidad de León, 2009. Consultado: el 9 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://buleria.unileon.es/bitstream/handle/10612/1414/2008ONMART%25CDNEZ%20GARC%25CDA%2C%20LORENA.pdf?sequence=1>
- [22] C. C. de Seguridad (CCS), “Guía del sistema de seguridad, salud en el trabajo y ambiente para contratistas RUC®”. 2020. [En línea]. Disponible en: https://ccs.org.co/wp-content/uploads/2020/01/OAUPE009_GUÍA-DEL-SISTEMA-DE-SEGURIDAD-SALUD-EN-EL-TRABAJO-Y-AMBIENTE-PARA-CONTRATISTAS-RUC®-_Rev18.pdf
- [23] A. Brown, C. Eickhoff, J. E. A. Reinders, I. Raben, M. Spruijt, y F. Neele, “IMPACTS: Framework for Risk Assessment of CO2 Transport and Storage Infrastructure”, *Energy Procedia*, vol. 114, pp. 6501–6513, jul. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1786.
- [24] A. Hernández-Pérez y J. I. Labbé, “Microalgas, cultivo y beneficios”, *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.*, vol. 49, núm. 2, pp. 157–173, ago. 2014, doi: 10.4067/S0718-19572014000200001.
- [25] K. E. Dickinson *et al.*, “Photosynthetic conversion of carbon dioxide from cement production to microalgae biomass”, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, sep. 2023, doi: 10.1007/s00253-023-12769-w.
- [26] D. T. Mohler, M. H. Wilson, Z. Fan, J. G. Groppo, y M. Crocker, “Beneficial Reuse of Industrial CO2 Emissions Using a Microalgae Photobioreactor: Waste Heat Utilization Assessment”, *Energies*, vol. 12, núm. 13, Art. núm. 13, ene. 2019, doi: 10.3390/en12132634.
- [27] H. Onyeaka, T. Miri, K. Obileke, A. Hart, C. Anumudu, y Z. T. Al-Sharif, “Minimizing carbon footprint via microalgae as a biological capture”, *Carbon Capture Sci. Technol.*, vol. 1, p. 100007, dic. 2021, doi: 10.1016/j.ccst.2021.100007.
- [28] M. Zieliński, M. Dębowski, J. Kazimierowicz, y I. Świca, “Microalgal Carbon Dioxide (CO2) Capture and Utilization from the European Union Perspective”, *Energies*, vol. 16, p. 1446, feb. 2023, doi: 10.3390/en16031446.
- [29] M. Branco-Vieira, M. P. C. Lopes, y N. Caetano, “Algae-based bioenergy production aligns with the Paris agreement goals as a carbon mitigation technology”, *Energy Rep.*, vol. 8, pp. 482–488, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.01.081.
- [30] M. Carone, G. Frungieri, L. Costamagna, M. Zanetti, M. Vanni, y V. A. Riggio, “Advanced Design and Characterization of a Flat Panel Photobioreactor Equipped with a Customizable Light-Emitting Diode Lighting System”, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 12, núm. 7, pp. 2550–2562, 2024, doi: 10.1021/acssuschemeng.3c05176.
- [31] P. M. Slegers, R. H. Wijffels, G. van Straten, y A. J. B. van Boxtel, “Design scenarios for flat panel photobioreactors”, *Appl. Energy*, vol. 88, núm. 10, pp. 3342–3353, 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.12.037.
- [32] V. Aryai, H. Bajji, M. Mahmoodian, y C.-Q. Li, “Time-dependent finite element reliability assessment of cast-iron water pipes subjected to spatio-temporal correlated corrosion process”, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 197, 2020, doi: 10.1016/j.ress.2020.106802.

- [33] R. Xiao y C. Xiong, “Predictive modeling for gas transmission pipeline failure cause and consequence analysis”, *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 195, 2025, doi: 10.1016/j.psep.2025.106812.
- [34] W. H. Ahmed, M. M. Bello, M. El Nakla, y A. Al Sarkhi, “Flow and mass transfer downstream of an orifice under flow accelerated corrosion conditions”, *Nucl. Eng. Des.*, vol. 252, pp. 52–67, 2012, doi: 10.1016/j.nucengdes.2012.06.033.
- [35] A. Klimanek, M. Cedzich, y R. Białecki, “3D CFD modeling of natural draft wet-cooling tower with flue gas injection”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 91, pp. 824–833, 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.08.095.
- [36] V. Dolganyuk *et al.*, “Microalgae: A Promising Source of Valuable Bioproducts”, *Biomolecules*, vol. 10, núm. 8, p. 1153, ago. 2020, doi: 10.3390/biom10081153.
- [37] A. Bosoaga, O. Masek, y J. E. Oakey, “CO2 Capture Technologies for Cement Industry”, *Energy Procedia*, vol. 1, núm. 1, pp. 133–140, feb. 2009, doi: 10.1016/j.egypro.2009.01.020.
- [38] 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.
- [39] M. Ras, J.-P. Steyer, y O. Bernard, “Temperature effect on microalgae: a crucial factor for outdoor production”, *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 12, núm. 2, pp. 153–164, jun. 2013, doi: 10.1007/s11157-013-9310-6.
- [40] O. Bernard y L.-D. Lu, “Optimal optical conditions for Microalgal production in photobioreactors”, el 23 de agosto de 2021, *arXiv*: arXiv:2108.10009. doi: 10.48550/arXiv.2108.10009.
- [41] H. Endo, H. Moriyama, y Y. Okumura, “Photoinhibition and Photoprotective Responses of a Brown Marine Macroalga Acclimated to Different Light and Nutrient Regimes”, *Antioxidants*, vol. 12, núm. 2, p. 357, feb. 2023, doi: 10.3390/antiox12020357.
- [42] A. Melis, “Solar energy conversion efficiencies in photosynthesis: Minimizing the chlorophyll antennae to maximize efficiency”, *Plant Sci.*, vol. 177, núm. 4, pp. 272–280, oct. 2009, doi: 10.1016/j.plantsci.2009.06.005.
- [43] E. T. Johnson y C. Schmidt-Dannert, “Light-energy conversion in engineered microorganisms”, *Trends Biotechnol.*, vol. 26, núm. 12, pp. 682–689, dic. 2008, doi: 10.1016/j.tibtech.2008.09.002.
- [44] Serrano Bermúdez, “Estudio de cuatro cepas nativas de microalgas para evaluar su potencial uso en la producción de biodiesel”, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2012. Consultado: el 24 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/10636>
- [45] A. Marsh, “SunPath3D - solar geometry tool”. [En línea]. Disponible en: <https://andrewmarsh.com/apps/staging/sunpath3d.html>
- [46] Altair, “Altair SimLab Applications”, Default. Consultado: el 7 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://altair.com/simlab-applications>
- [47] P. Spalart y S. Allmaras, “A one-equation turbulence model for aerodynamic flows”, en *30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, en Aerospace Sciences Meetings. , American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992. doi: 10.2514/6.1992-439.
- [48] 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
- [49] 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_r.htm
- [50] 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_r.htm

- [51] 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_r.htm
- [52] “ACU-T: 3201 Solar Radiation and Thermal Shell Tutorial”. Consultado: el 7 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://2021.help.altair.com/2021/hwsolvers/acusolve/topics/tutorials/acu/acu_3201_intro_cfd_r.htm
- [53] Altair, “Accelerate Simulation-driven Design | Altair Inspire”, Default. Consultado: el 7 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://altair.com/inspire>
- [54] 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
- [55] “Earth seasons – TikZ.net”. Consultado: el 14 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://tikz.net/astronomy_seasons/
- [56] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, “Velocidad del Viento - Estación 1206500136 - Datos del 21 de diciembre de 2022”. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2022. [En línea]. Disponible en: http://aquariuswebportal.ideam.gov.co/Data/DataSet/Chart/Location/1206500136/DataSet/VEL%20VIENTO/VV_AUT_10/Interval/Daily/Calendar/CALENDARYEAR/2022/12/21
- [57] “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>
- [58] 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
- [59] Pandas, “pandas - Python Data Analysis Library”. Consultado: el 7 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://pandas.pydata.org/>
- [60] Python, “Welcome to Python.org”, Python.org. Consultado: el 7 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.python.org/>
- [61] R. Storn y K. Price, “Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces”, *J. Glob. Optim.*, vol. 11, núm. 4, pp. 341–359, dic. 1997, doi: 10.1023/A:1008202821328.
- [62] Numpy, “NumPy”. Consultado: el 7 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://numpy.org/>
- [63] SciPy, “SciPy -”. Consultado: el 7 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://scipy.org/>
- [64] Plotly, “Data Apps for Production | Plotly”. Consultado: el 7 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://plotly.com/>
- [65] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Education, 2018.
- [66] B. R. Munson, D. F. Young, T. H. Okiishi, y W. W. Huebsch, *Fundamentals of fluid mechanics*, 7a ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- [67] H. W. King y E. F. Brater, *Handbook of Hydraulics ...* McGraw-Hill Book Company, 1963.
- [68] MATLAB, “MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico”. Consultado: el 7 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- [69] Soler & Palau, “Acoplamiento de ventiladores - hojas técnicas”. [En línea]. Disponible en: <https://www.solerpalau.com/es-es/hojas-tecnicas-acoplamiento-de-ventiladores/>

- [70] R. B. Zapata, J. F. P. Bayer, y C. S. Jiménez, “Carbones colombianos: clasificación y caracterización termoquímica para aplicaciones energéticas”, *Rev. ION*, vol. 27, núm. 2, Art. núm. 2, ene. 2015, Consultado: el 8 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/4589>
- [71] Jr y C. E. Baukal, Eds., *Industrial Combustion Testing*. Boca Raton: CRC Press, 2010. doi: 10.1201/EBK1420085280.
- [72] S. Hernández, G. Leguizamón, y E. Mezura Montes, “Evolución diferencial para problemas restringidos dinámicos”, presentado en XXII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2020, El Calafate, Santa Cruz)., 2020. Consultado: el 7 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/103494>
- [73] A. Díaz y R. Restrepo Manrique, “Empleo de las microalgas en la fijación del CO₂ presente en los gases de chimenea de equipos industriales de combustión en Colombia”, *ITECKNE Innov. E Investig. En Ing.*, vol. 8, núm. 1, pp. 23–30, 2011.
- [74] J. Cabrera-Gómez, E. Palomino-Marín, y F. Ferreras-Cuevas, “Evaluación de causas del sobreconsumo de combustible en horno de calentamiento de acero para laminación”, *Ing. Mecánica*, vol. 21, núm. 1, pp. 45–51, abr. 2018.