

### POSGRADO INTERINSTITUCIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

# DISEÑO Y SIMULACIÓN CFD DEL SUBSISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE CONCENTRACIÓN SOLAR

# **TESIS**

PARA OBTENER EL GRADO
ACADÉMICO DE

MAESTRO EN CIENCIA Y

TECNOLOGÍA

EN LA ESPECIALIDAD DE

DISEÑO Y DESARROLLO DE SISTEMAS MECÁNICOS

**PRESENTA** 

ING. FRANCISCO EDUARDO DE LOERA LONA

**DIRECTOR** 

DR. IVÁN SALGADO TRÁNSITO



AGUASCALIENTES, AGS., ABRIL, 2022

# **DEDICATORIA**

A mi padre, por inculcar en mi las bases de la responsabilidad y el deseo de superación, por trabajar arduamente en su vida por su familia y guiarme por el buen camino.

A mi madre por brindarme un cálido hogar a pesar de las adversidades, por ser una luz en mi camino, por consolarme cuando estuve triste y por estar feliz aún con mis mas pequeños logros.

A mi hermano por demostrarme que es posible ser leal a pesar de las adversidades de la vida.

A mis dos hermanas, por su gran compromiso de hacer que nuestra familia mejore con amor.

A todos mis sobrinos, por llenar mi vida de alegría, por recordarme cada día que la felicidad esta en las cosas más simples de la vida.

A todos mis amigos, quienes se convirtieron en mi familia, por brindarme consejo y apoyo cuando lo necesité, por acompañarme en el viaje de la vida y llenarlo de diversión y alegría.

# **AGRADECIMIENTOS**

Al Dr. Iván Salgado Tránsito, mi director de Tesis, por todas sus enseñanzas, por su paciencia, su compromiso por formar capital humano de alto valor y sobre todo por su amistad.

Al Dr. Carlos Pineda Arellano, por contribuir arduamente con mi formación, por brindarme su apoyo cuando lo necesité y sobre todo por su amistad.

Al Dr. Moisés Montiel González por compartirme su invaluable conocimiento, por su calidez como persona, y por brindarme su amistad.

A los miembros del jurado el Dr. Juan Manuel López, el Dr. Saúl Piedra González, y al Dr. Arturo Díaz Ponce, por la revisión y los edificantes comentarios que contribuyeron a la elaboración del presente trabajo.

Gracias a todos mis maestros, quienes se convirtieron en mis amigos, por compartir su conocimiento y contribuir a mi desarrollo personal y profesional, por proveerme de herramientas invaluables que me servirán para toda mi vida.

Gracias a mis compañeros, por acompañarme en esta importante etapa de mi vida y brindarme su consejo cuando lo necesité.

A CONACYT y al Centro de investigaciones en Óptica A.C. por su gran labor y contribución a formar capital humano de excelencia.

Gracias dios por las virtudes y bendiciones con las que llenas mi vida, ayúdame a seguir el buen camino y no perderme nunca.

### RESUMEN

Los sistemas fotovoltaicos de concentración CPV poseen el mayor récord de conversión a nivel mundial, cercanos al 42 %. El control de la temperatura de una celda solar integrada a un sistema CPV es importante debido a que, si no se cuenta con un sistema de enfriamiento eficiente, la concentración será capaz de generar estrés térmico en la celda solar y dañar los componentes que la conforman. En este proyecto se analiza la transferencia de calor de un nuevo disipador de calor de aletas radiales mediante el método de volumen finito en el software ANSYS Fluent, donde el mecanismo de transferencia de calor dominante es la convección natural. El sistema óptico primario está integrado por una lente de Fresnel de 28 cm x 28 cm. Dicha lente fue caracterizada de manera experimental para determinar su eficiencia óptica y factor de concentración real, dichos parámetros fueron utilizados para definir una condición de frontera en las simulaciones. Para los estudios de simulación se consideraron los efectos de la concentración solar, las pérdidas de calor por convección, los efectos de la inclinación debidos al seguimiento solar, los efectos de la velocidad del viento, así como los efectos causados por la temperatura del ambiente. Bajo estas consideraciones, se logró mantener la temperatura de la celda solar por debajo de los 50°C en condiciones climáticas típicas del estado de Aguascalientes.

# **ABSTRACT**

Concentrating photovoltaics (CPV) systems have the world's highest convertion record close to  $42\,\%$ . The temperature control of a solar cell integrated to a CPV system is important because without an efficient cooling system, the solar concentration will be able to generate thermal stress on the solar cell and damage it. In this project the heat transfer analysis on a new radial fins heat sink was carried out using the finite volume method on ANSYS Fluent software, where the dominant heat transfer mechanism is natural convection. The primary optical system consists of a 28cm x 28cm Fresenl lens. This lens was experimentally characterized to determine its optical efficiency and real concentration factor, these parameters were used to define a boundary condition in the simulations. Solar concentration effects, heat losses by convection, tilt effects due the solar tracking, wind velocitu effects and ambient temperature affects were considered. Under these configurations it was posible to mantain the solar cell temperature under  $50^{\circ}C$  on tipic climatic conditions of the estate Aguascalentes.

# **ÍNDICE DE CONTENIDOS**

Di	EDICA	AIOHIA	
A	GRAD	DECIMIENTOS	ı
RI	ESUN	IEN	II
ΑI	BSTR	ACT	I۱
ĺN	DICE	DE TABLAS	VII
ĺN	DICE	DE FIGURAS	D
1.	INTE	RODUCCIÓN	2
	1.1.	ANTECEDENTES	2
		1.1.1. Energía en México y el mundo	2
		1.1.2. Vías de transición energética	
		1.1.3. Energía solar	2
		1.1.4. Energía solar fotovoltaica	5
		1.1.5. Sistemas Fotovoltaicos de Concentración	8
		1.1.6. Configuración de un sistema CPV	ç
	1.2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
	1.3.	OBJETIVO GENERAL	14
		1.3.1. Objetivos específicos	14
	1.4.	JUSTIFICACIÓN	14
	1.5.	HIPÓTESIS	15
2.	MAF	RCO TEÓRICO	16
	2.1.	INTRODUCCIÓN	16
	2.2.	ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO EN SISTEMAS CPV	16
	2.3.	DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	25
		2.3.1. Antecedentes de la Dinámica de fluidos computacional	25
		2.3.2. Estructura de un modelo CFD	28
		2.3.3. Verificación y validación	32
		2.3.4. Verificación	33
		2.3.5. Validación	35
	2.4	ECHACIONES GORERNANTES EN DINÁMICA DE EL LIDOS	37

		2.4.1. Introducción a las ecuaciones de dinamica de fluidos, transferencia de calor y masa	37
		2.4.2. Ecuaciones conservativas	37
	2.5.	MODELO PARA LA REGIÓN FLUIDA	38
		2.5.1. Ecuación de conservación de masa	38
		2.5.2. Ecuación de conservación de momentum	38
		2.5.3. Aproximación de Boussinesq	41
		2.5.4. Ecuación de conservación de la energía	42
	2.6.	ECUACIÓN GENERAL DE LA CONVECCIÓN-DIFUSIÓN	44
	2.7.	Esquemas numéricos	47
		2.7.1. Esquema centrado	47
		2.7.2. Esquema Upwind	48
		2.7.3. Esquema híbrido	48
		2.7.4. Esquema de ley de potencia	48
		2.7.5. Esquemas numéricos de alto orden	48
	2.8.		49
		2.8.1. Algoritmo SIMPLE	49
		2.8.2. Algoritmo SIMPLER	50
		2.8.3. Algoritmo SIMPLEC	50
		2.8.4. Algoritmo PISO	50
		2.8.5. Algoritmo SIMPLE Presto	51
	2.9.		51
		2.9.1. La cascada de la energía	52
	2.10	MÉTODOS DE ANÁLISIS Y CÁLCULO DE FLUJOS TURBULENTOS	53
		2.10.1. DNS	53
		2.10.2.LES	
		2.10.3. RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations)	
	2.11	.MODELO PARA LA REGIÓN SÓLIDA	56
3.	MET	TODOLOGÍA	58
	3.1.		59
			63
	3.2.	ANÁLISIS ESTOCÁSTICO DE DATOS CLIMÁTICOS CON AÑO METEOROLÓGICO	
		,	66
	3.3.		67
			67
			68
		·	69
			71
			76
	3.4.	RECURSO SOLAR. TEMPERATURA AMBIENTE Y VELOCIDAD DEL VIENTO	

4.	RESULTADOS	88
	4.1. VERIFICACIÓN	88
	4.2. CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DEL SISTEMA DE CONCENTRACIÓN SOLAR	94
	4.3. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES	95
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	104
	5.1. CONCLUSIONES	104
	5.2. TRABAJO A FUTURO	105
6.	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	106
Bi	bliografía	107
Α.	Anexo I: Planos del disipador de calor	112
В.	Anexo II: Constancia de obtención de 1er lugar en el concurso nacional de proyectos	
	académicos en diseño y simulación	114

# **ÍNDICE DE TABLAS**

1.1.	ventajas y desventajas de la energia solar fotovoltaica (Sampalo and Gonzalez, 2017)	/
2.1.	Ventajas y desventajas de las tres formas de solución de dinámica de fluidos(Xamán,	
	2016)	26
2.2.	Relaciones con expresiones empíricas	37
2.3.	Equivalencias de la formulación general de la convección-difusión(Xamán, 2016)	46
3.1.	Propiedades de los materiales sólidos en el modelo	79
3.2.	Valores de densidad con variaciones en la temperatura del fluido	79
3.3.	Propiedades del aire en el modelo	80
3.4.	Representación de los residuales por color	83
4.1.	$Temperatura\ de\ las\ aletas\ en\ los\ puntos\ medidos\ experimentalmente (Meng\ et\ al.,\ 2018)\ .$	91
42	Resultados de la caracterización del sistema de concentración solar	95

# **ÍNDICE DE FIGURAS**

1.1.	La relación reserva / producción de petróleo para recursos probados en todo el	
	mundo(Alemán-Nava et al., 2014)	3
1.2.	Revisión energética mensual Abril 2021 (E.U. Energy Information administration, 2021) .	3
1.3.	Promedios anuales y diarios de distribución de irradiancia global horizontal sobre la	
	superficie de la tierra (World Bank Group, 2019)	5
1.4.	Fenómeno del electrón hueco	6
1.5.	Celda fotovoltaica de una unión (Sampaio and González, 2017)	7
1.6.	Sistemas fotovoltaicos	8
1.7.	Ejes de coordenadas: Eje de altitud, eje Azimuth, ángulo de altitud y ánulo Azimuth(Hafez	
	et al., 2018)	10
1.8.	Tipos de seguimiento para módulos fotovoltaicos(Hafez et al., 2018)	10
1.9.	Mejor investigacion de las eficiencias de las celdas solares realizado por NREL E.U.A	11
1.10	. Variación de la eficiencia con distintas temperaturas predicha con simulaciones (Fesha-	
	raki et al., 2011)	12
0.1		
2.1.	Temperatura de operación de la celda solar reportados en la literatura bajo diferentes	4.0
0.0	factores de concentración donde el sistema de enfriamiento fue un disipador de calor	18
2.2.	Contornos de temperatura de la celda y el disipador obtenidos por (Cruz and Manuel,	4.0
0.0		18
2.3.	Contornos de temperaturas de el disipador de aletas circulares(2.3a) y de el disipador de	40
0.4	aletas rectangulares(2.3b) obtenidos por (Aldossary et al., 2016)	19
2.4.	Contornos de temperatura del disipador de calor con microcanales y sin microcanales	40
٥.	obtenidos por (Alzahrani et al., 2020)	19
	Condiciones de frontera y consideraciones realizadas por (Abo-Zahhad et al., 2020)	19
2.6.	·	-
	ción solar obtenidos por (Chou et al., 2012)	20
2.7.	Distribución de temperaturas (° $C$ ) en la celda solar considerando $h_{conv}=1.6kW/m^2K$ y	
	una $T_{amb} = 45^{\circ}C$ (Theristis and O'Donovan, 2015)	20
2.8.	Resultados de la simulación para una DNI= $900W/m^2$ y $20^{\circ}C$ de temperatura en el	
	ambiente (Micheli et al., 2015a)	21
2.9.	Diferencias de resistencia térmica entre un disipador de calor acampanado y un disipador	
	de calor de aletas rectas y la distribución de temperaturas que fue obtenido por la cámara	
	térmica (Luo et al., 2019)	21

2.10	Contornos de temperatura del análisis efectuado por el equipo de Phil Blumenfeld	00
0.14	(Blumenfeld et al., 2010)	22
2.11	Contornos de temperatura de la celda solar (a)y el disipador de calor (b) obtenidos por	22
0.40	Cui Min (Min et al., 2013)	22
2.12	Distribución de temperatura en la celda y el disipador de calor obtenido en el análisis	
	numérico de Marios Theristis (Theristis et al., 2017)	23
	. Contornos de temperatura utilizados por (Rejeb et al., 2020) para validar su modelo	23
2.14	Resultados de la variación de la temperatura máxima de la celda solar con el disipador	
	de calor obtenidos por (Zaghloul et al., 2021)	24
2.15	Las tres disciplinas en CFD(Xamán, 2016)	28
2.16	Estructura general de CFD	29
2.17	. Volumen de control para la conservación convectiva-difusiva de $\phi$	44
2.18	.Clasificación de los esquemas numéricos(Xamán, 2016)	47
2.19	.Diferencias entre LES Y DNS. Mientras LES opera con promedios locales, DNS resuelve	
	todas las escalas	54
3.1.	Esquema general de la metodología seguida en el desarrollo de la tesis	59
3.2.	Etapas fundamentales del experimento de caracterización del sistema de concentración .	60
3.3.	Configuración del sistema de concentración solar	60
3.4.	Sensor gardon	61
3.5.	Montaje del sistema de concentración solar sobre el seguidor solar	62
3.6.	Configuración de componentes para toma de datos	63
3.7.	Relación entre el área de apertura de un captador y el área de apertura de un absorvedor	64
3.8.	Los 8 pasos principales en la metodología de CFD	67
3.9.	CPV Receiver 10mm suncore PHOTOVOLTAICS	68
3.10	.Características del modelado para simulación	69
3.11	.Capas de la celda solar física	70
3.12	. Modelado de la región fluida y visualización del eje de simetría en todos los dominios	70
3.13	.Volúmenes de control, nodos y notación en una malla	71
3.14	.Tipos de elementos en una malla estructural	71
3.15	. Variaciones del número de elementos en la malla para analizar el comportamiento de la	
	temperatura	72
3.16	.Malla computacional final para el modelo	73
3.17	. Malla computacional en zonas cercanas a las paredes del disipador y la celda solar	73
3.18	. Vista aumentada de la región próxima a las caras del disipador y la celda solar	74
3.19	.Relación de aspecto de los elementos en el modelo	74
3.20	.Calidad de la ortogonalidad en los elementos de nuestro modelo	75
3.21	. Asimetría de los elementos en la discretización del modelo	75
3.22	.Calidad de los elementos en el modelo	76
3.23	.Configuración general	77
3.24	.Configuración del modelo de viscosidad	78

3.25	.Función de generación de calor	80
3.26	.Condiciones de frontera en los diferentes casos de estudio	81
3.27	.Configuración de los métodos de solución	82
3.28	.Residuales a la misma escala	83
3.29	. Distribución de frecuencias de la radiación solar directa en Aguascalientes, Ags. México	
	obtenidos a partir del TMY con el software SAM	84
3.30	.Temperatura ambiente típica en Aguascalientes, Ags. México obtenida con el software	
	SAM	85
3.31	. Velocidades del viento típicas en Aguascalientes, Ags. México obtenidas con el software	
	SAM	85
3.32	Distribución de frecuencias del ángulo de inclinación respecto a la horizontal de un	
	seguidor solar de dos ejes ubicado en Aguascalientes México	86
3.33	Relación entre los valores de DNI y el ángulo de inclinación respecto a la horizontal del	
	seguidor solar	87
4 1	Arreglo experimental de Meng : (1)Fuente de poder; (2)Adquisidor de datos Agilent	
	34970A; (3)Computador; (4)Disipador de calor; (5) Resistencia eléctrica (6)Aislante	
	térmico (Meng et al., 2018)	89
4.2.	Esquema del soporte (Meng et al., 2018)	89
	Arreglo de los puntos de las mediciones. Puntos 1-6 termopares tipo K; Puntos 7-9	
	PT100 RTDs	90
4.4.	Dominio de la simulación elaborada por (Meng et al., 2018)	90
	Mallado obtenido por (Meng et al., 2018)	91
	Variación del coeficiente de transferencia de calor por convección con respecto al poder	
	de calentamiento(Resultados simulados por(Meng et al., 2018) comparados con una	
	replica elaborada)	92
4.7.	Comparación de contornos de temperatura obtenidos de manera numérica por (Meng	
	et al., 2018) y contornos de temperatura para la verificación de este trabajo	92
4.8.	Variación de la resistencia térmica con respecto a la inclinación de montura (Resultados	
	por (Meng et al., 2018) comparados con la replica elaborada)	93
4.9.	Contornos de temperatura y lineas de corriente de aire obtenidos por (Meng et al.,	
	2018) mostrados en la parte superior y contornos de temperatura y lineas de corriente	
	obtenidos en la replica de la simulación para verificación se muestran en la parte inferior	93
4.10	. Resultados de las simulaciones con una velocidad del viento de $1m/s$	96
4.11	. Resultados de las simulaciones con una velocidad del viento de $4m/s$	96
4.12	.Efecto de la inclinación del disipador de calor sobre la temperatura promedio operación	
	de la celda solar, a) $15^\circ$ , b) $45^\circ$ y c) $90^\circ$ Se varían la temperatura ambiente y la intensidad	
	de la radiación solar directa. La velocidad de viento y el factor de concentración se	
	mantienen constantes en $0m/s$ y 722.5 soles respectivamente $\dots \dots \dots \dots$	97
4.13	.Contornos de temperatura y lineas de corriente variando la inclinación del ángulo de	
	operación cuando se considera DNI= $1100W/m^2$ , CR=722.5, $\eta_{ont}=0.89$ y $V_{viento}=0m/s$	98

4.14	Contornos de temperatura de la celda solar y el disipador de calor operando en	
	condiciones críticas	99
4.15	Contornos de temperatura de la celda solar y el disipador de calor operando en	
	condiciones más frecuentes	100
4.16	Contornos de temperatura de la celda solar y el disipador de calor operando en	
	condiciones favorables	101
4.17	Comparación entre la geometría del disipador propuesta y el caso de referencia(Zaghloul	
	et al., 2021)	102
4.18	. Comparación entre algunos análisis realizados por (Zaghloul et al., 2021)para disipadores	
	de aletas rectas y el disipador de aletas radiales propuesto	103

### **CAPÍTULO 1**

# INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se abordará el panorama energético de México y el mundo, además de las principales tecnologías emergentes de los últimos años en el tema de sistemas fotovoltaicos; Esto con el fin de resaltar las bondades que tiene el generar energía eléctrica a partir de la energía solar.

#### 1.1. ANTECEDENTES

#### 1.1.1. Energía en México y el mundo

Según el reporte del año 2021 de la administración de información energética de Estados Unidos(E.U. Energy Information administration, 2021), el consumo mundial de energía se estima en 92.94 cuatrillones de BTU (British Thermal Units), siendo el 79 % de esta energía suministrada por combustibles fósiles. Los recursos energéticos se suelen clasificar en tres categorías: Combustibles fósiles, recursos renovables y nucleares(Alemán-Nava et al., 2014). Los combustibles fósiles han sido por mucho la fuente de energía dominante, especialmente, petroleo, carbón y gas natural. La región Asia-Pacífico mostró el consumo mayor de energía (35 % del consumo total de energía), con China, Japón y Corea del Sur como los consumidores más importantes. Debido a este nivel de uso, la relación reserva/producción mundial de petróleo estimada en 2012 es de 54.2 años. La relación reserva- producción de otras regiones en el mundo se pude apreciar en la Figura (1.1)(Alemán-Nava et al., 2014).

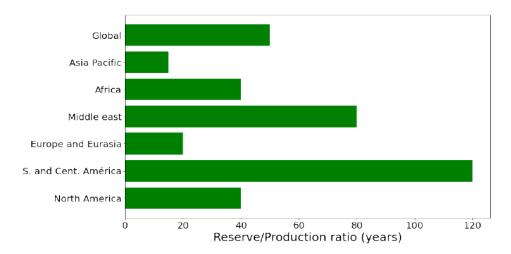


Figura 1.1: La relación reserva / producción de petróleo para recursos probados en todo el mundo(Alemán-Nava et al., 2014)

Es necesario impulsar el uso de energía renovables a razón de que, como puede observarse en la figura 1.1, las reservas de combustibles fósiles y su efecto es nocivo para el medio ambiente debido a que su uso está asociado con gases de efecto invernadero. Las energía renovables pueden ser definidas como fuentes sostenibles e incluyen energía hidroeléctrica, geotérmica, solar, eólica y maremotriz. (Alemán-Nava et al., 2014) Las energías renovables considerando el uso tradicional de la biomasa en 2011 suministraron alrededor del  $12\,\%$  del consumo final mundial de demanda de energía, y el  $7.32\,\%$  provino de fuentes renovables como energía hidroeléctrica, eólica, solar, geotérmica y biocombustibles. La energía hidroeléctrica suministra aproximadamente el  $2.64\,\%$  de la demanda de energía y está creciendo de manera constante. Todas las demás energías renovables modernas proporcionaron aproximadamente el  $9.36\,\%$  de la demanda de energía en 2021 y han experimentado un rápido crecimiento en muchos países desarrollados y en desarrollo. El rol de las energías renovables en la demanda de energía mundial puede ser observada en la Fig. (1.2)

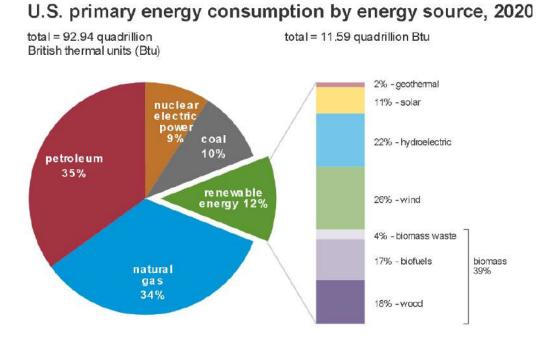


Figura 1.2: Revisión energética mensual Abril 2021 (E.U. Energy Information administration, 2021)

#### 1.1.2. Vías de transición energética

La contaminación asociada a la quema de combustibles fósiles provocan un agravamiento del cambio climático, intensificándose la presencia de fenómenos meteorológicos catastróficos tales como, incremento del nivel del mar, alteración de sistemas agrícolas y daño al ecosistema. Las emisiones también son peligrosas para la salud, ya que se estima que fueron causantes de aproximadamente 3 millones de muertes prematuras solo en 2013Gilmore et al. (2018). La urgencia para solucionar este problema se ve agravada por la creciente demanda de energía que se prevé que aumente un 35 % en 2035Outlook (2017). El cambio climático y la contaminación atmosférica local se encuentran entre las principales preocupaciones para impulsar la transición energética. La contaminación del aire es un problema severo en países como China e India, pero también en Europa se presta cada vez mas atención a los peligrosos efectos para la salud de un aire contaminado, en gran parte relacionados con el suministro y uso de energía. La transición energética debe reducir las emisiones, al tiempo que se asegura que haya suficiente energía disponible para el crecimiento económico.

#### 1.1.3. Energía solar

En nuestro planeta, el sol es una de las principales fuentes de energía, además de que podríamos decir que es inagotable. Teóricamente la energía solar tiene el potencial de satisfacer adecuadamente las demandas de energía del mundo entero, esto si las tecnologías para su recolección y suministro están disponibles (Kabir et al., 2018).

Aproximadamente 4,000,000 de exajulios ( $1Exajulio=10^{-18}J$ ) de la energía solar incide en la tierra anualmente, sin embargo, el aprovechamiento de toda esta energía sigue siendo insignificante comparada con los métodos de generación de energía convencionales.

Otra ventaja del aprovechamiento de energía solar, está relacionado con la reducción de emisiones de  $CO_2$  que se ha convertido en un problema ambiental a nivel mundial en los últimos años. Un ejemplo de ello es que 696,544 toneladas métricas de emisiones de  $CO_2$  se han reducido o evitado mediante la instalación de 113,533 sistemas solares en los hogares de California Estados Unidos (Kabir et al., 2018). Por lo tanto la adopción de la tecnología de energía solar mitigará y aliviará de una manera significativa los problemas que esten asociados con el cambio climático.

#### Potencial de las tecnologías de energía solar y comparaciones entre locaciones

Solo tres fuentes de energía renovable(biomasa, geotérmica y solar) pueden ser utilizadas para producir suficiente energía para satisfacer la demanda energética actual. De estas tres, la energía solar presenta un mayor potencial, ya que las fuentes geotérmicas se limitan a unas pocas ubicaciones y el suministro de la biomasa no es omnipresente por naturaleza. Varios factores (p.ej. latitud, variación diurna, clima y

variación geográfica) son en gran parte responsables de determinar la intensidad del flujo solar incidente sobre la superficie terrestre. La irradiancia global horizontal (GHI) varia en un total anual de entre 803 y  $2,702~kWh/m^2$  dependiendo la región (World Bank Group, 2019). De esta energía aproximadamente el  $30\,\%$  se dispersa o se refleja en el espacio dejando aproximadamente  $70\,\%$  disponible para recolección y captura(Kabir et al., 2018).La figura (1.3) muestra la irradiación global horizontal en la tierra.

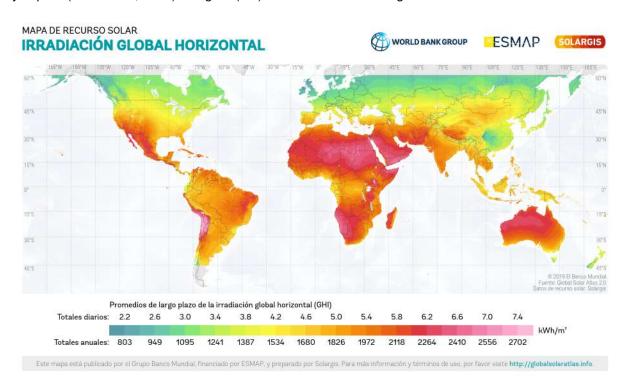


Figura 1.3: Promedios anuales y diarios de distribución de irradiancia global horizontal sobre la superficie de la tierra (World Bank Group, 2019)

#### 1.1.4. Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es una de las industrias de mayor crecimiento en todo el mundo, y para mantener ese ritmo, los nuevos desarrollos se han enfocado en lo que respecta al uso de nuevos materiales, mayor eficiencia en los procesos de fabricación de materiales, diseño de dispositivos para colección de energía, así como conceptos innovadores que ayudan a mejorar la eficiencia de las celdas solares (Sampaio and González, 2017). Los sistemas fotovoltaicos basan su funcionamiento en el principio del efecto fotoeléctrico, en el cual la energía solar fotovoltaica es la conversión directa de luz solar en electricidad (Green, 2000). Los fotones de la luz solar pueden transferir su energía a los átomos de ciertos materiales. Los fotones no tienen masa, pero tienen energía, la cual es determinada por la frecuencia de onda de la luz. Cuando un material foto-emisor es expuesto a luz solar, sus átomos absorben la energía del fotón siendo el electrón excitado hasta nivel de vacío, esto ocasiona que el electrón sea liberado de la ultima capa del átomo y se convierta en un electrón libre. Los electrones que se logran liberar de la red atómica son aquellos que requieren menos energía para ser expulsados. Si el fotón es absorbido por el átomo, entonces esta energía además de ser utilizada para liberar al electrón del enlace atómico, esta energía también contribuirá a brindar de energía cinética al electrón libre.

Entonces se puede decir que el efecto fotoeléctrico es la emisión de electrones de un material fotoeléctrico cuando incide luz sobre el.

Los electrones de valencia son los que tienen mayor energía, es decir que están en la última capa del átomo, y sirven para crear enlaces entre los átomos del metal. Estos electrones de valencia pueden ser compartidos entre átomos formando enlaces, estos enlaces son conocidos como enlaces covalentes. Entonces si un fotón expulsa un electrón de valencia, también rompe el enlace covalente que tenía y podemos ver esto como un hueco en el enlace y es conocido como par electrón hueco. Un material comúnmente utilizado en los sistemas fotovoltaicos es el silicio, esto debido a que es un material semiconductor, y puede actuar como conductor o aislante eléctrico dependiendo de condiciones físicas en las que se encuentre. En la figura (1.4) se puede apreciar de manera esquemática el fenómeno de electrón hueco en silicio.

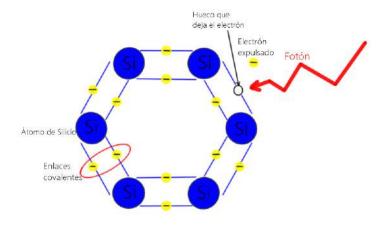


Figura 1.4: Fenómeno del electrón hueco

Los electrones liberados por la luz se mueven en el interior del material de manera aleatoria. Cuando el electrón encuentra un hueco lo ocupa y libera la energía que había adquirido por el fotón. Este efecto es conocido como recombinación de par electrón-hueco.

#### Efecto fotovoltaico

El efecto fotovoltaico es una aplicación del efecto fotoeléctrico, sin embargo en este el electrón es promovido a la banda de conducción de un material semiconductor. El movimiento de los electrones libres son llamados cargas eléctricas. Esta corriente de cargas puede alcanzar los límites de los materiales y salir de ellos. Para que esta corriente sea constante y logre tener una dirección es necesario un campo eléctrico. Convencionalmente todos los dispositivos fotovoltaicos se integran mediante una unión PN ya que esta unión es la encargada de generar el campo eléctrico para brindar dirección y flujo a la carga eléctrica. Este campo eléctrico se logra básicamente por que el material tipo N tiene un exceso de electrones, mientras que el material tipo P tiene un exceso de huecos. Una celda solar típica de una unión se muestra en la figura (1.5).

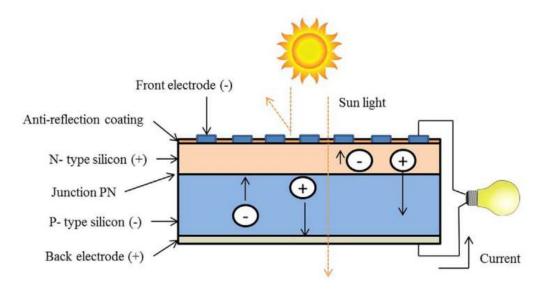


Figura 1.5: Celda fotovoltaica de una unión (Sampaio and González, 2017)

Entonces la unión PN es la parte principal de la celda, ya que es la encargada de permitir el flujo eléctrico, donde la luz es recibida es en el material tipo N y debajo se encuentra el material tipo P. La eficiencia de conversión de energía de las celdas fotovoltaicas es clave ya que permite conocer la cantidad de energía solar que se está aprovechando. Por esta razón que desde enero de 1993 "Progress in Photovoltaics" ha publicado un registro de las eficiencias de conversión de diferentes tecnologías de celdas fotovoltaicas (Green et al., 2018).

Algunas ventajas y desventajas de la energía solar fotovoltaica son descritas en el cuadro (1.1).

Ventajas	Sistema confiable
	Bajo costo de operación y mantenimiento
	Fuente de energía gratuita
	Energía limpia
	Alta disponibilidad
	La generación se puede acercar al consumidor
	Impactos ambientales negativos casi nulos
	Amigable con el medio ambiente
	Potencial para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero
	Silencioso
Desventajas	Limitación en la disponibilidad de sistemas en el mercado
	Costo inicial alto
	Necesita relativamente una gran área para su instalación
	Gran dependencia al desarrollo de la tecnología
	Intermitencia de radiación solar

Cuadro 1.1: Ventajas y desventajas de la energía solar fotovoltaica (Sampaio and González, 2017)

#### 1.1.5. Sistemas Fotovoltaicos de Concentración

En la actualidad las dos principales tecnologías fotovoltaicas disponibles son: La fotovoltaica convencional o de panel plano fig.(1.6a) y la fotovoltaica de concentración (CPV) fig. (1.6b). La fotovoltaica de panel plano utiliza celdas solares de gran superficie fabricadas con materiales relativamente económicos, los cuales colectan luz solar sin un sistema óptico intermedio, este enfoque ha tenido éxito debido a lo económico que resulta y domina el mercado fotovoltaico actual, mientras que el CPV se ha quedado atrás en gran medida a pesar de su prometedora alta eficiencia (Apostoleris et al., 2016).

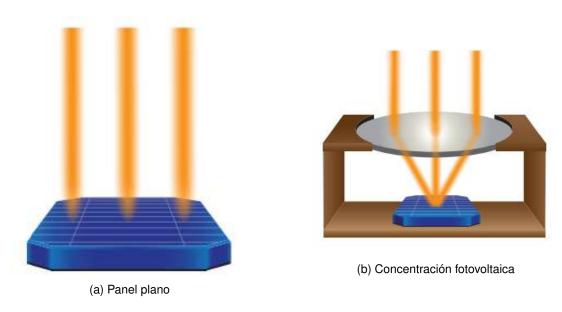


Figura 1.6: Sistemas fotovoltaicos

Los sistemas CPV utilizan elementos ópticos de concentración solar para irradiar la celda solar con mayor intensidad de flujo, lo que permite una mayor eficiencia. Inherentemente la concentración conduce a un aumento de voltaje en circuito abierto y por tanto, idealmente, un aumento en la eficiencia de conversión de energía. La mejora en la eficiencia de conversión se deba al uso de celdas con mayor eficiencia aunque con materiales mayormente costosos. De estos materiales, las celdas solares de múltiple unión de película delgada son los que han reportado una mayor eficiencia alcanzando hasta un 46 % bajo concentración, sin embargo son muy costosos de fabricar; las celdas multi-unión son viables solo en sistemas de alta concentración 500x o más(Apostoleris et al., 2016).

Los sistemas CPV son divididos en sistemas de baja concentración (LCPV) y sistemas de alta concentración (HCPV) dependiendo de su factor de concentración. De acuerdo con (Wiesenfarth et al., 2012) para sistemas de baja concentración el factor de concentración está por debajo de 100x, la concentración media va de los 100x a los 500x, para alta concentración va desde 500x hasta 2,000x y se considera ultra alta concentracion a concentraciones superiores a los 2,000x.

#### 1.1.6. Configuración de un sistema CPV

Un sistema CPV requiere de distintos subsistemas para efectuar su trabajo tales como: un sistema de alta precisión para el seguimiento solar, un sistema óptico de concentración solar, celdas solares de alta eficiencia y un sistema de enfriamiento o disipación de calor que sirva para mantener la temperatura de operación de la celda en un rango de temperatura bien definido.

#### Sistema de seguimiento solar

El sistema de seguimiento solar es una estructura electromecánica dinámica que soporta el sistema óptico y las celdas solares respecto al suelo. Su función es mantener orientado el eje óptico hacia el sol, de tal modo que, los rayos solares siempre sean normales al área de apertura del sistema de concentración. El objetivo es aumentar la producción de electricidad, ya que asegura minimizar el efecto coseno, es decir, buscar la normalidad entre la superficie receptora y los rayos solares(Lambert, 1760).

Existen dos tipos de sistemas de seguimiento solar: de un eje y de dos ejes.

- 1. <u>De un eje:</u> Normalmente con la orientación norte-sur. Este sistema permite a la celda mover-se de este a oeste, esto le permite seguir al sol desde que sale, hasta que se pone. Este tipo de sistemas son menos costosos y son mas simples, sin embargo su seguimiento solar no es tan preciso, con lo que captan menos energía.
- 2. De dos ejes: Este tipo de sistemas cuentan con movimiento en dos direcciones un eje se encuentra alineado norte-sur y el otro de este-oeste. El diseño de este tipo de sistemas maximiza la captación de energía. Su seguimiento solar cuenta con mayor precisión si se compara con los sistemas de seguimiento solar de un solo eje y atrae mayores rendimientos, sin embargo, este tipo de sistemas son mas costosos.

El movimiento electromecánico de los seguidores solares puede ser alimentado con motores eléctricos o hidráulicos, esto dependerá de la capacidad de carga requerida en el sistema.

El seguimiento de este tipo de sistemas puede ser manual o automático. El control automático esta compuesto por microprocesadores que permiten determinar la posición solar a partir de datos astronómicos.

La figura (1.7) muestra ambos ángulos de los sistemas de seguimiento; ángulo de altitud es  $\alpha$ , el ángulo de azimuth es  $\alpha\omega$ , el eje de altitud, el eje de azimuth, el plano del horizonte, y plano vertical. (Hafez et al., 2018)

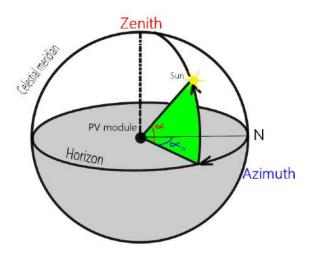


Figura 1.7: Ejes de coordenadas: Eje de altitud, eje Azimuth, ángulo de altitud y ánulo Azimuth(Hafez et al., 2018)

La figura (1.8) muestra los tipos de seguimiento de los sistemas de seguimiento solar, que consta de un solo eje y un seguidor de doble eje.

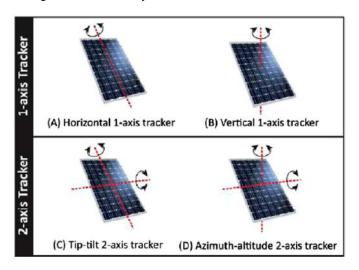


Figura 1.8: Tipos de seguimiento para módulos fotovoltaicos(Hafez et al., 2018)

#### Sistema de concentración solar

Debido al enfoque al que está dirigido este proyecto, es importante conocer las principales tecnologías de concentración solar de foco puntual; dentro de estas tecnologías se tienen las que funcionan en base a espejos como los concentradores de disco parabólico y las torres solares o receptor central. También se cuenta con las que utilizan lentes como los concentradores de Fresnel.

Los sistemas CPV son dispositivos que producen electricidad y están diseñados para concentrar la energía solar. Estos dispositivos concentran la radiación solar en la superficie de la celda solar. Los sistemas CPV son prácticamente concentradores fotovoltaicos térmicos (CPVT) que producen tanto electricidad como calor. El calor es disipado al ambiente para evitar el daño a la celda y mantener la eficiencia de la celda al controlar la temperatura.(Bellos and Tzivanidis, 2020)

#### Celdas solares

Las celdas solares son el elemento más importante de los sistemas fotovoltaicos, ya que son las que se encargan de convertir la radiación solar en energía eléctrica. En la literatura se pueden encontrar una gran variedad de tipos de celdas solares que se han desarrollado en los últimos 50 años. Un parámetro clave de las celdas solares es su eficiencia de conversión. Uno de los análisis mas exhaustivos de las celdas solares existentes ha sido efectuado por National Renewable Energy Laboratory (NREL); este análisis está reportado de manera esquemática en la figura (1.9); esta figura nos muestra las eficiencias de conversión que han alcanzado los distintos tipos de celdas solares a lo largo de los años.

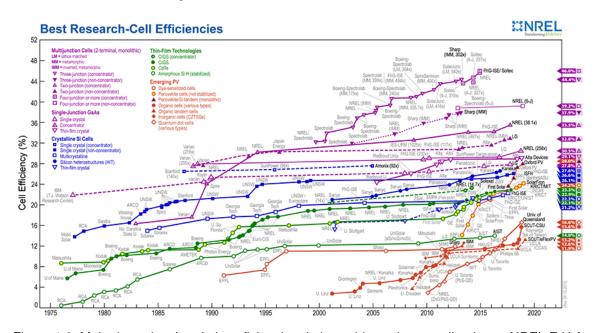


Figura 1.9: Mejor investigacion de las eficiencias de las celdas solares realizado por NREL E.U.A.

En la figura(1.9) se puede identificar que las celdas solares que cuentan con una mayor eficiencia de conversión energética, son las celdas solares de múltiple unión.

En la década de 1970 los dispositivos de doble unión formados a partir de una unión de arseniuro de galio-aluminio (AlGaAs) apilada sobre una unión arseniuro de galio (GaAs); estos materiales fueron interconectados por una unión de túnel de semiconductores la cual sirve para proporcionar una baja resistencia eléctrica y una unión entre las sub-celdas que sea de baja pérdida óptica. En la misma década el Instituto de Investigación de Energía Solar, ahora Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL por sus siglas en inglés) propuso otro dispositivo que consistía en una unión de fosfuro de galio-indio (GaInP) formada en la parte superior de una unión arseniuro de galio (AsGa) crecido en un sustrato de germanio (Ge), lo que formo una celda de dos uniones. Las celdas de múltiple unión presentan la ventaja de responder a diferentes longitudes de onda, captando y convirtiendo en energía eléctrica una porción más grande de el espeto electromagnético de la luz solar.(Green et al., 2021)

#### Sistema de enfriamiento

Distintas técnicas de enfriamiento han sido desarrolladas con distintas metodologías de análisis; estas metodologías son analizadas en el marco teórico de este trabajo. Los dispositivos fotovoltai-

cos de concentración requieren una disipación efectiva del calor; esto le permite a la celda operar dentro de un rango de temperatura adecuado y con esto, lograr eficiencias aceptables en el sistema. El cambio de temperatura de operación de la celda solar afectará la potencia de salida de la misma. El voltaje es altamente dependiente de la temperatura de operación de la celda solar, por esto, un incremento en la temperatura causará un decremento en el voltaje.

Un estudio realizado por (Fesharaki et al., 2011) investiga los efectos de la temperatura en módulos fotovoltaicos usando ecuaciones básicas que relacionan la eficiencia, la radiación solar y la temperatura, ecuación(1.1).

$$\eta_c = \eta_{Tref} [1 - \beta_{ref} (T_c - T_{ref}) + \gamma log_{10} I_{(t)}]$$
(1.1)

#### En donde:

 $\eta_c$ =Eficiencia de conversión energética de la celda solar.

 $\eta_{Tref}$ =Eficiencia eléctrica del módulo a una temperatura de referencia.

 $T_{ref}$ =Temperatura de referencia.

 $\beta_{ref}$ =Coeficiente de expansión volumétrica de referencia.

 $T_c$ =Temperatura de la celda.

 $\gamma$ =Propiedades de los materiales.

Aunado a esto se realizan una serie de simulaciones considerando días soleados y días nublados. Asumiendo una corriente de I(t)=1000+500sin(t/5) y se obtienen resultados de un decremento en la eficiencia cuando hay un incremento de la temperatura a medida que incrementa el tiempo, además, la eficiencia varía por la variación de la radiación solar. La figura (1.10) muestra muestra la variación de la eficiencia con la temperatura a una radiación de  $1000W/m^2$  Donde dicho autor encuentra una relación lineal entre la temperatura del ambiente y la eficiencia del módulo solar obtenido con sus simulaciones.

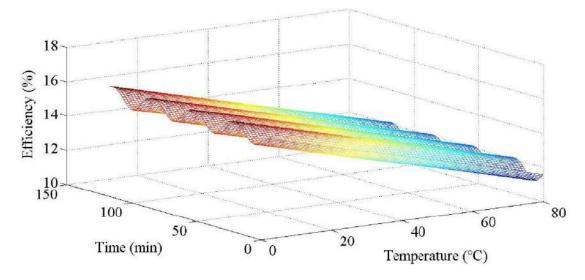


Figura 1.10: Variación de la eficiencia con distintas temperaturas predicha con simulaciones (Feshara-ki et al., 2011)

#### 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sistemas fotovoltaicos de concentración (CPV) tienen una alta eficiencia de conversión energética, esto si se comparan con los sistemas convencionales de celdas de silicio mono-cristalino. Sin embargo, también representan un costo mayor ya que estos requieren un sistema de concentración solar, un sistema preciso de seguimiento solar, celdas solares de nuevas generaciones y un sistema de disipación de calor que permita hacer trabajar a las celdas en sus rangos de temperatura establecidos por los fabricantes. Si se analiza la configuración básica del sistema CPV mostrado con anterioridad, se podrá percatar el hecho de que una porción de energía será convertida en calor, y a su vez este calor causará estrés térmico en la celda, afectando a los distintos componentes que la conforman. Entonces se deberá evitar el estrés térmico en la celda; lo cual se pretende lograr con el diseño y fabricación de un sistema de enfriamiento, que sea económico en su fabricación, que tenga costos bajos en su mantenimiento y que sea completamente capaz de mantener a la celda solar trabajando en su rango de temperatura de operación.

La mayoría de los sistemas de enfriamiento basan su funcionamiento en la interacción de un sólido con un fluido para efectuar intercambio de energía; es por este motivo que en este proyecto se propone simular el intercambio de energía entre la celda solar, una nueva propuesta de disipador de calor circular configurado con aletas radiales y el aire a temperatura ambiente que mediante convección natural disipa el calor, eso haciendo uso de la técnica del método de volumen finito.

#### 1.3. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este trabajo es contribuir al desarrollo de los sistemas de concentración fotovoltaico, mediante el diseño, simulación y verificación de un sistema de enfriamiento pasivo para celdas solares de triple unión integradas a los sistemas CPV.

#### 1.3.1. Objetivos específicos

- Analizar la transferencia de calor entre la celda solar y un disipador de calor de aletas radiales mediante simulación numérica, cuyo análisis no se ha realizado en la literatura enfocado a este tipo de sistemas.
- Obtención de condiciones de frontera para las simulaciones mediante métodos estocásticos y experimentales.
- Asegurar que las celdas solares se mantendrán operando en un rango de temperaturas permisible dado por el fabricante.
- Hacer uso de técnicas de simulación que nos permitan conocer y observar el comportamiento de la temperatura en la celda solar y el disipador de calor con el fin de tomar decisiones favorables a la reducción del costo del sistema de disipación de calor.
- Lograr temperaturas de operación de la celda solar inferiores a los 110°C con un sistema de enfriamiento pasivo, específicamente con un sistema de disipación de calor por aleteo bajo el principio físico de la convección natural.
- Verificación de las simulaciones realizadas con un artículo científico que haya sido validado experimentalmente.
- Generación de planos del disipador de calor.

#### 1.4. JUSTIFICACIÓN

Una de las principales problemáticas mundiales en la actualidad es la transición a un sistema energético de cero emisiones.

Algunas agencias de investigación como IRENA (International Renewable Energy Agency) aseguran que la transición hacia un sistema que este basado en energías renovables ocasionará efectos económicos que serán muy positivos para la economía global y el desarrollo mundial.

El cambio climático esta afectando a la tierra por causa de las actividades humanas. Es bien sabido

que el consumo energético mundial es cada vez más elevado y la producción de esa energía a partir de la quema de combustibles fósiles no es para nada favorable a la solución de la problemática ambiental. Es por esta razón que en los últimos años el crecimiento de las energías renovables ha tenido un crecimiento exponencial, sin embargo, aún se encuentran en una etapa de desarrollo. El desarrollo de las energías limpias es completamente necesario para combatir el cambio climático, pero también para combatir la pobreza energética ya que millones de personas alrededor del mundo aún carecen de acceso energía eléctrica para su consumo y lograr así el acceso a la electricidad para todas las personas.

Una de las energías limpias mas prometedoras en la actualidad es la energía solar fotovoltaica, sin embargo, los sistemas fotovoltaicos existentes en la actualidad, aún requieren aumentar sus eficiencias. Los sistemas fotovoltaicos de concentración solar han demostrado alcanzar las eficiencias de aprovechamiento energético más altas, sin embargo, este tipo de tecnologías aún es afectada por los elevados costos de los subsistemas que la conforman.

Uno de los componentes clave para maximizar la eficiencia en estos sistemas es el control de la temperatura de las celdas solares, ya que su eficiencia esta directamente relacionada con su temperatura de operación. A pesar de que esta problemática ha sido resuelta en términos funcionales, los sistemas de enfriamiento aún requieren un impulso con la disminución de sus costos de manufactura y sus costos de mantenimiento.

#### 1.5. HIPÓTESIS

Mediante el uso de herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional se ha obtenido un nuevo diseño de disipador de calor de aletas radiales, el cual mejora el control de temperatura en las celdas solares de un Sistema Fotovoltaico de Concentración, manteniéndola por debajo de los  $110^{\circ}C$ 

### **CAPÍTULO 2**

# **MARCO TEÓRICO**

#### 2.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta una revisión del estado del arte de concentración solar fotovoltaica. La revisión se orienta a sistemas de enfriamiento pasivo de celdas solares, específicamente con un disipador de calor. Los métodos empleados para los análisis de transferencia de calor son analizados de manera general. También se presenta una descripción general de la teoría CFD la cual se siguió en este trabajo.

# 2.2. ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO EN SISTEMAS CPV

Los sistemas fotovoltaicos de concentración (CPV) han registrado los mayores records de eficiencia de conversión energética, superiores al 40 % (Green et al., 2021). Los sistemas CPV convencionalmente utilizan celdas solares de múltiple unión, las cuales están expuestas a altos flujos de radiación concentrada y por consecuente, deben contar con un sistema de disipación de calor para mantener la temperatura de la celda dentro de un intervalo de trabajo bien definido. El control de temperatura en la celda solar es clave para maximizar su funcionamiento y alcanzar las altas eficiencias reportadas de hasta 47.1% (Green et al., 2021). De ahí que sea necesario la innovación y el desarrollo de eficientes sistemas de enfriamiento que permiten a las celdas solares mantenerse en una temperatura óptima de operación. Por esta razón en la literatura se han propuesto diferentes sistemas de enfriamiento para dispositivos CPV, los cuales pueden dividirse en dos tipos: 1) Sistemas de enfriamiento activo y 2)

sistemas de enfriamiento pasivo. Cada uno tiene ciertas ventajas, en el caso del enfriamiento activo tiene el potencial de disipar elevados flujos de calor, pueden captar el calor y transferirlo a un fluido de trabajo además de poder ser más compactos. En el caso de los sistemas de enfriamiento pasivo su manufactura es mas simple, su mantenimiento podría considerarse nulo, alta fiabilidad debido a que tiene ausencia de control activo, además de no tener pérdidas parasitarias ya que no consume energía para lograr su cometido de enfriamiento. Algunos ejemplos de métodos pasivos son los siguientes: materiales de nano-partículas en cambio de fase (Nanoparticle-PC) (Zarma et al., 2019), método de enfriamiento radiativo (Sato and Yamada, 2019), sistemas de enfriamiento basados en tubo de calor (Popov et al., 2020), sistemas de enfriamiento en paneles solares con camas de hidrogel (Abdo et al., 2020), inmersión líquida (Xin et al., 2015), y disipador de calor por convección natural (Gallero et al., 2019). En contraste algunos ejemplos de métodos activos son: la circulación de aire forzado (Kasaeian et al., 2017), rociado de agua (Schiro et al., 2017), técnica de disipadores de calor con micro-canales (Yang and Zuo, 2015), sistemas de intercambio de calor acoplados a tierra en regiones áridas (Ruoping et al., 2020), chorro de impacto (Nadda et al., 2018)(Abo-Zahhad et al., 2018), sistemas de enfriamiento termo-eléctrico (Kane et al., 2017), enfriamiento con intercambiadores de calor haciendo uso de nanofluidos (Kumar et al., 2020) e intercambiadores de calor con multicanales haciendo fluir un líquido (Dong et al., 2018), métodos que por lo contrario si requieren del suministro de energía.

Los tipos de enfriamiento que se utilizan en los sistemas CPV varían dependiendo del nivel de concentración solar, siendo común los sistemas de enfriamiento activo para sistemas de alta concentración solar y sistemas pasivos para sistemas de baja concentración solar o sin concentración solar. Sin embargo, en los últimos años se ha demostrado que se puede aprovechar las virtudes de los sistemas pasivos en sistemas de alta o incluso ultra alta concentración solar. En la literatura la clasificación del nivel del factor de concentración varía entre distintos autores, pero la mayoría coinciden en considerar baja concentración de 0-100 soles, media concentración de 100-500 soles, alta concentración de 500-2000 soles y ultra alta concentración en concentraciones superiores a los 2,000 soles(AlFalah et al., 2020).

En la literatura se ha reportado el desempeño de diferentes sistemas de enfriamiento CPV bajo distintos parámetros como el factor de concentración, tipo de materiales de fabricación, dimensiones y su geometría, estas variables provocan que su rendimiento sea mayor o menor dependiendo las consideraciones que se realicen para su diseño.

En la figura (2.1) puede observarse un esquema de los factores de concentración y temperaturas de operación de las celdas solares utilizadas en trabajos reportados durante los últimos 10 años. En todos ellos se implementaron técnicas de simulación numérica para modelar el enfriamiento pasivo en un sistema CPV con un disipador de calor. En el eje horizontal se pueden observar los autores y el año en el que han reportado sus trabajos, en la línea color azul se puede apreciar el nivel de concentración solar analizado y en la linea color naranja se puede observar la temperatura de operación de la celda solar que fue alcanzada bajo su respectivo nivel de concentración reportado.

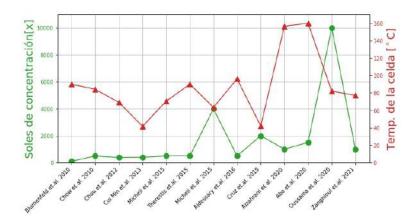


Figura 2.1: Temperatura de operación de la celda solar reportados en la literatura bajo diferentes factores de concentración donde el sistema de enfriamiento fue un disipador de calor.

Entre los diferentes disipadores de calor que existen en la actualidad, se han propuesto distintas configuraciones geométricas, bajo distintas condiciones de estudio, y bajo distintos niveles de concentración, todos los que se mencionan a continuación son estudios de sistemas de enfriamiento pasivo por disipador de calor. Algunas configuraciones se muestran en el siguiente listado:

- (Micheli et al., 2015b) realizaron un análisis numérico y experimental de un disipador de calor de micro-canales en el año 2015 haciendo uso del software COMSOL Multiphysics, obteniendo resultados de temperatura de operación de 70.4°C. Encontrando que la técnica de micro-canales es una solución viable como enfriamiento pasivo para concentraciones inferiores a los 500x de concentración.
- Por su parte, (Cruz and Manuel, 2019) realizaron un análisis numérico con el método de elemento finito en el año 2019 con ayuda del software COMSOL Multiphysics. Ellos investigaron altas concentraciones solares, variando de 2,000x a 10,000x y obtuvieron resultados de temperatura de operación en la celda solar de 41.8°C y 57.85°C respectivamente. Encontrando con esto que se puede mantener operando en condiciones aceptables celdas solares de 1mm x 1mm bajo esos niveles de concentración. La geometría propuesta por estos autores pude observarse en la figura (2.2).



Figura 2.2: Contornos de temperatura de la celda y el disipador obtenidos por (Cruz and Manuel, 2019)

 (Aldossary et al., 2016) realizaron un análisis numérico-experimental en el año 2016 con ayuda del software COMSOL Multiphysics de tres sistemas, uno activo y dos sistemas pasivos con configuraciones de aletas rectangulares y circulares a una concentración solar de 500x obteniendo una temperatura de operación de la celda de  $117^{\circ}C$  en el caso de las aletas circulares y  $96^{\circ}C$  en el caso de las aletas rectas. Se pueden apreciar los contornos de temperatura de ambas configuraciones en la figura (2.3).

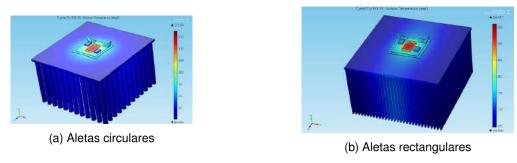


Figura 2.3: Contornos de temperaturas de el disipador de aletas circulares(2.3a) y de el disipador de aletas rectangulares(2.3b) obtenidos por (Aldossary et al., 2016)

■ Por su parte (Alzahrani et al., 2020) realizó un análisis numérico en el software COMSOL Multiphysics variando la concentración solar de 100x a 1,000x obteniendo resultados de temperatura de operación en la celda solar de 156.42°C. Sus resultados muestrán que la temperatura en las celdas solares es linealmente dependiente del factor de concentración y de la temperatura del ambiente. Los contornos de temperatura que obtuvo este autor y su equipo se pueden observar en la figura (2.4).

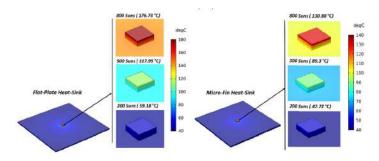


Figura 2.4: Contornos de temperatura del disipador de calor con microcanales y sin microcanales obtenidos por (Alzahrani et al., 2020)

(Abo-Zahhad et al., 2020) realizaron un análisis numérico en el Software Ansys Fluent, en este trabajo se evaluaron los niveles de concentración solar de 50x a 1,500x, obteniendo resultados de temperatura de 160°C correspondiente a 1500x, en la figura (2.5) se puede observar un poco de las configuraciones físicas que se analizaron en este estudio.

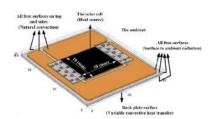
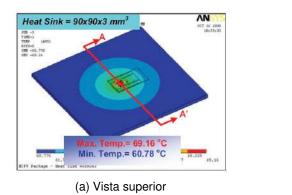
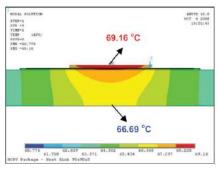


Figura 2.5: Condiciones de frontera y consideraciones realizadas por (Abo-Zahhad et al., 2020)

■ El trabajo de (Chou et al., 2012) muestra un análisis numérico con el software ANSYS, en el cual se estudió la temperatura alcanzada con una concentración solar de 380x y lograron temperaturas de operación de la celda solar de 69°C, en la figura (2.6) se puede observar una vista superior (2.6a) y una vista transversal (2.6b) de los resultados obtenidos.





(b) Sección transversal

Figura 2.6: Distribución de temperatura con el modelo de elemento finito en el modulo de concentración solar obtenidos por (Chou et al., 2012)

■ El trabajo de (Theristis and O'Donovan, 2015) nos muestran un análisis numérico en el software SMART S2 de un sistema con un factor de concentración solar de 500x, obteniendo temperaturas de operación en la celda solar superiores a los 90°C, sin disipador de calor, este autor y su equipo de trabajo únicamente calculan perdidas por convección en la celda solar. En la figura (2.7), se puede observar la distribución de temperaturas obtenido.

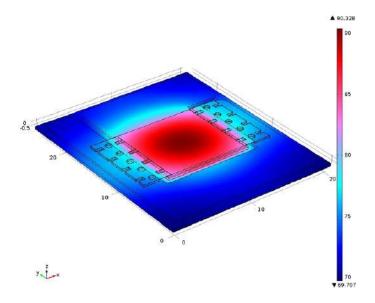


Figura 2.7: Distribución de temperaturas (°C) en la celda solar considerando  $h_{conv}=1.6kW/m^2K$  y una  $T_{amb}=45$ °C(Theristis and O'Donovan, 2015)

■ Por su parte (Micheli et al., 2015a) realizaron un análisis numérico en el software COMSOL Multiphysics de un sistema con una concentración solar de 4,000x reportando resultados de temperatura de operación en la celda solar de 63.3°C en condiciones favorables y 91.5°C en condiciones no tan favorables. En la figura (2.8) se puede observar los contornos de temperatura obtenidos por el autor.

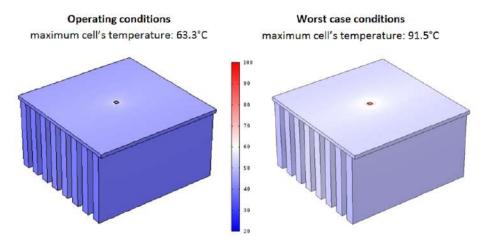


Figura 2.8: Resultados de la simulación para una DNI= $900W/m^2$  y  $20^{\circ}C$  de temperatura en el ambiente (Micheli et al., 2015a)

- (Chow et al., 2010) realizó un análisis numérico en el software COMSOL Multiphysics para un sistema con una factor de concentración de 500x reportando resultados de temperatura de operación en la celda solar de 84°C.
- Por su parte (Luo et al., 2019), realizaron un análisis experimental de distintas geometrías de disipadores de calor acampanados para evaluar sus rendimientos, señalando que el número óptimo de aletas para el disipador con esa geometría debe estar entre 15 y 18 aletas y destacando las bondades de un disipador acampanado con respecto a un disipador de aletas rectas por medio de una diferencia de temperatura y la resistencia térmica, tal como se muestra en la figura (2.9).

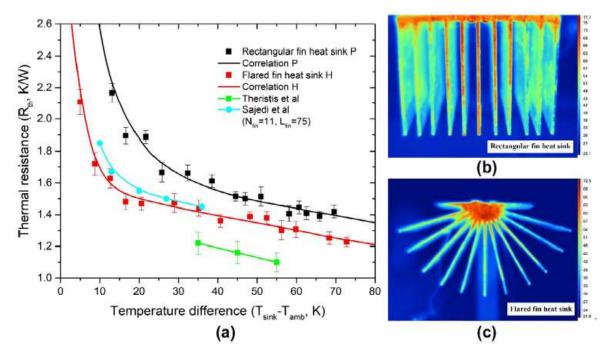


Figura 2.9: Diferencias de resistencia térmica entre un disipador de calor acampanado y un disipador de calor de aletas rectas y la distribución de temperaturas que fue obtenido por la cámara térmica (Luo et al., 2019)

■ (Blumenfeld et al., 2010)ha evaluado el comportamiento de una celda solar sometida a 100x de concentración con un disipador de calor acampanado, alcanzando una temperatura máxima de operación de 90°C los cuales se pueden observar en forma de contornos de temperatura en la figura (2.10)

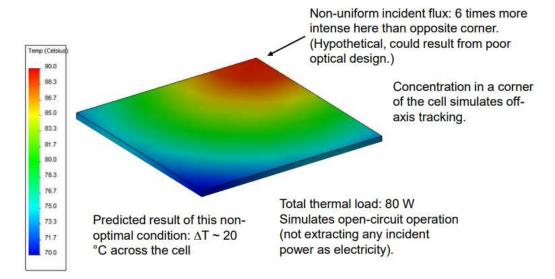


Figura 2.10: Contornos de temperatura del análisis efectuado por el equipo de Phil Blumenfeld (Blumenfeld et al., 2010)

■ El trabajo de (Min et al., 2013) evalúa un disipador de calor y lo valida con métodos experimentales, ellos analizan un sistema con un factor de concentración geométrico de 400x y alcanzan una temperatura de operación promedio en la celda solar de 41.7°C. los contornos de temperatura obtenidos por este autor pueden observarse en la figura (2.11).

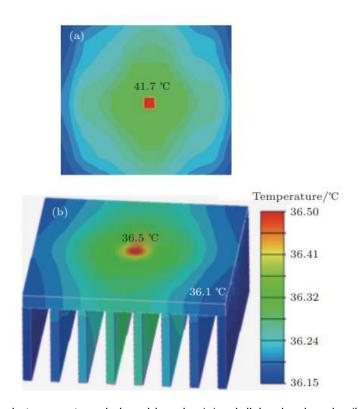


Figura 2.11: Contornos de temperatura de la celda solar (a)y el disipador de calor (b) obtenidos por Cui Min (Min et al., 2013)

Por su parte (Theristis et al., 2017) realizó un estudio numérico experimental de un disipador de calor acampanado, el análisis es a partir de un calentamiento de 80W a una temperatura de 40°C en el ambiente y consideran un coeficiente de transferencia de calor por convección de 20W/m²K obteniendo resultados de temperatura de operación en la celda solar de 91.2°C en el centro de la celda solar, justo como se puede observar en los contornos de temperatura en la figura (2.12).

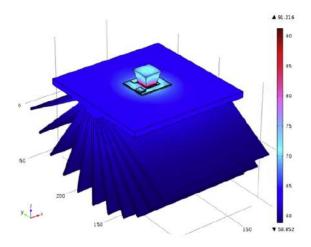


Figura 2.12: Distribución de temperatura en la celda y el disipador de calor obtenido en el análisis numérico de Marios Theristis (Theristis et al., 2017)

■ El trabajo de (Rejeb et al., 2020) evalúa en el software comercial Ansys Fluent un sistema de enfriamiento pasivo de placa sin aletas con distintos factores de concentración (2,000, 6,000 y 10,000 soles) para una celda solar de área muy pequeña(1mm²), obteniendo valores de temperatura de operación promedio en la celda de 35°C, 57°C y 82°C respectivamente cuando supone una radiación solar directa de 1,000 W/m². La figura (2.13) muestra los contornos de temperatura de la parte posterior del difusor de calor obtenidos por el autor para validar su modelo.

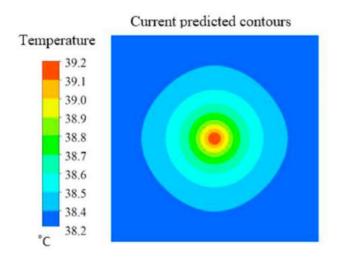


Figura 2.13: Contornos de temperatura utilizados por (Rejeb et al., 2020) para validar su modelo

(Zaghloul et al., 2021)analizó el comportamiento de la temperatura de una celda solar, haciendo uso de un disipador de calor de aletas rectas para disipar el calor, este aquipo de trabajo utiliza el software Ansys Fluent. Los efectos de la temperatura del ambiente, la velocidad del viento y los factores de concentración fueron estudiados para varias longitudes de aletas en el disipador de calor. Algunos de sus resultados mas relevantes son mostrados en la figura (2.14).

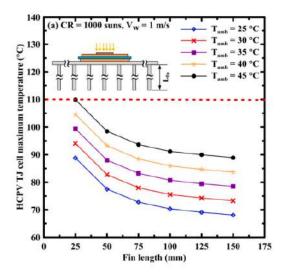


Figura 2.14: Resultados de la variación de la temperatura máxima de la celda solar con el disipador de calor obtenidos por (Zaghloul et al., 2021)

Como se pudo apreciar, la técnica de disipación de calor por convección natural predomina la comunidad científica, esto es debido a las bondades que nos brinda esta técnica como bajos costos de manufactura o mantenimiento casi nulo.

El análisis del estado del arte nos brinda un panorama general de las técnicas y consideraciones que han sido analizadas por distintos autores a lo largo de los últimos años al analizar los sistemas de enfriamiento con métodos numéricos. Una cantidad considerable de autores han utilizado software que no está específicamente diseñado para analizar la transferencia de calor en medios fluidos. Sino que se hacen consideraciones para simplificar los análisis como suponer coeficientes de transferencia de calor promediados o despreciar la variación de las propiedades del aire como función de la temperatura.

Esta revisión también permite observar que los autores suponen factores de concentración solar sin variabilizar la radiación solar directa que es fluctuante con la hora del día, la estación del año e incluso de la zona en la que se encuentre operando el sistema. Esto puede generar incertidumbres altas y por consecuente generar diferencias reconocibles de los modelos con la física real causada por las suposiciones efectuadas en los modelos. Entonces, en el presente trabajo se busca evitar estas fuentes de error realizando un análisis estricto del comportamiento del medio fluido que interactúa con el disipador de calor para obtener aproximaciones más confiables. Además de considerar los casos críticos y los casos más comunes de operación, que están dados por la radiación solar directa que incide en los sistemas de concentración solar y las condiciones atmosféricas y ambientales del entorno.

### 2.3. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

### 2.3.1. Antecedentes de la Dinámica de fluidos computacional

En el campo científico se utilizan múltiples métodos de estudio, los cuales pueden clasificarse en dos métodos: teóricos y experimentales.

Un gran número de los problemas que involucran fluidos, transferencia de calor y masa, en la práctica se reducen a la solución de modelos matemáticos que están basados en sistemas de ecuaciones diferenciales parciales. Estos modelos que describen y gobiernan fenómenos físicos, son generalmente complejos y su solución analítica solo es posible para cuando se analizan casos simples.

En la mecánica de fluidos se cuenta con un conjunto de leyes conservativas y modelos matemáticos que describen el comportamiento de los fluidos, sin embargo estos modelos solo pueden resolver problemas simples debido a que en casos complejos las ecuaciones no tienen una solución analítica. La incapacidad de resolver analíticamente las ecuaciones que determinan el comportamiento de un fluido en condiciones complejas ha conducido al desarrollo de diferentes aproximaciones de solución. Una de ellas es la experimentación, la cual se realiza en prototipos a pequeña o gran escala, y de esta forma se determinan los campos de presión, velocidad y/o temperatura. Sin embargo la experimentación involucra un elevado costo económico y de inversión de tiempo para la obtención de resultados.

Otra forma de resolver los problemas de los fluidos es mediante el uso de métodos numéricos. Esta técnica es eficiente, menos costosa en comparación con la experimental y puede resolver problemas complejos, permitiendo obtener resultados en un periodo de tiempo corto.

Los métodos numéricos por tanto, se han convertido en una alternativa para la solución de problemas de la dinámica de los fluidos, transferencia de calor, entre otros. Los métodos numéricos que son mas ampliamente usados son el métodos de diferencias finitas (MDF), de volumen finto (MVF) y de elemento finito (MEF), estos métodos se usan para resolver las ecuaciones conservativas de masa, cantidad de movimiento, energía y especies químicas (transporte de masa). Xamán (2016) presenta un resumen de las ventajas y desventajas que tienen las formas de resolver los problemas de mecánica de fluidos, las cuales pueden ser observadas en el cuadro (2.1)

Técnica	Ventajas	Desventajas		
Experimental	Fenómeno más realista	Equipo requerido Problemas de escala Dificultad de mediciones Costo operacional		
Teórica	Fenómenos más general Resultado en formato de una formula	Restricción de geometría Fenómenos lineales		
Numérica	Geometría y procesos físicos complicados Fenómenos no lineales Evolución temporal del fenómeno	Errores de truncamiento Información de condiciones de frontera Costo computacional		

Cuadro 2.1: Ventajas y desventajas de las tres formas de solución de dinámica de fluidos(Xamán, 2016)

#### Método de las diferencias finitas

El método de las diferencias finitas (MDF), fue introducido por Euler en el siglo XVIII. También es el método más fácil de utilizar para aplicación de problemas de geometrías simples.

En principio, el MDF puede ser aplicado para cualquier tipo de malla. Sin embargo, se complica el método cuando es aplicado para mallas no regulares. La principal desventaja del MDF es que es un método no conservativo, esto es, la conservación de la masa no se cumple a menos de que se tenga especial cuidado para ello.

#### Método de volúmenes finitos

El método de volúmenes finitos (MVF) fue desarrollado muy similar a la formulación de diferencias finitas, pero con algunas distinciones. Este método parte usando la forma integral de las ecuaciones conservativas. El dominio bajo estudio es dividido en un número finito de volúmenes de control(VC) y las ecuaciones de conservativas son aplicadas para cada VC. En el centro de cada VC existe un nodo en el cual se calcula el valor de las variables, el cual es utilizado para expresar los valores de las variables en las zonas superficiales de los VC, se utiliza algún tipo de interpolación. Las integrales superficiales se aproximan usando fórmulas de cuadratura disponibles. Teniendo como resultado ecuaciones algebraicas para cada uno de los VC, en la cual aparecen los valores de los nodos contiguos. El MVF puede ser adecuado para cualquier tipo de malla computacional y por este motivo, se puede aplicar a geometrías complejas. El mallado únicamente define las fronteras de los VC. El método es conservativo para cada VC, así que las integrales superficiales son las mismas para las fronteras de los VC adyacentes.

El algoritmo numérico del MVF consta de los siguientes pasos:

- Primero se integran las ecuaciones gobernantes del flujo sobre todos los VC del dominio computacional.
- Posteriormente se realiza una discretización sustituyendo una variedad de aproximaciones finitas para cada uno de los términos en las ecuaciones integradas, estos términos son representativos de fenómenos físicos, tales como la convección, la difusión y fuentes de generación de movimiento, esto hace que las ecuaciones integrales sean convertidas en un sistema de ecuaciones algebraicas.
- Por último la solución de estas ecuaciones algebraicas con el uso de algún método iterativo

Los ingenieros y los científicos optan por adoptar este modelo debido a su similitud con el principio conservativo de las distintas cantidades físicas en las ecuaciones diferenciales.

#### Validación de los resultados

El desarrollo de súper computadoras ha impulsado el uso de métodos numéricos para la solución de diferentes fenómenos físicos modelados mediante ecuaciones diferenciales parciales (EDPs). La necesidad para resolver numéricamente problemas complejos se debe a que algunas veces no es posible obtener una solución analítica y tampoco se cuenta con el equipo necesario para realizar la prueba experimental. Cuando la experimentación se puede llevar a cabo, es posible validar el código numérico desarrollado a través de los resultados experimentales, abriendo con ello la posibilidad de realizar con mucha facilidad otras pruebas numéricas con solo variar algunos parámetros del problema, mientras que la variación de parámetros en una prueba experimental puede ser muy costosa e incluso tediosa. La implementación de una técnica numérica cuyos resultados aproximados puedan considerarse confiables, requiere se realice una validación, o en su defecto una verificación. La validación permite cuantificar si los resultados numéricos pueden representar la realidad, por ello los resultados numéricos tienen que ser comparados con resultados experimentales. Por otro lado, la verificación permite cuantificar la desviación que se tiene debido a la correcta solución del modelo matemático involucrado, los resultados numéricos serán comparados con alguna otra solución teórica existente en la literatura (Roache, 1998). La formulación de un problema simplificado, ha logrado que la investigación en la rama de análisis numéricos sea comparable a los métodos experimentales. Inclusive, los análisis numéricos presentan ciertas ventajas, como una simplicidad relativa y bajos costos, además de brindar la posibilidad de considerar con mayor exactitud los efectos físicos involucrados en los estudios. Los métodos numéricos permiten variar los parámetros y condiciones de frontera de un análisis y nos permiten obtener información detallada de los fenómenos físicos bajo estudio, esta información detallada en ocasiones no esta disponible en análisis bajo condiciones de laboratorio(Xamán, 2016).

### Algunas aplicaciones y disciplinas involucradas

CFD se está utilizando en variadas industrias como la alimenticia, aeronáutica, aeroespacial, automovilística, biomédica, eléctrica y electrónica, farmacéutica, química, metalúrgica, naval, nuclear, etc. Como ejemplo, en la industria del automóvil se puede simular el comportamiento aerodinámico del coche para mejorar el rendimiento.

CFD principalmente integra tres disciplinas (Fig 1): mecánica de fluidos, matemáticas y ciencias computacionales. La mecánica de fluidos que esencialmente representa el estudio de fluidos en reposo o en movimiento. Este movimiento de fluidos (dinámica de fluidos) se describe mediante ecuaciones matemáticas, usualmente ecuaciones diferenciales, las cuales gobiernan el proceso de interés y son comúnmente llamadas en CFD: ecuaciones gobernantes. Para resolver estas ecuaciones matemáticas, las ciencias computacionales mediante un compilador (C, Fortran, etc.) y un alto nivel en el lenguaje de programación, convierten las ecuaciones en programas de cómputo o paquetes de software. Finalmente, la aplicación de CFD puede extenderse a análisis conjugados que involucran otros procesos de transporte como son de calor y masa.

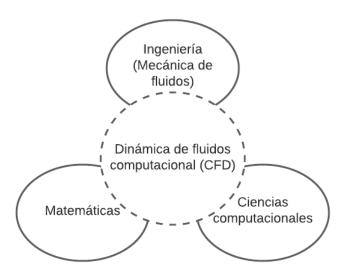


Figura 2.15: Las tres disciplinas en CFD(Xamán, 2016)

### 2.3.2. Estructura de un modelo CFD

Generalmente la secuencia y estructura de solución de un problema mediante CFD consta de 3 partes fundamentales en el siguiente orden: Pre-proceso, Solver y Post-proceso. En la figura 2.16 puede ser observada la estructura general de CFD.

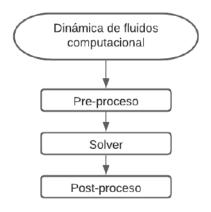


Figura 2.16: Estructura general de CFD

### Pre-proceso

Según Xamán (2016) en esta etapa se definen los parámetros de entrada al código. En el caso de un usuario de software comercial consiste en: (1) definir una geometría o dominio computacional, (2) generar una malla numérica, (3) especificar los fenómenos físicos que se pretenden simular, (4) especificar las propiedades físicas del dominio y (5) establecer las condiciones de frontera.

En este sentido se tienen que seguir los siguientes puntos en el Pre-proceso:

- Establecer un modelo físico: Un modelo físico se define como la representación gráfica que se hace de la realidad, este modelo sirve para definir el problema, convencionalmente de manera simple y con el propósito de estudiar detalladamente su comportamiento bajo ciertas circunstancias pre-establecidas.
- 2. Establecer un modelo matemático: Un modelo matemático está definido como la ecuación o conjunto de ecuaciones que describen lo que físicamente ocurre en determinada situación. En este punto, la persona tendrá que hacer uso de los modelos disponibles o desarrollar uno para el fenómeno que se intenta estudiar. Se establecen las condiciones de frontera y las respectivas condiciones iniciales. También, se requiere especificar las propiedades físicas del medio en cuestión.
- 3. Generar una malla numérica Una malla numérica es una discretización espacial de un modelo, el cual es dividido en volúmenes finitos. Las ecuaciones conservativas son resueltas en cada uno de estos volúmenes finitos, generando resultados en cada uno de sus centroides.

Solver(Procesamiento)

Esta etapa de CFD constituye la parte central del software, está asociada con el aspecto de solución

del problema, en el cual se resuelve el modelo matemático usando una computadora, aquí es donde se

desarrollan los algoritmos del software para resolver las ecuaciones diferenciales con análisis numérico.

El usuario de software ejecuta y espera los resultados, el tiempo de procesamiento es dependiente del

modelo que se resuelve, el cual puede tomar desde algunas horas, días o semanas. Para el desarrollo

de esta etapa se lleva a cabo en dos pasos: el proceso de discretización y la solución del sistema de

ecuaciones algebraicas con métodos iterativos.

1. Proceso de discretización: El concepto de discretización numérica se define como la sustitución

de la ecuación diferencial o ecuaciones diferenciales que describen el fenómeno de estudio, por

un conjunto de expresiones algebraicas usando alguna de las técnicas numéricas mencionadas

anteriormente, tal como el MDF, MVF o MEF. En particular, en el MVF el modelo matemático se

integra sobre todo el dominio de interés y los términos de derivadas se discretizan mediante apro-

ximaciones o esquemas numéricos para llegar a formar un sistema de ecuaciones algebraicas.

2. Solución del sistema de ecuaciones algebraicas en este punto el desarrollador tendrá que

implementar un método de inversión de matrices para el sistema de ecuaciones algebraicas re-

sultantes del proceso de discretización.

3. Post-proceso Esta etapa de CFD permite evaluar de manera cualitativa y cuantitativa los resulta-

dos de la simulación. En esta etapa se debe representar la malla numérica, mapas de contornos

de iso-lineas, campos de velocidad, etc.

Errores e incertidumbre

En la solución de las ecuaciones diferenciales parciales con CFD se tiene disponible una amplia varie-

dad de esquemas para la discretización de las derivadas y la correspondiente solución de sistema de

ecuaciones algebraicas resultante. En muchas ocasiones se cuestionan los errores de redondeo que

ocurren en las computadoras, por lo cual es importante identificar cuales son los tipos de errores e

incertidumbres a los que se está expuesto, definiendo los siguientes conceptos:

Error: es la deficiencia reconocible en un modelo de CFD que no es causada por la carencia de cono-

cimiento. Las causas o fuentes de error que caen bajo esta definición son:

1. Errores numéricos : estos pueden ser de tres tipos:

30

#### Errores de redondeo:

Raramente los cálculos numéricos se realizan en aritmética exacta. Esto significa que los números reales son representados en formato "de punto flotante" o "cifras significativas" y como resultado se generan errores debido al redondeo de los números reales.

#### Errores de discretización:

En la presencia de las derivadas de una ecuación diferencial parcial mediante una expresión algebraica, por ejemplo, el uso de una serie de Taylor, los términos de mas alto orden, son despreciados al truncar la serie y el error causados como resultado es llamado el error de discretización o de truncamiento. Este error representa la diferencia entre las soluciones exactas de las ecuaciones diferenciales y las correspondientes soluciones exactas de las ecuaciones algebraicas discretas. El concepto de error de discretización se asocia indirectamente con tres propiedades importantes en CFD: Consistencia, Estabilidad y Convergencia.

- Consistencia: en las aproximaciones usadas de un método numérico para discretizar las derivadas de las EDP's, se requiere que conforme el refinamiento del tamaño del paso llegue a ser extremadamente pequeño, la aproximación usada en el método numérico debe llegar a ser arbitrariamente cercana a las derivadas. Este requerimiento implica que el error de discretización debe tender a cero conforme el tamaño del paso se desvanece. Entonces, la aproximación del método numérico se dice ser consistente con la ecuación diferencial original(Xamán, 2016). La importancia de esta propiedad radica en mejorar la solución numérica mediante un ejercicio de consistencia o independencia de malla.
- Estabilidad: esta propiedad se relaciona con el control del proceso hacia la solución. En
  la solución numérica de las EDPs, diversos errores se introducen en casi cada etapa
  de los cálculos (por ejemplo, errores de discretización). El esquema de solución se dice
  ser estable, si los errores involucrados en los cálculos numéricos no son amplificados
  conforme el cálculo numérico progrese hacia la solución correcta de las EDPs.
- Convergencia: La solución numérica se dice ser convergente si la solución numérica se aproxima hacia valores fijos mientras la solución progresa. La tendencia hacia valores fijos debe presentarse conforme los pasos de tiempo y espacio tienden a cero. En caso contrario, se dice que la solución es divergente. Debe notarse que las propiedades de consistencia, estabilidad y convergencia están relacionadas unas con otras.
- Errores de criterio de convergencia Generalmente, la solución numérica de los problemas de flujos de fluidos, de transferencia de calor y transferencia de masa, requieren de un proceso iterativo; para detener o terminar el proceso iterativo de manera automática en un número k de iteraciones, se requiere de un criterio de paro o mejor conocido como criterio de convergencia. La solución final obtenida en la iteración k debe satisfacer las ecuaciones discretizadas del problema (Xamán, 2016). El criterio de convergencia debe establecerse de tal forma que la diferencia entre la solución de la iteración k y la solución de la iteración anterior (k-1), debe ser mínima. Durante el proceso iterativo esta diferencia debe decrecer; en otras palabras, la solución numérica debe ser convergente. Se pueden establecer diferentes criterios de convergencia (por ejemplo, que el residual de la variable incógnita φ sea menor

a  $\varepsilon$ , donde  $\varepsilon$  es un valor significativamente pequeño).

Aun cuando la solución final satisfaga las ecuaciones discretas y se cumpla el criterio de con-

vergencia, esto no garantiza que la solución del problema sea la correcta, ya que la variable

incógnita  $\varphi$  puede ser menor que  $\varepsilon$ .

Los errores de software y usuario pueden minimizarse o eliminarse gracias a un adecuado

entrenamiento y nivel de experiencia en CFD, este tipo de errores se asocia con el asegura-

miento de calidad en la ingeniería de software.

2. Errores de código fuente: Errores en el software

3. Errores de usuario

Se puede definir la incertidumbre como la deficiencia potencial en un modelo CFD causada por la

carencia de conocimiento. Las causas de incertidumbre son:

1. Incertidumbre debido a información requerida:

Limitada representación geométrica

Aproximación en condiciones de frontera

Propiedades de los materiales o del medio fluido

2. Incertidumbre debido al modelo matemático

2.3.3. Verificación y validación

Cuando se reconoce que los errores y la incertidumbre no se pueden evitar en CFD, se hace obligatorio

desarrollar métodos que sirvan para cuantificar el nivel de error en los resultados. Entonces, la siguiente

terminología obtenida gracias a OvercampfOberkampf and Trucano (2002) ahora ha sido ampliamente

aceptado por la comunidad:

¿Que es la verificación?

La verificación nos ayuda a determinar que la implementación de un modelo representa con pre-

cisión los modelos físicos. Roache (1998) acuñó la frase Resolver adecuadamente las ecuaciones".

Entonces en este proceso lo que se hace es cuantificar los errores.

32

### ¿Que es la validación?

La validación es el proceso que nos permite determinar el grado en que un modelo es una representación precisa del fenómeno físico. En este proceso se analiza la incertidumbre. Discutiendo la verificación y la validación.

### 2.3.4. Verificación

En el proceso de verificación se tienen que cuantificar los errores. Si se han ignorado los errores de código de la computadora y los del usuario, será necesario calcular el error de redondeo, el de convergencia y el de discretización.

#### Error de redondeo

El error de redondeo puede ser evaluado comparando los resultados obtenidos con CFD utilizando diferentes niveles de precisión de la máquina (por ejemplo, en precisión simple, 7 cifras significativas; o doble precisión, 16 cifras significativas).

### Error de convergencia iterativo

Se puede cuantificar investigando los efectos de variación de los criterios de convergencia para todos los residuales en , p. ej. la caída de presión o masa calculada, caudal, la fuerza de arrastre sobre un objeto en un flujo externo, la velocidad en los componentes coordenados. Las diferencias entre los valores de una cantidad que se fija objetivo en los criterios de convergencia.

### Error de discretización

El error de discretización se cuantifica mediante el refinamiento de la discretización espacial y la discretización temporal. En CFD se debe demostrar la mitigación del error. Los métodos utilizados para la estimación del error de discretización serán descritos a continuación.

Se supone que el análisis numérico satisface las siguientes condiciones Roache (1997):

- El campo de flujo es suave. Con esto se justifica el uso de series de Taylor.
- La convergencia debe ser monótona, esto quiere decir que si los residuales tienden a aumentar, se debe reducir cuando se pasa de una malla burda a una malla mas fina.
- El término principal de la expansión de la serie de Taylor domina el error de truncamiento.

Si se considera la solución numérica para un problema de flujo estable bajo condiciones dadas, se puede escribir la siguiente estimación del error  $E_U$  en una cantidad objetivo U como función de referencia del tamaño h de los volúmenes de control dentro de la malla:

$$E_U(h) = U_{exact} - U \approx Ch^P \tag{2.1}$$

Donde C es constante y P es el orden del esquema numérico

Para dos mallas con relación de refinamiento  $r=\frac{h_2}{h_1}$  y soluciones  $U_1$  y  $U_2$  se puede estimar el error de discretización escrito en términos de la diferencia  $U_2-U_1$  entre las dos soluciones:

$$E_{U,1} = \frac{U_2 - U_1}{1 - r^P} \tag{2.2}$$

$$E_{U,2} = r^P \left(\frac{U_2 - U_1}{1 - r^P}\right) \tag{2.3}$$

Donde  $E_{U,1}$  es el error en la solución gruesa y  $E_{U,2}$  es el error en la solución de la malla fina.

Roache también señaló que no debe darse por sentado que el el error de truncamiento en una solución numérica decaerá exactamente de acuerdo con el orden formal p de precisión del esquema numérico básico. Él dio varios ejemplos en los que sus investigaciones habían demostrado que este no era el caso debido a fallas aparentemente menores en el método numérico, y recomendó usar el orden observado de caída del error de truncamiento en tres refinados sucesivamente mallas. Para una relación de refinamiento constante r = h2 / h1 = h3 / h2 el orden observado T de la caída de la tasa de truncamiento se puede encontrar de la siguiente manera:

$$\tilde{p} = \ln\left(\frac{U_3 - U_2}{U_2 - U_1}\right) / \ln(r)$$
 (2.4)

Donde  $U_2-U_1$  es la diferencia entre las soluciones de las mallas gruesa y media y  $U_3-U_2$  es la diferencia entre las soluciones en la malla fina y media.

Se pueden utilizar técnicas de refinamiento de cuadrícula similares para estimar la discretización error debido al tamaño del paso de tiempo finito. Roache (1997) también dio una estimación de error para soluciones transitorias totalmente implícitas basadas en una solución explícita adicional utilizando el tamaño del paso de tiempo original, que es mucho más económico que el tiempo refinamiento escalonado. (Roache, 1997) señaló que las estimaciones de las ecuaciones (2.2,2.3) son aproximadas y no constituyen límites al error de discretización. Él propuso un llamado indicador de convergencia de la red (GCI) para cuantificar el error numérico en una solución CFD:

$$GCI_U = F_S E_U \tag{2.5}$$

Donde  $F_S$  es el factor de seguridad, se recomienda  $F_S = 3$ 

En códigos con defectos, el valor observado de la tasa de reducción del error de truncamiento T es siempre menor que el orden formal de precisión p del subyacente esquemas numéricos. En estudios de alta calidad que utilizan dos o más niveles de refinamiento, se recomienda que las fórmulas de error de discretización (2,3) debe evaluarse utilizando el valor observado T de la ecuación (4) y utilizado junto con un factor de seguridad reducido FS = 1,25 en convergencia de red fórmula de índice (10,8). Finalmente, se observa que los métodos anteriores simplemente estiman el valor numérico error del código tal como está y no pruebe si el código en sí es preciso refleja el modelo matemático del flujo previsto por el diseñador de código. Oberkampf and Trucano (2002), por lo tanto, argumentaron que un programa completo de las actividades de verificación siempre debe incluir una etapa de comparación de resultados CFD con puntos de referencia fiables, es decir, de alta precisión soluciones de problemas de flujo (generalmente simples), como soluciones analíticas o soluciones numéricas de alta resolución.

### 2.3.5. Validación

En la validación se debe cuantificar la incertidumbre de entrada y la incertidumbre con la que cuenta el modelo físico.

### Incertidumbre de entrada

La incertidumbre de entrada puede ser estimada con un análisis de incertidumbre. Esto implica algunas ejecuciones de prueba del modelo CFD con distintos valores de datos de entrada basados en su valor medio.

Las variaciones que se observan en los residuales pueden ser utilizados para crear límites superiores e inferiores para su rango esperado y, por lo tanto, son una medida útil de la incertidumbre de entrada.

Los efectos de la variación de cada uno de los elementos de los datos de entrada se estudian individualmente. El análisis de incertidumbre, por otro lado, considera interacciones causadas por variaciones de diferentes datos de entrada y hace uso de técnicas de Monte Carlo en el diseño del modelo CFD. (Oberkampf and Trucano, 2002) afirmaron que la evaluación de la incertidumbre del modelado físico requiere la comparación de los resultados obtenidos con CFD y los resultados obtenidos de manera experimental. Ellos destacaron que la validación solo es posible cuando se tienen buenas estimaciones de (i) los errores numéricos, (ii) la incertidumbre de entrada y (iii) la incertidumbre con la que cuentan los datos experimentales utilizados para comparar. Por lo tanto, se podrá validar un modelo CFD comparando la simulación con los datos experimentales. Sin embargo, la forma en que dicha comparación debería que mejor se lleve a cabo sigue siendo un tema de discusión. La forma más común de comparar una simulación es dibujar un gráfico de un residual o magnitud física en el eje y y un parámetro de flujo, posición espacial o temporal en el eje x. Si los valores parecen lo suficientemente pequeños como para que el modelo CFD se considere valido, entonces se dice realizada la validación. Este último juicio es bastante subjetivo, y Coleman y Stern (1997) propusieron una base más rigurosa para las comparaciones, basándose en práctica de estimar la incertidumbre en resultados experimentales que involucran varios fuentes independientes de incertidumbre. Sugirieron que los errores deberían combinarse estadísticamente calculando la suma de cuadrados de las estimaciones de errores numéricos, incertidumbre de entrada y experimental para formar una estimación de la incertidumbre de la validación. Una simulación se considera validada si la diferencia entre los datos experimentales y los resultados obtenidos con CFD es menor que la incertidumbre de validación. La confianza del modelo CFD esta en función de la magnitud de la incertidumbre de validación. Sin embargo con este enfoque, se torna sencillo validar un modelo CFD con resultados experimentales que tienen incertidumbres altas, entonces Overkampf at. al. sugieren una métrica de validación que sea alternativa, la cual incluye una contribución de análisis estadístico, lo cual contribuye a disminuir la varianza de los datos en un experimento. Por tanto, se tendrán niveles de confianza en un código CFD validado si:

- 1. La diferencia entre los resultados de un modelado CFD y los resultados experimentales son pequeños.
- 2. Si la incertidumbre de los experimentos es pequeña.

Ambos métodos proporcionan una mayor base que es objetiva para las comparaciones, pero se dirige a los lectores interesados estar atentos a nuevos desarrollos, ya que este tema aún se encuentra en sus inicios etapas.

### 2.4. ECUACIONES GOBERNANTES EN DINÁMICA DE FLUIDOS

# 2.4.1. Introducción a las ecuaciones de dinámica de fluidos, transferencia de calor y masa

Para representar un modelo físico de interés, se requiere de un modelo matemático, el cual tiene su grado de complejidad dependiente del grado de complejidad del fenómeno físico bajo estudio. En general para representar la dinámica de fluidos, la transferencia de calor y de especies químicas se usan las ecuaciones de continuidad, momentum, energía y transporte de masa. Todas estas ecuaciones cumplen con un principio de conservación, y por lo tanto pueden ser expresadas de forma conservativa.

### 2.4.2. Ecuaciones conservativas

Estas ecuaciones de conservativas de flujo de fluidos, transferencia de calor y masa definidas a continuación, se basan en una formulación Euleriana, en la cual se discretiza un dominio en volúmenes de control, a través del cual pasa un fluido, y se aplican los principios de conservativos de masa, momentum y energía Xamán (2016).

Entonces, las ecuaciones que gobiernan el flujo de algún fluido son representativas de principios matemáticos de leyes conservativas las cuales son:

- La ley de la conservación de la masa.
- La segunda ley de Newton, la cual nos dice que la tasa de cambio de movimiento en una partícula esta dada por las fuerzas que actúan sobre ella.
- La primera ley de la termodinámica, la cual nos dice que la tasa de cambio de energía esta dada por la suma del calor en el sistema y el trabajo que se realiza sobre la partícula.

Adicionalmente, las ecuaciones resultantes, se relacionan con las expresiones empíricas:

Ley de Fourier	Relaciona calor y temperatura			
Ley de Fick	Relaciona el transporte de masa con la especie química o concentración			
Ley de viscosidad de Newton	Relaciona los esfuerzos con las velocidades			
Ecuaciones de estado	Relaciona la densidad con presión y temperatura			

Cuadro 2.2: Relaciones con expresiones empíricas

Generalmente las ecuaciones conservativas son representadas matemáticamente en términos de ecuaciones diferenciales. Cada ecuación cuenta con un parámetro físico como su variable dependiente e implica que debe existir un balance entre los factores que influyen en dicha variable. Estas variables dependientes usualmente son la velocidad, la presión, la temperatura y la concentración de masa. Sin embargo, es importante mencionar que para el análisis de este trabajo no se consideró la concentración de especies químicas, además, que por utilizar un análisis de transferencia de calor conjugado, se debe analizar un modelo matemático para una región fluida y una sólida.

### 2.5. MODELO PARA LA REGIÓN FLUIDA

#### 2.5.1. Ecuación de conservación de masa

El principio de conservación de masa es expresado de la siguiente manera: El flujo neto másico que sale por un volumen de control (VC) debe ser igual al incremento en el tiempo de la masa en el interior del VC. Lo que resulta se conoce como ecuación de continuidad, la cual es representada en la forma tensorial:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \qquad para \quad i = x, y, z$$
 (2.6)

Donde se representa la variación de la densidad con respecto al tiempo en el primer término y la masa que sale por las fronteras del VC se representa en el segundo término.

Debido a que en este trabajo se realizó un análisis estacionario se puede quitar el término temporal, por lo tanto la ecuación de conservación de la masa puede ser expresada de la siguiente forma para nuestro modelo:

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0$$
 (2.7)

### 2.5.2. Ecuación de conservación de momentum

La segunda ley de Newton nos dice que una partícula que se se mueve con un fluido es acelerada por las fuerzas que actúan sobre el, la ecuación coservativa de momentum es la representación matemática de esta ley.

La forma general de las ecuaciones de conservación de momentum puede ser escrita en forma tenso-

rial como:

$$\frac{\partial \left(\rho u_{i}\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho u_{i} u_{j}\right)}{\partial x_{j}} = -\frac{\partial P}{\partial x_{i}} + \frac{\partial \left(\tau_{ij}\right)}{\partial x_{j}} + F_{i} \quad para \ cada \ i = x, y, z \ y \ toda \ j = x, y, z$$
 (2.8)

Donde la velocidad de cambio de movimiento es representada en el primer término de la ecuación, el segundo representa el cambio de movimiento por convección, el tercero es referente a las fuerzas de presión que actúan sobre el VC, el cuarto hace referencia a la ganancia de movimiento por transporte viscoso y el último término representa la fuerza de gravedad centrífuga que actúa sobre el VC. A finales del siglo XVII, Isaac Newton demostró que en ciertos fluidos como el aire, las llamadas tensiones viscosas son proporcionales a los diferenciales de velocidad, estos son conocidos como fluidos Newtonianos. La relación entre el tensor de esfuerzos viscosos y los gradientes de velocidad es conocida como la ley de viscosidad de Newton la cual se muestra en forma tensorial:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \zeta \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \qquad \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & si & i = j \\ 0 & si & i \neq j \end{cases}$$
 (2.9)

Donde el primer término indica los esfuerzos tangenciales originados por los gradientes de velocidad de acuerdo al primer coeficiente de viscosidad  $\mu$  (Relaciona los esfuerzos a las deformaciones lineales), el segundo término solo afecta a los esfuerzos normales respecto al coeficiente de viscosidad( $\zeta$ ) (Relaciona los esfuerzos a las deformaciones volumétricas), el cual se define como:

$$\zeta = k - \frac{2}{3}\mu\tag{2.10}$$

Donde k es conocida como la velocidad de expansión, la cual es la responsable de incluir esfuerzos normales en el fluido causadas por variaciones en el volumen. Sin embargo, esta viscosidad es considerada despreciable en muchas ocasiones.

Suponiendo k=0 la ecuación de cantidad de movimiento es reducida a:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \qquad \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & si & i = j \\ 0 & si & i \neq j \end{cases}$$
 (2.11)

Sustituyendo (eq 10) en (eq 7) se obtiene la expresión en notación tensorial de cantidad de movimiento para fluidos Newtonianos:

$$\frac{\partial \left(\rho u_{i}\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho u_{i} u_{j}\right)}{\partial x_{j}} = -\frac{\partial P}{\partial x_{i}} + \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_{k}}{\partial x_{k}} \delta_{y} \right] + F_{i}$$
(2.12)

Por lo tanto para las tres componentes se puede escribir:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \cdot u)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \cdot u)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial z} + F_x \tag{2.13}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \cdot v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \cdot v)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zy})}{\partial z} + F_y$$
 (2.14)

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \cdot w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \cdot w)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \cdot w)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial(\tau_{xi})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zz})}{\partial z} + F_z$$
 (2.15)

Se puede hacer un arreglo similar para las ecuaciones de cantidad de movimiento. Con esta simplificación en términos de esfuerzos viscosos, la expresión en notación tensorial de cantidad de movimiento para fluidos Newtonianos puede ser escrita:

$$\frac{\partial \left(\rho u_{i}\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho u_{i} u_{j}\right)}{\partial x_{j}} = -\frac{\partial P}{\partial x_{i}} + \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[\mu \left(\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}}\right)\right] + F_{i} + s_{i}$$
(2.16)

Donde:

$$s_{i} = \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left( -\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_{k}}{\partial x_{k}} \delta_{ij} \right)$$
 (2.17)

Históricamente las tres ecuaciones anteriores para representar la cantidad de movimiento para flujos viscosos han sido consideradas como las ecuaciones de Navier-Stokes. No obstante en la literatura moderna de CFD se refieren a las ecuaciones de Navier-Stokes como el sistema de ecuaciones para flujos viscosos, continuidad, cantidad de movimiento y energía.(Xamán, 2016).

Entonces, para este proyecto se realiza un análisis estacionario, por este motivo podemos descartar el termino temporal de las ecuaciones, además de que no tenemos términos fuente en las direcciones "x" y "z", únicamente se cuenta con un término fuente en la dirección y, esto debido a que en convección natural la fuerza motriz básica es el campo de temperaturas para problemas de transferencia de calor, entonces, esta variación de temperaturas ocasiona que las densidades varíen y en presencia del campo gravitacional se origina un movimiento del fluido. Entonces para este trabajo se puede definir alas ecuaciones de conservación de momentum de la siguiente manera:

$$\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \cdot u)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \cdot u)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \tag{2.18}$$

$$\frac{\partial(\rho u \cdot v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \cdot v)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) + g\left(\rho - \rho_0\right) \tag{2.19}$$

$$\frac{\partial(\rho u \cdot w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \cdot w)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \tag{2.20}$$

Para alcanzar la convergencia en el modelo se uso la aproximación de Boussinesq.

### 2.5.3. Aproximación de Boussinesq

La variación de la densidad es un análisis estrictamente obligatorio al tratar las ecuaciones para flujos compresibles, pero es posible realizar una serie de simplificaciones. Sin embargo cuando se analiza convección natural la variación que tiene la densidad ocasionada por la temperatura es de suma importancia y conviene modificar la ecuación de movimiento para tener en cuenta automáticamente los efectos de flotación. Si se divide la presión local en tres términos:

$$P = P_{ref} + \int_{h_{ref}}^{h} \rho_{\infty} g dz + P_d \tag{2.21}$$

Donde:

 $P_{ref} =$ Presión de referencia

 $\int_{h_{ref}}^{h}
ho_{\infty}gdz=$  Presión estática

 $P_d =$ Presión dinámica

 $ho_{\infty} =$  Densidad de referencia a la temperatura de referencia  $T_{\infty}$ 

 $h_{ref}=$  Altura de referencia.

Si se sustituye la eq(2.21) en la eq(2.16), la ecuación de cantidad de movimiento resultante sería similar a la eq(2.16) con la excepción de que el gradiente de presión será para la presión dinámica y tendrá un término adicional  $\rho_{\infty}g$  que representa a la presión estática. La diferencia entre este término y la fuerza gravitacional,  $(\rho_{\infty-\rho})g$  es la que origina la aparición del flujo. Por otro lado, para relacionar las densidades con la temperatura y la presión la Hipótesis de Boussinesq establece que la densidad no varía con la presión, entonces por una serie de Taylor se puede expresar:

$$\rho_{\infty} = \rho + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right) (T_{\infty} - T) + \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial^2 \rho}{\partial T^2}\right) (T_{\infty} - T)^2 + \cdots$$
 (2.22)

Donde se define el coeficiente de expansión térmica como:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \tag{2.23}$$

Si se desprecian los términos de alto orden de la serie de Taylor se obtiene:

$$(\rho_m - -\rho) = \beta \left( T - T_m \right) \tag{2.24}$$

Entonces, la hipótesis de Boussinesq considera que la densidad es constante en la ecuación de momentum, y y solamente considera la variación de la densidad en el término llamado fuerza de cuerpo, sustituyendo la fuerza gravitacional,  $\rho g$ , por el término  $\rho g \beta (T-T_m)$  en la dirección correspondiente y la presión local por la presión dinámica (las ecuaciones pueden observarse como las correspondientes a un flujo incompresible).

La hipótesis de Boussinesq será valida siempre que la variación de la densidad con la presión sea despreciable y que las diferencias de la densidad y temperaturas sean pequeñas (Xamán, 2016).

### 2.5.4. Ecuación de conservación de la energía

La primera ley de la termodinámica rige la ecuación de la energía, esta ley nos dice que el cambio de energía en una partícula esta dado por la suma del calor que se añade al elemento y la cantidad de trabajo que se realiza sobre dicha partícula. En otras palabras se puede decir que la salida de energía (interna y cinética), mas el incremento en el tiempo de la de la misma, debe ser igual al trabajo sobre el VC. Las fuerzas que actúan en las superficies, también son las fuerzas viscosas y la presión mas el flujo de calor que entra al VC, y se le añade la energía que es aportada o retirada al VC(Esto es el término fuente dado por la absorción o emisión de calor y generalmente se expresa como  $S_E$ ). La energía del fluido es definida como la suma de la energía interna  $(e_{int})$ , la energía cinética  $(e_{cin}=\frac{1}{2}(u^2+v^2+w^2))$  y la energía potencial gravitacional. Esta energía potencial se incluirá en la fuerza gravitatoria como una fuerza de cuerpo. Entonces , la ecuación para la energía específica  $(E=e_{int}+e_{cin})$  del fluido se puede escribir como:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial\left(\rho E u_{j}\right)}{\partial x_{j}} - -\frac{\partial\left(P u_{j}\right)}{\partial x_{j}} + \frac{\partial}{\partial x_{j}}\left[\tau_{jx}u\right] + \frac{\partial}{\partial x_{j}}\left[\tau_{jy}v\right] + \frac{\partial}{\partial x_{j}}\left[\tau_{jz}w\right] + \frac{\partial}{\partial x_{j}}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x_{j}}\right) + s_{E} + \sum_{i=1}^{3} F_{i}u_{i}$$
(2.25)

Por conveniencia aunque la ecuación (2.25) es la ecuación de energía de un fluido es útil contar con una ecuación de la energía interna  $(e_{int})$  o temperatura (T) (Ecuación de la conservación de energía térmica) extrayendo los cambios de energía cinética. La parte de la ecuación de energía (2.25) atribuible a la energía cinética, se obtiene al multiplicar la eqn. de cantidad de movimiento-(2.13) por la componente de velocidad u, la eqn. de cantidad de movimiento-(2.14) por la componente de velocidad v, y la eqn. de cantidad de movimiento-(2.15) por la componente de velocidad w y sumar los resultados de las tres ecuaciones resultantes, el cual está dado como (ecuación de conservación de energía mecánica):

$$\frac{\partial \left(\rho e_{cin}\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho e_{cin} u_j\right)}{\partial x_j} = -u_j \frac{\partial (P)}{\partial x_j} + u \frac{\partial \left(\tau_{jx}\right)}{\partial x_j} + v \frac{\partial \left(\tau_{jy}\right)}{\partial x_j} + w \frac{\partial \left(\tau_{jz}\right)}{\partial x_j} + \sum_{i=1}^{3} F_i u_i \tag{2.26}$$

De acuerdo a la definición de energía específica ( $E = e_{cin} + e_{int}$ ) resaltando la Ec. (2.26) de la Ec. (2.25), se obtiene la ecuación de conservación de la energía interna ( $e_{int}$ ):

$$\frac{\partial \left(\rho e_{\rm int}\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho e_{\rm int} u_j\right)}{\partial x_j} - -P \frac{\partial \left(u_j\right)}{\partial x_j} + \tau_{jx} \frac{\partial \left(u\right)}{\partial x_j} + \tau_{jy} \frac{\partial \left(v\right)}{\partial x_j} + \tau_{jz} \frac{\partial \left(w\right)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}\right) + s_E \qquad (2.27)$$

Todos los efectos debidos a efectos viscosos en la ecuación de energía interna son compactados en la función de disipación ( $\phi$ ) como:

$$\Phi = \tau_{jx} \frac{\partial(u)}{\partial x_j} + \tau_{jy} \frac{\partial(v)}{\partial x_j} + \tau_{jz} \frac{\partial(w)}{\partial x_j}$$
(2.28)

Para un flujo incompresible, la energía interna puede ser escrita de la siguiente manera:

$$e_{int} = C_p T (2.29)$$

Donde  $C_p$  es el calor específico cuando se cuenta con presión constante.

Si se sustituye las Ecs. (2.28) y (2.29) en la ec. (2.27) se obtiene la ecuación de conservación de energía térmica en términos de la temperatura:

$$\frac{\partial \left(\rho C_p T\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho C_p T u_j\right)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}\right) + \Phi + s_E \tag{2.30}$$

Recordando que el análisis de este trabajo es un análisis estacionario, se debe omitir el término temporal, además de que en la región aérea no se tiene un término de generación de energía, por tanto, para nuestro modelo, se puede expresar la ecuación de conservación de la energía como:

$$\frac{\partial(\rho uT)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vT)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wT)}{\partial z} = \frac{k}{cp} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$
 (2.31)

Para llegar a las ecuaciones que se utilizaron en nuestro modelo y fueron descritas con anterioridad fueron simplificadas con las siguientes hipótesis:

#### 1. Flujo incompresible:

Cuando se habla de incompresibilidad no necesariamente hablamos de que la densidad de un fluido sea constante, a lo que se refiere es a que la densidad pasa a ser función únicamente de la temperatura y que cuando trabajamos con un flujo compresible la densidad es dependiente de la temperatura, la presión y la concentración.

#### Aproximación de Boussinesq:

Esta hipótesis puede ser observada en la descripción de las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento, sección (2.5.3).

- Fluido radiativamente no participante:
   Se dice que el fluido es un medio transparente a la radiación, es decir que no absorbe ni dispersa energía térmica.
- 4. Mezcla homogénea: Se considera que la mezcla total de un fluido compuesto por dos especies químicas o más, se lleva a cabo de manera homogénea y por lo tanto, no existe generación o reacción química por alguna de las componentes de la mezcla total( $S_K=0$ ).
- 5. Análisis estacionario: Las características del sistema no varían con el tiempo.

### 2.6. ECUACIÓN GENERAL DE LA CONVECCIÓN-DIFUSIÓN

Las ecuaciones gobernantes de los fenómenos físicos presentados con anterioridad, se pueden expresar en una única expresión, a esta expresión se le llama ecuación general conservativa de convección-difusión. Entonces para obtener la ecuación generalizada de conservación para la variable de interés  $\phi$ ; que está definida en un volumen de control de dimensiones dxdydz=dV Fig (2.17), se aplica el principio de conservación sobre dicho VC esto es:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} Incrementode\phi \\ respectoaltiempo"t" \end{pmatrix}}_{i} = \underbrace{\begin{pmatrix} Flujonetode\phi \\ queentraenel \\ VCporlassuperficies \end{pmatrix}}_{2} + \underbrace{\begin{pmatrix} Generación \\ netade\phi \end{pmatrix}}_{3}$$
 (2.32)

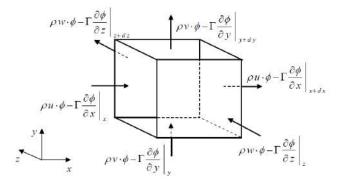


Figura 2.17: Volumen de control para la conservación convectiva-difusiva de  $\phi$ 

Cada uno de los tres términos de la Ec(2.32) se pueden expresar matemáticamente. Entonces en el primer término, el incremento temporal de  $\phi$  es:

$$\underbrace{\begin{pmatrix}
Incremento de \phi \\
respecto al tiempo
\end{pmatrix}}_{1} = [(\rho\phi)_{t+dt} - (\rho\phi)_{t}] dV \tag{2.33}$$

Donde  $\rho$  es la densidad.

Para el término 2 se consideran dos mecanismos fundamentales, responsables de la generación del flujo en el VC: (1) La difusión originada a nivel molecular, (2) la convección, la cual es asociada al movimiento del fluido a nivel microscópico, esto es:

$$\underbrace{\begin{pmatrix}
Flujo neto de\phi \\
que entra en el \\
VC por las superficies
\end{pmatrix}}_{2} = \left[\left(\rho u \cdot \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_{x} - \left(\rho u \cdot \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_{x+dx}\right] dy dz dt + (2.34)$$

$$\left[ \left( \rho v \cdot \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_y - \left( \rho v \cdot \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_{y+dy} \right] dx dz dt +$$

$$\left[\underbrace{\frac{\rho w}{\underset{convección}{\text{enverción}}} \cdot \phi - \underbrace{\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z}}_{\underset{difusión}{\text{usión}}}\right)_z - \left(\rho w \cdot \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z}\right)_{z+dz}\right] dx dy dt$$

Donde  $\Gamma$  es el coeficiente de transporte difusivo y u,v,w son las componentes de velocidad en cada una de las direcciones del sistema coordenado rectangular.

El término 3 representa la generación de  $\phi$  en el VC, normalmente se le denomina término fuente.

$$\left(\begin{array}{c}
Generación \\
neta \ de \ \phi
\end{array}\right) = SdVdt$$
(2.35)

Donde S representa la generación de  $\phi$  por unidad de volumen.

Al sustituir las Ecs.(2.33)-(2.35) en la Ec.(2.32) y dividir la ecuación resultado por dV dt se llega a:

$$\frac{(\rho\phi)_{t+dt} - (\rho\phi)_{t}}{dt} = \frac{\left(\rho u \cdot \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_{x} - \left(\rho u \cdot \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_{x+dx} + \left(\rho v \cdot \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y}\right)_{y} - \left(\rho v \cdot \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y}\right)_{y+dy} + \left(\rho w \cdot \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z}\right)_{z} - \left(\rho w \cdot \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z}\right)_{z+dz} + S$$

$$\frac{\left(\rho w \cdot \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z}\right)_{z} - \left(\rho w \cdot \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z}\right)_{z+dz} + S}{dz} + S$$
(2.36)

Tomando los límites cuando  $dx, dy, dz \to 0$  se obtiene en forma diferencial la ecuación generalizada de conservación (Ecuación general conservativa de convección - difusión) para la variable  $\phi$  esto es:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \cdot \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \cdot \phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \cdot \phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z}\right) + S$$
 (2.37)

o también de forma indícial:

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{\text{temporal}} + \underbrace{\frac{\partial(\rho u_j\phi)}{\partial x_j}}_{\text{convectivo}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_j}\right)}_{\text{difusivo}} + \underbrace{S}_{\text{fuente}} \tag{2.38}$$

La Ec.(2.38), esta compuesta de cuatro términos, el primero representa la variación de  $\phi$  en el VC respecto al tiempo(término transitorio); el segundo es representativo del término convectivo, es decir el flujo neto de  $\phi$  causado por la velocidad del fluido; el tercero se refiere al término difusivo, es decir el flujo de  $\phi$  debido a las corrientes ocurridas a nivel molecular y el ultimo hace referencia al término fuente, es decir la generación del  $\phi$  en el VC.

Las ecuaciones de conservativas de masa, cantidad de movimiento, energía y especies químicas presentadas en la tabla de la forma conservativa de las ecuaciones gobernantes, pueden ser expresadas en términos generales de  $\phi$ ,  $\Gamma$  y S. La tabla(2.3) muestra las equivalencias de estos términos.

Entonces la tarea es resolver numéricamente las ecuaciones diferenciales de flujo de fluidos, transferencia de calor y concentración de especies, es aprender a resolver la ecuación general conservativa de convección - difusión.

En la siguiente tabla se muestran las equivalencias de la formulación general de la convección difusión.

Ecuación conservativa	$\phi$	Γ	S	Ec.
Masa	1	0	0	2.6
Momentum- x	u	$\mu$	$-\frac{\partial P}{\partial x} + F_x + s_x$	2.13
Momentum- y	v	$\mu$	$-\frac{\partial P}{\partial y} + F_y + s_y$	2.14
Momentum- z	w	$\mu$	$-\frac{\partial P}{\partial z} + F_z + s_z$	2.15
Energía interna	$e_{int}$	λ	$-P\frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \Phi + s_E$	2.29

Cuadro 2.3: Equivalencias de la formulación general de la convección-difusión(Xamán, 2016)

En este trabajo se está realizando un análisis estacionario, es decir que no se está considerando los cambios con respecto al tiempo, además de saber que si se analiza la ecuación general de convección difusión no se tendrán términos fuente en ninguna ecuación conservativa, únicamente en la cantidad de movimiento en el eje vertical tenemos la fuerza dada por la flotabilidad del medio causado por en diferencial de densidades, la presión atmosférica y las fuerza gravitatoria, entonces la ecuación general conservativa de la convección difusión para nuestro modelo se puede resumir en forma índicial de la

siguiente forma:

$$\frac{\partial \left(\rho u_{j} \phi\right)}{\partial x_{j}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_{j}} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_{j}}\right)}_{\text{diffusivo}} + \underbrace{S}_{\text{fuente(Solo en la cantidad de movimiento en el eje vertical)}}$$
(2.39)

### 2.7. Esquemas numéricos

Se requiere discretizar los términos convectivos para la variable  $\phi$  para completar la solución numérica de la ecuación general de la conservación, la discretización del término convectivo en la ecuación de convección difusión nos lleva a problemas donde la participación del fluido tiene una participación importante y los efectos de la convección deben ser considerados. Para la discretización de los términos convectivos existen diferentes tipos de aproximaciones que en general se pueden clasificar en esquemas de alto y bajo orden figura (2.18).

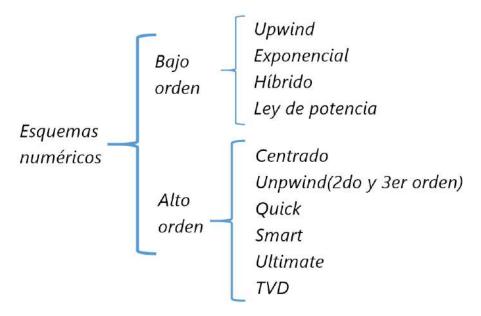


Figura 2.18: Clasificación de los esquemas numéricos(Xamán, 2016)

### 2.7.1. Esquema centrado

La aproximación del esquema centrado se usa para calcular los valores de la variable  $\phi$  en las fronteras del VC como una medida aritmética o una aproximación lineal, entonces para resolver un problema de convección-difusión será necesario escribir las ecuaciones discretas para todos los nodos de la malla que representan el dominio físico.

### 2.7.2. Esquema Upwind

Debido a que la aproximación del esquema centrado no considera la dirección del flujo, para los casos altamente convectivos es necesario idear una manera que tome en cuenta esta dirección. Aunque el esquema es de primer orden, este esquema propone una mejor aproximación para la variable en la interfase al tomar en cuenta la dirección de la corriente principal del flujo. Por otro lado la aproximación del esquema Upwind resulta razonable solo en problemas altamente convectivos o convección dominante.

### 2.7.3. Esquema híbrido

El esquema híbrido fue desarrollado por Spalding en el año 1972 y es una combinación del esquema Upwind y centrado. Este esquema considera una formulación con base al número de Peclet local, introduciendo aproximaciones lineales por tramos para evitar el cálculo de funciones exponenciales. El esquema híbrido es similar a una esquema centrado para bajos números de Peclet para los términos convectivos, pero cuando el número de Peclet es mayor a dos es similar a utilizar el esquema Upwind, donde el término convectivo es el de mayor significado y el término difusivo es cero.

### 2.7.4. Esquema de ley de potencia

La forma del esquema de ley de potencia fue desarrollada por Pantakar en 1980, esta formulación tiene vetajas de exactitud, comparado con el esquema centrado e híbrido. Para esta formulación, en lugar de usar una aproximación lineal por tramos para representar los datos exactos, se puede utilizar una aproximación por ley de potencia que permita conseguir resultados cercanos a los del esquema exacto o exponencial a un costo computacional más reducido.

### 2.7.5. Esquemas numéricos de alto orden

Debido a que los esquemas numéricos se clasifican de acuerdo al número de nodos para realizar las aproximaciones, esto define en cierta manera el orden de truncamiento de la aproximación.

La popularidad de los esquemas de bajo orden está basada en una simplicidad del algoritmo, rápida convergencia y obtención de resultados relativamente satisfactorios. La base principal son problemas idealizados, en estado permanente en una dirección con propiedades físicas constantes y sin un término fuente.

Aunque los esquemas de bajo orden poseen características de estabilidad y rápida convergencia, estos esquemas en muchas ocasiones carece de exactitud, principalmente en problemas que involucran

flujos oblicuos o recircula-torios. Para sobrellevar esta problemática diversos autores han desarrollado esquemas de alto orden, cuyas interpolaciones son más complejas y con resultados más exactos que las interpolaciones con esquemas de bajo orden.

Uno de los primeros esquemas de alto orden y de lo más conocidos, fue propuesto por Leonard (1979), el esquema fue llamado QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics). Leonard fue pionero en el desarrollo de esquemas de alto orden y propuso una serie de esquemas para sobrellevar comportamientos del movimiento de fluido con cambios bruscos de la variable (Leonard, 1979). Sin embargo, no fue hasta en 1992 cuando Hayase et al., reformularon el esquema QUICK bajo el concepto de la "Corrección Diferida"; la nueva formulación garantiza que se cumplan las cuatro reglas básicas de Patankar, las cuales serán definidas en el Capítulo 3. El uso de la implementación de esquemas de alto orden mediante la corrección diferida es usado ampliamente en CFD para evitar inestabilidades numéricas(Xamán, 2016).

### 2.8. ALGORITMOS DE ACOPLE PRESIÓN-VELOCIDAD

En la dinámica de fluidos se ven involucradas la presión y la velocidad, los modelos matemáticos correspondientes para estas variables son las ecuaciones conservativas de masa y momentum. Cada una de estas ecuaciones puede ser presentada por la ecuación conservativa de la convección difusión, de lo cual se puede destacar que las ecuaciones de momentum y continuidad están fuertemente acopladas debido a las componentes de velocidad que aparecen en ellas, lo cual forma un sistema de ecuaciones diferenciales parciales. La parte compleja de esto es estimar el rol de la presión en las ecuaciones de cantidad de movimiento ya que no existe una ecuación de transporte para la presión. Por lo tanto, la principal problemática en la solución numérica de la dinámica de fluidos reside en resolver el rol que desempeña el gradiente de presión en este sistema de ecuaciones diferenciales parciales.

### 2.8.1. Algoritmo SIMPLE

El método semi implícito para ecuaciones acopladas con la presión, (SIMPLE, por sus siglas en inglés) tiene mas de cuatro décadas de existencia, es eficiente y estable, trata fluidos compresibles como incompresibles, la aplicación de este algoritmo ha sido muy utilizado para modelar todo tipo de flujos y geometrías.

Básicamente, el método resuelve las ecuaciones de conservación, utilizando una formulación en variables primarias sobre un dominio computacional en el cual se encuentran mallas desplazadas.

La estructura del algoritmo SIMPLE está compuesta de dos partes; la suposición de un campo de presiones que facilita la obtención de una distribución de velocidades y la correlación de estas distribuciones cumpliendo con la ecuación de continuidad de manera iterativa hasta llegar a una solución correcta. Este método comúnmente utilizado al resolver problemas de CFD, para lograr la convergencia,

supone una presión inicial, la cual se actualiza con factores de corrección aplicados al vector velocidad, pero puede generar errores en la corrección de presión.

### 2.8.2. Algoritmo SIMPLER

El método semi implícito para ecuaciones acopladas con la presión mejorado (SIMPLER, por sus siglas en inglés) fue el primer método para mejorar el algoritmo SIMPLE. El algoritmo es altamente efectivo para calcular el campo de presión correctamente y tiene ventajas significativas cuando se resuelven las ecuaciones de momentum; aunque el número de cálculos involucrados en el algoritmo SIMPLER es aproximadamente 30 % más grande que el método SIMPLE, la velocidad de convergencia se reduce en un tiempo de computo de 30 % a 50 % (Anderson et al., 1984). En este algoritmo se usa una corrección de presión únicamente para calcular las correcciones de velocidades y se resuelve una ecuación discreta para la presión para obtener el campo de presión correcto. Además ningún término se omite al derivar la ecuación de presión efectiva. Estos cambios se realizaron con la idea de sobrellevar la inconsistencia entre el valor inicial del campo de presión y el campo de velocidad inicial.

### 2.8.3. Algoritmo SIMPLEC

El método semi implícito para ecuaciones acopladas con la presión consistente (SIMPLEC, por sus siglas en inglés) es una modificación del SIMPLE, en el este se usa exactamente el mismo concepto que el algoritmo SIMPLE, solo que se considera la relación para la corrección de velocidades y la corrección de presión. Con esto evitamos elegir un valor óptimo de el factor de relajación de la presión y por lo tanto, se mejora el proceso iterativo. Este método tiene grandes ventajas en la convergencia para problemas complejos, sin embargo, el número de iteraciones aumenta hasta un 30 % más que en el método SIMPLE y su convergencia esta en función del flujo analizado.

### 2.8.4. Algoritmo PISO

El método de presión implícita con división de operadores (PISO, por sus siglas en inglés) es un procedimiento de cálculo para acoplamiento de Presión-Velocidad, el cual se estableció inicialmente como un algoritmo para la solución no iterativa de problemas de flujos compresibles transitorios. Posteriormente el algoritmo PISO se adapto para problemas en estado permanente con un procedimiento iterativo. El algoritmo utiliza un paso para predecir los valores de las variables de interés y dos pasos para corregir. El algoritmo PISO puede verse como el algoritmo SIMPLE con un paso corrector posterior. El algoritmo PISO requiere memoria de almacenamiento adicional por que la ecuación de corrección de presión se resuelve dos veces lo cual también representa mayor tiempo computacional.

### 2.8.5. Algoritmo SIMPLE Presto

Para acoplar la presión y la velocidad en el presente trabajo fue utilizado el algoritmo SIMPLE Presto. Se sabe que para discretizar la ecuación de cantidad de movimiento, se necesitan valores de presión en las caras del volumen de control. La discretización de presión estándar interpola la presión en las caras utilizando los valores centrales del volumen de control. Por otro lado, Presto! en realidad calcula la presión en la cara, esto es posible utilizando rejillas escalonadas donde las variables de presión y velocidad no están co-ubicadas. Esta discretización nos brinda precisión ya que se evitan los errores de interpolación en los límites. Este esquema funciona mejor para problemas con remolinos y flujos con alto número de Rayleigh(Ventilación natural) sin embargo, es más costoso computacionalmente hablando ya que requiere memoria adicional para las cuadriculas alternativas.

### 2.9. EL FENÓMENO DE LA TURBULENCIA

El análisis teórico y la predicción de la turbulencia han sido, y hasta esta fecha siguen siendo uno de los problemas fundamentales de la dinámica de fluidos particularmente en la dinámica de fluidos computacional. La mayor dificultad surge con la naturaleza caótica del fenómeno de la turbulencia. Por su impredecibilidad ha sido costumbre trabajar con las ecuaciones gobernantes en formas promediadas en el tiempo, lo cual, inevitablemente resulta el términos envueltos en correlaciones de alto orden de variables cuantitativamente fluctuantes del fluido.

En 1937, Taylor y von Karman propusieron la siguiente definición para la turbulencia:

"La turbulencia es un movimiento irregular el cual en general se hace aparecer en fluidos, gaseosos o líquidos, cuando el flujo pasa por superficies de sólidos o incluso cuando las corrientes vecinas del mismo flujo del fluido fluyen pasando uno sobre el otro"

Se podría decir que un flujo turbulento es un régimen de flujo que está caracterizado por una baja difusión de cantidad de movimiento, una alta convección y cambios espacio-temporales caóticos de presión y velocidad. A los flujos que no son turbulentos se les llama flujos laminares y podemos caracterizar al fluido como laminar o turbulento dependiendo la magnitud de su número de Reynolds, cuando el número de Reynolds aumenta, se desarrolla el flujo turbulento.

Debido a la dificultad que se tiene para definir a la turbulencia, se opta por atribuir sus propiedades, es preciso saber que la turbulencia no es una característica del fluido si no del flujo:

### Irregularidad:

La irregularidad es manifestada con las fluctuaciones de las variables del fluido que son dinámicas como la velocidad, la presión, la temperatura, o la concentración, con escalas diferentes. Al parecer caóticos e impredecibles, se justifica usar análisis estadísticos para estudiar los flujos turbulentos.

#### Tridimensionalidad:

Se puede dar la ocasión en que los movimientos turbulentos se efectúen en dos dimensiones si se analizan las escalas más grandes de la turbulencia, o que al ser promediados con el tiempo parezca que se está trabajando bidimensional-mente. Sin embargo si se analizan las escalas más pequeñas de la turbulencia siempre se tendrán movimientos tridimensionales.

#### Difusividad:

El fenómeno de la turbulencia amplifica los fenómenos de transferencia de masa, momentum y energía. Esto es ocasionado por las altas fluctuaciones de movimiento en el fluido.

#### Disipación:

Una vez que se desarrolla un flujo en régimen turbulento, esta turbulencia tenderá a mantenerse, aunque para que esto ocurra, es reuqerido un aporte constante de energía. Esta energía es extraída del la energía inicial del flujo y aumenta su energía interna por la deformación a la que se ven sometidas las partículas del fluido. Si no existe un suministro constante de energía, la turbulencia decaerá.

### Altos números de Reynolds:

La turbulencia esta dada por flujos laminares que no son estables. Cuando se analiza la estabilidad de flujos que son laminares se nota que la inestabilidad surge a partir de cierto numero de Reynolds. Sin embargo este valor crítico en el número de Reynolds será dependiente de la aplicación. Una solución analitica resulta no viable en la solución de la turbulencia debido a que las escalas más pequeñas de la turbulencia incluso están muy alejadas de la longitud molecular del flujo. La turbulencia es igual en los fluidos aunque se encuentren en estado líquido o gaseoso si se llega al punto crítico en el número de Reynolds.

### 2.9.1. La cascada de la energía

Cuando se desarrolla la turbulencia, los remolinos más grandes interactúan con el flujo principal extrayendo energía de el. Podemos comparar la escala de estos remolinos con la escala del flujo en el que se encuentran. Sin embargo, estos remolinos tienden a dividirse en remolinos más pequeños al ser inestables. Este encogimiento de remolinos se produce en forma de cascada por lo que en un régimen turbulento pueden existir una gran variedad de escalas de los remolinos, los cuales se verán afectados en su forma por la velocidad del flujo y po la interacción con los demás remolinos.

## 2.10. MÉTODOS DE ANÁLISIS Y CÁLCULO DE FLUJOS TURBU-LENTOS

Debido a las caracteristicas de la turbulencia en la actualidad no es posible la solución exacta de este fenómeno, sin embargo, gracias al creciente avance tecnológico de los ordenadores y al desarrollo de algoritmos técnicos de este fenómeno se han tenido avances considerables para la resolución de la turbulencia con métodos numéricos. A continuación , tres métodos de aproximación para modelar la turbulencia son presentados. Estos métodos se ordenan según el análisis de los movimientos turbulentos. Cuando se cuenta con un menor número de ecuaciones para aproximarnos a la solución del método será mas exacto, pero con esto el tiempo computacional aumenta considerablemente. Estos métodos son considerados únicamente como aproximaciones y no como leyes científicas.

### 2.10.1. DNS

El método de simulación numérica directa (DNS, por sus siglas en inglés), es la manera más precisa de predecir un flujo turbulento ya que se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes de manera directa. En este tipo de solución, se resuelven todas las escalas en el tiempo y en el espacio sin realizar promediados ni aproximaciones. Los errores en este tipo de análisis son provenientes de las discretizaciones numéricas. Este tipo de aproximación cuenta con un al alto costo computacional, y su utilización práctica está limitada a geometrías sencillas con números de Reynolds bajos.

### 2.10.2. LES

En el método de simulación de grandes remolinos (LES, por sus siglas en inglés), la escalas que son más efectivas en el amplio rango de vórtices en un flujo turbulento son las grandes escalas ya que son más efectivas en el transporte de propiedades, mientras que las escalas más pequeñas son más debiles y el transporte que ocasionan es menor. Teniendo esto en cuenta se tiene una aproximación para simular únicamente los remolinos de mayor tamaño. Esto ocasiona un modela con mayor simplicidad y que no se tengan que hacer muchos ajustes a la hora de analizar distintos flujos. Aún así el analizar únicamente los remolinos de mayor tamaño no nos exenta de la capacidad que deben tener los ordenadores y del tiempo destinado para el cálculo.

En la figura (2.19) se puede apreciar de manera esquemática la escala de magnitud en la que se centra cada uno de los métodos de análisis, observando que el método LES opera con promedios locales, es decir que no pone tanto énfasis en las escalas pequeñas, mientras que DNS resuelve hasta escalas más pequeñas.

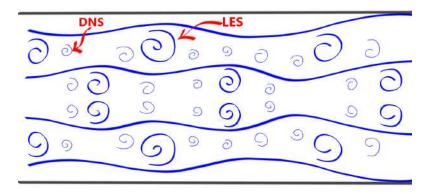


Figura 2.19: Diferencias entre LES Y DNS. Mientras LES opera con promedios locales, DNS resuelve todas las escalas

### 2.10.3. RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations)

En el método de ecuaciones de Reynolds-Navier-Stokes promediadas, como se ha observado con anterioridad, en un flujo turbulento existen remolinos que cuentan con un amplio rango de escalas. Por ejemplo, si se considera un dominio de  $0.1 \times 0.1~\mathrm{m}^2\mathrm{y}$  un flujo de fluido sobre él con un número de Reynolds (Re) muy grande:

Tamaño de los vórtices: entre  $10\mu m$  y  $100\mu m \rightarrow 10^9 - 10^{12}$  celdas Frecuencia: hasta  $10 kHz \rightarrow \Delta t = 100 \mu s$  ¡En este caso no será posible una simulación directa!

Comúnmente en aplicaciones de ingeniería el interés va dirigido a los detalles del flujo medio, y no tanto en los detalles de las fluctuaciones en la turbulencia, por lo que las aproximaciones RANS adoptan aproximaciones estadísticas las cuales promedian las ecuaciones conservativas durante un periodo temporal que es más grande que el periodo característico de las fluctuaciones turbulentas.

El principio que utilizan estos modelos fue establecido por Reynolds en 1985, este principio establece que todas las cantidades físicas serán expresadas como una suma de las partes individuales. Con esta formulación se puede crear un promedio de las variables con respecto al tiempo (Wilcox, 1993).

Algunos modelos RANS se describen a continuación:

#### **Spallart-Allmaras**

Este modelo es de una ecuación, fue diseñado para analizar la turbulencia en perfiles aerodinámicos con flujo subsónico. Es ampliamente utilizado en flujos cercanos a las paredes por su acertividad y se ha probado como un buen modelo a la hora de resolver capas límite hidrodinámicas que cuentan con gradientes de presión adversos(Ansys, 2013).

#### STANDARD $k - \varepsilon$

Este es un modelo de dos ecuaciones, permite obtener una solución independiente de las escalas espaciales y temporales de la turbulencia.(Ansys, 2013). Las ecuaciones de transporte en este modelo permiten obtener los términos k y  $\varepsilon$  (energía cinética y la tasa de disipación de energía cinética turbulenta respectivamente).

El modelo  $k-\varepsilon$  es presentado como una solución adecuada para aplicaciones ingenieriles. Este modelo es fácil de implementar, se tiene una rápida convergencia y se obtienen buenos resultados para distintos regímenes de fluidos (Ansys, 2013). Este modelo fue utilizado para el análisis de este trabajo, debido a que a pesar de que no se espera tener turbulencia en la convección natural por los bajos números de Reynolds, se ha demostrado que integrar este modelo puede ocasionar aproximaciones más precisas si lo comparamos con el método de función de pared.

#### RNG $k-\varepsilon$

De acuerdo a (Ansys, 2013), las ecuaciones este modelo sin derivadas estadísticamente de las ecuaciones de Navier-Stokes. Se analizan los efectos de las ondas fluctuantes en el régimen turbulento. Además este modelo añade ecuaciones que son desarrolladas para maximizar las características del modelo estándar. Se cuenta con la ecuación de modificación del efecto de ondas fluctuantes y la ecuación del término Re. (Ansys, 2013).

#### Realizable $k-\varepsilon$

Este modelo analiza la viscosidad turbulenta de manera distinta a su modelo original y este modelo ha formulado la derivación de la raíz fluctuante de vorticidad para encontrar la disipación de  $\varepsilon$ (Ansys, 2013).

La ecuación de este modelo está regida por la energía cinética turbulenta al igual que en el modelo estándar, sin embargo para la ecuación de la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta es

diferente. Sus ventajas son conocidas, acentuando su buen comportamiento en flujos planos, en análisis de separación de capa límite o en flujos con rotación y recirculación.

#### STANDARD $k-\omega$

Este es un modelo más simple si es comparado con otros modelos en términos de análisis de k. Una ecuación de transporte para  $\omega$  es establecida, además de incluir algunas modificaciones para analizar bajos números de Reynolds, efectos de la compresibilidad así como flujos cortantes. En este modelo  $\omega$  representa específicamente la tasa de disipación de energía cinética turbulenta(Ansys, 2013).

### **SST**

Este modelo de transporte de esfuerzo cortante (SST, por sus siglas en inglés), ha sido diseñado combinando características de los modelos  $k-\varepsilon$  y  $k-\omega$  en distintas regiones del flujo. Dentro de las regiones de capa límite desarrolla su aproximación con el modelo  $k-\omega$ , pero en la región que se encuentra fuera de la capa límite utiliza la aproximación de  $k-\varepsilon$ . (Inc, 2003).

Este modelo ha tenido una buena aceptación en análisis aerodinámicos y flujos de fluidos en general.

### 2.11. MODELO PARA LA REGIÓN SÓLIDA

Una importante ecuación diferencial parabólica es la ecuación de calor. ya que es comúnmente utilizada para describir las variaciones de temperatura en alguna región de estudio. Para el caso tridimensional de una función  $(x,y,z)\in\mathbb{R}^3$  y sujeto a una variable temporal t esta ecuación es presentada como ecuación (2.40), donde se analiza transitoriamente y se considera que no hay una generación de energía (Se asume transferencia de masa nula y ninguna fuente radiativa).

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0$$
 (2.40)

Donde el primer término representa la variación de la temperatura con respecto al tiempo, sin embargo no consideraremos este término en el presente trabajo debido a el análisis estacionario realizado. Además de puntualizar que tenemos generación de energía en la región sólida que conforma a la celda solar.

Entonces para este trabajo se representa la ecuación de calor de la siguiente manera:

$$-\alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = q_{Ge}$$
 (2.41)

Donde  $\alpha$  es la difusividad térmica y esta dada de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_{\nu}} \tag{2.42}$$

Donde k es la conductividad térmica del material,  $\rho$  es la densidad y  $C_p$  es la capacidad calórica específica del material. El término fuente en la cantidad de energía que está dado por la generación de calor en la celda solar fotovoltaica (Abo-Zahhad et al., 2018):

$$q_{Ge} = \frac{(1 - \eta_{cell}) * G * \alpha_{Ge} * A}{V}$$
 (2.43)

En la ecuación (2.43) es posible observar que el calor generado está en función de la eficiencia de la celda solar ( $\eta_{cell}$ ), de la radiación solar directa que incide en la superficie de la celda solar (G), de la absortividad del germanio ( $\alpha_{Ge}$ ), del área en la que incide la radiación solar (G) y del volumen de la celda solar (G). Y es sabido que la eficiencia de la celda solar está en función de su temperatura de operación, por lo tanto es posible representar la eficiencia de la celda solar de la siguiente manera:

$$\eta_{cell} = \eta_{ref} - [\beta_{\text{thermal}} (T_{cell} - T_{\text{ref}})]$$
 (2.44)

Donde es posible observar que la eficiencia térmica esta en función de una eficiencia de referencia que está dada por el fabricante de la celda solar  $(\eta_{ref})$ , un coeficiente de expansión térmica  $(\beta_{termal})$ , la temperatura de operación de la celda solar  $(T_{cell})$  y una temperatura de referencia también proporcionada por el fabricante de la celda solar  $(T_{ref})$ .

Adicionalmente es importante destacar que la energía que entra al sistema esta dada por la radiación solar concentrada que incide en la superficie de la celda solar y es efectuada por los elementos ópticos, esta radiación es representada de la siguiente manera:

$$G = DNI * C_q * \eta_{opt} \tag{2.45}$$

Donde es posible observar que esta radiación concentrada (G) esta dada por la radiación solar directa que incide en el elemento óptico (DNI), del factor de concentración geométrico ( $C_g$ ) y de la eficiencia óptica del sistema ( $\eta_{opt}$ ) (Abo-Zahhad et al., 2018).

## **CAPÍTULO 3**

## **METODOLOGÍA**

En este capítulo se describe la metodología que se implementó en la fase experimental y las simulaciones numéricas.

Como se mencionó en el capítulo anterior, durante la solución a las ecuaciones diferenciales parciales mediante CFD, es necesario identificar y evaluar el efecto de los errores e incertidumbres del modelo particular que se está implementando. En este capítulo se abordarán los cuestionamientos comunes que surgen cuando se trabaja con CFD como la verificación, validación y la manera en cómo fueron afrontados los errores para su identificación y mitigación.

La metodología aplicada se puede apreciar en la figura (3.1). Como se puede observar, la componente principal de este trabajo es la simulación CFD, sin embargo, para realizarlas, es necesario definir algunas de las condiciones iniciales y de frontera delimitadas mediante la caracterización experimental del sistema óptico de concentración solar, la evaluación del recurso solar, y de las condiciones climáticas del lugar donde se encuentra operando el sistema, tales como la temperatura ambiente y la velocidad del viento, ya que esto ayuda a acotar las condiciones en las cuales se desarrollan las simulaciones de transferencia de energía y masa en la celda solar y el disipador de calor. Con ello se generan diferentes condiciones de estudio para conocer como afectan las variaciones de estos parámetros de interés en la temperatura de la celda solar.



Figura 3.1: Esquema general de la metodología seguida en el desarrollo de la tesis

## 3.1. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONCENTRACIÓN SO-LAR

El Pre-proceso es una parte fundamental de CFD, se deben establecer condiciones iniciales y de frontera, en esta etapa se requiere una preparación de datos de entrada para un código.

El hecho de obtener estas condiciones iniciales y de frontera no es una tarea fácil, ya que se debe tener en la medida de lo posible la menor incertidumbre.

El objetivo de la fase experimental va dirigido a obtener de manera confiable características del sistema de concentración solar, uno de los parámetros principales a determinar es la energía de entrada al sistema, definida por el flujo de calor que incide en la celda solar. Este flujo incidente en la celda es función de la eficiencia óptica del sistema de concentración, la DNI incidente en el plano de la celda y un factor de pérdidas debido al seguidor solar.

El objetivo general de estos experimentos es verificar el factor de concentración solar efectivo y la eficiencia óptica.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- 1. Determinar las incertidumbres de los equipos de medición que se utilizaron en los experimentos.
- 2. Manufacturar y ensamblar un módulo de concentración fotovoltaico integrado por una lente de fresnel.
- 3. Obtener el flujo incidente neto del spot de radiación concentrada, para contrastarlo con las mediciones de DNI de una estación solarimétrica y determinar el factor de concentración.

En la fig. (3.2) se muestra la metodología seguida para determinar el factor de concentración efectivo y el flujo de calor radiativo sobre la celda solar.

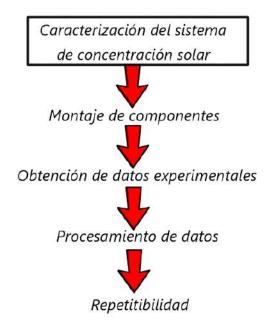


Figura 3.2: Etapas fundamentales del experimento de caracterización del sistema de concentración

### Sistema de concentración solar

El sistema de concentración solar esta compuesto por lente de fresnel cuadrada de 30x30 cm con su respectiva celda solar, la cual se puede apreciar de forma esquemática en la fig. (3.3).

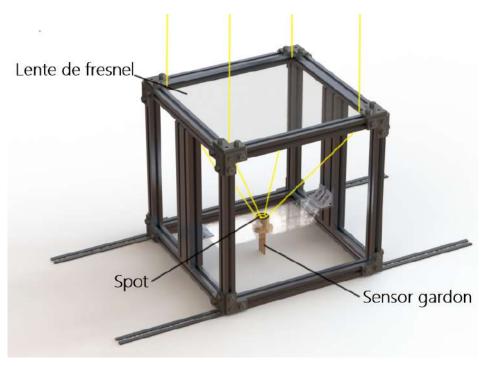


Figura 3.3: Configuración del sistema de concentración solar

Los componentes principales del sistema de concentración los cuales son los siguientes:

#### 1. Lente de fresnel

La lente de fresnel es un elemento óptico que se utiliza para concentrar la radiación solar en una zona focal donde se coloca la celda fotovoltaica. Para el experimento de obtención de flujo de calor, la radiación solar concentrada (spot) se mide mediante un sensor gardon localizado en la zona focal de la lente.

#### 2. Sensor Gardon

El sensor gardon es un transductor de flujo radiativo capaz de medir altas intensidades. El transductor que será utilizado para realizar los experimentos es el modelo TG-1000-0. Este modelo cuenta con un rango de  $0-108~W/cm^2$  con una precisión de  $\pm 3\,\%$ .

Este transductor requiere operar bajo temperatura controlada manteniéndose en una temperatura de  $23^{\circ}C$ , por tal motivo cuenta con un sistema de enfriamiento activo con agua.

En la fig. (3.4) se muestra un esquema del sensor gardon, se puede apreciar que este cuenta con tres canales. El canal número uno es la entrada del fluido, el canal dos es la salida del fluido y el canal tres es la salida de información la cual tiene conexión con el adquisidor de datos.

Para mantener el flujo de fluido se cuenta con una bomba de agua que es alimentada con una fuente de 24 VCD.



Figura 3.4: Sensor gardon

Cuando el transductor de flujo de radiación es expuesto a un flujo de calor, será producido un voltaje que es proporcional al flujo de calor. Cada unidad es calibrada individualmente por la compañía Vatell y la información puede ser encontrada en las hojas de calibración que son incluidas con el sensor.

El factor de escala del sensor tiene un valor de  $338,200~W/m^2/mV$ . Se ejemplifica a continuación: Si el transductor es expuesto a un flujo de calor, y este arroja una señal de voltaje con un valor de 1.606mV entonces el valor del flujo de calor medido con el sensor Gardon fue:

$$q'' = (1.606mV)(338, 200W/m^2/mV) = 543, 149.2$$
(3.1)

#### 3. Luz concentrada

Aunque la luz concentrada (spot) no es un componente físico, su dimensión (diámetro) y distribución espacial es relevante para la estimación del flujo de calor incidente sobre la celda solar. Para

el presente caso, el spot debe tener un diámetro de 1 cm, esto debido a la dimensión de la celda solar.

#### Sistema de seguimiento solar

El sistema de seguimiento solar tiene el objetivo de mantener la orientación del sistema CPV perpendicular al vector de la DNI del sol para maximizar la captación de energía. Es importante destacar que para que los sistemas CPV no pierdan eficiencia el error del seguidor solar debe ser inferior al semi-ángulo de aceptación del sistema (convencionalmente 1°). En caso que el vector de la radiación solar y la normal al plano del sistema de concentración sea mayor al semi-ángulo de aceptación, el sistema falla y la radiación concentrada se desfasa del foco y ya no incide sobre la celda solar. Como se puede observar, el valor del semi-ángulo de aceptación es demasiado bajo, de ahí que los sistemas de seguimiento solar sean de alta precisión para esta aplicación. El sistema de seguimiento utilizado para la caracterización experimental cuenta con dos ejes.

El seguidor es de tipo vertical montado en un poste para transferir la carga de la estructura a su base como se muestra en la fig. 3.5). El poste tiene 2.3 m de altura y soporta el mecanismo de giro con un área de superficie de carga útil nominal de estructura de acero de  $4\,m^2$ . Se colocaron 4 perfiles de aluminio con el fin de montar fácilmente la carga útil. La precisión del seguidor solar es función de la precisión de los sistemas que lo componen, como el actuador, la reducción de los engranajes y los sensores de finales de carrera. Considerando el conjunto de las incertidumbres de estos componentes, la incertidumbre del seguidor solar es  $< 0.5^{\circ}$ .

El seguidor solar fue desarrollado en el "Laboratorio de innovación y caracterización de sistemas termosolares y fotovoltaicos" que se encuentra en CIO Unidad Aguascalientes. El sistema es totalmente funcional, tanto en lo mecánico, como en el sistema de control automático. El sistema óptico de concentración solar fue montado sobre el seguidor tal como se muestra en la fig. (3.5).

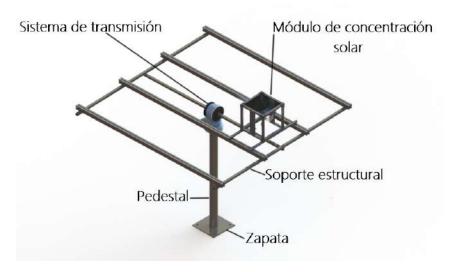


Figura 3.5: Montaje del sistema de concentración solar sobre el seguidor solar

#### 3.1.1. Campaña experimental

Para la etapa de adquisición de datos se utilizó la infraestructura que se ilustra en la figura (3.6a) en la cual se puede observar que los componentes principales para la adquisición de datos son:

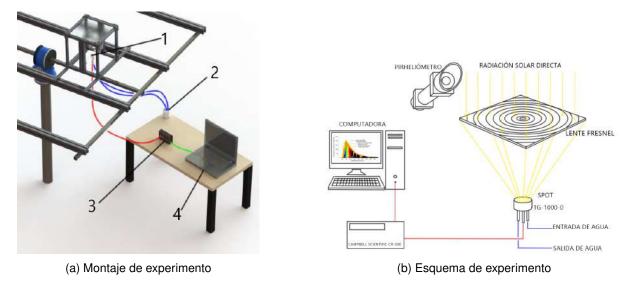


Figura 3.6: Configuración de componentes para toma de datos

#### 1. Sensor gardon

El cual se describe en la sección anterior.

#### 2. Sistema de enfriamiento

Debido a que el sensor gardon requiere trabajar bajo un intervalo de temperatura determinado  $(26^{\circ}C)$ , el dispositivo cuenta con un sistema de enfriamiento que le permite trabajar a la temperatura requerida. El sistema de enfriamiento cuenta con un depósito agua, donde haya una bomba sumergible de agua la cual hace circular el agua fría con el caudal especificado por el fabricante. En la figura(3.6a) se esquematiza con dos lineas azules, la entrada y la salida de agua en el sensor gardon.

#### 3. Adquisidor de datos

La linea en color rojo en la figura(3.6a) esquematiza el cable para la transmisión de los datos del sensor al adquisidor de datos. El cual es el adquisidor de datos modelo CR-300 de la marca Campbell Scientific, cuenta con una precisión de  $\pm 0.04\,\%$  si trabaja de 0 a  $40^{\circ}C$  o de  $\pm 0.1\,\%$  si trabaja de 40 a  $70^{\circ}C$ 

#### 4. Equipo de computo

Una vez que las señales de voltaje llegan al adquisidor de datos, este se encarga de guardar los datos obtenidos en un archivo de texto con ayuda de una computadora portátil a través de una conexión de puerto USB.

#### 5. Determinación de la eficiencia óptica

La eficiencia óptica( $\eta_{opt}$ ) de un sistema CPV se relaciona con la capacidad de transmitir el flujo

radiativo en la superficie de la lente hacia la celda solar (Fernández et al., 2018). Esto se puede definir como la relación entre el flujo concentrado  $F^{conc}$  en la superficie de salida  $A_{exit}$  con respecto al flujo de entrada  $F^{inc}$ , en la superficie que entra, con un área  $A_{entrance}$ , del concentrador ya que se producen perdidas ópticas:

$$\eta_{\rm opt} = \frac{F^{\rm conc}}{F^{\rm inc}} \tag{3.2}$$

La eficiencia típica de sistemas ópticos de concentración esta entre 0.8 y 0.9 (Chong et al., 2013). El flujo concentrado también es llamado concentración efectiva  $C_{eff} \equiv F^{conc}$ , está relacionado con la eficiencia óptica y la relación de concentración geométrico como:

$$C_{\text{eff}} = \eta_{\text{opt}} \cdot C_{\text{g}}$$
 (3.3)

El factor de concentración geométrico  $C_g$  es la relación entre el área de apertura de un captador de concentración  $A_c$  y el área del absorbedor  $A_a$ . Es posible apreciar estas áreas de manera esquemática en la figura (3.7).

Para el presente caso el área de apertura del captador es el área de la lente de fresnel, y el área del absorvedor es el área del spot, por lo tanto:

$$C_q = A_c/A_a \tag{3.4}$$

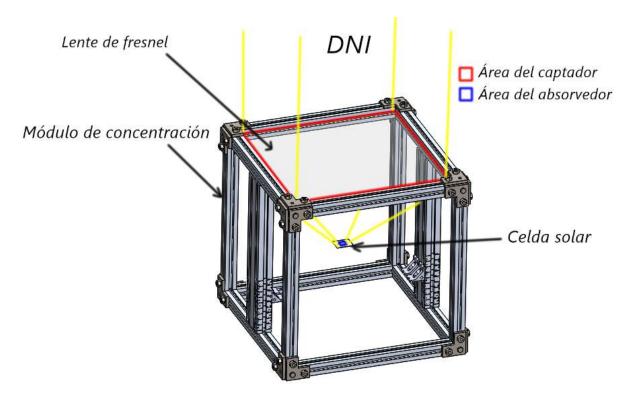


Figura 3.7: Relación entre el área de apertura de un captador y el área de apertura de un absorvedor

En la figura (3.6b) se puede observar que para la medición de la componente directa de la radiación solar (DNI) se utilizó un pirheliómetro el cual está montado sobre una estación solarimétrica perteneciente al Laboratorio de Innovación y Caracterización de sistemas termo-solares y foto-

voltaicos del CIO Unidad Aguascalientes. Con el pirheliómetro se mide en tiempo real la DNI que llega a la lente de fresnel y al ser comparado con el flujo medido por el sensor gardon se puede conocer la eficiencia óptica y el factor de concentración efectivo.

# 3.2. ANÁLISIS ESTOCÁSTICO DE DATOS CLIMÁTICOS CON AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO (TMY)

Para la obtención de los datos climáticos de un año meteorológico típico se utilizó System Advisor Model (SAM, por sus siglas en inglés) un software tecno-económico de uso libre desarrollado por Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL, por sus siglas en inglés) y el Departamento de Energía de los Estados Unidos. Este software facilita la toma de decisiones a las personas que están integradas a la industria de las energías renovables. SAM puede simular el rendimiento de energía solar fotovoltaica y energía solar concentrada, calentamiento de agua con energía solar, viento, geotérmica y sistemas de biomasa.

SAM también nos ayuda a acceder a archivos con datos climáticos en distintos puntos en el mundo, en base al año meteorológico típico, el cual se construye a partir de los datos climáticos promediados durante periodos de 10 años.

El fin de utilizar SAM en este proyecto es extraer los datos del año meteorológico típico (TMY) a fín de caracterizarlo hacer uso de estos datos como condición de frontera en las simulaciones.

El primero de los parámetros que nos interesa determinar es la cantidad de energía que esta incidiendo sobre la celda solar, para ello una vez que se tiene caracterizado el sistema de concentración solar se conoce la eficiencia óptica y factor de concentración, entonces únicamente resta por conocer el valor de DNI. Sin embargo el valor de DNI es fluctuante, dependiendo de la hora del día, la época del año y las condiciones de nubosidad. De ahí que para capturar su dinámica se realizó un análisis estadístico de su comportamiento. Con dicho análisis se obtienen el valor promedio, el valor más frecuente y el valor máximo. Estos valores son los que se declaran como condiciones de frontera en la simulación CFD de nuestro sistema. El beneficio es que las condiciones de frontera ya no son definidas de manera arbitraria, si no en función de las condiciones reales de un lugar seleccionado.

Respecto a la temperatura de la celda solar, esta no es solo función de la DNI incidente, sino también se ve afectada por la temperatura ambiente y la velocidad del viento. Las cuales también tienen un comportamiento dinámico a lo largo del día y de la época del año. De igual modo, para el caso de la temperatura ambiente y de la velocidad del viento, se realizó un análisis estadístico para determinar el valor promedio, el valor mas frecuente (la moda) y el valor máximo. Con este análisis, definimos con mayor certeza los escenarios de simulación bajo los cuales se debe implementar la simulación CFD.

Para obtener los valores de DNI, temperatura del ambiente y velocidad del viento, es necesario definir una ubicación en específico. Por ello se seleccionó a manera de ejemplo el estado de Aguascalientes, municipio de Aguascalientes (lugar donde se encontrará funcionando el sistema) se encuentra en la latitud 21.89 DD, longitud -102.3 DD a una elevación sobre el nivel del mar de 1878 m. Los datos fueron obtenidos de NSRDB (National Solar Radiatión Data Base) de la estación con ID 554051.

#### 3.3. SIMULACIÓN NUMÉRICA

Las simulaciones efectuadas en el presente trabajo, son análisis de la transferencia de calor conjugada en un sistema en el cual existe interacción entre un fluido (aire) y superficies sólidas (Disipador de calor y celda triple unión) sometidas a calentamiento debido a la concentración solar.

La metodología para las simulaciones será descrita mediante 8 pasos principales. En la literatura, distintos autores hacen uso de esta metodología(Mario Di Capua et al., 2018)(Selimefendigil and Öztop, 2022) ya que permite llevar un correcto y ordenado análisis del fenómeno físico bajo estudio. Estos 8 pasos pueden observarse en la figura (3.8).



Figura 3.8: Los 8 pasos principales en la metodología de CFD

#### 3.3.1. Pre-análisis y planteamiento del problema

Esta etapa es fundamental en CFD ya que se debe conocer con claridad el fenómeno físico que se desea simular. Además de tener en claro la información que se requiere obtener con los resultados de las simulaciones.

#### 3.3.2. Planteamiento del problema

En este caso particular se resuelve la transferencia de calor para una región sólida y para una región fluida, es por eso que se hace uso del modelo de transferencia de calor conjugado. El fenómeno físico que se desea resolver es la convección natural de un disipador que sea capaz de mantener operando en condiciones óptimas de temperatura a una celda solar de triple unión sometida a concentración solar. La celda solar utilizada en los módulos de concentración es de la marca suncore PHOTOVOLTAICS esta celda tiene una eficiencia típica del 38.5 % si se mantiene operando a  $25^{\circ}C$  su temperatura de operación tiene un rango de  $-40^{\circ}C$  a  $100^{\circ}C$  y soporta una máxima temperatura de  $150^{\circ}C$ . Esta celda entrega una potencia nominal de 39 W cuando trabaja a  $25^{\circ}C$  con una DNI= $1,000~W/m^2$ , con una concentración de 1,000x, con un voltaje en circuito abierto de 3.20~V a  $25^{\circ}C$ , tiene una área efectiva de 10~mm x 10~mm, es llamada multi-unión debido a que su estructura esta compuesta por tres capas de materiales GaAs, Ge y GaInP. Podemos apreciar la celda solar utilizada en la figura (3.9).

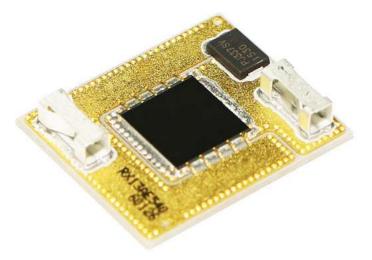


Figura 3.9: CPV Receiver 10mm suncore PHOTOVOLTAICS

Para la selección del material que conformará el disipador de calor es requerido que el material sólido cuente con una alta conductividad térmica, ya que esto permitirá que el el calor generado fluya por los sólidos y se disipe por medio de la transferencia de calor por convección una vez que entre en contacto con el fluido, sin embargo, también es necesario utilizar un material que no sea de un costo elevado ya que lo que se busca con este proyecto es disminuir los costos del subsistema de enfriamiento que se encuentra en el sistema CPV.

La conductividad térmica (k) es una de las propiedades físicas de los materiales que mide la capacidad que tiene un material de conducir el calor, es decir si es un buen o un mal conductor de calor. Para este análisis de estudio fue seleccionado el Aluminio debido a que este presenta una buena relación entre su alta conductividad térmica y costo (Klemens and Williams, 1986).

#### 3.3.3. Definición de la geometría

Debido a que la convección natural es un mecanismo de transferencia de calor, cuyo movimiento del fluido no es generado por una fuente externa, sino que el movimiento esta dado por la presión atmosférica y un diferencial de densidades causadas por condiciones de calentamiento, un parámetro importante de analizar es la configuración de la geometría del disipador. Distintos autores en la literatura han realizado análisis de distintas configuraciones geométricas para maximizar la transferencia de calor por convección en disipadores de calor para distintas aplicaciones ingenieriles, que van desde variar la geometría de las aletas hasta el espaciamiento que tienen entre ellas. Algunos investigadores han estudiado y optimizado las dimensiones geométricas para disipadores de calor de aletas paralelas y han dado algunas formulas para calcular dimensiones geométricas (Jones and Smith, 1970) (Jian-hui et al., 2009) (Yu et al., 2010) (Yu et al., 2011).

Se ha demostrado que un factor que afecta negativamente al rendimiento de los disipadores de calor, es el estancamiento de aire caliente entre sus aletas (Meng et al., 2018), con el fin de evaluar una nueva configuración geométrica, el disipador de calor propuesto es de aluminio, con una geometría circular, con 20 aletas rectas verticales adyacentes a un cilindro en el cual se monta la celda solar, se pueden observar las características dimensionales principales de la geometría con la que cuenta el disipador de calor propuesto en la figura (3.10a) (Las dimensiones se expresan en milímetros). Una vez que tenemos la geometría del disipador que se va a simular, es necesario ensamblar en el modelado la celda montada, esta celda estará montada en la parte superior del disipador de calor justo como se muestra en la figura (3.10b).

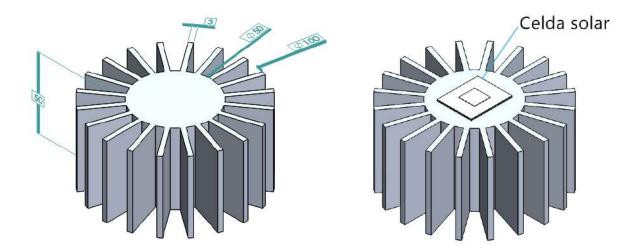


Figura 3.10: Características del modelado para simulación

(b) Montaje de la celda solar en el disipador de calor

(a) Características geométricas del disipador de calor

propuesto (Unidades: mm)

Para el modelado de la celda solar se supone que la celda efectiva es de Germanio, se modelaron las capas que conforman la celda solar, ya que esta cuenta con dos capas de cobre en su base y una capa de un material cerámico justo como se muestra en la figura (3.11).

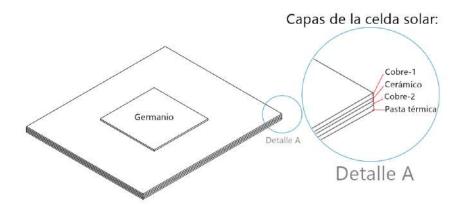


Figura 3.11: Capas de la celda solar física

Debido a que se resolverá la la transferencia de calor para una región sólida y una región fluida es necesario modelar una región fluida, además debido a que el disipador y la celda solar cuentan con propiedades simétricas, se modela y analiza de manera simétrica para ahorrar costo computacional, estas ventajas se verán reflejadas al momento de discretizar el modelo, debido a la reducción de elementos y de nodos. Podemos apreciar las características geométricas del modelado para la región fluida (Dimensionamiento en milímetros), y el plano de simetría para el tipo de análisis en la figura (3.12).

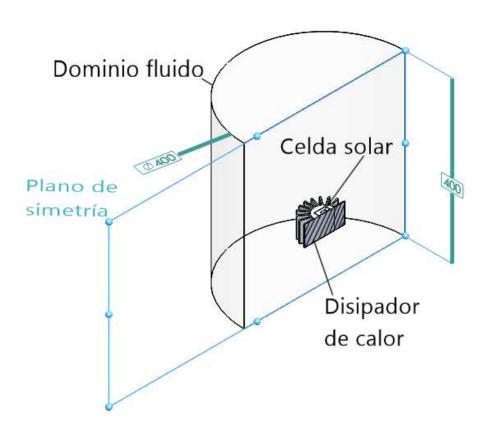


Figura 3.12: Modelado de la región fluida y visualización del eje de simetría en todos los dominios

Para realizar el modelado de este trabajo fue utilizada la versión académica del software Solid Works en su versión 2017.

#### 3.3.4. Mallado

Una importante propiedad del método de los volúmenes finitos es que los principios de conservación (masa, cantidad de movimiento y energía), son la base del modelado matemático. Uno de los pasos fundamentales de este método es la descomposición del dominio en pequeños volúmenes de control de manera ordenada y sin traslaparse, donde las variables son almacenadas en los nodos. Los nodos donde se ubican las variables a resolver, se ubican en los vértices de esta malla o en los centros de los volúmenes y es la referencia con la que se cuenta para aproximar la solución en el resto del dominio. En la figura (3.13) se puede observar un volumen central y sus volúmenes de control vecinos, para cada una de las direcciones (Norte, Sur, Este y Oeste ), además de los nodos para cada uno de estos volúmenes de control.

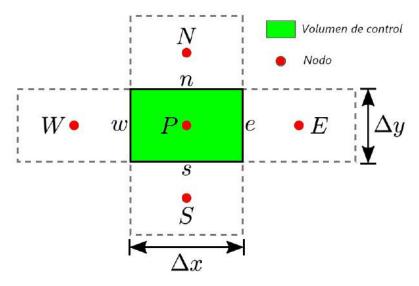


Figura 3.13: Volúmenes de control, nodos y notación en una malla

Los estudios que utilizan el MVF hacen uso de distintos tipos de discretizaciones en sus modelos, los cuales varían dependiendo de sus geometrías y la física que resuelven. Este tipo de discretización va desde mallas estructuradas hasta mallas no estructuradas, y en modelos con tres dimensiones puede variar el número de caras que tienen los volúmenes de control estas van desde mallas con tetraedros, hexaedros y poliedros como elementos. Figura (3.14)

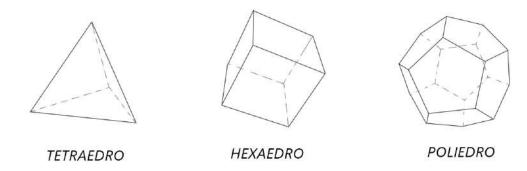


Figura 3.14: Tipos de elementos en una malla estructural

Para este caso de estudio se seleccionó trabajar con una malla de elementos tetraedricos debido a la configuración geométrica de nuestro modelado, esta malla se obtuvo a partir de un análisis de sensibilidad de la malla.

#### Análisis de sensibilidad de la malla

Para seleccionar la malla con la que se estará trabajando en las simulaciones, se realizaron distintas configuraciones, variando el número de volúmenes de control en los que se discretiza la geometría. Este número de elementos es variable dependiente del tamaño que se les da a los volúmenes de control. Es importante recalcar que se ha demostrado que las aproximaciones suelen ser más precisas cuando el tamaño de los VC tiende a ser cero, sin embargo, entre mas números de elementos existan en la discretización del modelo, este será mas pesado computacionalmente y le costará mas tiempo a la máquina realizar los cálculos necesarios para obtener las aproximaciones.

Se parte de realizar simulaciones y analizar el comportamiento de la temperatura promedio en la celda solar para así poder observar en qué punto los resultados dejan de variar considerablemente cuando la variación depende únicamente de la manera en que estamos discretizando el modelo.

En la figura (3.15) se muestra la gráfica del análisis de sensibilidad de la malla realizado. El eje horizontal nos muestra la variación del número de elementos y el eje vertical nos muestra la temperatura de operación promedio de la celda obtenida de manera numérica.

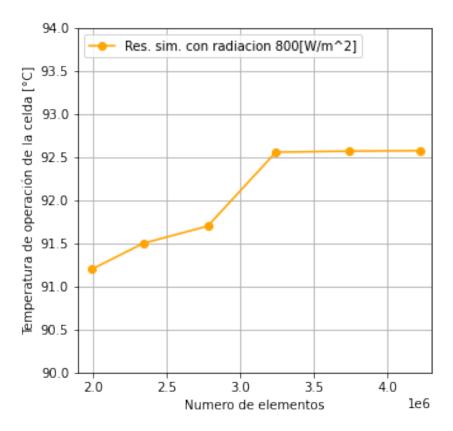


Figura 3.15: Variaciones del número de elementos en la malla para analizar el comportamiento de la temperatura

En la figura (3.15) es posible observar que las aproximaciones del comportamiento de la temperatura de operación de la celda solar dejaron de tener variaciones considerables a partir de los 3,243,096 elementos. Esto indica que a partir de la malla construida con este número de celdas la solución será consistente, ya que si se cuenta con un menor número de celdas, los resultados podrían variar considerablemente, y si tenemos mas de esa cantidad de elementos el costo computacional incrementaría y los resultados no tendrían variaciones considerables.

La discretización final del modelado se muestra de manera isométrica en la figura (3.16a). En la figura (3.16b), se puede observar la vista frontal del mallado.

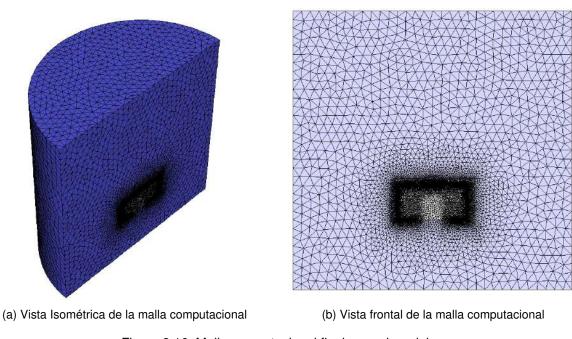


Figura 3.16: Malla computacional final para el modelo

Como se puede observar en las figuras anteriores, la malla es mas fina en las regiones cercanas a las paredes del disipador de calor, esto tiene el propósito de identificar la capa límite térmica para trabajos futuros. Es posible observar las regiones cercanas a las paredes del disipador en la figura (3.17).

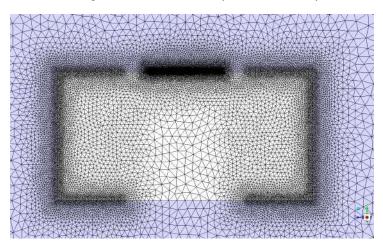


Figura 3.17: Malla computacional en zonas cercanas a las paredes del disipador y la celda solar

Para los detalles de este mallado se seleccionó un tamaño máximo de elementos de 12.8 mm captu-

rando la curvatura de los límites, además se captura la proximidad de los elementos en las caras a tres números de celdas a través de los límites. Con un tamaño de elementos en las caras próximas de 0.05 mm. En la figura (3.18) se puede observar con mayor detalle el tamaño de los elementos cercanos a las caras, se hizo una selección de algunos elementos (Elementos en color verde) con el fin de ilustrar el tamaño de los elementos en las distintas regiones del mallado.

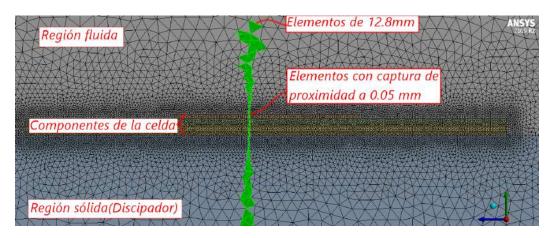


Figura 3.18: Vista aumentada de la región próxima a las caras del disipador y la celda solar

#### Relación de aspecto

Es importante analizar la relación de aspecto de los elementos, donde lo que se busca en la mayoría de los casos es tener relaciones de aspecto de 1, es decir, que el lado mas grande y el mas corto del elemento tengan la misma dimensión, sin embargo esta relación de aspecto podrá variar dependiendo la física en el análisis. Crear mallas con una elevada relación de aspecto puede producir resultados de mala calidad. Para el presente caso de estudio, lo que se busca es tener relaciones de aspecto de 1, la figura (3.19) muestra en el eje horizontal el valor de relación de aspecto de los elementos, y en el eje vertical el número de elementos.

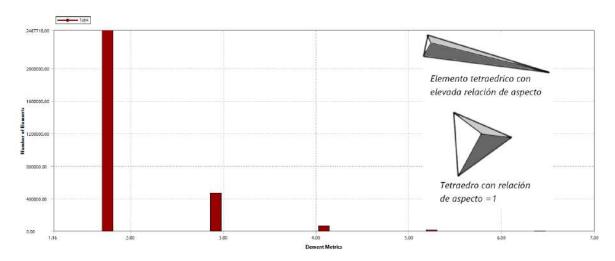


Figura 3.19: Relación de aspecto de los elementos en el modelo

#### Calidad ortogonal

La ortogonalidad es una generalización de la noción geométrica de la perpendicularidad, este concepto también tiene que ver con la calidad de mallas numéricas, uno de los factores característicos de mallas confiables y de buena calidad precisamente es una buena ortogonalidad. En la figura (3.20), se muestra la ortogonalidad de los elementos en nuestro modelo, ANSYS evalúa como una buena ortogonalidad los elementos cercanos a 1 y no muy buena valores cercanos a 0. A pesar de tener algunas celdas con una ortogonalidad no tan buena, su promedio es superior a 0.88 lo cual es un buen indicador.

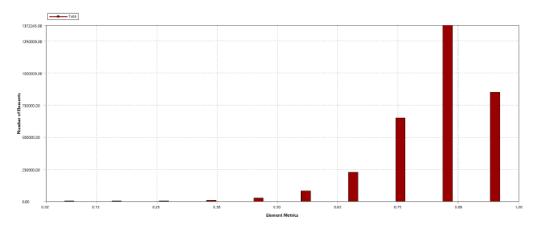


Figura 3.20: Calidad de la ortogonalidad en los elementos de nuestro modelo

#### Asimetría(skewness)

La asimetría se define como la diferencia entre la forma de la celda y la forma de una celda equilátera de volumen equivalente. Las celdas muy sesgadas pueden disminuir la precisión y desestabilizar la solución. Una regla general es que la asimetría máxima para una malla tetraédrica en la mayoría de los flujos debe mantenerse por debajo de 0.95, con un valor promedio a 0.33. Un valor máximo por encima de 0,95 puede provocar dificultades de convergencia. La asimetría y número de celdas puede observarse en la figura(3.21), donde a pesar de tener pocos elementos asimétricos, el valor promedio es cercano a 0.33 lo cual cumple con lo definido.

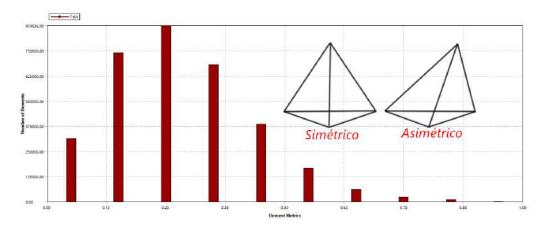


Figura 3.21: Asimetría de los elementos en la discretización del modelo

#### Calidad de elementos

Para muchos problemas de valores límite, la forma de los elementos de la malla afecta directamente la convergencia numérica y la precisión de la solución. Se dice que un elemento de malla tiene buena calidad, si estos efectos son beneficiosos. Sin embargo, depende principalmente de la aplicación, el problema del valor límite y el tipo de elemento, qué formas de un elemento se consideran buenas. En el mallador meshing se dice que un elemento es de buena calidad cuando tiene valores cercanos a 1, el promedio de la calidad de nuestros elementos es de 0.80391, la figura (3.22) nos muestra la calidad de los elementos en nuestro modelo en el eje horizontal y el número de elementos en el eje vertical.

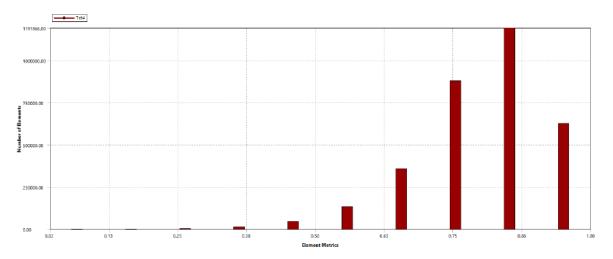


Figura 3.22: Calidad de los elementos en el modelo

El propósito de las métricas de calidad de malla es evaluar la idoneidad de un dominio computacional discreto (malla) para simulaciones. Por lo general, se considera que una malla es de mayor calidad en comparación con otra malla si mejora al menos una de las propiedades de simulación más importantes; Tiempo de convergencia, estabilidad o precisión, las métricas que evalúan la calidad de una malla son la relación de aspecto, la ortogonalidad o la asimetría, tales propiedades fueron presentadas con anterioridad.

#### 3.3.5. Configuración

Una vez que se ha creado la malla computacional a partir de la geometría se procede a la configuración del análisis de CFD usando el módulo de Fluent del Software comercial ANSYS en su versión 2019R2. La parte inicial de este análisis tiene que ver con analizar el problema con doble precisión, esto quiere decir que el software utilizará 16 cifras significativas en lugar de 8 para evitar los errores de redondeo.

#### Configuraciones generales

Para las configuraciones generales del análisis se parte en resolver basado en presión, esta etapa de CFD constituye la parte central del software, en el cual se resuelve el modelo matemático, y es aquí donde interviene el análisis numérico, los fundamentos de matemáticas discretas y el desarrollo del software.

El solucionador basado en presión emplea un algoritmo que pertenece a una clase general de métodos denominada método de proyección (Chorin, 1968). Dado que las ecuaciones gobernantes no son lineales y están acopladas entre sí, el proceso de solución implica iteraciones en las que el conjunto completo de ecuaciones gobernantes se resuelve repetidamente hasta que la solución converge.

Se realiza un análisis estacionario, esto quiere decir que las variables que definen el comportamiento permanecen invariantes con respecto al tiempo, de esta noción es donde se anulan las variables con respecto al tiempo en el modelo matemático presentado en la sección (2.5 y 2.11).

También se activa la gravedad con un valor de  $-9.81m/s^2$  en el eje vertical. La figura (3.23), nos muestra la configuración en el software.

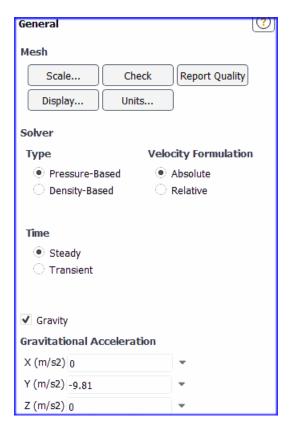


Figura 3.23: Configuración general

#### **Modelos**

Los modelos que resuelve el software ANSYS en el módulo de Fluent son variados, sin embargo, para el presente caso de estudio, el modelo de energía, la viscosidad del fluido será resuelto con el modelo de dos ecuaciones  $k-\varepsilon$ , en su versión "Realizable", debido al buen desempeñño que tuvo en el artículo de verificación (Meng et al., 2018), este método es descrito en la sección (2.10), y recordando que se supone al fluido radiativamente no participante, no es resuelto ningún modelo de radiación. La configuración del modelo de viscosidad puede apreciarse en la figura (3.24).

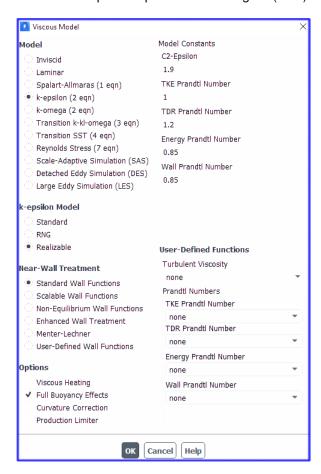


Figura 3.24: Configuración del modelo de viscosidad

#### **Materiales**

Para definir los materiales y sus propiedades se puede usar la base de datos que tiene Fluent, o se puede crear una librería definida por el usuario. La tabla (3.1) nos muestra las propiedades de los materiales sólidos que se utilizaron en este análisis. Donde  $\rho$  representa la densidad, Cp el calor específico y K la conductividad térmica de los materiales.

Material	$\rho [kg/m^3]$	Cp [J/kg.K]	K[W/m.K]
Pasta térmica	4,000	800	10
Aluminio	2,719	871	202.4
Cobre	8,978	381	387.6
Germanio	5,323	310	60
Cerámico	3,700	880	20

Cuadro 3.1: Propiedades de los materiales sólidos en el modelo

Para definir el material fluido se hizo uso de la base de datos de ANSYS, sin embargo, al realizar simulaciones con variaciones de temperatura que existen en el ambiente, se pone particular atención en dos propiedades del aire, la densidad  $[\rho]$  y el coeficiente de expansión volumétrica  $[\beta]$ .

El comportamiento del aire fue considerado como un gas ideal debido a que se hicieron consideraciones en el cambio de temperatura en el aire que interactúa con el sistema de enfriamiento, esto ocasiona cambios en su densidad, entonces, se puede expresar el valor de la densidad justo como se muestra en la ecuación (3.5). Es posible destacar que este valor de densidad  $[\rho]$  esta en función de la presión atmosférica [P], la constante universal de los gases ideales [R], de su temperatura [T].

$$\rho = \frac{P}{RT} \tag{3.5}$$

Si se considera la presión atmosférica para el Estado de Aguascalientes, con un valor de P=102.5KPa, la constante R=0.287KJ/KgK a una temperatura de T=300K. Entonces es posible decir que el valor de la densidad del aire en el Estado de Aguascalientes es:

$$\rho = \frac{102.5KPa}{(0.287KJ/KgK)(300K)} = 1.19Kg/m^3$$
(3.6)

Sin embargo, es sabido que el comportamiento de la densidad varía con respecto a la temperatura del aire, entonces se supone la densidad obtenida en la ecuación (3.6) como una densidad de referencia  $[\rho_0]$ . Recordando que el modelo de Boussinesq es adoptado para analizar la densidad que es descrito en la sección (2.5.3) y que los análisis de la temperatura del aire van de  $10^{\circ}C$  a  $40^{\circ}C$  se obtiene la información de los valores de densidad utilizados en el modelo, los cuales se muestran en la tabla (3.2).

Temp.[ ${}^{\circ}C$ ]	Temp.K	$[\rho_0]$	$\beta[1/K]$	$T-T_0$	$\rho$ (Boussinesq)
10	283.15	1.19	0.003531697	10	1.1479
15	288.15	1.19	0.003470415	15	1.1280
20	293.15	1.19	0.003411223	20	1.1088
25	298.15	1.19	0.00335016	25	1.0902
30	303.15	1.19	0.003298697	30	1.0722
35	308.15	1.19	0.003245173	35	1.0548
40	313.15	1.19	0.003193358	40	1.0380

Cuadro 3.2: Valores de densidad con variaciones en la temperatura del fluido

Entonces, las propiedades del aire que se usaron en las simulaciones pueden observarse en la tabla (3.3).

Material	$\rho \left[ kg/m^3 \right]$	Cp [J/kg.K]	K[W/m.K]	$\mu[kg/m.s]$	$\beta[1/K]$
Aire	Tabla(3.2)	1006.43	0.0242	$1.7894x10^{-5}$	Tabla(3.2)

Cuadro 3.3: Propiedades del aire en el modelo

#### Condiciones de los volúmenes (Cell zone conditions)

En esta sección del software es donde se pueden configurar opciones referentes a zonas volumétricas. Para modelos simples probablemente nunca se haga uso de ellas, pero se hará uso de ellas si se tienen múltiples volúmenes en el modelo con diferentes materiales y diferentes modelos en cada uno (regiones sólidas y regiones fluidas).

Para el presente caso de estudio es bien sabido que hay una generación de calor en la zona volumétrica de la celda solar. Esta energía es dependiente de la radiación solar directa, entonces, para los análisis se introdujeron valores acordes a los valores típicos en la región que van de 600, 800, 1000 y  $1100W/m^2$ . Esta generación de calor causada por la radiación solar concentrada es descrita en la sección (2.11).

En el software se debe añadir esta generación de calor como una función justo como se muestra en la figura (3.25).

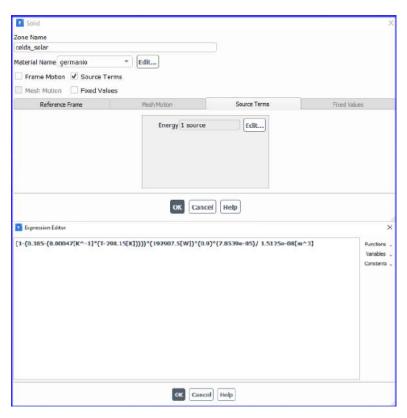


Figura 3.25: Función de generación de calor

#### Condiciones de frontera

La solución de las ecuaciones diferenciales depende de las condiciones iniciales y de las condiciones de frontera, las primeras especifican los valores iniciales del dominio en el tiempo inicial t=0. Las segundas se refieren a los valores que toman los campos en las fronteras de los dominios. Los tipos de condiciones de frontera mas utilizados son de dos tipos:

- Condición de frontera tipo Dirichlet: Es en la cual se especifica el valor de la función sobre la frontera o contorno del dominio.
- Condición de frontera de Von Neumann: Es en la cual se especifica el valor de la derivada de la función sobre la frontera o contorno del dominio.

En la figura (3.26) se esquematizan los casos de estudio que fueron analizados en el presente trabajo. El inciso a) muestra las condiciones de frontera utilizadas para cuando se definió una velocidad de viento de 0m/s, debido a los principios de la convección natural, se configuro la presión atmosférica  $(P_{atm}=102.5KPa)$ en todas las paredes del dominio fluido. Debido a que el presente caso de estudio es efectuado para un sistema que se encontrará funcionando en el municipio de Aguascalientes, se considera la presión atmosférica dada por la altura al nivel del mar de la región.

El caso b) se consideraron velocidades de viento de 1m/s y 4m/s, es por esta razón que se establecen velocidades de entrada y de salida en la región fluida.

En ambos casos se establece la generación de calor en la celda solar.

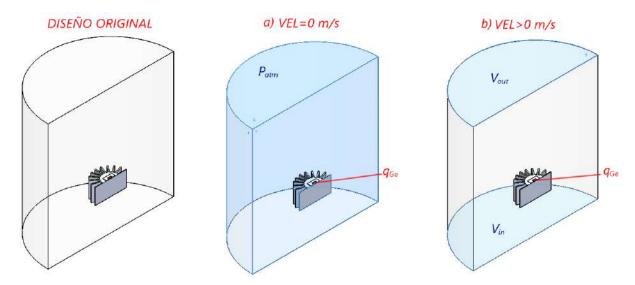


Figura 3.26: Condiciones de frontera en los diferentes casos de estudio

#### Métodos de solución

Para estimar el rol de la presión se hace uso del algoritmo de acople presión-velocidad SIMPLE Presto! el cual es descrito en la sección (2.8). Se hace uso de un esquema de segundo orden upwind descrito en la sección (2.7), para estimar la cantidad de movimiento, la energía cinética turbulenta, la tasa de disipación de energía cinética turbulenta y la energía. Las configuraciones para los métodos de solución pueden observarse en la figura (3.27).

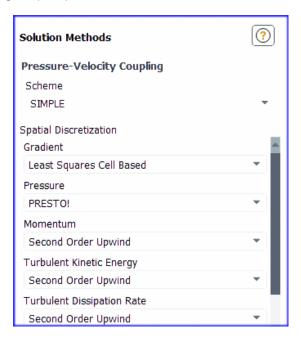


Figura 3.27: Configuración de los métodos de solución

#### Información de la convergencia

Debido a que métodos iterativos son utilizados para la solución de un sistema de ecuaciones algebraicas, se debe tener presente que cuando la solución del problema tiende a converger, ésta se aproxima de manera asintótica a la solución de la EDP. También si el proceso iterativo no diverge, la solución numérica ya no cambia después de cierto número de iteraciones y no permite obtener una mejor de los resultados hacia la solución del problema. Es por esto que, es necesario establecer un criterio de convergencia del proceso iterativo a partir del cual se considera la solución suficientemente convergente. Es importante establecer un buen criterio de convergencia, de lo contrario se podría generar una fuente de error debido a una solución no convergida adecuadamente.

El error ocasionado debido a un mal criterio de convergencia es detallado en el capitulo (2.3.2). En la figura (3.28) se puede observar el comportamiento de los residuales a lo largo de las iteraciones realizadas en la simulación. Los distintos colores representan cada uno de los residuales para cada parámetro. La correspondencia de colores y el criterio de convergencia para cada residual se representa en la tabla (3.4).

Parámetro físico	Color	Criterio de convergencia
Continuidad	Negro	$1x10^{-3}$
Velocidad-x	Rojo	$1x10^{-3}$
Velocidad-y	Verde	$1x10^{-3}$
Velocidad-z	Azul	$1x10^{-3}$
Energía	Cyan	$1x10^{-6}$
Energía cinética turbulenta (k)	Magenta	$1x10^{-3}$
Tasa de disipación de energía cinética turbulenta $(\epsilon)$	Amarillo	$1x10^{-3}$

Cuadro 3.4: Representación de los residuales por color

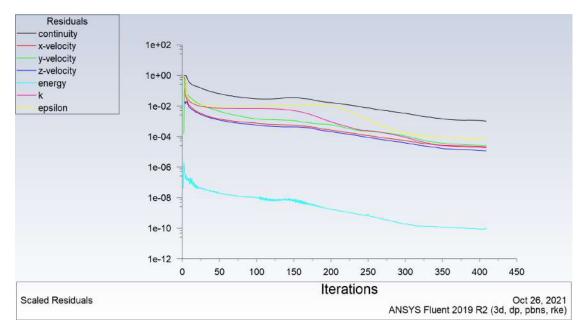


Figura 3.28: Residuales a la misma escala

En la figura (3.28) se puede observar que al residual que le toma el mayor número de iteraciones el converger es a la continuidad, ya que le toma 416 iteraciones alcanzar la convergencia.

Uno de los residuales a los que se le prestó mayor atención debido al fenómeno físico simulado es a la conservación de la energía, es por esto que se fue más estricto en su criterio de convergencia. Este residual alcanzó  $1x10^{-10}$  a las 416 iteraciones.

## 3.4. RECURSO SOLAR, TEMPERATURA AMBIENTE Y VELOCIDAD DEL VIENTO

Los valores de DNI típicos son obtenidos con ayuda del software SAM modeler, descrito en la sección (3.2). En la figura (3.29) se puede apreciar la caracterización del recurso solar a partir de los datos del año meteorológico típico (TMY, por sus siglas en ingles) en el municipio de Aguascalientes en el estado de Aguascalientes México. Los valores climatológicos son obtenidos a partir de la base de datos de SAM. También se muestra un histograma de la distribución de los valores de la DNI y la curva en color negro representa la distribución de frecuencia acumulada (CDF) de la DNI. En el eje horizontal se observan los intervalos de DNI.

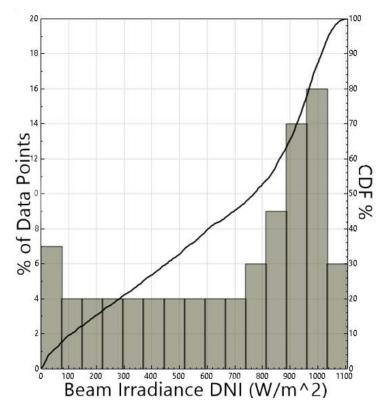


Figura 3.29: Distribución de frecuencias de la radiación solar directa en Aguascalientes, Ags. México obtenidos a partir del TMY con el software SAM

Para las simulaciones fueron utilizados valores de 600, 800, 1000 y 1100  $W/m^2$  debido a que estos son los valores más frecuentes a lo largo del año, además se consideró el valor máximo de  $1100W/m^2$  por ser el valor más crítico durante la operación de la celda solar ya que es el caso cuando más se generara calor.

Del mismo modo en la figura (3.30) es posible observar ahora la caracterización de la temperatura ambiente obtenido a partir del TMY para el municipio de Aguascalientes México. La curva en color negro representa la distribución acumulada. En el eje horizontal se puede observar los valores de temperatura en el ambiente en  $^{\circ}C$  y en el eje vertical el porcentaje de datos.

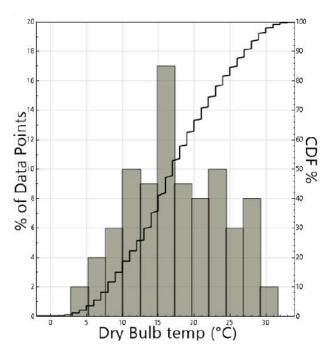


Figura 3.30: Temperatura ambiente típica en Aguascalientes, Ags. México obtenida con el software SAM

Para las simulaciones se utilizaron valores de 10, 20, 30 y 40  $^{\circ}C$  debido a que estos son los valores de mayor frecuencia a lo largo del año, además para este caso, el escenario más significativo para el análisis es cuando se presenta la temperatura máxima del ambiente.

Otra variable clave, es la velocidad del viento debido a que la transferencia de calor por convección es función de esta. Para el caso de la velocidad del viento, en la figura (3.31) se puede observar su caracterización estadística a partir del TMY.

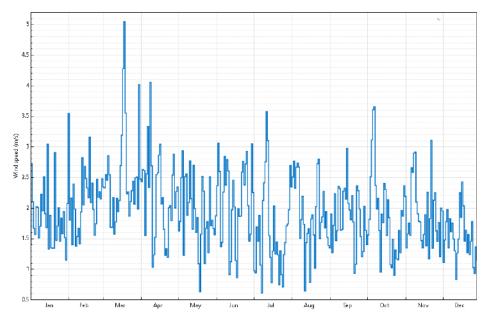


Figura 3.31: Velocidades del viento típicas en Aguascalientes, Ags. México obtenidas con el software SAM

En base a los resultados obtenidos, se determinó que para las simulaciones fueron utilizados valores de velocidad de viento de 0,1 y 4m/s.

Para identificar los valores de inclinación bajo los cuales el disipador de calor estará operando con mayor frecuencia, de igual modo se realizó un análisis con el software SAM Modeler. Dicho software nos permite conocer el ángulo de inclinación y de azimuth a la cual trabaja el seguidor solar para una ubicación en particular. De ahí que en la figura (3.32) se muestre la distribución de frecuencias de la inclinación del seguidor solar durante todo el año. Como se puede observar en la práctica el seguidor trabaja desde los 85°, correspondientes al amanecer y al atardecer. Y de ahí el valor mínimo de altura registrado es de 12°. El ángulo de referencia para estas mediciones es considerado entre suelo y el área efectiva del seguidor solar.

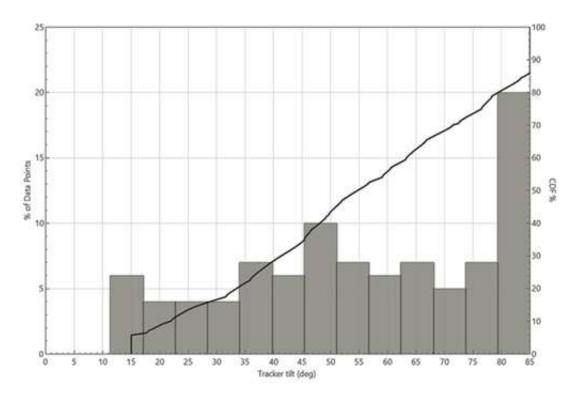


Figura 3.32: Distribución de frecuencias del ángulo de inclinación respecto a la horizontal de un seguidor solar de dos ejes ubicado en Aguascalientes México

En la figura (3.33) se observa la relación entre los valores de DNI respecto al ángulo de inclinación respecto a la horizontal del seguidor para todo un año de operación. De la figura se puede observar que valores superiores a  $1000W/m^2$  únicamente son posibles en horarios cuando el seguidor al menos está ya con una inclinación de  $60^\circ$ . De igual modo se observa que la inclinación mínima para un seguidor ubicado en esta región es de  $15^\circ$ , para el verano.

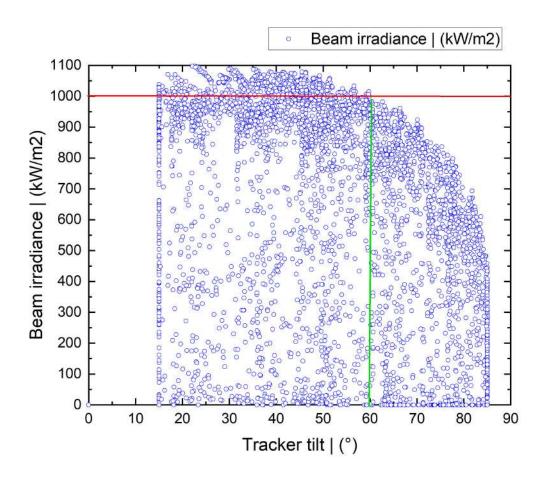


Figura 3.33: Relación entre los valores de DNI y el ángulo de inclinación respecto a la horizontal del seguidor solar

## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS**

En esta sección se presentan los resultados de la verificación, de la elección de la condición de frontera dada por la caracterización del sistema CPV y de las aproximaciones realizadas con simulación numérica. En esta sección también se reportan los resultados del rendimiento del disipador de calor propuesto.

#### 4.1. VERIFICACIÓN

El proceso de verificación implica la cuantificación de los errores que se tienen en el modelo matemático resuelto, errores de codificación de la computadora y los errores del usuario.

El error de convergencia iterativo se cuantificó investigando los efectos de variación sistemática de los criterios de truncamiento para todos los residuos en cantidades objetivo de interés. Específicamente se realizó la réplica de un artículo científico para poder comparar las variaciones de los criterios de truncamiento. El error de discretización fue cuantificado inicialmente con las variaciones obtenidas entre nuestro modelo y el modelo replicado.

El trabajo seleccionado fue el elaborado por Xiaungrui Meng et.al. (Meng et al., 2018), en el cual muestra el efecto del ángulo de montaje en el rendimiento de un disipación de calor de aleta recta sometido a condiciones de convección natural con aire. Este trabajo consiste en una simulación numérica y una evaluación experimental. Meng et. al. encontró que el disipador de calor logra una mejor tasa de enfriamiento cuando se monta a un ángulo de  $90^{\circ}$ , mientras alcanza el poder de enfriamiento mínimo cuando es montado a  $15^{\circ}$  que es un 6.88% mas bajo que el de  $90^{\circ}$ .

#### Arreglo experimental

Los componentes principales del banco de pruebas utilizado en el trabajo de Meng (Meng et al., 2018) incluyen: una fuentes de poder de corriente directa JP1505D, una placa calefactora de corriente directa, un adquisidor de datos AGILENT, termopares tipo K y algunas resistencias detectoras de temperatura (RTDs) PT100. El esquema general del banco de prubas se muestra en la figura(4.1).

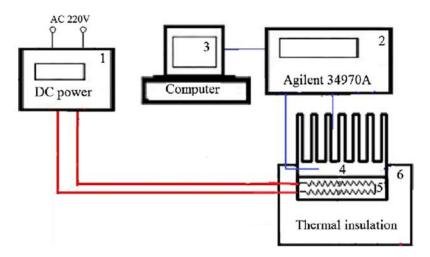


Figura 4.1: Arreglo experimental de Meng : (1)Fuente de poder; (2)Adquisidor de datos Agilent 34970A; (3)Computador; (4)Disipador de calor; (5) Resistencia eléctrica (6)Aislante térmico (Meng et al., 2018)

El sistema experimental es ubicado en un espacio amplio y aislado de la intemperie sin la interferencia externa para lograr las condiciones ideales y controladas para la convección natural. Un soporte especial fue diseñado para garantizar que el disipador de calor pueda girar libremente  $360^{\circ}$  como se muestra en la figura (4.2).

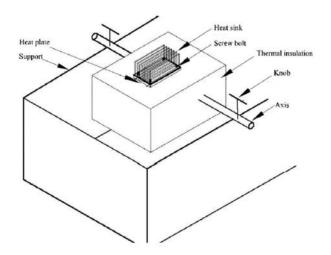


Figura 4.2: Esquema del soporte (Meng et al., 2018)

Para la adquisición de datos se colocaron una serie de termopares en diferentes puntos de muestreo

sobre el disipador de calor, como se ilustra en la figura (4.3).

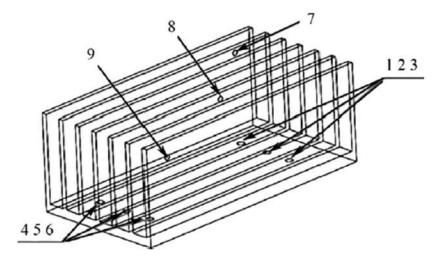


Figura 4.3: Arreglo de los puntos de las mediciones. Puntos 1-6 termopares tipo K; Puntos 7-9 PT100 RTDs.

#### Modelo de la simulación numérica

La simulación CFD se llevó a acabo utilizando la simplificación de geometría. La zona de trabajo (dominio computacional) se muestra en la figura (4.4) y sus dimensiones son 900mm x 456mm x 330mm, por la forma de la geometría regular (Meng et al., 2018) adopta un mallado hexaédrico, la simulación se llevó a cabo utilizando diferentes tipos de mallado. La temperatura promedio en las superficies de las aletas es monitorizada y analizada.

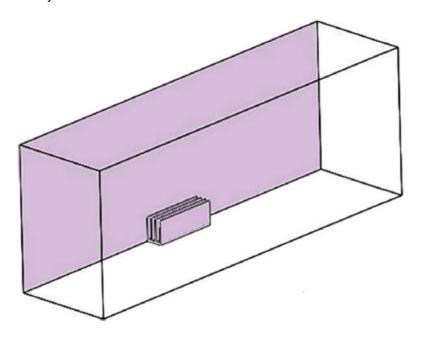
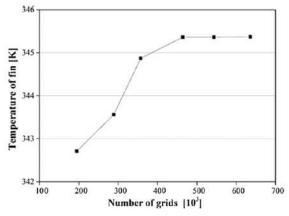
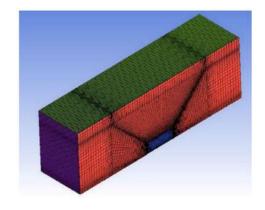


Figura 4.4: Dominio de la simulación elaborada por (Meng et al., 2018)

Los resultados del análisis de sensibilidad de malla se muestran en la figura (4.5a), donde se puede observar que a partir de 464,058 elementos, el resultado ya no se ve afectado por el número de nodos

en la malla. El modelo óptimo de mallado se muestra en la figura(4.5b).





(a) Análisis de independencia de malla elaborado por (Meng et al., 2018)

(b) Modelo del mallado final realizado por (Meng et al., 2018)

Figura 4.5: Mallado obtenido por (Meng et al., 2018)

#### Resultados de la verificación

Las mediciones de temperatura en las aletas reportados por Meng (Meng et al., 2018) se muestran en la tabla (4.1) cuando el disipador de calor es montado a una inclinación de  $0^{\circ}$ 

Heating power (W)	Temperatura en los puntos (°C)								Temp. prom(°C)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
5	24	22	24	24	23	22	17	20	18	23.2
10	33	35	35	34	34	34	30	33	30	34.2
20	47	48	46	47	47	47	41	45	42	47
30	52	53	53	51	52	52	48	50	47	52.2
40	62	61	61	61	62	63	57	60	55	61.7
50	67	68	67	67	70	70	64	69	64	68.2
60	82	80	80	80	84	83	72	76	74	81.5
70	87	88	86	86	87	88	81	84	82	87
80	92	92	92	93	94	94	86	91	85	92.8

Cuadro 4.1: Temperatura de las aletas en los puntos medidos experimentalmente (Meng et al., 2018)

Para verificar el modelo matemático se realizó una réplica del sistema analizado por Meng et. al. (Meng et al., 2018). En la gráfica (4.6), se pueden observar los resultados obtenidos por Meng de manera experimental en color verde, los resultados obtenidos por Meng de manera numérica en color rojo y los resultados de la simulación implementada por nuestro equipo a manera de réplica, la cual se grafica en color azul. Los resultados consideran los efectos en el coeficiente de transferencia de calor como función de la variación de la intensidad del calentamiento para cuando el disipador esta montado con una inclinación de  $0^{\circ}$ .

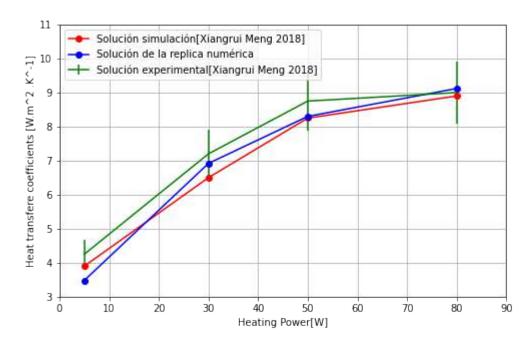
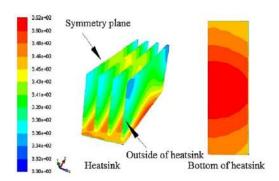
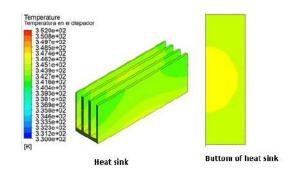


Figura 4.6: Variación del coeficiente de transferencia de calor por convección con respecto al poder de calentamiento(Resultados simulados por(Meng et al., 2018) comparados con una replica elaborada)

En la figura (4.7a) se muestran los contornos de temperatura del disipador obtenidos tanto por (Meng et al., 2018) y son comparados con los obtenidos por este equipo de trabajo en la figura (4.7b). Esto con el propósito de poder verificar nuestra metodología de solución. Las variaciones de temperatura se le atribuyen a una incertidumbre de la densidad del aire utilizada en el trabajo de Meng.





- (a) Resultados de simulación obtenidos por (Meng et al., 2018) con un ángulo de inclinación de  $0^{\circ}$
- (b) Resultados de la simulación para verificación con ángulo de inclinación de  $0^{\circ}$  y un calentamiento de 50W

Figura 4.7: Comparación de contornos de temperatura obtenidos de manera numérica por (Meng et al., 2018) y contornos de temperatura para la verificación de este trabajo

Debido a que el autor efectuó variaciones en la inclinación de montura para evaluar el desempeño térmico del disipador, reportó sus resultados en términos de variación de resistencia térmica. En la figura (4.8) se pueden observar los resultados reportados por Meng (Meng et al., 2018) en líneas continuas, las variaciones del color representan las variaciones de la inclinación. En líneas discontinuas es posible observar las variaciones de los resultados realizados en la replica de la simulación.

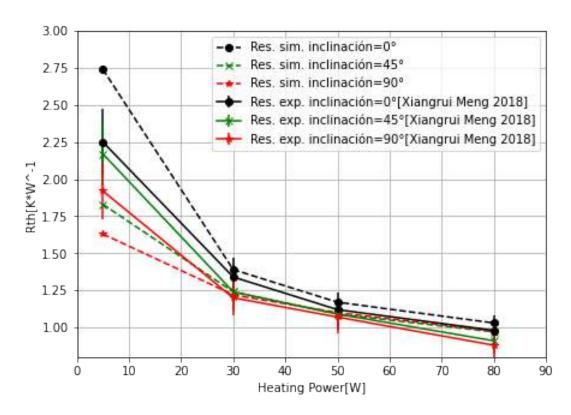


Figura 4.8: Variación de la resistencia térmica con respecto a la inclinación de montura (Resultados por (Meng et al., 2018) comparados con la replica elaborada)

Una buena manera de comparar los resultados obtenidos con la replica de la simulación, es comparando los contornos de temperatura y las lineas de corriente del fluido. En la figura (4.9) se puede observar en la parte superior de la figura los contornos de temperatura y lineas de corriente obtenidos por (Meng et al., 2018) para cuando el disipador se encuentra operando a  $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  y  $90^{\circ}$ . En la parte inferior de la figura se puede observar los contornos de temperatura y lineas de corriente de los resultados obtenidos en la replica de la simulación para la verificación.

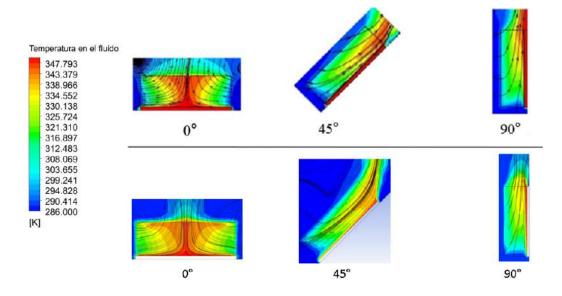


Figura 4.9: Contornos de temperatura y lineas de corriente de aire obtenidos por (Meng et al., 2018) mostrados en la parte superior y contornos de temperatura y lineas de corriente obtenidos en la replica de la simulación para verificación se muestran en la parte inferior

Entonces con las comparaciones anteriores se concluye que la metodología que se utilizó para implementar las simulaciones del sistema es el adecuado, teniendo certeza de que se está resolviendo de manera correcta el fenómeno de la convección natural y haciendo las consideraciones pertinentes para obtener aproximaciones confiables.

## 4.2. CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DEL SISTEMA DE CONCENTRA-CIÓN SOLAR

#### Factor de concentración geométrico

El factor de concentración geométrico  $C_g$  se determinó de manera experimental al cuantificar el área de captación  $(A_c)$ , y el área de la superficie absorbedora  $(A_a)$ , es decir, la celda solar. Es sabido que  $A_c = 268.8mm * 268.8mm = 72,253.44mm^2$  y también que  $A_a = 100mm^2$  entonces:

$$C_q = 72,253.44mm^2/100mm^2 = 722.5$$
 (4.1)

 $C_g$  es el factor de concentración ideal, sin embargo, el factor de concentración real es atenuado por la eficiencia óptica del sistema, la cual se determinó de manera experimental.

#### Eficiencia óptica

La eficiencia óptica $(\eta_{opt})$  Está dada por la relación entre el factor de concentración geométrico  $(C_g)$  y el factor de concentración real que es medido experimentalmente  $(C_r)$  entonces:

$$\eta_{opt} = C_q/C_r \tag{4.2}$$

El factor de concentración real  $(C_r)$  esta definido por la relación entre el flujo de radiación directa incidente DNI y el flujo registrado en la zona focal de la lente por el sensor gardon, el cual será nombrado flujo concentrado  $(F_{conc})$ . Los valores de DNI se obtuvieron de la estación solarimétrica ubicada en CIO Unidad Aguascalientes.

La campaña de experimentación en el presente trabajo fue realizada para la obtención del  $C_r$ , el montaje, los componentes y el aparato experimental son descritos en la sección (3.1).

Los experimentos fueron realizados los días 20 de marzo, 22 de abril y 30 de abril del año 2021, se realizaron mediciones cada segundo para ciertos rangos de horarios en estos días.

La eficiencia más alta obtenida en los experimentos, fue una obtenida el día 20 de marzo del año 2021,

a las 12:01:11 pm, debido a que se obtuvo una medición de DNI= $763W/m^2$ , un  $F_{conc}=493,772W/m^2$ , el valor de  $C_r$  fue de 647.14 y  $\eta_{opt}=0.89$ .

Se realizaron 724 mediciones de flujo radiativo para obtener la eficiencia, la media fue de  $\eta_{opt}=0.86$ , la desviación estándar muestral de S=0.04622.

En la tabla(4.2) se presentan los parámetros de interés del sistema de concentración CPV obtenidos con la campaña experimental.

Factor	Símbolo	Valor
Factor de concentración geométrico	$C_g$	722.5
Eficiencia óptica	$\eta_{opt}$	0.89
Desv. Est. Muestral	S	0.04622

Cuadro 4.2: Resultados de la caracterización del sistema de concentración solar

Donde  $C_g$  y  $\eta_{opt}$ , son requeridos para conocer el flujo incidente sobre la celda solar. Sin embargo, el flujo incidente también es función de una variable dinámica a lo largo del dia y de la época del año. de ahí que sea necesario la evaluación de la variabilidad de la DNI para obtener los intervalos de simulación mas apropiados acorde a las condiciones reales.

#### 4.3. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Para este análisis, 80 simulaciones fueron llevadas a cabo con el fin de evaluar el desempeño del disipador bajo distintas condiciones climáticas típicas del Estado de Aguascalientes. Las variaciones realizadas fueron descritas en las secciones anteriores, esta sección tiene como objetivo representar los resultados obtenidos.

En las figuras (4.10, 4.11) se presentan los resultados de temperatura de la celda solar obtenidos en la simulación cuando la velocidad del viento es de 1m/s y 4m/s. Se evaluó el efecto de la variación de la temperatura ambiente y la intensidad de la DNI; mientras que, en ambos casos se mantuvieron constantes el factor de concentración solar en 722.5, y la eficiencia óptica en 0.89. El ángulo de inclinación del disipador de calor es de  $90^\circ$  (referenciado en la horizontal y el eje del disipador de calor) y la dirección del viento es de forma ascendente. En la figura, la línea punteada en color azul representa las simulaciones para una DNI= $1100W/m^2$ , la línea negra representa DNI= $1000W/m^2$ , la linea verde representa DNI= $800W/m^2$ , la línea roja representa una DNI= $600W/m^2$  y los resultados son representados como la temperatura de operación de la celda solar los cuales se representan en el eje vertical. La temperatura de la celda solar es definida como el promedio de temperatura de los volúmenes de control que la integran.

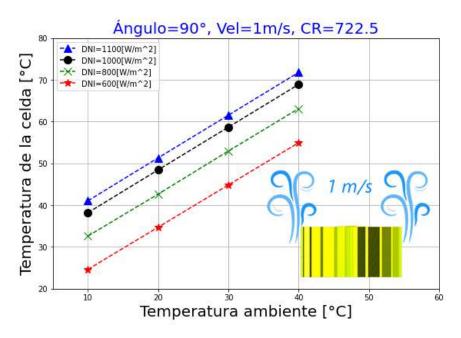


Figura 4.10: Resultados de las simulaciones con una velocidad del viento de 1m/s

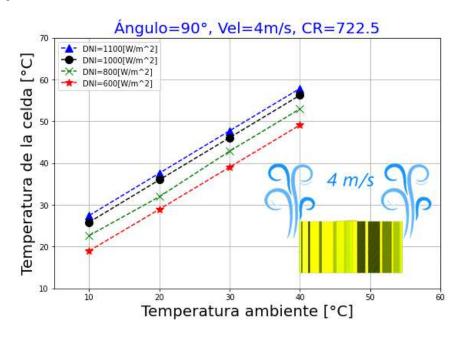
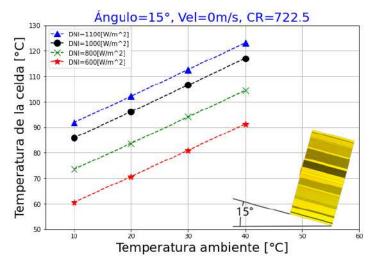
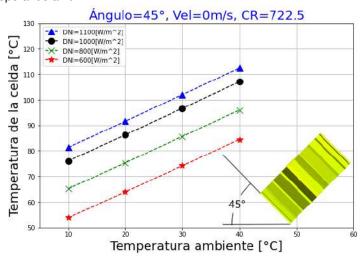


Figura 4.11: Resultados de las simulaciones con una velocidad del viento de 4m/s

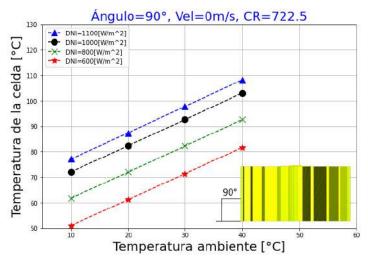
Las figuras (4.12a,4.12b,4.12c) muestran los resultados de las simulaciones realizadas para una velocidad de viento de 0m/s, un factor de concentración de 722.5 y variando el ángulo de operación en el disipador a  $15^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$  respectivamente. En el eje horizontal se observa la variación de temperatura en el ambiente, la linea punteada en color azul representa las simulaciones para un valor de  $1100W/m^2$  de radiación solar directa, la linea negra representa  $\mathrm{DNI}=1000W/m^2$ , la linea verde representa  $\mathrm{DNI}=800W/m^2$ , la linea roja representa una  $\mathrm{DNI}=600W/m^2$  y los resultados son representados como la temperatura de operación de la celda solar los cuales se representan en el eje vertical.



(a) Resultados de las simulaciones con el disipador operando a  $15^{\circ}$ 



(b) Resultados de las simulaciones con el disipador operando a  $45^{\circ}$ 



(c) Resultados de las simulaciones con el disipador operando a  $90^{\circ}$ 

Figura 4.12: Efecto de la inclinación del disipador de calor sobre la temperatura promedio operación de la celda solar, a) $15^{\circ}$ , b) $45^{\circ}$  y c) $90^{\circ}$  Se varían la temperatura ambiente y la intensidad de la radiación solar directa. La velocidad de viento y el factor de concentración se mantienen constantes en 0m/s y 722.5 soles respectivamente

Si se analizan los resultados de las figuras (4.12a, 4.12b y 4.12c) se puede apreciar que cuando el disipador de calor está operando a  $15^{\circ}$ , se tiene una temperatura mayor de operación de la celda solar que cuando el disipador se encuentra a  $90^{\circ}$ , esto se atribuye a una zona de estancamiento de aire caliente entre las aletas del disipador. Se le llama zona de estancamiento ya que la velocidad del fluido en esta zona es de 0m/s mientras que la temperatura del aire en esta zona ronda los  $76^{\circ}C$ , la cual es alta si se compara con otras zonas. En la figura (4.13a) se pueden apreciar los contornos de temperatura del aire en las regiones cercanas al disipador, en la figura (4.13b) se pueden apreciar las lineas de corriente de aire para cada una de las inclinaciones que se analizaron en las simulaciones. Estos análisis representan una condición crítica, ya que se considera una DNI= $1100W/m^2$ , un CR=722.5, una  $\eta_{opt}=0.89$  y se supone una velocidad de viento igual a 0m/s. A pesar de suponer esta velocidad de viento, se aprecian velocidades en las líneas de corriente debido a la convección natural del aire en el eje vertical a causa del diferencial de densidades, la presión atmosférica y la fuerza gravitatoria.

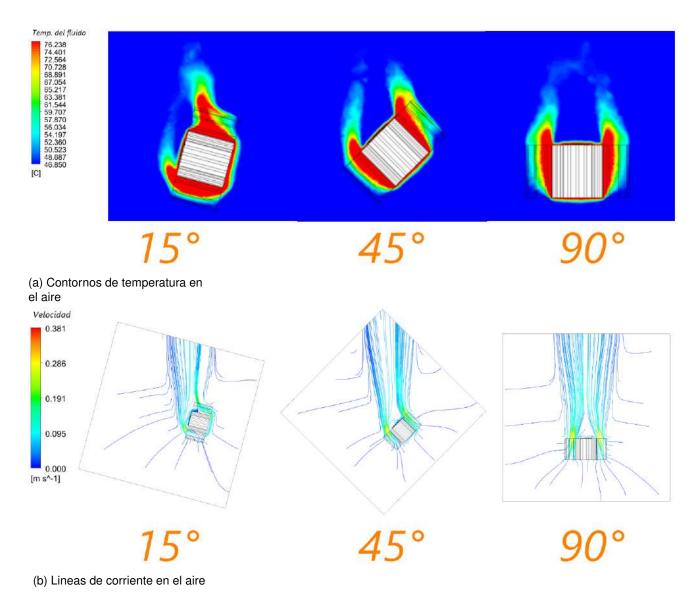


Figura 4.13: Contornos de temperatura y lineas de corriente variando la inclinación del ángulo de operación cuando se considera DNI= $1100W/m^2$ , CR=722.5,  $\eta_{opt}=0.89$  y  $V_{viento}=0m/s$ 

Si se establecen condiciones críticas de operación cuando las condiciones del entorno hacen trabajar a la celda solar a su temperatura mas alta, estas serían de la siguiente manera. En la figura(4.14) se muestran los contornos de temperatura de la celda solar y el disipador de calor, para un valor de  ${\rm DNI=}1100W/m^2$ ,  ${\rm CR=}722.5$ ,  $\eta_{opt}=0.89$ ,  $T_{amb}=40^{\circ}C$ , una inclinación del disipador de  $15^{\circ}$  y una velocidad del viento de 0m/s.

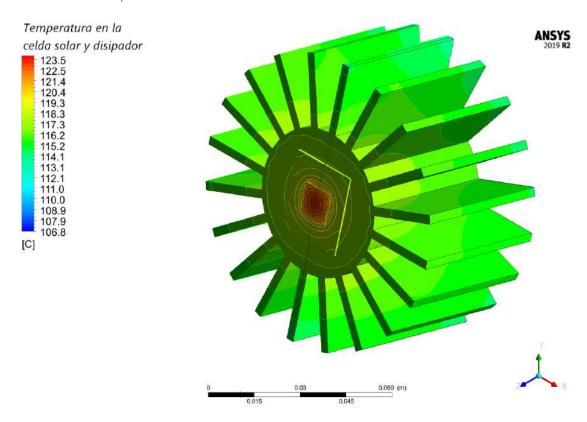


Figura 4.14: Contornos de temperatura de la celda solar y el disipador de calor operando en condiciones críticas

El resultado mostrado en la figura (4.14) sería el caso extremo, sin embargo, no es el más frecuente. Por ello además conviene analizar el caso donde se evalúen las condiciones que están presentes con mayor frecuencia. Para ello se pueden considerar condiciones típicas. Por lo tanto la figura(4.15) nos muestra los contornos de temperatura de la celda solar y el disipador de calor, para obtener estos contornos de temperatura se consideró una  ${\rm DNI=1000}W/m^2$ ,  ${\rm CR=722.5},~\eta_{opt}=0.89,~T_{amb}=20^{\circ}C$ , una inclinación del disipador de  $90^{\circ}$  (referenciado desde la horizontal y el eje del disipador) y una velocidad del viento de 1m/s.

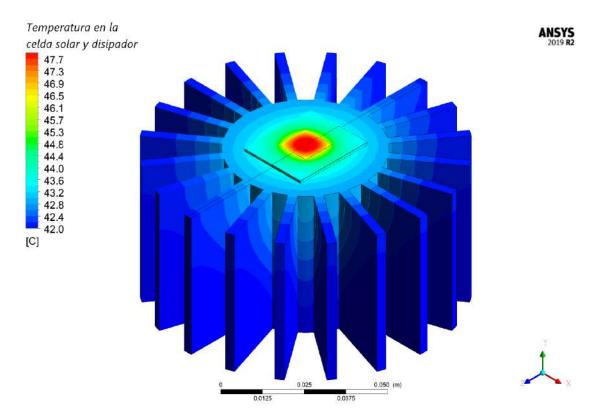


Figura 4.15: Contornos de temperatura de la celda solar y el disipador de calor operando en condiciones más frecuentes

Por otra parte, también se puede analizar el caso cuando las condiciones del entorno son las más favorables para el desempeño del disipador de calor. La figura(4.16) nos muestra los contornos de temperatura de la celda solar y el disipador de calor, para obtener estos contornos de temperatura se considero una DNI= $800W/m^2$ , CR=722.5,  $\eta_{opt}=0.89$ ,  $T_{amb}=10^{\circ}C$ , una inclinación del disipador de  $90^{\circ}$  y una velocidad del viento de 4m/s.

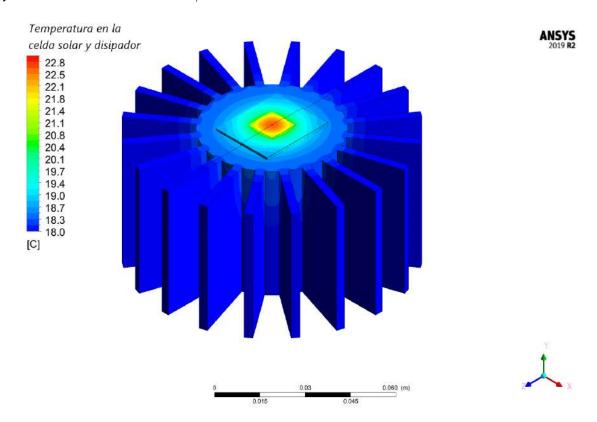


Figura 4.16: Contornos de temperatura de la celda solar y el disipador de calor operando en condiciones favorables

Con el fin de evaluar el rendimiento de la geometría del disipador propuesta, se realizaron 5 simulaciones replicando las condiciones de un estudio realizado por Hesham Zaghloul et.al. (Zaghloul et al., 2021). Este equipo de trabajo analiza un disipador de calor de placa plana y aletas rectas suponiendo una  $\text{DNI}=1,000W/m^2$ , una velocidad del viento de 1m/s, un CR=1,000 y realizan variaciones en la temperatura del ambiente y la longitud de las aletas. Para hacer la comparación se tomaron estas condiciones atmosféricas y se tomó la longitud de las aletas de 50 mm. Los resultados reportados por(Zaghloul et al., 2021) y los resultados obtenidos en la replica de sus condiciones de estudio, pueden ser observados en la figura (4.17).

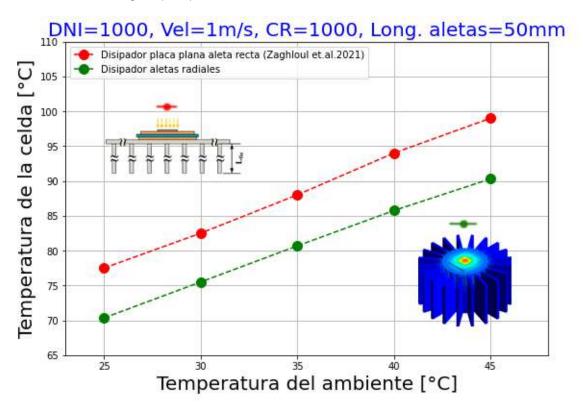


Figura 4.17: Comparación entre la geometría del disipador propuesta y el caso de referencia(Zaghloul et al., 2021)

Sin embargo, con la comparación que se realiza en la figura (4.17), se podría pensar que el disipador de aletas radiales tiene cierta ventaja, ya que este cuenta con 20 aletas, mientras que el disipador de aletas rectas únicamente cuenta con 11. La figura (4.18) nos muestra un caso particular de simulaciones realizadas por (Zaghloul et al., 2021) para distintas longitudes de aletas en su disipador, con lo cual la masa de cada una de las distintas geometrías varía. Aunado a estos resultados, se añaden los resultados obtenidos con el disipador de aletas radiales. En el eje vertical en color verde se muestra la masa que tienen estos disipadores, y en el eje vertical azul, se muestran las temperaturas de operación de la celda solar haciendo uso de cada uno de los disipadores analizados en la figura. El disipador con el mejor desempeño es el de aletas rectas de longitud de 150 mm sin embargo esto representa una cantidad de masa grande, ya que pesa casi 1 kg, pero si se toma de referencia el rendimiento igual entre algún disipador de aletas rectas y al disipador de aletas radiales (Cuando la temperatura de operación de la celda es de 71°C) se puede observar que el diferencial de masa es de 184.93 gramos(Aletas radiales y aletas rectas con longitud de 100 mm) siendo el disipador de aletas radiales el que cuenta

con la menor cantidad de masa, lo cual suma valor en este tipo de sistemas.

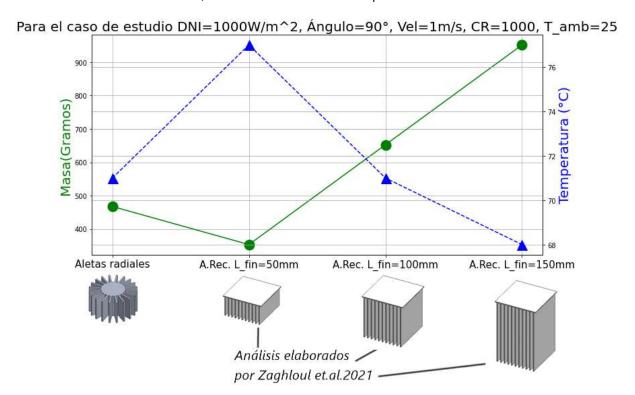


Figura 4.18: Comparación entre algunos análisis realizados por (Zaghloul et al., 2021)para disipadores de aletas rectas y el disipador de aletas radiales propuesto

#### **CAPÍTULO 5**

# CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

#### 5.1. CONCLUSIONES

En el presente trabajo de Tesis se desarrolló un modelo de transferencia de calor entre un disipador de calor de aletas radiales y una celda solar de triple unión sometida a concentración solar, esto con el fin de predecir su temperatura de operación bajo diferentes condicione de intensidad de flujo, temperatura ambiente, inclinación del disipador y velocidad del viento. Predecir la temperatura de la celda solar sometida a alta concentración solar es fundamental ya que por un lado se debe garantizar no superar la temperatura que dañe de manera definitiva la celda y por otro lado asegurar la operación dentro de un intervalo de temperatura bajo para no afectar demasiado su eficiencia de conversión. La geometría propuesta en este trabajo, un disipador de aletas radiales que no ha sido analizado previamente para sistemas CPV. Los resultados muestran que la geometría es eficiente para mantener operando por debajo de los  $50^{\circ}C$  bajo condiciones climáticas típicas del Estado de Aguascalientes y por debajo de los  $125^{\circ}C$  aún en un escenario crítico; lo cual cumple con los requerimientos del fabricante de la celda. Con fines comparativos se contrastó el desempeño del disipador propuesto con un trabajo recientemente reportado en la literatura (Zaghloul et al., 2021) obteniéndose que el disipador de calor propuesto en este trabajo tuvo una mejora en el rendimiento del 10.7%.

Con respecto al efecto que tiene el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre la celda solar, el presente estudio nos permite observar un diferencial de temperatura de aproximadamente el  $10\,\%$  entre una operación en  $15^\circ$  y  $90^\circ$  de inclinación con respecto a la horizontal y con una velocidad del viento =0m/s. De acuerdo al estudio realizado se encontró que el disipador de calor tiene un mejor rendimien-

to cuando el sistema se encuentra operando verticalmente.

En este trabajo se llevaron a cabo más de 80 simulaciones bajo diferentes consideraciones evaluando los efectos de la intensidad de flujo, velocidad del viento, temperatura ambiente e inclinación del disipador. De los resultados se encontró que la temperatura máxima registrada fue de  $125^{\circ}C$  mientras que en la mayoría de los casos la temperatura de la celda solar se mantuvo entre  $37^{\circ}C$  y  $68^{\circ}C$ . Con lo cual es posible concluir que el disipador de calor propuesto es apropiado para una aplicación CPV de 722.5 soles de concentración. Adicionalmente, se realizó un estudio estocástico de condiciones climáticas obtenidas del año meteorológico típico del estado de Aguascalientes, México, esto con el objetivo de representar de manera realista las condiciones ambientales en el modelo de simulación. Las variables que se consideraron fueron velocidad del viento, temperatura ambiente, DNI y ángulo de inclinación del seguidor solar. También se llevó a cabo una campaña experimental con el objetivo de obtener la eficiencia óptica y el factor de concentración solar de un sistema de concentración CPV de lentes de Fresnel, para posteriormente inyectarlas al modelo de simulación como condiciones de frontera.

#### 5.2. TRABAJO A FUTURO

Se recomienda realizar una campaña experimental exhaustiva para incrementar la certeza de los resultados de las simulaciones y cuantificar el porcentaje de error que tienen las simulaciones.

Se recomienda continuar con la optimización de la geometría propuesta, ya que aún es posible evaluar diferentes parámetros como el número de aletas, el espesor, su longitud y su perfil transversal.(Luo et al., 2019)

Se recomienda realizar una comparativa de costos entre el disipador propuesto y los sistemas de enfriamiento comerciales.

### **CAPÍTULO 6**

## **BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS**

### Bibliografía

- Abdo, S., Saidani-Scott, H., Benedi, J., and Abdelrahman, M. (2020). Hydrogels beads for cooling solar panels: Experimental study. *Renewable Energy*, 153:777–786.
- Abo-Zahhad, E. M., Ookawara, S., Radwan, A., El-Shazly, A., El-Kady, M., and Esmail, M. F. (2020). Performance, limits, and thermal stress analysis of high concentrator multijunction solar cell under passive cooling conditions. *Applied Thermal Engineering*, 164:114497.
- Abo-Zahhad, E. M., Ookawara, S., Radwan, A., El-Shazly, A., and ElKady, M. (2018). Thermal and structure analyses of high concentrator solar cell under confined jet impingement cooling. *Energy Conversion and Management*, 176:39–54.
- Aldossary, A., Mahmoud, S., and Al-Dadah, R. (2016). Technical feasibility study of passive and active cooling for concentrator pv in harsh environment. *Applied thermal engineering*, 100:490–500.
- Alemán-Nava, G. S., Casiano-Flores, V. H., Cárdenas-Chávez, D. L., Díaz-Chavez, R., Scarlat, N., Mahlknecht, J., Dallemand, J.-F., and Parra, R. (2014). Renewable energy research progress in mexico: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32:140–153.
- AlFalah, G., Maatallah, T. S., Alzahrani, M., and Al-Amri, F. G. (2020). Optimization and feasibility analysis of a microscale pin-fins heat sink of an ultrahigh concentrating photovoltaic system. *International Journal of Energy Research*, 44(14):11852–11871.
- Alzahrani, M., Baig, H., Shanks, K., and Mallick, T. (2020). Estimation of the performance limits of a concentrator solar cell coupled with a micro heat sink based on a finite element simulation. *Applied Thermal Engineering*, 176:115315.
- Anderson, D., Tannehill, J., and Pletcher, R. (1984). Computational fluid mechanics and heat transfer, hemisphere publ. *Corp., New York*.
- Ansys, I. (2013). Fluent theory guide. ANSYS Inc, USA [(accessed on 27 March 2020)].
- Apostoleris, H., Stefancich, M., and Chiesa, M. (2016). Tracking-integrated systems for concentrating photovoltaics. *Nature Energy*, 1(4):1–8.
- Bellos, E. and Tzivanidis, C. (2020). Solar concentrating systems and applications in greece—a critical review. *Journal of Cleaner Production*, page 122855.

- Blumenfeld, P., Foresi, J., Lang, Y., and Nagyvary, J. (2010). Thermal management and engineering economics in cpv design. *Emcore Corp.*, *Albuquerque*, *NM* (*USA*).
- Chong, K.-K., Lau, S.-L., Yew, T.-K., and Tan, P. C.-L. (2013). Design and development in optics of concentrator photovoltaic system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19:598–612.
- Chorin, A. J. (1968). Numerical solution of the navier-stokes equations. *Mathematics of computation*, 22(104):745–762.
- Chou, T.-L., Shih, Z.-H., Hong, H.-F., Han, C.-N., and Chiang, K.-N. (2012). Thermal performance assessment and validation of high-concentration photovoltaic solar cell module. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2(4):578–586.
- Chow, S., Valdivia, C. E., Wheeldon, J. F., Ares, R., Arenas, O. J., Aimez, V., McMeekin, D., Fafard, S., and Hinzer, K. (2010). Thermal test and simulation of alumina receiver with high efficiency multi-junction solar cell for concentrator systems. In *Photonics North 2010*, volume 7750, page 775035. International Society for Optics and Photonics.
- Cruz, R. and Manuel, P. (2019). Feasibility of flat-plate heat-sinks using microscale solar cells up to 10,000 suns concentrations. *OPENAIRE*.
- Dong, J., Zhuang, X., Xu, X., Miao, Z., and Xu, B. (2018). Numerical analysis of a multi-channel active cooling system for densely packed concentrating photovoltaic cells. *Energy conversion and management*, 161:172–181.
- E.U. Energy Information administration (Abril de 2021). https://www.eia.gov/energyexplained/us-energy-facts/
- Fernández, E. F., Almonacid, F., Rodrigo, P. M., and Pérez-Higueras, P. J. (2018). Cpv systems. In *McEvoy's Handbook of Photovoltaics*, pages 931–985. Elsevier.
- Fesharaki, V. J., Dehghani, M., Fesharaki, J. J., and Tavasoli, H. (2011). The effect of temperature on photovoltaic cell efficiency. In *Proceedings of the 1stInternational Conference on Emerging Trends in Energy Conservation–ETEC, Tehran, Iran*, pages 20–21.
- Gallero, F. J. G., Maestre, I. R., Hemida, H., and Gómez, P. Á. (2019). Practical approaches to assess thermal performance of a finned heat sink prototype for low concentration photovoltaics (lcpv) systems: Analytical correlations vs cfd modelling. *Applied Thermal Engineering*, 156:220–229.
- Gilmore, N., Timchenko, V., and Menictas, C. (2018). Microchannel cooling of concentrator photovoltaics: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90:1041–1059.
- Green, M., Dunlop, E., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., and Hao, X. (2021). Solar cell efficiency tables (version 57). *Progress in photovoltaics: research and app77+ lications*, 29(1):3–15.
- Green, M. A. (2000). Photovoltaics: technology overview. Energy policy, 28(14):989–998.
- Green, M. A., Hishikawa, Y., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., and Ho-Baillie, A. W. (2018). Solar cell efficiency tables (version 52). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 26(7):427–436.

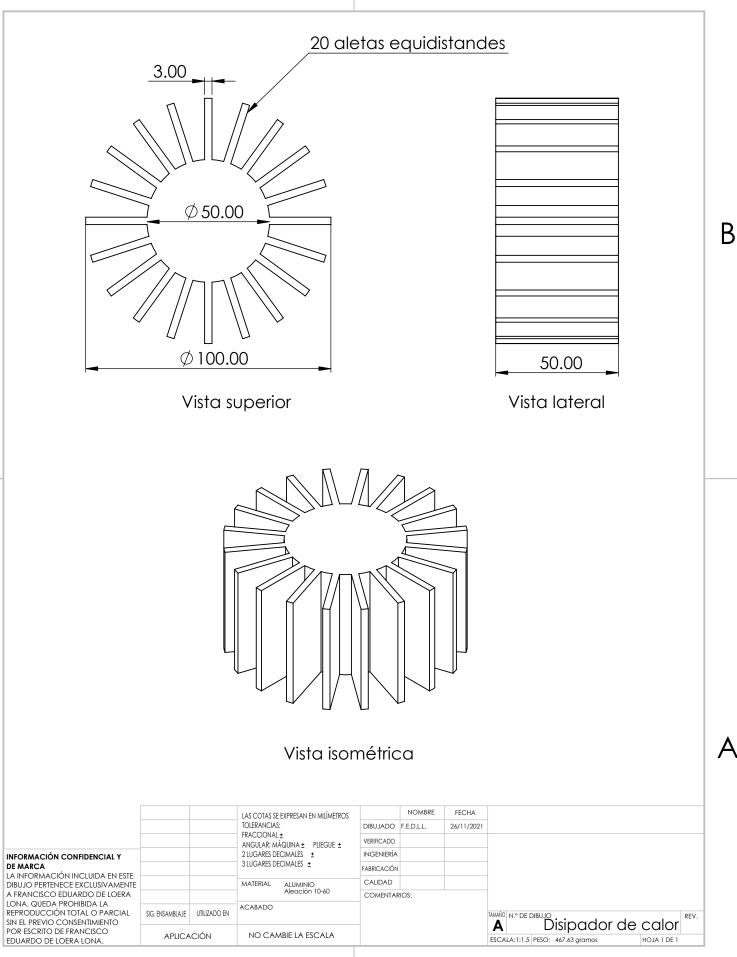
- Hafez, A., Yousef, A., and Harag, N. (2018). Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91:754–782.
- Inc, F. (2003). Fluent user's guide. Fluent Inc, 2(3).
- Jian-hui, Z., Chun-xin, Y., and Li-na, Z. (2009). Minimizing the entropy generation rate of the plate-finned heat sinks using computational fluid dynamics and combined optimization. *Applied Thermal Engineering*, 29(8-9):1872–1879.
- Jones, C. D. and Smith, L. F. (1970). Optimum arrangement of rectangular fins on horizontal surfaces for free-convection heat transfer.
- Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., and Kim, K.-H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82:894–900.
- Kane, A., Verma, V., and Singh, B. (2017). Optimization of thermoelectric cooling technology for an active cooling of photovoltaic panel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75:1295–1305.
- Kasaeian, A., Khanjari, Y., Golzari, S., Mahian, O., and Wongwises, S. (2017). Effects of forced convection on the performance of a photovoltaic thermal system: An experimental study. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 85:13–21.
- Klemens, P. and Williams, R. (1986). Thermal conductivity of metals and alloys. *International metals reviews*, 31(1):197–215.
- Kumar, R., Deshmukh, V., and Bharj, R. S. (2020). Performance enhancement of photovoltaic modules by nanofluid cooling: A comprehensive review. *International Journal of Energy Research*, 44(8):6149–6169.
- Lambert, J. H. (1760). *Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae*. sumptibus vidvae E. Klett, typis CP Detleffsen.
- Luo, Q., Li, P., Cai, L., Chen, X., Yan, H., Zhu, H., Zhai, P., Li, P., and Zhang, Q. (2019). Experimental investigation on the heat dissipation performance of flared-fin heat sinks for concentration photovoltaic modules. *Applied Thermal Engineering*, 157:113666.
- Mario Di Capua, H., Escobar, R., Diaz, A., and Guzmán, A. M. (2018). Enhancement of the cooling capability of a high concentration photovoltaic system using microchannels with forward triangular ribs on sidewalls. *Applied Energy*, 226:160–180.
- Meng, X., Zhu, J., Wei, X., and Yan, Y. (2018). Natural convection heat transfer of a straight-fin heat sink. International Journal of Heat and Mass Transfer, 123:561–568.
- Micheli, L., Fernandez, E. F., Almonacid, F., Reddy, K., and Mallick, T. K. (2015a). Enhancing ultra-high cpv passive cooling using least-material finned heat sinks. In *AIP Conference Proceedings*, volume 1679, page 130003. AIP Publishing LLC.
- Micheli, L., Senthilarasu, S., Reddy, K., and Mallick, T. K. (2015b). Applicability of silicon micro-finned heat sinks for 500× concentrating photovoltaics systems. *Journal of Materials Science*, 50(16):5378–5388.

- Min, C., Nuo-Fu, C., Jin-Xiang, D., and Li-Ying, L. (2013). Thermal modeling optimization and experimental validation for a single concentrator solar cell system with a heat sink. *Chinese Physics B*, 22(8):084208.
- Nadda, R., Kumar, A., and Maithani, R. (2018). Efficiency improvement of solar photovoltaic/solar air collectors by using impingement jets: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93:331–353.
- Oberkampf, W. L. and Trucano, T. G. (2002). Verification and validation in computational fluid dynamics. *Progress in aerospace sciences*, 38(3):209–272.
- Outlook, B. E. (2017). Bp energy outlook.
- Popov, R., Paunkov, N., Rangelova, V., and Georgiev, A. (2020). Study of hybrid thermal system with photovoltaic panels using virtual instruments. *Renewable Energy*, 154:1053–1064.
- Rejeb, O., Radwan, A., Abo-Zahhad, E. M., Ghenai, C., Serageldin, A. A., Ahmed, M., El-Shazly, A. A., Bettayeb, M., and Abdelrehim, O. (2020). Numerical analysis of passive cooled ultra-high concentrator photovoltaic cell using optimal heat spreader design. *Case Studies in Thermal Engineering*, 22:100757.
- Roache, P. J. (1997). Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. *Annual review of fluid Mechanics*, 29(1):123–160.
- Ruoping, Y., Xiaohui, Y., Fuwei, L., and Huajun, W. (2020). Study of operation performance for a solar photovoltaic system assisted cooling by ground heat exchangers in arid climate, china. *Renewable Energy*, 155:102–110.
- Sampaio, P. G. V. and González, M. O. A. (2017). Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74:590–601.
- Sato, D. and Yamada, N. (2019). Review of photovoltaic module cooling methods and performance evaluation of the radiative cooling method. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104:151–166.
- Schiro, F., Benato, A., Stoppato, A., and Destro, N. (2017). Improving photovoltaics efficiency by water cooling: Modelling and experimental approach. *Energy*, 137:798–810.
- Selimefendigil, F. and Öztop, H. F. (2022). Thermal management for conjugate heat transfer of curved solid conductive panel coupled with different cooling systems using non-newtonian power law nanofluid applicable to photovoltaic panel systems. *International Journal of Thermal Sciences*, 173:107390.
- Theristis, M., Fernández, E. F., Sumner, M., and O'Donovan, T. S. (2017). Multiphysics modelling and experimental validation of high concentration photovoltaic modules. *Energy Conversion and Management*, 139:122–134.
- Theristis, M. and O'Donovan, T. S. (2015). Electrical-thermal analysis of iii–v triple-junction solar cells under variable spectra and ambient temperatures. *Solar Energy*, 118:533–546.

- Wiesenfarth, M., Helmers, H., Philipps, S. P., Steiner, M., and Bett, A. W. (2012). Advanced concepts in concentrating photovoltaics (cpv). In *Proceeding of 27th European PV Solar Energy Conference and Exhibition*, volume 24, page 28.
- Wilcox, D. C. (1993). Comparison of two-equation turbulence models for boundary layers with pressure gradient. *AIAA journal*, 31(8):1414–1421.
- World Bank Group (Abril de 2019). https://globalsolaratlas.info/download/world.
- Xamán, J. (2016). Dinámica de fluidos computacional para ingenieros. Palibrio.
- Xin, G., Wang, Y., Sun, Y., Huang, Q., and Zhu, L. (2015). Experimental study of liquid-immersion iii–v multi-junction solar cells with dimethyl silicon oil under high concentrations. *Energy Conversion and Management*, 94:169–177.
- Yang, K. and Zuo, C. (2015). A novel multi-layer manifold microchannel cooling system for concentrating photovoltaic cells. *Energy Conversion and Management*, 89:214–221.
- Yu, S.-H., Lee, K.-S., and Yook, S.-J. (2010). Natural convection around a radial heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(13-14):2935–2938.
- Yu, S.-H., Lee, K.-S., and Yook, S.-J. (2011). Optimum design of a radial heat sink under natural convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(11-12):2499–2505.
- Zaghloul, H., Emam, M., Abdelrahman, M., and Abd Rabbo, M. (2021). Optimization and parametric analysis of a multi-junction high-concentrator pv cell combined with a straight fins heat sink. *Energy Conversion and Management*, 243:114382.
- Zarma, I., Ahmed, M., and Ookawara, S. (2019). Enhancing the performance of concentrator photovoltaic systems using nanoparticle-phase change material heat sinks. *Energy Conversion and Management*, 179:229–242.

## **Apéndice A**

Anexo I: Planos del disipador de calor



#### **Apéndice B**

Anexo II: Constancia de obtención de 1er lugar en el concurso nacional de proyectos académicos en diseño y simulación





Presidente Corporativo Grupo SSC







Grupo SSC y el Instituto Tecnológico Sanmiguelense otorgan el presente reconocimiento a:

Francisco Eduardo de Loera Lona

Por su valiosa participación en el 10mo. Concurso Nacional de Proyectos Académicos en Diseño y Simulación y haber obtenido el 1er lugar en la categoría de Posgrado con el Proyecto:

Diseño y simulación CFD del subsistema de enfriamiento de un sistema fotovoltaico de concentración

En el marco del ANSYS Convergence México 2021

San Miguel de Allende, Gto., 15 de octubre, 2021

