



Casa abierta al tiempo

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA**

UNIDAD IZTAPALAPA

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

POSGRADO EN CIENCIAS (INGENIERÍA QUÍMICA)

**“Simulación Computacional del Efecto Distributivo Espacial de Soportes Fotocatalíticos en un Reactor Solar Acondicionado con CPC”**

**TESIS**

Para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS (INGENIERÍA QUÍMICA)**

**PRESENTA:**

Brandon Luke Carranco Arias

Matrícula: 2223803283

Correo electrónico: [blac.4321@gmail.com](mailto:blac.4321@gmail.com)

**DIRECTOR DE TESIS:**

Dr. Richard Steve Ruiz Martinez

**CODIRECTORA DE TESIS:**

Dra. Yuridiana Rocio Galindo Luna

**JURADO:**

Presidente: Dr. Hernando Romero Paredes Rubio

Secretario: Dr. Ruben Jose Dorantes Rodriguez

Vocal: Dr. Edtson Emilio Herrera Valencia

Iztapalapa, Ciudad de México a 01 de diciembre del 2025



---

### *Agradecimientos*

---

***Edtson Emilio Herrera Valencia*** por ser propulsor de mi formación académica universitaria y de posgrado, a través de constantes evaluaciones de extensos, tesis, resúmenes y presentaciones. Permitirme participar activamente en el seminario de investigación en Fenómenos de Transporte y Reología de Fluidos Complejos, FESZ. Y Prestar ayuda en ejercicios intrincados ajenos a sus menesteres.

***Yuridiana Rocio Galindo Luna*** por su apoyo en el desarrollo de esta tesis y los diversos eventos que galardonan este proyecto, la constante guía mediante correcciones e inestimable tiempo invertido día tras día con diligencia.

***Richard Steve Ruiz Martinez*** por prestar espacio y sugerir alternativas precisas en retos ilusoriamente incajeables, su indubitable amparo pese a los fallos cometidos, fue fundamental para alcanzar la conclusión de esta tesis.

---

*Dedicatorias*

---

*A **Gabriela** por las enigmáticas secuelas de una carrera de fondo, prueba de un pensamiento materializado en cada instante, espejismo de aquello que fue sueño y ahora, con la transferencia de su momento, es presente.*

*A **Blanca** por su característica alegría y fortaleza en el ominoso paraje, su apoyo, cosa cierta entre la circunstancia desdibujada, característica de mi andar a lo largo de la inclinada senda.*

*A **Omar** por el orgullo que insufla mi pecho ante la fábula de su peregrinar universitario, motivado por un auténtico amor al conocimiento, potencia almacenada en mis acciones.*

*A **Estefania** por la perplejidad que genera su creencia en mí, traducida en andares que acertadamente han arribado a en parajes inefables encontrando siempre mi mano tejida.*

***César** por ser consuelo en el pináculo de los dolores y el festín que siempre quise darte y siempre, te deberé.*

## Tabla de contenido

Índice de figuras.....	vi
Índice de tablas .....	xi
Resumen.....	1
1. Introducción .....	2
1.1 El agua en el mundo.....	2
1.2 La situación del agua en México.....	2
1.3 Tratamiento de agua residual .....	3
1.3.1 Tratamiento primario .....	4
1.3.2 Tratamiento secundario.....	4
1.3.3 Tratamiento terciario.....	5
1.4 Procesos de oxidación avanzados .....	5
1.4.1 Degradación de contaminantes con AOPs .....	6
1.5 Principios de Fotocatálisis .....	7
1.6 Colorantes azoicos .....	8
1.7 Sistemas fotocatalíticos.....	8
1.8 Mejora de irradiancia en sistemas fotocatalíticos .....	8
1.9 Concentrador parabólico compuesto (CPC).....	9
1.9.1 Ángulo de inclinación CPC.....	9
1.9.2 Material del absorbedor en reactor de CPC .....	10
1.10 Determinación de radiación incidente en soportes cubiertos de fotocatalizador .....	11
1.11 Trazado de rayos .....	12
1.11.1 Rayos oblicuos meridionales .....	12
1.11.2 Rayos paraxiales .....	16
1.12 Simulación .....	17
1.12.1 Tonatiuh .....	17
1.13 Analogías de transferencia de masa, energía y momento .....	17
1.13.1 Analogía de Reynolds .....	18
1.13.2 Diámetro hidráulico .....	19
1.14 Gradiente de velocidad superficial.....	19
1.15 Coeficiente de transferencia de masa.....	20
1.15.1 Capa límite hidrodinámica .....	20
1.15.2 Capa límite de concentración.....	20
1.16 Estado del arte.....	21

1.17 Hipótesis .....	23
1.18 Objetivo general.....	23
1.18.1 Objetivos específicos .....	23
2. Metodología .....	24
2.1 Geometría.....	24
2.1.1 Sistema experimental .....	24
2.2 Simulación .....	25
2.2.1 Tonatiuh .....	25
2.3 Forma de distribución energética solar .....	27
2.3.1 Luz solar.....	29
2.4 Propiedades ópticas del sistema.....	29
2.4.1 Propiedades del absorbedor e involuta y parábola.....	29
2.5 Condiciones de radiación .....	31
2.5.1 Fechas de análisis.....	31
2.5.2 Inclinación del sistema.....	32
2.5.3 Identificación de sectores del absorbedor y soportes .....	33
2.5.4 Disposición de soportes .....	33
2.6 Condiciones hidrodinámicas del sistema .....	35
2.6.1 Diámetro hidráulico ( $D_h$ ).....	35
2.7 Cálculo de gradiente de velocidad superficial en la dirección normal al soporte .....	36
2.8 Cálculo de gradiente de velocidad superficial en la dirección normal al soporte .....	37
2.9 Espesor de capa límite hidrodinámica ( $\delta_h$ ) .....	38
2.10 Tratamiento de resultados .....	38
3. Resultados .....	40
3.1 Irradiancia solar en elementos de CPC .....	40
3.1.1 Comparación entre materiales de absorbedor .....	40
3.1.2 Irradiancia en superficie de soportes de fotocatalizador .....	45
3.1.3 Análisis integral sobre perfiles de radiación en diferentes disposiciones .....	60
3.2 Mecánica de fluidos y transferencia de masa.....	63
3.2.1 Un soporte anular y desplazado .....	63
3.2.2 Soportes múltiples.....	65
3.2.3 Capa límite hidrodinámica ( $\delta_h$ ).....	69
3.3 Análisis integral de fenómenos de transporte .....	72
3.3.1 Hidrodinámica y capa límite .....	72

3.3.2	Transferencia de masa ( $k_c$ ).....	72
3.3.3	Efecto en eficiencia fotocatalítica.....	72
3.3.4	Elección de sistema, análisis multifenomenológico.....	74
3.4	Comparación con otros autores.....	75
3.4.1	Pelayo et al. (2017).....	75
3.4.2	Peña et al. (2018).....	77
3.4.3	Reyes et al. (2024).....	78
4.	Conclusiones.....	81
4.1	Evaluación de hipótesis y sensibilidad de distribución geométrica.....	81
4.2	Conclusiones.....	81
4.2.1	Limitaciones y consideraciones para futuros diseños.....	82
4.3	Trabajo Futuro.....	82
4.3.1	Contribución.....	83
5.	Apéndices.....	84
	Apendice A. Generación de geometría COMSOL.....	84
	Apendice B. Perfiles de radiación sobre soportes en diferentes fechas y horas.....	85
	B.1. 2 soportes horizontales.....	85
	B.2. 2 soportes verticales.....	86
	B.3. 2 soportes diagonales.....	86
	B.4. 3 soportes disposición triangular.....	87
	B.5. 3 soportes disposición triangular invertida.....	89
	B.6. 4 soportes disposición romboidal.....	91
6.	Referencias.....	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Un total de 22 mil 235 empresas industriales asentadas en la región vierten sus desechos en el río Atoyac. Foto: Iván Venegas. El Sol de Puebla.....	3
Figura 1.2 Clasificación de los procesos de tratamiento de aguas residuales .....	3
Figura 1.3 Diagrama de CPC parámetros útiles (Salgado et al., 2015) .....	10
Figura 1.4 Ángulos con mayores flujos en fechas de análisis (Muhammad et al., 2013).....	10
Figura 1.5 Notación usada en el trazado de un rayo oblicuo meridional .....	13
Figura 1.6 Casos especiales: (a) $L=\infty$ ; (b) $r=\infty$ .....	15
Figura 1.7 Trazado de rayo oblicuo meridional a través de dos superficies refractivas sucesivas .....	15
Figura 2.1 Sistema CPC para tratamiento de agua residual a) CPC múltiple o concentradores b) interconexiones hidráulicas de concentradores c) proyección longitudinal CPC/absorbedor .....	24
Figura 2.2 a) Membrana para soportar TiO <sub>2</sub> en fase anatasa, b) Membrana dispuesta provisionalmente dentro de reactor de cuarzo .....	25
Figura 2.3 Radio de elementos en reactor de CPC; $r_1=0.5\text{cm}$ , $r_2=1.35\text{cm}$ y $r_3=1.45\text{cm}$ .....	25
Figura 2.4 Elementos de selección, en interfaz de usuario Tonatiuh a) Nodos Tonatiuh Group Node (azul) y Surface Node (rojo) b) Transformaciones lineales de los componentes del sistema c) Geometrías disponibles .....	26
Figura 2.5 Representación de los parámetros para un sistema CPC a) perspectiva oblicua, desplazamiento de eje de truncamiento b) perspectiva axial, ángulos de aceptación (Tonatiuh, 2024) .....	27
Figura 2.6 Distribución angular tipo Pillbox (Sanchez, 2016).....	27
Figura 2.7 Parámetros superficiales para evaluación de calidad óptica en Tonatiuh .....	28
Figura 2.8 Espectro teórico de cuerpo negro y espectro completo solar en la superficie Terrestre y la superficie atmosférica (Wang, et al., 2023).....	29
Figura 2.9 a) Reflectancia y b) transmitancia de vidrio con y sin recubrimiento (Wonwook et al., 2016).29	
Figura 2.10 Transmitancia óptica de vidrio pyrex Código (Corning, 2023) .....	30
Figura 2.11 Transmitancia óptica de pyrex y cuarzo (Wonwook et al., 2016).....	30
Figura 2.12 Mapa con tiempo universal coordinado, México en región -6 .....	32
Figura 2.13 Traslación terrestre, representación de tiempos con distancias características .....	32
Figura 2.14 Interfaz Tonatiuh en la selección de tiempos de análisis .....	32
Figura 2.15 Disposición espacial estudiada en sistema de un soporte .....	33
Figura 2.16 Disposiciones espaciales estudiadas en sistema de dos soportes.....	34
Figura 2.17 Disposiciones espaciales estudiadas en sistema de tres soportes .....	34
Figura 2.18 Disposición espacial estudiada en sistema de cuatro soportes: a) romboidal y b) cuadrangular .....	35

Figura 2.19 Regiones de fluido para análisis fluidodinámico y de transferencia de masa en sistemas: a) un soporte, b) dos soportes, c) tres soportes y d) cuatro soportes .....	37
Figura 2.20 Reactor de CPC con línea (roja) sobre la que se evaluara el perfil de velocidad para determinar $\delta h$ local con diferente número de soportes: a) uno, b) dos, c) tres y d) cuatro.....	38
Figura 2.21 Perfil de velocidad evaluado sobre una línea mediante CFD .....	38
Figura 3.1 Sistema de análisis en Tonatiuh a) vista transversal b) proyección axial .....	40
Figura 3.2 Densidad de flujo de radiación solar ( $W/m^2$ ) durante las cuatro temporadas del año considerando un absorbedor de vidrio .....	41
Figura 3.3 Análisis del flujo de radiación durante las cuatro temporadas del año considerando un absorbedor de pyrex.....	42
Figura 3.4 Análisis del flujo de radiación durante las cuatro temporadas del año considerando un absorbedor de cuarzo .....	43
Figura 3.5 Flujo de radiación ( $W/m^2$ ) en intervalo de horas con actividad solar (09:00AM-16:00PM) en seno de absorbedor de vidrio .....	44
Figura 3.6 Flujo de radiación ( $W/m^2$ ) en intervalo de horas con actividad solar (intervalo 09:00AM-16:00PM) en seno de absorbedor de pyrex.....	44
Figura 3.7 Flujo de radiación ( $W/m^2$ ) en intervalo de horas con actividad solar (intervalo 09:00AM-16:00PM) en seno de absorbedor de cuarzo .....	45
Figura 3.8 Comparativa entre flujo total simulado ( $W/m^2$ ) de tres materiales: vidrio, pyrex y cuarzo, los días 21 de los meses: marzo, junio, septiembre y diciembre, el año 2024.....	45
Figura 3.9 Análisis del flujo de radiación durante las cuatro temporadas del año considerando un soporte anular .....	46
Figura 3.10 Flujo de radiación ( $W/m^2$ ) en intervalo de horas con actividad solar (intervalo 09:00 a.m.-16:00 p.m.) en soporte anular.....	47
Figura 3.11 Soporte desplazada 5 mm a la izquierda del eje central del absorbedor.....	47
Figura 3.12 Flujo de radiación durante el día 21 de marzo considerando un soporte anular desplazada del ánulo del absorbedor a) desplazamiento hacia abajo (en dirección del reflector), b) desplazamiento hacia arriba (apertura del sistema), c) desplazamiento hacia la izquierda (sur) y d) desplazamiento hacia la derecha (norte).....	48
Figura 3.13 Flujo de radiación solar por unidad de área promedio ( $W/m^2$ ), sobre soporte (rojo) el día 21 de marzo a las 12:30 p. m., en sistema de un soporte dentro de absorbedor de CPC .....	49
Figura 3.14 Inclinación de sistema de dos soportes horizontales dependiente de la fecha de análisis en 4 meses diferente.....	49
Figura 3.15 Disposición de soportes en sistema de 2 soportes con desplazamiento horizontal.....	50
Figura 3.16 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes horizontales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de marzo cuarzo con inclinación $18^\circ$ .....	51

Figura 3.17 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes horizontales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de junio cuarzo con inclinación $-4^\circ$ .....	51
Figura 3.18 Disposición de soportes en sistema de 2 soportes con desplazamiento vertical del eje del soporte $\pm 6.16$ mm del eje central del absorbedor.....	52
Figura 3.19 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes verticales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de marzo cuarzo con inclinación $18^\circ$ .....	52
Figura 3.20 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes verticales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de diciembre cuarzo con inclinación $43^\circ$ .....	53
Figura 3.21 Disposición de soportes en sistema de 2 soportes con desplazamiento diagonal.....	53
Figura 3.22 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes diagonales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de marzo cuarzo con inclinación $18^\circ$ .....	54
<i>Figura 3.23 Irradiancia solar total por unidad de área (<math>W/m^2</math>) en sistemas de 2 soportes 4 diferentes fechas</i> .....	54
Figura 3.24 Disposición de soportes en sistema de 3 soportes con disposición triangular.....	55
Figura 3.25 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 3 soportes dispuestos triangularmente a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3 y d) flujo promedio en la superficie de soportes de CPC 21 de marzo cuarzo con inclinación $18^\circ$ .....	56
Figura 3.26 Disposición de soportes en sistema de 3 soportes con disposición triangular.....	56
Figura 3.27 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 3 soportes dispuestos en forma triangular invertida a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3 y d) flujo promedio en la superficie de soportes de CPC 21 de marzo cuarzo con inclinación $18^\circ$ .....	57
Figura 3.28 Disposición de soportes en sistema de 4 soportes con disposición romboidal.....	58
Figura 3.29 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 4 soportes dispuestos en forma romboidal a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3, d) soporte 4 y e) flujo promedio en la superficie de soportes de CPC 21 de marzo cuarzo con inclinación $18^\circ$ .....	59
Figura 3.30 Regiones de fluido analizadas en sistemas de un soporte.....	63
Figura 3.31 Distribución de velocidad en sistema de un soporte a) anular primer sector, desplazada del ánulo 5 mm b) segundo sector y c) primer sector.....	64
Figura 3.32 $k_c$ (m/s) en las secciones de cuatro disposiciones de un soporte: a) $k_c$ dependiente de la $v_{m\acute{a}x}$ y b) $k_c$ dependiente de $v_{prom}$ .....	65
Figura 3.33 Regiones de fluido analizadas en sistemas de varios soportes .....	65
Figura 3.34 Distribución de velocidad (m/s) y $v_{inf}$ (m/s) de sector 1 y 4 en sistema: a) dos soportes, b) tres soportes y c) cuatro soportes.....	67
Figura 3.35 $k_c$ (m/s) en las secciones de cuatro disposiciones de soportes múltiples .....	67

Figura 3.36 Caída de presión ( $\Delta P$ ) [=] Pa en escala logarítmica, dependiente del número de soportes y disposición, en sistema reducido de 6 cm.....	69
Figura 3.37 Velocidad de flujo anular (m/s) evaluada sobre línea entre soporte y pared de reactor respecto a longitud de línea (cm) en sistema de un soporte .....	70
Figura 3.38 Velocidad de flujo anular (m/s) evaluada sobre línea entre soporte y pared de reactor a) dispuesta a 0° y b) dispuesto a 90°, respecto a longitud de línea (cm) en sistema de dos soportes.....	70
Figura 3.39 Velocidad de flujo anular (m/s) evaluada sobre línea entre soporte y pared de reactor a) dispuesta a 0°, b) 90° y c) 270°, respecto a longitud de línea (cm) en sistema de tres soportes.....	71
Figura 3.40 Velocidad de flujo anular (m/s) evaluada sobre línea entre soporte y pared de reactor a) dispuesta a 0°, b) 90° y c) 270°, respecto a longitud de línea (cm) en sistema de cuatro soportes .....	72
Figura 5.1 Algoritmo de generación de CPC en COMSOL para transferencia radiativa.....	84
Figura 5.2 Generación de geometría en COMSOL a) proyección axial b) proyección transversal .....	84
Figura 5.3 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes horizontales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de septiembre cuarzo con inclinación 19° .....	85
Figura 5.4 Figura 5.3. Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes horizontales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de diciembre cuarzo con inclinación 43° .....	85
Figura 5.5 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes verticales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de junio cuarzo con inclinación -4° .....	86
Figura 5.6 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes verticales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de septiembre cuarzo con inclinación 19° .....	86
Figura 5.7 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes diagonales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de junio cuarzo con inclinación -4°.....	87
Figura 5.8 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes diagonales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de septiembre cuarzo con inclinación 19° .....	87
Figura 5.9 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes diagonales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de diciembre cuarzo con inclinación 43° .....	87
Figura 5.10 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 3 soportes dispuestos triangularmente a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3 y d) flujo promedio en la superficie de soportes de CPC 21 de junio cuarzo con inclinación -4°.....	88
Figura 5.11 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 3 soportes dispuestos triangularmente a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3 y d) flujo promedio en la superficie de soportes de CPC 21 de septiembre cuarzo con inclinación 19°.....	88

Figura 5.12 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 3 soportes dispuestos triangularmente a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3 y d) flujo promedio en la superficie de soportes de CPC 21 de diciembre cuarzo con inclinación  $43^\circ$  ..... 89

Figura 5.13 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 3 soportes dispuestos en forma triangular invertida a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3 y d) flujo promedio en la superficie de soportes de CPC 21 de marzo cuarzo con inclinación  $-4^\circ$  ..... 90

Figura 5.14 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 3 soportes dispuestos en forma triangular invertida a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3 y d) flujo promedio en la superficie de soportes de CPC 21 de septiembre cuarzo con inclinación  $19^\circ$  ..... 90

Figura 5.15 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 3 soportes dispuestos en forma triangular invertida a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3 y d) flujo promedio en la superficie de soportes de soportes de CPC 21 de diciembre cuarzo con inclinación  $43^\circ$  ..... 91

Figura 5.16 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 4 soportes dispuestos en forma romboidal a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3, d) soporte 4 y e) flujo promedio en la superficie de soportes de CPC 21 de junio cuarzo con inclinación  $-4^\circ$  ..... 92

Figura 5.17 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 4 soportes dispuestos en forma romboidal a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3, d) soporte 4 y e) flujo promedio en la superficie de soportes de CPC 21 de septiembre cuarzo con inclinación  $19^\circ$ . 93

Figura 5.18 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 4 soportes dispuestos en forma romboidal a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3, d) soporte 4 y e) flujo promedio en la superficie de soportes de CPC 21 de diciembre cuarzo con inclinación  $43^\circ$  ... 94

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Clasificación de los procesos de tratamiento de aguas residuales (CONAGUA, 2019) .....	4
Tabla 1.2 AOPs fotoquímicos y no-fotoquímicos más estudiados .....	6
Tabla 2.1 Longitudes características sistema .....	25
Tabla 2.2 Parámetros de CPC en software Tonatiuh .....	26
Tabla 2.3 Parámetros de superficies especulares rugosas estándar de software Tonatiuh .....	28
Tabla 2.4 Valores de transmitancia para los materiales .....	30
Tabla 2.5 Valores de índices de refracción para los materiales .....	31
Tabla 2.6 Valores de absorbancia para los materiales .....	31
Tabla 2.7 Fechas consideradas para la simulación y ángulo de inclinación del sistema CPC .....	32
Tabla 2.8 Sectores circulares de soporte con rango de ángulos y circunferencias asociados para absorbedor y soporte .....	33
Tabla 2.9 Coordenadas rectangulares de las disposiciones de dos soportes .....	34
Tabla 2.10 Coordenadas rectangulares de las disposiciones de tres soportes .....	34
Tabla 2.11 Coordenadas rectangulares de 4 soportes dispuestos romboidalmente .....	35
Tabla 2.12 coordenadas rectangulares de 4 soportes dispuestos cuadrangularmente .....	35
Tabla 2.13 Parámetros hidrodinámicos dependientes del número de soportes .....	36
Tabla 3.1 Incremento porcentual entre flujos radiativo por unidad de área del vidrio, pyrex, cuarzo, en diferentes fechas .....	45
Tabla 3.2 Flujos totales en diferentes disposiciones de soportes en diferentes fechas del año .....	60
Tabla 3.3 Porcentaje de aumento entre disposiciones con mayor flujo radiativo .....	61
Tabla 3.4 Potencias en disposiciones de soportes en diferentes fechas del año .....	61
Tabla 3.5 Porcentaje de aumento en potencia neta (W) entre disposiciones con mayor flujo radiativo .....	62
Tabla 3.6 Gradiente de velocidad normal a la superficie del soporte, velocidades y coeficientes de transferencia de masa por sección de soporte .....	63
Tabla 3.7 Gradiente de velocidad normal a la superficie del soporte, velocidades y coeficientes de transferencia de masa por sección de soporte .....	66
Tabla 3.8 Relaciones porcentuales entre coeficientes de transferencia de masa (kc) [=] m/s, de sistemas de soportes múltiples .....	68
Tabla 3.9 Presión máxima soportada por absorbedores de diferente material basado en su esfuerzo de rotura y modelo de Barlow .....	69
Tabla 3.10 Relaciones porcentuales entre caída de presión ( $\Delta P$ ) [=] Pa, de sistemas de soportes múltiples .....	69
Tabla 3.11 Configuraciones óptimas según interés particular en fenómeno de transporte .....	73

Tabla 3.12 Ventajas y desventajas de sistemas con mejor eficiencia global frente a sistema de dos soportes .....	74
Tabla 3.13 Comparativa metodológica respecto a Pelayo et al. (2017) .....	75
Tabla 3.14 Comparativa en términos de resultados respecto a Pelayo et al. (2017) .....	76
Tabla 3.15 Limitaciones y validación experimental con Pelayo et al. (2017) .....	77
Tabla 3.16 Análisis comparativo metodológico respecto a Peña et al. (2018).....	77
Tabla 3.17 Análisis comparativo en resultados respecto a Peña et al. (2018).....	78
Tabla 3.18 Características geométricas en estudios .....	78
Tabla 3.19 Comparativa metodológica entre artículo de Reyes et al. (2024) y este estudio.....	79
Tabla 3.20 Comparativa metodológica entre artículo de Reyes et al. (2024) y este estudio.....	79

## RESUMEN

El estudio se centra en el diseño y optimización de un reactor fotocatalítico acoplado a un Concentrador Parabólico Compuesto (CPC) para el tratamiento de aguas residuales, al analizar sinérgicamente el efecto de la disposición espacial de soportes tubulares recubiertos con material fotocatalítico, dispuestos dentro del reactor, mediante la evaluación de tres fenómenos de transferencia: distribución de irradiancia solar sobre los soportes, hidrodinámica del fluido y transferencia de masa. El enfoque multifísico es computacional y analítico, mientras el cálculo de irradiancia sobre los soportes se basa en simulaciones de trazado de rayos (software Tonatiuh), y la dinámica de fluidos computacional (CFD en COMSOL), la transferencia de masa se basa en la determinación del coeficiente de transferencia de masa ( $k_c$ ), mediante la analogía de Reynolds. El número de soportes estudiado va de 1 a 4 en diferentes disposiciones espaciales, así como diferentes materiales para el absorbedor (vidrio, pyrex y cuarzo).

Los resultados indican, en términos radiativos: mientras el aumento de soportes incrementa el área catalítica total y el flujo radiativo neto, también generan un sombreado significativo que reduce la irradiancia promedio por unidad de área hasta en un 43 % (4 soportes respecto a 1 soporte). La transferencia de momento y masa indican: el aumento de soportes reduce el espesor de capa límite, paralelamente esto produce la disminución del coeficiente de transferencia de masa ( $k_c$ ) debido al dominio de la velocidad del fluido sobre el gradiente de velocidad superficial.

Se concluye: la configuración que maximiza la sinergia entre la activación fotocatalítica, el transporte de contaminantes y la viabilidad operativa es el sistema de dos soportes dispuestos horizontalmente con un absorbedor de cuarzo e inclinación dinámica con ajuste estacional. Alcanzando un flujo radiativo neto de 28.22 W, coeficiente de transferencia de masa de  $1.89 \times 10^{-3}$  m/s y caída de presión manejable, siendo la solución más balanceada para la escalabilidad de estos sistemas.

**Palabras clave:** Fotocatálisis solar, CPC, Tratamiento de agua, Transferencia de masa, Simulación CFD, Trazado de rayos, Diseño de reactores.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 El agua en el mundo

El cambio climático, sequías severas, crecimiento demográfico, aumento de demanda y mala gestión durante las últimas décadas han acentuado la escasez de agua dulce todo el mundo, resultando en grave escasez para alrededor de 4 mil millones de personas, al menos un mes al año (Shalamzari y Zhang, 2018, Khatibi y Arjjumend, 2019 , Orimoloye et al., 2021) según datos del Banco Mundial (2023) esta cifra representa aproximadamente el 50% de la población mundial (4,012 mil millones) y la disponibilidad promedio anual de agua per cápita pasó de diez mil metros cúbicos en 1960 a cuatro mil en 2012, se espera una disminución a tres mil metros cúbicos en 2030. Por lo tanto, la reutilización de agua se ha vuelto esencial en el futuro cercano.

Los contaminantes presentes en el agua están constituidos por contaminantes orgánicos, tóxicos para varios microorganismos, vida acuática y seres humanos. Diversos químicos como colorantes azoicos, herbicidas y pesticidas se encuentran en ríos y lagos, y son considerados dañinos, algunos de ellos disruptores endócrinos. La mayoría de las aguas residuales provienen del uso municipal, industrial y agroalimentario. Los colorantes textiles y otros tintes forman parte de uno de los grupos más grandes de contaminantes orgánicos, incrementando el peligro ambiental. Entre el 1-20 % de la producción global de colorantes se pierde durante los procesos de teñido y son descargados en efluentes textiles. Estos pueden teñir el agua (*Figura 1.1*) dañando a los organismos vivos, pues es limitada la reoxigenación del agua, disminuyendo la penetración de luz solar y, por lo tanto, el desarrollo natural de la vida acuática se modifica. La industria textil es el principal consumidor de agua dulce por kg de material tratado. Sus efluentes contienen químicos tóxicos, carcinogénicos y estables como formaldehído, colorantes azoicos, dioxinas y metales pesados. Colorantes, pesticidas, etc son estructuras complejas y se degradan naturalmente a elevadas temperaturas, condiciones alcalinas, radiación ultravioleta (UV) y otros iniciadores radicalarios, formando subproductos tóxicos, que podrían mucho más tóxicos para el medio ambiente que el químico original. Estos son resistentes a la degradación microbiana, química, térmica y fotolítica pues muchos de ellos son productos recalcitrantes. La composición de estos efluentes es de 99.9 % agua y 0.1 material suspendido o sólido, así, existe la necesidad de remover los contaminantes con un método efectivo, ecológico y económico.

## 1.2 La situación del agua en México

Datos de CONAGUA (2010) indican en México únicamente el 35 % de las aguas municipales y el 18 % de aguas industriales residuales reciben algún tipo de tratamiento. El uso de agua para abastecimiento público representa 15 % de la concesión total mientras que el sector Agrícola, Ganadero y Acuacultural tiene asignado un 76 %, a pesar de ello algunas alcaldías en la urbe mexicana como Iztapalapa padecen desabasto continuo, el problema se manifiesta también en el área metropolitana y Estado de México. Esta característica se dispersa por la república, siendo tema central de discusión acerca del tratamiento de agua.



Figura 1.1 Un total de 22 mil 235 empresas industriales asentadas en la región vierten sus desechos en el río Atoyac. Foto: Iván Venegas. El Sol de Puebla

### 1.3 Tratamiento de agua residual

Existen diversos métodos para el tratamiento de agua como fotodegradación, adsorción, filtración, coagulación, tratamientos biológicos, de cualquier manera, algunas de estas técnicas no son totalmente efectivas o viables, debido a la estabilidad de las moléculas contaminantes, de este modo hay procesos de oxidación avanzada (AOPs) dispuestos para degradar tales moléculas y reducir la carga de contaminantes orgánicos en el agua residual. (Suresh, 2018)

El tratamiento de agua es un proceso que convierte desechos de agua en un efluente útil (sin perjuicio para la salud o ambiente) que puede reincorporarse al ciclo del agua, en otras palabras, puede reutilizarse. Este proceso se ha incrementado en la era moderna, por su relevancia en el impacto de la salud, procesos clasificados como físicos, químicos y biológicos, de acuerdo con la *Figura 1.2*, estos procesos son combinados en secuencia o concurrentes, pero están restringidos por la eficiencia, ejecución y costo.

Químico	Biológico	Físico	Físico
<ul style="list-style-type: none"> <li>•Catalísis</li> <li>•Electrólisis</li> <li>•Intercambio iónico</li> <li>•Neutralización</li> <li>•Oxidación</li> <li>•Reducción</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Lodo activado</li> <li>•Lagunas aireadas</li> <li>•Digestión anaeróbica</li> <li>•Floculación</li> <li>•Tratamiento fúngico</li> <li>•Filtros percoladores</li> <li>•Estabilización</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Adsorción</li> <li>•Coagulación</li> <li>•Destilación</li> <li>•Filtración</li> <li>•Flotación</li> <li>•Fraccionamiento de espuma</li> <li>•Incineración</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Radiación ionizante</li> <li>•Tratamiento por membranas</li> <li>•Ósmosis inversa</li> <li>•Sedimentación</li> <li>•Extracción con solventes</li> </ul>

Figura 1.2 Clasificación de los procesos de tratamiento de aguas residuales

La infraestructura física para el tratamiento de agua se conoce como planta de tratamiento de agua por sus siglas en inglés (WWTP). Una planta típica de tratamiento se compone de tratamiento primario, secundario

y terciario, dependiendo de las características y composición de los efluentes se establece un tratamiento que recibirá (Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Clasificación de los procesos de tratamiento de aguas residuales (CONAGUA, 2019)

<b>Clasificación</b>	<b>Remueve</b>	<b>Proceso</b>
<i>Tratamiento primario</i>	Arenas	Rejillas desarenadores sedimentación
	Partículas gruesas Sólidos suspendidos	
<i>Tratamiento secundario</i>	Materia orgánica disuelta	Tratamiento biológico (ej. lodos activados)
<i>Tratamiento terciario</i>	Nitrógeno	Desnitrificación-nitrificación Remoción de fósforo Coagulación-floculación
	Fósforo Materia coloidal	
<i>Tratamiento avanzado</i>	Patógenos Microcontaminantes	Desinfección Oxidación forzada

### 1.3.1 Tratamiento primario

#### ***Separación de fases***

Las impurezas se acumulan en una fase no acuosa en puntos intermedios de una secuencia de tratamientos para remover sólidos generados durante la oxidación o pulimiento. Grasa y aceite también pueden recuperarse por combustible o saponificación. Los sólidos inorgánicos disueltos pueden eliminarse con métodos como intercambio iónico, ósmosis inversa, destilación, etc.

#### ***Sedimentación***

Sólidos y líquidos no polares son removidos del agua residual por efecto de la gravedad y las diferencias de densidad. Esta primera etapa se lleva a cabo en tanques de sedimentación. Los sólidos más pesados se acumulan en el fondo.

#### ***Filtración***

Sólidos finos están presentes en suspensiones coloidales y son removidos al filtrarlos a través de barreras físicas finas.

### 1.3.2 Tratamiento secundario

#### ***Oxidación bioquímica***

Dispuesta para tratar compuestos orgánicos disueltos y coloidales, aplicable en efluentes agrícolas o industriales. Además, puede actuar como suministro de alimento para el ecosistema tratado.

### ***Oxidación química***

Usada generalmente para remover los compuestos orgánicos persistentes que han permanecido después de la oxidación bioquímica. En la desinfección puede usarse ozono, cloro o hipoclorito, la oxidación química mata bacterias y patógenos microbianos.

### ***Pulimento***

Los procedimientos subsecuentes a la oxidación se conocen como pulimento. Algunas veces, estos tratamientos son usados independientemente para efluentes de industriales. Después de la oxidación química, la reactividad química del efluente puede reducirse por reducción química o ajuste de pH. Entonces, los contaminantes restantes serán removidos mediante absorción química usando carbón activado. Filtración con arena (carbonato de calcio) o filtros de tejido usado comúnmente para tratamiento de aguas municipales.

### **1.3.3 Tratamiento terciario**

Considerado dentro de las técnicas de pulimento. Con una amplia aplicación en ciudades industrializadas usando microfiltración o membranas sintéticas. Contaminantes como nitratos pueden removerse mediante procesos naturales en los humedales, pero también por vía microbiana. El tratamiento de efluentes con ozono descontamina el agua filtrando burbujas de ozono a través del tanque, sin embargo, es intensivo energéticamente. La última innovación es la granulación aerobia. Las plantas de tratamiento de lixiviados son usadas para el tratamiento de lixiviados de basureros. El tratamiento terciario incluye varias opciones: tratamiento biológico, ultrafiltración, filtros de carbón activado y osmosis inversa utilizando tecnología de módulo de membrana. Se observa que la mayoría de estas aproximaciones son útiles para la transferencia de contaminantes de la fase acuosa a otra fase, de este modo, se genera otro tipo de contaminación a ser tratada. Otros métodos como microbiológicos o descomposición enzimática, biodegradación, ozonación, y AOPs como reacciones catalíticas, procesos fotón-fentón, procesos  $H_2O_2/UV$ , etc. También se han usado para remover diversos contaminantes.

En los últimos veinte años, los procesos fotocatalíticos de degradación han sido ampliamente usados. AOPs, han sido desarrollados para alcanzar la mineralización total de la mayoría de los contaminantes orgánicos.

## **1.4 Procesos de oxidación avanzados**

Los procesos de oxidación avanzados (AOPs) son eficientes en el tratamiento de contaminantes tóxicos y orgánicos, destruyéndolos completamente. Estos se refieren a tratamientos de agua oxidativos usados para tratar efluentes tóxicos, a nivel industrial, hospitales y tratamiento de agua residual industrial. Entre ellos se incluyen  $UV/O_3$ ,  $UV/H_2O_2$ , fentón, foto-fentón, plasmas no térmicos, sonolisis, fotocátalisis, radiolisis, proceso de oxidación en agua supercrítica, etc. Los AOPs fueron introducidos por primera vez por Glaze et al. (1987) como proceso que involucraban radicales hidroxilos en cantidad suficiente para provocar purificación de agua. Hay varios métodos para generar radicales hidroxilos y otras especies reactivas de oxígeno como radical anión superóxido, peróxido de hidrógeno y oxígeno singlete. Sin embargo, el radical hidroxilo es la especie más eficiente y efectiva entre ellas.

Los compuestos orgánicos interactúan con radical hidroxilo mediante vías de adición o abstracción de hidrógeno, resultando en un radical de carbono centrado, que reacciona con oxígeno molecular para formar radical peroxilo; son generados productos de oxidación como cetonas, aldehídos o alcoholes. Los radicales hidroxilos también pueden formar un catión radical extrayendo un electrón de sustratos ricos en electrones, que puede hidrolizarse fácilmente en medios acuosos dando un producto oxidado. Los productos suelen ser menos tóxicos y más susceptibles a la biorremediación como el CO<sub>2</sub>, el agua, etc.

Algunos de los AOPs más estudiados se listan en la *Tabla 1.2*, la cual contiene procesos fotoquímicos de generación de especies superoxidantes y no fotoquímicos.

*Tabla 1.2 AOPs fotoquímicos y no-fotoquímicos más estudiados*

<i>AOP's no fotoquímicos</i>	<i>AOP's fotoquímicos</i>
Ozono (O <sub>3</sub> )	Fotólisis (UV + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )
Fenton (Fe <sup>2+</sup> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	Fotocatálisis (luz+catalizador)
Electrolisis (Electrodos + Corriente)	Foto-Fenton (luz solar + Fenton)
Sonólisis (ultrasonido)	
Microondas + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	

### 1.4.1 Degradación de contaminantes con AOPs

#### 1) Generación del radical hidroxilo (OH·)

La reacción más común para generar radicales hidroxilos se lleva a cabo entre ozono (O<sub>3</sub>) y peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)



El ozono y el peróxido de hidrógeno reaccionan produciendo radicales hidroxilos (OH·), oxígeno molecular (O<sub>2</sub>) y radicales hidroperoxilo (HO<sub>2</sub>·).

#### 2) Reacción de radical hidroxilo con compuesto orgánico (benceno)



El radical hidroxilo extrae un átomo de hidrógeno derivado del benceno, forma agua y el radical fenilo (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>·).

#### 3) Degradación continua

El radical fenilo (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>·) reacciona con radicales hidroxilo y oxígeno, lo que provoca la apertura del anillo aromático y formación de compuestos simples, ácidos carboxílicos, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O.



El fenol  $C_6H_5OH$  continúa reaccionando con los radicales hidroxilos, rompiéndose en compuestos más pequeños hasta mineralizarse completamente ( $CO_2$  y  $H_2O$ ).

Reacción global simplificada



Fotocatálisis en el tratamiento de colorantes, entre los diversos AOP útiles para degradar moléculas complejas y estables, los efluentes de industria textil tienen concentraciones bajas a moderadas de contaminantes el tratamiento con fotocátalisis bajo estas condiciones no requiere tiempos prolongados de exposición, mientras que en regiones con alta irradiación solar la componente UV de la fuente activa a los fotocatalizadores.

La oxidación avanzada generalmente implica el uso de agentes oxidantes fuertes como peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) u ozono ( $O_3$ ), catalizadores (iones de hierro, electrodos, óxidos metálicos) e irradiación (luz ultravioleta, luz solar, ultrasonido) por separado o en combinación, bajo condiciones normales de operación (baja temperatura y presión). Los AOP impulsados por luz se suponen muy atractivos para el tratamiento de aguas residuales debido a la abundancia de luz solar en regiones donde la escasez de agua es alta, y a costos comparativamente bajos y alta eficiencia. El radical hidroxilo es uno de los oxidantes más activos seguido por el flúor.

AOPs son superiores pues los compuestos presentes en los efluentes son degradados en lugar de ser concentrados o transferidos a una fase difusa, evitando el tratamiento de material de residuo secundario. Los AOPs involucran tres etapas básicas

1. Formación de oxidantes fuertes como  $^{\circ}OH, HO_2^{\cdot}, O_2^{\cdot-}$ , etc.
2. Los oxidantes reaccionan con contaminantes orgánicos convirtiéndolos en compuestos biodegradables.
3. Oxidación de intermediarios biodegradables hasta una mineralización completa en agua, dióxido de carbono y sales inorgánicas.}

## 1.5 Principios de Fotocatálisis

En un átomo aislado cada electrón, ocupa un nivel discreto de energía, cuando todos los átomos de un mismo elemento, están lejos los unos de los otros tienen idénticos niveles de energía disponibles, pero cuando los átomos se acercan en la formación de un sólido, los electrones lejanos no solo sienten la atracción de su núcleo, si no del conjunto de núcleos, modificando el nivel de energía, ahora las distribuciones no son idénticas, en su lugar se funden en una serie de niveles de energía muy cercanos pero separados, formando una banda de energía. La banda de electrones con energía más elevada se conoce como banda de valencia, la siguiente banda de energía más alta es conocida como banda de conducción. Los conductores tienen banda de valencia parcialmente llena de electrones, con disposición de energía térmica los electrones en la capa de valencia pueden moverse localmente, al aplicar un campo eléctrico pueden conducir corriente a través del material. Los aislantes tienen banda de valencia llena, además la separación entre bandas (band gap) es amplia, al aplicar un campo eléctrico los electrones no pueden moverse. Los semiconductores tienen una disposición parecida a los aislantes, los electrones llenan la capa de valencia con la diferencia de presentar una separación entre bandas pequeña, permitiendo que incluso a temperatura ambiente algunos electrones salten a la capa de conducción, permitiéndoles conducir energía.

El  $TiO_2$  es un semiconductor con la capacidad de absorber luz, cuando el flujo es suficiente los electrones de la capa de valencia (VB) son excitados y se trasladan hasta la banda de conducción (CB), el espacio abandonado por los e- queda cargado electropositivamente

La fotocatalisis se basa en la capacidad de ciertos materiales, para absorber luz y generar pares electrón-hueco ( $e^-/h^+$ ) que pueden participar en reacciones redox. Los electrones y huecos generados pueden migrar a la superficie del semiconductor y reaccionar con moléculas adsorbidas. Por ejemplo, en la fotocatalisis con dióxido de titanio ( $TiO_2$ ), la energía del fotón debe ser mayor que el ancho de banda prohibida ( $E_g \approx 3.2$  eV) para generar el par  $e^-/h^+$ .

## 1.6 Colorantes azoicos

Los colorantes azoicos se caracterizan por la presencia de uno o más grupos funcionales azo ( $-N=N-$ ) que funcionan como conexiones entre grupos aromáticos o heterocíclicos. Se sintetizan mediante reacciones de diazotización y acoplamiento permitiendo una amplia diversidad de tonalidades y estructural. Algunos de ellos son capaces de liberar aminas aromáticas carcinogénicas por la reducción del grupo azo.

## 1.7 Sistemas fotocatalíticos

La fotocatalisis, es un poderoso y sostenible proceso capaz de degradar contaminantes recalcitrantes, sin embargo, se requiere aumentar la eficiencia de esta tecnología y con ello escalar a nivel industrial. El esfuerzo de los científicos se ha centrado en el diseño de fotoreactores y materiales fotocatalíticos. Los reactores de estos sistemas se pueden clasificar como soportados o suspendidos, dependiendo de la ubicación del fotocatalizador. Los fotocatalizadores pueden dispersarse en el agua contaminada, la mezcla es expuesta a luz UV o solar para activar el catalizador, este método favorece el contacto entre el catalizador y los contaminantes, pero entre sus limitaciones está la dificultad para separar el catalizador del agua después del tratamiento, este proceso requiere de filtración o centrifugación para recuperar el catalizador, aumentando los costos y tiempos de operación.

El catalizador soportado evita la separación posterior del catalizador, lo cual es relevante al realizar escalamiento, evitar pérdida de material y reducir costos de operación. La fotocatalisis soportada implica la inmovilización del catalizador sobre un soporte sólido (vidrio, cerámica, acero, fibras o membranas), a pesar de las bondades frente a la suspensión del catalizador, se produce una reducción en la superficie activa, pues las partículas tienden a aglomerarse o formar capas densas, el contacto directo con el soporte y las capas imposibilita la interacción con la luz o los reactivos, además los soportes pueden degradarse con el tiempo, a pesar de ello, este método permite operar de manera continua.

## 1.8 Mejora de irradiancia en sistemas fotocatalíticos

El diseño de reactores con soportes múltiples busca solucionar la disminución de radiación incidente aumentando la superficie activa de catalizador en los sistemas, este diseño a su vez puede provocar sombreamiento entre los soportes, por lo que un buen diseño considera las regiones sombreadas a la par de la irradiancia.

Es deseable usar como fuente radiativo al astro solar, sin embargo, la componente capaz de activar a la mayoría de los fotocatalizadores es reducida (UV) el uso de concentradores solares permiten enfocar la luz en un área determinada, aumentando la intensidad de luz que llega al fotocatalizador, esto puede mejorar la generación de portadores de carga (electrones y huecos), en un catalizador soportado la región de interés para concentración solar está determinada haciendo una elección natural la implementación de concentradores solares.

## 1.9 Concentrador parabólico compuesto (CPC)

El uso de concentradores permite aprovechar mejor la limitada radiación solar, los concentradores parabólicos compuestos (CPC) son concentradores solares, diseñados para proyectar la luz en un región específica, un receptor o tubo absorbedor, los CPC están basados en los sistemas parabólicos de concentración donde una superficie reflejante con forma parabólica concentra la radiación el foco del paraboloide, estos sistemas requieren de sistemas precisos de seguimiento solar pues solo llegaran al foco los rayos paralelos al eje de la parábola, este problema condujo al desarrollo de los CPC donde se ha generado una superficie curva con características semejantes a la parábola, sin necesidad de sistemas de seguimiento. Un CPC es un dispositivo óptico diseñado para concentrar la radiación solar en un área específica, como un receptor o tubo absorbedor. A diferencia de los concentradores parabólicos simples, los CPC tienen una geometría más compleja que les permite capturar y concentrar la luz solar de manera más eficiente, incluso cuando el sol no está perfectamente alineado con el sistema.

La partes laterales y externas del CPC tienen forma de dos parábolas independientes que comparten un eje focal la parte baja o central del sistema recibe el nombre de involuta, con una curvatura menor que une los paraboloides. Estas superficies están ideadas para reflejar y concentrar la radiación solar en el receptor. Por su función suelen fabricarse con materiales altamente reflectantes como aluminio pulido.

El área de apertura ( $A_0$ ) es la superficie de ingreso de la luz solar hacia el CPC. Su tamaño determina la cantidad de luz que puede capturar el CPC, como puede observarse en la *Figura 1.3* donde se muestran las características de un CPC.

El semi-ángulo de aceptación ( $\theta_{máx}$ ) es el ángulo formado por el eje central del CPC y la línea tangente al tubo receptor que pasa por el punto externo de la parábola, duplicar este ángulo abarca al área de apertura del CPC y define el rango de ángulos de los rayos incidentes que puede capturar el concentrador y redirigir al receptor. Un CPC bien diseñado puede captar luz dentro de un ángulo de aceptación amplio, lo que reduce la necesidad de sistemas de seguimiento solar (tracking).

La relación de concentración ( $C$ ) es la relación entre el área de apertura del CPC y el área del receptor. Matemáticamente, se define como:

$$C=A_0/A_r \quad (1-5)$$

Donde:  $A_0$ : Área de apertura

$A_r$ : Área de receptor

El rango general de esta relación está entre 2 y 10. El receptor (área de absorción) es la zona donde se concentra la luz solar reflejada por las superficies parabólicas. Puede ser un tubo absorbedor (en aplicaciones térmicas), una célula fotovoltaica (en aplicaciones de energía solar) o un fotocatalizador (en reactores fotocatalíticos). Está ubicado en la parte inferior del CPC, donde convergen los rayos reflejados. Debe estar diseñado para soportar altas intensidades de luz y, en algunos casos, altas temperaturas.

### 1.9.1 Ángulo de inclinación CPC

Factor importante en el uso de CPC es la inclinación del sistema, si bien este, no cuenta con seguimiento es deseable orientar el área de apertura dependiendo de la latitud a la que se encuentra el sistema. Pues el ángulo de incidencia de la radiación solar debe ser menor al semi-ángulo de apertura del CPC ( $\Theta_c$ ) para que la radiación llegue al receptor (Salgado, 2011) la *Figura 1.3* muestra los ángulos de inclinación en función de 4 fechas representativas de las estaciones del año, ángulos donde se manifiesta el mayor flujo radiativo.

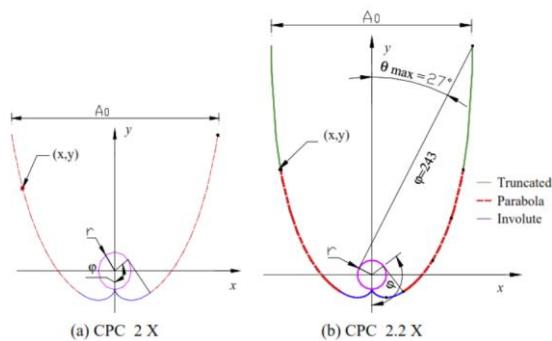


Figura 1.3 Diagrama de CPC parámetros útiles (Salgado et al., 2015)

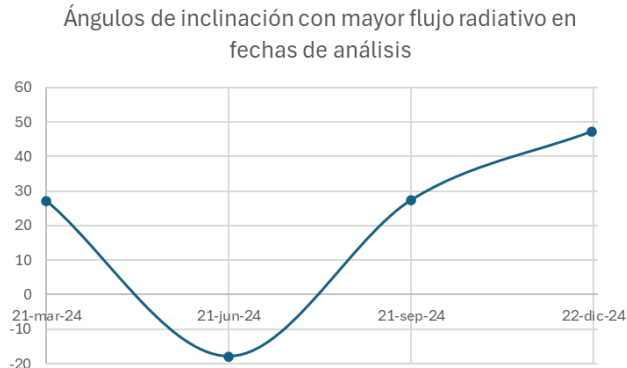


Figura 1.4 Ángulos con mayores flujos en fechas de análisis (Muhammad et al., 2013)

En latitudes muy elevadas donde los días son más cortos la contribución estacional será reducida drásticamente. Por otra parte, la naturaleza estática del sistema no permite sacar ventaja de los días largos del verano.

Los ángulos de inclinación del sistema en proyectos donde se busca maximizar el flujo radiativo, evalúan el flujo diario con distintos ángulos (Muhammad et al., 2013) un análisis de estos resultados indica, el ángulo de inclinación con mayor recolección es cercano al promedio del ángulo cenital en el intervalo de horas vecinas al medio día solar (ángulo azimut solar de  $0^\circ$  o  $180^\circ$ ).

El eje axial del receptor usualmente se dispone en la dirección este-oeste para optimizar la recolección anual de rayos solares (Peña, 2018). Esta investigación utiliza la disposición este-oeste del sistema en los resultados ulteriores.

## 1.9.2 Material del absorbedor en reactor de CPC

El diseño del CPC fotocatalítico implica la selección de un material para el absorbedor, este estudio valora los parámetros de absorbancia, transmitancia, reflectancia y refracción del absorbedor además de la reflectancia de las parábolas compuestas mediante trazado de rayos con el software Tonatiuh. La metodología está basada en los principios físicos de la óptica geométrica, presentando ventajas frente a los enfoques experimentales. La valoración de los materiales mediante un enfoque experimental, está limitado por la geometría del sistema con múltiples reflexiones de la luz y la necesidad de piranómetros capaces de adaptarse a la curvatura del absorbedor, la simulación permite hacer una evaluación de geometrías complejas sin coste adicional, permitiendo reconstruir fielmente la geometría del CPC: involuta, parábolas y absorbedor, este enfoque captura las pérdidas por reflexiones múltiples o dispersión, estos factores no han sido valorados en los diseños contemporáneos Salgado et al. (2015), la selección de vidrio de borosilicato como absorbedor, está basada en su parcial transparencia en el espectro UV y su compatibilidad con el  $\text{TiO}_2$  pues, “el vidrio tiene un band gap de 4.19 eV ( $\lambda_{\text{vidrio}}=296\text{nm}$ ), por lo que actúa como un filtro UV a longitudes de onda por debajo de 296 nm. A longitudes de onda más largas, el vidrio es transparente para la radiación electromagnética, por lo que, permite la excitación de  $\text{TiO}_2$  con un band gap de 3.3 eV que corresponde a una longitud de onda de 376 nm. El  $\text{TiO}_2$  tiene una absorción máxima de 330 nm, que decrece a niveles despreciables alrededor de los 295 nm” y “La baja reflectancia observada en los tubos, tanto especular como difusa (hasta 4%), en el espectro de interés”. Por su parte Blanco (2005) menciona, "con respecto a los materiales válidos como reactores para procesos de fotocatalisis, la necesidad de tener una

elevada transmisividad en el UV y una elevada resistencia a la degradación hace que las posibilidades de elección sean limitadas. Entre las posibles alternativas se encuentran los fluoropolímeros (inertes químicamente, con buena transmisividad y resistencia y buenos difusores de luz UV), materiales acrílicos y varios tipos de vidrio (necesariamente con bajo contenido en hierro ya que éste absorbe UV). El cuarzo es también un material excelente pero muy costoso, lo que lo invalida desde un punto de vista práctico."

"La utilización de materiales plásticos puede ser una buena opción ya que existen diversos materiales (politetrafluoretileno, etileno-tetrafluoretileno, etilpropileno fluorado, materiales acrílicos, etc) que pueden ser extruídos en forma tubular y poseen las necesarias características de transmisividad y resistencia térmica, así como el mantenimiento de sus propiedades durante su uso a la intemperie. Sin embargo, una de sus principales desventajas es la necesidad de incrementar el espesor del material cuando se desea que el reactor soporte condiciones de presión medias o elevadas; otra es el hecho de que las conexiones normalmente pueden soportar menos presión debido a la falta de rigidez del material."

"El vidrio es otro material alternativo para fotorreactores. Sin embargo, el vidrio común no es adecuado ya que absorbe parte de la luz UV que llega al fotorreactor, debido al contenido en hierro. Por ello solo resultan adecuados aquellos vidrios que poseen un bajo contenido en hierro, como es el caso del borosilicato, opción que parece la más simple, económica y práctica en la actualidad." La precisión experimental está sujeta a errores de medición ambiental, las variables en el enfoque teórico permiten modificar ángulos, inclinación, etc.

## 1.10 Determinación de radiación incidente en soportes cubiertos de fotocatalizador

La propuesta de un sistema CPC con fotocatalizador impregnado en soportes múltiples, conduce a la búsqueda del mejor número de soportes y disposición espacial de los mismos, el criterio determinante para sistemas fotoactivos es la cantidad de radiación solar incidente, la determinación de este parámetro ofrece algunas dificultades:

### a) Complejidad geométrica del CPC

Las superficies reflectantes del CPC tienen una geometría compuesta (dos parábolas asimétricas) e involuta en la parte inferior del sistema, el rango de ángulos por los que los rayos solares pueden atravesar el área de apertura del sistema es amplio, si los rayos atraviesan el área serán reflejados y la dirección del rayo reflejado dependerá del punto de incidencia en la superficie, si el rayo es reflejado fuera del sistema este rayo no será aprovechado, por otra parte si el rayo alcanza el receptor el material del mismo puede cambiar la dirección del rayo refractado, resta determinar la superficie de soporte que alcanzará si es que de hecho el soporte es alcanzado, en conclusión, una buena valoración de la irradiancia en los soportes debe considerar la multiplicidad de las reflexiones múltiples.

La luz no tendrá una distribución uniforme en el receptor, el hemisferio superior del receptor recibirá esencialmente radiación directa mientras que la inferior será radiación concentrada y reflejada. Implementar múltiples soportes dentro del receptor provocará un efecto de sombreamiento entre soportes, reduciendo la irradiancia en ciertas áreas. El efluente susceptible a tratamiento fotocatalítico puede absorber, dispersar o refractar la luz. La fuente radiativa (luz solar) no opera bajo condiciones constantes, la intensidad y ángulo de los haces cambian a lo largo del día, por condiciones climáticas. Todos estos factores son parámetros que dificultan la tarea, enfrentar el problema de manera analítica implica una serie de suposiciones que ofrecen una respuesta que debe validarse con otros métodos. La solución experimental presenta la dificultad

de disponer piranómetros (instrumento que mide la radiación solar global, es decir, la radiación directa y difusa que incide sobre una superficie) dentro del receptor y sobre la multiplicidad de soportes, el espacio disponible dentro del receptor es muy reducido. Se ha propuesto diseñar sistemas ópticos utilizando el trazado de rayos (Hecht, 2000)

La ecuación de transferencia permite conocer la altura de incidencia de un rayo cuando es la segunda superficie que alcanza a partir de información de su relación con la primera superficie

## 1.11 Trazado de rayos

En un sistema ideado sobre el papel es matemáticamente posible enviar rayos a través del sistema y evaluar su comportamiento mediante el trazado de rayos, este procedimiento puede aplicarse a rayos paraxiales (rayo que incide sobre un sistema óptico, formando un ángulo muy pequeño respecto al eje óptico) desde el punto de vista conceptual se trata de aplicar la ecuación de refracción

$$n_i(\widehat{k}_i \times \widehat{u}_n) = n_t(\widehat{k}_t \times \widehat{u}_n) \quad (1-6)$$

Donde:  $\widehat{k}_i$ : vector unitario en la dirección incidente;  $\widehat{k}_t$ : vector unitario en la dirección del rayo refractado;  $\widehat{u}_n$ : vector normal a la superficie de separación entre los dos medios;  $n_i$ : índice de refracción del medio del rayo incidente y  $n_t$ : índice de refracción del medio del rayo refractado

a la primera superficie, localizar el punto donde el rayo transmitido incide sobre la segunda superficie y volver a aplicar la ecuación de refracción, así sucesivamente a través de todo el sistema. Originalmente se trazaban únicamente rayos meridionales (aquellos contenidos en el plano del eje óptico) pues los rayos no meridionales u oblicuos (aquellos que no cortan el eje) son matemáticamente más difíciles de manejar, para un ordenador la diferencia no es tan importante.

El análisis algebraico que toma en cuenta términos de orden superior en la expansión de la función característica. Alternativamente la trayectoria de los rayos puede ser determinada con elevada precisión con el uso de geometría elemental sucedida por la aplicación de la ley de refracción (o reflexión) a este proceso se conoce como trazado de rayos (Max Born, Principles of Optics)

### 1.11.1 Rayos oblicuos meridionales

Se considera a un rayo oblicuo meridional, por ejemplo, un rayo desde un punto objeto extra-axial. Sea A el polo de la primera superficie del sistema. La superficie se asumirá como esférica refractante de radio r centrada en el punto C, y separando medios con índices de refracción n y n'. Un rayo incidente OP (Figura 1.5) en el plano meridional es especificado por el ángulo U generado con el eje, y por la distancia L=AB entre el polo de A y el punto B en el que se encuentra con el eje. Sea I el ángulo entre el rayo incidente y la normal PC. Las cantidades correspondientes relativas al rayo refractado están denotadas por símbolos con prima.

La siguiente convención de los signos es usada: Las cantidades r, L y L' son positivas cuando C; B y B' están a la derecha de A, la luz se ha asumido incidente

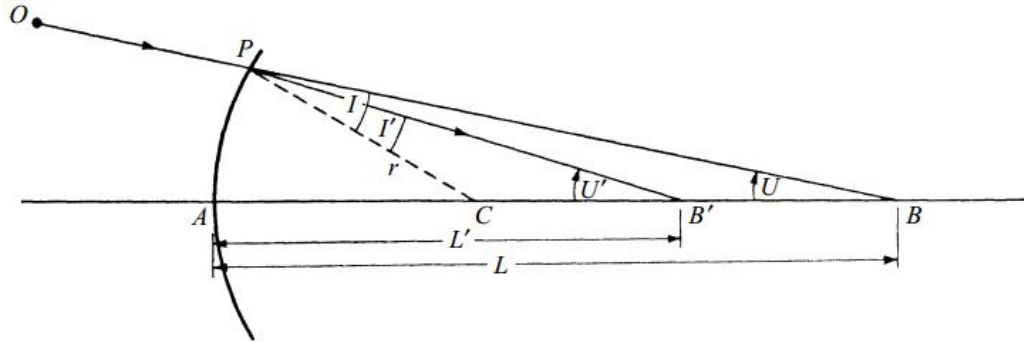


Figura 1.5 Notación usada en el trazado de un rayo oblicuo meridional

En la izquierda. Los ángulos  $U$  y  $U'$  son considerados positivos si el eje se puede hacer coincidir con los rayos  $PB$  y  $PB'$  con una rotación en el sentido horario de menos de  $90^\circ$  de  $B$  o  $B'$  respectivamente. Los ángulos  $I$  e  $I'$  son considerados positivos si los rayos incidentes y refractados se pueden hacer coincidir con la normal  $PC$  por una rotación en el sentido horario menor a  $90^\circ$  alrededor del punto  $P$  de incidencia.

Las cantidades  $L$  y  $U$  que definen el rayo incidente serán asumidas conocidas. Es necesario calcular  $L'$  y  $U'$ . Asumiendo también por el momento que  $L$  y  $r$  son finitas, se tiene, del triángulo  $PCB$ :

$$\sin I = \frac{L - r}{r} \sin U \quad (1-7)$$

Por la ley de refracción

$$\sin I' = \frac{n}{n'} \sin I \quad (1-8)$$

También de la Figura 1.5

$$U' = U + I - I' \quad (1-9)$$

Finalmente, del triángulo  $PCB'$ ,

$$L' = \frac{\sin I'}{\sin U'} r + r \quad (1-10)$$

Con la sucesiva aplicación de las ecuaciones de refracción (1-7)-(1-10), las cantidades  $L'$  y  $U'$  que especifican el rayo refractado  $PB'$ , son obtenidas.

El rayo refractado  $PB'$  ahora se convierte en el rayo incidente de la segunda superficie. Escribiendo  $L'_1$  en lugar de  $L'$  y  $U'_1$  en lugar de  $U'$ , denotando por  $L_2, U_2$  los valores correspondientes, con  $L_2$  referente al polo de la segunda superficie, tenemos las ecuaciones de transferencia

$$L_2 = L'_1 - d \quad (1-11)$$

$$U_2 = U'_1 \quad (1-12)$$

Donde:  $d > 0$  es la distancia entre los polos de las dos superficies.

Después de que los 'valores incidentes' dados por (1-11) y (1-12) son sustituidos en las ecuaciones de refracción (1-7)-(1-10). Resolviendo para las cantidades con prima, es entonces el rayo trazado a través de la segunda superficie. En este sentido, por la aplicación repetida de la refracción y las ecuaciones de transferencia, los valores  $L'$  y  $U'$ , relacionados con el rayo en el espacio de la imagen, son obtenidos. El punto de intersección de este rayo con el plano de la imagen puede también ser determinado. En la práctica, uno podría no simplemente trazar un rayo individual, sino un número adecuado de rayos seleccionados a través del sistema; sus puntos de intersección con el plano en la imagen pueden entonces dar una aproximación estimada del desempeño del sistema.

Si una de las superficies (digamos la  $k$ -ésima) es un espejo, la formulación apropiada por ser usada podría ser deducida formalmente por las superficies precedentes ajustando  $n'_k = -n_k$ . Entonces  $d_k$  puede ser considerada negativa. Además, el resto de los índices de refracción y los subsecuentes valores deben ser también considerados negativos, a menos que una segunda reflexión tome lugar, cuando se revertirán a signos positivos.

Después considerar los dos casos especiales que hasta ahora han sido excluidos. Si el rayo incidente es paralelo al eje ( $L=\infty$ ) la ecuación

$$\sin I = \frac{Y}{r} \quad (1-13)$$

Es usada en lugar de (1-7), donde  $Y$  es la distancia del rayo desde el eje (Figura 1.6 (a)).

Si la superficie es plana ( $L=\infty$ ) tenemos, el lugar de (1-7)-(1-10), el siguiente conjunto de ecuaciones (Figura 1.6 (b))

$$I = -U \quad (1-14)$$

$$\sin U' = \frac{n}{n'} \sin U \quad (1-15)$$

$$I' = -U' \quad (1-16)$$

$$L' = \frac{\tan U}{\tan U'} L \quad (1-17)$$

A causa de (1-15), (1-17) también puede escribirse en la forma

$$L' = \frac{n' \cos U'}{n \cos U} L \quad (1-18)$$

lo cual es más conveniente para el cálculo que (1-17) si los ángulos son pequeños.

Es útil determinar también las coordenadas ( $Y_k, Z_k$ ) del punto  $P_k$  de incidencia en la superficie  $k$ -ésima, y la distancia  $D_k=P_kP_{k+1}$  entre dos puntos de incidencia sucesivos (Figura 1.7).

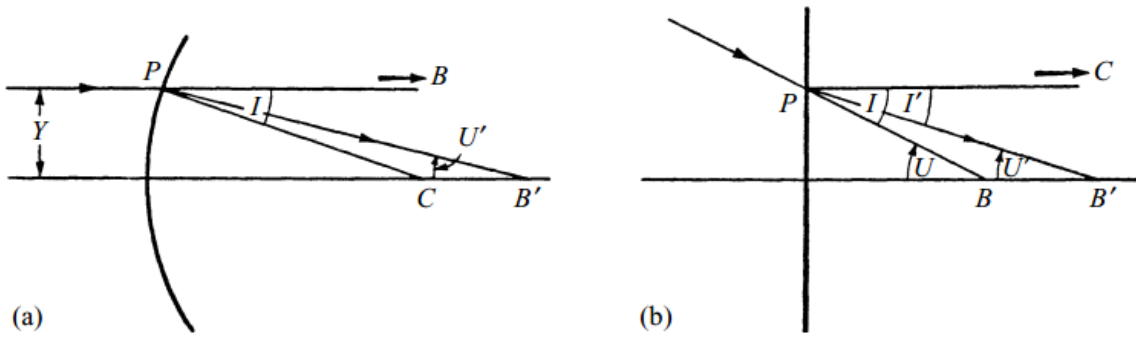


Figura 1.6 Casos especiales: (a)  $L=\infty$ ; (b)  $r=\infty$

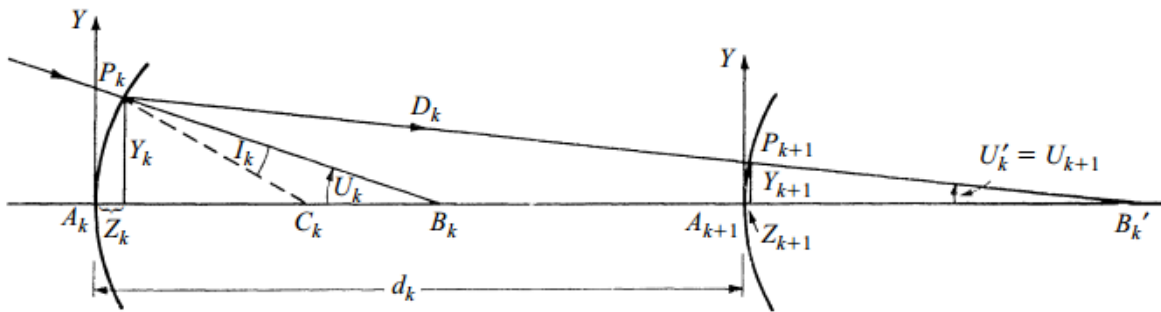


Figura 1.7 Trazado de rayo oblicuo meridional a través de dos superficies refractivas sucesivas

De la figura,

$$Y_k = r_k \sin(U_k + I_k) \quad (1-19)$$

$$Z_k = r_k - r_k \cos(U_k + I_k) = \frac{Y_k^2}{[1 + \cos(U_k + I_k)]r_k} \quad (1-20)$$

$$D_k = (d_k + Z_{k+1} - Z_k) \sec U'_k \quad (1-21)$$

En términos de  $Y_k$ ,  $Z_k$  y  $U'_k$

$$L'_k = Z_k + \frac{Y_k}{\tan U'_k} L' = \frac{n' \cos U'}{n \cos U} L \quad (1-22)$$

Esta relación puede utilizarse para comprobar el valor calculado a partir de (1-17).

En el caso especial en el que  $L_k$  es infinito,  $U_k = 0$ , y (1-19)–(1-22) siguen siendo válidos. Si  $r_k$  es infinito,  $Y_k$  puede calcularse a partir de la relación

$$Y_k = L_k \tan U_k \quad (1-23)$$

$Z_k$  entonces se convierte en cero.

### 1.11.2 Rayos paraxiales

Si la inclinación de un rayo respecto del eje es suficientemente pequeña, los senos de los diversos ángulos pueden reemplazarse, en las fórmulas anteriores, por los propios ángulos. Las fórmulas se reducen entonces a la aproximación gaussiana para la trayectoria de la luz. Estas "fórmulas de trazado de rayos paraxiales" se utilizan en la práctica para calcular la magnificación gaussiana y la distancia focal del sistema. Por lo tanto, aquí se dará un breve resumen de estas fórmulas.

Es habitual denotar las cantidades que se refieren a la región paraxial con letras minúsculas. Las ecuaciones de refracción (1-7)–(1-10) se convierten en

$$i = \frac{l-r}{r}u \quad (1-24)$$

$$i' = \frac{n}{n'}i \quad (1-25)$$

$$u' = u + i + i' \quad (1-26)$$

$$l' = \frac{i'}{u'}r + r \quad (1-27)$$

Las ecuaciones de transferencia (1-11) y (1-12) toman la forma

$$l_2 = l'_1 + d \quad (1-28)$$

$$u_2 = u'_1 \quad (1-29)$$

De manera similar, las ecuaciones paraxiales para los casos  $L = \infty$  y  $r = \infty$  se obtienen de (1-13)–(1-17).

La ecuación paraxial para la altura de incidencia, necesaria más adelante, se deduce de (1-19):

$$y_k = r_k(u_k + i_k) \quad (1-30)$$

Aunque las relaciones (1-24)–(1-27) involucran los ángulos que el rayo incidente y el rayo refractado forman con el eje,  $l'$  es independiente de estas cantidades. Este resultado, establecido de manera diferente se obtiene cuando  $i$ ,  $i'$  y  $u'$  se eliminan de las relaciones anteriores. Entonces se encuentra que,  $u$  también desaparece, y obtenemos  $n'$

$$n' \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{l'} \right) = n \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{l} \right) \quad (1-31)$$

Esto se reconocerá como la relación de Abbe.

Para determinar la ampliación gaussiana lateral  $M$ , sólo es necesario trazar un rayo paraxial desde el punto axial del objeto. Entonces,

$$M = \frac{n_1 u_1}{n_l u_l} \quad (1-32)$$

donde los subíndices 1 e  $l$  se refieren al primer y último medio.

La distancia focal  $f'$  del sistema se puede obtener trazando un rayo paraxial a cualquier altura deseada  $y_1$  desde un objeto infinitamente distante. La ecuación del rayo conjugado en el espacio de la imagen, referida a los ejes en el segundo punto focal, es entonces  $y_1$  y se sigue de (1-16) que

$$f' = -\frac{y_1}{u_l'} \quad (1-33)$$

El tratamiento de rayos no coplanares con el eje, denominados rayos oblicuos, su análisis se lleva a cabo en sistemas con aperturas muy altas, el software de trazado de rayos los valora.

## 1.12 Simulación

### 1.12.1 Tonatiuh

Tonatiuh es un software de código abierto, basado en el método Monte Carlo para trazado de rayos, útil para simular el comportamiento del flujo radiativo en sistemas de concentración solar (Blanco et al, 2009). El Método Monte Carlo es una técnica matemática para estimar soluciones de problemas complejos, a través de secuencias de números aleatorios, por lo que se puede asociar a un método probabilístico. La precisión del método depende del número de rayos de trazado. Útil con fenómenos dependientes de muchas variables. En el área de transferencia radiativa este método valora las propiedades ópticas de los materiales (absorción, emisión, reflectancia y transmisividad), evalúa la trayectoria a través del material, de un número elevado de rayos (fotones) y las interacciones ópticas con el medio, además de las superficies del entorno. El método de Monte Carlo es capaz de modelar superficies rugosas o dispersión de luz en medios volumétricos como niebla o agua.

El trazado de rayos es un método determinista, por ejemplo; si un material refleja el 70 % de la energía y absorbe el 30 %, todos los rayos son parcialmente reflejados y absorbidos, reduciendo la energía de cada rayo un 30 %. En el caso del método Monte Carlo con Trazado de Rayos cada rayo recibe un tratamiento individual con dos opciones absorción o reflexión totales, cuyas probabilidades son 30 % y 70 %, respectivamente, en promedio 30 rayos serán absorbidos y 70 reflejados, empero, puede existir variación estadística, la ley de los grandes números indica mientras mayor sea la cantidad de rayos la proporción se acercará más a 70/30.

## 1.13 Analogías de transferencia de masa, energía y momento

Existen semejanzas entre las ecuaciones diferenciales y condiciones de frontera en fenómenos de transferencia de momento, energía y masa, cuando se expresan sus gradientes en función de variables adimensionales. Por lo que existen analogías entre los fenómenos de transferencia, esto debido a la semejanza de sus mecanismos y, por consiguiente: de sus modelos matemáticos, sin embargo, introducir términos de generación de masa o energía en las ecuaciones de masa o energía invalidaría su aplicación, pues no aparecerían en los modelos semejantes, por lo que la adecuada aplicación de las analogías está sujeta a las siguientes condiciones:

1. Las propiedades físicas deben ser constantes.
2. Que no haya producción de energía o masa dentro del sistema. Esto implica que no pueden ocurrir reacciones químicas homogéneas.
3. Que no exista emisión o absorción de energía radiante.

4. No hay disipación viscosa.
5. El perfil de velocidad no está afectado por la transferencia de masa, por lo cual hay una transferencia lenta de masa.

Estos factores alterarían la equivalencia estructural. La primera condición garantiza la linealidad de los modelos, por ejemplo, cuando la temperatura modifica la viscosidad. La segunda condición se limita a reacciones homogéneas pues estas implican considerar un término de generación o consumo en los modelos, en contraposición a las reacciones heterogéneas, donde la contribución es asociada a una condición de frontera respetando la similitud matemática, la tercera consideración implica que los resultados derivados de las analogías solo considerarán el mecanismo convectivo y conductivo en la transferencia de calor.

### 1.13.1 Analogía de Reynolds

Reynolds postuló que los mecanismos de transferencia, energía y momento en las capas límites eran idénticos, esta condición se cumple cuando el número de Prandtl es igual a la unidad. Este postulado puede ampliarse a la transferencia de masa cuando el número de Schmidt es igual a la unidad. Los perfiles de velocidad y concentración dentro de las capas límite están relacionados por medio de:

$$\left[ \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{c_A - c_{A,s}}{c_{A,\infty} - c_{A,s}} \right) \right]_{y=0} = \left[ \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{v_x}{v_\infty} \right) \right]_{y=0} \quad (1-34)$$

En la frontera próxima a la placa, donde  $y=0$ , el flujo de masa puede expresarse como función de la difusividad de masa o el coeficiente de transferencia de masa con la ecuación

$$N_{A,y} = -D_{AB} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (c_A - c_{A,s}) \right]_{y=0} = k_c (c_{A,s} - c_{A,\infty}) \quad (1-35)$$

La combinación de las ecuaciones 1 y 2 resulta en una expresión que relaciona el coeficiente de transferencia de masa con el gradiente de la velocidad en la superficie

$$k_c = \frac{\mu}{\rho v_\infty} \left[ \frac{\partial v_x}{\partial y} \right]_{y=0} \quad (1-36)$$

El gradiente de velocidad se relaciona con el coeficiente de fricción superficial mediante la expresión

$$C_f = \frac{\tau_0}{\rho v_\infty^2 / 2} = \frac{2\mu \left[ \frac{\partial v_x}{\partial y} \right]_{y=0}}{\rho v_\infty^2} \quad (1-37)$$

Con esta expresión se puede reordenar la ecuación 3 para obtener la analogía de Reynolds de transferencia de masa correspondiente a los sistemas cuyo número de Schmidt es igual a uno,

$$\frac{k_c}{v_\infty} = \frac{C_f}{2} \quad (1-38)$$

La ecuación (1-33) es análoga a la analogía de Reynolds de transferencias de energía, es válida cuando  $Sc$  es cercano a 1 y su resistencia al flujo se debe a la fricción superficial. No debe usarse para describir situaciones donde exista un arrastre de forma.

Prandtl propone el concepto de subcapa laminar también conocida como capa viscosa, una región delgada cercana a una superficie sólida en un flujo turbulento, en esta zona los efectos viscosos se imponen a los turbulentos, comportándose el flujo de manera laminar incluso si el flujo global es turbulento, el espesor adelgaza al aumentar el número de Reynolds.

### 1.13.2 Diámetro hidráulico

El diámetro hidráulico ( $D_h$ ) es útil al analizar el flujo en tuberías no circulares o parcialmente llenas, por extensión calcular el número de Reynolds, permitiéndonos conocer el régimen de flujo en sistemas complejos, está definido como:

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (1-39)$$

Donde:  $D_h$ : diámetro hidráulico; A: área transversal del flujo y P: perímetro mojado.

Mientras mayor es el diámetro hidráulico más eficiente es el transporte de fluido. En geometrías como ductos rectangulares, flujo en tuberías parcialmente llenas o sistemas donde el área de flujo no es una sección circular simple, este parámetro permite extender la aplicación conceptos como el número de Reynolds, simplificando el análisis de flujos turbulentos o laminares en geometrías complejas.

## 1.14 Gradiente de velocidad superficial

El gradiente de velocidad es una entrada necesaria en el modelo del coeficiente de transferencia de masa de la analogía de Reynolds. La solución analítica del sistema de flujo anular entre cilindros concéntricos de radio interior y exterior,  $\kappa R$  y  $R$  respectivamente se muestra a continuación:

$$v_z = \frac{(p_0 - p_L)R^2}{4\mu L} \left[ 1 - \frac{r^2}{R^2} - (1 - \kappa^2) \frac{\ln \frac{r}{R}}{\ln \kappa} \right] + v_0 \frac{\ln \frac{r}{R}}{\ln \kappa} \quad (1-40)$$

Derivando respecto a  $r$ , para obtener el gradiente de velocidad:

$$\frac{dv_z}{dr} = -\frac{(p_0 - p_L)R}{2\mu L} \left[ \frac{r}{R} + \frac{(1 - \kappa^2)}{r/R \ln \kappa^2} \right] + \frac{v_0}{r \ln \kappa} \quad (1-41)$$

Donde:  $v_0$ : velocidad de cilindro interno;  $p_0$ : presión a la entrada del sistema;  $p_L$ : presión a la salida del sistema

$$r = \kappa R \quad (1-42)$$

$$r_0 = 0.5 = \kappa(1.35); \kappa = 0.37$$

Esta solución será útil al compararla con los valores derivados de la simulación para el sistema de flujo con un soporte anular y usar criterios de convergencia.

## 1.15 Coeficiente de transferencia de masa

El coeficiente de transferencia de masa,  $h_{\text{masa}}$  [=] m/s, cuantifica la velocidad en la interfase a la que un componente es transferido de una fase a otra, por el efecto de un gradiente de concentración.

Existen sistemas complejos donde no es posible determinar los perfiles de concentración, limitándose al conocimiento de la concentración en dos puntos, en estos casos el uso de coeficientes de transferencia de masa es de utilidad (Lobo R., 2007). Se sugiere su aplicación cuando la región de transporte de masa no es conocida y los perfiles de velocidad en la vecindad del sólido son desconocidos; se conoce la concentración de soluto en la superficie del sólido y la concentración promedio del soluto en el seno del sólido a lo largo de la disolución. Para determinar la disolución de sólido por unidad de tiempo  $W_A$  se supone: proporcionalidad con la diferencia de concentración entre el líquido superficial del soluto y el seno del fluido; proporcionalidad con el área superficial.

$$W_A = h_{\text{masa}} \Delta C_A A_S = k_c (C_{A1} - C_{A2}) A_S \quad (1-43)$$

$k_c$  es conocido como el coeficiente de transferencia de masa, al dividir entre el área superficial el flujo total

$$\frac{W_A}{A_S} = N_A = h_{\text{masa}} \Delta C_A = h_{\text{masa}} (C_{A1} - C_{A2}) \quad (1-44)$$

$N_A$  valora el flux difusivo y convectivo

El coeficiente de transferencia de masa no depende de la solubilidad, área del sólido o volumen de la solución; depende de la agitación y viscosidad de la solución. Por lo tanto, no es una propiedad del sistema.

Para cuantificar el transporte de masa hay dos alternativas fundamentales: la ley de Fick y el modelo de coeficiente de transporte de masa. La elección depende de que queremos conocer y que es posible medir en el modelo de Fick, el flux es proporcional al gradiente de concentración, el modelo de coeficiente de transferencia de masa el flux es proporcional a una diferencia de concentración.

El modelo de capa límite permite calcular teóricamente el coeficiente de transferencia de masa, sin embargo, al implicar una geometría y condiciones de flujo específicas, un cambio en ellos implica, volver a determinar el coeficiente. Otras alternativas como los modelos de película, penetración y renovación de la superficie requieren parámetros determinados experimentalmente.

### 1.15.1 Capa límite hidrodinámica

El efecto de frenado de un fluido sobre una superficie está relacionado con el esfuerzo de corte, hasta una distancia donde los efectos de frenado son despreciables, el flujo del fluido puede esquematizarse por dos regiones, la región donde los gradientes de velocidad y los esfuerzos de corte son grandes, conocida como capa límite, y la región externa donde estos efectos son insignificantes. La capa límite crece en la dirección del flujo, donde los efectos viscosos penetran en la región de flujo no viscoso. Relevante para fenómenos donde exista transporte convectivo. El desarrollo del factor de fricción está basado en el concepto de capa límite, su determinación implica el conocimiento del esfuerzo de corte dependiente del gradiente de velocidad en la superficie.

### 1.15.2 Capa límite de concentración

En el flujo sobre una placa construida por un compuesto ligeramente soluble en el fluido. Formará una capa límite hidrodinámica. Por otra parte, si la concentración superficial difiere de la concentración en el seno

del fluido se formará una capa límite de concentración por la difusión dentro de la capa hacia la corriente libre. La capa límite de concentración se define como la región donde existen gradientes de concentración, su grosor es el valor de “y” para el cual se cumple lo siguiente:

$$\frac{C_{Ai} - C_A}{C_{Ai} - C_{Ab}} = 0.99 \quad (1-45)$$

Donde:  $C_A$ : concentración de soluto;  $C_{Ai}$ : concentración de soluto en la interfase;  
 $C_{Ab}$ : concentración en la capa límite

La transferencia de masa ocurre por difusión y por convección natural originada por el gradiente de concentración. Sin embargo, si la solución es diluida, no es preocupante la convección inducida por la alta concentración de soluto. Debido a que se considera condición de no deslizamiento, la transferencia de masa en la interfase placa-fluido ocurre únicamente por difusión. La capa límite de concentración es importante por su relación con el coeficiente de transferencia de masa.

Si se resuelven las ecuaciones de capa límite hidrodinámica, se plantean y resuelven las ecuaciones que describen el perfil de concentración, se puede evaluar el perfil de concentración en la superficie y por tanto el coeficiente de transferencia de masa. Útil para determinar la transferencia de masa convectiva en la interfase placa-fluido.

Las condiciones de la capa límite de concentración influyen directamente en el gradiente de concentración superficial. Mientras el grosor de capa límite de concentración aumenta con z, la diferencia de concentración superficial y de seno del fluido es constante, ello implica que el gradiente de concentración disminuirá conforme z aumenta. Por lo tanto, el flux de masa en la interfase, como el coeficiente de transferencia de masa disminuyen conforme z aumenta.

## 1.16 Estado del arte

La investigación relacionada con el diseño de sistemas CPC fotocatalíticos es atendida bajo diferentes perspectivas: analítica, computacional, estocástica y experimental, en esta sección se analizan estudios contemporáneos y relevantes en esta área del conocimiento.

Peña et al. en el año 2018, evaluaron el desempeño estacional y anual de catalizador soportado en reactores solares fotocatalíticos acoplados a un CPC teóricamente. Mediante el uso de un modelo detallado para las películas de catalizador anatasa, basado en el método de matriz característica, a la par de simulaciones de Monte Carlo-trazado de rayos. El catalizador fue soportado en tubos de vidrio contenidos en un tubo de vidrio más grande que funciona como receptor del CPC. Los arreglos de cuatro, cinco y seis tubos fueron considerados. Se concluyó que, el arreglo de cuatro tubos presentó el peor desempeño, seguido por el caso de cinco tubos. La configuración de seis tubos supera la absorción del resto de casos, cuando la distancia entre los tubos es grande, con una mejora del 27 % anual respecto al caso de referencia y de 47 % respecto al peor caso escenario. Reyes et al. (2023) analizó el desempeño óptico e hidrodinámico de monolitos fotocatalíticos compuestos de  $TiO_2$  en un reactor tubular acoplado a un concentrador parabólico compuesto (CPC), para alcanzar su objetivo se usó un enfoque computacional, el modelado óptico uso simulaciones de Monte Carlo en monolitos de diferentes geometrías: cilindro, asteriscos con 2 a 8 lóbulos y flor, se consideraron diferentes fuentes luminosas, radiación difusa y colimada, se aplicaron las leyes de Snell y Fresnel para modelar las reflexiones y refracciones respectivamente, en las interfases. El tratamiento

hidrodinámico resuelve la ecuación de Poisson para flujo laminar, determinando el factor de fricción ( $f'$ ) y la fracción de vacío con métodos estocásticos. Se identificó que los monolitos con forma de asterisco de 5 lóbulos presentaron el mejor resultado de 9.6 % en potencia absorbida en comparación con el cilindro, la distribución de flujo por unidad de área es más uniforme con un valor de 4.61 W/m<sup>2</sup> y el factor de fricción de 10.8 mientras que el cilindro presenta 50.7 respectivamente. Las geometrías con cavidades aumentan la absorción, pero los perfiles de flujo son heterogéneos. La radiación difusa presenta perfiles de irradiancia uniformes, mientras que la colimada manifiesta picos. Barrón-Díaz et al. (2021) analizó el desempeño térmico en concentradores parabólicos compuestos (CPC) con absorbedores tubulares con aletas segmentadas y sin aletas, para aplicaciones residenciales. Usando simulaciones ópticas basadas en trazado de rayos en el software Tonatiuh, se mapeó la distribución de irradiancia en la superficie del absorbedor, por secciones, para valorar el flujo de calor. Se analizó mediante el software Abaqus FEM-CFD y fueron validados los resultados con datos experimentales de Mérida, México. Los resultados fueron, que la presencia de aletas incrementó la eficiencia térmica en un 37 % en comparación con el sistema sin aletas. Por su mayor capacidad de captar la radiación y transferir el calor al fluido, la tasa de flujo másico es un parámetro importante en el diseño de CPC. Nchikou et al. (2021) generó un modelo bidimensional de seis flujos (SMF-2D) para estimar el perfil de radiación de reactores fotocatalíticos en CPC's. A partir de una solución analítica de la ecuación de transferencia radiativa en coordenadas polares, integrando la ley del coseno de Lambert, técnicas de trazado de rayos y con ello calcular la tasa volumétrica local de absorción de fotones (LVRPA). El modelo fue validado al compararlo con simulaciones, las discrepancias son menores al 0.5 %. Se demostró que la carga de catalizador y la geometría del reactor influyen en la uniformidad de la absorción energética. En el estudio de Rasul et al. (2023), se evaluó el rendimiento hidrodinámico de un reactor fotocatalítico de placa plana con baffles superiores y elementos rugosos en la superficie reactiva, utilizando modelado computacional (CFD) y validación experimental. Se analizó el efecto de cuatro baffles y tres tipos de rugosidad: semicircular, triangular y rectangular, sobre la caída de presión, la transferencia de masa del ácido fórmico (contaminante) y la energía cinética turbulenta. Mediante simulaciones de flujo laminar ( $Re = 2150$ ) y turbulento ( $Re = 7500$ ), la combinación de baffles y rugosidad incrementó la cinética turbulenta en al menos un 8 % y mejoró la transferencia de masa hasta un 37 %, favoreciendo la degradación del contaminante. Los elementos cuadrados y triangulares generaron mayores caídas de presión (8 kPa en flujo turbulento) y esfuerzos cortantes en la pared (40 Pa), mientras que las rugosidades semicirculares mostraron un equilibrio entre eficiencia hidrodinámica y pérdidas de energía. Se concluyó que la disposición de estructuras promotoras de turbulencia optimiza la exposición del catalizador ( $TiO_2$ ) al flujo y a la irradiación. Balestrin et al. (2024) estudió un reactor fotocatalítico de laberinto anular con simulación de fluidos computacional (CFD) y diseño experimental Box-Behnken con el método de función de deseabilidad. Los parámetros estudiados fueron 3: número de aletas de 5 a 9, espesor de región anular de 5 a 25 mm y transmitancia de la solución del 35 % al 95 %, su objetivo fue minimizar el tiempo de degradación de contaminantes y su costo energético. Utilizando modelos cinéticos intrínsecos y considerando la distribución de la intensidad lumínica, identificaron que la transmitancia fue el factor más influyente, seguido del espesor y el número de aletas. La configuración óptima, con 9 aletas, 25 mm de espesor y 95 % de transmitancia, logró una mejora del 53 % en eficiencia respecto a un reactor anular convencional, gracias al aumento del área catalítica, la turbulencia y la exposición a la radiación. Este enfoque metodológico, basado en CFD y optimización estadística, destaca la importancia de la geometría y las condiciones lumínicas en el diseño de reactores.

## 1.17 Hipótesis

La disposición espacial de soportes tubulares cubiertas de  $\text{TiO}_2$  dentro de un reactor fotocatalítico acoplado a un concentrador parabólico compuesto (CPC) influye en la distribución de la irradiancia solar, el aumento en el número de soportes respecto a un soporte anular incrementará la irradiancia promedio, disminuirá el espesor de capa límite y aumentará el coeficiente de transferencia de masa, en el caso de cuatro soportes 30 %, 15 % y 20 % respectivamente.

## 1.18 Objetivo general

Analizar el flujo radiativo y la hidrodinámica, en los soportes catalíticos de un fotoreactor dentro de un concentrador parabólico compuesto de planta piloto, con uno a cuatro soportes, a través de la simulación computacional.

### 1.18.1 Objetivos específicos

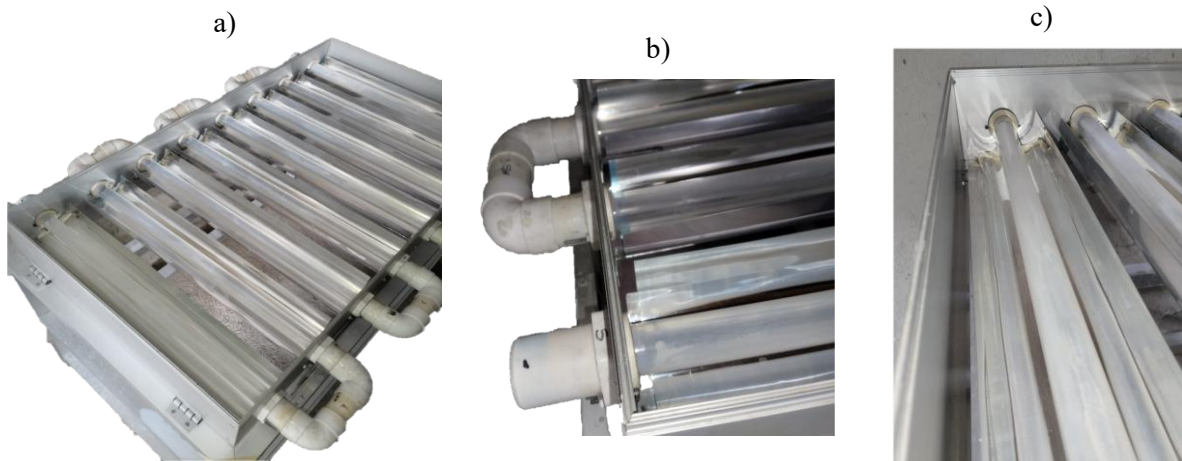
- Generar virtualmente el sistema CPC en Tonatiuh considerando las propiedades ópticas transmitancia, reflectancia y refractancia, de la superficie reflejante y del absorbedor, realizar la tarea correspondiente en COMSOL para el problema hidrodinámico, con sus condiciones de frontera.
- Evaluar el flujo de radiación solar en el seno del absorbedor cuando está constituido por vidrio, vidrio pyrex o cuarzo.
- Generar perfiles de flujo radiativo alrededor de los soportes fotocatalíticos, en sistemas compuestos por uno hasta cuatro soportes, variando la disposición geométrica de estas dentro del absorbedor, usando Tonatiuh.
- Determinar la caída de presión dentro del absorbedor cuando la posición y número de soportes varía de uno a cuatro con el software COMSOL.
- Calcular el coeficiente de transferencia de masa a partir del espesor de capa límite, determinado con fluidodinámica computacional.

## 2. Metodología

### 2.1 Geometría

#### 2.1.1 Sistema experimental

Se cuenta con un sistema de concentración solar múltiple CPC (*Figura 1*) este sistema es emulado en software computacional. Aquí son tratados efluentes contaminados con colorantes azoicos (*Figura 1a*), el fluido se hace circular por el sistema con una bomba a través de las interconexiones hidráulicas (*Figura 1b*) y a través del cilindro transparente de cuarzo (*Figura 1c*) con un flujo volumétrico de 0.116 l/s, este, se ha centrado en el eje focal del CPC, tal componente es el absorbedor del sistema y contiene al fluido por tratar, en el efluente se ha suspendido al fotocatalizador  $\text{TiO}_2$ , por lo que el absorbedor funciona como reactor. Este reactor fotocatalítico está integrado por 8 CPC, cada uno de ellos con un factor de concentración de 2 soles, la superficie de parábolas compuestas es reflectiva y está fabricada con aluminio. El proyecto está basado en este sistema y simula el comportamiento de uno de los CPC. Las simulaciones que buscan valorar la irradiancia al cambiar el material del absorbedor poseen las características de este sistema (fotocatalizador suspendido).



*Figura 2.1 Sistema CPC para tratamiento de agua residual a) CPC múltiple o concentradores b) interconexiones hidráulicas de concentradores c) proyección longitudinal CPC/absorbedor*

El sistema pretende ser modificado al implementar soportes cilíndricos para el fotocatalizador, el soporte se muestra en la *Figura 2.2* en a) individualmente y b) su disposición provisional dentro del absorbedor. El sistema con un soporte es el caso base comparativo con el resto de las disposiciones y número de soportes variable, en términos de irradiancia.

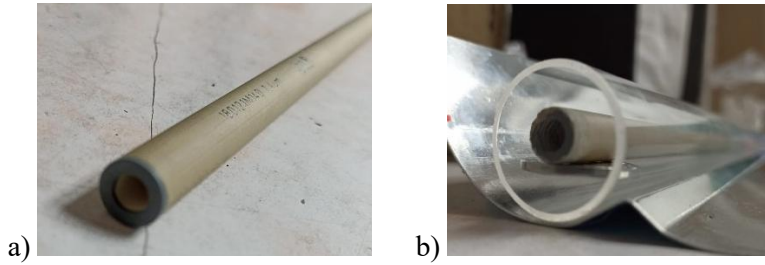


Figura 2.2 a) Membrana para soportar  $TiO_2$  en fase anatasa, b) Membrana dispuesta provisionalmente dentro de reactor de cuarzo

Las longitudes características del absorbedor con un soporte anular se representan en la Figura 2.3 y se listan en la Tabla 2.1.

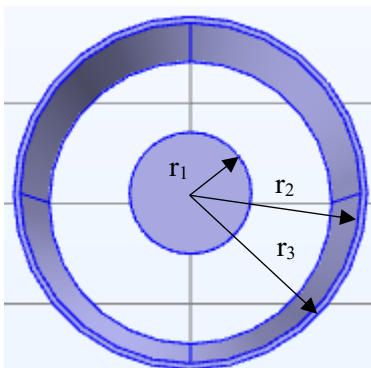


Figura 2.3 Radio de elementos en reactor de CPC;  $r_1=0.5\text{cm}$ ,  $r_2=1.35\text{cm}$  y  $r_3=1.45\text{cm}$

Tabla 2.1 Longitudes características sistema

Elemento	Longitud [=] cm
Tubo cuarzo, largo	60
Tubo cuarzo, radio interno ( $r_2$ )	1.35
Tubo cuarzo, radio externo ( $r_3$ )	1.45
Membrana (soporte), radio ( $r_1$ )	0.5

## 2.2 Simulación

### 2.2.1 Tonatiuh

#### Geometría en sistema computacional

Las geometrías en Tonatiuh se implementan a través de nodos, cada componente del sistema se asocia con un nodo raíz "Group Node" (Figura 2.4a), el sistema CPC, incluye al absorbedor y los soportes, con la finalidad de disponer al sistema en la dirección Este-Oeste, un nodo entero incluirá a todos estos componentes, esto facilita la rotación del sistema (rotation), tal característica es mostrada en la Figura 2.4b, la utilidad es seleccionar la disposición espacial de los elementos (translation), su escala (scaleFactor) y centro (center). Las geometrías son una rama de los nodos raíz denominados "Surface Node" (Figura 2.4a), para este proyecto se generará una geometría de proyección de CPC asimétrico, la Figura 2.4c muestra la diversidad de elementos geométricos incluidos en la paquetería de Tonatiuh.

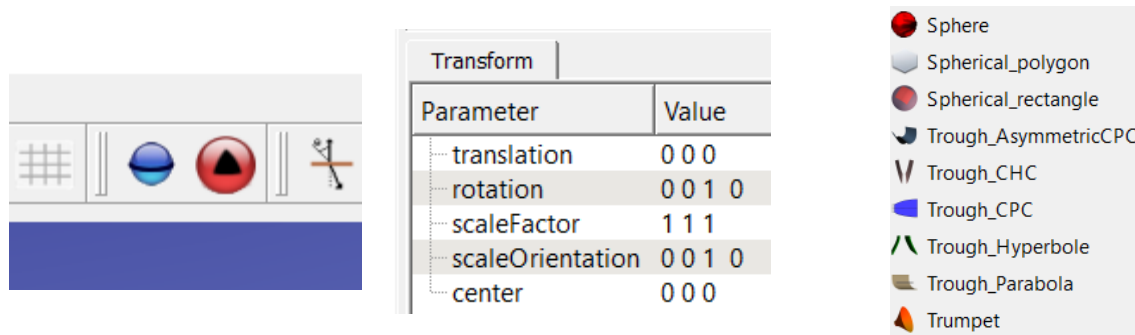


Figura 2.4 Elementos de selección, en interfaz de usuario Tonatiuh a) Nodos Tonatiuh Group Node (azul) y Surface Node (rojo) b) Transformaciones lineales de los componentes del sistema c) Geometrías disponibles

Los parámetros para la generación del CPC, su significado y valores asignados en este trabajo presentan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Parámetros de CPC en software Tonatiuh

Parámetro	Nomenclatura	Valor
Radio del tubo absorbedor	$r_{Int}$	0.013m
Radio exterior del tubo de vacío	$r_{Ext}$	0.015m
Ángulo de aceptación en el sentido horario, respecto al eje del CPC ( $\theta_{cw}$ )	AcceptanceAngleCW ( $\theta_{cw}$ )	1.14°
Ángulo de aceptación en sentido antihorario, respecto al eje del CPC, ( $\theta_{ccw}$ )	AcceptanceAngleCCW ( $\theta_{ccw}$ )	1.14°
Inclinación del plano de truncamiento respecto al eje horizontal ( $t_a$ )	truncationAngle ( $t_a$ )	0°
Altura del origen del plano de truncamiento ( $t_0$ )	truncationOrigin ( $t_0$ )	0.008°
Longitud	longitud	0.6m

Implementados los parámetros, el CPC resultante tiene una concentración de 2 soles y representa al sistema experimental, la Figura 2.5 muestra el sistema con una membrana, desde la perspectiva a) oblicua y b) axial b).

a)

b)

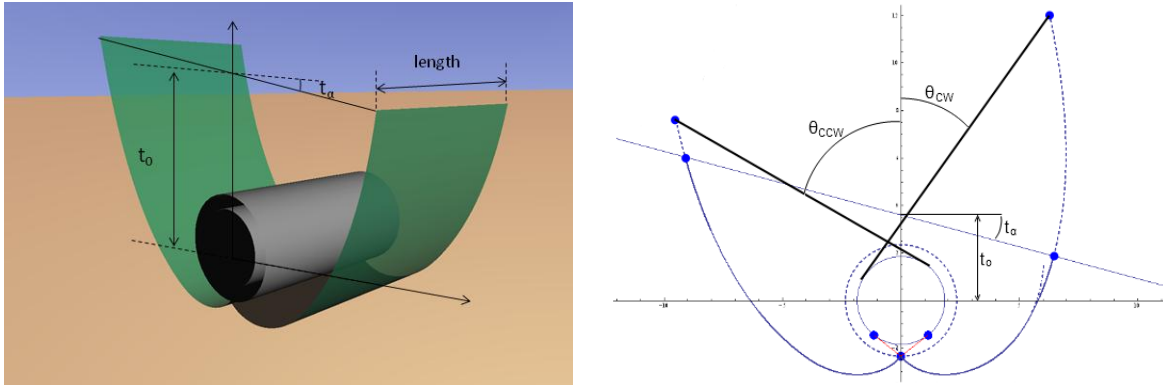


Figura 2.5 Representación de los parámetros para un sistema CPC a) perspectiva oblicua, desplazamiento de eje de truncamiento b) perspectiva axial, ángulos de aceptación (Tonatiuh, 2024)

Las características ópticas de los elementos generados son definidos con las opciones materiales, diferenciables por su interacción con la luz, superficies refractivas, especulares o especulares rugosas que ofrece el software, para el desarrollo del sistema ha se han usado: “Specular Estándar Material” para estudiar la reflexión de la luz (capacidad de proyectar el flux en la superficie material), con la finalidad de simular el comportamiento de la superficie involuta y parabólica del CPC, también ha sido usado en el soporte cubierto con el catalizador pues no es de nuestro interés determinar la reflexión de la luz en la superficie opaca. Los nodos materiales “Basic Refractive Material” sirven para evaluar la refracción de la luz a basado en los índices de refracción, esta clase de nodo será usado para definir el absorbedor como: vidrio, vidrio pyrex y cuarzo.

## 2.3 Forma de distribución energética solar

Este software utiliza como fuente al sol, la distribución radial energética, de esta fuente, no es puntual. Debido a la distancia entre el sol y la superficie terrestre, el sol puede considerarse un disco de diámetro

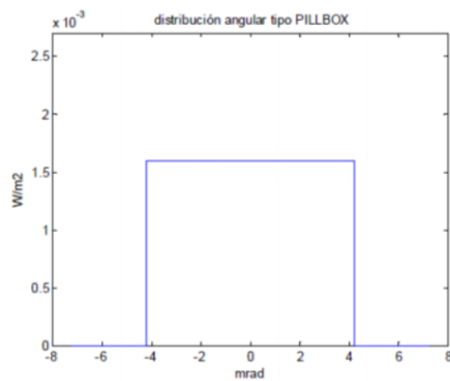


Figura 2.6 Distribución angular tipo Pillbox (Sanchez, 2016)

9.3 mrad, la luz solar proveniente de este disco que proyecta un cono con apertura angular de 9.3 mrad. Considera al sol como un disco con brillo constante con temperatura uniforme de 5777 K, se conoce como una distribución energética del tipo “pillbox” Figura 2.6 en la que se observa una distribución de disco achatado. La alternativa es considerar el atenuamiento estelar en la distribución energética al acercarse a los bordes, esta configuración se conoce como “Buie”, considerando la distancia estelar y longitudes del sistema, el sol será modelado bajo las directrices de una “pillbox”.

Los nodos materiales cuentan con una serie de características que deben considerarse *Tabla 2.3*, en el caso

Parameter	Value
reflectivity	0.97000003
sigmaSlope	2
sigmaSpecularity	0
distribution	NORMAL
mAmbientColor	0.5 0.5 0.5
mDiffuseColor	1.55 1.55 1.55
mSpecularColor	1.55 1.55 1.55
mEmissiveColor	0 0 0
mShininess	0.2
mTransparency	0

Figura 2.7 Parámetros superficiales para evaluación de calidad óptica en Tonatiuh

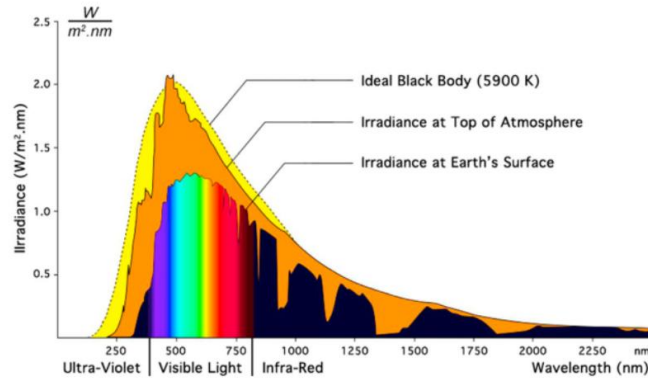
de las superficies especulares rugosas estándar. El software evalúa los errores reflectivos en sistemas experimentales donde pueden existir ondulaciones superficiales, deformaciones estructurales, efectos de no specularidad, etc, desviaciones del sistema reflectivo ideal, provocando variaciones angulares de la dirección normal, estos efectos se valoran con la herramienta “sigmaSlope” *Figura 2.7*, el valor “2” asociado hacer referencia a una distribución normal de los rayos solares. Los parámetros que tienen sufijo “Color” además de “mShininess” y “mTransparency” son características estéticas del simulador quedando fuera de nuestro análisis.

Tabla 2.3 Parámetros de superficies especulares rugosas estándar de software Tonatiuh

<b>Parámetro de simulación óptica</b>	<b>Concepto</b>
<i>sigmaSlope</i>	Distribución probabilística de los rayos solares definida, con el parámetro “distribution” este proyecto hace uso de una distribución NORMAL.
<i>mAmbientColor</i>	parámetro encargado del color de un objeto que refleja luz, por lo tanto, depende de la iluminación en la escena.
<i>mDiffuseColor</i>	Color base de un objeto.
<i>mSpecularColor</i>	Calidad reflectiva de los puntos destacados de un objeto.
<i>mEmissiveColor</i>	Para objetos brillantes este parámetro evalúa su luminosidad.
<i>mShininess</i>	Evalúa el brillo superficial de un objeto. Donde 0 es una superficie difusa y 1 para superficies pulidas.
<i>mTransparency</i>	Transparencia superficial, 0 opaca y 1 transparente.

### 2.3.1 Luz solar

La luz solar que alcanza el suelo terrestre tiene una longitud de onda dentro del rango 200-2500 nm, la *Figura 2.8* muestra la irradiancia terrestre dependiente de la longitud de onda, el espectro de luz UV tiene longitud de onda del orden  $< 380$  nm, la radiación solar tiene una componente de luz ultravioleta entre 3 % y 5 % (Wang et al., 2023). La actividad del fotocatalizador simulado,  $\text{TiO}_2$  es promovida por la radiación UV, por lo tanto, se considera este espectro de la composición en la radiación incidente en las propiedades ópticas de los componentes del sistema.



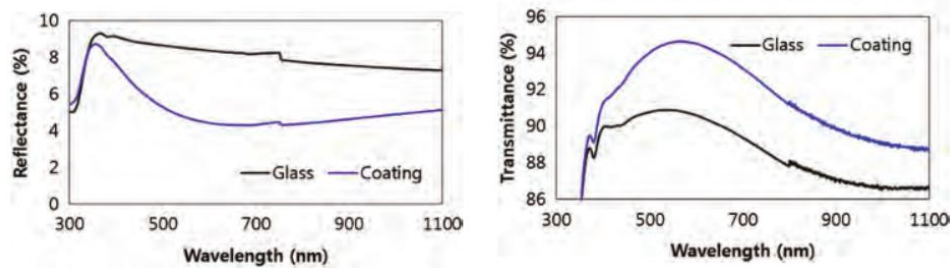
*Figura 2.8 Espectro teórico de cuerpo negro y espectro completo solar en la superficie Terrestre y la superficie atmosférica (Wang, et al., 2023)*

## 2.4 Propiedades ópticas del sistema

Las propiedades para los componentes son consideradas en el rango de longitud de onda 290-400 nm, este intervalo está asociado al espectro UV que activa los fotocatalizadores más usados entre ellos  $\text{TiO}_2$ , estos datos son alimentados en el software de trazado de rayos Tonatuh para evaluar el comportamiento de los sistemas, es de interés conocer la irradiancia sobre el soporte por lo que no se consideran las características ópticas del fotocatalizador, promoviendo el ajuste de datos con el catalizador pertinente.

### 2.4.1 Propiedades del absorbedor e involuta y parábola

Los valores de transmitancia y reflectancia para el absorbedor de vidrio están presentados gráficamente en la *Figura 2.9*, en donde se tiene una muestra de vidrio con y sin recubrimiento, la información relativa a la transmitancia de vidrio pyrex y cuarzo es presentada en la *Figura 2.10* y *2.11* respectivamente, los datos considerados para la evaluación de la transmitancia fueron discretizados de las figuras anteriores, ponderados con la ecuación 2.1 y se condensan en la *Tabla 2.4* Mientras que los valores de índice de refracción (desviación en la trayectoria del flux al atravesar el seno de un material) se muestran en la *Tabla 2.5*, los cuales fueron recuperados de la literatura. La ecuación de Beer-Lambert (ecuación 2.2) se utiliza para para obtener los datos de absorbancia presentados en la *Tabla 2.6* La reflectancia de la parte involuta y parabólica del CPC se construye generalmente con aluminio, este material cuenta con una reflexión de 92.68 % (Smith et al., 1997).



*Figura 2.9 a) Reflectancia y b) transmitancia de vidrio con y sin recubrimiento (Wonwook et al., 2016)*

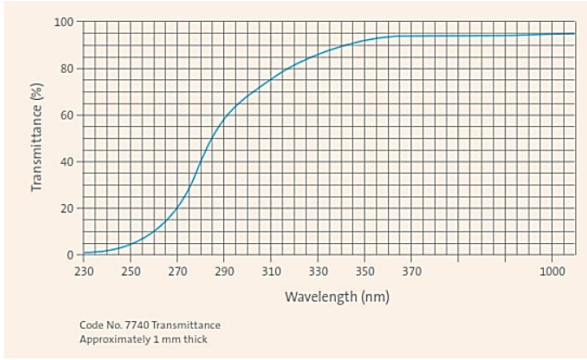


Figura 2.10 Transmitancia óptica de vidrio pyrex Código (Corning, 2023)

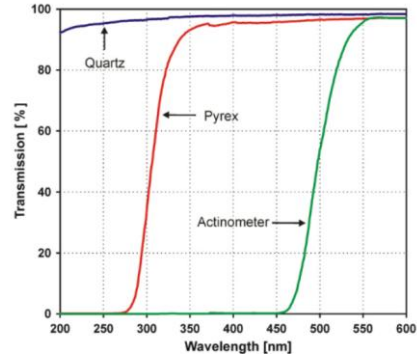


Figura 2.11 Transmittancia óptica de pyrex y cuarzo (Wonwook et al., 2016)

Los valores de transmitancia se determinan con el modelo de media ponderada (ecuación 1-33) (Freund et al., 1994)

$$x_w = \frac{\sum wx}{\sum w} \quad (2-1)$$

Donde,  $x_w$ : media ponderada de la propiedad  $x$ ,  $w$ : valor relativo y  $x$ : propiedad; subíndices, v: vidrio, p: pyrex y c: cuarzo

Ecuación de Beer-Lambert (Modest et al.)

$$A = -\log T \quad (2-2)$$

Donde, A: Absorbancia y T: Transmitancia

Tabla 2.4 Valores de transmitancia para los materiales

Longitud de onda (nm)	Transmitancia (%)		
	Vidrio (Wonwook et al., 2016)	Pyrex (Corning, 2023)	Cuarzo (Lukes et al., 2008)
280	0	40	96
300	20	68	97
320	30	82	97.5
340	80	90	98
360	89	93	98
380	89	94	98
400	90	94	98

<i>Media ponderada transmitancia (%)</i>		
$T_{w,v} = \frac{\sum wT_v}{\sum w} = 56.86$	$T_{w,p} = \frac{\sum wT_p}{\sum w} = 80.14$	$T_{w,c} = \frac{\sum wT_c}{\sum w} = 97.5$

Tabla 2.5 Valores de índices de refracción para los materiales

Material	Índice de refracción (n)
Vidrio	1.52 (Seward et al., 2005)
Pyrex	1.47 (Corning, 2023)
Cuarzo (sílice fundida)	1.458 (Zajac et al., 2003)

Tabla 2.6 Valores de absorbanza para los materiales

Material	Absorbancia
Vidrio	0.25
Pyrex	0.097
Cuarzo	0.011

## 2.5 Condiciones de radiación

Para entender las variaciones de irradiancia a lo largo del año, los fenómenos involucrados son la traslación y rotación terrestre, han sido simuladas fechas donde la radiación solar sobre el sistema es máxima o mínima o los días y noches tiene duración equivalente, con la finalidad de obtener una comparativa en distintos escenarios, la Tabla 2.7 muestra las fechas consideradas. El flujo solar es dependiente de la ubicación del sistema, todos los resultados están asociados a las coordenadas de la UAM Iztapalapa, ubicada en la Ciudad de México (19.362492 Norte, -99.075222 Oeste).

### 2.5.1 Fechas de análisis

La región de estudio según el tiempo universal coordinado es un parámetro necesario en el cálculo de la irradiancia solar en el software, la *Figura 2.12* muestra la disposición regional en el tiempo universal coordinado. La *Figura 2.13* muestra eventos anuales en la interacción solar-terrestre: el punto más cercano al sol (periapsis), el más alejado (apoapsis), a lo largo de la trayectoria de traslación terrestre, los días donde la actividad del sistema es prolongada debido a la mayor duración de las horas solares (solsticio) o los días donde los días y noches tiene duración equivalente (equinoccio), estos eventos son considerados en la selección de tiempos simulados.

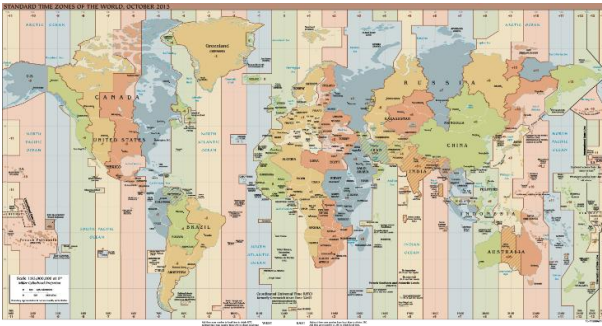


Figura 2.12 Mapa con tiempo universal coordinado, México en región -6

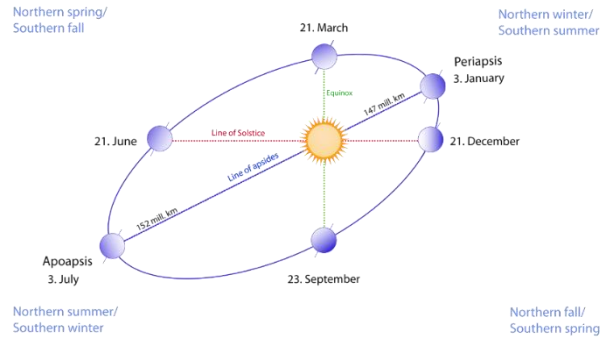


Figura 2.13 Traslación terrestre, representación de tiempos con distancias características

## 2.5.2 Inclinación del sistema

La Figura 2.14 muestra la interfase del software Tonatiuh al seleccionar las coordenadas y tiempo de simulación, asignadas las condiciones, se proyectan los ángulos acimut solar y cenital, en este caso para el día 21 de marzo, el ángulo acimut es cercano al medio día solar ( $180^\circ$ ), por lo tanto, se asigna el ángulo de inclinación del sistema en  $18^\circ$ , basado en el ángulo cenital de ese momento. Los ángulos de inclinación asignados a cada fecha se listan en la tercera columna de la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Fechas consideradas para la simulación y ángulo de inclinación del sistema CPC

<i>Evento</i>	<i>Fecha</i>	<i>Ángulo de inclinación</i>
<i>Fin invierno, inicio primavera, equinoccio</i>	21 de marzo	$18^\circ$
<i>Fin primavera, inicio verano, solsticio de verano</i>	21 junio	$-4^\circ$
<i>Fin verano, inicio otoño, equinoccio</i>	21 septiembre	$19^\circ$
<i>Fin otoño, inicio invierno</i>	21 diciembre	$43^\circ$

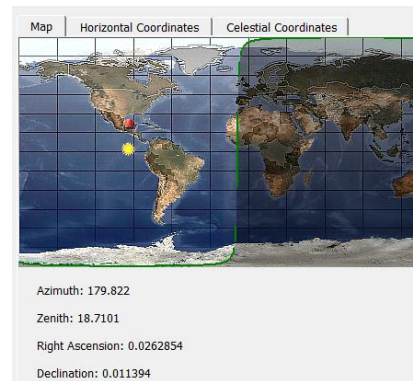






Figura 2.14 Interfaz Tonatiuh en la selección de tiempos de análisis

### 2.5.3 Identificación de sectores del absorbedor y soportes

Los perfiles de radiación dependen de la dirección de incidencia sobre el absorbedor o soporte dependiendo del caso de estudio, la *Tabla 2.8* muestra los diferentes sectores circulares asociados a la superficie estudiada, el primer sector apunta al sur ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ) y el segundo al norte ( $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ), estos sectores reciben radiación solar directa, la mayoría de estas superficies apuntan a la apertura del sistema disponiéndose en el hemisferio superior, el tercer sector apunta al norte ( $180^\circ$ ,  $270^\circ$ ) y cuarto al sur ( $270^\circ$ ,  $360^\circ$ ), estas caras apuntan a la superficie reflejante, por lo que, en su mayoría perciben radiación reflejada (concentrada), estos sectores pertenecen al hemisferio inferior.

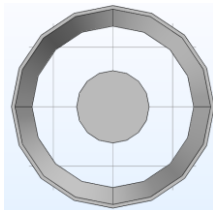
*Tabla 2.8 Sectores circulares de soporte con rango de ángulos y circunferencias asociados para absorbedor y soporte*

		<i>Absorbedor</i>	<i>Soporte</i>
Sector	Ángulo ( $^\circ$ )	Circunferencia (cm)	Circunferencia (cm)
	$(0^\circ-90^\circ)$	(0, 2.3)	(0, 0.8)
	$(90^\circ-180^\circ)$	(2.3, 4.6)	(0.8, 1.6)
	$(180^\circ-270^\circ)$	(4.6, 6.8)	(1.6, 2.4)
	$(270^\circ-360^\circ)$	(6.8, 9.1)	(2.4, 3.1)

### 2.5.4 Disposición de soportes

En esta sección se muestran las disposiciones de los soportes en las simulaciones realizadas y las coordenadas asociadas a los soportes en el sistema, se valoran de uno a cuatro soportes.

#### Un soporte



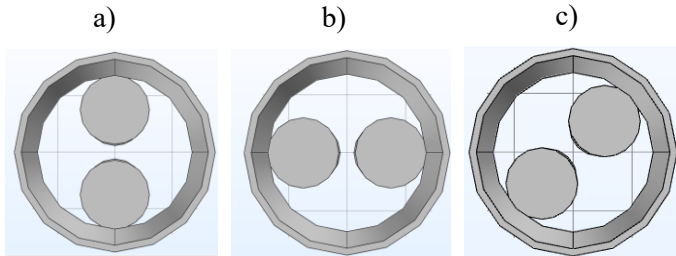
*Figura 2.15 Disposición espacial estudiada en sistema de un soporte*

La *Figura 2.15* muestra la configuración de un soporte anular con coordenadas (0,0), en proyección axial, el soporte será desplazado del ánulo en el intervalo  $\pm 3$  mm en la dirección vertical u horizontal, la superficie gris externa es la pared del absorbedor, el círculo interno es el soporte.

#### **Dos soportes**

Las limitaciones físicas del sistema contemplan que el diámetro interno del absorbedor es de 2.7 cm, si consideramos colocar dos soportes horizontales dentro del absorbedor con un diámetro de 1 cm, hay un espacio disponible de 0.7 cm. La distancia mínima sin traslape entre soportes ubica su centro a  $\pm 5$  mm del ánulo del absorbedor, con una distancia hasta la pared de 0.35 cm, mientras que en el caso donde los soportes entran en contacto con la superficie del absorbedor, el eje

será desplazado del ánulo del absorbedor 8.5 mm. Resultando en un intervalo de desplazamiento posible de 5 mm a 8.5 mm. Son valoradas las disposiciones equidistantes entre soportes y superficie del absorbedor en las tres disposiciones analizadas mostradas en la *Figura 2.16*, en las que se generan tres espacios de 2.33 mm. El ánulo de los soportes se encontrará en  $5 \text{ mm} + 1.166 \text{ mm} = 6.166 \text{ mm}$  desplazados del centro. El ánulo de los soportes se presenta en coordenadas rectangulares en la *Tabla 2.9*.



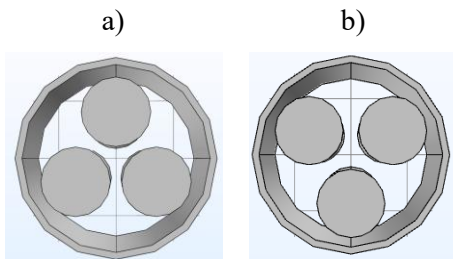
*Figura 2.16 Disposiciones espaciales estudiadas en sistema de dos soportes*

*Tabla 2.9 Coordenadas rectangulares de las disposiciones de dos soportes*

	<b>Soporte 1</b> <b>(x, y) [=] mm</b>	<b>Soporte 2</b> <b>(x, y) [=] mm</b>
a)	(0, 6.16)	(0, -6.16)
b)	(6.17, 0)	(-6.17, 0)
c)	(4.36, 4.36)	(-4.36, -4.36)

### **Tres soportes**

En esta distribución hay una separación angular de  $120^\circ$  entre los soportes, las disposiciones estudiadas son triangular y triangular invertida, pueden observarse en la *Figura 2.17*, donde los círculos grises internos representan los tres soportes y la superficie externa representa el absorbedor del sistema, la *Tabla 2.10* muestra la disposición cada uno de los soportes en coordenadas rectangulares.



*Figura 2.17 Disposiciones espaciales estudiadas en sistema de tres soportes*

*Tabla 2.10 Coordenadas rectangulares de las disposiciones de tres soportes*

	<b>Soporte 1</b> <b>(x, y) [=] mm</b>	<b>Soporte 2</b> <b>(x, y) [=] mm</b>	<b>Soporte 3</b> <b>(x, y) [=] mm</b>
a)	(0, 7.1)	(-6.15, 6.15)	(6.15, -3.55)
b)	(6.15, 3.55)	(-6.15, 3.55)	(0, -7.1)

### **Cuatro soportes**

En el arreglo de cuatro soportes estos, se han dispuesto con un ángulo equidistante de  $90^\circ$  en un arreglo romboidal y cuadrangular, estas características se muestran en la *Figura 2.18a y b* respectivamente. Como puede observarse en la figura las limitaciones físicas del sistema, acotan las regiones donde pueden disponerse los soportes, dejando una región de flujo libre en el ánulo, y disminuyendo el espacio entre el absorbedor y los soportes, la *Tabla 2.11 y 2.12* muestran las coordenadas asociadas a cada soporte en la disposición pertinente.

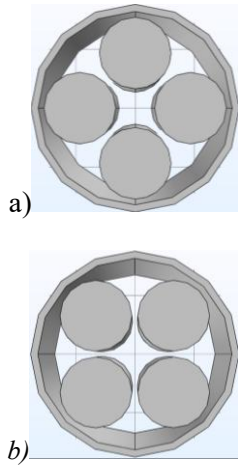


Figura 2.18 Disposición espacial estudiada en sistema de cuatro soportes: a) romboidal y b) cuadrangular

Tabla 2.11 Coordenadas rectangulares de 4 soportes dispuestos romboidalmente

<b>Soporte 1</b> <b>(x, y) [≠] mm</b>	<b>Soporte 2</b> <b>(x, y) [≠] mm</b>
(7.7, 0)	(0, 7.7)
<b>Soporte 3</b> <b>(x, y) [≠] mm</b>	<b>Soporte 4</b> <b>(x, y) [≠] mm</b>
(-7.7, 0)	(0, -7.7)

Tabla 2.12 coordenadas rectangulares de 4 soportes dispuestos cuadrangularmente

<b>Soporte 1</b> <b>(x, y) [≠] mm</b>	<b>Soporte 2</b> <b>(x, y) [≠] mm</b>
(5.44, 5.44)	(-5.44, 5.44)
<b>Soporte 3</b> <b>(x, y) [≠] mm</b>	<b>Soporte 4</b> <b>(x, y) [≠] mm</b>
(-5.44, -5.44)	(5.44, -5.44)

## 2.6 Condiciones hidrodinámicas del sistema

### 2.6.1 Diámetro hidráulico ( $D_h$ )

Para analizar el comportamiento hidrodinámico del sistema deben establecerse las condiciones de flujo el uso del diámetro hidrodinámico es una suposición que permite conocer el régimen de flujo a través del número de Reynolds asumiendo está es la longitud característica del sistema, los cálculos relativos, se presentan a continuación. La determinación del área transversal ( $A_n$ ) para un sistema de n-soportes (n-cilindros), se presenta como:

$$A_n = \pi R_{ext}^2 - n\pi R_s^2 = \pi(R_{ext}^2 - nR_s^2) \quad (2-3)$$

Donde:

$A_n$ : Área transversal de sistema con n-soportes;  $R_{ext}$ : Radio de cilindro externo (absorbedor);

$R_s$ : Radio de cilindro interno (soporte).

Para el perímetro mojado ( $P_n$ ), se considera la pared interna del absorbedor y la externa del soporte, resultando en:

$$P_n = 2\pi R_{ext} + 2\pi nR_s = 2\pi(R_{ext} + nR_s) \quad (2-4)$$

Por último, el diámetro hidráulico ( $D_h$ ) para un sistema de flujo anular de cilindros concéntricos es:

$$D_{h,n} = \frac{4A_n}{P_n} = \frac{4\pi(R_{ext}^2 - nR_s^2)}{2\pi(R_{ext} + nR_s)} = \frac{2(R_{ext}^2 - nR_s^2)}{R_{ext} + nR_s} \quad (2-5)$$

En el sistema a de un soporte el diámetro hidráulico es el doble del espacio radial entre el cilindro interno y la tubería externa. En la descripción del sistema experimental de esta metodología se comparten los

parámetros necesarios para la determinación de  $D_{h,1} = 0.017 \text{ m}$ ,  $A = 4.938 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ , cuando el catalizador ha sido suspendido el flujo volumétrico alimentado al sistema es de  $0.116 \text{ l/s}$ , con una velocidad de  $0.235 \text{ m/s}$ , estos parámetros permiten conocer el número de Reynolds = 3995, régimen de transición, cercano al umbral inferior de régimen turbulento.

Para el sistema de un soporte con régimen de flujo laminar se cumple:

$$Re = 2000 = \frac{v(0.017 \text{ m})}{1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} \quad (2-6)$$

De donde puede determinarse la velocidad  $v = 0.1176 \text{ m/s}$ , asociada a un flujo volumétrico de

$$Q = vA = 0.1176 \frac{\text{m}}{\text{s}} (4.938 \times 10^{-4} \text{ m}^2) = 5.8071 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \left( \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} \right) = 5.8071 \times 10^{-2} \frac{\text{l}}{\text{s}} \quad (2-7)$$

Tabla 2.13 Parámetros hidrodinámicos dependientes del número de soportes

Sistema de n-soportes	$P_n$ [=] m	$A_n$ [=] $\text{m}^2$	$D_{h,n}$ [=] m	Velocidad de fluido [=] m/s a $Re=2000$	Flujo volumétrico másico [=] l/s-kg/s
1	0.1162	4.94E-04	0.0170	0.1176	0.0581
2	0.1477	4.15E-04	0.0113	0.1777	0.0738
3	0.1791	3.37E-04	0.0075	0.2657	0.0895
4	0.2105	2.58E-04	0.0049	0.4073	0.1052

## 2.7 Cálculo de gradiente de velocidad superficial en la dirección normal al soporte

Cuando un vector  $v$  se multiplica por un escalar  $s$ , el vector resultante  $sv$  apunta en la misma dirección que  $v$ , aunque su longitud es distinta. El producto escalar entre los vectores  $v$  y  $w$ , es la magnitud de  $w$  multiplicada por la proyección de  $v$  sobre  $w$  o viceversa. Sin embargo, cuando a un tensor  $\tau$  se aplica el producto punto con  $v$ , el vector resultante  $[\tau \cdot v]$  difiere de  $v$  tanto en longitud como en dirección, es decir, el tensor  $\tau$  desvía al vector  $v$  para formar un nuevo vector que apunta en dirección diferente (Bird et al., 2006). El objeto de nuestro interés es calcular el gradiente de velocidad en la dirección normal a la superficie del soporte, en coordenadas rectangulares, el procedimiento para esta empresa es normalizar las componentes del vector nabla, mediante el producto escalar entre el vector normal y el vector nabla, el operador resultante modificará al vector velocidad, este procedimiento es conocido como la derivada direccional del campo de velocidad.

$$(n \cdot \nabla)v = n_i e_i \cdot e_j \frac{\partial v_k}{\partial x_j} e_k = n_i \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_j} e_k = n_i \frac{\partial v_k}{\partial x_i} e_k = n_i \frac{\partial v_j}{\partial x_i} e_j \quad (2-8)$$

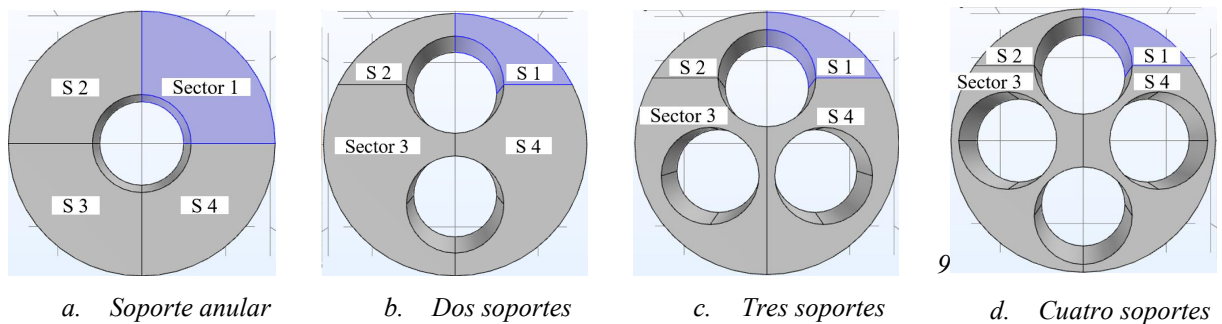
Esta expresión será evaluada en el software COMSOL con la estructura:

$$\text{abs}(nx) * (\text{abs}(ux) + \text{abs}(vx) + \text{abs}(wx)) + \text{abs}(ny) * (\text{abs}(uy) + \text{abs}(vy) + \text{abs}(wy)) + \text{abs}(nz) * (\text{abs}(wx) + \text{abs}(wy) + \text{abs}(wz)) \quad (2-9)$$

Donde:  $n_x$ ;  $n_y$ ;  $n_z$ : componentes del vector normal en las direcciones x, y, z respectivamente;  $u$ ;  $v$ ;  $w$ : componentes x, y, z, de la velocidad respectivamente;  $u_i$ : derivada de la componente x de velocidad respecto a la dirección i.

La solución analítica para el gradiente de velocidad en régimen laminar del sistema de cilindros concéntricos fue comparada con el resultado simulado en las mismas condiciones donde se obtuvo una diferencia del 2.94 % con la solución numérica en sistema de 6 cm mientras que hubo una diferencia de 7.26 % con el sistema de 60 cm, el mallado con tal convergencia se ha aplicado a todas las simulaciones. La longitud del sistema se ha limitado a 6 cm, la décima parte de un tubo en el sistema real, debido a las limitaciones computacionales, los resultados son tratados comparativamente por lo que esta longitud no los afecta significativamente, se han simulado en COMSOL bajo régimen laminar los sistemas descritos en la sección 2.5.4 además se incluyen los sistemas con un soporte desplazado del ánulo del absorbedor en 0.3, 0.5 y 0.7 mm, con la finalidad de observar el efecto de la pared en la transferencia de momento.

La evaluación del gradiente de velocidad superficial en la dirección normal a la superficie del soporte es realizada mediante CFD en el software COMSOL, y se lleva a cabo alrededor de un soporte seleccionado en cada sistema aprovechando sus propiedades simétricas, el sistema es escindido en cuatro sectores, la *Figura 2.19* muestra los sectores asociados a cada sistema, el sistema de un soporte anular desplazado tiene las mismas secciones que el de un soporte anular.



*Figura 2.19* Regiones de fluido para análisis fluidodinámico y de transferencia de masa en sistemas: a) un soporte, b) dos soportes, c) tres soportes y d) cuatro soportes

## 2.8 Cálculo de gradiente de velocidad superficial en la dirección normal al soporte

El coeficiente de transferencia de masa ( $k_c$ ) es calculado mediante la analogía de transporte de Reynolds y se determinó para los mismos sectores que el gradiente de velocidad superficial en la dirección normal (*Figura 2.22*), por lo que debe determinarse la velocidad de fluido libre ( $v_\infty$ ), esta velocidad está asociada a cada sector, por lo que se han propuesto dos valores de velocidad asociados la velocidad máxima del sector ( $v_{m\acute{a}x}$ ) y la velocidad promedio ( $v_{prom}$ ). Determinados los parámetros necesarios es posible determinar  $k_c$  mediante la *Ecuación 1-33* derivada de la analogía de transporte de Reynolds:

$$k_c = \frac{\mu}{\rho v_\infty} \left[ \frac{\partial v_x}{\partial y} \right]_{y=0} \quad (2-10)$$

Donde:  $\mu$ : viscosidad dinámica;  $v_\infty$ : velocidad de fluido libre;  $\rho$ : densidad;

$\left[\frac{\partial v_x}{\partial y}\right]_{y=0}$  : gradiente de velocidad superficial en la dirección normal.

## 2.9 Espesor de capa límite hidrodinámica ( $\delta_h$ )

El espesor de capa límite hidrodinámica ( $\delta_h$ ) ha sido determinado a través de CFD, de estas simulaciones se derivan los perfiles de velocidad y con el conocimiento de la velocidad máxima ( $v_{m\acute{a}x}$ ) puede deducirse el volumen de fluido que no ha alcanzado el 99% de  $v_{m\acute{a}x}$ , esta porción se asocia a la capa límite, debido a la geometría cilíndrica de los soportes, el parámetro  $\delta_h$  es local, por lo que se han evaluado los perfiles de velocidad en cuatro diferentes líneas (Figura 2.20), las líneas se han dispuesto a  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  y  $270^\circ$ .

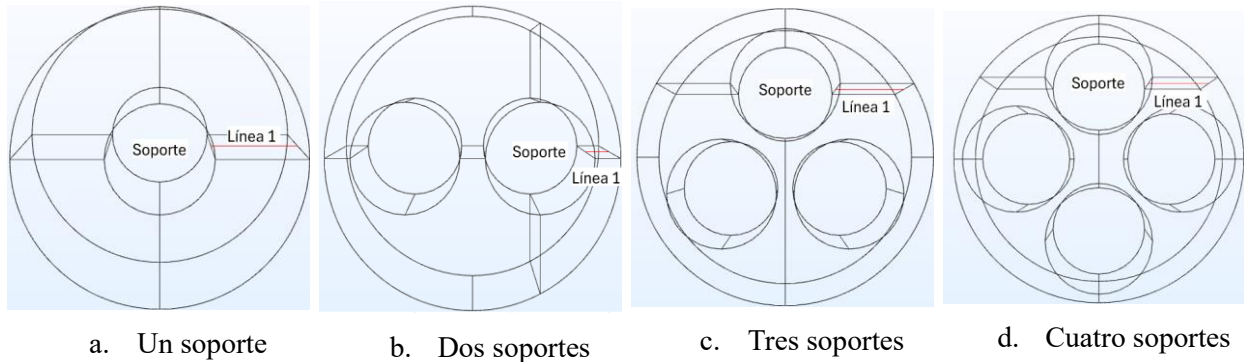


Figura 2.20 Reactor de CPC con línea (roja) sobre la que se evaluara el perfil de velocidad para determinar  $\delta_h$  local con diferente número de soportes: a) uno, b) dos, c) tres y d) cuatro

La Figura 2.21 muestra el perfil de velocidad para la línea 1, dispuesto a  $0^\circ$  alrededor del soporte en el sistema de un soporte anular, al conocer  $v_{m\acute{a}x}$  se determina la longitud de la línea asociada al espesor de capa límite.

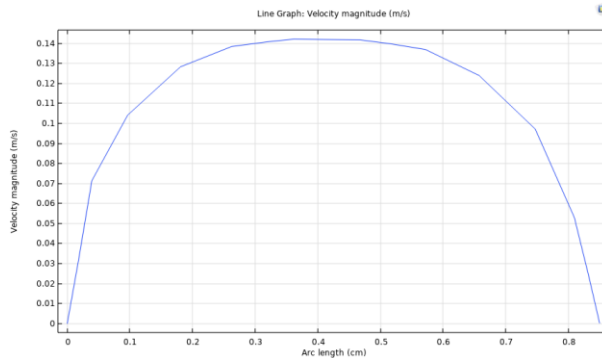


Figura 2.21 Perfil de velocidad evaluado sobre una línea mediante CFD

## 2.10 Tratamiento de resultados

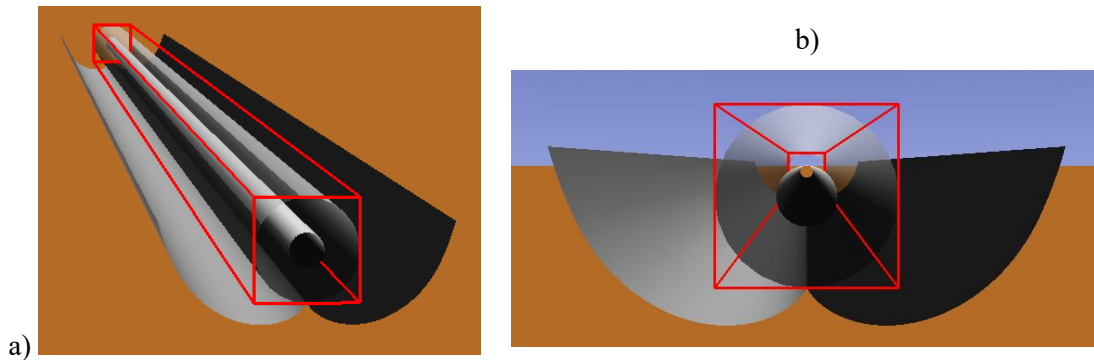
Tonatiuh ofrece el flujo por unidad de área ( $W/m^2$ ) en cualquier elemento seleccionado, dividiendo la superficie en la cantidad de sectores solicitados por el usuario, los datos pueden exportarse como diagramas de calor o tablas, por lo que, en los sistemas con soportes múltiples pueden valorarse de manera

independiente los diferentes soportes y sus sectores, en la **Sección 3** se realizan comparativas entre los flujos por unidad de área de los diversos sistemas, al promediar el flujo en el soporte y posteriormente entre los soportes, la comparativa se realiza usando con una referencia variable, siendo la referencia desde el sistema sin soporte hasta el sistema de cuatro soportes. Los flujos solares totales ( $W$ ) se han obtenido al considerar el flujo promedio por unidad de área asociado a cada sistema y las superficies del sistema en cuestión, por ejemplo; en el sistema de un soporte la superficie considerada ha sido la del soporte singular, mientras que en el sistema de cuatro soportes la superficie se ha cuadruplicado, permitiéndonos conocer el flujo promedio en la superficie de los diferentes sistemas.

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Irradiancia solar en elementos de CPC

El concentrador parabólico compuesto generado en software se muestra en la *Figura 3.1*, aquí se ha dispuesto un soporte en el ánulo del absorbedor, el sistema se dispone axialmente en la dirección este-oeste, la componente a) presenta la proyección transversal del sistema, la componente b), una visión axial donde puede observarse de adentro hacia afuera: el soporte anular, el absorbedor de cuarzo y el CPC.



*Figura 3.1 Sistema de análisis en Tonatiuh a) vista transversal b) proyección axial*

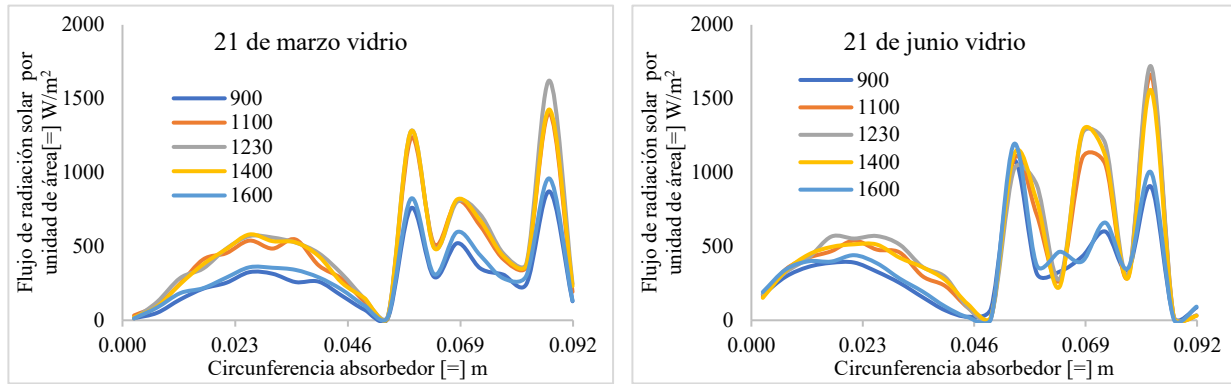
#### 3.1.1 Comparación entre materiales de absorbedor

Esta sección evalúa el efecto de tres distintos materiales: vidrio común, vidrio pyrex y cuarzo, con la irradiancia en el seno del absorbedor, pues la absorbancia, índices de refracción y transmisión son propiedades materiales. La determinación se lleva a cabo sin soportes catalíticos con aplicación directa en sistemas con catalizador suspendido; sin embargo, la radiación incidente en sistemas con soporte podría disminuir el número de reflexiones dentro del absorbedor, este efecto no cambia sustancialmente la energía recibida, debido a la velocidad de la luz. Extendiendo su aplicación a sistemas con catalizador soportado. El CPC está fijado con una inclinación de  $18^\circ$ , este ángulo beneficia el flujo en los meses de marzo y septiembre, no es el caso para junio y diciembre, esta condición es suficiente pues las relaciones son válidas mientras la única variable sea el cambio de material del absorbedor. Estos análisis consideran los sectores de la circunferencia del absorbedor, el hemisferio superior contiene los sectores 1 y 2, receptores de radiación directa con valores circunferenciales (0 m, 0.023 m) (primer sector) y (0.023 m, 0.046 m) (segundo sector), los sectores del hemisferio inferior, apuntando a la superficie reflejante contienen los sectores 3 y 4 con valores circunferenciales de (0.046 m, 0.068 m) (tercer sector) y (0.068 m, 0.091 m) (cuarto sector) los detalles sobre los sectores del soporte se discuten a detalle en la metodología de este texto.

#### **Vidrio**

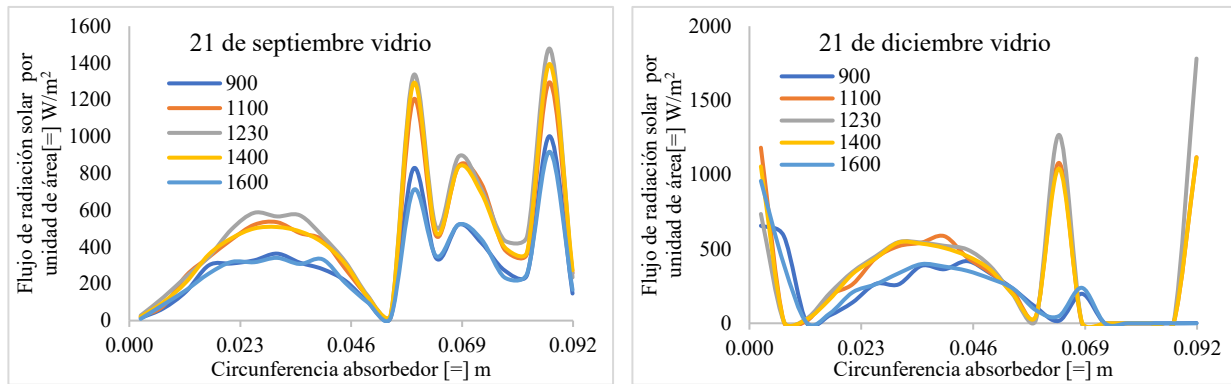
La *Figura 3.2* muestra los flujos de radiación solar por unidad de área ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) que penetra al absorbedor de vidrio en las diferentes temporadas del año (a-d), las diferentes curvas están asociadas a diferentes horas en el periodo de actividad solar de intervalo [0900 am, 1600 pm], con horario de 24 horas, los perfiles de radiación son semejantes en primavera, verano y otoño, en diciembre (*Figura 3.2d*) la fuente solar emite radiación desde el sur, con un ángulo cenital de  $43^\circ$ , sin embargo, la inclinación del sistema no atiende esta

inclinación, provocando que el cuarto sector del absorbedor este parcialmente sombreado. Entre todas las Figuras (3.2a-d) flujo máximo se manifiesta a las 12:30 pm el día 21 de junio del 2024 fecha cercana al solsticio de verano, con un valor de  $1720 \text{ W/m}^2$ , el valor mínimo está relacionado cualquier horario en el cuarto sector del día 21 de diciembre del 2024, con un valor de  $0 \text{ W/m}^2$ . El comportamiento general, muestra al hemisferio inferior, donde la radiación es concentrada, con una serie de tres máximos locales, el menor de ellos asociado al punto más bajo del absorbedor y cercano al CPC, los dos máximos restantes se acercan a la dirección de la fuente solar, la concentración en esta cara no es uniforme, en contraste con el hemisferio superior. El rango de flujo en el hemisferio superior es de  $(0, 500)$  mientras que el rango de flujo promedio en el hemisferio inferior es de  $(300, 1700)$ .



a. Densidad de flujo de radiación solar ( $\text{W/m}^2$ ) de 09:00 a.m. a 16:00 p.m. durante el 21 de marzo

b. Densidad de flujo de radiación solar ( $\text{W/m}^2$ ) de 09:00 a.m. a 16:00 p.m. durante el 21 de junio



c. Densidad de flujo de radiación solar ( $\text{W/m}^2$ ) de 09:00 a.m. a 16:00 p.m. durante el 21 de septiembre

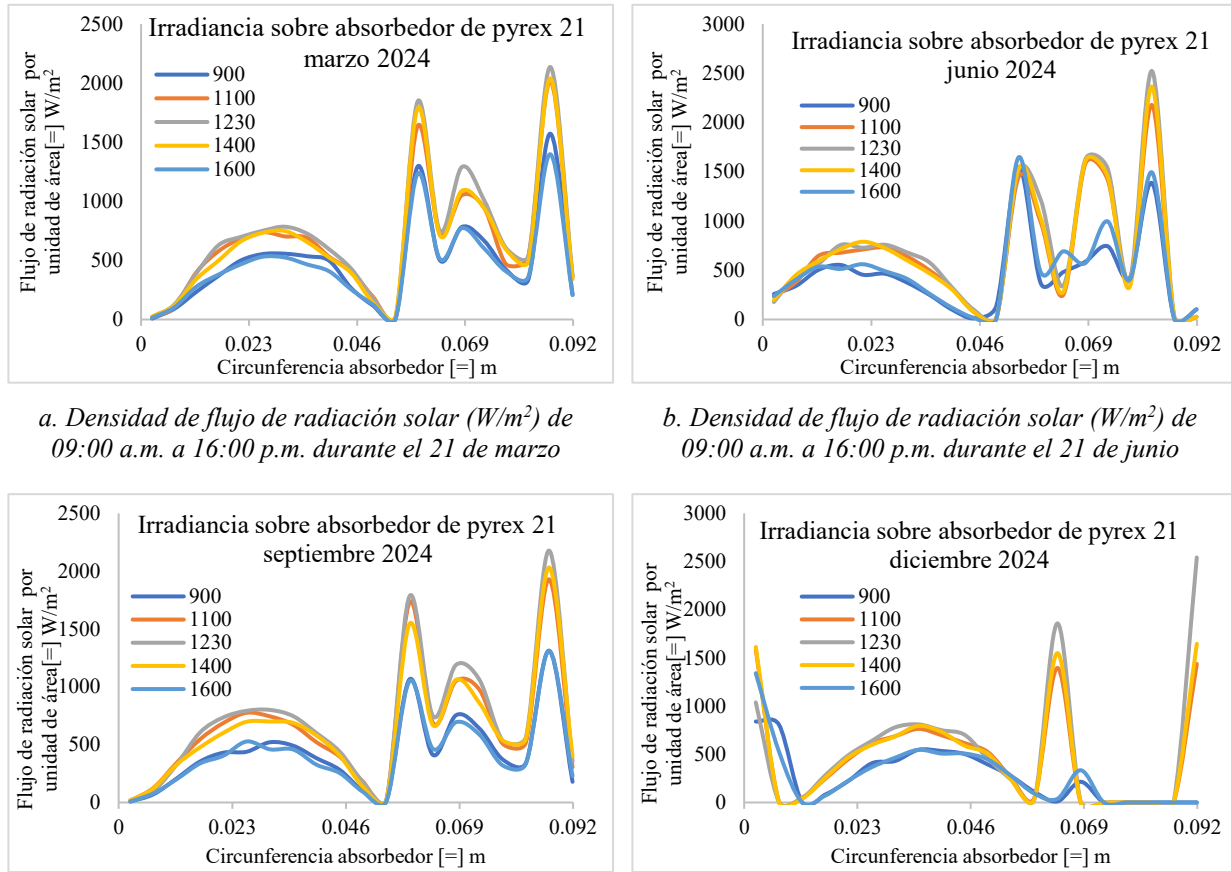
d. Densidad de flujo de radiación solar ( $\text{W/m}^2$ ) de 09:00 a.m. a 16:00 p.m. durante el 21 de diciembre

Figura 3.2 Densidad de flujo de radiación solar ( $\text{W/m}^2$ ) durante las cuatro temporadas del año considerando un absorbedor de vidrio

### Vidrio pyrex

La Figura 3.3 muestra los flujos de radiación solar por unidad de área ( $\text{W/m}^2$ ) que penetra al absorbedor de vidrio pyrex en las diferentes temporadas del año (a-d), las diferentes curvas están asociadas a diferentes horas, en el periodo de actividad solar de intervalo [0900 am, 1600 pm]. Los valores máximos alcanzados fueron de  $2177 \text{ W/m}^2$  correspondientes a marzo, junio y septiembre. El rango de flujo promedio en el hemisferio superior es de  $(0, 800)$  mientras que el rango en el hemisferio inferior es de  $(300, 2300)$ . Los

perfiles de flujo obedecen la configuración descrita en el caso de absorbedor de vidrio y han sido discutidos en tal sección, la diferencia radica en las magnitudes.



a. Densidad de flujo de radiación solar ( $W/m^2$ ) de 09:00 a.m. a 16:00 p.m. durante el 21 de marzo

b. Densidad de flujo de radiación solar ( $W/m^2$ ) de 09:00 a.m. a 16:00 p.m. durante el 21 de junio

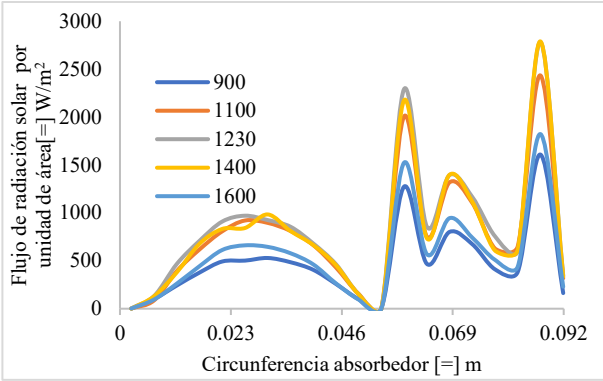
c. Densidad de flujo de radiación solar ( $W/m^2$ ) de 09:00 a.m. a 16:00 p.m. durante el 21 de septiembre

d. Densidad de flujo de radiación solar ( $W/m^2$ ) de 09:00 a.m. a 16:00 p.m. durante el 21 de diciembre

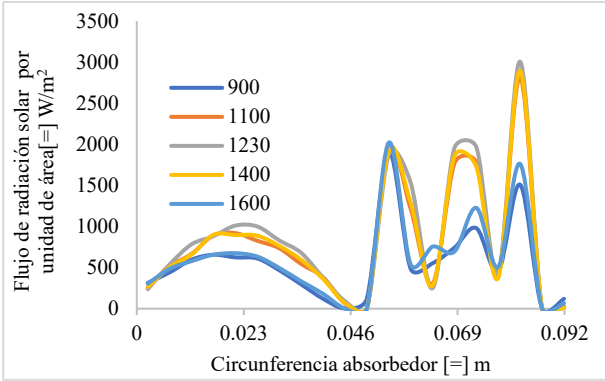
Figura 3.3 Análisis del flujo de radiación durante las cuatro temporadas del año considerando un absorbedor de pyrex

### Cuarzo

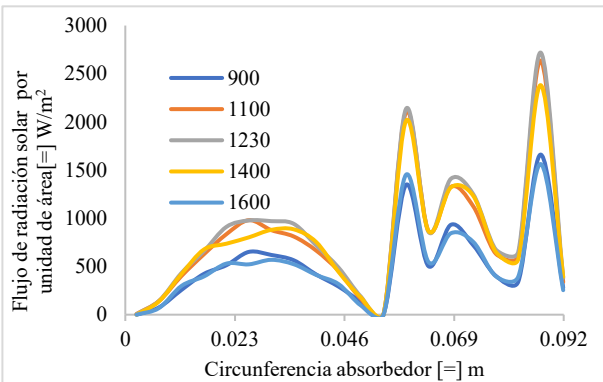
La Figura 3.4 muestra los flujos de radiación solar por unidad de área ( $W/m^2$ ) que penetra el absorbedor de cuarzo en las diferentes temporadas del año (a-d), las diferentes curvas están asociadas a diferentes horas, en el periodo de actividad solar de intervalo [0900 am, 1600 pm]. El rango de flujo promedio en el hemisferio superior es de (0, 1000) mientras que el rango en el hemisferio inferior es de (300, 2800). Los perfiles de flujo obedecen la configuración descrita en el caso de absorbedor de vidrio y han sido discutidos en tal sección, la diferencia radica en las magnitudes, con un valor puntual máximo el 21 de diciembre a las 12:30 p. m. de valor  $3221 W/m^2$  (Figura 3.4d)



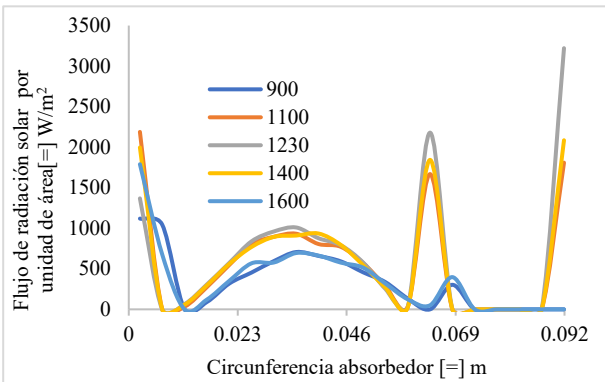
a. Flujo de radiación solar por unidad de área ( $W/m^2$ ) de 09:00 a.m. a 16:00 p.m. durante el 21 de marzo



b. Flujo de radiación solar por unidad de área ( $W/m^2$ ) de 09:00 a.m. a 16:00 p.m. durante el 21 de junio



c. Flujo de radiación solar por unidad de área ( $W/m^2$ ) de 09:00 a.m. a 16:00 p.m. durante el 21 de septiembre



d. Flujo de radiación solar por unidad de área ( $W/m^2$ ) de 09:00 a.m. a 16:00 p.m. durante el 21 de diciembre

Figura 3.4 Análisis del flujo de radiación durante las cuatro temporadas del año considerando un absorbedor de cuarzo

La Figuras 3.5-3.7 promedian el flujo alrededor de la circunferencia, y muestran su dependencia respecto a la hora, en las cuatro fechas estacionales simuladas, se diferencian por el material del absorbedor estudiado. La Figura 3.5 donde el absorbedor es de vidrio muestra la mejor estación de colección solar como junio, esta fecha tiene la particularidad de poseer el menor de los ángulos cenitales solares en la operación con  $-4^\circ$ , los perfiles son semejantes sin importar la fecha la diferencia radica en las magnitudes, lo que representa el menor flujo asociado a diciembre

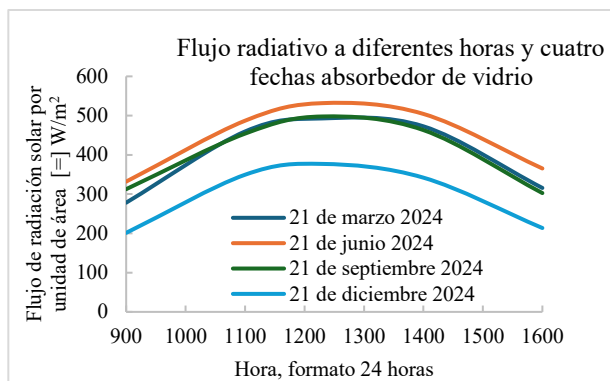


Figura 3.5 Flujo de radiación ( $W/m^2$ ) en intervalo de horas con actividad solar (09:00AM-16:00PM) en seno de absorbedor de vidrio

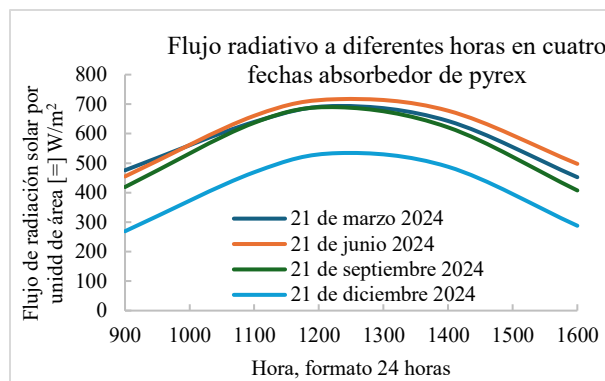


Figura 3.6 Flujo de radiación ( $W/m^2$ ) en intervalo de horas con actividad solar (intervalo 09:00AM-16:00PM) en seno de absorbedor de pyrex

En la *Figura 3.5* se observa la comparativa de los materiales en función de la radiación solar con respecto al mes del año. En marzo el flujo total que penetra el sistema de vidrio es de  $403W/m^2$ , pyrex manifiesta  $580W/m^2$  y cuarzo  $673 W/m^2$ , el sistema pyrex tiene un incremento de 43.8% de flujo radiativo en relación con vidrio, mientras que el cuarzo posee una mejora del 66.7% frente al vidrio, la comparativa: cuarzo/pyrex muestra mejora de 15.9% con el uso de cuarzo. Las comparativas se condensan en la *Tabla 3.1*.

La *Figura 3.7* promedia el efecto de incidencia radiativa circunferencial en el seno del absorbedor de cuarzo facilitando la observación del efecto estacional y la hora simulada, las magnitudes de flujo solar presentan su máximo en junio, cuando la inclinación del sistema es mínima ( $-4^\circ$ ) y máxima en diciembre con inclinación también máxima ( $43^\circ$ ), se observa una dependencia del flujo respecto al ángulo de inclinación, el comportamiento durante marzo y septiembre es homólogo, las curvas dibujan una trayectoria aproximadamente igual con independencia de la estación, como es de esperarse el máximo se presenta al medio día solar. La perspectiva que promedia el flujo de radiación solar a lo largo de las horas y la dirección se presenta en la *figura 3.8*, este gráfico permite realizar una comparación directa entre los tres materiales en las diferentes estaciones, existe consistencia respecto al flujo dominante con el uso de cuarzo y mínimo con el uso de absorbedores de vidrio, el comportamiento entre marzo y septiembre no presenta diferencias mayores al 10 %, sin embargo, en diciembre existe una diferencia del 32 % respecto al resto de estaciones, este comportamiento es consistente con las condiciones climáticas de la temporada a pesar de ello la recuperación de radiación permite operar con el sistema incluso en tales condiciones.

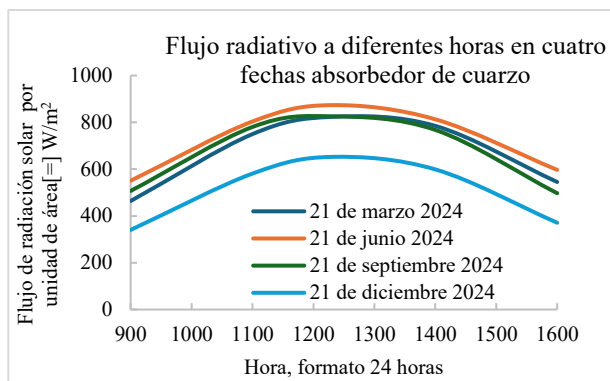


Figura 3.7 Flujo de radiación ( $W/m^2$ ) en intervalo de horas con actividad solar (intervalo 09:00AM-16:00PM) en seno de absorbedor de cuarzo

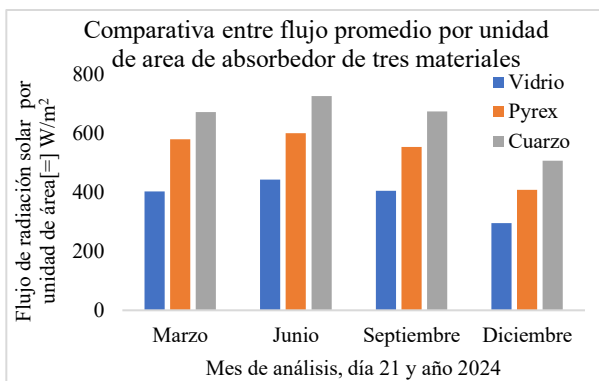


Figura 3.8 Comparativa entre flujo total simulado ( $W/m^2$ ) de tres materiales: vidrio, pyrex y cuarzo, los días 21 de los meses: marzo, junio, septiembre y diciembre, el año 2024

Tabla 3.1 Incremento porcentual entre flujos radiativo por unidad de área del vidrio, pyrex, cuarzo, en diferentes fechas

<b>Materiales relacionados/Mes</b>	<b>Marzo</b>	<b>Junio</b>	<b>Septiembre</b>	<b>Diciembre</b>	<b>Promedio</b>
<i>Pyrex/Vidrio</i>	43.84 %	35.44 %	36.62 %	38.03 %	38.48 %
<i>Cuarzo/Vidrio</i>	66.75 %	63.81 %	66.34 %	71.46 %	67.09 %
<i>Cuarzo/Pyrex</i>	15.92 %	20.94 %	21.75 %	24.22 %	20.71 %

El cuarzo en relación con otras alternativas presenta una transmitancia en la región UV promedio del 97.5 %, frente al 56 % del vidrio y 80 % del pyrex. La diferencia en términos de irradiancia efectiva con el vidrio asciende al 67 %, este parámetro es crucial para activar fotocatalizadores como el  $TiO_2$  con un  $E_g \approx 3.2eV$ .

### 3.1.2 Irradiancia en superficie de soportes de fotocatalizador

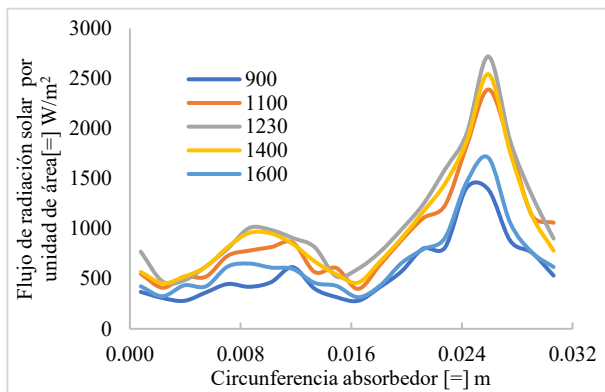
#### ***Irradiancia en sistema con un soporte de catalizador***

En esta sección se muestra el caso base para el análisis de flujo de radiación solar por unidad de área en un soporte dentro del absorbedor del CPC en el año 2024. El análisis consiste en dos aspectos: 1) fijar el soporte en el ánulo y analizar el flujo radiativo a lo largo de las cuatro estaciones y 2) variar la posición del soporte (desde 3 a 9 mm, partiendo del ánulo), en dirección horizontal y vertical, evaluando en marzo. Estos análisis consideran los sectores de la circunferencia del soporte, el hemisferio superior contiene los sectores 1 y 2, receptores de radiación directa con valores circunferenciales de 0-0.8 cm (primer sector) y 0.8-1.6 cm (segundo sector), los sectores del hemisferio inferior, apuntando a la superficie reflejante contienen los sectores 3 y 4 con valores circunferenciales de 1.6 a 2.4 cm (tercer sector) y 2.4 a 3.1 cm (cuarto sector) los detalles sobre los sectores del soporte se discuten a detalle en la metodología de este texto, pero debe

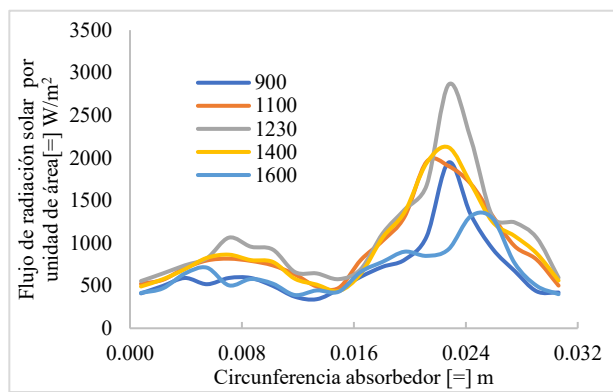
recordarse: en soporte cilíndrico tiene una longitud axial de 60 cm y diámetro de 1 cm, mientras que el absorbedor en todos los casos ha sido simulado con las propiedades del cuarzo.

### *Soporte dispuesto en el ánulo del absorbedor*

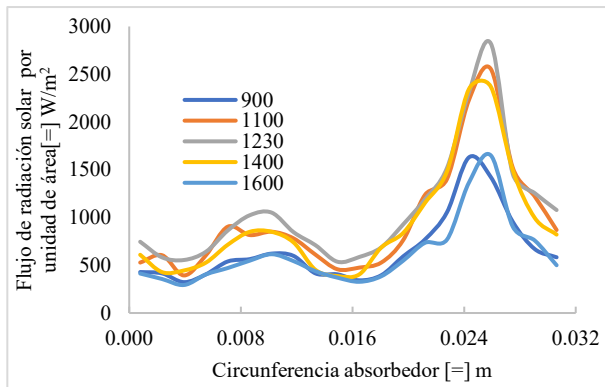
Las Figuras 3.9a-d evalúan el flujo de radiación solar por unidad de área ( $W/m^2$ ) dependiente de la circunferencia del soporte (m), el cuarto sector recibe el mayor flujo de radiación solar en los meses donde los rayos solares provienen del sur (dirección opuesta al cuarto sector), las magnitudes pertenecen al mismo orden, durante los meses: marzo, septiembre y diciembre. El mes de junio (Figura 3.9b) donde el ángulo cenital es el más cercano al cenit, con  $-4^\circ$  presenta el mayor flujo, mientras nos alejamos de las 12:30 p.m. se manifiesta una caída de en el flujo de  $600 W/m^2$ , ambos efectos se neutralizan y el comportamiento general no mejora la irradiancia. En este caso el sector más iluminado es el tercero, esto se debe a que los rayos solares provienen ligeramente desde el norte.



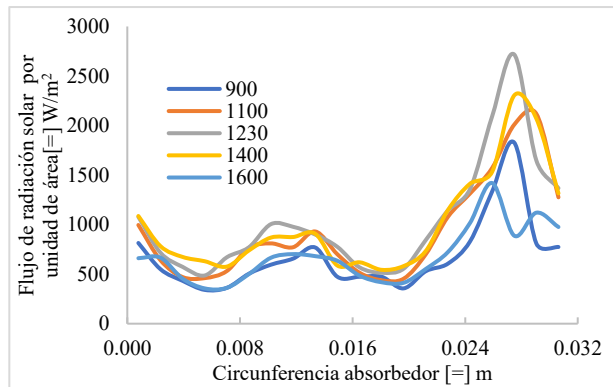
a. Flujo de radiación solar por unidad de área ( $W/m^2$ ) de 09:00 a.m. a 16:00 p.m. durante el 21 de marzo.



b. Flujo de radiación solar por unidad de área ( $W/m^2$ ) de 09:00 a.m. a 16:00 p.m. durante el 21 de junio.



c. Flujo de radiación solar por unidad de área ( $W/m^2$ ) de 09:00 a.m. a 16:00 p.m. durante el 21 de septiembre



d. Flujo de radiación solar por unidad de área ( $W/m^2$ ) de 09:00 a.m. a 16:00 p.m. durante el 21 de diciembre

Figura 3.9 Análisis del flujo de radiación durante las cuatro temporadas del año considerando un soporte anular

La Figura 3.10 muestra el flujo de radiación por unidad de área del día 21 de los diferentes meses ( $W/m^2$ ) el resultado ha promediado el efecto de la radiación dependiente de la circunferencia, es notorio el traslape de las curvas indicando: la inclinación del sistema dependiente de los diferentes meses permite compensar las condiciones solares en las diferentes fechas.

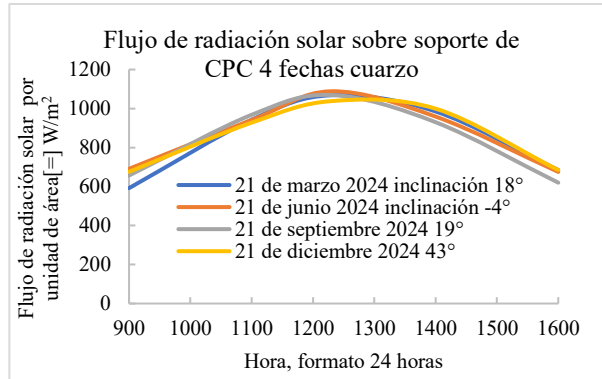


Figura 3.10 Flujo de radiación ( $W/m^2$ ) en intervalo de horas con actividad solar (intervalo 09:00 a.m.-16:00 p.m.) en soporte anular

### Soporte desplazado del ánulo del absorbedor

En esta sección se evalúa la irradiancia en los sistemas donde el soporte es desplazado 3 mm, 5 mm, 7 mm y 9 mm en las siguientes direcciones arriba, abajo, derecha e izquierda. Se consideran 1,000,000 de rayos proyectados desde la fuente solar, para la fecha 21 de marzo 2024 con un ángulo de inclinación de  $18^\circ$  asociado al ángulo del medio día solar a la hora fija 12:30PM, debido a las condiciones de mayor irradiancia al medio día solar.

La Figura 3.11 muestra el soporte dispuesto axialmente en la dirección Este-Oeste, donde adicionalmente ha sido desplazado 5 mm a la izquierda de la parte central del absorbedor cuyo radio es de 14.5 mm, esta característica define el rango de desplazamiento de los soportes.

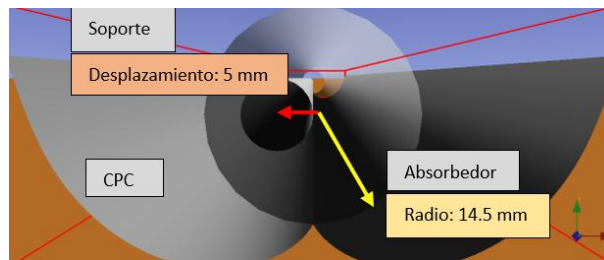
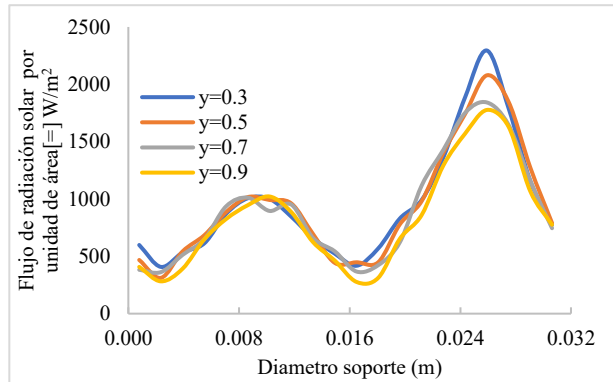
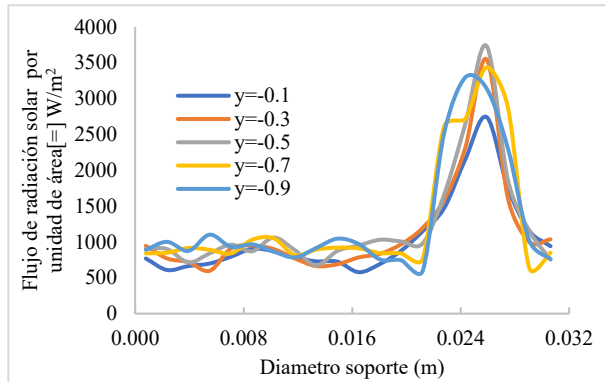


Figura 3.11 Soporte desplazada 5 mm a la izquierda del eje central del absorbedor

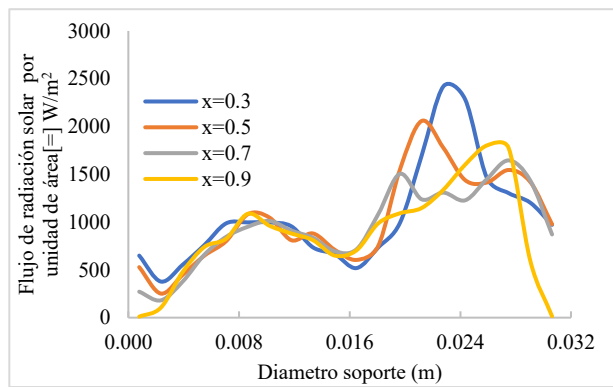
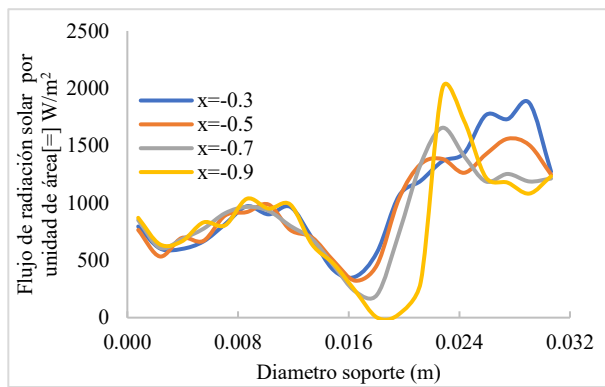
La Figura 3.12 muestra el flujo de radiación solar para los casos de desplazamiento: arriba, abajo, izquierda y derecha. En estas figuras se manifiesta un máximo en el cuarto sector de la circunferencia del soporte, para todos los casos, sin importar la dirección del desplazamiento, la simulación consideró que el astro solar emite sus rayos desde el sur, esto se debe a su evaluación en los ángulos de elevación solar en la fecha y hora alimentada. Los flujos que promedian el desplazamiento en cada dirección van de mayor a menor: abajo ( $1193 W/m^2$ ), derecha ( $992 W/m^2$ ), izquierda ( $W/m^2$ ) y arriba ( $908 W/m^2$ ), puede deducirse, acercar el soporte al reflector mejora la irradiancia Figura 3.12a, alejarlo (Figura 3.12b) compromete el flujo radiativo, por lo que la concentración mejora en la cercanía del reflector. Como puede observarse en las Figuras 13.2c y d, el movimiento horizontal del soporte manifiesta máximos de magnitud superior (c) o semejante (d) a los otros desplazamientos en términos de flujo radiativo este comportamiento es desestimado por mostrar los mínimos absolutos, en este caso el astro se ha dispuesto al sur de la locación

simulada, por lo que se observa una disminución menor en el desplazamiento del soporte hacia el norte, en comparación los desplazamientos del ánulo discretos presentan mayores flujos siendo perjudicioso el desplazamiento lateral de los soportes.



b. Flujo de radiación con desplazamiento anular  $y = [-0.1 \text{ cm}, -0.9 \text{ cm}]$  en superficie diametral de soporte (m).

b. Flujo de radiación  $y = [0.3 \text{ cm}, 0.9 \text{ cm}]$  en superficie diametral de soporte (m)



c. Flujo de radiación ( $W/m^2$ ) con desplazamiento anular (intervalo  $x = [-0.3 \text{ cm}, -0.9 \text{ cm}]$ ) en superficie diametral de soporte (m)

d. Flujo de radiación ( $W/m^2$ ) con desplazamiento anular (intervalo  $x = [0.3 \text{ cm}, 0.9 \text{ cm}]$ ) en superficie diametral de soporte (m)

Figura 3.12 Flujo de radiación durante el día 21 de marzo considerando un soporte anular desplazada del ánulo del absorbedor a) desplazamiento hacia abajo (en dirección del reflector), b) desplazamiento hacia arriba (apertura del sistema), c) desplazamiento hacia la izquierda (sur) y d) desplazamiento hacia la derecha (norte)

La Figura 3.13 muestra el flujo promedio por unidad de área ( $W/m^2$ ) en cada soporte (círculo rojo) para el sistema de un soporte dentro del absorbedor (circunferencia azul) del CPC, la superficie reflejante se encuentra en la parte inferior del CPC, la radiación solar proviene del sur con una inclinación de  $18^\circ$  respecto a la vertical por lo que el sistema se ha inclinado en idéntico ángulo, se ha simulado el día 21 de marzo del 2024 a las 12:30 p. m., en el centro está el caso comparativo con soporte concéntrico y un flujo de  $1068 W/m^2$ , el flujo disminuye al alejarse de la base reflejante o acercarse a las paredes laterales, explicando la concentración superior entre el tercer y cuarto cuadrante de los soportes.

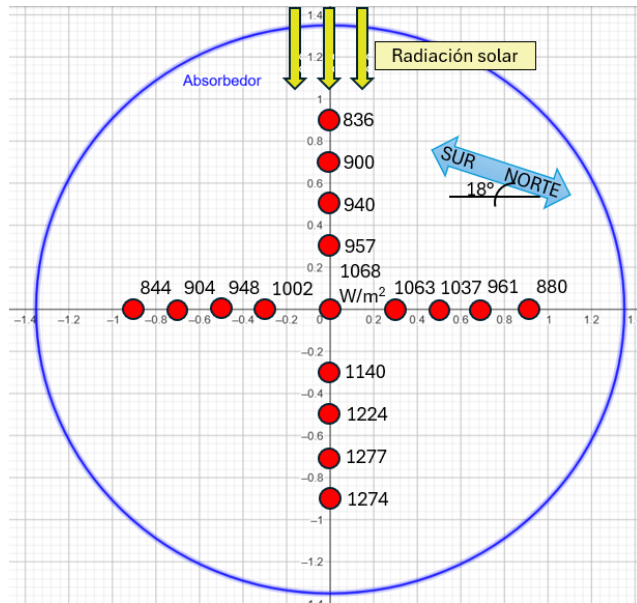
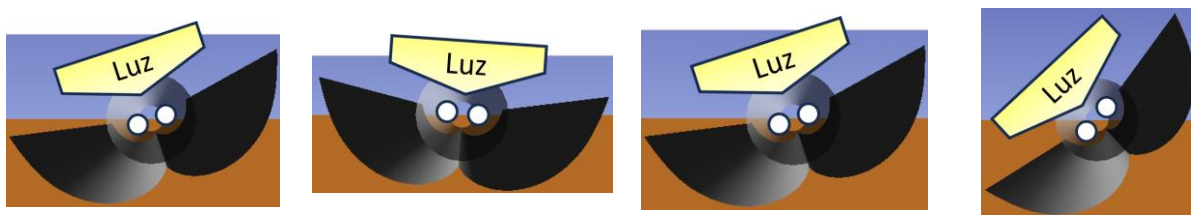


Figura 3.13 Flujo de radiación solar por unidad de área promedio ( $W/m^2$ ), sobre soporte (rojo) el día 21 de marzo a las 12:30 p. m., en sistema de un soporte dentro de absorbedor de CPC

Se espera las configuraciones de soportes en los cuadrantes tercero y cuarto reporten la mayor concentración de flujo radiativo, basado en las simulaciones para un soporte desplazado en el absorbedor.

### ***Irradiancia en sistema de dos soportes***

En esta sección se evaluó la irradiancia en sistemas con absorbedor de cuarzo con soportes dispuestos axialmente en dirección este-oeste en cuatro diferentes épocas del año y el periodo de actividad solar 0900 a. m.-1600 p. m., con tres configuraciones de dos soportes: horizontal, vertical y diagonal, las disposiciones reciben sus nombres por su disposición respecto a la radiación solar, sin importar la fecha pues el eje del CPC está alineado con el sol al medio día solar, la *Figura 3.14* muestra la inclinación del sistema de dos soportes horizontales dependiendo del mes simulado



a. marzo

b. junio

c. septiembre

d. diciembre

Figura 3.14 Inclinación de sistema de dos soportes horizontales dependiente de la fecha de análisis en 4 meses diferente

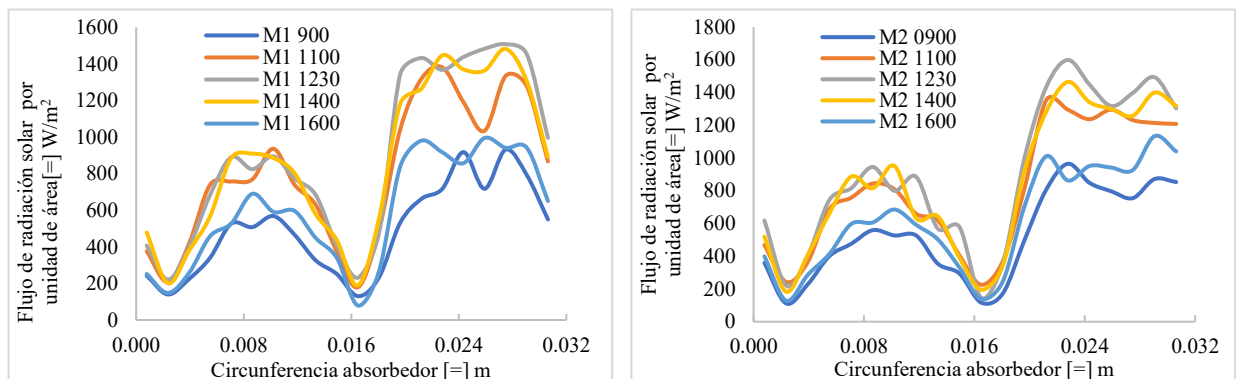
### ***Dos soportes catalíticos desplazados horizontalmente***

La *Figura 3.15* muestra la geometría analizada en el desplazamiento horizontal los dos soportes han sido desplazados del eje axial  $\pm 6.16$  mm equidistantes entre sí y la superficie del absorbedor.



*Figura 3.15 Disposición de soportes en sistema de 2 soportes con desplazamiento horizontal*

La *Figura 3.16* muestra la irradiancia por unidad de área ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) en marzo, el gráfico a) el comportamiento del soporte más cercano a la superficie norte del CPC. Los máximos se manifiestan entre los cuadrantes primero y segundo, estos cuadrantes reciben la iluminación directa, mientras que los cuadrantes tercero y cuarto reciben esencialmente radiación reflejada, recuperando 66 % más radiación el hemisferio inferior respecto al superior. Los valores mínimos se manifiestan entre los cuadrantes cuarto-primero y segundo-tercero, es decir, en las superficies laterales del soporte, la superficie de cara al reflector lateral tiene un valor mínimo de  $147 \text{ W}/\text{m}^2$ , mientras que la superficie lateral que apunta al centro del absorbedor y es cercana al segundo soporte, presenta un mínimo de  $78 \text{ W}/\text{m}^2$ , es decir, la superficie lateral externa tiene un aumento de flujo del 88 % respecto a la interna. El segundo soporte en la región sur del sistema presenta puntos críticos semejantes al primero, esta característica se traslada a sus perfiles de flujo, con diferencia en sus magnitudes, la comparativa entre los máximos respecto al hemisferio inferior es de aumento con 68 % en el hemisferio superior, las caras laterales donde se presentan los mínimos, con una diferencia menor al 1 % respecto a la superficie lateral externa, hay una gran diferencia entre las relaciones de aumento de los mínimos del soporte 2 y soporte 1 (87 %), a pesar de ello el flujo promedio sobre las superficies laterales del soporte 1 es de  $112 \text{ W}/\text{m}^2$  y  $132 \text{ W}/\text{m}^2$  para el segundo soporte, sin embargo, las diferencias se dispersan al valorar el flujo promedio en todas las direcciones, el comportamiento general entre los dos soportes es semejante y los valores de irradiancia de un soporte individual desplazado a la izquierda, con un valor promedio de  $948 \text{ W}/\text{m}^2$  o a la derecha con valor de  $1037 \text{ W}/\text{m}^2$  en comparación con  $895 \text{ W}/\text{m}^2$  y  $903 \text{ W}/\text{m}^2$  sus homólogos en configuración horizontal de dos soportes, es decir la presencia de otro soporte disminuye la irradiancia promedio de 6 % - 14 %.

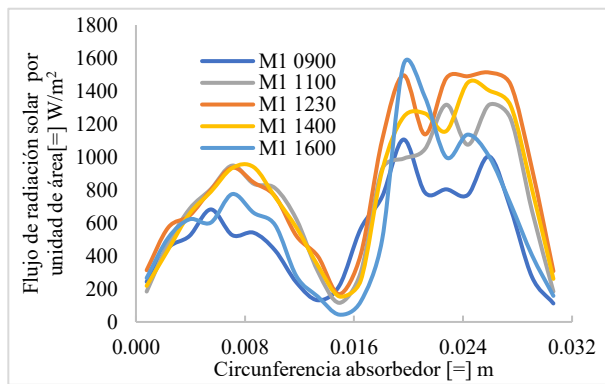


a. Soporte 1, cercano a la superficie norte del sistema

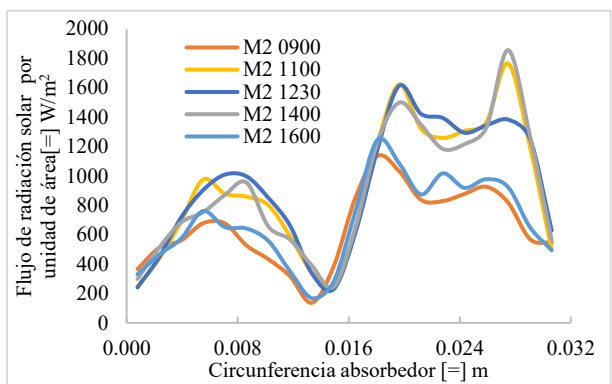
b. Soporte 2, cercano a la superficie sur del sistema

Figura 3.16 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes horizontales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de marzo cuarzo con inclinación  $18^\circ$

La configuración de 2 soportes horizontales en los meses: junio, septiembre y diciembre, muestran perfiles radiativos semejantes desplazando sus puntos críticos en el eje x esta diferencia es notable en el caso de junio (Figura 3.17a y b) respecto a las otra fechas, donde los puntos críticos han sido desplazados a la izquierda linealmente o desde la perspectiva de la circunferencia de los soportes en sentido horario cerca de  $15^\circ$ , este comportamiento puede explicarse por la disposición del sol al medio día solar, donde el astro solar en junio se inclina hacia el norte en comparación con las otras tres fechas analizadas cuya declinación está en el sur. Los perfiles de radiación en cada soporte para las fechas simuladas en septiembre y diciembre se muestran en el **Apéndice B**.



a. Soporte 1, cercano a la superficie norte del sistema



b. Soporte 2, cercano a la superficie sur del sistema

Figura 3.17 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes horizontales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de junio cuarzo con inclinación  $-4^\circ$

### Dos soportes catalíticos desplazados verticalmente

En esta sección se analiza el flujo radiativo por unidad de área de dos soportes dispuestos verticalmente (Figura 3.18) a diferentes horas en el intervalo de actividad 0900 a. m.-1600 p. m. los soportes han sido desplazados del ánulo del absorbente verticalmente  $\pm 6.16$  mm, las simulaciones discutidas están asociadas a los días 21 de marzo y 21 de diciembre.

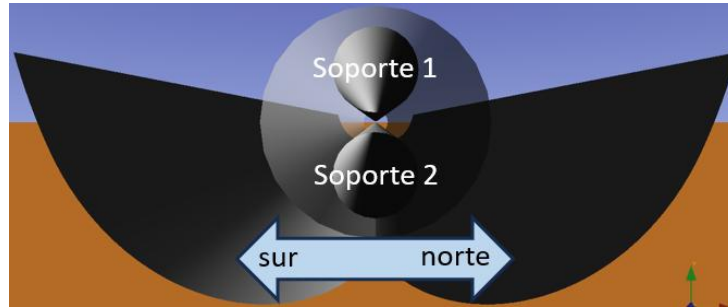
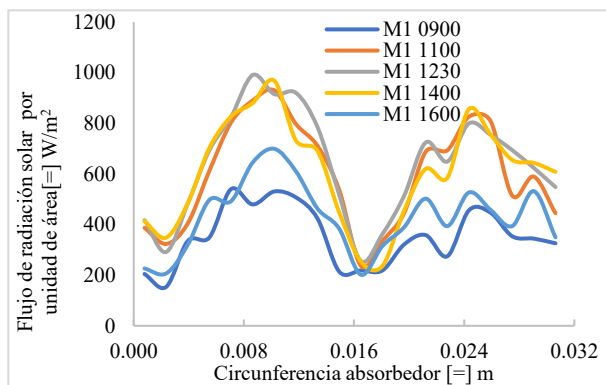
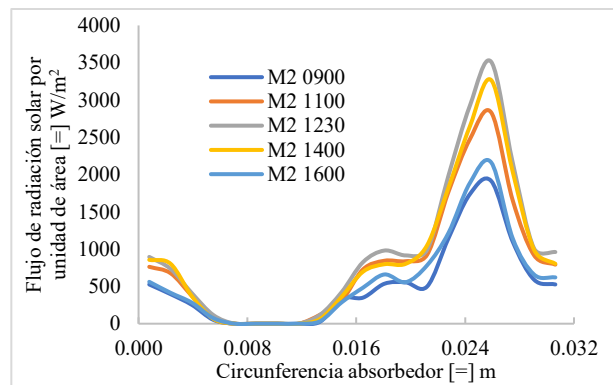


Figura 3.18 Disposición de soportes en sistema de 2 soportes con desplazamiento vertical del eje del soporte +/- 6.16 mm del eje central del absorbedor

La Figura 3.19a muestra el perfil de radiación solar sobre el soporte 1 cercano a la apertura del CPC entre los máximos hay una diferencia aproximada de  $100 \text{ W/m}^2$  al analizar una misma hora, esta diferencia es 400 % menor al compararla con el segundo soporte, el máximo absoluto se debe a la radiación directa en el hemisferio superior del primer soporte, el hemisferio inferior del primer soporte se encuentra en la vecindad del segundo soporte a pesar de ello muestra la segunda irradiancia máxima del primer soporte ordenadas por orden de magnitud, con un comportamiento semejante al del hemisferio superior, los mínimos están una vez más, asociados a las superficies laterales del soporte y tienen el mismo orden de magnitud. La Figura 3.19b muestra el perfil de radiación del soporte 2, cercano a la superficie reflejante, este soporte tiene el hemisferio superior parcialmente sombreado, sector circular que va de los  $45^\circ$  a los  $140^\circ$ , esta superficie se encuentra debajo del soporte 1, en ningún horario se aprovecha la radiación. Hay un máximo localizado en el cuarto sector, recordemos que la fuente solar bajo las condiciones simuladas se orienta al sur del sistema, a pesar de que el sistema se ha orientado paralelo a la fuente solar, el cuarto sector, cercano a la superficie norte presenta un notable aumento con un orden de magnitud superior y un valor de  $3511 \text{ W/m}^2$  al medio día solar. En esta disposición no es recomendable soportar catalizador en el hemisferio superior del segundo soporte, pues no es posible aprovechar la irradiancia en tal superficie.



a. Soporte 1, cercano a la apertura del sistema

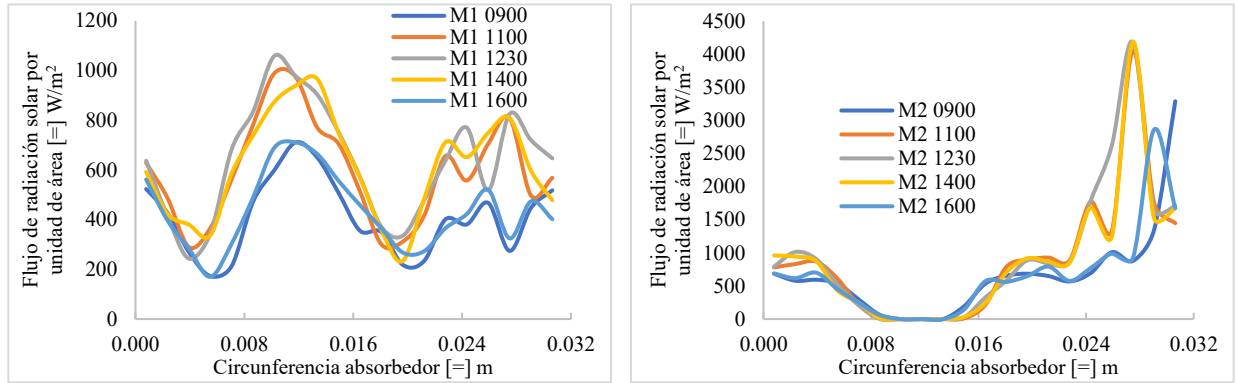


b. Soporte 2, cercano a la involuta reflejante del sistema

Figura 3.19 Irradiancia solar ( $\text{W/m}^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes verticales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de marzo cuarzo con inclinación  $18^\circ$

El perfil radiativo en los soportes durante el mes de septiembre tiene un comportamiento semejante a marzo, mientras que durante junio las curvas mantienen la forma, pero son desplazadas horizontalmente hacia la izquierda, es decir sus puntos críticos se desplazan ligeramente, de manera homologa durante diciembre las

curvas son desplazadas a la derecha, sin embargo, el desplazamiento es mayor (*Figura 3.20.b*) resultando en el sombreado del segundo soporte en el segundo sector, este fenómeno puede explicarse por la inclinación de  $-4^\circ$  hacia el norte, en comparación con la inclinación de  $18^\circ$ ,  $19^\circ$  y  $43^\circ$  de marzo, junio y diciembre respectivamente, donde el enorme desplazamiento de la sombra asociada a diciembre se debe a la inclinación del sistema. Los perfiles radiativos para las fechas 21 de junio y septiembre pueden consultarse en el **Apéndice B**.



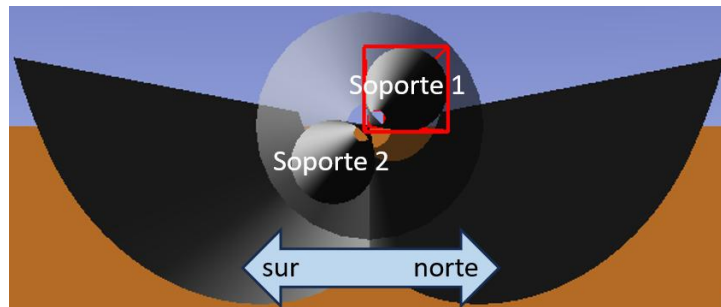
a. Soporte 1, cercano a la apertura del sistema

b. Soporte 2, cercano a la involuta reflejante del sistema

*Figura 3.20 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes verticales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de diciembre cuarzo con inclinación  $43^\circ$*

### **Dos soportes catalíticos desplazadas diagonalmente**

En esta sección se analiza el perfil de flujo radiativo sobre dos soportes dispuestos diagonalmente y con una separación de  $\pm 6.16$  mm del anulo del absorbedor (*Figura 3.20*) el soporte 1 se ha dispuesto cercano a la apertura del CPC y superficie reflejante norte, el soporte 2 se encuentra en la vecindad de la parte inferior reflejante del CPC y la superficie reflejante sur.



*Figura 3.21 Disposición de soportes en sistema de 2 soportes con desplazamiento diagonal*

La *Figura 3.22a* muestra el perfil de radiación solar sobre el primer soporte, las curvas y sus magnitudes son semejantes a sus homologas en cualquiera de los soportes horizontales, con dos máximos centrados los hemisferios superior e inferior y los mínimos en las superficies laterales del sistema, con la diferencia de estar sombreada en la superficie vecina al segundo soporte. El segundo soporte (*Figura 3.22b*) presenta un perfil oscilatorio amplificado mientras recorremos los sectores circulares en sentido antihorario, siendo el primer sector el de menor energía recolectada y el cuarto, más cercano a la involuta reflejante y de cara a

la parábola norte el de mayor concentración, no se presentan sombras en este soporte. Los resultados relativos a este sistema en junio, septiembre y diciembre se muestran en el **Apéndice B**.

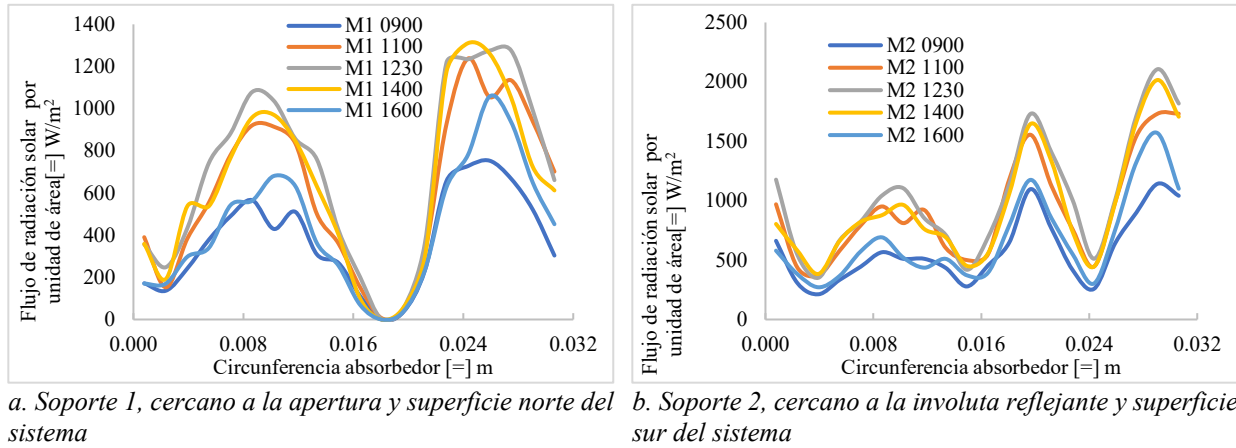


Figura 3.22 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes diagonales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de cuarzo con inclinación  $18^\circ$

Los flujos promedio en las diferentes fechas de análisis se muestran en la *Figura 3.23*, en cualquier fecha el sistema de dos soportes horizontales recupera la mayor cantidad de radiación, seguida por los soportes diagonales y los soportes verticales. Cuando el sistema de un soporte anular fue desplazado del ánulo absorbedor, se observó una elevada irradiancia en la cercanía de la involuta reflejante, este fenómeno no puede ser aprovechado al máximo en el sistema de dos soportes, por los efectos de sombreado mutuos entre los soportes, siendo claro el fenómeno en la disposición vertical, a pesar de contar con la mayor cercanía a la involuta reflejante, obtuvo en promedio el peor flujo radiativo por unidad de área, en cualquier época, el sistema de dos soportes horizontales, tiene el mejor rendimiento por la ausencia de sombras aunque los valores máximos no sean exacerbados en comparación con las disposiciones vertical y diagonal, en conclusión la presencia de sombras en los soportes afecta significativamente el flujo radiativo y los picos de flujo no compensan este efecto.

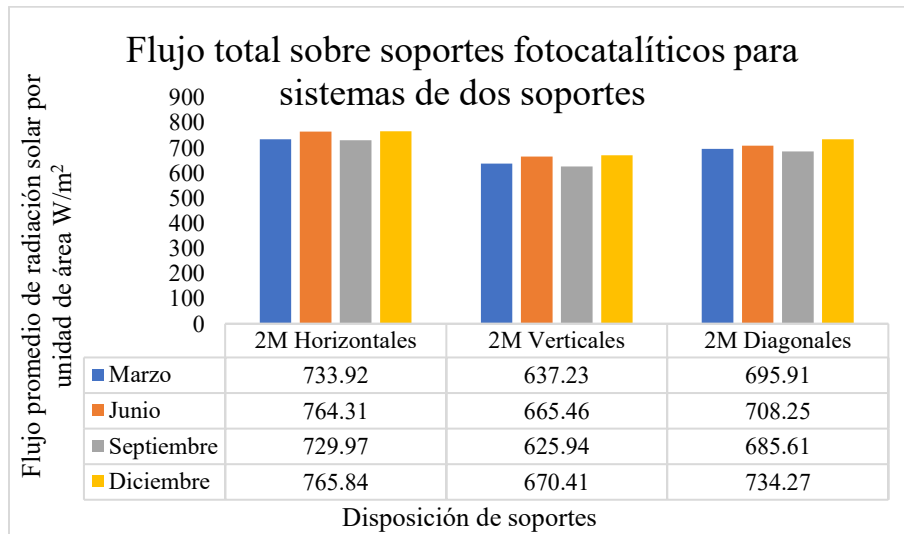


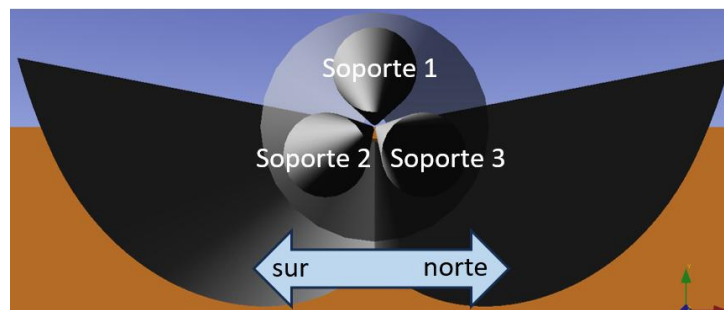
Figura 3.23 Irradiancia solar total por unidad de área ( $W/m^2$ ) en sistemas de 2 soportes 4 diferentes fechas

### ***Irradiancia en sistema de tres soportes***

En esta sección se evaluó la irradiancia en los sistemas con absorbedor de cuarzo con soportes dispuestos axialmente en dirección este-oeste en cuatro diferentes épocas del año y el periodo de actividad solar 0900 a. m.-1600 p. m., con dos configuraciones de tres soportes: triangular y triangular invertida.

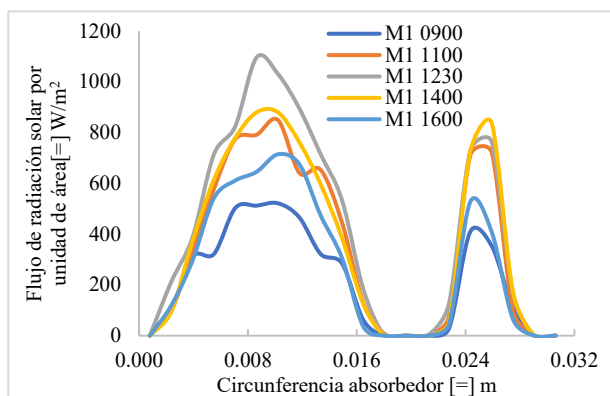
### ***Tres soportes catalíticos dispuestas en forma triangular***

La configuración triangular invertida de los soportes (*Figura 3.24*) muestra una disposición intermedia entre los soportes y el absorbedor, el primer soporte apunta a la apertura del CPC, los soportes 2 y 3, cercanos a la involuta reflejante y las superficies parabólicas sur y norte respectivamente.

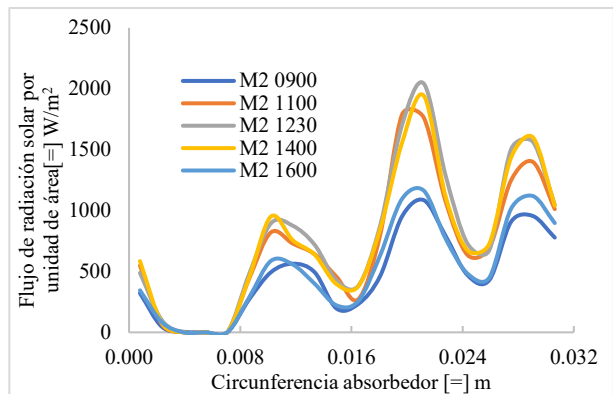


*Figura 3.24 Disposición de soportes en sistema de 3 soportes con disposición triangular*

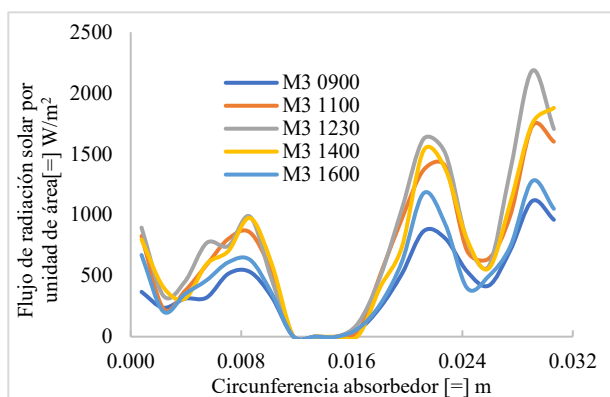
La *Figura 3.25* muestra la irradiancia sobre los tres diferentes soportes (*a, b y c*) y d. el flujo solar superficial promedio a diferentes horas. La *Figura 3.25a* describe el flujo radiativo sobre el primer soporte el hemisferio superior de cara a la apertura del sistema es la superficie que recibe la mayor cantidad de radiación solar, esta radiación es directa, mientras que el tercer sector se encuentra casi totalmente sombreado, en contraposición con el comportamiento del cuarto sector donde existe un máximo local del mismo orden de magnitud que el máximo del hemisferio superior, el 40 % del cuarto sector esta sombreado, los flujos por unidad de área en este soporte ascienden a los  $1100 \text{ W/m}^2$ . El segundo soporte se presenta en la *Figura 3.25b* orientado en la vecindad de la involuta reflejante y parábola sur del sistema, el primer sector, cercano a los otros soportes tiene un sombreadamiento del 30 %, el segundo sector del soporte tiene un pico en su medianía, asociado a la radiación directa y un mínimo en la superficie lateral compartido por el tercer sector, el tercer sector cuya cara apunta a la superficie reflejante dibuja el máximo de este soporte, para descender mientras se apunta a la involuta del sistema, el cuarto sector tiene un comportamiento intermedio entre el segundo y tercer sector a pesar de su cercanía con el tercer soporte, este comportamiento puede explicarse por la reflexión derivada de la parábola norte los valores radiativos están en el orden de  $1750 \text{ W/m}^2$ . El tercer soporte, esta ocluido radiativamente en el 50 % del segundo sector cara que apunta a los soportes primero y segundo, esta es la única sección sombreada y el máximo se presenta en el cuarto sector circular apuntando a la parábola reflejante norte. El primer soporte percibe radiación de la mitad de magnitud que el soporte segundo y tercero (*Figura 3.25d*), mientras que en promedio los soportes reciben radiación por unidad de área de  $400\text{-}650 \text{ W/m}^2$ . Los perfiles relativos a las fechas junio, septiembre y diciembre se muestran en el **Apéndice B**.



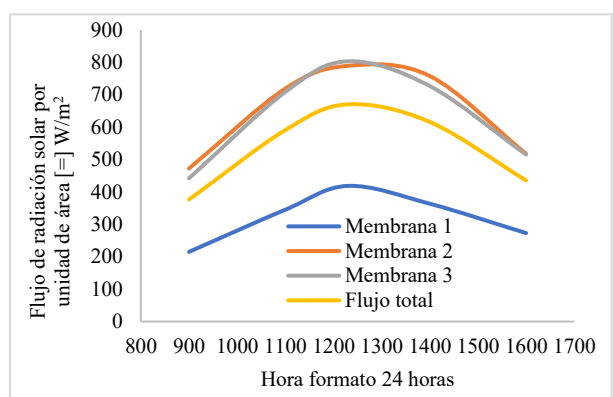
a. Soporte 1, cercano a la apertura del CPC



b. Soporte 2, cercano a la involuta reflejante y superficie sur del sistema



c. Soporte 3, cercano a la involuta reflejante y superficie norte del sistema



d. Flujo promedio sobre la superficie de cada soporte y total

Figura 3.25 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 3 soportes dispuestos triangularmente a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3 y d) flujo promedio en la superficie de soportes de CPC 21 de marzo cuarzo con inclinación  $18^\circ$

### Tres soportes catalíticos dispuestas en forma triangular invertida

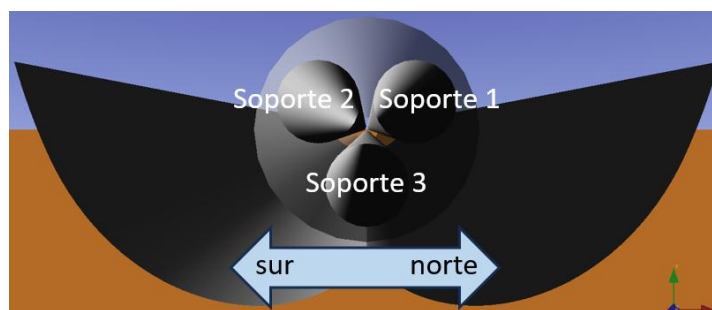
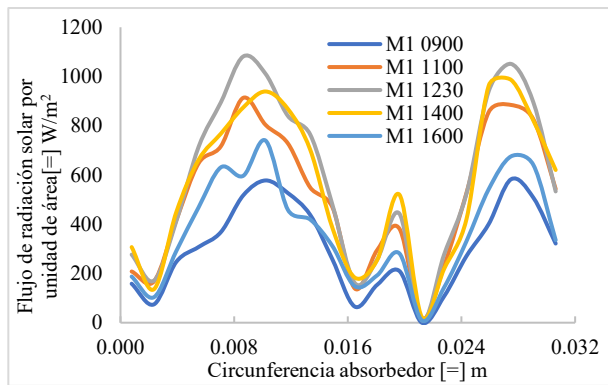


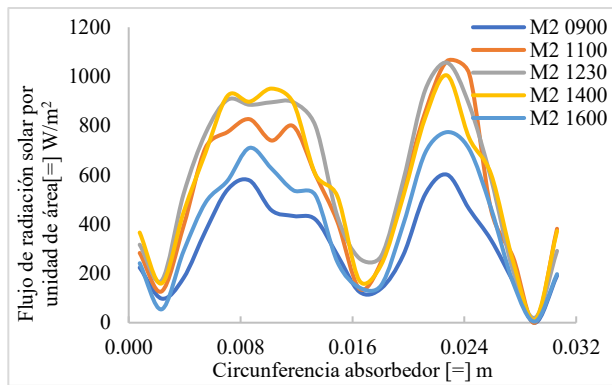
Figura 3.26 Disposición de soportes en sistema de 3 soportes con disposición triangular

La Figura 3.27a muestra el perfil radiativo sobre el primer soporte dispuesto en la apertura del sistema y cercano a la parábola norte, hay dos máximos de magnitud equiparable el primero de ellos se asocia a la superficie del sector primero y segundo, centrado en el pináculo del hemisferio superior, el tercer sector,

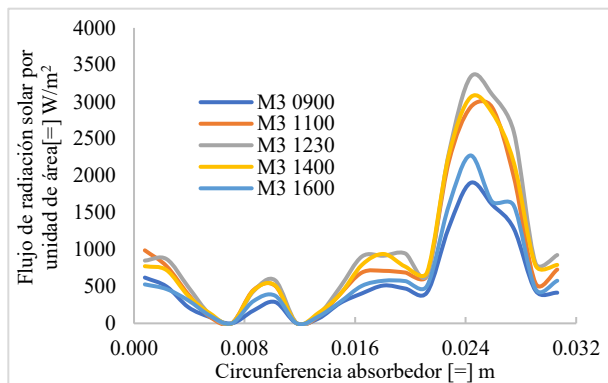
cercano a los soportes segundo y tercero presenta un máximo local de magnitud promedio  $300 \text{ W/m}^2$  y una superficie sombreada puntual, el cuarto sector está totalmente iluminado y sus máximos son de magnitud promedio  $700 \text{ W/m}^2$  igual que en el pináculo del hemisferio superior. El segundo soporte (*Figura 3.27b*) presenta una superficie sombreada puntual en el cuarto sector cercano a los soportes primero y tercero, el hemisferio superior presenta flujos promedio de  $700 \text{ W/m}^2$ , mientras que el tercer sector de cara a la parábola sur comparte el máximo valor de concentración con el cuarto sector. El tercer soporte (*Figura 3.27c*) presenta dos sombras puntuales: en el primer y segundo sector, las superficies están asociadas a interacciones con el primer y segundo soporte, estas sombras cubren el 20 % de los respectivos soportes, una visión general sobre el soporte indica 10 % de sombreadamiento, el hemisferio inferior (sector tercero y cuarto) cuenta con flujos radiativos promedio de  $2000 \text{ W/m}^2$ , el comportamiento integral de flujo superficial a diferentes horas muestra una recepción superior en el tercer soporte de 88 % respecto a los soportes primero y segundo, el sombreadamiento parcial en el tercer soporte esta compensado por la concentración solar en su hemisferio inferior. El comportamiento en los meses: junio, septiembre y diciembre es homologo, con desplazamiento horizontal del perfil dependiente de la inclinación del sistema, estos perfiles se muestran en el **Apéndice B** del presente texto.



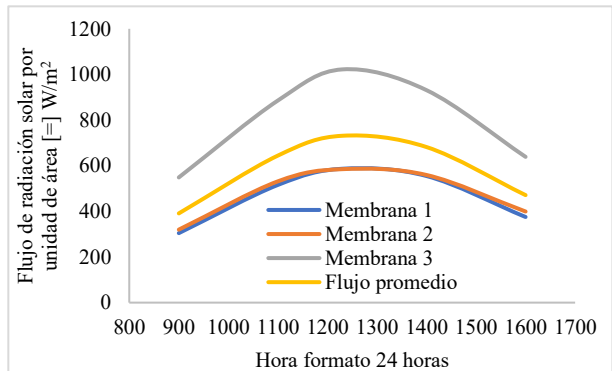
a. Soporte 1, cercano a la apertura y superficie norte del sistema



b. Soporte 2, cercano a la apertura y superficie sur del sistema



c. Soporte 3, cercano a la involuta reflejante del sistema

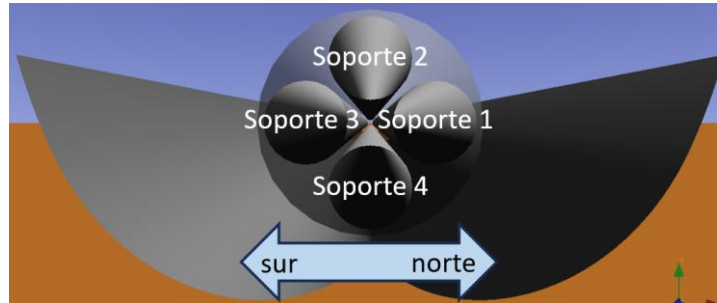


d. Flujo promedio sobre la superficie de cada soporte y total

*Figura 3.27 Irradiancia solar ( $\text{W/m}^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 3 soportes dispuestos en forma triangular invertida a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3 y d) flujo promedio en la superficie de soportes de CPC 21 de marzo cuarzo con inclinación  $18^\circ$*

### ***Irradiancia en sistema de cuatro soportes***

El sistema de concentración simulado en esta sección se compone por cuatro soportes, la disposición romboidal (*Figura 3.28*) el primer soporte está dispuesto a los  $0^\circ$  y se enumeran en sentido antihorario, el segundo se ubica en la apertura del CPC y más cercano a la fuente solar. En esta disposición los soportes tienen una separación de 1 mm con el absorbedor y los soportes vecinos. En esta sección se describen los perfiles de radiación incidente cada soporte.



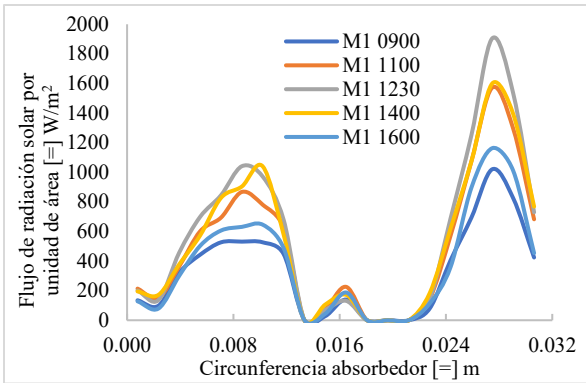
*Figura 3.28 Disposición de soportes en sistema de 4 soportes con disposición romboidal*

### ***Cuatro soportes catalíticos dispuestas romboidalmente***

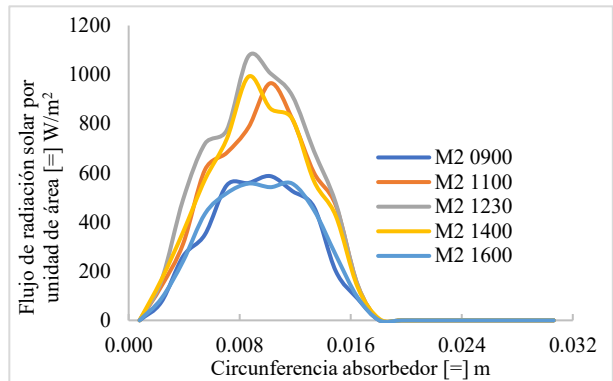
La *Figura 3.29a* muestra el perfil radiativo sobre el primer soporte, dispuesto en la vecindad de la parábola reflejante norte, el máximo promediado entre las diferentes horas asciende a un valor de  $1350 \text{ W/m}^2$ , el primero y el 70 % del segundo sector (hemisferio superior) alcanzan flujos de la mitad del máximo promedio ( $675 \text{ W/m}^2$ ), el 30 % restante asociado a la segunda superficie presenta una sombra puntual asociada a la intersección con el segundo soporte, seguido de un flujo de  $200 \text{ W/m}^2$  en la parte lateral del soporte que se extiende al tercer sector, esta región iluminada se debe a una combinación de la luz filtrada entre los soportes 2-3 y 3-4, el tercer sector padece el mayor sombreadamiento con una superficie sombreada del 60 %, el cuarto sector de cara a la superficie parabólica reflejante norte, posee el máximo absoluto de la curva con flujos intermedios entre radiación directa y reflejada por la superficie inferior. El segundo soporte (*Figura 3.29b*) está sombreado en un 50 %, con la cara iluminada por radiación directa al disponerse en la apertura del sistema el pico de flujo radiativo se presenta en intervalo de actividad (1100 a. m.-1230 p. m.) y su valor promedio es de  $800 \text{ W/m}^2$ , este soporte es el más afectado por los efectos de sombreadamiento. El perfil de radiación sobre el tercer soporte (*Figura 3.29c*) presenta simetría radial respecto al segundo soporte sus magnitudes son semejantes, pero sus puntos críticos están localizados simétricamente en las secciones circulares pertinentes, sombreadamiento en las intersecciones con el soporte segundo y cuarto y máximos en las superficies de cara a los reflectores. El cuarto soporte presenta un sombreadamiento global del 25 % mientras que su flujo máximo está asociado a la radiación reflejada en su hemisferio inferior con un valor promedio que asciende a los  $2300 \text{ W/m}^2$ , la primera y tercera superficie en general reciben radiación de magnitud directa ( $800 \text{ W/m}^2$ ).

La superficie del primer soporte se encuentra sombreada en un 25 %, el segundo soporte 50 %, el tercero 12.5 % y el cuarto 25 %, el área total sombreada entre los soportes asciende a un 28.13 %, si las sombras se concentraran en un solo soporte aproximadamente, este quedaría totalmente sombreado si la capacidad de aprovechar sus propiedades fotocatalíticas. El flujo promedio entre todos los soportes (*Figura 3.29e*) revela: el cuarto soporte recupera la mayor cantidad de flujo con un valor promedio de  $800 \text{ W/m}^2$ , los soportes primero y tercero recuperan  $500 \text{ W/m}^2$ , y el segundo soporte alimentado esencialmente por

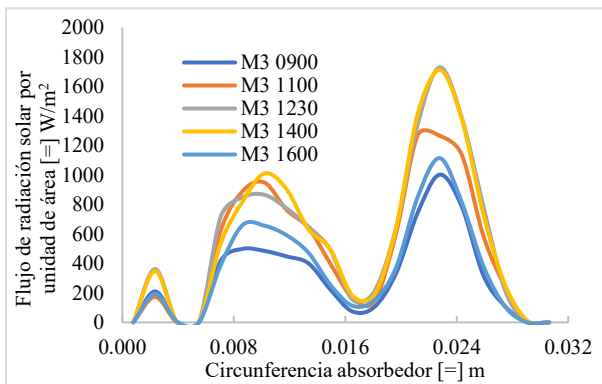
radiación directa cuenta con un flujo de  $200 \text{ W/m}^2$ , debe recordarse que este soporte es el más afectado por el sombreado esta observación es fundamental en la comparativa con los sistemas de tres soportes e invita a analizar el sistema triangular invertido extensivamente. Los perfiles del flujo simulados en los meses: junio, septiembre y diciembre pueden consultarse en el apéndice B de este texto, el comportamiento general y sus perfiles son homólogos a lo descrito por la *Figura 3.29*.



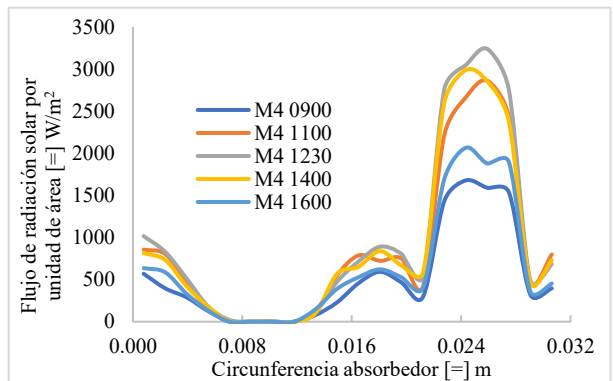
a. Soporte 1, cercano a la superficie parabólica norte del CPC



b. Soporte 2, dispuesto en la apertura del CPC

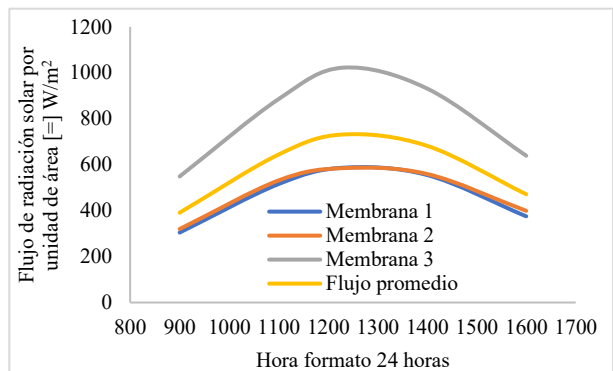


c. Soporte 3, cercano a la superficie parabólica sur del CPC



d. Soporte 4, cercano a la involuta reflejante del CPC

*Figura 3.29 Irradiancia solar ( $\text{W/m}^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 4 soportes dispuestos en forma romboidal a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3, d) soporte 4 y e) flujo promedio en la superficie de soportes de CPC 21 de marzo cuarzo con inclinación  $18^\circ$*



e. Flujo promedio sobre la superficie de cada soporte y promedio

### 3.1.3 Análisis integral sobre perfiles de radiación en diferentes disposiciones

Esta sección integra los resultados obtenidos en la transferencia radiativa a lo largo de los sistemas simulados, se valora el flujo radiativo ( $W/m^2$ ) y potencia (W), además de tablas comparativas entre las diferentes disposiciones de soportes.

La *Tabla 3.2* muestra los flujos promedio en las 4 diferentes fechas del año, debe considerarse que los sistemas sin soporte no han sido inclinados bajo el criterio del ángulo cenital, esto tiene un efecto directo en los valores recuperados en diciembre donde hay una caída importante respecto al resto de los meses, especialmente junio donde el ángulo de elevación solar es  $-4^\circ$ , cercano al cenit y por lo tanto se reportan los valores máximos de concentración solar, el aumento en flujo de junio respecto a diciembre es de 50 % con el absorbedor de vidrio y se reduce a 43 % en el caso de cuarzo, debe tomarse en cuenta, la reducción de este aumento, al inclinar el sistema según el criterio del ángulo cenital, en el caso de diciembre  $43^\circ$ , por ejemplo con un soporte e inclinando el sistema bajo el criterio del ángulo de elevación solar el aumento de flujo de junio respecto a diciembre es de 0.5 %, es decir la variación de flujo a lo largo de los meses puede compensarse a través de la inclinación del sistema, otro ejemplo de este fenómeno es reportado el mes de junio: la irradiancia por unidad de área en el seno del absorbedor de cuarzo sin inclinación asciende a  $727.46 W/m^2$  en comparación con el sistema de un soporte y su valor  $870.87 W/m^2$  notoriamente superior y presentado un aumento del 19.6 %, mostrando la importancia en la inclinación del sistema de nueva cuenta, de estos resultados se deduce: la mejor forma de aprovechar el catalizador soportado es con un soporte en el ánulo y el aumento de soportes disminuye su aprovechamiento. La *Tabla 3.3* muestra los porcentajes de aumento entre las disposiciones que reportaron mejor flujo radiativo, el valor de referencia varía entre columnas en la comparativa respecto al absorbedor sin soportes, de nueva cuenta un soporte muestra la mayor eficiencia con un aumento de 33 %, cuatro soportes presentan una disminución de 23 %, al aumentar un soporte provoca una reducción del aprovechamiento promedio de 16.6 %.

*Tabla 3.2 Flujos totales en diferentes disposiciones de soportes en diferentes fechas del año*

Mes	Marzo	Junio	Septiembre	Diciembre	Media
	Flujo de radiación solar por unidad de área [=] $W/m^2$				
Vidrio sin soporte e inclinación	403.83	444.10	406.08	296.66	387.67
Pyrex sin soporte e inclinación	580.89	601.48	554.78	409.49	536.66
Cuarzo sin soporte e inclinación	673.38	727.46	675.47	508.66	646.24
1M ánulo	854.48	870.87	848.70	865.08	859.78
2M Horizontales	733.92	764.31	729.97	765.84	748.51
2M Verticales	637.23	665.46	625.94	670.41	649.76
2M Diagonales	695.91	708.25	685.61	734.27	706.01
3M Triangular	538.00	587.14	538.36	558.50	555.50
3M Triangular invertida	583.90	594.77	583.14	594.92	589.18
4M Rombo	484.09	502.54	488.33	501.12	494.02

Tabla 3.3 Porcentaje de aumento entre disposiciones con mayor flujo radiativo

Porcentaje de aumento en flujo de radiación solar entre mejores disposiciones [=] W/m <sup>2</sup>	Referencia				
	Absorbedor s/ inclinación	1M ánulo	2M Horizontales	3M Triangular invertida	4M Rombo
Absorbedor s/ inclinación	0%	-25%	-14%	10%	31%
1M ánulo	33%	0%	15%	46%	74%
2M Horizontales	16%	-13%	0%	27%	52%
3M Triangular invertida	-9%	-31%	-21%	0%	19%
4M Rombo	-23%	-43%	-34%	-16%	0%

La *Tabla 3.4* presenta la potencia neta (W) de los sistemas, a pesar de que aumentar el número de soportes provoca el desaprovechamiento máximo de las superficies, el flujo neto crece con el aumento de soportes, en todos los casos, la desviación estándar entre los sistemas de dos soportes es de 1.6 W, 6 % respecto a la media, mientras que los sistemas de tres soportes tienen una desviación estándar de 1 W, 3 % respecto a la media. Cabe aclarar que el flujo neto en el sistema de 4 soportes es de 37.25 W, mientras que el sistema sin soportes e inclinación asciende a 36.54 W, este aumento se debe a la falta de inclinación a lo largo del año en el caso del sistema sin soportes y sustenta el comportamiento teórico: si el número de soportes tiende a infinito se esperaría que el flujo sobre el absorbedor se recupere casi íntegramente al considerar la reflexión y dispersión en la superficie del absorbedor. Un enfoque alternativo se muestra en la *Tabla 3.5* donde se muestran las relaciones de aumento entre los sistemas con mayor flujo solar el sistema de cuatro soportes tiene un aumento de 2 % respecto al sistema sin soportes por las condiciones de simulación descritas previamente al pasar de un soporte a dos la radiación recuperada asciende en un 74 %, al comparar dos soportes con el sistema de tres hay un aumento de 18 % y en el sistema de cuatro comparado con tres hay un aumento de 12 %.

Tabla 3.4 Potencias en disposiciones de soportes en diferentes fechas del año

Mes	Marzo	Junio	Septiembre	Diciembre	Media
	Potencia neta [=] W				
Vidrio sin soporte e inclinación	22.84	25.11	22.96	16.78	21.92
Pyrex sin soporte e inclinación	32.85	34.01	31.37	23.16	30.35
Cuarzo sin soporte e inclinación	38.08	41.14	38.20	28.76	36.54
1M ánulo	16.11	16.42	16.00	16.31	16.21
2M Horizontales	27.67	28.81	27.52	28.87	28.22
2M Verticales	24.02	25.09	23.60	25.27	24.50
2M Diagonales	26.24	26.70	25.85	27.68	26.62
3M Triangular	30.42	33.20	30.44	31.58	31.41
3M Triangular invertida	33.02	33.63	32.98	33.64	33.32
4M Rombo	36.50	37.89	36.82	37.78	37.25

Tabla 3.5 Porcentaje de aumento en potencia neta ( $W$ ) entre disposiciones con mayor flujo radiativo

Porcentaje de aumento de radiación solar total entre mejores disposiciones [=] $W$	Referencia				
	Absorbedor s/ inclinación	1M ánulo	2M Horizontales	3M Triangular invertida	4M Rombo
Absorbedor s/ inclinación	0%	125%	29%	10%	-2%
1M ánulo	-56%	0%	-43%	-51%	-56%
2M Horizontales	-23%	74%	0%	-15%	-24%
3M Triangular invertida	-9%	106%	18%	0%	-11%
4M Rombo	2%	130%	32%	12%	0%

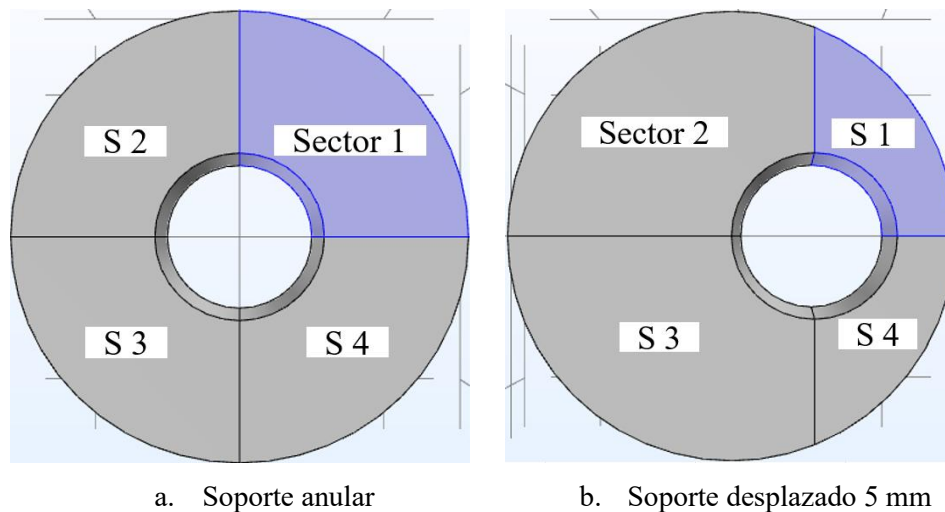
La inclinación basada en la elevación solar y por lo tanto el mes del año en junio es de  $-4^\circ$  donde se presenta un ángulo cenital solar mínimo, es capaz de obtener radiación por unidad de área de magnitud  $870 \text{ W/m}^2$ , mientras que en los meses de marzo y septiembre las condiciones son semejantes con radiación uniforme y la inclinación del sistema es de  $18^\circ$ - $19^\circ$ . En diciembre el objetivo es evitar pérdidas de radiación que en el sistema sin inclinación ascienden al 32 % respecto a los otros meses, esto se debe a que el astro tiene una baja altura, la inclinación del sistema que evita esta pérdida es de  $43^\circ$ . El dinamismo en la inclinación del sistema minimiza la variabilidad estacional radiativa por unidad de área a 5 % en configuraciones de dos soportes.

## 3.2 Mecánica de fluidos y transferencia de masa

En esta sección se muestran los valores de velocidad promedio ( $v_{prom}$ ) y máxima ( $v_{m\acute{a}x}$ ), esto se debe a que el coeficiente de transferencia de masa ( $k_c$ ) (**Sección 2.8**) es un parámetro local y la velocidad puede determinarse bajo diferentes criterios, en este estudio se valora el enfoque promedio y máximo, los coeficientes de transferencia de masa derivados también son reportados y resultan útiles en términos comparativos con otros sistemas analizados y condiciones similares, estos parámetros son dependientes del dominio analizado, debido a la variedad de condiciones propicias por la geometría compleja del sistema, por lo que el dominio ha sido dividido en cuatro regiones en derredor de un soporte particular y valorando su simetría como extensión de los resultados en otros soportes del mismo sistema.

### 3.2.1 Un soporte anular y desplazado

La *Figura 3.30* muestra las regiones analizadas para los resultados subsecuentes, estas fueron designadas de sección 1 a 4 en sentido antihorario, la imagen incluye el desplazamiento de 5 mm, este criterio es idéntico en los sistemas con soportes desplazados 3 y 7 mm.



*Figura 3.30 Regiones de fluido analizadas en sistemas de un soporte*

La *Tabla 3.6* muestra los coeficientes de transferencia de masa ( $k_c$ ) dependientes del sector estudiado, determinado con la analogía de Reynolds, el método ha sido descrito en la metodología de este texto, debido a las semejanzas entre algunas regiones (e.g en el sistema de un soporte anular las regiones 1 a 4 con diferencias en gradientes de velocidad y velocidades menores al 1%) los resultados se han agrupado en general por pares de sectores. El parámetro  $k_c$  es dependiente del gradiente de velocidad superficial del soporte, y la velocidad de fluido libre, ambos parámetros asociados al sector pertinente del soporte, es destacable su relación directa en el caso del gradiente e indirecta en el caso de la velocidad, respecto a este último parámetro se proponen dos valores, la velocidad calculada a partir de la velocidad máxima ( $v_{inf}$ ) y velocidad promedio ( $v_{prom}$ ), la diferencia entre estos parámetros promueve la determinación de dos diferentes coeficientes de transferencia de masa:  $k_c (v_{inf})$  y  $k_c (v_{prom})$ , la diferencia entre estos coeficientes es su magnitud  $v_{inf}$  es naturalmente mayor y por su relación indirecta con  $k_c$  disminuye el valor de este parámetro. El desplazamiento del soporte afecta a la transferencia de masa en ambas visiones  $v_{inf}$  y  $v_{prom}$ .

*Tabla 3.6 Gradiente de velocidad normal a la superficie del soporte, velocidades y coeficientes de transferencia de*

masa por sección de soporte

Soportes, disposición	1, anular	1, desplazada 0.3 mm		1, desplazada 0.5 mm		1, desplazada 0.7 mm	
		1 y 4	2 y 3	1 y 4	2 y 3	1 y 4	2 y 3
Sección	1 a 4	1 y 4	2 y 3	1 y 4	2 y 3	1 y 4	2 y 3
Gradiente de la velocidad [ $\text{m/s}^2$ ]	198	130	207	87	183	36	161
$v_{\text{máx}}$ [ $\text{m/s}$ ]	0.15	0.14	0.18	0.12	0.19	0.09	0.19
$v_{\text{prom}}$ [ $\text{m/s}$ ]	0.12	0.08	0.14	0.06	0.14	0.03	0.13
$v_{\text{inf}}$ [ $\text{m/s}$ ]	0.15	0.14	0.18	0.12	0.19	0.08	0.19
$k_c (v_{\text{inf}})$ [ $\text{m/s}$ ]	1.36E-03	9.63E-04	1.16E-03	7.30E-04	9.91E-04	4.24E-04	8.71E-04
$k_c (v_{\text{prom}})$ [ $\text{m/s}$ ]	1.71E-03	1.59E-03	1.53E-03	1.54E-03	1.35E-03	1.23E-03	1.23E-03

La Figura 3.31 muestra los perfiles de velocidad en regiones de sistemas de un soporte anular 3.31a y un soporte desplazado del ánulo 3.31b y c, en este sistema se han dividido los perfiles pues los valores máximos y de donde se podría derivar el valor de  $v_{\text{inf}}$  no son iguales considerando que  $k_c$  es un parámetro local, esta observación es respaldada por la asimetría en la intensidad de la velocidad entre las regiones primera y segunda de las figuras referenciadas siendo en el caso de b una región de velocidad baja y en el caso de c de la velocidad máxima.

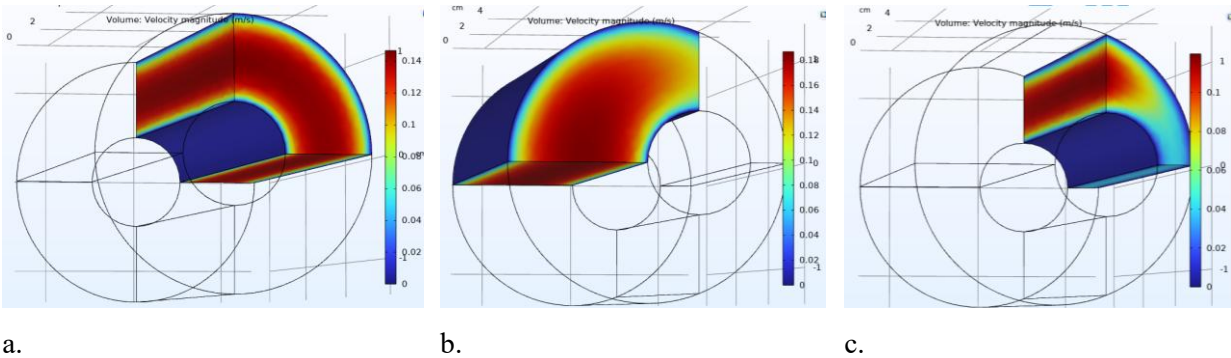
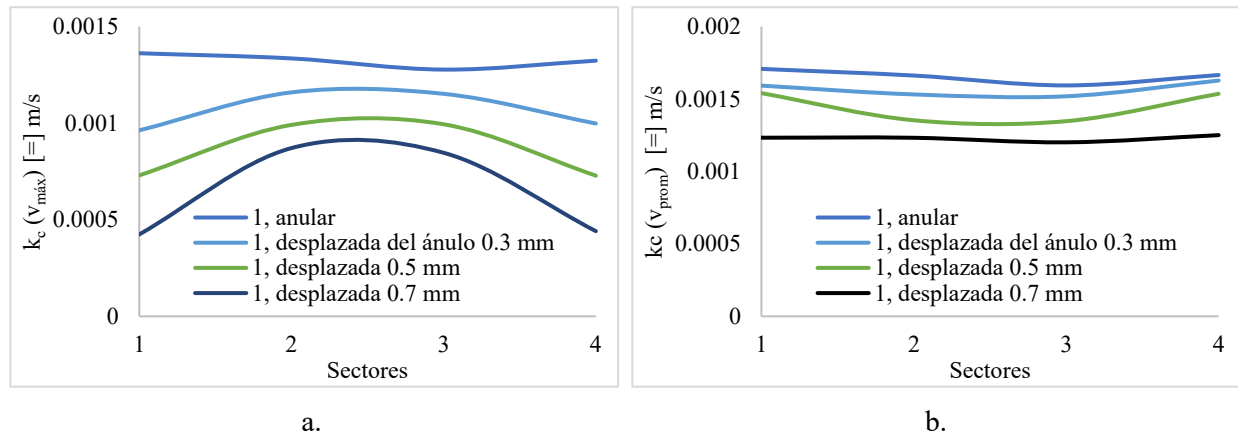


Figura 3.31 Distribución de velocidad en sistema de un soporte a) anular primer sector, desplazada del ánulo 5 mm b) segundo sector y c) primer sector

El parámetro  $k_c$  evaluado a lo largo de los sectores, es función de la velocidad de fluido libre cuando esta velocidad se determina mediante la velocidad promedio ( $v_{\text{prom}}$ ),  $k_c$  no presenta cambios significativos (Figura 3.32b), es decir los efectos geométricos del sistema se pierden al promediar la velocidad salvo en el caso de desplazamiento intermedio del soporte a 5 mm del ánulo, donde las caras que apuntan al ánulo (sectores 2 y 3) del sistema tienen una disminución del 13 % respecto a las caras externas (sectores 1 y 4), a pesar de ello hay una tendencia en la disminución del  $k_c$  mientras el soporte se aproxima a la pared del reactor (absorbedor) este resultado se debe a que en otros casos el aumento del gradiente de velocidad y la velocidad al comparar las 2 y 3 respecto a las caras 1 y 4 son de la misma proporción, la diferencia con este sistema es la disparidad en sus relaciones de aumento, mientras el gradiente de velocidad presenta un aumento de 60 % en comparación con la velocidad promedio con un aumento del 130 %, esta observación resulta clave al observar el comportamiento de  $k_c$  cuando se lo considera como función de  $v_{\text{máx}}$  (Figura 3.32a) donde el comportamiento es diametralmente diferente manifestando puntos críticos opuestos máximos en el caso de considerar  $v_{\text{prom}}$  se presenta un mínimo en los sectores segundo y tercero (Figura

3.32b), mientras que al considerar  $v_{\text{m}\acute{a}\text{x}}$  hay un máximo en los sectores homólogos (*Figura 3.32a*), el efecto geométrico del sistema logra ser capturado por  $k_c(v_{\text{m}\acute{a}\text{x}}$ ) mostrando en todos los casos transferencia de masa favorecida en la región libre de fluido en todos los casos, sector segundo y tercero.

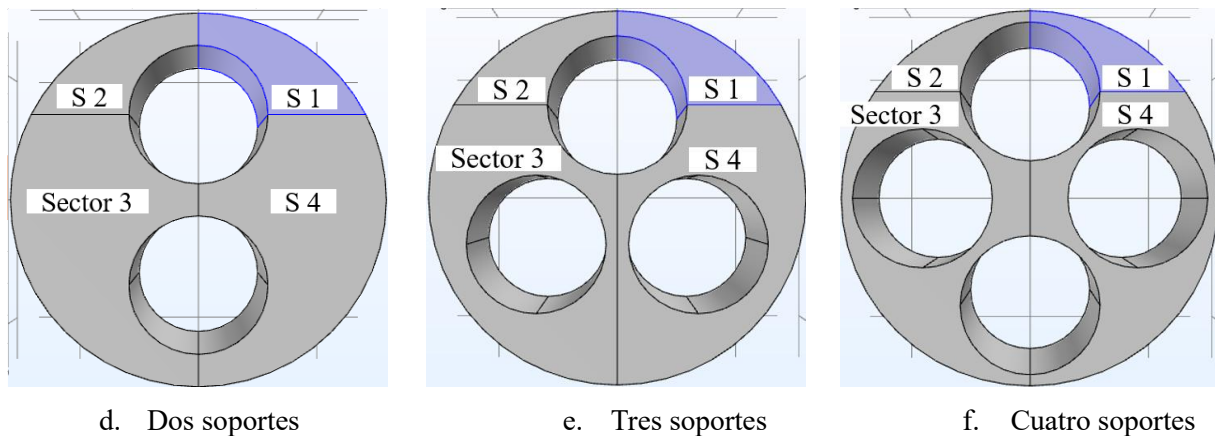


*Figura 3.32  $k_c$  (m/s) en las secciones de cuatro disposiciones de un soporte: a)  $k_c$  dependiente de la  $v_{\text{m}\acute{a}\text{x}}$  y b)  $k_c$  dependiente de  $v_{\text{prom}}$*

La observación de los perfiles de flujo y sus valores indica un beneficio a la transferencia de masa en las regiones donde disminuyen las superficies sólidas en este caso los sectores 2 y 3 en todos los casos, se espera una disminución en la magnitud de  $k_c$  al aumentar el número de soportes.

### 3.2.2 Soportes múltiples

La *Figura 3.33* muestra las regiones analizadas para los sistemas de soportes múltiples: dos soportes (*a*), tres soportes (*b*) y cuatro soportes (*c*), las regiones varían de 1 a la 4 en sentido antihorario, las regiones ilustradas son opacas y representan el espacio por donde el fluido y las especies han de transitar, el análisis se centra en uno de los soportes pues se han considerado las propiedades simétricas de los sistemas.



*Figura 3.33 Regiones de fluido analizadas en sistemas de varios soportes*

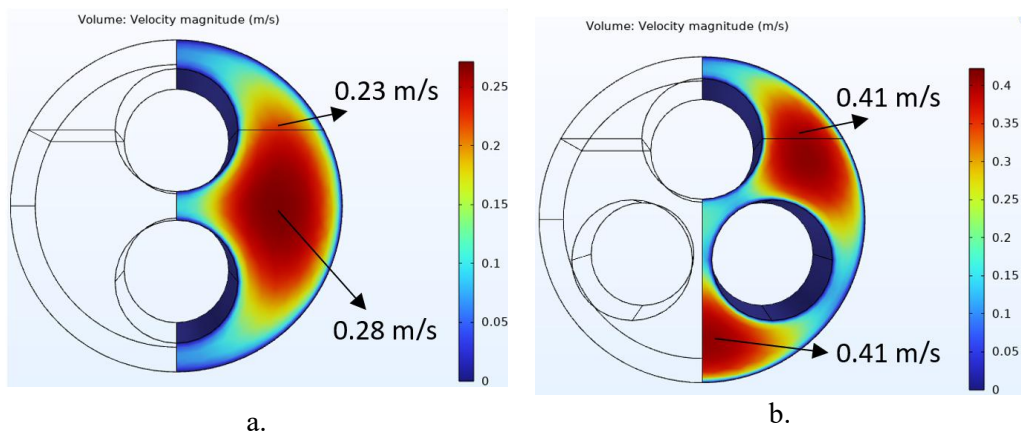
La *Tabla 3.7* incluye parámetros relativos a transferencia de momento y masa el sistema de dos soportes manifiesta un aumento promedio en el gradiente de velocidad del 50 % y de velocidad 90 % respecto a un soporte anular, este sistema es usado como referencia por reportar los mejores resultados en comparación con los sistemas de un soporte desplazado del nulo. Al incrementar el número de soportes el gradiente de

velocidad superficial y la velocidad aumentan, sin embargo, este crecimiento es dispar siendo mayor el de la velocidad (con dependencia inversa a  $k_c$ ) respecto al gradiente y provocando la disminución de  $k_c$  con el aumento de soportes, el flujo volumétrico es variable y depende del sistema, el parámetro constante en este caso el número de Reynolds fijado en 2000 régimen laminar, todos los parámetros pueden consultarse en la **Sección 2.6**.

Tabla 3.7 Gradiente de velocidad normal a la superficie del soporte, velocidades y coeficientes de transferencia de masa por sección de soporte

<b>Soportes, disposición</b>	<b>1, anular</b>	<b>2, horizontal</b>		<b>3, triangular</b>		<b>4, romboidal</b>	
<i>Sección</i>	1 a 4	1 y 2	3 y 4	1 y 2	3 y 4	1 y 2	3 y 4
<i>Gradiente de la velocidad [=<math>\frac{m}{s^2}</math>]</i>	198	229.91	357.72	341.47	345.39	604.59	485.32
<i><math>v_{m\acute{a}x}</math> [=<math>\frac{m}{s}</math>]</i>	0.15	0.23	0.28	0.41	0.42	0.68	0.66
<i><math>v_{prom}</math> [=<math>\frac{m}{s}</math>]</i>	0.12	0.12	0.19	0.25	0.27	0.43	0.40
<i><math>v_{inf}</math> [=<math>\frac{m}{s}</math>]</i>	0.15	0.23	0.28	0.41	0.41	0.68	0.65
<i><math>k_c (v_{m\acute{a}x})</math> [=<math>\frac{m}{s}</math>]</i>	1.36E-03	9.89E-04	1.29E-03	8.37E-04	8.38E-04	8.95E-04	7.48E-04
<i><math>k_c (v_{prom})</math> [=<math>\frac{m}{s}</math>]</i>	1.71E-03	1.89E-03	1.86E-03	1.37E-03	1.29E-03	1.41E-03	1.22E-03

La *Figura 3.34* muestra los valores y la disposición de los valores de velocidad considerados por sector para el cálculo de  $k_c$  para el soporte seleccionado, existe un aumento en la velocidad a la par del aumento de soportes y regiones de estancamiento cuando la distancia entre los soportes y el absorbedor es mínima este fenómeno afecta especialmente al sistema de cuatro soportes, debido a las dimensiones de los soportes y el absorbedor la configuración es ajustada y cerca del 30 % de los soportes tienen fluido cuasi estático.



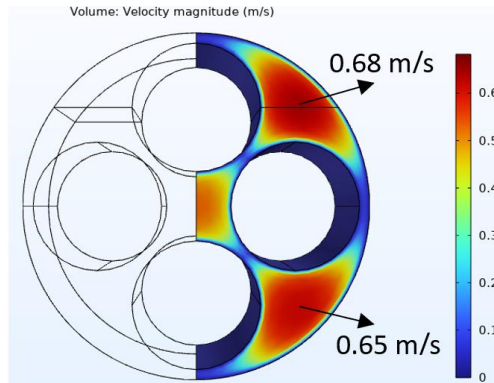


Figura 3.34 Distribución de velocidad (m/s) y  $v_{inf}$  (m/s) de sector 1 y 4 en sistema: a) dos soportes, b) tres soportes y c) cuatro soportes

c.

La comparación entre los valores de  $k_c$  asociados a los diferentes sistemas se muestra en la *Figura 3.35* el sistema de un soporte anular presenta el valor más elevado, mientras que dos soportes emulan su comportamiento en los sectores tercero y cuarto, estos sectores contienen las áreas de flujo más grandes, en contraposición con los sectores primero y segundo donde la velocidad ha disminuido, se resalta la disminución de  $k_c$  de estos sectores respecto al sistema de un soporte anular con un valor de 30% a pesar de presentar un valor inferior de velocidad, con una renovación de fluido pausada es decir tiempo de residencia mayor, fenómeno que favorece el transporte de especies químicas, el gradiente de velocidad superficial es menor dificultando el mezclado de las especies, estas región representa el comportamiento esperado en los sistemas subsecuentes con regiones de flujo limitadas. Los sistemas de tres y cuatro soportes en general tienen un comportamiento semejante con  $k_c$  de magnitud 0.00085 m/s, mientras que las regiones alrededor de los soportes en el sistema de cuatro soportes en términos de la transferencia de masa tienen un comportamiento homólogo, debe analizarse el sistema de tres soportes pues en todas las regiones la velocidad considerada es idéntica (0.41 m/s) siendo la única variable: el gradiente de velocidad superficial, los sectores tercero y cuarto de este sistema manifiestan velocidades bajas en el 50 % de su superficie disminuyendo el valor de este parámetro y afectando directamente la transferencia de masa.

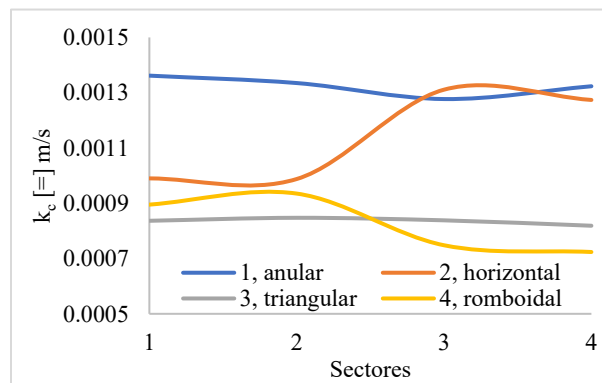


Figura 3.35  $k_c$  (m/s) en las secciones de cuatro disposiciones de soportes múltiples

La *Tabla 3.8* muestra las relaciones de aumento de  $k_c$  entre todas las disposiciones evaluadas, los parámetros de referencia se encuentran en la segunda fila de esta tabla al comparar la transferencia de masa con un soporte anular se observa una disminución en todos los casos, es notorio: el menor decremento entre los sistemas modificados se presenta con dos soportes (disminución del 21 %) en comparación con el desplazamiento ligero de 3 mm de un soporte con decremento del 28 %, la comparación de cuatro soportes

respecto a tres ofrece un incremento del 15 % en este parámetro debido a las magnitudes de velocidad semejantes pero el crecimiento del gradiente de velocidad superficial en el sistema de cuatro soportes, en ese sentido basado en la transferencia de masa se prefiere el sistema de cuatro soportes respecto al de tres.

Tabla 3.8 Relaciones porcentuales entre coeficientes de transferencia de masa ( $k_c$ ) [=] m/s, de sistemas de soportes múltiples

# soportes, disposición	Referencia $k_c$						
	1, Anular	1, desplazado 3 mm	1, desplazado 3 mm	1, desplazado 3 mm	2, vertical	3, triangular	4, romboidal
1, Anular	0%	39%	85%	153%	27%	101%	75%
1, desplazado 0.3 mm	-28%	0%	33%	82%	-9%	45%	26%
1, desplazado 0.5 mm	-46%	-25%	0%	37%	-31%	9%	-5%
1, desplazado 0.7 mm	-60%	-45%	-27%	0%	-50%	-20%	-31%
2, vertical	-21%	9%	45%	99%	0%	58%	38%
3, triangular	-50%	-31%	-8%	26%	-37%	0%	-13%
4, romboidal	-43%	-21%	6%	45%	-27%	15%	0%

La Figura 3.36 muestra la caída de presión (Pa) dependiente de la configuración del sistema simulado y su número de soportes hay pérdidas menores al desplazar el soporte del ánulo con un mínimo en el sistema de un soporte desplazado 7 mm del ánulo de 1.17 Pa, por cada 6 cm de sistema recorrido, en el sistema de cuatro soportes la caída de presión asciende a 52.29 Pa, la longitud de los tubos del sistema CPC asciende a 4.8 m, el sistema de cuatro soportes para este sistema requiere una presión mínima de 4183 Pa, la Tabla 3.9 muestra las presiones máximas ( $P_{\text{máx}}$ ) antes de la fractura de los absorbedores en los sistemas: vidrio, vidrio pyrex y cuarzo, basado en el esfuerzo de rotura y usando el modelo de Barlow con un factor de seguridad ( $n$ ) igual a 4, la presión máxima soportada por un elemento tubular de cuarzo con las características de nuestro sistema es de 1.4 MPa los requisitos de flujo mínimos para un sistema de longitud de 4.8 m son de 0.004183 MPa, por lo tanto: la caída de presión en cualquiera de los sistemas analizados no es una limitante para su adecuado funcionamiento.

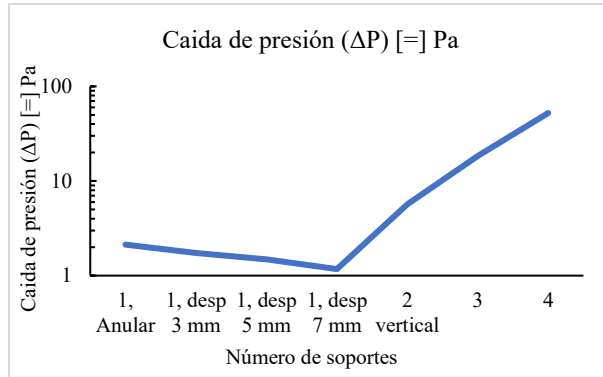


Figura 3.36 Caída de presión ( $\Delta P$ ) [=] Pa en escala logarítmica, dependiente del número de soportes y disposición, en sistema reducido de 6 cm

Tabla 3.9 Presión máxima soportada por absorbedores de diferente material basado en su esfuerzo de rotura y modelo de Barlow

Material	Vidrio estándar	Vidrio Pyrex	Cuarzo
$\sigma_{rotura}$ (MPa)	50	70	47.5
$P_{m\acute{a}x}$ (MPa)	1.4	1.9	1.4

La Tabla 3.10 muestra las relaciones de aumento entre las caídas de presión de los diferentes sistemas analizados el sistema de referencia está en la segunda fila de la tabla siendo el sistema con menor caída de presión el de un soporte desplazado 7 mm del ánulo, cuando el sistema de cuatro soportes es comparado con el de un soporte desplazado 7 mm, se observa un incremento en la caída de presión de 4361 %.

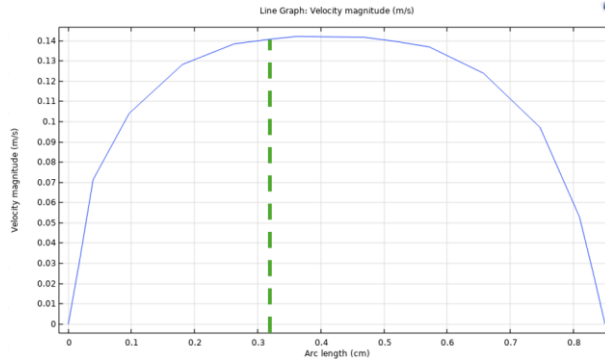
Tabla 3.10 Relaciones porcentuales entre caída de presión ( $\Delta P$ ) [=] Pa, de sistemas de soportes múltiples

# soportes	Referencia $\Delta P$						
	1, Anular	1, desp. 3 mm	1, desp. 5 mm	1, desp. 7 mm	2 vertical	3	4
1, Anular	0%	22%	43%	82%	-62%	-88%	-96%
1, desp. 3 mm	-18%	0%	17%	48%	-69%	-91%	-97%
1, desp. 5 mm	-30%	-15%	0%	27%	-74%	-92%	-97%
1, desp. 7 mm	-45%	-33%	-21%	0%	-79%	-94%	-98%
2	166%	226%	281%	384%	0%	-69%	-89%
3	764%	958%	1138%	1472%	225%	0%	-65%
4	2352%	2904%	3414%	4361%	821%	184%	0%

### 3.2.3 Capa límite hidrodinámica ( $\delta_h$ )

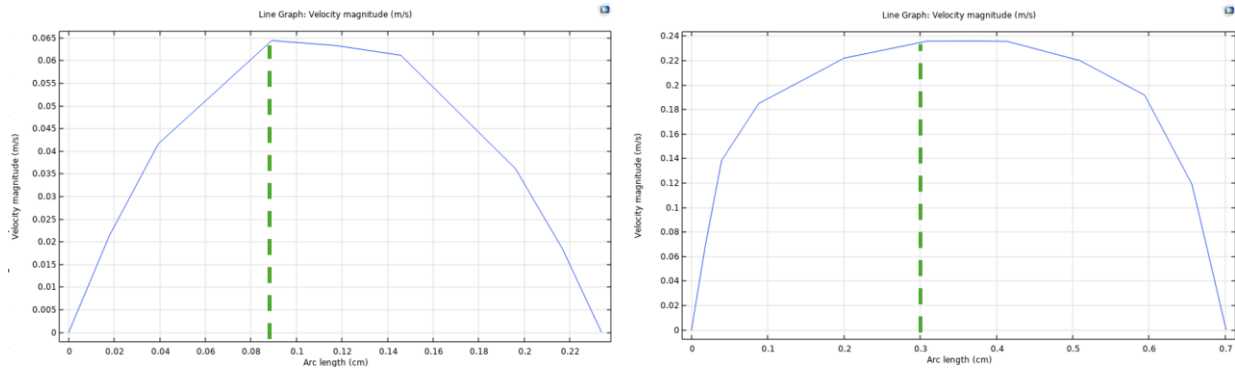
En esta sección se muestran los espesores de capa límite hidrodinámica promedio ( $\delta_h$ ) derivados de los perfiles de velocidad sobre una línea, alrededor de los soportes del reactor (véase **Sección 2.9**) mediante el conocimiento de la velocidad máxima ( $v_{m\acute{a}x}$ ) y su percentil 99.

La *Figura 3.37* muestra el perfil de velocidad en una línea dispuesta a  $0^\circ$  desde el soporte hasta la pared del reactor del sistema de un soporte anular, solo se obtiene un perfil por las propiedades simétricas del sistema, asumiendo el comportamiento es semejante angularmente. El perfil de flujo está directamente asociado al flujo de Poiseuille (flujo anular entre dos tubos concéntricos) y su espesor de capa límite tiene un valor aproximado de 3.2 mm asociado a la velocidad de 0.1407 m/s, basado en la velocidad máxima de 0.14217 m/s.



*Figura 3.37* Velocidad de flujo anular (m/s) evaluada sobre línea entre soporte y pared de reactor respecto a longitud de línea (cm) en sistema de un soporte

La *Figura 3.38* muestra los perfiles de velocidad sobre las líneas entre el soporte derecho del sistema de dos soportes y la pared del reactor 3.38a muestra la línea a  $0^\circ$ , en esta línea la velocidad máxima es de 0.0644 m/s, el 99% de esta velocidad es de 0.0639 m/s, con un espesor de capa límite asociado de 0.88 mm y 3.38b muestra el perfil sobre la línea a  $90^\circ$  del soporte con una velocidad máxima de 0.236 m/s, el espesor de capa límite es de 3 mm asociado a la velocidad de 0.233 m/s.



*Figura 3.38* Velocidad de flujo anular (m/s) evaluada sobre línea entre soporte y pared de reactor a) dispuesta a  $0^\circ$  y b) dispuesta a  $90^\circ$ , respecto a longitud de línea (cm) en sistema de dos soportes

La *Figura 3.39* muestra los perfiles de velocidad sobre las líneas entre el soporte derecho del sistema de tres soportes y la pared del reactor 3.39a muestra la línea a  $0^\circ$ , en esta línea la velocidad máxima es de 0.41 m/s, el 99% de esta velocidad es de 0.406 m/s, con un espesor de capa límite asociado de 3.7 mm, 3.39b muestra el perfil sobre la línea a  $90^\circ$  del soporte con una velocidad máxima de 0.126 m/s, el espesor de capa límite es de 0.91 mm asociado a la velocidad de 0.124 m/s y 3.39c muestra el perfil sobre la línea a  $270^\circ$  del soporte con una velocidad máxima de 0.19 m/s, el espesor de capa límite es de 1.7 mm asociado a la velocidad de 0.189 m/s.

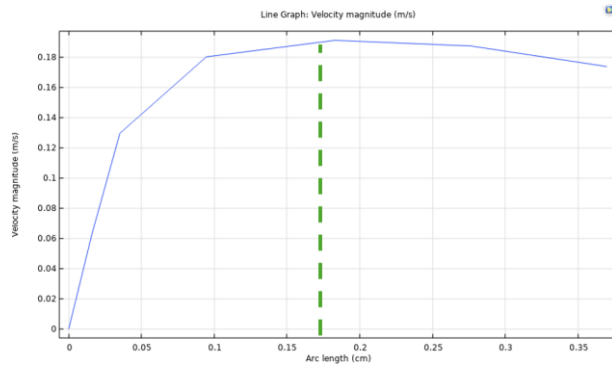
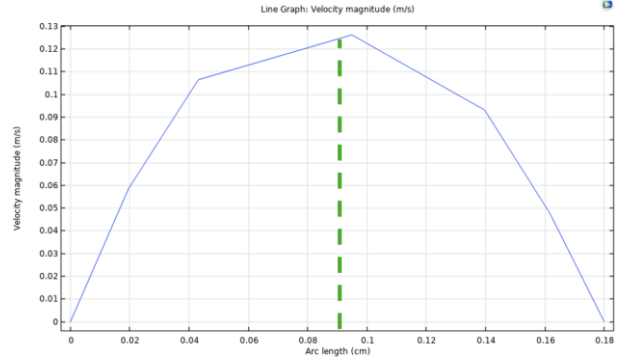
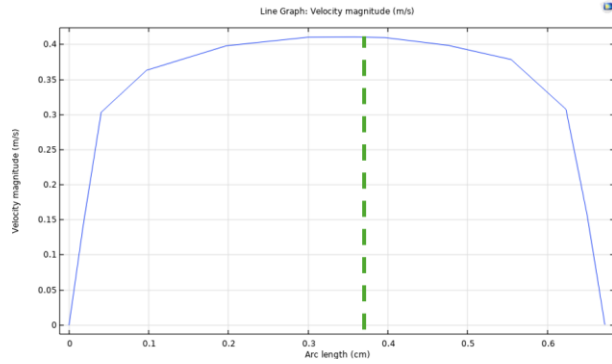
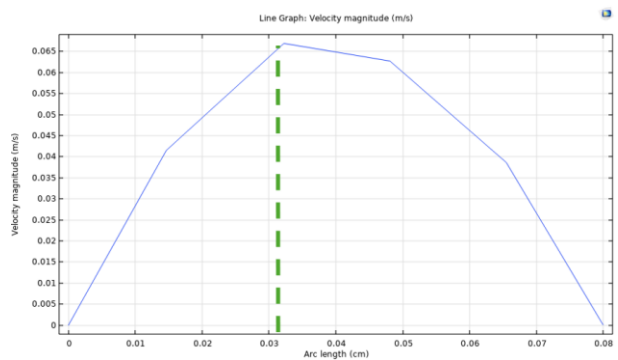
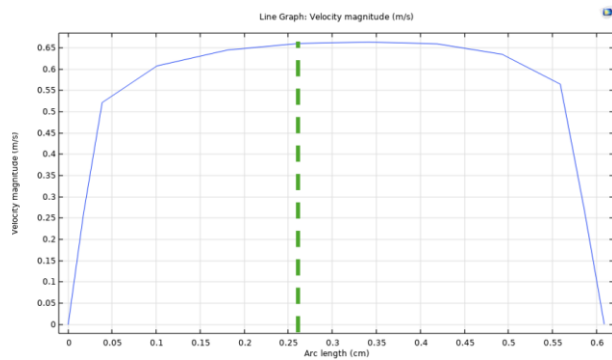


Figura 3.39 Velocidad de flujo anular (m/s) evaluada sobre línea entre soporte y pared de reactor a) dispuesta a  $0^\circ$ , b)  $90^\circ$  y c)  $270^\circ$ , respecto a longitud de línea (cm) en sistema de tres soportes

La Figura 3.40 muestra los perfiles de velocidad sobre las líneas entre el soporte derecho del sistema de cuatro soportes y la pared del reactor 3.40a muestra la línea a  $0^\circ$ , en esta línea la velocidad máxima es de 0.663 m/s, el 99% de esta velocidad es de 0.657 m/s, con un espesor de capa límite asociado de 2.6 mm, 3.40b muestra el perfil sobre la línea a  $90^\circ$  del soporte con una velocidad máxima de 0.0669 m/s, el espesor de capa límite es de 0.31 mm asociado a la velocidad de 0.0662 m/s y 3.40c muestra el perfil sobre la línea a  $270^\circ$  del soporte con una velocidad máxima de 0.544 m/s, el espesor de capa límite es de 2.35 mm asociado a la velocidad de 0.539 m/s.



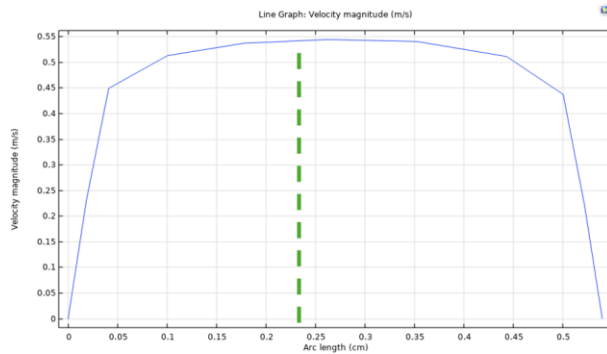


Figura 3.40 Velocidad de flujo anular (m/s) evaluada sobre línea entre soporte y pared de reactor a) dispuesta a 0°, b) 90° y c) 270°, respecto a longitud de línea (cm) en sistema de cuatro soportes

Los diagramas muestran una reducción significativa en  $\delta_h$  con el aumento en el número de soportes, cuando el sistema promueve flujo restringido, por ejemplo, la línea evaluada a 90° en el sistema de cuatro soportes presenta un espesor de capa límite de 0.31 mm, lo que sugiere una mejora en la transferencia de masa cerca de la superficie catalítica.

### 3.3 Análisis integral de fenómenos de transporte

En esta sección se integra el análisis de transporte fenomenológico radiativo, hidrodinámico y de transferencia de masa en el reactor fotocatalítico de un CPC. Las variables fueron la distribución espacial de soportes, irradiancia solar, mecánica del fluido y transferencia de masa.

La disposición espacial de los soportes tubulares dentro del CPC modifica: La distribución radiativa, el aumento de soportes incrementa la superficie catalítica, pero también se generan sombras (Figura 3.13). Por ejemplo, cuatro soportes en disposición romboidal incrementan el flujo neto en 130 % en comparación con un soporte (37.25 W y 16.21 W respectivamente), sin embargo, existe una reducción en la irradiancia promedio de 43 % (494.02 W/m<sup>2</sup> y 859 W/m<sup>2</sup>, Tabla 3.4). La máxima irradiancia local se localiza en los sectores expuestos a reflexión (cuarto sector).

#### 3.3.1 Hidrodinámica y capa límite

El aumento de soportes reduce el espesor de capa límite hidrodinámica y de concentración. Un soporte:  $\delta h \approx 0.8\text{mm}$  y cuatro soportes:  $\delta h \approx 0.3\text{mm}$  (validado por perfiles de velocidad, Figura 3.34). La comparativa entre estos sistemas en términos de velocidad muestra un crecimiento promedio del 90 % (0.12 m/s a 0.43 m/s) a pesar de ello existen regiones de estancamiento cerca de las paredes, 30 % de la superficie en sistema de cuatro soportes.

#### 3.3.2 Transferencia de masa ( $k_c$ )

Existe una relación inversa entre  $k_c$  y el número de soportes (Figura 3.35),  $k_c$  (1 soporte anular):  $1.71 \times 10^{-3}\text{m/s}$  y  $k_c$  (4 soportes):  $1.22 \times 10^{-3}\text{m/s}$  (↓29%). Existe una disparidad entre aumento de velocidad (+90%) y gradiente de velocidad superficial (+50%) (Tabla 3.7).

#### 3.3.3 Efecto en eficiencia fotocatalítica

Los sistemas con cuatro soportes logran mayor contacto entre el fluido y el catalizador, pero la irradiancia insuficiente en zonas sombreadas limita la activación del TiO<sub>2</sub>. La configuración óptima depende del contaminante, por ejemplo, en contaminantes con baja degradabilidad la irradiancia debe priorizarse con el sistema de un soporte.

Desplazar un soporte en dirección al reflector aumenta  $k_c$  hasta en 45 % (Tabla 3.6), por ejemplo, cuando un soporte es desplazado 5 mm del ánulo  $k_c$  asciende a  $1.54 \times 10^{-3}$  m/s comparado con  $1.71 \times 10^{-3}$  m/s (anular) y presenta un flujo neto de 16 W. Dos soportes horizontales mantienen un  $k_c$  equilibrado  $1.39 \times 10^{-3}$  m/s (Figura 3.23) y maximizan en flujo neto (28.22 W), en el caso del sistema de cuatro soportes  $k_c$  disminuye 27 % respecto a dos soportes (Tabla 3.8) el sombreado en las caras que reciben radiación reflejadas es mínimo (Figura 3.28) con un flujo neto de 37 W.

Al evaluar el impacto de las propiedades ópticas del absorbedor se observa un aumento del 67 % en la irradiancia en el seno del absorbedor de cuarzo respecto al absorbedor de vidrio, es recomendable implementar absorbedores de cuarzo para maximizar la radiación UV incidente en  $\text{TiO}_2$ .

Tabla 3.11 Configuraciones óptimas según interés particular en fenómeno de transporte

<b>Objetivo</b>	<b>Configuración recomendada</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>
<i>Máxima irradiancia local</i>	1 soporte anular	$k_c$ máximo ( $1.71 \times 10^{-3}$ ) simplicidad hidráulica	Baja área catalítica
<i>Máximo flujo neto</i>	4 soportes romboidales	Flujo neto 37.25 W, área catalítica $\times 4$	Caída de presión elevada (52.29 Pa/6 cm)
<i>Balance costo eficiencia</i>	2 soportes horizontales	$k_c$ de $1.89 \times 10^{-3}$ m/s, flujo neto 28.22 W	Irradiancia heterogénea

Los sectores en términos de irradiancia no son uniformes, el hemisferio inferior de los soportes recibe hasta 300 % más radiación reflejada del CPC respecto a los hemisferios superiores que perciben radiación directa, lo que provoca variabilidad en los flujos promedio por unidad de área relevante en algunos puntos, por ejemplo, se observaron picos locales de  $3221 \text{ W/m}^2$  en el sistema de cuarzo durante diciembre, mientras que los flujos promedios ascienden a  $670 \text{ W/m}^2$ . En términos hidrodinámicos: el espesor de capa límite ( $\delta_h$ ) es inverso al número de soportes; mientras un soporte presenta 0.8 mm, cuatro soportes presentan un espesor de 0.3 mm. La relación entre el número de soportes y  $\delta_h$  estriba en que al aumentar el número de soportes hay una reducción del espesor de capa límite, pero este efecto no puede ser aprovechado por el coeficiente de transferencia de masa ( $k_c$ ), que manifiesta una disminución pues existe una dependencia directa con el gradiente de velocidad e indirecta con la velocidad de fluido libre, las configuraciones de soportes provocan la dominancia de la velocidad del fluido libre sobre el gradiente de velocidad, mientras que en algunas superficies existe estancamiento del fluido, por ejemplo, en el 30 % de la superficie del sistema con cuatro soportes hay una región asociada a un fluido estancado ( $v=0$  m/s).

### **Un soporte anular**

El sistema de un soporte anular presenta irradiancia por unidad de área máxima, con un valor de  $859.78 \text{ W/m}^2$ , a pesar de ello el área activa está limitada a  $188 \text{ cm}^2$ , siendo naturalmente el valor más pequeño en comparación con los sistemas con más soportes. El coeficiente de transferencia de masa ( $k_c$ ) de este sistema asciende a  $1.71 \times 10^{-3}$  m/s, este valor se debe al espesor de capa límite hidrodinámica de orden  $\delta_h \approx 3.2$  mm.

### **Dos soportes horizontales**

El sistema de dos soportes horizontales presenta un área catalítica del orden de los 376 cm<sup>2</sup> mientras es capaz de mantener el 85 % de la irradiancia por unidad de área del caso anular, con valor de 748.51 W/m<sup>2</sup>, la configuración horizontal no presenta sombreamiento, mientras que las configuraciones vertical o diagonal alcanzan una superficie sombreada del 12.5 % y el 3.125 % respectivamente. En términos de transferencia de masa ( $k_c$ ) la comparativa entre todos los sistemas muestra el valor máximo global con  $1.89 \times 10^{-3}$  m/s esto se asocia a su capacidad de renovación de capa límite hidrodinámica, con un espesor medio de 1.92 mm y velocidad máxima promedio de 0.15 m/s.

### ***Cuatro soportes romboidales***

El sistema de cuatro soportes en disposición romboidal muestra el flujo radiativo neto más elevado con 37.25 W y un aumento del 130 % respecto al soporte único, esto a costa de reducir la irradiancia por unidad de área en un 43 % con un valor de 494 W/m<sup>2</sup>. El sombreado en este sistema es crítico pues desaprovecha el 43 % de la superficie y mientras que hidrodinámicamente desarrolla regiones de fluido estancado en el 30 % de la superficie. En términos de transferencia de masa ( $k_c$ ) disminuye 55 %, esto a pesar de contar con un gradiente de velocidad superficial superior, la razón está asociada a la disparidad entre este parámetro y la velocidad del fluido.

### **3.3.4 Elección de sistema, análisis multifenomenológico**

El sistema de dos soportes horizontales con absorbedor de cuarzo, en términos físicos y químicos alcanza el mayor equilibrio manteniendo el 85 % de la irradiancia por unidad de área de un soporte (748.51 W/m<sup>2</sup> contra 859.78 W/m<sup>2</sup>) y mientras duplica el área catalítica. Esta disposición evita sombreado crítico, contrastando con el 28 % de cuatro soportes. En términos de transferencia de masa ( $k_c$ ) el perfil presenta un valor máximo de  $1.89 \times 10^{-3}$  m/s, este valor es 11 % superior al comportamiento de un soporte y 55 % mayor que cuatro soportes (*Tabla 3.8*), la sinergia con el absorbedor de cuarzo activa eficientemente el TiO<sub>2</sub>. El comportamiento hidrodinámico muestra una velocidad promedio de 0.19 m/s, propiciando la renovación de capa límite sin estancamientos, mientras que la capa límite hidrodinámica tiene un espesor promedio de 1.92 mm en contraste con los 3.2 mm de un soporte, facilitando la difusión de contaminantes hacia el catalizador. El sistema con longitud lineal de 4.8 m (8 absorbedores de 60 cm cada uno) presenta una caída de presión de 1.9 kPa cuando se dispone dos soportes en contraste con la caída de 3.9 kPa en el sistema de cuatro soportes. Los flujos de radiación dependientes de la fecha presentan una variación menor al 5 % (*Figura 3.23*).

El sistema con dos soportes dispuestos horizontalmente, absorbedor de cuarzo e inclinación variable obtiene un flujo neto de 28.22 W. Un coeficiente de transferencia de masa  $k_c=1.89 \times 10^{-3}$  m/s, 11% superior respecto al sistema de un soporte. En términos de operación, la caída de presión asociado a este sistema es de 1.9 kPa en comparación de 4.2 kPa asociados al sistema de cuatro soportes. Su costo energético es 35 % menor en comparación con sistemas de más soportes, el sistema es capaz de aprovechar el 92 % del volumen del absorbedor sin perjudicar a la irradiancia.

*Tabla 3.12 Ventajas y desventajas de sistemas con mejor eficiencia global frente a sistema de dos soportes*

<b><i>Sistema</i></b>	<b><i>Ventaja contra 2 soportes horizontales</i></b>	<b><i>Desventaja contra 2 soportes horizontales</i></b>
<i>1 soporte anular</i>	+15 % irradiancia	-50 % área catalítica, $k_c$ 11 % menor

<i>3 soportes invertidos</i>	+ 18 % flujo radiativo neto	$k_c$ 27 % menor, $\Delta P$ 28 % mayor, sombreado 30 %
<i>4 soportes romboidal</i>	+ 31 % flujo radiativo neto	$k_c$ 55 % menor, $\Delta P$ 113 % mayor, sombreado 43 %

El costo de operación energético en el sistema de dos soportes es 35 % inferior ( $\Delta P$  reducida) respecto al sistema de cuatro soportes. La disposición horizontal elimina la oclusión radiativa, presentada por sistemas de dos soportes (vertical y horizontal). En comparación con un soporte la velocidad aumenta 58 % mejorando la renovación de capa límite.

Conclusión: El sistema de dos soportes horizontales con absorbedor de cuarzo es el sistema que maximiza sinérgicamente.

- Eficiencia fotoquímica, combinación de alta irradiancia y área catalítica.
- Transporte de masa  $k_c$  máxima por fenómenos hidrodinámicos balanceados.
- Sostenibilidad operativa (baja caída de presión, baja variabilidad estacional, ligero aumento de costos respecto a sistema de un soporte).

La inclinación del sistema debe ser dinámica siendo 18 ° en marzo y septiembre, -4° en junio y 43 ° en diciembre (*Tabla 2.7*) el eje axial del CPC/absorbedor se orienta en todos los casos en dirección este-oeste.

### 3.4 Comparación con otros autores

Esta sección muestra una comparativa entre este estudio y otros autores en el área de investigación en términos de absorción de película de fotocatalizador (Pelayo et al., 2017), desempeño óptico anual de un CPC con catalizador soportado en diferentes configuraciones (Peña et al., 2018) y desempeño hidrodinámico de monolitos fotocatalíticos en diferentes configuraciones (Reyes et al., 2024).

#### 3.4.1 Pelayo et al. (2017)

En la *Tabla 3.13* se muestran los aspectos metodológicos del estudio de Pelayo y el presente.

*Tabla 3.13 Comparativa metodológica respecto a Pelayo et al. (2017)*

<i>Aspecto</i>	<i>Pelayo et al. (2017)</i>	<i>Estudio presente</i>	<i>Diferencia</i>
<i>Modelado óptico</i>	Método de escalas múltiples: película (matriz característica) y reactor (Montecarlo), validación experimental de propiedades ópticas de películas de TiO <sub>2</sub> .	Uso de software Tonatiuh (trazado de rayos) para irradiancia en CPC y validación de materiales: vidrio, pyrex y cuarzo.	Pelayo se enfoca en las propiedades ópticas en la película (espesor óptimo o interferencias). Este estudio valora los materiales del absorbedor y su impacto en la transmisividad UV.
<i>Geometría analizada</i>	Absorbedor con 6 tubos absorbedores en forma pentagonal. Optimiza el	Configuraciones variables de uno a cuatro soportes con desplazamientos	Ambos estudios optimizan la geometría, pero este trabajo evalúa

	radio del tubo y el espesor de película.	(horizontal, vertical, etc.) y análisis estacional.	la disposición espacial y su efecto en el sombreado.
<i>Variables clave</i>	Fracción absorbida, uniformidad y potencia volumétrica.	Irradiancia superficial, flujo neto, transferencia de masa y caída de presión.	Este estudio acopla los fenómenos de radiación, hidrodinámica y transferencia de masa mientras que Pelayo se centra en la óptica.

La *Tabla 3.14* muestra una comparativa con el estudio presente y el desarrollado por Pelayo en el año 2017 desde la perspectiva de los resultados.

*Tabla 3.14 Comparativa en términos de resultados respecto a Pelayo et al. (2017)*

<b>Parámetro</b>	<b><i>Pelayo et al. (2017)</i></b>	<b><i>Estudio presente</i></b>	<b><i>Comparación</i></b>
<i>Espesor de película</i>	Espesor óptimo 230 nm, mientras que la saturación de absorción fue superior a los 250 nm	La variación del espesor es nula, los resultados están asociados a un espesor referente de 800 nm.	Pelayo encuentra: las películas delgadas maximizan absorción mientras que este estudio asume espesor fijo y recomienda cuarzo para mejorar transmisividad.
<i>Radio de tubo</i>	El aumento del radio mejora el área catalítica, pero disminuye uniformidad.	El aumento de soportes mejora el flujo neto (W), pero disminuye la irradiancia promedio (W/m <sup>2</sup> ) y por lo tanto sombreado	Pelayo propone aumentar el radio con un espesor disminuido, mientras que este estudio muestra que el aumento de soportes mejora el área, pero reduce la eficiencia óptica por sombreado
<i>Material absorbedor</i>	Uso de borosilicato.	Comparativa entre materiales con miras en transmisividad UV superior.	Existe una contribución, donde se evaluaron materiales críticos.

En términos de uniformidad y eficiencia óptica Pelayo reporta absorción no homogénea, el presente estudio cuantifica explícitamente el sombreado, hallando la configuración óptima de dos soportes horizontales, las conclusiones convergen: la geometría afecta determinadamente la uniformidad, con énfasis en el equilibrio entre área catalítica y distribución de la luz. La innovación del estudio presente y sus aplicaciones se encuentran en los ángulos de incidencia mientras Pelayo simula ángulos de incidencia fijos (0°, 30° y 70°) este estudio valora las características estacionales en marzo, junio, septiembre y diciembre con inclinación dinámica en un rango de -4° a 43°. El hallazgo está en la compensación de la variabilidad estacional con la inclinación, por ejemplo, el diciembre el flujo disminuye solo 5 % respecto a junio en el caso de dos soportes. La *Tabla 3.15* muestra la comparativa desde la visión de las limitaciones.

Tabla 3.15 Limitaciones y validación experimental con Pelayo et al. (2017)

<i>Aspecto</i>	<i>Pelayo et al. (2017)</i>	<i>Estudio presente</i>
<i>Validación experimental</i>	Comparativa entre reflectancia y transmitancia modelada con la experimental.	No valora experimentalmente los resultados tampoco se informa en términos de degradación.
<i>Escala</i>	Modelo teórico a escala de película y reactor.	Modelo 3D en dominio reducido por limitación computacional.
<i>Relevancia práctica</i>	Recomienda aumentar radio y disminuir espesor, pero no evalúa desafíos de fabricación.	evalúa viabilidad en términos de presión e inclinación dinámica.

#### Conclusiones comparativas

Los estudios son complementarios mientras Pelayo ofrece las bases *óptico-microscópicas* (espesor de película e interferencias), este estudio acopla los fenómenos ópticos, hidrodinámicos y masicos además de la estacionalidad y viabilidad. Las recomendaciones derivadas de los dos estudios indican una optimización del área y la iluminación a través del aumento en el radio y la disposición de dos soportes horizontales, con un absorbedor de cuarzo maximizando la transmisividad UV e implementar la inclinación estacional.

#### 3.4.2 Peña et al. (2018)

En la *Tabla 3.16* se muestran los aspectos metodológicos del estudio de Peña y el presente.

Tabla 3.16 Análisis comparativo metodológico respecto a Peña et al. (2018)

<i>Aspecto</i>	<i>Peña et al. (2018)</i>	<i>Estudio presente</i>
<i>Objetivo</i>	Optimizar ópticamente el reactor de un CPC con catalizador soportado en tubos de vidrio.	Estudio multifenomenológico (óptica, hidrodinámica y transferencia de masa) en CPC con soportes del tipo membrana.
<i>Modelo óptico</i>	Método de matriz característica con método de Montecarlo en software Tonatih.	Trazado de rayos en software Tonatih y validación de materiales.
<i>Geometría</i>	Tubos cilíndricos dentro de reactor de cuatro a seis tubos.	Membranas como soportes en arreglos de 1 a 4 en diferentes disposiciones.
<i>Parámetros</i>	Absorción anual de energía radiativa.	Irradiancia superficial, flujo neto, coeficiente de transferencia de masa ( $k_c$ ) y caída de presión.
<i>Escala</i>	Modelado de sistema real con longitud de 70 cm.	Modelo a escala reducida.

La *Tabla 3.17* muestra una comparativa con el estudio presente y el desarrollado por Peña en el año 2018 desde la perspectiva de los resultados.

*Tabla 3.17 Análisis comparativo en resultados respecto a Peña et al. (2018)*

<i>Variable</i>	<i>Peña et al. (2018)</i>	<i>Estudio presente</i>
<i>Configuración óptima</i>	Seis tubos con la mayor separación (27 % de absorción en comparación con caso de referencia).	Dos soportes en disposición horizontal.
<i>Efecto del material en reactor</i>	No evaluado (se asume uso de vidrio estándar)	Cuarzo incrementa 67 % la irradiancia respecto a vidrio con una transmitancia UV superior.
<i>Sombreamiento</i>	Se describen pérdidas por sombreado mutuo entre tubos, comparativa entre 4 y 6 tubos muestra reducción del 47 % en sistema de cuatro tubos.	Sombreado dominante en soportes múltiples 43 % en disposición de cuatro soportes.
<i>Inclinación estacional</i>	El sistema este fijo en disposición este oeste	Inclinación como parámetro crítico para compensar pérdidas.

Peña utiliza un enfoque óptico en la investigación mientras que este estudio extiende el análisis a los fenómenos de transferencia de momento y másico. En relación con las diferencias en sombreado la raíz se encuentra en la escala geométrica y la ubicación de los soportes (*Tabla 3.18*), en el caso de Peña cuando el número de soportes se eleva el diámetro de los mismos disminuye permitiendo la filtración de la luz, directa y reflejada transite entre ellos y las paredes del absorbedor, en este estudio la invariabilidad en el diámetro de los soportes provoca la oclusión en las zonas de reflexión crítica (sectores tercero y cuarto, de los soportes) en los soportes superiores. Estas características permiten el arreglo pentagonal con tubo central que recibe la radiación filtrada entre los soportes externos mientras que en estas condiciones los soportes se alojan en la vecindad de la pared bloqueando parcialmente la involuta del CPC.

*Tabla 3.18 Características geométricas en estudios*

<i>Parámetro</i>	<i>Peña et al. (2018)</i>	<i>Estudio presente</i>
<i>Diámetro absorbedor [=] cm</i>	2.35	2.9
<i>Diámetro soporte [=] cm</i>	0.57-0.855	1
<i>Relación soporte/absorbedor</i>	25-36 %	35.5-69 %

En conclusión, las diferencias entre los resultados reportados en los estudios se deben al tamaño relativo superior de los soportes aumentando la oclusión, la ubicación periférica de soportes intercepta rutas reflexivas antes de que la luz directa toque la involuta del CPC, la geometría romboidal coloca soportes en la ruta donde la involuta proyecta luz hacia el resto de los soportes.

### 3.4.3 Reyes et al. (2024)

En la *Tabla 3.19* se muestran los aspectos metodológicos del estudio de Reyes y el presente.

Tabla 3.19 Comparativa metodológica entre artículo de Reyes et al. (2024) y este estudio

<b>Aspecto</b>	<b>Reyes et al. (2024)</b>	<b>Estudio presente</b>	<b>Observación</b>
<i>Modelado óptico</i>	Trazado de rayos con Monte Carlo para valoración de absorción UV en monolitos	Trazado de rayos con software Tonatiuh y validación de materiales	A pesar de usar en ambos casos métodos estocásticos, Reyes se centra en geometrías de catalizador mientras que este estudio valida materiales del absorbedor.
<i>Hidrodinámica</i>	Modelo de Poiseuille simplificado para cálculo de factor de fricción en flujo laminar	CFD para determinación de gradientes de velocidad, en transferencia de masa uso de analogía de Reynolds	Los modelos matemáticos usados en hidrodinámica son diferentes, las condiciones de flujo son semejantes
<i>Geometría</i>	Monolitos sólidos con impresión 3D (cilíndrico, asterisco, flor, etc.)	Soportes tubulares en diversidad de disposiciones espaciales	Este estudio analiza la disposición espacial de los soportes mientras que el artículo optimiza la forma de los soportes.
<i>Validación</i>	Validación numérica basada en referencias, no experimental.	Presión máxima derivada de modelo de Barlow, no experimental.	Ambos estudios son teóricos pero este estudio incluye criterios de resistencia mecánica

La Tabla 3.20 muestra una comparativa con el estudio presente y el desarrollado por Reyes en el año 2017 desde la perspectiva de los resultados

Tabla 3.20 Comparativa metodológica entre artículo de Reyes et al. (2024) y este estudio

<b>Parámetro</b>	<b>Reyes et al. (2024)</b>	<b>Estudio presente</b>	<b>Observación</b>
<i>Configuración óptima</i>	El monolito de 5 lóbulos en forma de asterisco presenta +9.6 % en términos de absorción, +40 % en área y -78 % fricción respecto al monolito cilíndrico.	Dos soportes horizontales con absorbedor de cuarzo: equilibrio entre irradiancia $748 \text{ W/m}^2$ , coeficiente de transferencia de masa $k_c=1.89 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ y caída de presión de 1.9 kPa.	Mientras que el artículo optimiza la geometría del monolito, la tesis se centra en la disposición de los soportes
<i>Efecto de material</i>	No analizado siempre se usa Pyrex.	Cuarzo presenta +67 % de irradiancia respecto a vidrio.	Este trabajo estudia el efecto del efecto del material del absorbedor.

<i>Sombreamiento</i>	Impacto mínimo al desplazar monolito efecto menor al 4 % en absorción	Diferencia crítica en sistemas de dos soportes, sombreado del 43 % en sistema de 4 soportes.	Ambos estudios destacan la dependencia de la uniformidad lumínica respecto a la geometría.
<i>Transferencia de masa</i>	No analizado.	Disminución promedio del 29 % por soporte adicional.	El artículo usa un enfoque óptico-hidrodinámico, este estudio lo hace desde la óptica, hidrodinámica y transferencia de masa.
<i>Inclinación</i>	Ángulos de incidencia de 0°, 30°, 45° y 60° sin ajuste estacional.	Dinámica y dependiente del ángulo de elevación solar al medio día solar.	Los estudios se complementan al operar en condiciones angulares fijas o variables.

Las contribuciones de ambos estudios resultan complementarias mientras se aborda multifenomenológicamente el problema uno desempeña el análisis estacional mientras que el otro explora geometrías monolíticas, los dos con el objetivo de maximizar el área y el aprovechamiento lumínico minimizando caídas de presión, las recomendaciones del artículo señalan al asterisco de cinco lóbulos como óptimo mientras que este estudio promueve la disposición de dos soportes en disposición horizontal, resulta natural comprobar la eficacia de dos soportes de cinco lóbulos en disposición horizontal y su validación experimental.

## 4. CONCLUSIONES

### 4.1 Evaluación de hipótesis y sensibilidad de distribución geométrica

En la **Sección 1.15** se propuso la predicción en la comparativa cuatro soportes/un soporte,

- a) Aumento en irradiancia promedio de 30 % en sistema de cuatro soportes al compararlo con el sistema de un soporte, sin embargo, se obtenido fue una disminución del 43 %.
- b) Disminución de espesor de capa límite cercana al 15%, la disminución obtenida fue del 39 %.
- c) Aumento de 20 % en el coeficiente de transferencia masa, mientras que los resultados muestran una disminución del 29 %.

### 4.2 Conclusiones

En esta sección se condensan los resultados desde una perspectiva general y particular, abordando las problemáticas esenciales en el área de investigación: Disposición espacial y sombreado, material de absorbedor, inclinación como variable de control y análisis multifenomenológico, se propone una disposición geométrica de los soportes que favorece desde todas las perspectivas evaluadas el funcionamiento del sistema y se exponen las limitaciones del presente estudio.

Esta investigación estudió integralmente el comportamiento de reactores fotocatalíticos solares a través de simulaciones computacionales multifásicas, centrado en el efecto distributivo espacial de soportes tubulares en el reactor de un concentrado parabólico compuesto (CPC). Los hallazgos están sustentados en más de 150 simulaciones ópticas con el uso del software Tonatiuh e hidrodinámicas a través de COMSOL, revelan interrelaciones críticas entre la geometría del sistema, la radiación solar, transferencia de masa y eficiencia catalítica. Las conclusiones fundamentales se comparten a continuación:

- Un soporte anular presenta la irradiancia por unidad de área máxima, dos soportes horizontales no presentan sombreado mientras que en términos del coeficiente de transferencia de masa este es el valor máximo asociado a su capacidad de renovación de capa límite, cuatro soportes romboidales tienen el flujo neto más elevado, a pesar de tener la mayor superficie fotocatalítica, el 43 % de esta se encuentra sombreada e incapaz de activarse el coeficiente de transferencia de masa disminuye debido a la disparidad entre el gradiente de velocidad superficial y la velocidad del fluido.
- El cuarzo en relación con vidrio y vidrio de borosilicato presenta un comportamiento semejante al reportado por la literatura, a pesar de presentar geometría cilíndrica y la consideración de la desviación lumínica mediante el fenómeno de refracción, siendo dominante la transmitancia como parámetro de diseño en estos sistemas.
- El ángulo de inclinación solar guarda una relación directa con la magnitud de flujo por unidad de área del sistema, siendo los ángulos pequeños los que generan la mayor concentración (junio) y los grandes la menor (diciembre), a pesar de ello el dinamismo en la inclinación del sistema, minimiza la variabilidad estacional radiativa por unidad de área a 5 %, en la configuración de dos soportes horizontales.
- El espesor de capa límite es inverso al número de soportes, a pesar de que aumentar el número de soportes reduce el espesor, el coeficiente de transferencia de masa ( $k_c$ ) tiende a disminuir, pues

existe una dependencia directa con el gradiente de velocidad e indirecta con la velocidad de fluido libre, mientras que en términos hidrodinámicos las configuraciones provocan la dominancia de la velocidad del fluido libre sobre el gradiente de velocidad, y en algunas superficies el fluido se estanca.

- El sistema con dos soportes dispuestos horizontalmente, absorbedor de cuarzo e inclinación variable percibe un flujo neto menor en 24% respecto al mejor caso (4 soportes), el coeficiente de transferencia de masa más elevado y un aumento en caída de presión respecto al sistema de un soporte, siendo el sistema con mayores beneficios y menores perjuicios respecto al resto.

#### 4.2.1 Limitaciones y consideraciones para futuros diseños

El sombreado con el aumento de soportes no es lineal, se observa un comportamiento exponencial, mientras dos soportes presentan sombreado del 15 %, cuatro soportes presentan 43 %. Debe tomarse en consideración que flujos volumétricos superiores a 0.12 l/s generan régimen turbulento en el sistema, con un número de Reynolds superior a 4000 alterado los perfiles del coeficiente de transferencia de masa. Limitaciones de estudio, las simulaciones fueron desarrolladas para un modelo a escala del sistema real, esto se debe a las características del sistema de cómputo, el efecto de esta limitación puede generar la subestimación de gradientes axiales en secciones alargados. Las simulaciones se basaron en régimen laminar ( $Re=2000$ ), esta característica es diferenciable de los sistemas de foto degradación en general, pero prima los tiempos de residencia, con el objetivo de mejorar la degradación.

### 4.3 Trabajo Futuro

Descritas las conclusiones y limitaciones de este estudio, se propone continuar a lo largo de las siguientes líneas de investigación, cuyo objetivo es la optimización de reactores fotocatalíticos solares con CPC.

#### a) Validación experimental

Ejecutar pruebas piloto en sistema con absorbedor de cuarzo y de uno a cuatro soportes en disposición horizontal (dos soportes), triangular invertida (tres soportes) y romboidal (cuatro soportes), evaluar distribución lumínica para mapeo in situ con el uso de piranómetros miniatura (sensores de irradiancia), estudiar la degradación de colorantes azoicos prototipo (e.g. negro reactivo 5) ante las condiciones estacionales variables. Determinar la correlación entre la irradiancia superficial simulada y la medida y los coeficientes de transferencia de masa teóricos en comparación con las cinéticas de degradación experimental.

#### b) Optimización multifenomenológica con simulación acoplada

Desarrollar un modelo tridimensional que combine: simulaciones ópticas para distribución radiativa, CFD en regímenes de flujo distintos al laminar y módulo cineto-químico para degradación de moléculas recalcitrantes (químicamente estables). Debe optimizarse la geometría de los soportes (i.e., asterisco de cinco lóbulos, Reyes et al., 2023). Considerar el espesor óptimo de la capa de  $TiO_2$ , mediante el método de deposición sol-gel y el flujo másico que maximiza  $k_c$  sin afectar el tiempo de residencia.

#### c) Condiciones climáticas extremas

Evaluar desempeño en localidades con elevada nubosidad por ejemplo CDMX y baja nubosidad desiertos, evaluar la degradación en medios dispersores de luz, tiempo lluvioso, con elevada humedad relativa (mayor al 80 %) o contaminación (muchas partículas suspendidas). Diseño de sistemas híbridos ozonización in situ

con mejorando la mineralización en días nublados, el ensuciamiento óptico en condiciones de climáticas adversas podría mitigarse con recubrimientos autolimpiantes en CPC para mitigar este efecto.

d) Escalamiento industrial y estudio técnico/económico.

Validar las caídas de presión en experimentalmente y estudiar la vida útil de los soportes ante degradación mecánica y foto corrosión a nivel industrial sistemas de más de 20 CPC podrían acentuar estos efectos. Evaluar costos para determinar la inversión inicial al comparar absorbedores de vidrio y cuarzo, la generación de CO<sub>2</sub> por volumen de agua tratada en comparación con métodos convencionales como tratamiento de agua con lodos activados u ozono.

Las propuestas abordan los factores críticos identificados como la falta de validación experimental, el régimen de flujo laminar que favorece los tiempos de residencia, pero dificulta el mezclado y la evaluación en términos de escalabilidad. La integración de modelos multifísicos, variedad de materiales y estudio de ciclo de vida permitirá: validar la hipótesis sobre la inclinación dinámica y su compensación estacional, mejorar la sinergia entre la superficie catalítica, irradiancia y transferencia de masa.

### 4.3.1 Contribución

Este estudio acopla trazado de rayos con el método de Monte Carlo, dinámica de fluidos computacional (CFD) y analogías de transporte (Reynolds) para sistemas CPC fotocatalíticos.

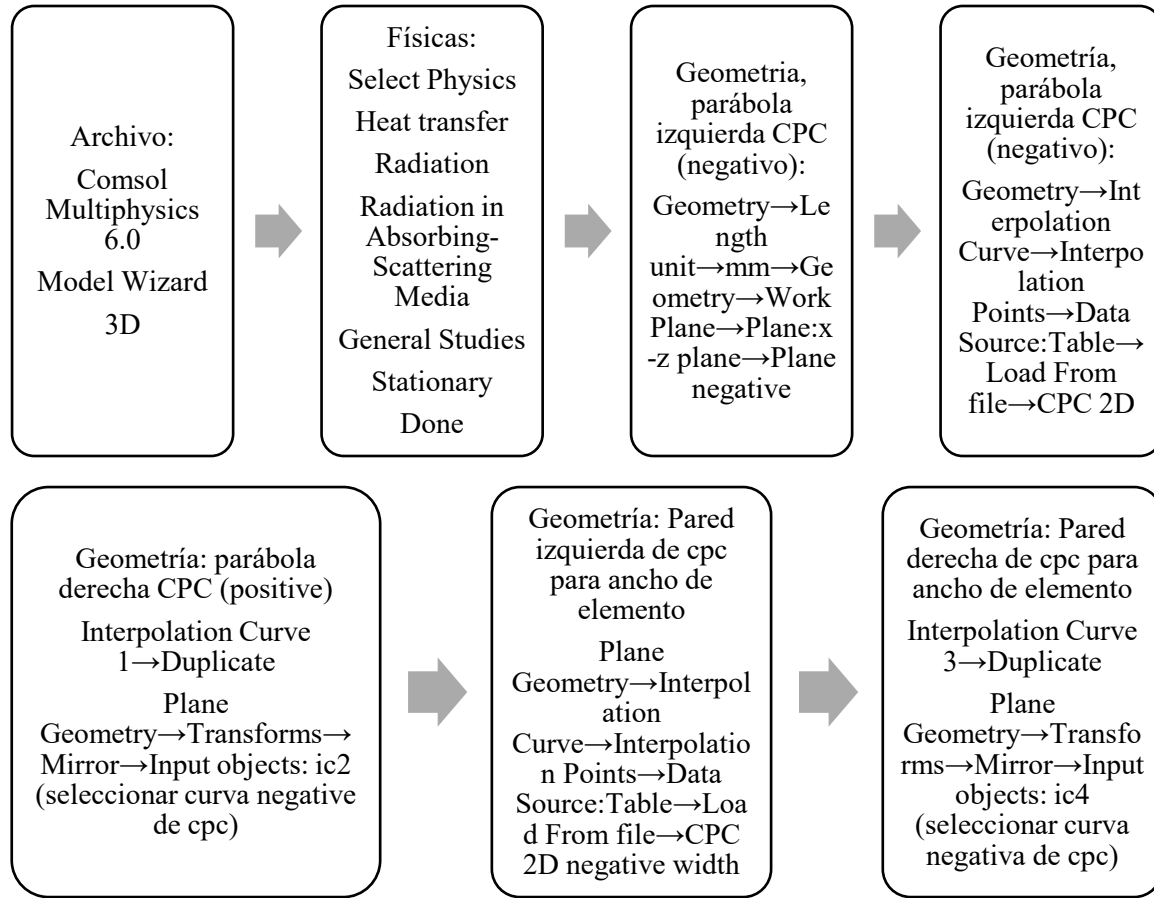
Se han propuesto parámetros de diseño cuantificados, la distancia óptima entre el soporte y el absorbedor es de 5 mm, presentando aumento en el coeficiente de transporte de masa, respecto al sistema de un soporte anular en un 45 %.

El enfoque computacional utilizado en esta tesis permite superar las limitaciones experimentales y proporciona un marco riguroso para optimizar CPC fotocatalíticos, al evaluar pérdidas ópticas no consideradas en estudios previos y habilitar el uso de otro parámetro sistemático en el análisis, como lo es la refracción de la luz al cambiar de medio, se logró capturar el efecto de la distribución espacial de soportes en reactores de CPC y su efecto en aspectos multidimensionales en la eficiencia del sistema a través de la irradiancia, hidrodinámica y transferencia de masa. Usar exitosamente la tecnología fotocatalítica solar en problemas reales como aumentar la proporción de agua industrial del área textil tratada en México (18 %), depende de una configuración que valore: fotones útiles, transporte de masa y viabilidad técnica. El sistema propuesto de dos soportes horizontales con absorbedor de cuarzo, solventan estos tres problemas.

## 5. APÉNDICES

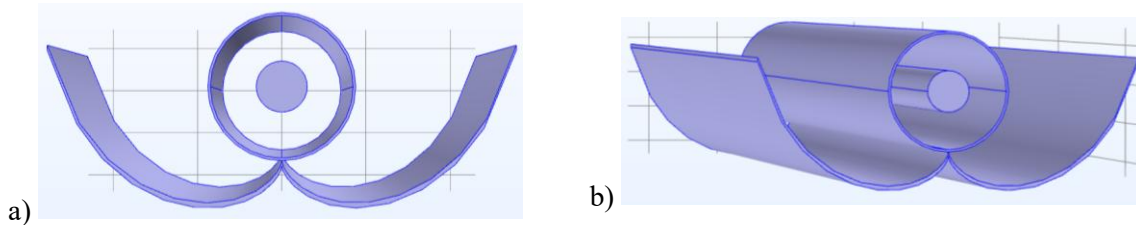
### Apéndice A. Generación de geometría COMSOL

Este apéndice muestra el método usado para desarrollar la geometría del CPC en el software COMSOL, los pasos están condensados en la *Figura 5.1* y se utilizan físicas de transferencia radiativa, aunque pueden extrapolarse a otras físicas evitando el apartado “Físicas” del diagrama.



*Figura 5.1 Algoritmo de generación de CPC en COMSOL para transferencia radiativa*

La *Figura 5.2* muestra el sistema CPC generado mediante la metodología propuesta desde una proyección a) axial y b) oblicua.

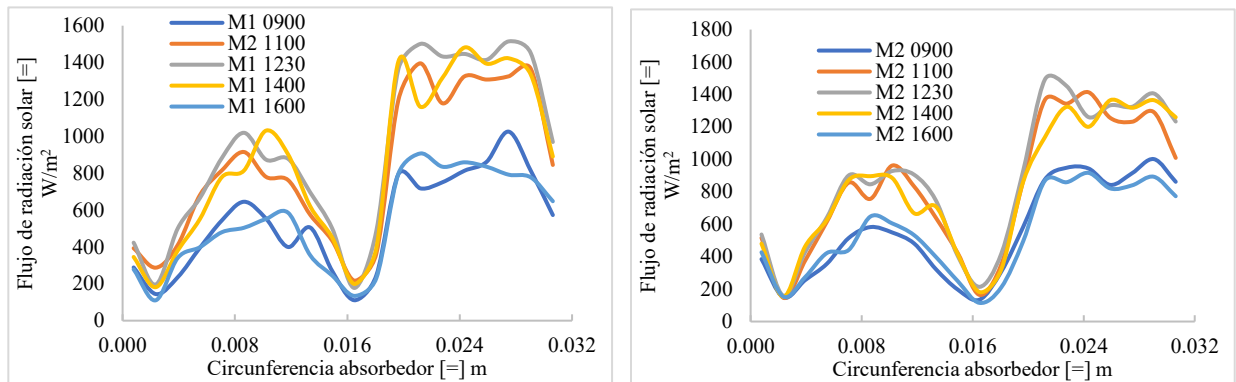


*Figura 5.2 Generación de geometría en COMSOL a) proyección axial b) proyección transversal*

## Apendice B. Perfiles de radiación sobre soportes en diferentes fechas y horas

En este apéndice se muestran los perfiles de flujo radiativo en los diferentes soportes de las múltiples configuraciones con comportamiento semejante a los casos seleccionados en la **sección 3**, han sido ordenados de acuerdo con el sistema asociado.

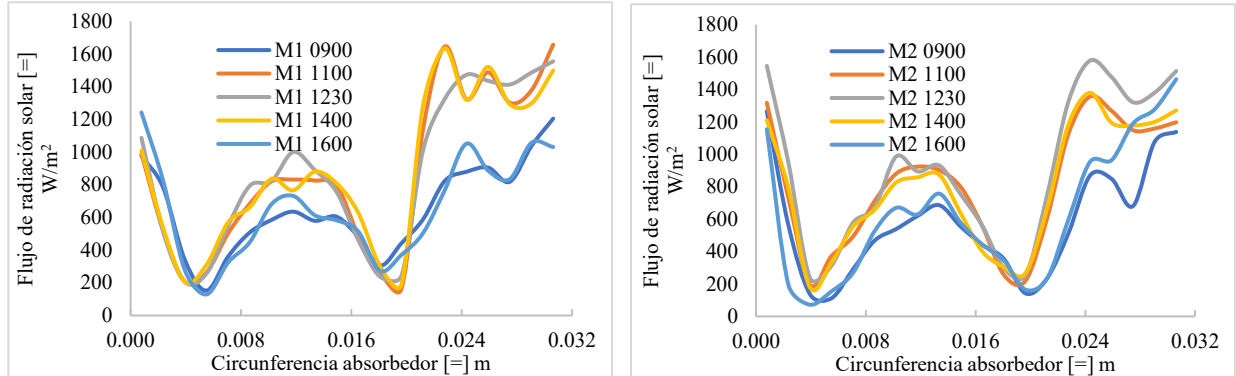
### B.1. 2 soportes horizontales



a. Soporte 1, cercano a la superficie norte del sistema

b. Soporte 2, cercano a la superficie sur del sistema

Figura 5.3 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes horizontales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de septiembre cuarzo con inclinación  $19^\circ$

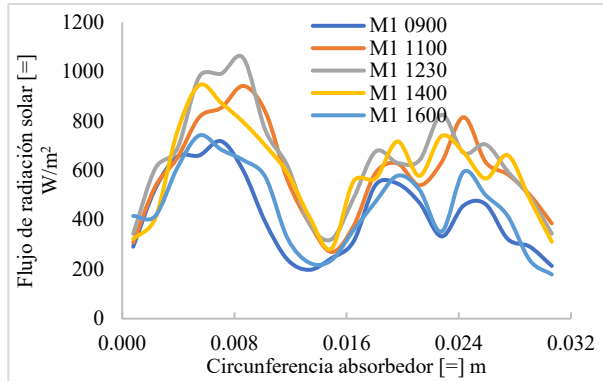


a. Soporte 1, cercano a la superficie norte del sistema

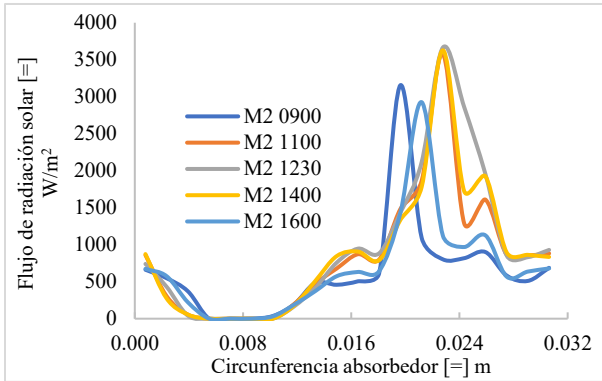
b. Soporte 2, cercano a la superficie sur del sistema

Figura 5.4 Figura 5.3. Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes horizontales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de diciembre cuarzo con inclinación  $43^\circ$

## B.2. 2 soportes verticales

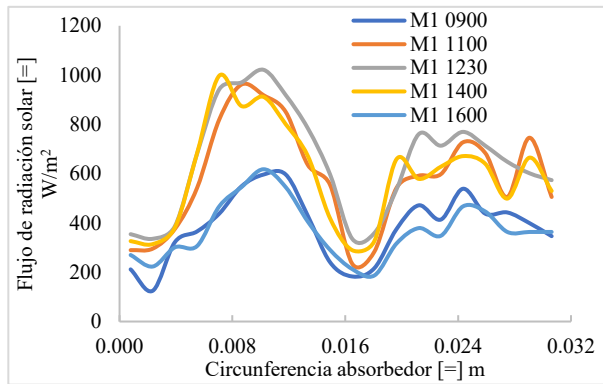


a. Soporte 1, cercano a la apertura del sistema

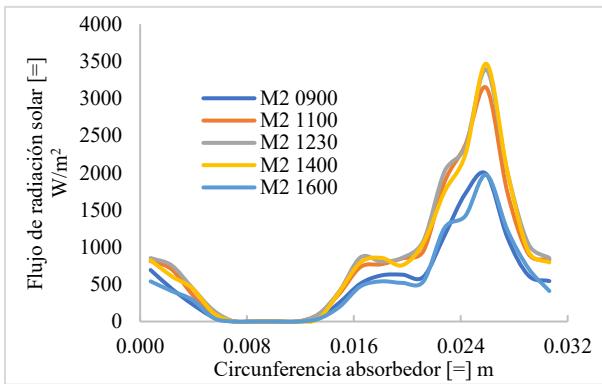


b. Soporte 2, cercano a la involuta reflejante del sistema

Figura 5.5 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes verticales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de junio cuarzo con inclinación  $-4^\circ$



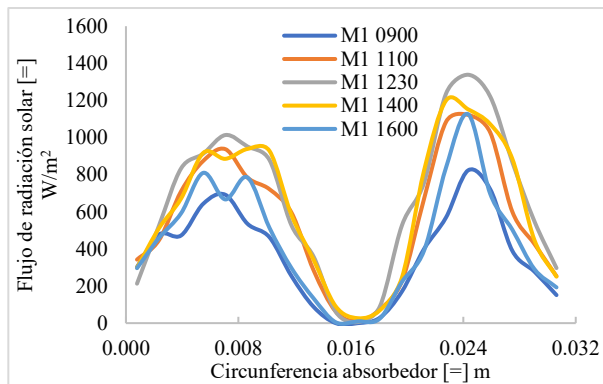
a. Soporte 1, cercano a la apertura del sistema



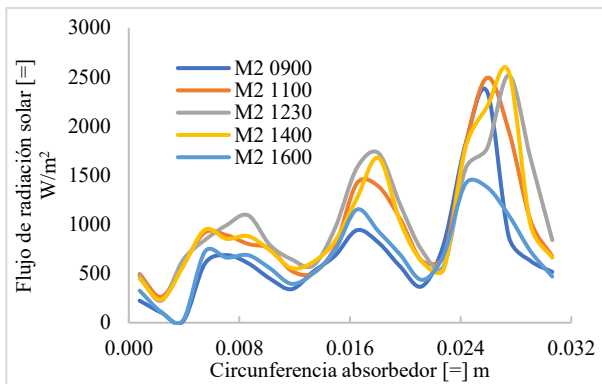
b. Soporte 2, cercano a la involuta reflejante del sistema

Figura 5.6 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes verticales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de septiembre cuarzo con inclinación  $19^\circ$

## B.3. 2 soportes diagonales

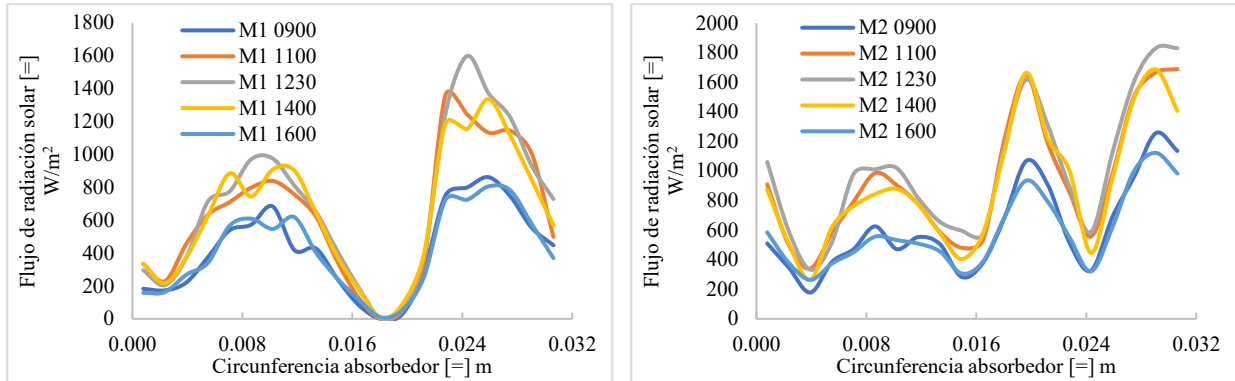


a. Soporte 1, cercano a la apertura y superficie norte del sistema



b. Soporte 2, cercano a la involuta reflejante y superficie sur del sistema

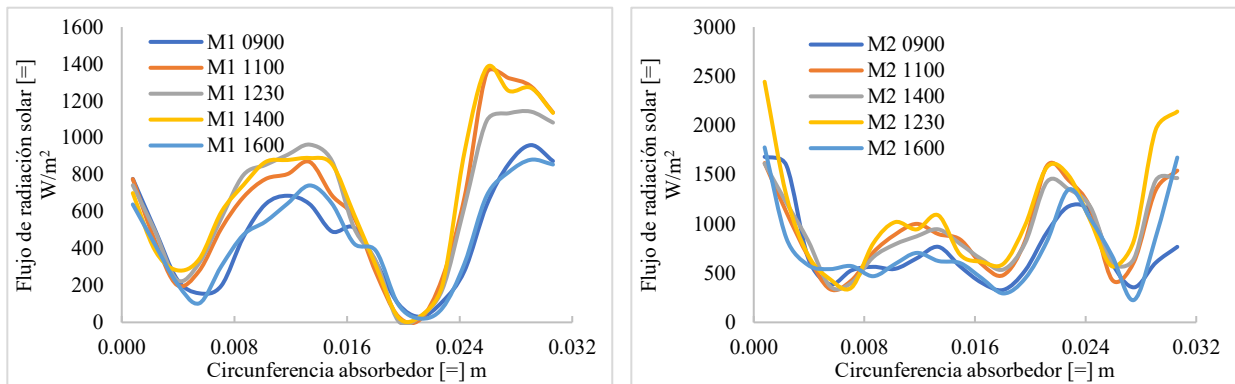
Figura 5.7 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes diagonales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de junio cuarzo con inclinación  $-4^\circ$



a. Soporte 1, cercano a la apertura y superficie norte del sistema

b. Soporte 2, cercano a la involuta reflejante y superficie sur del sistema

Figura 5.8 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes diagonales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de septiembre cuarzo con inclinación  $19^\circ$

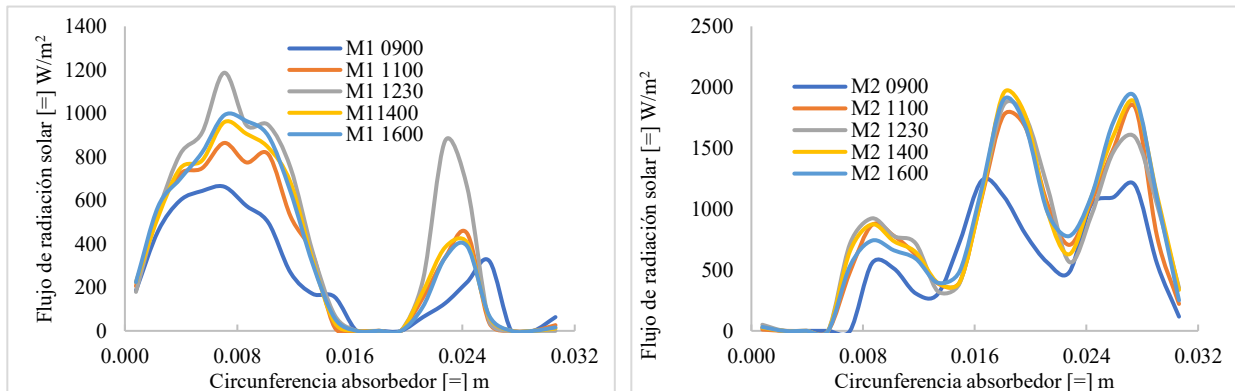


a. Soporte 1, cercano a la apertura y superficie norte del sistema

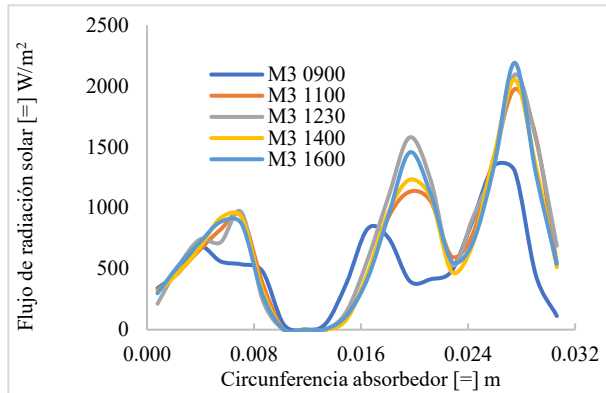
b. Soporte 2, cercano a la involuta reflejante y superficie sur del sistema

Figura 5.9 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 2 soportes diagonales a) soporte 1 y b) soporte 2 de CPC 21 de diciembre cuarzo con inclinación  $43^\circ$

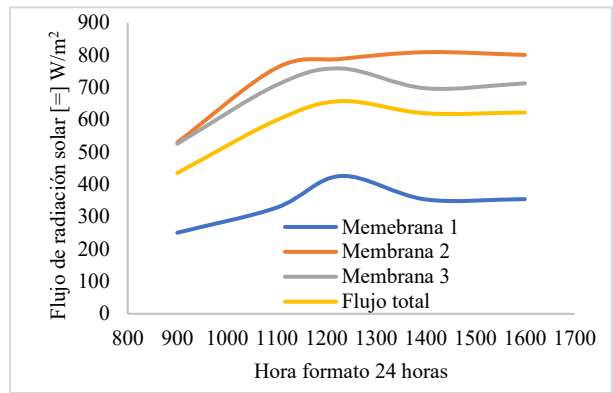
### B.4. 3 soportes disposición triangular



a. Soporte 1, cercano a la apertura del CPC



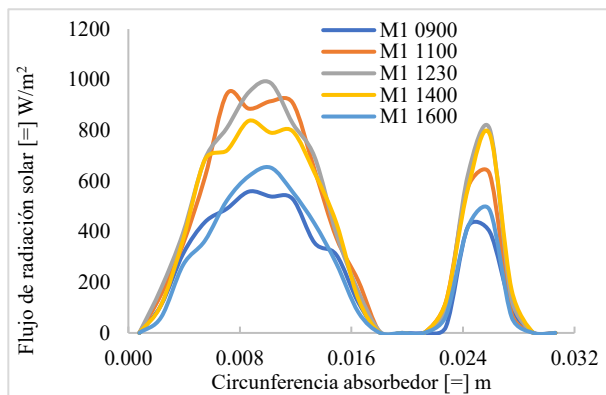
b. Soporte 1, cercano a la involuta reflejante y superficie sur del sistema



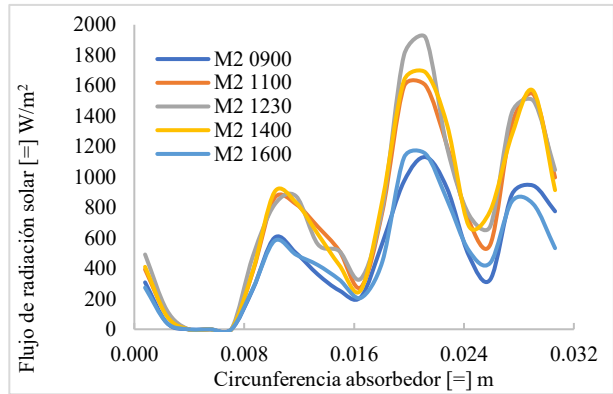
c. Soporte 1, cercano a la involuta reflejante y superficie norte del sistema

d. Flujo promedio sobre la superficie de cada soporte y total

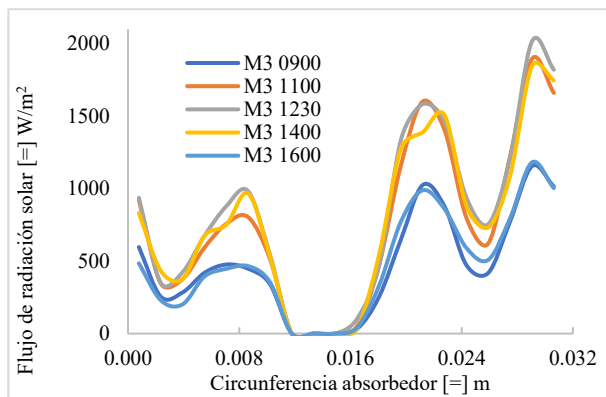
Figura 5.10 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 3 soportes dispuestos triangularmente a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3 y d) flujo promedio en la superficie de soportes de CPC 21 de junio cuarzo con inclinación  $-4^\circ$



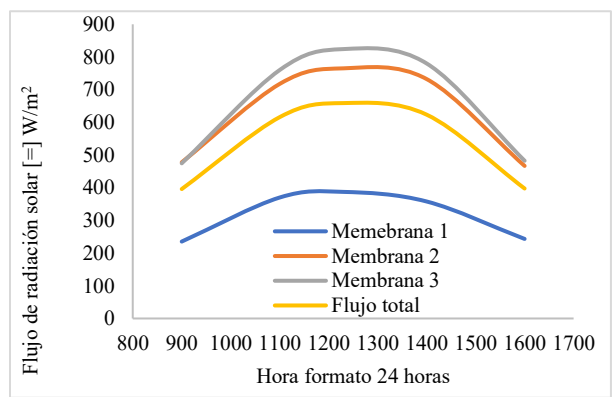
a. Soporte 1, cercano a la apertura del CPC



b. Soporte 1, cercano a la involuta reflejante y superficie sur del sistema



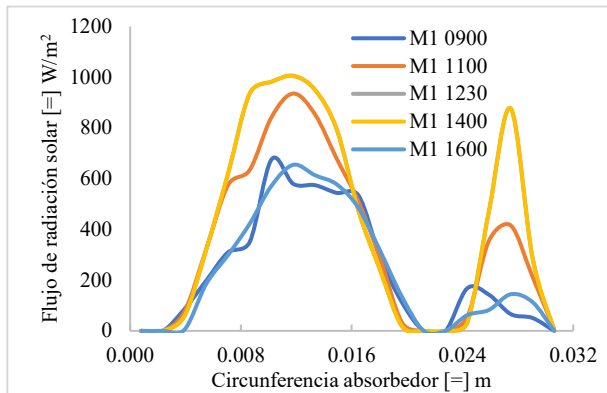
c. Soporte 1, cercano a la involuta reflejante y superficie norte del sistema



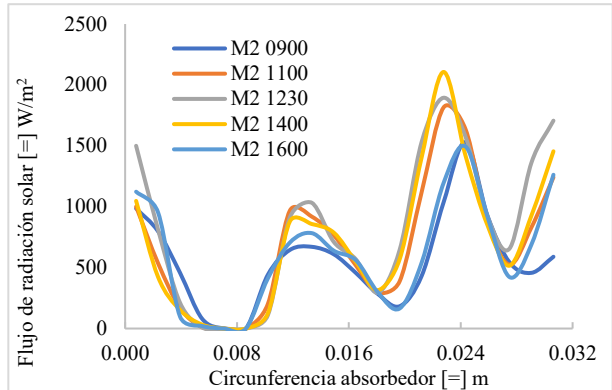
d. Flujo promedio sobre la superficie de cada soporte y total

Figura 5.11 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.],

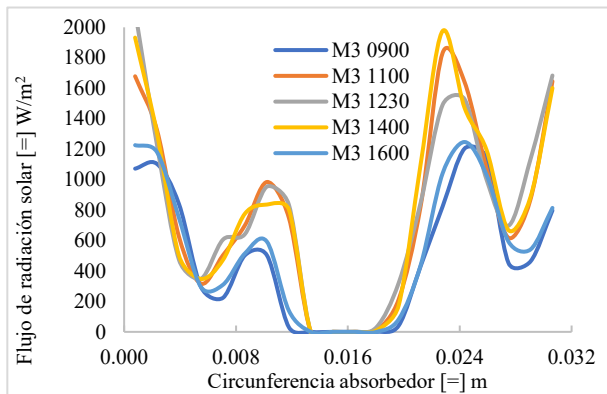
sistema de 3 soportes dispuestos triangularmente a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3 y d) flujo promedio en la superficie de soportes de CPC 21 de septiembre cuarzo con inclinación 19°



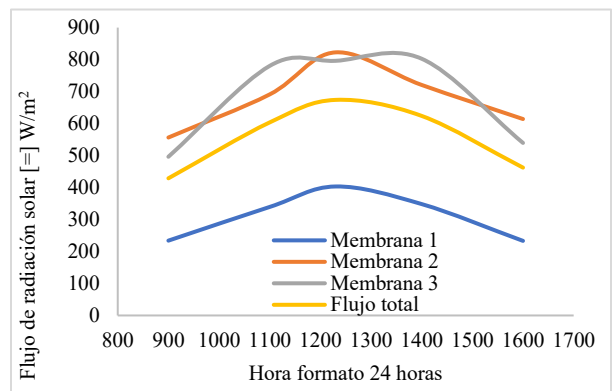
a. Soporte 1, cercano a la apertura del CPC



b. Soporte 1, cercano a la involuta reflejante y superficie sur del sistema



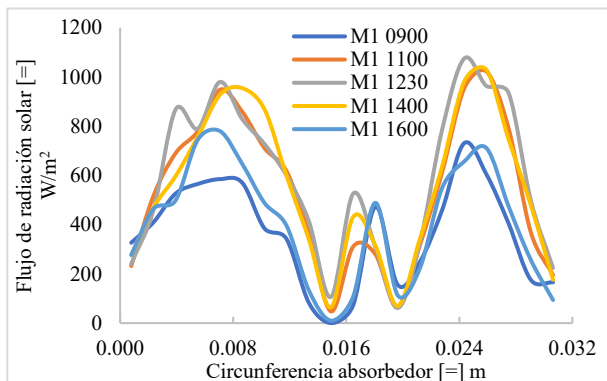
c. Soporte 1, cercano a la involuta reflejante y superficie norte del sistema



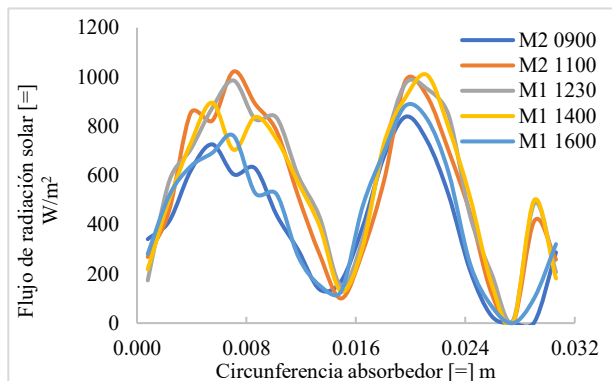
d. Flujo promedio sobre la superficie de cada soporte y total

Figura 5.12 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 3 soportes dispuestos triangularmente a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3 y d) flujo promedio en la superficie de soportes de CPC 21 de diciembre cuarzo con inclinación 43°

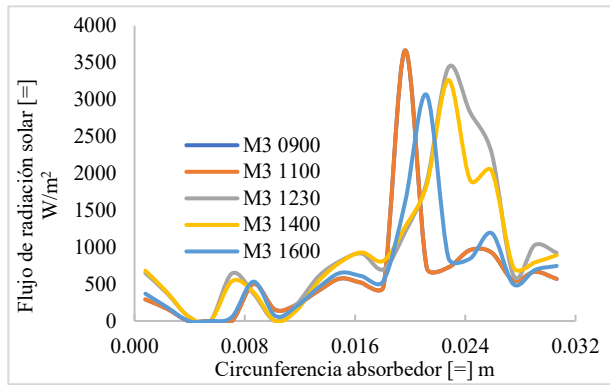
### B.5. 3 soportes disposición triangular invertida



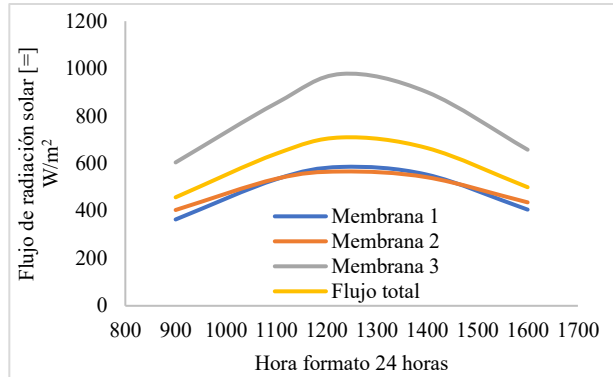
a. Soporte 1, cercano a la apertura y superficie norte del sistema



b. Soporte 2, cercano a la apertura y superficie sur del sistema

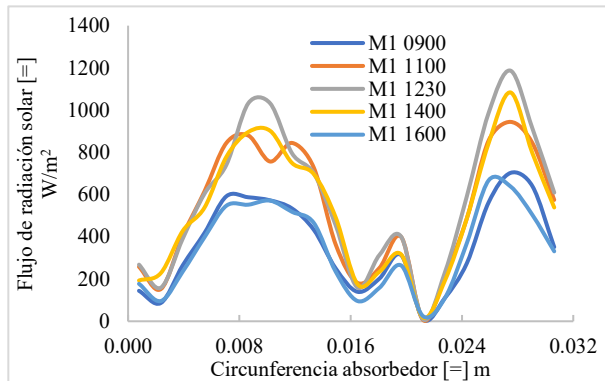


c. Soporte 3, cercano a la involuta reflejante del sistema

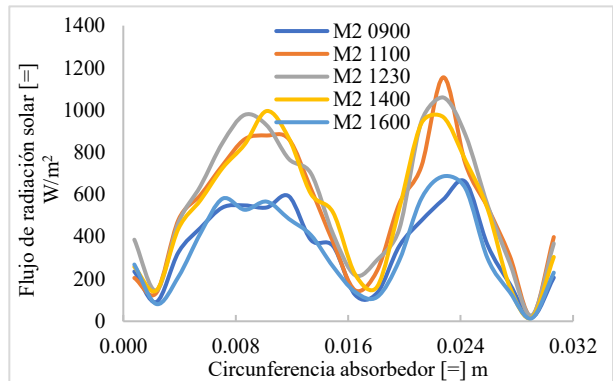


d. Flujo promedio sobre la superficie de cada soporte y total

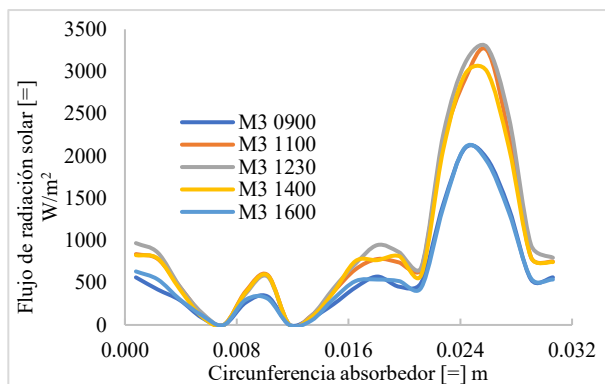
Figura 5.13 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 3 soportes dispuestos en forma triangular invertida a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3 y d) flujo promedio en la superficie de soportes de CPC 21 de marzo cuarzo con inclinación  $-4^\circ$



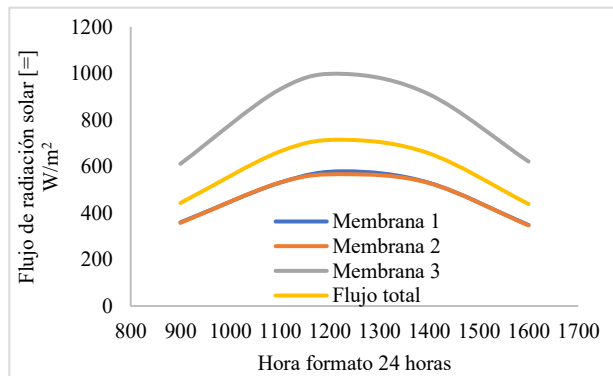
a. Soporte 1, cercano a la apertura y superficie norte del sistema



b. Soporte 2, cercano a la apertura y superficie sur del sistema



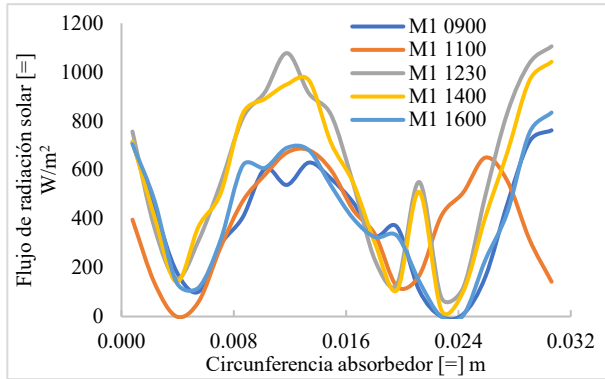
c. Soporte 3, cercano a la involuta reflejante del sistema



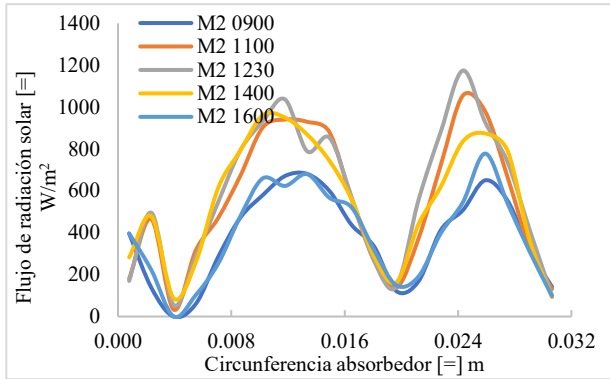
d. Flujo promedio sobre la superficie de cada soporte y total

Figura 5.14 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema

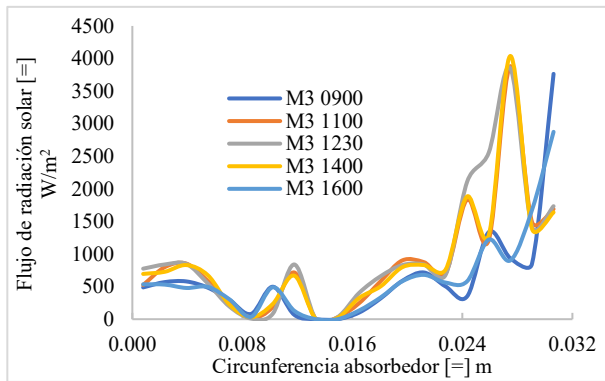
de 3 soportes dispuestos en forma triangular invertida a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3 y d) flujo promedio en la superficie de soportes de CPC 21 de septiembre cuarzo con inclinación  $19^\circ$



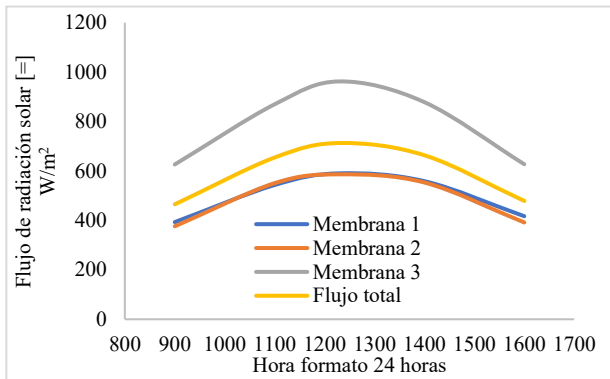
a. Soporte 1, cercano a la apertura y superficie norte del sistema



b. Soporte 2, cercano a la apertura y superficie sur del sistema



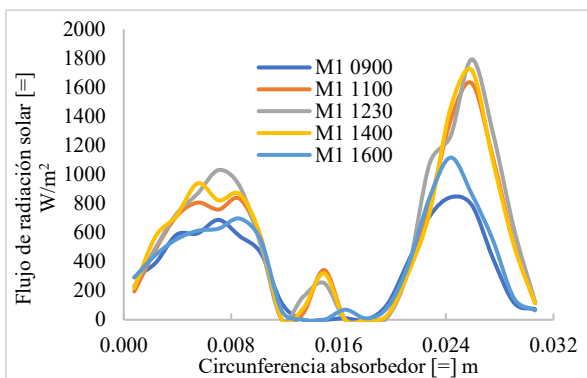
c. Soporte 3, cercano a la involuta reflejante del sistema



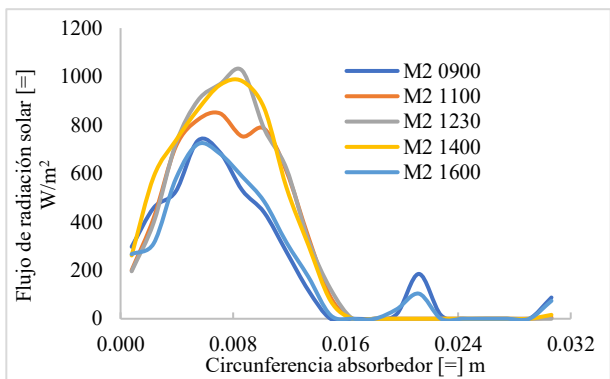
d. Flujo promedio sobre la superficie de cada soporte y total

Figura 5.15 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 3 soportes dispuestos en forma triangular invertida a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3 y d) flujo promedio en la superficie de soportes de soportes de CPC 21 de diciembre cuarzo con inclinación  $43^\circ$

## B.6. 4 soportes disposición romboidal

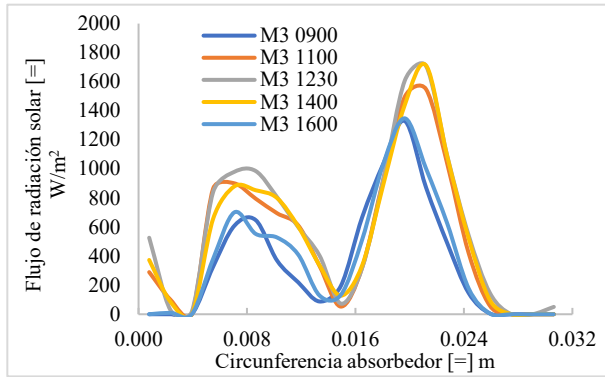


a. Soporte 1, cercano a la superficie parabólica norte

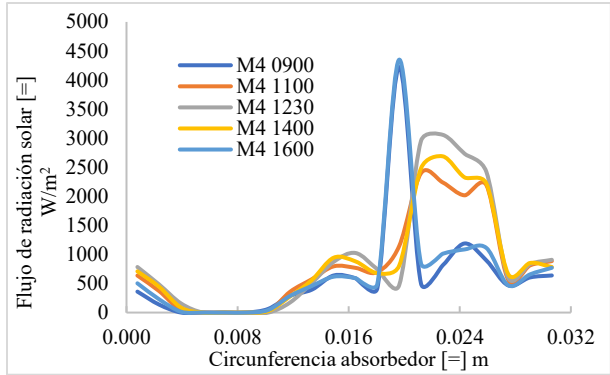


b. Soporte 2, dispuesto en la apertura del CPC

del CPC

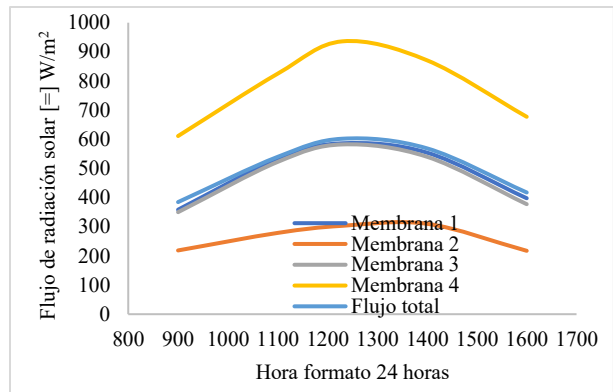


c. Soporte 3, cercano a la superficie parabólica sur del CPC

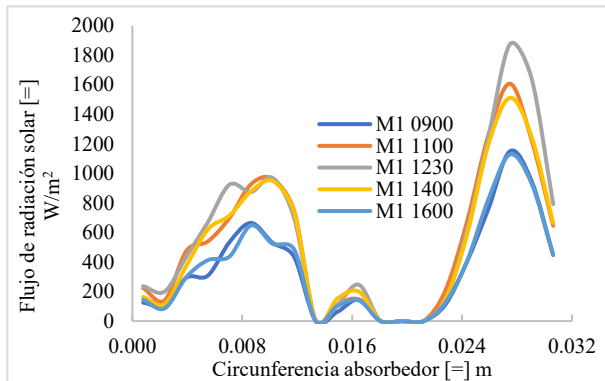


d. Soporte 4, cercano a la involuta reflejante del CPC

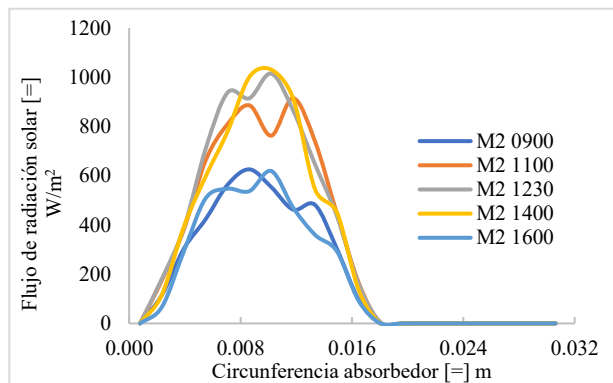
Figura 5.16 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 4 soportes dispuestos en forma romboidal a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3, d) soporte 4 y e) flujo promedio en la superficie de soportes de CPC 21 de junio cuarzo con inclinación  $-4^\circ$



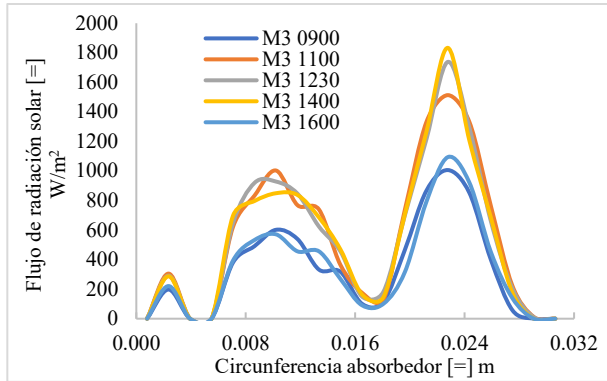
e. Flujo promedio sobre la superficie de cada soporte y total



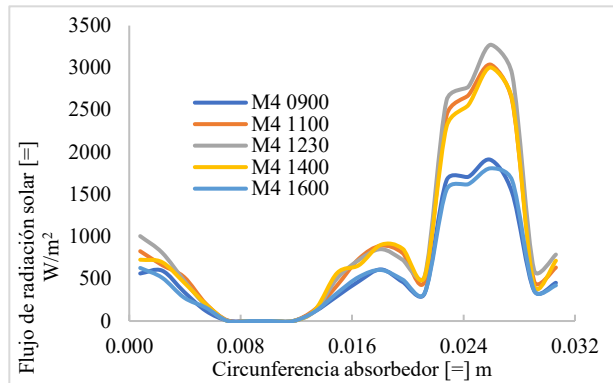
a. Soporte 1, cercano a la superficie parabólica norte del CPC



b. Soporte 2, dispuesto en la apertura del CPC

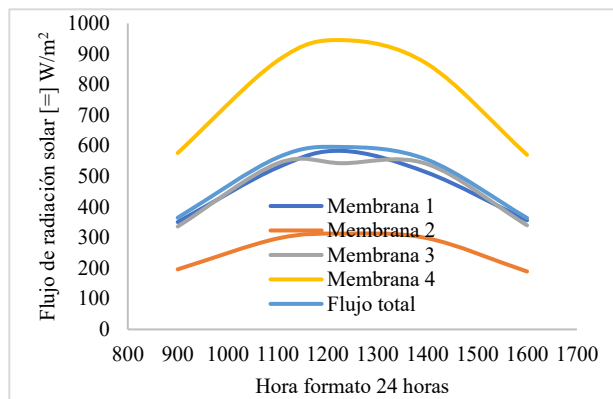


c. Soporte 3, cercano a la superficie parabólica sur del CPC

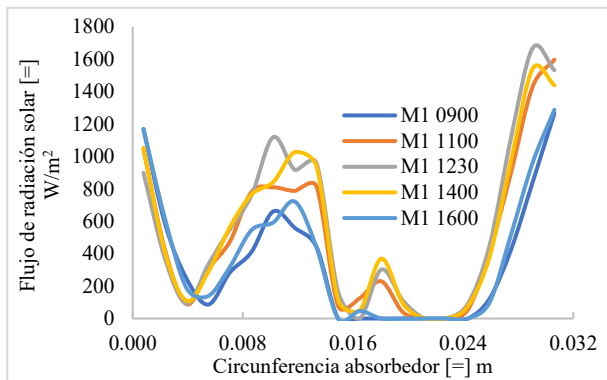


d. Soporte 4, cercano a la involuta reflejante del CPC

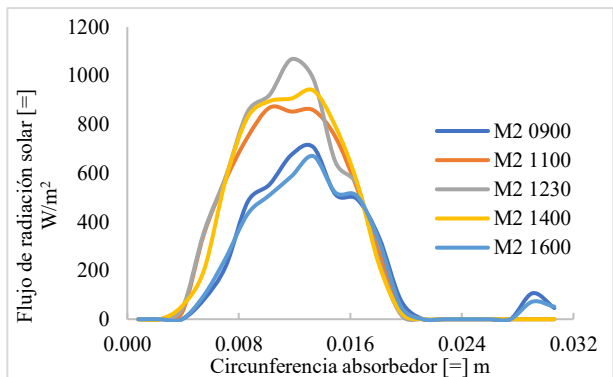
Figura 5.17 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 4 soportes dispuestos en forma romboidal a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3, d) soporte 4 y e) flujo promedio en la superficie de soportes de CPC 21 de septiembre cuarzo con inclinación  $19^\circ$



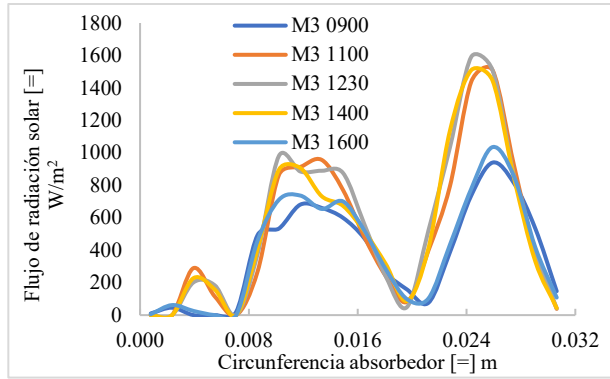
e. Flujo promedio sobre la superficie de cada soporte y total



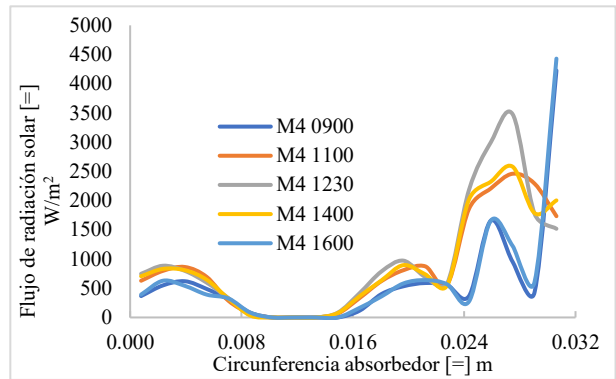
a. Soporte 1, cercano a la superficie parabólica norte del CPC



b. Soporte 2, dispuesto en la apertura del CPC

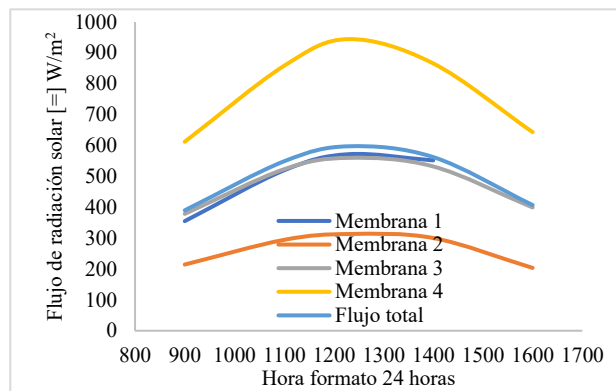


c. Soporte 3, cercano a la superficie parabólica sur del CPC



d. Soporte 4, cercano a la involuta reflejante del CPC

Figura 5.18 Irradiancia solar ( $W/m^2$ ) en superficie diametral de soporte (m) en horas [0900 a. m.-1600 p. m.], sistema de 4 soportes dispuestos en forma romboidal a) soporte 1, b) soporte 2, c) soporte 3, d) soporte 4 y e) flujo promedio en la superficie de soportes de CPC 21 de diciembre cuarzo con inclinación  $43^\circ$



e. Flujo promedio sobre la superficie de cada soporte y total

## 6. REFERENCIAS

1. A. Ishimaru, Wave Propagation and Scattering in Random Media, Wiley-IEEE Press, 1997, <https://doi.org/10.1109/9780470547045.part5>.
2. Al-Tohamy, R., Ali, S. S. and Li, F. (2022). A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 231, 113160. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160>
3. Barrón-Díaz, J. E., Flores-Johnson, E. A. and Chan-Colli (2021). FEM-CFD simulation and experimental study of compound parabolic concentrator (CPC) solar collectors with and without fins for residential applications. *Applied Sciences*, 11(8), 3704. <https://doi.org/10.3390/app11083704>
4. Bird, R. B., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N. (1982). Fenómenos de transporte: un estudio sistemático de los fundamentos del transporte de materia, energía y cantidad de movimiento. Argentina: Reverté.
5. Blanco, M. J., Mutuberría, A. and Garcia, P. (2009). Preliminary validation of Tonatiuh. Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress & Exposition, American Society of Mechanical Engineers (ASME), Orlando, Florida. <https://www.researchgate.net/publication/212165994>
6. Blanco, J. (2005). El reactor solar fotocatalítico: estado del arte. En A. Editor (Ed.), \*Solar Safe Water\* (pp. 278–302). ByToner.
7. Born, M., Wolf, E. (2013). Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Reino Unido: Pergamon.
8. Cole, Curtis & Shyr, Thomas & Ou-Yang, Hao. (2015). Metal Oxide Sunscreens Protect Skin by Absorption, Not by Reflection or Scattering. *Photodermatology, photoimmunology & photomedicine*. 32. 10.1111/phpp.12214.
9. Comisión Nacional del Agua. (2019). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales (25a ed.). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. ISBN: 978-607-626-015-9.
10. Corning Incorporated. (2023). *Pyrex products*. Corning Incorporated.
11. F. Méndez-Arriaga, M. Rodríguez-Hernández, R. Almanza, 3d-hexagonalhelical tio2- monoliths: design, printing process and solar photoactivity, *Mater. Sci. Semicond. Process.* 167 (2023) 107764, <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2023.107764>.
12. Freund, J. E., Simon, G. A. (1994). Estadística elemental. Colombia: Pearson Educacion.
13. Hecht, E. (2000). Óptica (3rd ed.). Addison Wesley Iberoamericana.
14. Hummel, [1980], Reflectivity of silver and aluminum-based alloys for solar reflectors, *Solar Energy*, Volume 27, Issue 6, 1981, Pages 449-455, [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(81\)90040-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(81)90040-2)
15. Islam, A., Teo, S.H. and Taufiq-Yap, Y.H. (2021). Step towards the sustainable toxic dyes and heavy metals removal and recycling from aqueous solution-A comprehensive review. *Resour. Conserv. Recycl.* 175, 105849.
16. J. Moreno-SanSegundo, C. Casado, D. Concha, A.S. Montemayor, J. Marugan, Optimization and parallelization of the discrete ordinate method for radiation transport simulation in openfoam: hierarchical combination of shared and distributed memory approaches, *Open Res. Eur.* 1 (2021) 2.
17. J. Acosta-Herazo, R. Monterroza-Romero, M. Mueses, F. Machuca-Martínez, G. Li Puma, Coupling the six flux absorption-scattering model to the Henyey-Greenstein scattering phase function: evaluation and optimization of radiation
18. J.E. Duran, M. Mohseni, F. Taghipour, Computational fluid dynamics modeling of immobilized photocatalytic reactors for water treatment, *AIChE J.* 57 (2011) 1860–1872, <https://doi.org/10.1002/aic.12399>.
19. K.P. Sundar, S. Kanmani, Progression of photocatalytic reactors and itas comparison: a review, *Chem. Eng. Res. Des.* 154 (2000) 135–150.
20. Lukes, P., Clupek, M. and Babicky, V. (2008). Ultraviolet radiation from the pulsed corona discharge in water. *Plasma Sources Science and Technology*, 17(2), 024012. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/17/2/024012>
21. M. Tancrez, J. Taine, Direct identification of absorption and scattering coefficients and phase function of a porous medium by a Monte Carlo technique, *Int. J. Heat. Mass Transf.* 47 (2004) 373–383.

22. M.A. Ramirez-Cabrera, P.J. Valades-Pelayo, Simplified estimation of anisotropic non-homogeneous extinction coefficients in porous solids considering spherical and cylindrical pore networks, *Int. J. Chem. React. Eng.* 20 (2021) 35–46.
23. Nikfar, S., & Jaberidoost, M. (2014). Dyes and Colorants. En *Encyclopedia of Toxicology* (3rd ed., pp. 252-261). Elsevier Inc. doi:10.1016/B978-0-12-386454-3.00602-3
24. Oh, W., Kang, B. and Choi, S. (2016). Evaluation of Anti-Soiling and Anti-Reflection Coating for Photovoltaic Modules. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 16(10), 10689–10692. <https://doi.org/10.1166/jnn.2016.13219>
25. Peña-Cruz, M. I., Valades-Pelayo, P. J. and Arancibia-Bulnes, C. A. (2018). Annual optical performance of a solar CPC photoreactor with multiple catalyst support configurations by a multiscale model. *International Journal of Photoenergy*, 2018, Article ID 8718172. <https://doi.org/10.1155/2018/8718172>
26. P. Acosta-Herazo, R. Valad'es-Pelayo, M. Mueses, M. Pinzon-Cardenas, C. Arancibia Bulnes, F. Machuca-Martínez, An optimal and energy absorption analysis of the solar compound parabolic collector photoreactor (CPCP): the impact of the radiation distribution on its optimization, *Chem. Eng. J.* 202 (2023) 125065.
27. R. Changrani, G.B. Raupp, Monte Carlo simulation of the radiation field in a reticulated foam photocatalytic reactor, *AIChE J.* 45 (1999) 1085–1094, <https://doi.org/10.1002/aic.690450516>.
28. Reyes-García, J.L., Arancibia-Bulnes, C.A. and Méndez Arriga, F. (2024). Optical and hydrodynamic performance of photocatalytic monoliths of different shapes in a solar photoreactor with compound parabolic collector. *Catalysis Today*, Vol. 429, 114498. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2023.114498>.
29. R. Peralta Muniz Moreira, G. Li Puma, Multiphysics computational fluid-dynamics (cfd) modeling of annular hotocatalytic reactors by the discrete ordinates method (dom) and the six-flux model (sfm) and evaluation of the contaminant intrinsic kinetics constants, *Catal. Today* 361 (2021) 77–84, <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.01.012>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586120300122>.
30. Salgado-Tránsito, I., Jiménez-González, A. E. y Ramón-García, M. L. (2015). Design of a novel CPC collector for the photodegradation of carbaryl pesticides as a function of the solar concentration ratio. *Solar Energy*, Vol. 115, 537-551. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.02.034>
31. Salgado Tránsito, I. (2011). Diseño, construcción y puesta en marcha de una planta solar de degradación fotocatalítica de aguas contaminadas [Tesis doctoral]. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigación en Energía, Temixco, Morelos, México.
32. Seward, T.P. and Terese Vascott. (2005). High temperature glass melt property database for process modeling; Eds.; The American Ceramic Society, Westerville, Ohio ISBN 1-57498-225-7
33. Smith D.Y., E Shiles, Mitio Inokuti, *The Optical Properties of Metallic Aluminum\**, Editor(s): Edward D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press, 1997, Pages 369-406, ISBN 9780125444156, <https://doi.org/10.1016/B978-012544415-6.50016-9>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780125444156500169>)
34. Tanveer, M., & Tezcanli Guyer, G. (2013). Solar assisted photo degradation of wastewater by compound parabolic collectors: Review of design and operational parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 534–543. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.053>
35. Tapia, S., & del Río, J. A. (2009). Concentrador parabólico compuesto: una descripción opto-geométrica. *Revista Mexicana de Física*, 55(2), 141-153.
36. Valadés-Pelayo, P. J., Arancibia-Bulnes, C. A., Salgado-Tránsito, I., Villafán-Vidales, H. I., Peña-Cruz, M. I., & Jiménez-González, A. E. (2017). Effect of photocatalyst film geometry on radiation absorption in a solar reactor, a multiscale approach. *Chemical Engineering Science*, 161, 24–35. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.11.046>
37. Wang, L., & Yu, J. (2023). Principles of Photocatalysis. In *S-scheme Heterojunction Photocatalysts* (pp. 1-52). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18786-5.00002-0>



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

# ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00170

Matricula: 2223803283

Simulación Computacional del Efecto Distributivo Espacial de Soportes Fotocatalíticos en un Reactor Solar Acondicionado con CPC

En la Ciudad de México, se presentaron a las 15:00 horas del día 1 del mes de diciembre del año 2025 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DR. HERNANDO ROMERO PAREDES RUBIO  
DR. EDTSON EMILIO HERRERA VALENCIA  
DR. RUBEN JOSE DORANTES RODRIGUEZ

Bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretario el último, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS (INGENIERÍA QUÍMICA)

DE: BRANDON LUKE CARRANCO ARIAS

y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

**APROBAR**

Acto continuo, el presidente del jurado comunicó al interesado el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.



BRANDON LUKE CARRANCO ARIAS  
ALUMNO

REVISÓ  
  
MTRA. ROSALÍA SERRANO DE LA PAZ  
DIRECTORA DE SISTEMAS ESCOLARES

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBI

DR. ROMAN LINARES ROMERO

PRESIDENTE

DR. HERNANDO ROMERO PAREDES RUBIO

VOCAL

DR. EDTSON EMILIO HERRERA VALENCIA

SECRETARIO

DR. RUBEN JOSE DORANTES RODRIGUEZ