

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**ESCUELA DE POSTGRADO**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**DIMENSIONAMIENTO DE UN NUEVO CONCENTRADOR  
PARABÓLICO COMPUESTO (CPC) CON DOBLE  
ABSORBEDOR DE UN COLECTOR LINEAL FRESNEL (LFC),  
APLICADO COMO CASO DE ESTUDIO EN LA COMUNIDAD  
ALTO ANDINA DE PILPICHACA EN LA REGIÓN  
HUANCAVELICA SOBRE 4000 MSNM.**

Tesis para optar el Título de Magister en Energía

Presentado por :

**Carlos Augusto Dolorier Castillo**

**ASESOR: Mg. Henry García Bustamante**

Lima, Julio del 2017

## RESUMEN

En el presente trabajo de Tesis se desarrolla el dimensionamiento y evaluación simulada de un nuevo Concentrador Parabólico Compuesto (CPC) de un Colector Lineal Fresnel (LFC), que tiene la característica de operar con 2 tuberías de absorción en lugar de una como en el modelo estándar, particularidad que le da ventajas ópticas, térmicas y proyección a mejores prestaciones operativas, por su disposición como tubería continua preparada para recirculación. El estudio de sus posibilidades energéticas de servicio, se centra en la localidad altoandina de Pilpichaca ubicada en el departamento de Huancavelica en la serranía del Perú, poseedora de un alto potencial solar pero de climatología fría por la gran altitud de su localización geográfica.

De manera introductoria se presentan los aspectos generales de la tecnología de los LFCs y de los CPCs señalando sus características y su desarrollo actual.

En el capítulo 1, se abordan los conceptos teóricos necesarios para el diseño y el análisis posterior, se exponen las ecuaciones implicadas, para el tratamiento de temas como: Geometría y Óptica solar, Transferencia de Calor y Masa y Termodinámica Aplicada, para hallar los resultados que servirán para medir el performance operativo del nuevo CPC propuesto como solución técnica.

En el capítulo 2, se expone la metodología que será aplicada para realizar el pre dimensionamiento, análisis, evaluación y validación del nuevo diseño de CPC, presentando la secuencia lógica del flujo de tareas necesarias.

En el capítulo 3, se realiza la caracterización energética y climática de la zona Caso de Estudio, también se desarrolla la evaluación del recurso en términos de encontrar la radiación solar directa (DNI) del sitio para los meses estacionales del año, a partir de hallar los ángulos solares característicos y luego aplicar modelos matemáticos de distribución horaria de valoración. En este capítulo también se trata un aspecto importante que es el dimensionamiento básico del LFC en cuanto a la configuración de su Campo de Espejos y la altura eficiente de ubicación del CPC.

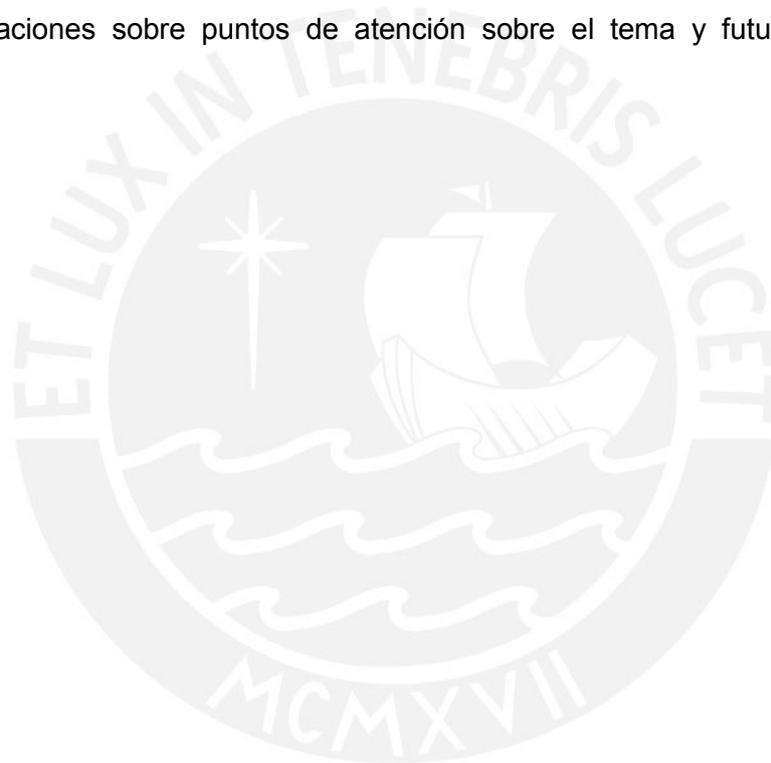
En el capítulo 4, se realiza el dimensionamiento geométrico y óptico del CPC propuesto, fundamentado en las teorías de optimización de flujo y uniformidad de distribución, para ello se utiliza la técnica de Trazado de Rayos Ray-Tracing- Montecarlo, a través de un software especializado de cálculo numérico, probando varios arreglos de CPCs y realizando contrastación de logros energéticos, esta tarea luego se extiende al modelo estándar para hallar las ventajas ópticas definitivas de la nueva propuesta.

En el capítulo 5, se desarrolla el Balance Energético en las Tuberías de Absorción del nuevo CPC, para ello se configura una matriz climática de la zona, para hacerla

interactuar con las propiedades térmicas de los materiales a través del modelo matemático de ecuaciones de conservación de masa y energía, y obtener los resultados de los rendimientos alcanzados por la instalación, bajo las Leyes de la Termodinámica.

En el capítulo 6, se hace la discusión de los resultados obtenidos y sus implicancias sobre los logros alcanzados por el nuevo diseño de CPC frente al modelo estándar, haciendo las aclaraciones relevantes sobre los puntos más sensibles encontrados.

Finalmente se concluye el estudio, validando la ventajas técnicas alcanzadas por el nuevo diseño de CPC en el aprovechamiento solar como energía de calor para procesos, para las aplicaciones identificadas como brecha energética, y otras actividades de fomento de desarrollo socioeconómico para la comunidad usuaria, al término se realizan las recomendaciones sobre puntos de atención sobre el tema y futuros trabajos a ser tratados.





### **DEDICATORIA**

A mí querida esposa Gabriela y a mi hija Lía, quienes me motivaron para regresar a las aulas universitarias, para continuar el camino de mejoramiento profesional y emprender un nuevo camino en la investigación.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al profesor Henry García por la confianza hacia mi persona y su orientación de manera práctica y efectiva, sobre el tratamiento de los tópicos que demandaron mayor complejidad.

Al profesor Luis Chirinos por su importante apoyo, y sus acertadas sugerencias para el presente trabajo.

A mis hermanos Norma, Sonia, Jorge y Mario, quienes a pesar del tiempo transcurrido desde mi etapa de estudiante del pregrado hace ya cerca de 25 años, estuvieron pendientes desde el primer día de mi evolución en esta nueva etapa del postgrado.



# ÍNDICE

RESUMEN.....	2
DEDICATORIA .....	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
ÍNDICE DE CUADROS .....	14
LISTA DE SÍMBOLOS.....	15
I.1. Antecedentes .....	22
I.2 Definición del problema .....	24
I.3. Propuesta de Solución.....	25
I.4. Justificación .....	25
I.5. Hipótesis .....	26
I.6. Objetivos .....	27
I.6. Estado del arte.....	28
I.6.1. La Tecnología de Colectores Lineales Fresnel .....	31
I.6.2. La Tecnología de los Concentradores Secundarios.....	34
CAPÍTULO 1 .....	39
MARCO TEÓRICO .....	39
1.1. Concentrador Secundario Parabólico Compuesto (CPC).....	39
1.2. El Sol como fuente de Energía.....	43
1.3. Parámetros importantes de la Óptica Solar .....	45
1.4. Cálculo de Radiaciones.....	52
1.4.1. Modelo Isotrópico .....	53
1.4.2. Modelo Anisotrópico.....	54
1.5. Técnica de trazado de rayos incidentes-reflejados (Ray-tracing).....	55
1.6. Tópicos seleccionados de Transferencia de Calor y Termodinámica .....	56
1.6.1. Transferencia de calor por conducción .....	57
1.6.2. Transferencia de calor por convección .....	58
1.6.3. Transferencia de calor por radiación .....	60
1.6.4. Balance Energético del Sistema .....	61
1.6.5. Análisis Exergético del Sistema .....	63
CAPÍTULO 2 .....	65
METODOLOGÍA DE MEJORAMIENTO TÉCNICO DEL NUEVO CPC .....	65
2.1. Procedimiento desarrollado para el modelamiento del CPC.....	65

2.2. Aclaraciones Importantes para el modelamiento del CPC .....	65
CAPÍTULO 3 .....	68
EVALUACIÓN DEL RECURSO SOLAR Y DIMENSIONAMIENTO DE LAS INSTALACIONES DEL LFC .....	68
3.1. Potencial Energético Solar de la localidad Caso de Estudio.....	68
3.2. Climatología de la localidad Caso de Estudio.....	71
3.3. Evaluación del Recurso solar en la Localidad Caso de Estudio.....	72
3.3.1 La Trayectoria Solar en la localidad de Pilpichaca .....	73
3.3.2 Estimaciones de Radiaciones .....	75
3.4. Dimensionamiento de las Instalaciones del LFC .....	79
CAPÍTULO 4 .....	83
MODELAMIENTO GEOMÉTRICO Y ÓPTICO DEL CPC .....	83
4.1. Modelamiento Geométrico.....	83
4.2. Modelamiento Óptico.....	89
4.2.1. Ray-tracing para ajuste de la geometría del CPC.....	89
4.2.2. Cálculo de flujo incidente en modelos geométricos CPC Doble Absorbedor 90	
4.2.3. Cálculo de flujo incidente en el modelo estándar optimizado de CPC .....	99
4.2.4. Cálculo de flujo incidente en modelo optimizado CPC con Doble Absorbedor.....	106
CAPITULO 5 .....	116
MODELAMIENTO Y BALANCE TÉRMICO .....	116
5.1. Configuración operativa del Modelo .....	116
5.2. Matriz climática de Evaluación .....	117
5.3. Planteamiento de los parámetros de la transferencia térmica .....	118
5.4. Resolución de las ecuaciones de desempeño energético y exergético .....	120
CAPITULO 6 .....	127
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	127
CONCLUSIONES.....	130
RECOMENDACIONES .....	132
BIBLIOGRAFÍA.....	133
ANEXOS.....	135
1. Función Matlab - Cálculo de Ángulos Solares.....	135
2. Script Matlab – Cálculo de Radiaciones Modelo Anisotrópico.....	136
3. Script Matlab - Perfilamiento óptimo de CPC1T.....	139
4. Script Matlab - Perfilamiento óptimo de CPC2T.....	141

5. Script Matlab - Seguimiento Solar ..... 144

6. Script Matlab - Balance Térmico..... 151



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1 – Disponibilidad de Radiación Directa Solar (DNI) mundial.....	20
Figura I.2 – Disponibilidad de Radiación Directa Solar (DNI) en Huancavelica - Perú. .....	20
Figura I.3 – Disposición Típica de un Colector Lineal Fresnel (LFC) con Concentrador Parabólico Compuesto (CPC) .....	21
Figura I.4 - Parámetros de ajuste para optimización de un CPC Doble Absorbedor. .....	26
Figura I.5 - Principales tecnologías Termosolares actuales. ....	28
Figura I.6 - Vista de Planta LFC de prueba FresDemo/Ferrostaal – Almería, España. .....	29
Figura I.7 – Sección Típica de CPC de LFC – Planta FresDemo/Ferrostaal – Almería, España. ....	30
Figura I.8 – Montaje de CPC de LFC – Planta FresDemo/Ferrostaal – Almería, España. .....	30
Figura I.9 – Componentes principales de un Colector Lineal Fresnel (LFC). ....	34
Figura I.10 - Configuración estándar de un Concentrador CPC. ....	35
Figura I.11 - Configuración estándar de un Receptor Cavidad Trapezoidal. ....	35
Figura I.12 - Configuración de un Concentrador solar Doble Ala. ....	36
Figura I.13 - Configuración de un Concentrador solar TERC. ....	37
Figura I.14 - Configuración de un Concentrador tipo Triángulo Invertido. ....	37
Figura I.15 - Configuración de un Concentrador de Cavidad Trapezoidal Semiaislado. .....	38
Figura 1.1 – Esquema para definición de Leyes de la Reflexión. ....	40
Figura 1.2 – Esquema para definición de Principio de Fermat. ....	40
Figura 1.3 – Esquema para definición de Ley de Snell de la Refracción. ....	41
Figura 1.4 – Curvas generadas con las ecuaciones de la sección de un CPC. ...	43

Figura 1.5 – El Sol y el Movimiento anual de la Tierra. ....	44
Figura 1.6 – Esquema para definición de ángulos solares .....	45
Figura 1.7 – Ángulos solares principales de rendimiento .....	48
Figura 1.8 – Angulo de Incidencia Modificado (IAM) en la dirección transversal y longitudinal. ....	49
Figura 1.9 – Formas de pérdidas ópticas en LFCs .....	49
Figura 1.10 – Esquema paso mínimo por Bloqueo entre espejos consecutivos ..	50
Figura 1.11 – Esquema paso mínimo por Sombreado entre espejos consecutivos .....	50
Figura 1.12 – Muestra de Técnica de Ray-tracing para un Concentrador de Disco parabólico en Tonatiuh. ....	56
Figura 2.1 – Diagrama de Flujo Optimización de CPC Doble Absorbedor – Parte 1. ....	66
Figura 2.2 – Diagrama de Flujo Optimización de CPC Doble Absorbedor – Parte 2. ....	67
Figura 3.1 - Nivel de Irradiación Solar en el mes de Marzo .....	68
Figura 3.2 - Nivel de Irradiación Solar en el mes de Junio.....	69
Figura 3.3 - Nivel de Irradiación Solar en el mes de Septiembre .....	69
Figura 3.4 - Nivel de Irradiación Solar en el mes de Diciembre .....	70
Figura 3.5 - Histograma de Irradiación anual en la localidad de Pilpichaca .....	70
Figura 3.6 - Coordenadas específicas del punto geográfico Caso de Estudio .....	71
Figura 3.7 - Irradiación a lo largo del año en la localidad de Pilpichaca. ....	73
Figura 3.8 - Mapa de trayectoria solar durante el año en la localidad de Pilpichaca. ....	74
Figura 3.9 - Estereografía solar anual de la localidad de Pilpichaca .....	75
Figura 3.10 - Distribución de Radiaciones en el Mes de Marzo. ....	76
Figura 3.11 - Distribución de Radiaciones en el Mes de Junio. ....	77

Figura 3.12 - Distribución de Radiaciones en el Mes de Septiembre. ....	77
Figura 3.13 - Distribución de Radiaciones en el Mes de Diciembre. ....	78
Figura 3.14 - Variación de la Radiación Directa en el 1° Semestre del año. ....	78
Figura 3.15 - Variación de la Radiación Directa en el 2° Semestre del año. ....	79
Figura 3.16 - Verificación de las distancias mínimas del Campo Especular. ....	80
Figura 3.17 - Verificación de la Altura de máximo aprovechamiento óptico ....	80
Figura 4.1 – Esquema de irradiación centrada de espejos del LFC respecto al CPC. .....	84
Figura 4.2 - Configuración geométrica de CPC con $\theta_a = 30^\circ$ . ....	85
Figura 4.3 - Configuración geométrica de CPC con $\theta_a = 34^\circ$ . ....	86
Figura 4.4 - Configuración geométrica de CPC con $\theta_a = 39^\circ$ . ....	86
Figura 4.5 - Configuración geométrica de CPC con $\theta_a = 30^\circ$ Variante. ....	87
Figura 4.6 - Configuración geométrica de CPC con $\theta_a = 34^\circ$ Variante. ....	88
Figura 4.7 - Configuración geométrica de CPC con $\theta_a = 39^\circ$ Variante. ....	88
Figura 4.8 - Modelamiento de la geometría del LFC en software Tonatiuh. ....	90
Figura 4.9 - Flujo energético en Tubería de Absorción 1 - CPC Doble Absorbedor ( $\theta_a=30^\circ$ ). ....	92
Figura 4.10 - Flujo energético en Tubería de Absorción 1 - CPC Doble Absorbedor ( $\theta_a=34^\circ$ ). ....	92
Figura 4.11 - Flujo energético en Tubería de Absorción 1 - CPC Doble Absorbedor ( $\theta_a=39^\circ$ ). ....	93
Figura 4.12 - Flujo energético en Tubería de Absorción 1 - CPC Doble Absorbedor ( $\theta_a=30^\circ$ ) Variante. ....	93
Figura 4.13 - Flujo energético en Tubería de Absorción 1 - CPC Doble Absorbedor ( $\theta_a=34^\circ$ ) Variante. ....	94
Figura 4.14 - Flujo energético en Tubería de Absorción 1 - CPC Doble Absorbedor ( $\theta_a=39^\circ$ ) Variante. ....	94

Figura 4.15 - Trazado en AutoCAD de rayos de flujo energético en CPC Doble Absorbedor ( $\theta_a=39^\circ$ ). .....	96
Figura 4.16 - Trazado en AutoCAD de rayos de flujo energético en CPC Doble Absorbedor ( $\theta_a=39^\circ$ ) modificado. ....	97
Figura 4.17 - Flujo energético en Tubería de Absorción ( $\theta_a=39^\circ$ ) modificado. ...	98
Figura 4.18 - Flujo incidente LFC con CPC estándar, Marzo 21 - 8:00 am. ....	100
Figura 4.19 - Flujo Incidente en Tubería de Absorción CPC, Marzo 21 - 8:00 am. ....	100
Figura 4.20 - Flujo incidente LFC con CPC estándar, Marzo 21 - 10:00 am. ....	101
Figura 4.21 - Flujo Incidente en Tubería de Absorción CPC, Marzo 21 - 10:00 am. ....	101
Figura 4.22 - Flujo incidente LFC con CPC estándar, Marzo 21 - 12:00 am. ....	102
Figura 4.23 - Flujo Incidente en Tubería de Absorción CPC, Marzo 21 - 12:00 m. ....	102
Figura 4.24 - Flujo incidente LFC con CPC estándar, Marzo 21 - 14:00 am. ....	103
Figura 4.25 - Flujo Incidente en Tubería de Absorción CPC, Marzo 21 - 14:00 pm. ....	103
Figura 4.26 - Flujo incidente LFC con CPC estándar, Marzo 21 - 16:00 am. ....	104
Figura 4.27 - Flujo Incidente en Tubería de Absorción CPC, Marzo 21 - 16:00 pm. ....	104
Figura 4.28 - Ubicación de monitor virtual para reporte en modelo LFC. ....	105
Figura 4.29 - Flujo incidente LFC con CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 8:00 am. ....	107
Figura 4.30 - Flujo en Tuberías de Absorción CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 8:00 am. ....	107
Figura 4.31 - Flujo incidente LFC con CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 10:00 am. ....	108
Figura 4.32 - Flujo en Tuberías de Absorción CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 10:00 am. ....	108

Figura 4.33 - Flujo incidente LFC con CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 12:00 m. .....	109
Figura 4.34 - Flujo en Tuberías de Absorción CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 12:00 m. .....	109
Figura 4.35 - Flujo incidente LFC con CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 14:00 pm. .....	110
Figura 4.36 - Flujo en Tuberías de Absorción CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 14:00 m. .....	110
Figura 4.37 - Flujo incidente LFC con CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 16:00 pm. .....	111
Figura 4.38 - Flujo en Tuberías de Absorción CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 16:00 m. .....	111
Figura 4.39 - Perfil de Distribución de flujo en Tubería de Absorción CPC estándar, Marzo 21 – 12:00 m. .....	114
Figura 4.40 - Perfil de Distribución de Flujo en Tubería de Absorción 1 de CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 12:00 m. .....	114
Figura 4.41 – Perfil de Distribución de Flujo en Tubería de Absorción 2 de CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 12:00 m. .....	114
Figura 5.1 - Esquema del proceso de aprovechamiento solar LFC. .....	117
Figura 5.2 - Evolución horaria de temperaturas alcanzadas - Marzo 21. .....	121
Figura 5.3 - Evolución horaria de flujo de calor alcanzado - Marzo 21. .....	121
Figura 5.4 - Evolución horaria de la eficiencia térmica alcanzada - Marzo 21. ....	122
Figura 5.5 - Evolución horaria de la eficiencia exergética alcanzada - Marzo 21..	122
Figura 5.6 - Evolución horaria de la temperatura alcanzada - Junio 21. ....	123
Figura 5.7 - Evolución horaria del flujo de calor alcanzado - Junio 21. ....	123
Figura 5.8 - Evolución horaria de la eficiencia térmica alcanzada - Junio 21. ....	124
Figura 5.9 - Evolución horaria de la eficiencia exergética alcanzada - Junio 21. .	124

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1. Valores de $Re_D$ , C y m, correlación Zhukauskas.....	59
Cuadro 3.1. Escenario de Evaluación del Modelo .....	72
Cuadro 3.2 – Resumen de datos de componentes LFC para Modelamiento. ....	81
Cuadro 4.1 – Propiedades ópticas de los elementos de Recepción .....	91
Cuadro 4.2 – Resumen de resultados de evaluación de alternativas de CPC. ....	95
Cuadro 4.3 – Comparación de resultados de la evaluación de CPCs $\theta_a=39^\circ$ . ....	98
Cuadro 4.4 – Rendimiento óptico en el Modelo LFC con CPC estándar. ....	105
Cuadro 4.5 – Rendimiento óptico en el Modelo LFC con CPC Doble Absorbedor. .....	112
Cuadro 4.6 – Comparación de Rendimientos Óptico-Geométrico entre CPCs. ..	113
Cuadro 5.1 – Ejemplo de matriz climática empleada en el análisis térmico. ....	118
Cuadro 5.2 – Propiedades de elementos de captura y transmisión de calor. ....	119
Cuadro 5.3 – Resumen de desempeño térmico de LFC con CPC Doble Absorbedor Hora de Control: 12 m .....	125
Cuadro 5.4 – Resumen de desempeño térmico de LFC con CPC estándar Hora de Control: 12 m .....	125
Cuadro 6.1 – Resumen de dimensiones finales del CPC Doble Absorbedor. ....	129

## LISTA DE SÍMBOLOS

$CPC$	Concentrador Parabólico Compuesto Solar
$HTF$	Sistema de Espejos Reflectantes con Torre de Concentración
$LFC$	Sistema Colector de Espejos Lineales Fresnel
$PDC$	Sistema Colector de Disco Parabólico Concentrador con motor Stirling
$PTC$	Sistema Colector de Espejos Cilíndricos Parabólicos
$L_c$	Longitud de Cavidad Receptora CPC (m)
$H_{CPC}$	Altura de Cavidad Receptora (m)
$D_{ta}$	Diámetro nominal de Tubería de Absorción (m)
$\theta_a$	Ángulo de aceptación ( $^\circ$ )
$R_g$	Radio de la generatriz del perfil CPC (m)
$d_{ap}$	Distancia entre Tuberías de Absorción (m)
$H_{trunc}$	Altura de truncamiento de cavidad CPC (m)
$\varphi_i$	Parámetro de caracterización de la geometría de la superficie ( $^\circ$ )
$C_g$	Índice de concentración geométrica en CPC
$A_{CR}$	Ancho de la Cavidad Receptora CPC (m)
$\varphi$	Latitud geográfica del sitio ( $^\circ$ )
$\delta$	Ángulo de Declinación ( $^\circ$ )
$\omega$	Ángulo Horario ( $^\circ$ )
$\gamma_c$	Ángulo de Azimut superficial ( $^\circ$ )
$\beta_c$	Ángulo de inclinación relativa ( $^\circ$ )
$\theta_z$	Ángulo de Zenit ( $^\circ$ )
$\theta_i$	Ángulo de Incidencia ( $^\circ$ )

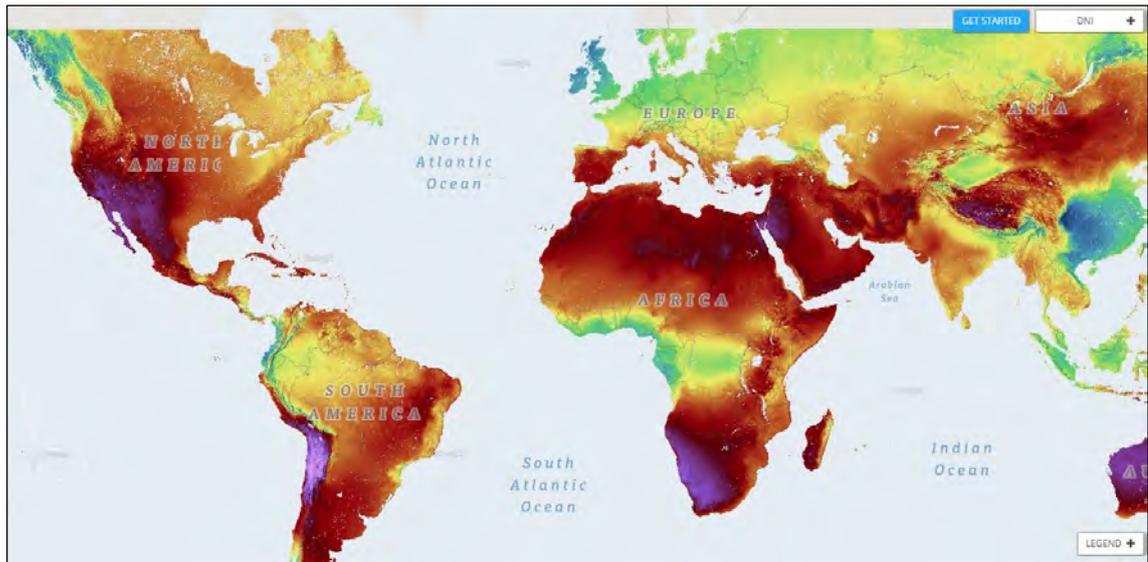
$\gamma_s$	Ángulo de Azimut Solar (°)
$\alpha_s$	Ángulo de Elevación Solar (°)
$Lst$	Huso horario más próximo (°)
$Lloc$	Longitud geográfica del sitio (°)
$\theta_{trans}$	Ángulo Transversal (°)
$\theta_{long}$	Ángulo Longitudinal (°)
$IAM$	Ángulo de Incidencia Modificado
$IAM_{long}$	Ángulo de Incidencia Longitudinal (°)
$IAM_{trans}$	Ángulo de Incidencia Transversal (°)
$P_n$	Paso mínimo entre espejos paralelos (m)
$W$	Ancho típico de espejo (m)
$\theta_n, \theta_p$	Ángulos críticos máximos por bloqueo (°)
$S_n$	Espacio libre lateral mínimo (m)
$d_n$	Sector afectado por sombra (m)
$\eta_{Somb}$	Eficiencia al sombreado durante el día
$\eta_{opt}$	Eficiencia óptica final
$\rho_{espejos}$	Reflectancia óptica de los espejos concentradores primarios
$\tau_{vidrio}$	Transmitancia óptica de la Cubierta de Vidrio de la tubería del receptor
$\alpha_{receptor}$	Absortancia óptica del receptor
$G_{sc}$	Constante solar 1,367 W/m <sup>2</sup>
$n$	Número de día del año
$H_o$	Irradiancia diaria extraterrestre (MJ/m <sup>2</sup> -día)
$H$	Irradiancia diaria a nivel del suelo (MJ/m <sup>2</sup> -día)
$I_o$	Irradiancia horaria extraterrestre (MJ/m <sup>2</sup> -h)

$I$	Irradiancia horaria (MJ/m <sup>2</sup> -h)
$I_b$	Radiación directa horaria perpendicular a la superficie (MJ/m <sup>2</sup> -h)
$I_d$	Radiación difusa horaria perpendicular a la superficie (MJ/m <sup>2</sup> -h)
$I_t$	Radiación total horaria a nivel de la superficie (MJ/m <sup>2</sup> -h)
$DNI$	Radiación directa (MJ/m <sup>2</sup> )
$DRS$	Radiación difusa isoreflejada por el cielo (MJ/m <sup>2</sup> )
$DRF$	Radiación difusa isoreflejada por el suelo (MJ/m <sup>2</sup> )
$DRC$	Radiación difusa anisocircunsolar (MJ/m <sup>2</sup> )
$DIF$	Radiación difusa total (MJ/m <sup>2</sup> )
$\dot{Q}_{cond}$	Calor por conducción (W/m <sup>2</sup> )
$k$	Coefficiente de conductividad térmica del material (W/m K)
$L$	Pared o espesor (m)
$R_1, R_2$	Radio interior, Radio exterior, de tubería (m)
$\dot{Q}_{conv}$	Calor transferido por convección (W/m <sup>2</sup> )
$T_s$	Temperatura de la superficie (K)
$T_\infty$	Temperatura del fluido (K)
$h$	Coefficiente de convección térmica del medio (W/m <sup>2</sup> K)
$Re_D$	Número de Reynolds
$Pr$	Número de Prandtl
$Nu_D$	Número de Nusselt
$\rho$	Densidad del fluido (kg/m <sup>3</sup> )
$V$	Velocidad corriente superior (m/s)
$L_c$	Longitud característica (m)
$\mu$	Viscosidad dinámica (N-s/m <sup>2</sup> )
$\nu$	Viscosidad cinemática (m <sup>2</sup> /s)
$\alpha$	Difusividad térmica (m <sup>2</sup> /s)

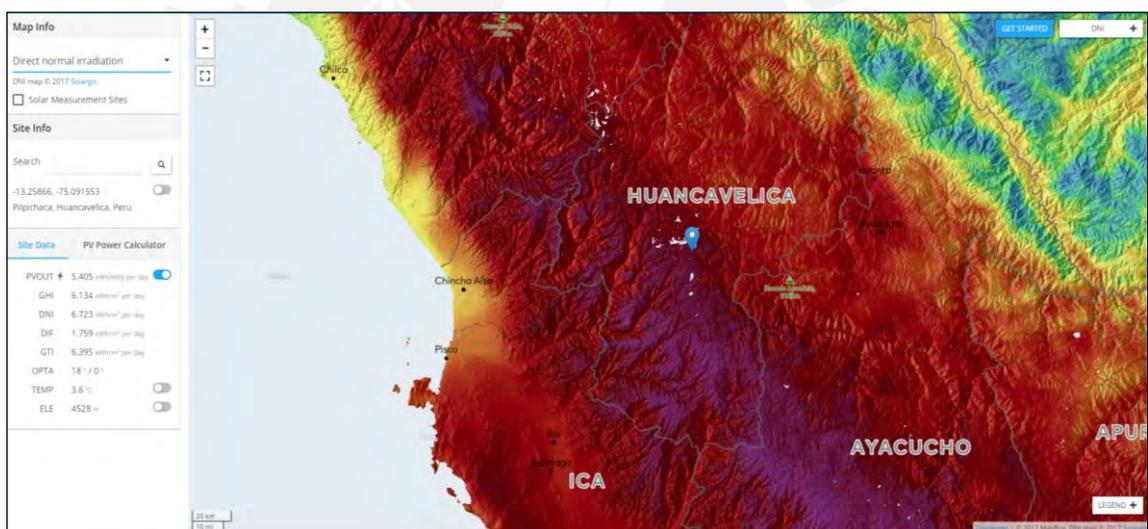
$\dot{Q}_{rad}$	Calor transferido por radiación (W/m <sup>2</sup> )
$T_{alred}$	Temperatura de la superficie circundante (K)
$\varepsilon$	Emisividad del cuerpo
$D_{int}, D_{ext}$	Diámetro interior, Diámetro exterior (m)
$A_s$	Área superficial (m <sup>2</sup> )
$\sigma$	Coficiente de Stefan-Boltzmann (W/m <sup>2</sup> -K <sup>4</sup> )
$\dot{Q}$	Velocidad neta de transferencia de Calor (W)
$\dot{m}$	Flujo másico (kg/s)
$C_p$	Calor específico a presión constante (kJ/kg-K)
$\Delta T$	Variación de temperatura (K)
$\dot{q}_i$	Flujo radiante reflejado por cada espejo (W/m <sup>2</sup> )
$A_{net}$	Área neta de espejo reflector (m <sup>2</sup> )
$\dot{Q}_i$	Flujo de calor total que ingresa a la Tubería de Absorción (W/m <sup>2</sup> )
$ELF$	Factor de pérdida final por angulación.
$L_F$	Longitud de espejo reflector (m)
$\eta_{ef}$	Eficiencia térmica
$\eta_{ex}$	Eficiencia exergética
$Q_{util}$	Calor aprovechado para el proceso (W)
$Q_{total}$	Calor total suministrado (W)
$T_a$	Temperatura ambiente (K)
$T_r$	Temperatura en la superficie del receptor (K)
$W_p$	Trabajo de bombeo (W)
$T_{sol}$	Temperatura del Sol (K)
$\Delta P$	Caída de presión (Pa)
$C_T$	Concentración total
$R_T$	Rendimiento Global

## INTRODUCCIÓN

La energía radiante solar es y ha sido la fuente energética que ha posibilitado el desarrollo de la vida en nuestro planeta, tomando principal protagonismo en procesos tan esenciales como la fotosíntesis y los ciclos físico-biológicos de la naturaleza, sus propiedades como recurso energético aprovechable a partir de ciertas tecnologías por desarrollar es de volumen ilimitado, 100 % renovable, no contaminante para el medioambiente y además gratuito. El nivel de uso actual como fuente directa para las actividades productivas en nuestro país y en el mundo, todavía no se ha impuesto masivamente especialmente por la visión de rentabilidad a corto plazo, quedando en desventaja respecto a las otras formas convencionales de energía “limpia” no renovable como las provenientes de los hidrocarburos, tales como el gas licuado de petróleo (GLP) y el Gas natural (LNG), de las que se obtiene comercialmente utilidades casi inmediatas. En los últimos 20 años han ido evolucionando las investigaciones en el campo de la utilización de la energía solar, por un lado en la tecnología fotovoltaica muy requerida para soluciones domésticas y por el otro en la tecnología fototérmica, con posibilidades más prometedoras de aplicación a nivel industrial, produciéndose en esta última muchos esfuerzos de desarrollo tecnológico principalmente en los países europeos y asiáticos, es importante citar sobre todo los avances realizados en España, Francia, Bélgica y la India en Centrales generación eléctrica basados en diferentes variantes, tales como Sistemas de Espejos Reflectantes con Torre de Concentración (HTF), Sistemas Colectores de Espejos Cilíndricos Parabólicos (PTC), Discos Parabólicos Concentradores con motores Stirling (PDC) y Sistemas Colectores de Espejos Lineales Fresnel (LFC), cuyo empuje ha dado lugar a una línea de desarrollo de nuevos trabajos teóricos y estudios experimentales en varias partes del mundo, todos interesados en encontrar formas de hacer más eficientes a los componentes y al conjunto integrado en los campos óptico y térmico, en el camino se han ido explorando y reconociendo las ventajas y desventajas a nivel de ingeniería en cada una de las tecnologías aplicadas actuales para la explotación de este recurso renovable. En el ámbito de promoción del recurso a nivel macro político, entidades internacionales de fomento de desarrollo e inversión económica a niveles de gobiernos, como el Banco Mundial, preocupados ahora en el fomento del uso de las energías renovables y la lucha contra el cambio climático, han publicado recientemente en el año 2016 su Atlas Global Solar de aprovechamiento del recurso, donde se ubican las zonas geográficas más favorables para la implementación de proyectos solares para todas las regiones del planeta, ubicando al sector centro-sur de la serranía peruana como un punto de atención importante y dentro de ella a la región Huancavelica.



**Figura I.1 – Disponibilidad de la Radiación Directa Solar (DNI) mundial (Fuente: Global Solar Atlas, World Bank Group, 2017).**



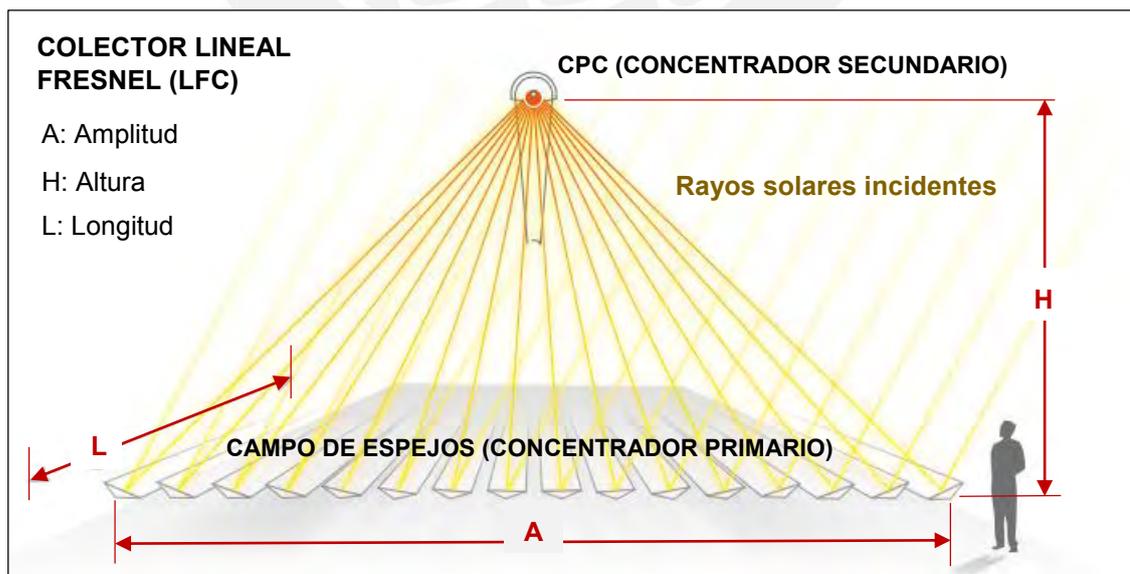
**Figura I.2 – Disponibilidad de Radiación Directa Solar (DNI) en Huancavelica - Perú (Fuente: Global Solar Atlas, World Bank Group, 2017).**

En esta misma vía, el Estado peruano también se ha propuesto mediante diferentes programas piloto, el fomento de la implementación de módulos de celdas fotovoltaicas para aprovechamiento solar en los sectores rurales, en donde las redes secundarias de energía eléctrica no llegan, con políticas de subsidios y financiamiento por la condición socio-económica presente. Al mismo tiempo el marco legal se ha hecho propicio para apoyar casi todos los programas de energías renovables y el desarrollo de las tecnologías

de aprovechamiento, afín de asegurar el suministro básico y la sostenibilidad medioambiental. Como punto saltante de la promoción estatal, en el año 2010 se hizo la puesta en marcha de las 2 primeras centrales solares fotovoltaicas a gran escala en Tacna y Moquegua con una producción anual proyectada de 47,176 y 50,676 MW respectivamente.

En el caso del aprovechamiento termosolar en el Perú, esta se ha dado mayormente a nivel de usuario doméstico, a través del uso de colectores solares planos para termas de agua caliente muy populares especialmente en el sur del país, no existiendo proyectos a mediana o gran escala a la fecha en el rubro, que involucren tecnologías de concentración diferentes como la PTC o la LFC, que han demostrado ser efectivas en otras partes del mundo.

En nuestro país el empleo de los LFC, podría ser la respuesta para atender las necesidades energéticas de las poblaciones andinas alejadas, sin acceso a recursos energéticos formales como electricidad y combustibles fósiles, pero con gran potencial solar, esta tecnología de aprovechamiento por su simplicidad técnica de componentes, y bajos costos de construcción, operación y mantenimiento, resulta aparente para cubrir varios rubros esenciales para el confort humano como: calefacción para áreas poblacionales necesitadas durante la noche, agua caliente de uso comunitario, vapor para cocción de alimentos (marmitas), etc., y también aplicación a procesos industriales a pequeña escala, como pasteurización, esterilización, limpieza, teñidos, etc., requeridos por las pymes comunales.



**Figura I.3 –Disposición Típica de un Colector Lineal Fresnel (LFC) con Concentrador Parabólico Compuesto (CPC) (Fuente: NOVATEC SOLAR, 2012).**

## **I.1. Antecedentes**

Con respecto al desempeño óptico de la tecnología LFC, en el trabajo de investigación presentado en Portugal por Canavarro, Chaves, J., & Collares-Pereira, M., 2014 [4], se hace manifiesto de la potencialidad de aprovechamiento solar de la tecnología Fresnel, realizando sus ventajas competitivas especialmente en bajos costos de inversión y operación para una eficiencia media, confiabilidad de servicio y una funcionabilidad para una amplia gama de aplicaciones, frente a otras soluciones con alta eficiencia como por ejemplo la tecnología HTF o la PTC que demandan costos elevados y complejidad de adaptación a suministros de pequeña y media escala, determinando que para lograr elevar el rendimiento global de los LFC convencionales es necesario enfocarse especialmente en aumentar su rendimiento óptico ya que estos concentradores están todavía lejos de los límites ideales de la concentración que se puede alcanzar. Este trabajo también presenta una nueva propuesta de LFC diseñado con el criterio de Superficie Simultánea Múltiple (SMS) en el cual se consideran dos elementos de captación con superficies reflectantes y con un receptor tubular común. Este diseño según el estudio logra obtener una buena uniformidad de distribución en el receptor. El trabajo también hace una comparación entre este nuevo SMS de LFC y dos concentradores estándar disponibles en la actualidad, un Colector Fresnel con CPC (Concentrador Parabólico Compuesto) y un concentrador PTC (Cilíndrico Parabólico), así como un cálculo del total de la cantidad de energía recogida, resaltando sus características y ventajas por aplicación.

Asimismo sobre el mismo aspecto referido al rendimiento óptico, en el trabajo de investigación realizado en España por Montes, Rubbia, C., Abbas, R., & Martínez-Val, J. M., 2014 [17], se afirma que la tecnología de los LFC presentan ventajas relevantes en el campo de la concentración de energía solar debido a su simplicidad, robustez y bajo costo de inversión, sin embargo, también presentan importantes inconvenientes y limitaciones, especialmente por su categoría de concentración media, que parece restringir significativamente el rendimiento global de estos sistemas. En primer lugar, el trabajo aborda el problema caracterizando la configuración del campo de espejos, asumiendo datos horarios de un año típico, en referencia a una configuración similar al de la planta solar de Almería (España) FresDemo, para un estudio adecuado definen un criterio de comparación con una nueva variable denominada la eficiencia energética útil, que sólo tiene en cuenta la radiación que incide sobre el receptor con intensidades por encima de un valor de referencia. Como segundo paso, realizan un estudio comparativo entre los LFC estándar de un CPC y los Colectores Lineales Fresnel Compactos (CLFC) que operan con doble CPC. El resultado de su análisis muestra que los CLFC minimizan las

pérdidas de bloqueo y sombreado en comparación con una configuración de focalización central, sin embargo esta mejora no es suficiente para superar otros efectos negativos que aparecen en los CLFC, ya que ocurre una mayor dispersión de los rayos que llegan al receptor, causada por el hecho de que los espejos deben situarse más alejados, lo que vuelve a generar eficiencias menores.

Con respecto a la modelación matemática del Sistema LFC, en el trabajo de investigación elaborado en Sudáfrica por Moghimi, Craig, K. J., & Meyer, J. P., 2015 [16], se presenta un tratamiento computacional que utiliza el método de volúmenes finitos (FV), mediante el software ANSYS FLUENT de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), para aplicar la técnica de trazado de rayos incidentes (Ray-tracing) requerido para cuantificar el rendimiento óptico de la tubería de absorción, y también para conformar el modelo de transferencia de calor integrado requerido para estimar la eficiencia térmica del receptor. En esta investigación se hace mención que el método matemático de Ordenadas Discretas puede proporcionar una solución bastante exacta de la Ecuación de Transferencia Radiante (RTE), si se trata adecuadamente con el software CFD de FV. Para evaluar la efectividad del método, se compara el criterio 2-D con los resultados de un modelo óptico y térmico 3-D completamente integrado pero costoso. Se concluye al final que el modelo propuesto con CFD para Ray-tracing y performance térmico, proporciona resultados similares al modelo costoso en 3-D, corroborado además con resultados experimentales.

Sobre el diseño funcional de un Sistema LFC, en el trabajo de investigación de corte teórico-experimental elaborado en Argentina por Gea, M. y otros, 2010 [10], se presentan los aspectos que interrelacionan a la óptica solar con la geometría del Campo de Espejos y la altura del Receptor, variables necesarias para el estudio de la radiación recibida por un CPC de un LFC, aplicados a un prototipo de área de 43 m<sup>2</sup>. El modelo de prueba que construyeron les permitió calcular el ángulo de incidencia de la radiación directa sobre los espejos, el ángulo de inclinación de cada espejo y la velocidad de rotación de éstos en función del tiempo, también se determinó el corrimiento sobre el eje del absorbedor de la radiación reflejada. Por otro lado en el trabajo se llegó a estimar de manera teórica, la radiación directa necesaria para la modelización del sistema completo en el punto de análisis, apoyados en un software de cálculo de radiación directa denominado SIMUSOL, para luego validar sus resultados con la radiación calculada con medidas experimentales. Finalmente se evaluó una novedosa propuesta de configuración geométrica de CPC basado en el diseño de (Canavarró, Chaves, J., & Collares-Pereira, M., 2014) que permitieron mejorar la eficiencia óptica del concentrador evaluado.

Sobre las aplicaciones y viabilidad de Proyectos con Sistemas LFC, en la Tesis de Acuña, F & José, C., 2016 [1], elaborada en el país vecino de Chile, se desarrolla un esquema de generación diversificada utilizando una planta de concentración de solar de potencia de 50 MW a la que se han acoplado los módulos de desalinización, generación de frío y calor para procesos industriales, para todos ellos se aplica la tecnología de Colectores Lineales Fresnel (LFC), modelando la planta en régimen transitorio para un período de un año en el software TRNSYS. En este estudio también se considera un sistema de almacenamiento térmico y un sistema de respaldo fósil para mantener la autonomía de la planta durante 24 horas. Concluye con la mención de resultados en términos energéticos y económicos para diferentes escenarios de análisis, determinando finalmente las condiciones para el diseño de la planta, llegando a una fracción solar de más del 52%, con la capacidad de producir más de 32.000 m<sup>3</sup>/día de agua, enfrentando demandas considerables de refrigeración y calor en la industria.

## **1.2 Definición del problema**

Existe una brecha de abastecimiento de energía que urge cubrir, en muchas poblaciones de nuestro país con economías vulnerables y clima invernal permanente, sobre este tema las instituciones del Estado y las instituciones no gubernamentales de promoción social han realizado varios estudios que pormenorizan las necesidades específicas por regiones y tipo de desarrollo económico, la gran mayoría de estas se refieren a cubrir requerimientos de calefacción, calor para procesos para las pequeñas empresas comunales y electricidad rural, necesidades que pueden solucionarse de una manera creativa aplicando tecnologías para el aprovechamiento de los recursos energéticos renovables que muchos de estos pueblos poseen con cierta abundancia, los cuales no son explotados por desconocimiento y falta de apoyo técnico adecuado. Una de estas tecnologías en el ámbito solar constituyen los Colectores Lineales Fresnel (LFC), que por sus facilidades operativas y bajos costos de implementación, se presentarían como una excelente alternativa para el aprovechamiento energético comunal.

Los LFC presentan una desventaja técnica frente a otras tecnologías del mismo rubro, que es tener un rendimiento óptico que no supera el rango medio (alrededor del 60%) [14], mientras que las otras alcanzan rendimientos altos llegando hasta el 90%, se han realizado variados diseños para lograr superar este problema que resulta complejo, dado que la geometría misma del sistema condiciona a las pérdidas, además la solución está restringida a realizar modificaciones que no contemplen cambios drásticos, pues de lo contrario esta tecnología se desvirtuaría y dejaría de ser económica la cual es su principal ventaja, por lo tanto en ese caso sería más lógico optar por otra tecnología más madura

como por ejemplo la de los PTC que tiene mejores prestaciones ópticas en el servicio para baja entalpia, pero de alta inversión económica en materiales, montaje y mantenimiento. Es sobre este problema técnico de desempeño óptico, que con la presente Tesis se quiere aportar una propuesta particular de solución.

### **I.3. Propuesta de Solución**

Con el fin de mejorar la desventaja expuesta sobre la tecnología LFC, en el trabajo de Tesis se plantea que cambiando el diseño del Concentrador Parabólico Compuesto (CPC) estándar de una sola tubería de absorción, por otro de características particulares que contenga 2 tuberías de absorción gemelas, se podría aumentar la captación de la energía de concentración primaria, distribuyendo además más uniformemente la radiación incidente por efecto del nuevo diseño de la cavidad concentradora, y como principal ventaja por la nueva configuración, poder realizar la recirculación casi inmediata del fluido de trabajo, de tal manera de ganar energía en “ida y vuelta” a través de las tuberías de absorción las veces que sean necesarias, hasta obtener las temperaturas que se requieren para el proceso aplicado final, propiciando así que el rendimiento global deje de ser función directa del rendimiento óptico.

El marco teórico que respaldará al estudio de Tesis, estará fundamentado en las ciencias de la Óptica asociada a la geometría solar [8], en las ciencias de la Transferencia de Calor y Masa [5], la Mecánica de fluidos [7], y la Termodinámica [6] que plasman los criterios de conservación de masa y energía, entropía disponibilidad transitoria y efectos ambientales asociados a las condiciones climatológicas de la zona, que servirán para encontrar los rendimientos térmicos y exergéticos finales, los cuales son calculados para conocer el potencial de trabajo útil extraíble del sistema.

### **I.4. Justificación**

En primer lugar, el presente trabajo de Tesis tiene la motivación técnica de llegar a aportar un nuevo tratamiento metodológico para lograr incrementar y distribuir mejor la captación de energía solar aprovechable en las tuberías de absorción, componentes esenciales de la tecnología de los Colectores Lineales Fresnel.

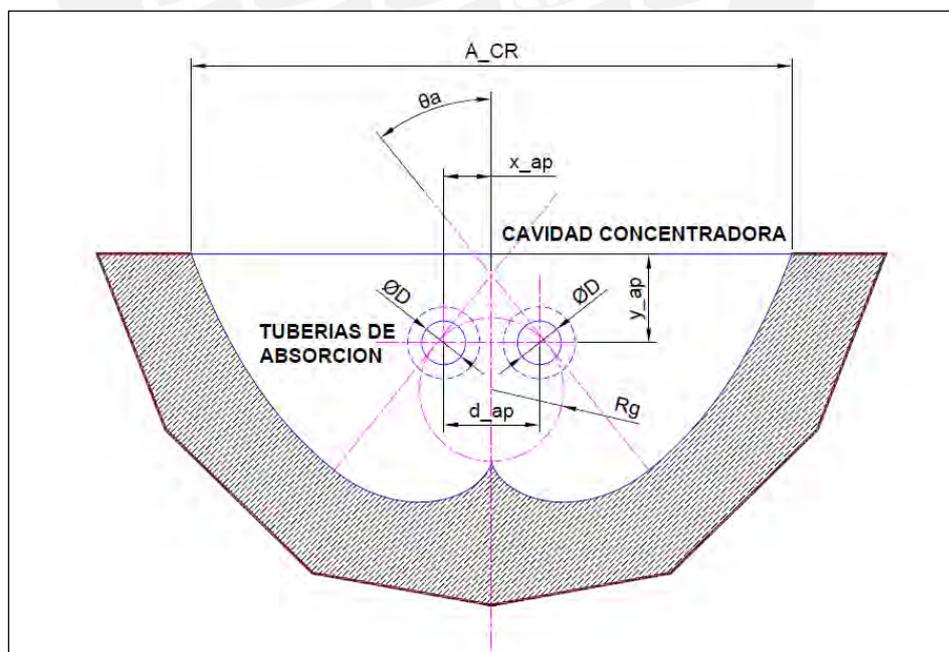
En segundo lugar, en el aspecto específico del problema, los CPCs estándar tienen la limitación de captar la energía radiante en un solo recorrido a través de la extensión de la tubería de absorción, no teniendo facilidad directa de realizar recirculación hacia la cavidad receptora lo que le resta funcionalidad y limita sus capacidades, con una solución que logre ganar esta facilidad se obtendría simplificación del sistema de absorción.

En tercer lugar, el estudio realizado toma importancia, por la necesidad de proponer una aplicación de un tipo de tecnología solar térmica, a la fecha no utilizada en nuestro país, como son los Colectores Lineales Fresnel, en zonas donde el recurso solar es favorable, y de esta manera poder contribuir a dar una solución técnica para resolver un problema social humano de abastecimiento de energía, para poblaciones vulnerables de bajos recursos económicos de la sierra como la comunidad de Pilpichaca, promoviendo además con ello el desarrollo sostenible.

### 1.5. Hipótesis

Es posible obtener una mejora en la captación energética promedio de un Concentrador Secundario tipo Parabólico Compuesto (CPC), de un Colector Lineal Fresnel (LFC), cambiando el diseño típico de cavidad estándar y una sola Tubería de Absorción, por un diseño nuevo con cavidad modificada y doble Tubería de Absorción del mismo diámetro y características, arreglo que le permitiría aumentar la captación solar y además distribuir más uniformemente el flujo energético en forma de calor que llega a la superficie en contacto con el Fluido de Trabajo [24], para las condiciones de aprovechamiento solar que ofrece la localidad adoptada como Caso de Estudio.

En la Figura I.4 se ilustra la ubicación de las variables a manejar en el presente trabajo:



**Figura I.4 - Parámetros de ajuste para optimización de un CPC Doble Absorbedor (Fuente: Elaboración propia).**

Las variables consideradas para la propuesta de mejora técnica, serán las siguientes: el Ángulo de Aceptancia ( $\theta_a$ ) y el Radio Generatriz ( $R_g$ ) para determinar el perfil de la cavidad concentradora, la cota horizontal respecto al eje de la cavidad concentradora ( $x_{ap}$ ), la cota vertical respecto al eje de la cavidad concentradora ( $y_{ap}$ ), el espaciamiento entre tuberías de absorción ( $d_{ap}$ ) y la Amplitud de la Cavidad Concentradora ( $A_{CR}$ ).

## **I.6. Objetivos**

### **Objetivo General**

Conseguir una mejora en el campo óptico de los Concentradores Parabólicos Compuestos (CPC), aplicable a la tecnología solar de los Colectores Lineales Fresnel (LFC), planteando obtener un incremento mínimo de un 5% en el rendimiento óptico [14], y una distribución más uniforme [24], en la capacidad de captación del flujo energético promedio que llega al elemento de absorción, comparativamente si la captación se diera con un concentrador CPC estándar optimizado.

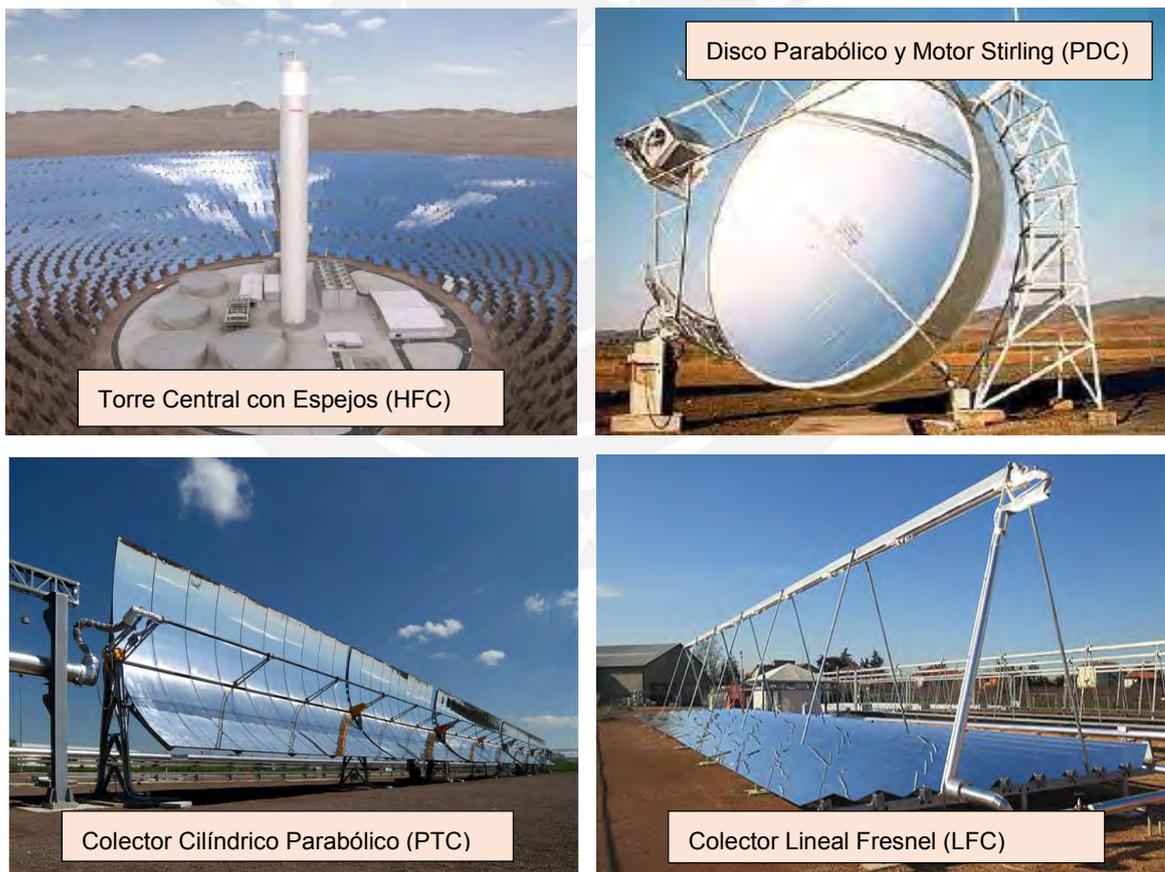
### **Objetivos Específicos**

- Evaluar el recurso solar disponible en la localidad geográfica de estudio, para ello se deben encontrar las coordenadas geodésicas de la zona propicia de implantación de la tecnología solar, con cuyos valores poder calcular los ángulos solares principales, estimar la trayectoria solar visto desde el sitio analizado. Con la información obtenida posteriormente determinar el valor de la radiación directa y difusa en base horaria, utilizando para ello modelos de estimación cuantitativa [8].
- Dimensionar el sistema LFC, más conveniente para la zona geográfica del caso de estudio, determinado el campo de espejos y la altura del sistema de recepción más adecuados, información básica a considerar para tener las condiciones geométricas y energéticas de entrada para el diseño del nuevo sistema receptor CPC del LFC [19].
- Realizar el diseño geométrico de la nueva cavidad concentradora CPC y la disposición más eficiente de las tuberías de absorción, para encontrar el mejor rendimiento óptico de concentración del Sistema [3] [20] [21].
- Elaborar una matriz climática sencilla, que pueda representar las características en las que podría operar el sistema en los días del año en la zona geográfica, en términos de temperatura, viento y nubosidad, para probar el LFC resultante con el nuevo CPC, en esas condiciones.

- Desarrollar un balance energético a través de la aplicación de los conceptos de la 1° y la 2° Ley de la Termodinámica, y hallar luego la eficiencia térmica lograda y la eficiencia exergética ganada para el proceso, por el Sistema LFC con el nuevo CPC propuesto [2]. Paralelamente realizar el mismo procedimiento para el Sistema LFC con CPC estándar y luego comparar los rendimientos finales para validar el objetivo general de esta investigación.

### I.6. Estado del arte

Dentro de la ingeniería de aprovechamiento termosolar se han desarrollado 4 principales tecnologías de captación del recurso solar, cada una de ellas con ciertas ventajas y desventajas de unas respecto a otras, según sea el caso de aplicación y el tamaño del Proyecto en que intervengan. En la Figura I.5 se puede ver la disposición de elementos captadores y receptores que presentan cada una de ellas.



**Figura I.5 - Principales tecnologías Termosolares actuales  
(Fuente: Fotos DLR 2012, Elaboración propia).**

La explotación del recurso solar en la vertiente térmica ha venido desarrollándose de forma dinámica, en estas 2 últimas décadas se han puesto en operación muchos

proyectos del rubro de gran y media escala principalmente en Europa y Asia, que han hecho que luego de la etapa de diseño teórico a partir de las experiencias ganadas en la operación misma, se refuercen mejor los enfoques hacia el afinamiento de los parámetros más determinantes para la operación más eficiente.

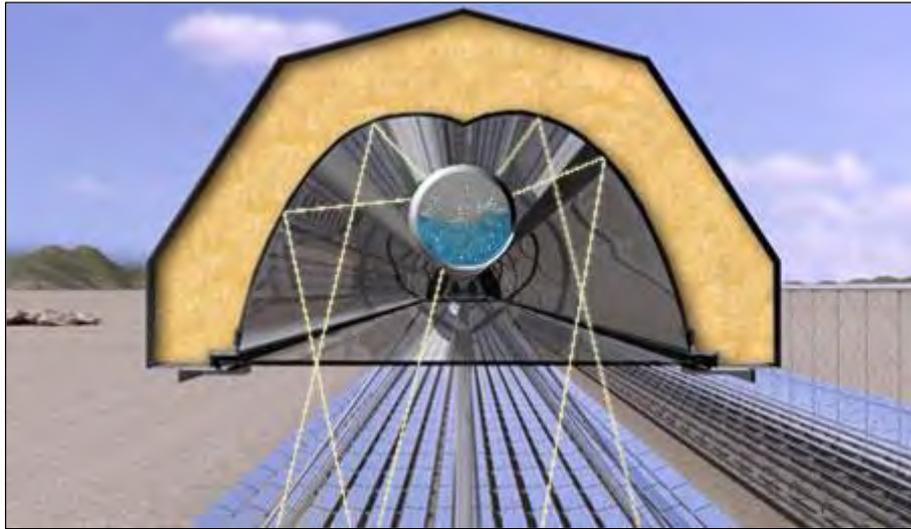
La tecnología de los Colectores Lineales Fresnel (LFC), actualmente es una de las alternativas de aprovechamiento solar más prometedoras dentro del rubro de colectores fototérmicos [17], por sus ventajas técnicas de concentración, simplicidad de ensamble de sus componentes y bajos costos de implementación. Muchas Plantas de este tipo han sido puestas en servicio en el mundo exitosamente realizando diseños acordes con la disponibilidad del recurso, según las características de producción, niveles de inversión y realidad social.



**Figura I.6 - Vista de Planta LFC de prueba FresDemo/Ferrostaal - Almería, España (Fuente: SPG Ferrostaal, 2012).**

Respecto a los avances realizados sobre la Cavity Receptora, donde la tecnología de los Concentradores Parabólicos Compuestos (CPC) es parte fundamental para los LFC, los diseños actuales utilizan una Tubería de Absorción con cubierta de vidrio al vacío. El perfilamiento geométrico se compone de una curva parabólica en combinación con una curva involuta, la cual se inicia bien próxima a la tubería y se extiende hasta la intersección de la línea proyectada para el ángulo de aceptación, de donde parte la parabólica, esta configuración fue encontrada por Winston y Welford en los finales de los años 70 y ha sufrido a la fecha pocas modificaciones.

Los trabajos de investigación experimental desarrollados en la actualidad sobre la Cavity Receptora [17], se dan para nuevas geometrías diferentes al CPC y provienen principalmente de ingenieros y físicos españoles, italianos, franceses e indios, donde la tecnología termosolar Fresnel ha ido ganando cierta madurez, por los proyectos ejecutados y puestos en operación.



**Figura I.7 – Sección Típica de CPC de LFC – Planta FresDemo/Ferrostaal – Almería, España (Fuente: SPG Ferrostaal, 2012).**



**Figura I.8 – Montaje de CPC de LFC – Planta FresDemo/Ferrostaal – Almería, España (Fuente: SPG Ferrostaal, 2012).**

### **I.6.1. La Tecnología de Colectores Lineales Fresnel**

Los Colectores Lineales Fresnel (LFC) son sistemas fototérmicos sencillos y de baja inversión, que alcanzan eficiencias de un nivel medio [17] (alrededor de 40% global entre óptica y térmica), muy funcionales para acomodarse a diferentes locaciones por su facilidad de montaje y adaptación a zonas geográficas y áreas climáticas.

La tecnología Fresnel es la más clara competencia a la tecnología de los Colectores Cilindro Parabólicos (PTC) [9], las une además el mismo principio de concentración "lineal" de energía radiante, que las diferencia de las demás tecnologías que operan por concentración "puntual", asimismo ambas tecnologías LFC y PTC comparten los mismos principios ópticos y térmicos para el diseño de su geometría, diferenciándose solo en que esta última por la calidad y mayor precisión de sus elementos componentes para aprovechamiento solar, obtiene un rendimiento óptico mayor a la tecnología Fresnel (alrededor de 25%), pero a costo de gran inversión.

Un sistema termosolar LFC está constituido por los siguientes elementos:

#### **a) Campo de espejos:**

Llamado también Campo Especular, es el sistema de captación primario conformado por un número de espejos planos dispuestos en filas paralelas, separados con una tolerancia tal que le permita no interferir la radiación que refleja o recibe del espejo vecino. El número de espejos a utilizar por flanco (derecho o izquierdo) dependerá del nivel de concentración que se quiere lograr con ello. A más espejos mayor concentración pero también más área de terreno a utilizar. Los espejos pueden girar alrededor de su eje medio transversal durante el día, para hacer seguimiento al sol mediante un mecanismo diseñado para cumplir esa función.

#### **b) Tubería de Absorción**

Es el elemento "usuario" de la energía, encargado de captar la radiación útil reflejada por el sistema primario o secundario. Está constituido por un tubo o tubos de acero o cobre que pueden presentarse como desnudos o con cobertura de vidrio al vacío que disminuyen grandemente el índice por pérdidas convectivas. Para mejoramiento de la Absortancia y disminución de la Reflectancia, se recomiendan la habilitación de los receptores como superficies selectivas, mediante el recubrimiento con capas de pintura con esas propiedades.

**c) Cavity Receptora:**

Es el componente a manera de caja donde se aloja la tubería receptora, la misma que está localizada en la parte más alta respecto al campo de espejos. Esta puede en su mayoría ser de 2 tipos:

- **Tipo Concentrador Secundario Parabólico Compuesto (CPC)**

Es un espejo de cavidad curvada, formada por un sector geométrico de involuta y un sector parabólico cuya finalidad es captar los rayos reflejados que “no dieron en el blanco” y redirigirlos hacia el receptor. Este sistema es importante porque asegura que la mayoría de los rayos reflejados llegue de alguna forma a su destino. El concentrador secundario contiene a la tubería receptora en su foco geométrico y se ubica en una posición alta para recoger las radiaciones reflejadas por el Campo de Espejos.

- **Tipo Cavity Trapezoidal (TCR)**

Actualmente es usado en reemplazo del concentrador secundario, cuando se requiere irradiar sobre múltiples tuberías receptoras de pequeño diámetro (entre ½” y 1” preferentemente), es recomendable para aplicaciones donde se necesita realizar recirculación del Fluido de Trabajo para ganar mayores temperaturas o estados de vapor sobrecalentados. Su eficiencia térmica no es comparativa con el concentrador secundario, porque al no re-direccionar permanentemente los rayos incidentes siempre existe el riesgo de energía perdida por reflexión.

**d) Fluido de Trabajo**

Para el proceso de transferencia energética solar se requiere un medio absorbente y de transporte de la energía ganada. Este papel lo cumple el Fluido de Trabajo el cual debe contar con propiedades físicas convenientes como son alta Absortancia y baja Emitancia para lograr la mayor captación energética. Como Fluido de Trabajo se pueden utilizar líquidos tales como: el agua o vapor de agua, aceites térmicos como Therminol VP1 muy extendido en muchas aplicaciones solares, metales líquidos como el estaño y sales fundidas, así como también gases como: el aire y el dióxido de carbono.

#### **e) Mecanismo de Seguimiento Solar**

Para permitir que el Sistema LFC siempre obtenga la máxima radiación posible, se debe contar con un sistema mecánico o electrónico o mixto (servomotores mecatrónicos), que aseguren que los espejos siempre se orienten a un ángulo que refleje los rayos solares capturados hacia el punto objetivo situado en el tubo colector de radiación.

#### **f) Estructura de Soporte**

El concentrador secundario o caja de cavidad trapezoidal se encuentra ubicado a una altura sobre el suelo que le permita aprovechar la radiación directa de todo el campo de espejos, por ello necesita anclarse a una estructura metálica de apoyo, la cual está conformada por un fila de columnas o pórticos que han de cubrir la extensión de su longitud, estos elementos deben contar con un arrostramiento lateral y longitudinal respecto a la tubería colectora, para mantener la perpendicularidad de las columnas y reforzar además su rigidez ante los embates de los vientos.

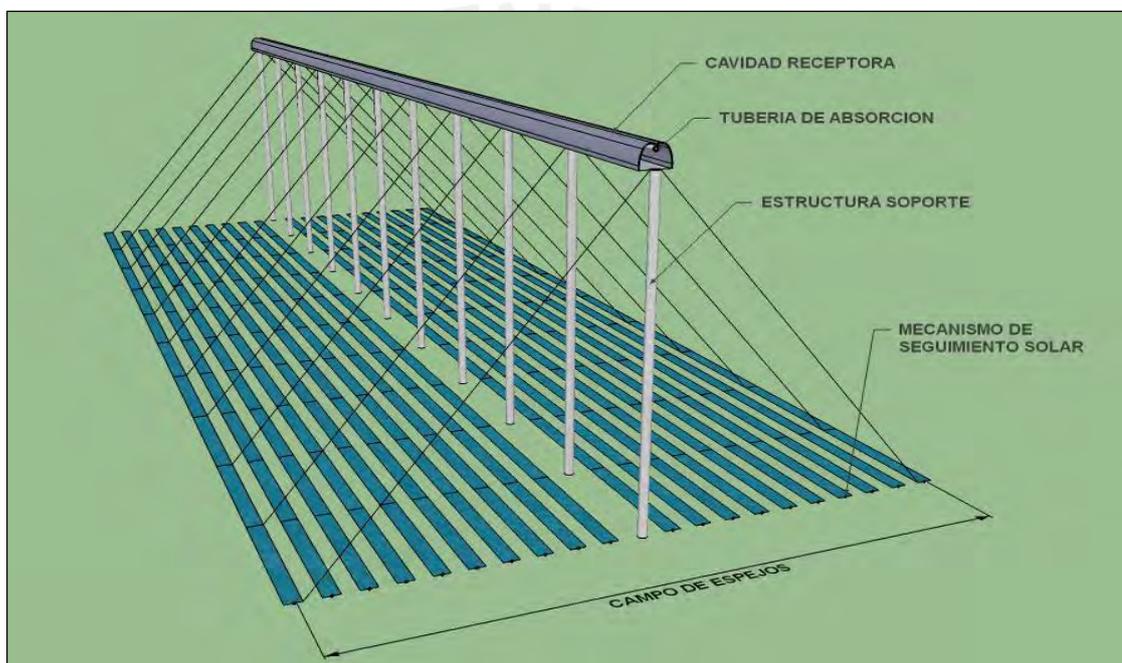
#### **g) Terreno de Implantación**

Es el área natural donde se habilitarán todas las instalaciones que correspondan para la tecnología implementada. Esta debe contar con una topografía más o menos plana, libre de interferencias ópticas naturales, cercanía a recursos hídricos y facilidades de acceso de redes de distribución. Un indicador importante en relación al aprovechamiento del terreno es el “factor de cubrimiento”, con el cual se puede estimar el ratio del área ocupada por los captadores solares principales, respecto al área total del terreno.

De acuerdo a las experiencias obtenidas en diferentes Plantas LFC, se sabe que se pueden obtener incrementos de temperatura mayores a 120°C como mínimo, en las horas aprovechables según la localización geográfica de las instalaciones, con ello se puede disponer si el Fluido de Trabajo es agua, desde agua caliente para usos domésticos o semindustriales, vapor para procesos industriales y hasta vapor sobrecalentado como insumo para generación eléctrica mediante un ciclo Rankine.

Los LFC de acuerdo a la zona geográfica donde se encuentren localizados requieren ser ajustados en sus parámetros de diseño [17], ya que presentan limitaciones para el aprovechamiento máximo promedio de la energía solar captada en las horas útiles del día. Esto se debe esencialmente a la presencia de interferencias por sombras entre sus

espejos, ocasionadas por el cambio de dirección frecuente de los rayos incidentes con la trayectoria solar, de igual forma por la geometría del equipo mismo, como por ejemplo la amplitud de la cavidad de ingreso de la Caja Receptora (boca del CPC o TCR), que puede resultar inadecuada por el ángulo de llegada de la radiación directa reflejada en los espejos concentradores primarios, también debido al número de estos espejos que conforman la extensión del Campo de Espejar, y por último la altura de instalación de la Cavidad Receptora portadora de la Tubería de Absorción, que requiere sincronizarse con el Campo de Espejos, para que todo el conjunto colabore para la recepción de la máxima energía posible.



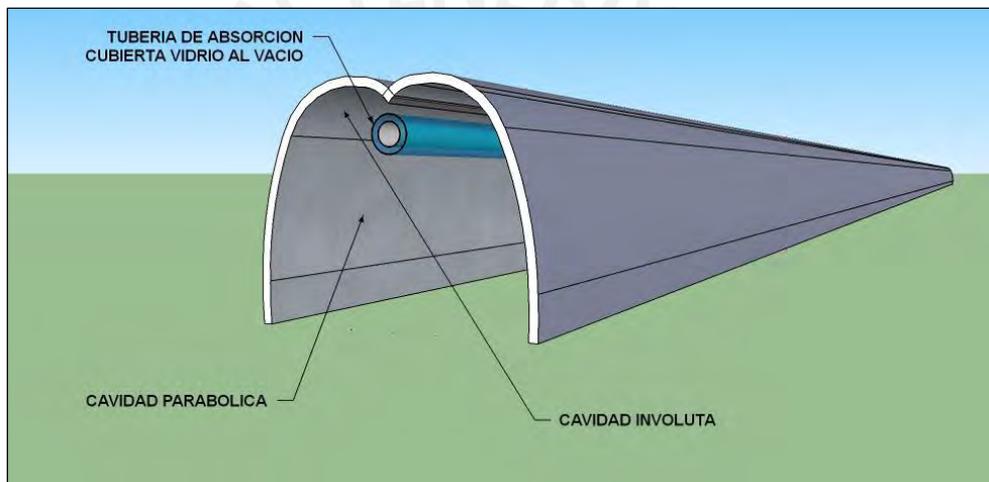
**Figura I.9 – Componentes principales de un Colector Lineal Fresnel (LFC)**  
(Fuente: Elaboración propia).

### **I.6.2. La Tecnología de los Concentradores Secundarios**

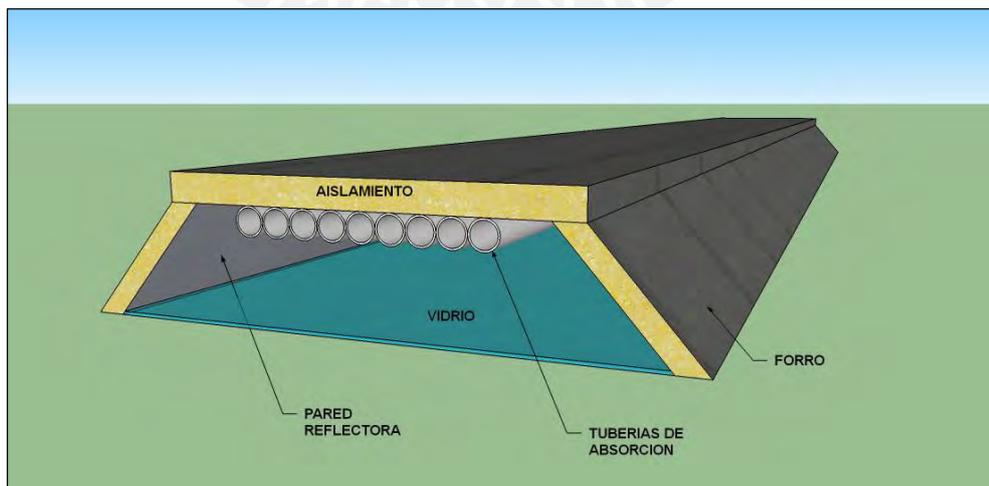
Una de las alternativas de aseguramiento para obtener la mayor eficiencia posible de un Sistema LFC, es la aplicación de los Concentradores Secundarios en el diseño de la Cavidad Receptora, las ventajas que presenta esencialmente se circunscriben en poder reflejar de una manera efectiva debido a la geometría que poseen, la mayor cantidad de flujo radiante hacia el elemento absorbedor por lo que su rendimiento óptico individual es mayor respecto a otros diseños. Los concentradores secundarios que son más usados son los Concentradores Parabólicos Compuestos (CPC) y los Concentradores

Parabólicos Segmentados, provenientes de la familia de Concentradores tipo PTC, pero en su versión más pequeña.

La otra opción de diseño que entra en competencia con ella y que ha ganado popularidad en muchos proyectos ejecutados, son los receptores de cavidad trapezoidal mencionados anteriormente, que tienen la ventaja de utilizar múltiples tuberías de menor diámetro para captar la energía radiante proveniente de los concentradores primarios (Campo Especular), facilitando ganar incrementos de temperatura continuados por la acción de realizar varias pasadas a través de la cavidad receptora, utilizando la estrategia de mejorar su eficiencia térmica en lugar de su eficiencia óptica, para aumentar así su eficiencia global final.



**Figura I.10 - Configuración estándar de un Concentrador CPC (Fuente: Elaboración propia).**

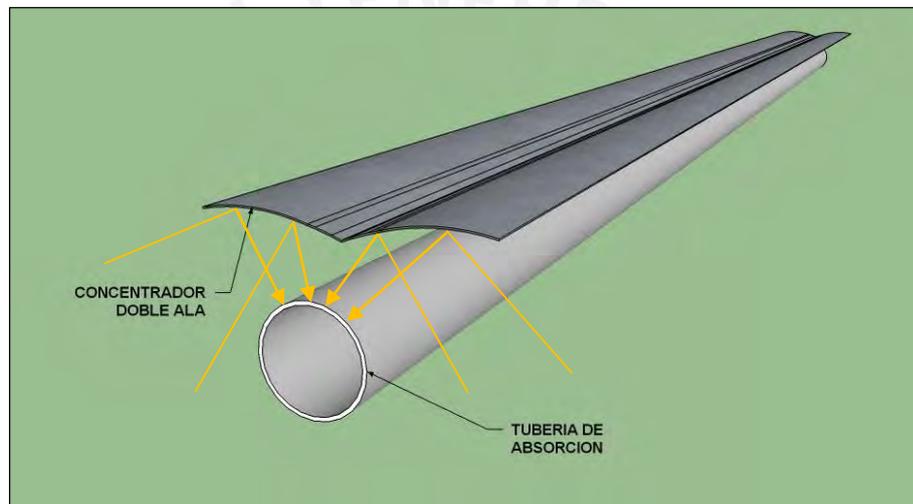


**Figura I.11 - Configuración estándar de un Receptor Cavidad Trapezoidal (Fuente: Elaboración propia).**

Por otro lado existen muchos diseños teóricos que se han propuesto a la fecha, y de los cuales algunos de ellos ya han tenido repercusión importante a nivel experimental, proyectándose como potenciales soluciones en combinación con las nuevas formas para los Campos de Espejos, a continuación pasamos a citarlos y detallarlos brevemente:

**a) Concentrador Secundario tipo Doble Ala (Grena & Tarquini) [21]**

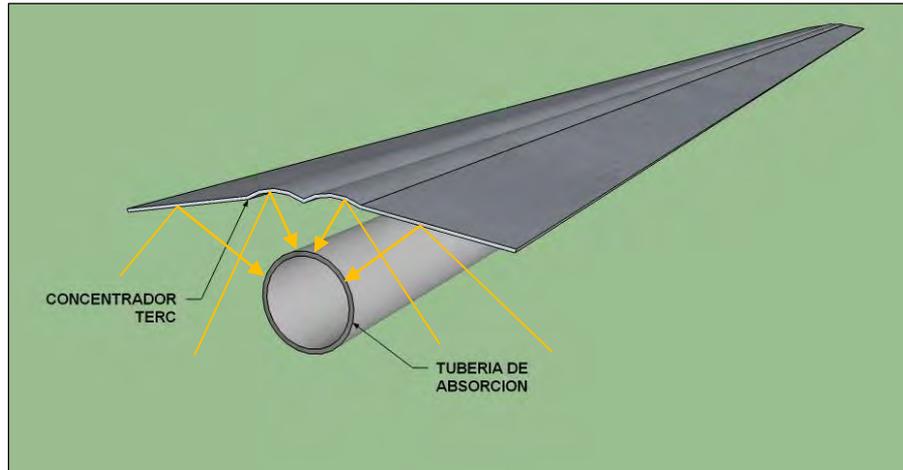
Presenta un arreglo de tipo “gaviota”, compuesto por la superposición de dos curvas parabólicas opuestas, teniendo como punto focal una sola tubería de absorción, este diseño se propuso para trabajar teniendo como fluido de trabajo sales fundidas de alta conductividad térmica.



**Figura I.12 - Configuración de un Concentrador solar Doble Ala (Fuente: Elaboración propia).**

**b) Concentrador Secundario tipo de borde adaptado TERC (Gordon & Ries) [11]**

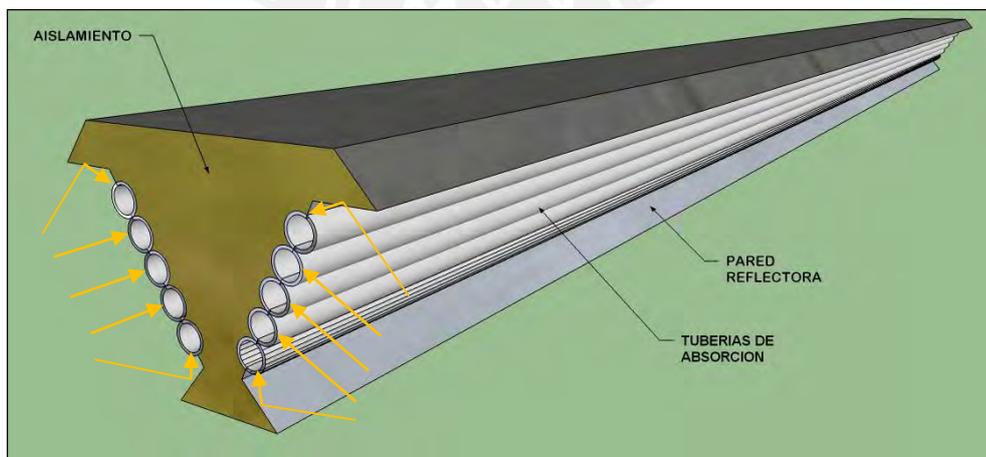
Compuesto por un sector central de geometría de involuta simétrica y los lados laterales por espejos planos, este diseño complementa la configuración optimizada del Campo Espectral denominado “Etendue-Matched”, que propone 2 cavidades reflectoras semi-elípticas extremas y una sector entre ellas de transición con forma de peldaños con perfilamiento de parabólica, todos estos elementos a nivel del piso y totalmente fijos.



**Figura I.13 - Configuración de un Concentrador solar TERC  
(Fuente: Elaboración propia).**

**c) Concentrador Secundario tipo Triángulo Invertido (Abbas) [16]**

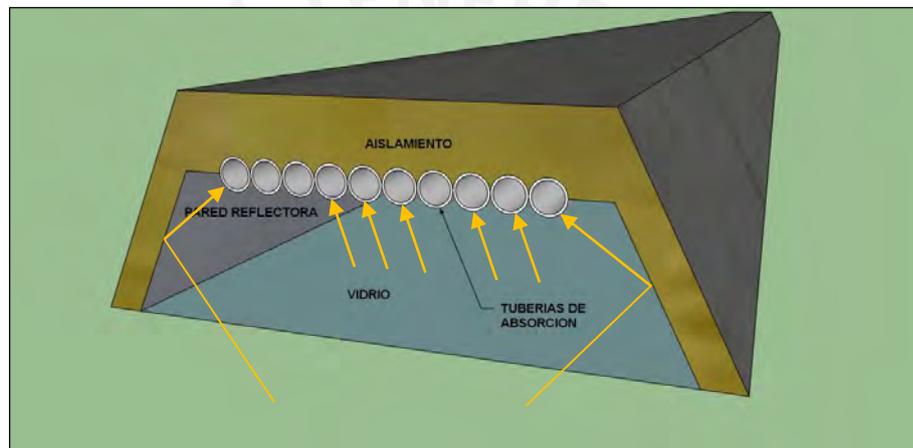
Consiste en 2 cavidades receptoras del tipo trapezoidal dispuestas simétricamente una a espaldas de la otra, que contienen sendas líneas de tuberías de diámetros menores, que complementan la modificación hecha en el campo de espejos, para enfocarse en concentrar la radiación solar en solo en receptor por flanco. Este diseño se propone como eficiente en aplicaciones para los sistemas de captación denominados Colectores Lineales Fresnel Compactos (CLFC), que se encuentran compuestos por 2 tuberías de absorción, donde su campo especular está orientado para focalizar alternativamente uno y otro receptor por cada espejo.



**Figura I.14 - Configuración de un Concentrador tipo Triángulo Invertido  
(Fuente: Elaboración propia)**

**d) Concentrador Secundario tipo Cavity Trapezoidal Semiaislado (Singh) [19]**

Este es una variante del concentrador de cavidad Trapezoidal estándar, pero que tiene solo en exposición a la radiación solar, la mitad de la sección de las múltiples tuberías de diámetro pequeño que posee, quedando la otra mitad incrustada dentro del aislamiento que posee. Esta alternativa es usada como la versión optimizada para muchas aplicaciones actuales, preferida por su versatilidad y uniformidad de distribución del flujo, para las aplicaciones de temperaturas superiores a los 180°, en regiones con alta disponibilidad del recurso.



**Figura I.15 - Configuración de un Concentrador de Cavidad Trapezoidal Semiaislado (Fuente: Elaboración propia).**

## CAPÍTULO 1

### MARCO TEÓRICO

Los fundamentos teóricos que han de ser las herramientas para elaborar los modelos matemáticos de análisis estarán asociados a las ciencias de la Óptica Geométrica, la Transferencia de Calor y la Termodinámica. A continuación pasaremos a detallar los conceptos científicos y experimentales sobre los cuales se sustentará la presente investigación, la idea flotante es de hilvanar de la mejor manera la interrelación de las disciplinas para que el cuerpo final englobe con claridad lo que se busca.

#### 1.1. Concentrador Secundario Parabólico Compuesto (CPC)

Los Concentradores Parabólicos Compuestos (CPCs) pertenecen a la categoría de dispositivos ópticos que se fundamentan en el principio de sistemas de “no imagen” los cuales modifican o reflejan la luz de forma distorsionada, transmitiendo solo un espectro variado según densidad de flujo incidente en el área. Estos sistemas aparecieron a mediados de los años 60 cuando se observaron, al menos en tres laboratorios de países diferentes, que la luz podía ser reflejada y concentrada de forma eficiente para muchos propósitos. El tratamiento de diseño de estos sistemas de “no imagen” difiere radicalmente del diseño óptico convencional y, para el caso de la radiación solar permite realizar diseños cercanos al límite de concentración teórica máxima.

Los sistemas ópticos formadores de imagen se basan en el objeto y la imagen que la óptica forma del objeto, mientras que en los sistemas ópticos no formadores de imagen en lugar del objeto se tiene la fuente de luz y en lugar de la imagen se tiene un receptor donde se generará una mapa de irradiación proveniente de la fuente.

La aplicación de los Sistemas “no imagen” no ha sido exclusividad de la energía solar, estos también se han aplicado para trabajos de investigación en el campo electromagnético como en la detección de radiación infrarroja, óptica de receptores visuales, fotomultiplicadores, etc.

La Óptica Geométrica en el estudio de los mecanismos de propagación de la luz, hace uso de las leyes de reflexión y de la refracción sobre el principio de Fermat y la Ley de Snell.

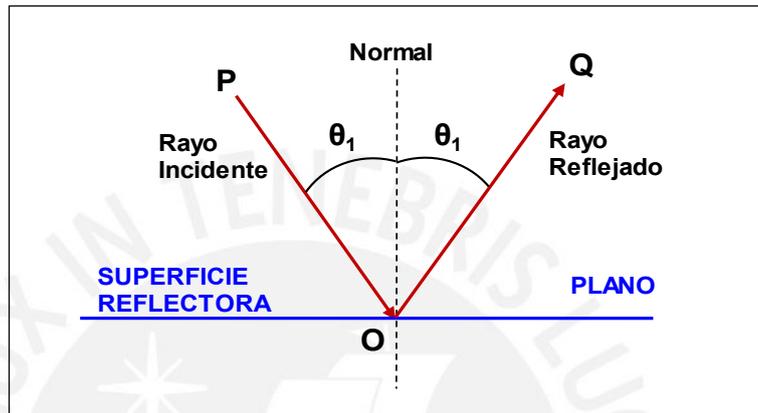
Al respecto es importante invocar dichos postulados, para tener presente de que estamos hablando:

**a) 1° Ley de la Reflexión:**

El ángulo de incidencia (formado por el rayo incidente y la recta normal) es igual al ángulo de reflexión (formado por el rayo de reflexión la normal).

**b) 2° Ley de la Reflexión:**

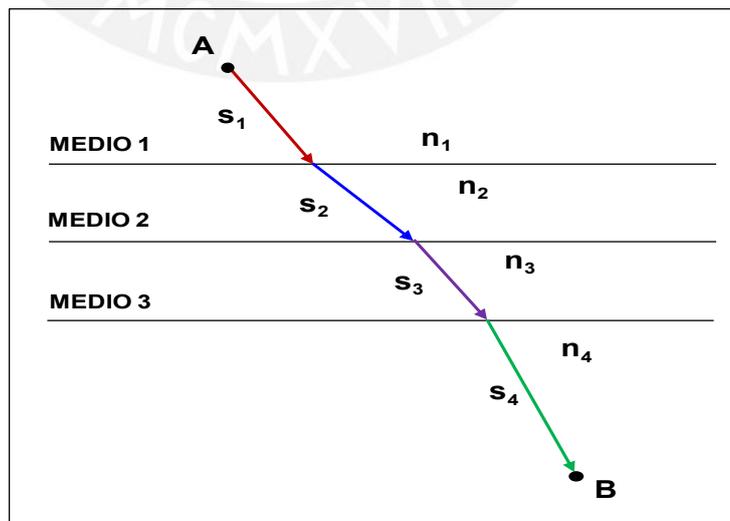
El rayo incidente, el rayo reflejado y la recta normal se encuentran en un mismo plano.



**Figura 1.1 – Esquema para definición de Leyes de la Reflexión (Fuente: Elaboración propia).**

**c) Principio de Fermat:**

Un rayo al ir de un punto A hacia un punto B debe recorrer una longitud de camino óptico que es estacionario o mínimo con respecto a variaciones de ese camino.



**Figura 1.2 – Esquema para definición de Principio de Fermat (Fuente: Elaboración propia).**

$$t = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^m S_i n_i \quad (1.1)$$

Donde:

$t$  Tiempo que emplea la luz (s)

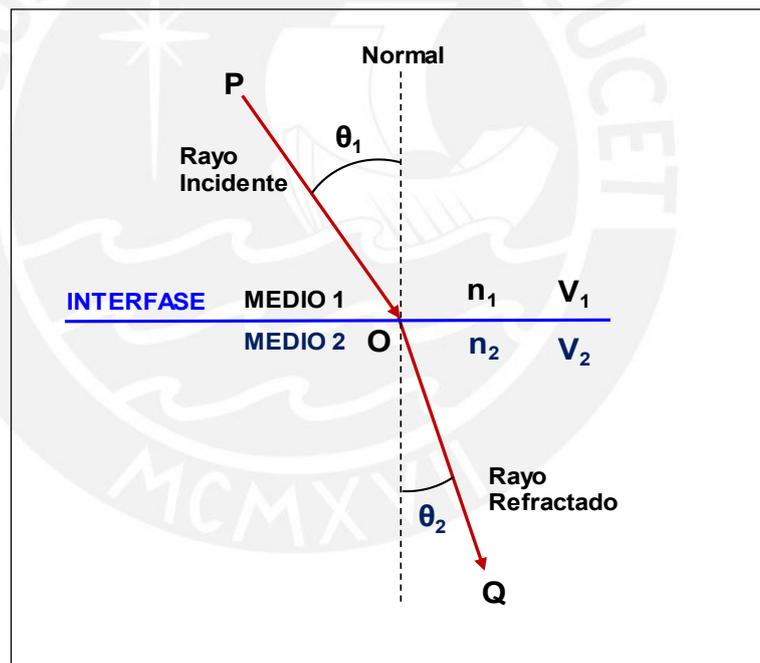
$c$  Velocidad de la luz (m/s)

$S_i$  Trayectoria seguida (m)

$n_i$  Índice de refracción del medio

**d) Ley de Snell:**

El producto del índice de refracción por el seno del ángulo de incidencia respecto a la normal, es constante para cualquier rayo de luz incidiendo sobre la superficie límite de dos medios.



**Figura 1.3 – Esquema para definición de Ley de Snell de la Refracción (Fuente: Elaboración propia).**

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\text{seno}\theta_2}{\text{seno}\theta_1} \quad (1.2)$$

Estas leyes y principios son la base para el desarrollo de las técnicas de trazado de rayos incidentes-reflejados, que se usan para perfilar la geometría de un CPC.

La cavidad típica de un CPC está compuesta por una sección simétrica de parábolas e involutas, dispuestas para redireccionar los rayos incidentes a la superficie perimétrica de la Tubería de Absorción.

La curva parabólica aporta su propiedad de concentración focal geométrica para ángulos límite, y la involuta aporta la concentración focal para sectores concéntricos cerrados.

Las ecuaciones que gobiernan la geometría de los CPCs vienen dadas por las siguientes expresiones:

a) Distancia entre la tangente a la tubería de absorción al inicio de la parábola

$$A = \frac{\frac{\pi}{2} + \theta_a + \varphi - \cos(\varphi - \theta_a)}{1 + \text{seno}(\varphi - \theta_a)} \quad (1.3)$$

$$\varphi_1 = \frac{\pi}{2} + \theta_a \quad (1.4)$$

b) Ecuaciones para la curva Parabólica:

$$x = r(\text{seno}\varphi - A\cos\varphi) \quad (1.5)$$

$$y = -r(A\text{seno}\varphi + \cos\varphi) \quad (1.6)$$

$$\frac{\pi}{2} + \theta_a \leq \varphi_2 \leq \frac{3\pi}{2} - \theta_a \quad (1.7)$$

c) Ecuaciones para la curva Involuta:

$$x = r(\text{seno}\varphi - \varphi\cos\varphi) \quad (1.8)$$

$$y = r(\varphi\text{seno}\varphi + \cos\varphi) \quad (1.9)$$

$$0 \leq \varphi_3 \leq \frac{\pi}{2} + \theta_a \quad (1.10)$$

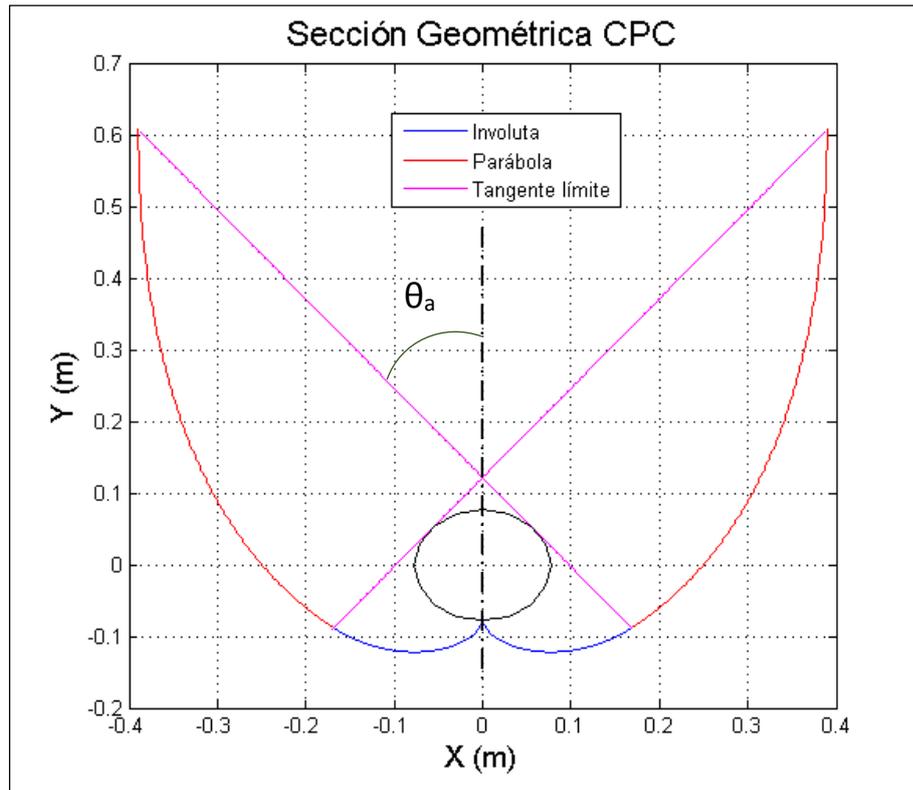
Donde:

$\theta_a$       Ángulo de aceptación (°)

$\varphi_i$       Parámetro de caracterización de la geometría de la superficie (°)

Las propiedades de la geometría del CPC determinan el índice de concentración geométrico ( $C_g$ ), que es función directa del ángulo de aceptación:

$$C_g = \frac{1}{\text{seno}(\theta_a)} \quad (1.11)$$



**Figura 1.4 – Curvas generadas con las ecuaciones de la sección de un CPC**  
(Fuente: Elaboración propia).

Los CPCs que aplican a los LFC cumplen solo con un perfil bidimensional en el plano transversal de la Tubería de Absorción y su geometría es extendida por extrusión a lo largo de la Cavidad Receptora.

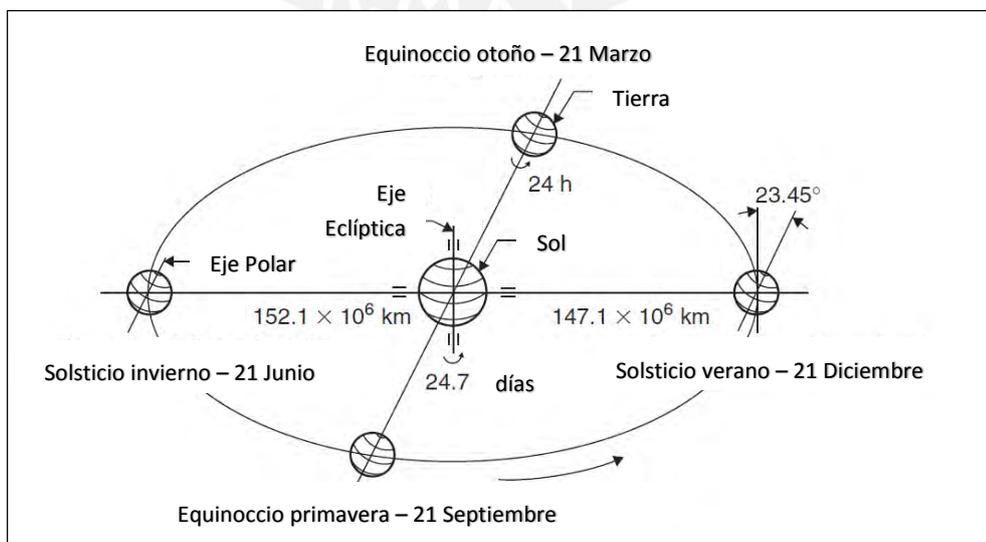
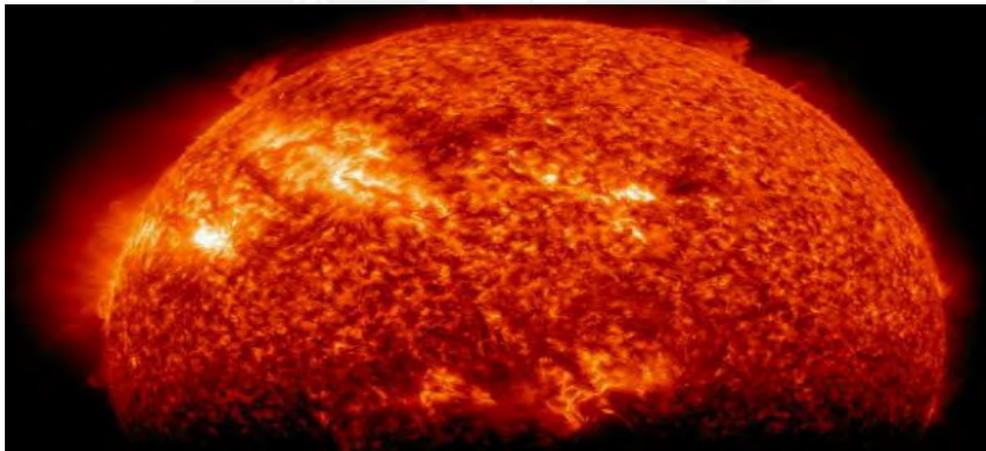
## 1.2. El Sol como fuente de Energía

Nuestro Sol es la estrella proveedora de toda la energía que consumimos en el planeta, es la fuente primaria quien da origen a todas las demás energías, las cuales son producto de almacenamiento o procesamiento de esta primigenia. El sol es un reactor de fusión atómica continuo en el que el hidrógeno se está convirtiendo constantemente en helio produciendo la energía que irradia. El sol tiene un diámetro de  $1.392 \times 10^9$  m y alcanza una temperatura de 5,760 K que es la que le correspondería idealmente a un cuerpo negro en constante emisión. La distancia que se encuentra respecto al planeta Tierra es de  $1.5 \times 10^8$  km, su energía total estimada es de  $3.8 \times 10^{20}$  MW que corresponde a  $63 \text{ MW/m}^2$  de la superficie solar. Esta energía es irradiada hacia fuera de él en todas las direcciones, la Tierra recibe sólo una fracción limitada de la radiación total emitida igual a

$1,7 \times 10^{14}$  kW, sin embargo, incluso con esta pequeña fracción, se estima que 84 min de radiación solar que cae sobre la Tierra es igual a la demanda energética mundial durante un año (aprox.  $900 \times 10^{18}$  J). La trayectoria seguida por el Sol a lo largo del año afectada por la declinación terrestre va determinando las estaciones del año, que van marcando la forma como llega la radiación en cada temporada, la que resulta importante estimar para el cálculo de los ángulos solares característicos con el objetivo de conocer la disponibilidad del recurso.

La radiación del sol que llega al punto donde inicia la atmosfera terrestre respecto a un plano perpendicular a ella, tiene un valor promedio estimado en  $1,367 \text{ W/m}^2$  (World Radiation Center), al que se le ha denominado Constante Solar ( $G_{sc}$ ), la cual representa el límite máximo que puede alcanzar la energía radiante en la Tierra.

El aprovechamiento de la energía solar está condicionada a la zona geográfica y la situación climática presente en ella durante el año, variando por consiguiente según la trayectoria solar relativa al punto de interés.



**Figura 1.5 – El Sol y el Movimiento anual de la Tierra (Fuente: [8]).**

### 1.3. Parámetros importantes de la Óptica Solar

La manera de monitorear el movimiento relativo del sol visto desde un sitio en particular del globo terráqueo durante un día, mes o año, se realiza mediante un sistema especial de coordenadas esféricas (azimut solar vs elevación solar), estas se usan valiéndose de un artificio Tolomaico (teoría geocéntrica), para determinar la trayectoria de puntos que marcan como el Sol se mueve “alrededor de la Tierra”.

A continuación se describen los ángulos que darán lugar a los parámetros básicos de ruteo:

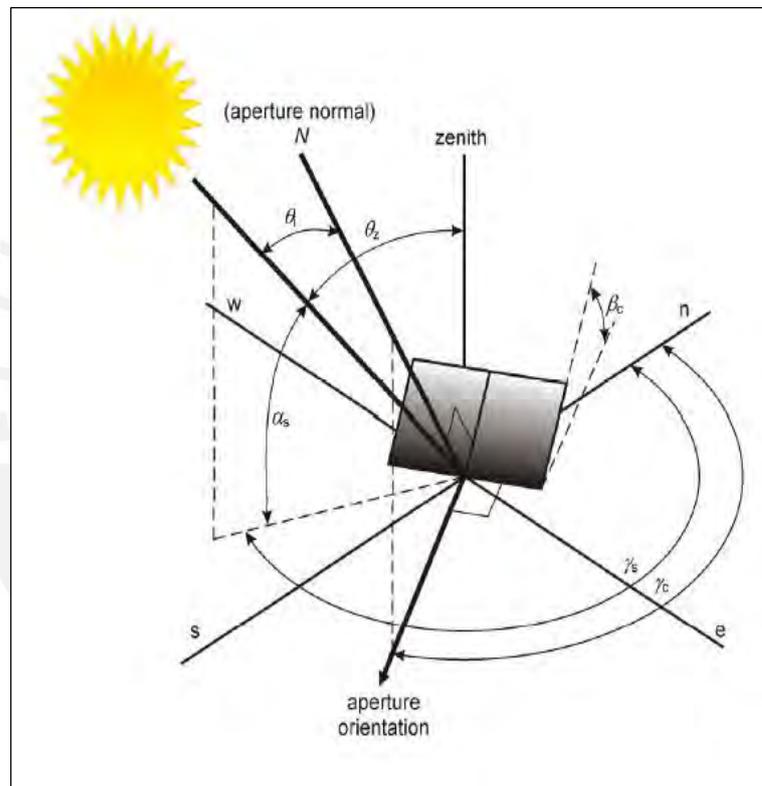


Figura 1.6 – Esquema para definición de ángulos solares (Fuente: [9]).

#### Longitud ( $\lambda$ ):

Distancia angular de cualquier lugar geográfico de la Tierra al meridiano de Greenwich; negativo para el hemisferio sur.  $-180^\circ < \lambda < 180^\circ$ .

#### Latitud ( $\phi$ ):

Distancia angular de cualquier lugar geográfico de la Tierra al ecuador terrestre. Negativo para el hemisferio sur.  $-90^\circ < \phi < 90^\circ$ .

### **Ángulo de Declinación ( $\delta$ ):**

Formado entre el plano ecuatorial terrestre y los rayos solares incidentes. Positivo en invierno para el hemisferio Sur.  $-23.45^\circ < \delta < 23.45^\circ$ .

$$\delta = 23.45 \text{ seno } [ 360 (284 + n) / 365 ] \quad (1.12)$$

### **Ángulo Horario ( $\omega$ ):**

Formado entre el meridiano del observador y el meridiano paralelo a los rayos de sol. Negativo en la mañana,  $0^\circ$  al mediodía.  $-180^\circ < \omega < 180^\circ$ .

$$\omega = \arcsin (- \tan \varphi \tan \delta) \quad (1.13)$$

### **Ángulo de Azimut superficial ( $\gamma_c$ ):**

Ángulo de orientación del plano de análisis respecto al norte geográfico.

### **Ángulo de inclinación relativa ( $\beta_c$ ):**

Ángulo de inclinación del plano de análisis respecto a la superficie.  $0 < \beta_c < 360^\circ$ .

### **Ángulo de Zenit ( $\theta_z$ ):**

Complemento angular del ángulo de elevación solar.

$$\theta_z = 90 - \alpha_s \quad (1.14)$$

### **Ángulo de Incidencia ( $\theta_i$ ):**

Formado entre los rayos solares y la normal al plano de incidencia.

$$\theta_i = \arccos [(\text{seno } \delta \text{ seno } \varphi \cos \beta_c) - (\text{seno } \delta \cos \varphi \text{ seno } \beta_c \cos \gamma_c) + (\cos \delta \cos \varphi \cos \beta_c \cos \omega) + (\cos \delta \text{ seno } \varphi \text{ seno } \beta_c \cos \gamma_c \cos \omega) + (\cos \delta \text{ seno } \beta_c \text{ seno } \gamma_c \text{ seno } \omega)] \quad (1.15)$$

### **Ángulo de Azimut Solar ( $\gamma_s$ ):**

Ángulo formado entre el norte y la ubicación proyectada del sol sobre el plano horizontal.  $0 < \gamma_s < 360^\circ$ .

$$\gamma_s = \text{signo } (\omega) [ \arccos [ (\cos \theta_z \text{ seno } \varphi - \text{seno } \delta) / (\text{seno } \theta_z \cos \varphi) ] ] \quad (1.16)$$

### Ángulo de Elevación Solar ( $\alpha_s$ ):

Ángulo vertical formado entre el ubicación proyectada del sol sobre el plano horizontal.  $0 < \alpha_s < 90^\circ$ .

$$\alpha_s = \text{arc seno} [\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \text{seno } \varphi \text{ seno } \delta] \quad (1.17)$$

### Tiempo solar:

Es la hora basada en el movimiento angular aparente del sol en el cielo con el mediodía ubicado cuando el sol cruza el meridiano del observador.

$$\text{Tiempo solar} = 4 (\text{Lst} - \text{Lloc}) + E + \text{Tiempo estándar} \quad (1.18)$$

### Ecuación del Tiempo:

$$E = 229.2 ( 0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \text{ seno } B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \text{ seno } 2B ) \quad (1.19)$$

$$B = (n - 1) (360 / 365) \quad (1.20)$$

Donde:

Lst Huso horario más próximo ( $^\circ$ )

Lloc Longitud geográfica del sitio ( $^\circ$ )

### Ángulo Transversal ( $\theta_{\text{trans}}$ ):

Formado entre el zenit y la proyección de los rayos incidentes del sol en un plano transversal.

$$\tan \theta_T = \frac{\text{seno } \gamma_s}{\tan \alpha_s} \quad (1.21)$$

### Ángulo Longitudinal ( $\theta_{\text{long}}$ ):

Formado entre el zenit y la proyección de los rayos incidentes del sol en un plano longitudinal.

$$\tan \theta_L = \cos \gamma_s \cos \alpha_s \quad (1.22)$$

Estos 2 últimos ángulos que se muestran en la Figura 1.7, son los determinantes para calificar el desenvolvimiento óptico del Sistema Colector Fresnel. El plano al que se

relaciona (transversal o longitudinal) depende de cómo sea la orientación que se le imponga al Sistema de captación solar general, que puede ser Norte-Sur o Este-Oeste.

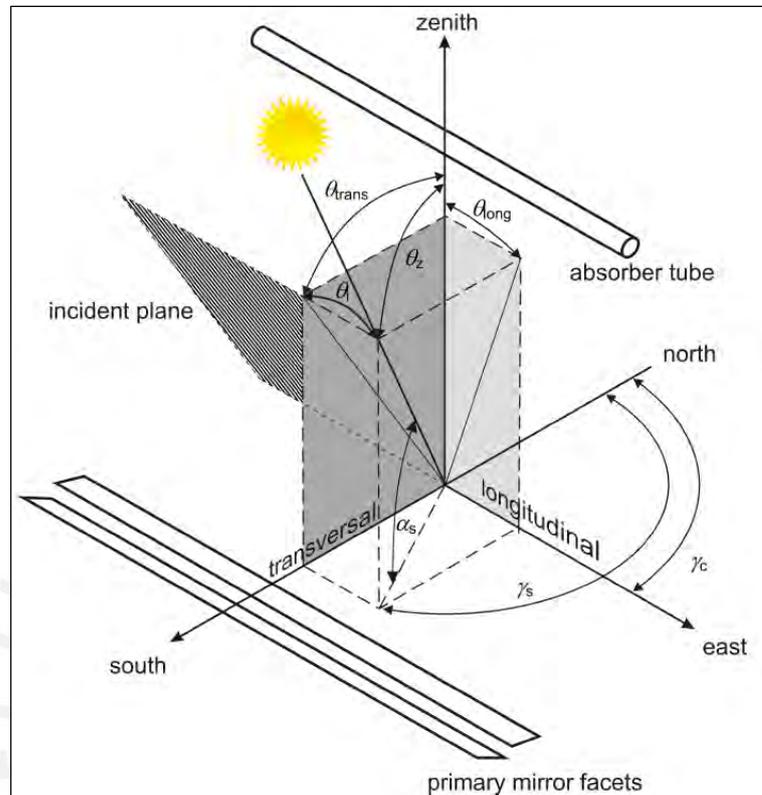


Figura 1.7 – Ángulos solares principales de rendimiento (Fuente: [9]).

### Ángulo de Incidencia Modificado (IAM)

Comúnmente las mediciones de rendimiento son tomadas de acuerdo con el nivel de insolación medido perpendicularmente al plano del receptor. Cuando el sol incide en la tubería receptora con otro ángulo, el rendimiento varía y es lo que el valor del IAM nos aporta, un factor angular de rendimiento.

$$IAM(\theta) = IAM_{trans}(\theta_T) \times IAM_{long}(\theta_i) \quad (1.23)$$

El  $IAM_{long}$  es función del ángulo de incidencia (no del Ángulo Longitudinal)

$$IAM_{long} = f(\theta_i) \quad (1.24)$$

Este factor se complementa con los efectos ópticos de pérdidas coseno, sombreados y bloqueos.

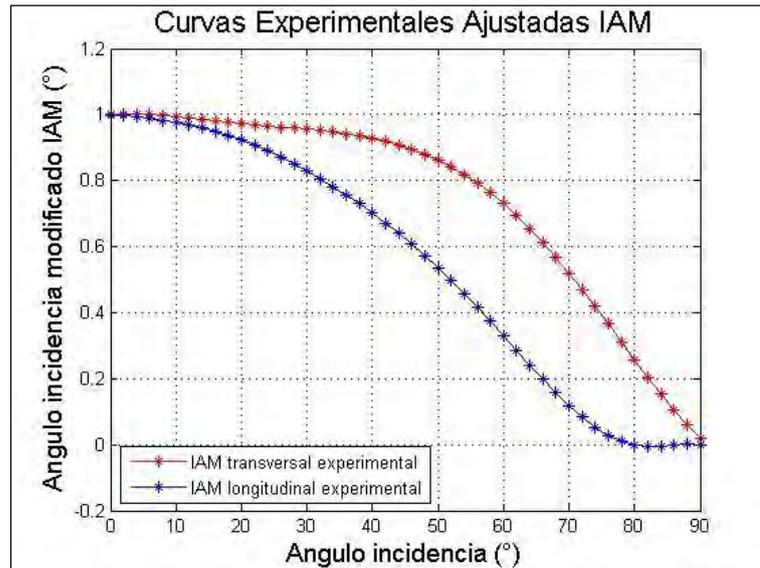


Figura 1.8 – Ángulo de Incidencia Modificado (IAM) en la dirección transversal y longitudinal (Fuente: [9]).

### Eficiencia Óptica

La eficiencia óptica va disminuyendo por efecto de causas tales como el “factor coseno” que crea pérdidas por el cambio frecuente de la amplitud del ángulo de incidencia, los bloqueos a los rayos reflejados y sombras entre espejos reflectores contiguos, ambos por interferencias antes o después de uno u otro espejo, como se ilustra en la Figura 1.9. Estos factores se manifiestan durante la operación diaria condicionados por la hora y la posición cambiante del sol a lo largo del año.

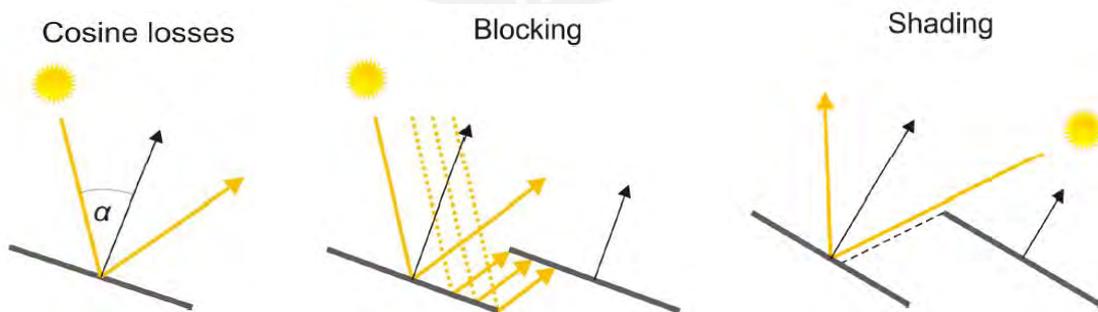


Figura 1.9 – Formas de pérdidas ópticas en LFCs (Fuente: [9]).

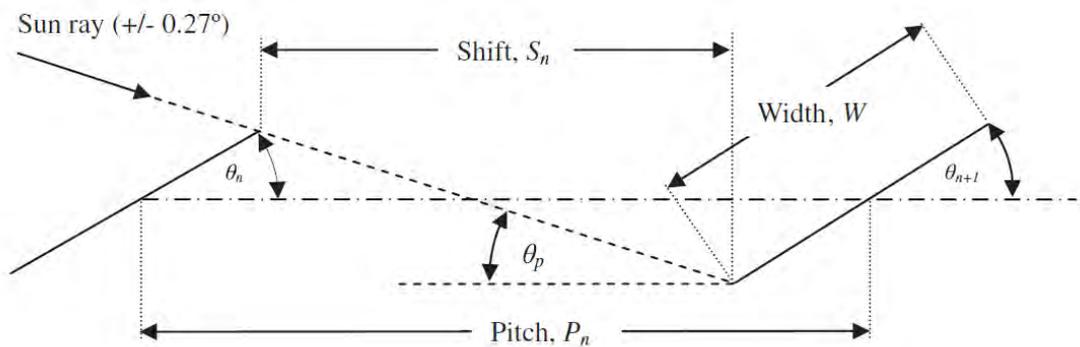
Durante la etapa del planeamiento y dimensionamiento de las instalaciones resulta relevante poder calcular el nivel de afectación a la geometría planteada, realizando evaluaciones horarias al modelo desarrollado, para prever si la orientación del sistema es la más adecuada o el paso (separación entre espejos) requiere mayor ajuste.

Nixon-Davis (2012) proporcionan fórmulas trigonométricas reducidas para determinar los valores de los espacios mínimos necesarios que deben conservarse, para evitar o mitigar los inconvenientes señalados.

### a) Factor coseno

Los Sistemas LFC tienen los espejos captadores primarios dispuestos para que al transcurrir las horas a través de su mecanismo de seguimiento solar puedan ir variando su angulación con la finalidad de recoger en todo momento la mayor radiación directa posible, por esa razón no se puede mantener una angulación pequeña respecto al rayo incidente siendo las pérdidas por amplitud inevitables, aunque su repercusión como factor de disminución de rendimiento representa menos del 0.1%.

### b) Bloqueo



**Figura 1.10 – Esquema paso mínimo por Bloqueo entre espejos consecutivos (Fuente: [19]).**

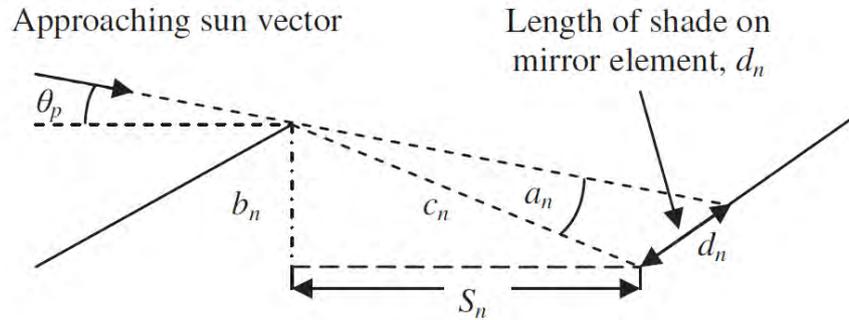
$$P_n = \frac{W[\text{seno}\theta_n + (\text{seno}\theta_{n+1} - \text{seno}\theta_n)]}{\tan(\theta_p - 0.27)} + \frac{W}{2}(\cos\theta_n + \cos\theta_{n+1}) \quad (1.25)$$

$$S_n = P_n - \frac{W}{2}(\cos\theta_n + \cos\theta_{n+1}) \quad (1.26)$$

Donde:

$P_n$	Paso mínimo entre espejos paralelos (m)
$W$	Ancho típico de espejo (m)
$\theta_n, \theta_p$	Ángulos críticos máximos por bloqueo ( $^\circ$ )
$S_n$	Espacio libre lateral mínimo (m)

### c) Sombreado



**Figura 1.11 – Esquema paso mínimo por Sombreado entre espejos consecutivos (Fuente: [19]).**

$$b_n = \frac{W}{2} (\text{seno}\theta_n + \text{seno}\theta_{n+1}) \quad (1.27)$$

$$c_n^2 = b_n^2 + S_n^2 \quad (1.28)$$

$$a_n = 90 - \text{arc tan} \left( \frac{S_n}{b_n} \right) - \theta_p \quad (1.29)$$

$$d_n = \frac{c_n \text{seno}a_n}{\text{seno}(\theta_p + \theta_{n+1})} \quad (1.30)$$

$$\eta_{\text{Somb}n} = 1 - \frac{d_n}{W} \quad (1.31)$$

$$\eta_{\text{Somb}} = \frac{\sum_0^n \eta_{\text{Somb}n}}{W} \quad (1.32)$$

Donde:

$d_n$  Sector afectado por sombra (m)

$\eta_{\text{Somb}}$  Eficiencia al sombreado durante el día

En cuanto al índice de eficiencia óptica final del sistema, basados en los estudios de Ahmed & Amin (2012) esta viene dada por la expresión:

$$\eta_{\text{opt}} = \rho_{\text{espejos}} \tau_{\text{vidrio}} \alpha_{\text{receptor}} \quad (1.33)$$

Donde:

$\eta_{\text{opt}}$  Eficiencia óptica final

$\rho_{\text{espejos}}$  Reflectancia óptica de los espejos concentradores primarios

$\tau_{\text{vidrio}}$  Transmitancia óptica de la Cubierta de Vidrio de la tubería del receptor

$\alpha_{\text{receptor}}$  Absortancia óptica del receptor

#### 1.4. Cálculo de Radiaciones

Los tipos de radiaciones solares conocidas y más estudiadas para el aprovechamiento del recurso solar son las siguientes: Radiación directa (DNI) y Radiación difusa (DIF), esta última se divide por la naturaleza del medio donde ocurre en: Radiación circunsolar, Radiación difusa reflejada del cielo y Radiación difusa reflejada por el suelo.

La radiación solar extraterrestre al atravesar la atmósfera sufre una serie de desviaciones (dispersión) por efecto de las masas de aire presentes, la existencia de moléculas de agua y polvo atmosférico entre otras interferencias, en el mismo escenario una parte de la radiación que ingresa a la Tierra, es captada y convertida en calor (absorción) principalmente por el CO<sub>2</sub> y el ozono, por lo tanto lo finalmente útil que llega a la superficie terrestre solo es un porcentaje menor de la radiación inicial. Nos interesa esencialmente la Radiación Directa por ser la banda de energía, aprovechable por cualquiera de las tecnologías termosolares descritas anteriormente.

Para poder conocer el valor de cada uno de los tipos de radiaciones presentes en un bloque de irradiación local, existen 2 modelos matemáticos que describen el fenómeno

con una precisión aceptable, los cuales se han sido elaborados a partir de investigaciones experimentales, que posteriormente fueron correlacionados estadísticamente para su segmentación, y posterior uso en un espectro amplio de aplicaciones. En el presente estudio nos interesa realizar la evaluación de radiaciones con base horaria.

#### 1.4.1. Modelo Isotrópico

Formulado por Liu – Jordan, este modelo considera que el comportamiento de la radiación es similar en cualquiera de las direcciones donde se proyecte, las bandas de energía son paquetes con grado de uniformidad, al no considerar ciertas propiedades diferenciadas para la radiación difusa se trata de un modelo simplificado. Lo que se busca encontrar con este modelo, es esencialmente como se distribuye la irradiancia local horaria o diaria según sea el caso, en radiación directa y difusa en función de la localización geográfica y características ópticas del sitio.

Se presentan a continuación las ecuaciones generales de cálculo.

Radiación diaria extraterrestre ( $H_0$ ):

$$H_0 = [ ( (24 \times 3600 G_{sc}) / \pi ) ( 1 + 0.033 \cos ( 360 n / 365 ) ) ( \cos \varphi \cos \delta \text{ seno } \omega_s + ( \pi \omega_s / 180 ) \text{ seno } \varphi \text{ seno } \delta ) ] \quad (1.34)$$

Radiación horaria extraterrestre ( $I_0$ ):

$$I_0 = ( (12 \times 3600 G_{sc}) / \pi ) \times ( 1 + 0.033 \cos ( 360 n / 365 ) ) \times [ \cos \varphi \text{ seno } \delta ( \text{seno } \omega_2 - \text{seno } \omega_1 ) + ( \pi ( \omega_2 - \omega_1 ) (1/180) \text{ seno } \varphi \text{ seno } \delta ) ] \quad (1.35)$$

Cálculo de distribución de Irradiación diaria a horaria:

$$\omega_s = \arccos [ -\tan \varphi \tan \delta ] \quad (1.36)$$

$$a = 0.409 + 0.5016 \text{ seno } ( \omega_s - 60 ) \quad (1.37)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \text{ seno } ( \omega_s - 60 ) \quad (1.38)$$

$$r_t = \pi / 24 ( a + b \cos \omega ) ( \cos \omega - \cos \omega_s ) / ( \text{seno } \omega_s - ( \pi / 180 ) \cos \omega_s ) \quad (1.39)$$

$$I = r_t H \quad (1.40)$$

Ratio radiación promedio diaria vs radiación extraterrestre:

Cálculo de  $(I_d/I) = F (Kt)$

Para  $K_t \leq 0.22$ :

$$I_d / I = 1.0 - 0.09 K_t \quad (1.41)$$

Para  $K_t > 0.22$  y  $K_t \leq 0.8$ :

$$I_d / I = 0.9511 - 0.1604 K_t + 4.388 K_t^2 - 16.638 K_t^3 + 12.336 K_t^4 \quad (1.42)$$

Para  $K_t > 0.8$ :

$$I_d / I = 0.165 \quad (1.43)$$

$$I_b = I - I_d \quad (1.44)$$

Ratio entre la superficie inclinada / superficie horizontal ( $R_b$ ):

$$R_b = \cos \theta / \cos \theta_z \quad (1.45)$$

Radiación directa (DNI):

$$DNI = I_b R_b \quad (1.46)$$

Radiación difusa iso reflejada por el cielo (DRS):

$$DRS = I_d [ (1 + \cos \beta_c) / 2 ] \quad (1.47)$$

Radiación difusa iso reflejada por el suelo (DRF):

$$DRF = I \rho_g [ (1 - \cos \beta_c) / 2 ] \quad (1.48)$$

Radiación total a nivel de superficie ( $I_t$ ):

$$I_t = I_b R_b + I_d [ (1 + \cos \beta_c) / 2 ] + I \rho_g [ (1 - \cos \beta_c) / 2 ] \quad (1.49)$$

#### 1.4.2. Modelo Anisotrópico

En el planteamiento anisotrópico se estima que el comportamiento de la radiación es variable según la dirección donde se presente y las bandas de energía se distribuyen según los cambios que ocurran, toma parámetros del modelo isotrópico y los complementa con las relaciones de participación por categoría de radiación implicada. Por bibliografía especializada [8] se conoce de 2 modelos que son los más aceptados para este tipo de análisis, estos son el método HDKR y el método de Pérez, siendo este último el que presenta mayor diferenciación y detalle, de las subdivisiones de la radiación

difusa; por las propiedades que nos demanda conocer la metodología HDKR resulta suficiente, ya que nuestro grado de precisión se enfoca exclusivamente para la Radiación directa (DNI).

A continuación se detallan las ecuaciones complementarias HDKR:

Ratios de participación respecto a la Radiación extraterrestre e Irradiación terrestre:

$$A_i = (I_b / I_0) \quad (1.50)$$

$$f = (I_b / I) \quad (1.51)$$

Radiación directa (DNI):

$$DNI = I_b R_b \quad (\text{similar a la ecuación 1.46})$$

Radiación difusa aniso circunsolar (DRC):

$$DRC = I_d A_i R_b \quad (1.52)$$

Radiación difusa aniso reflejada por el cielo (DRS):

$$DRS = I_d (1 - A_i) [(1 + \cos \beta_c) / 2] [1 + f \text{ seno } 3 (\beta_c / 2)] \quad (1.53)$$

Radiación difusa aniso reflejada por el suelo (DRF):

$$DRF = I \rho_g [(1 - \cos \beta_c) / 2] \quad (1.54)$$

Radiación total a nivel de superficie ( $I_t$ ):

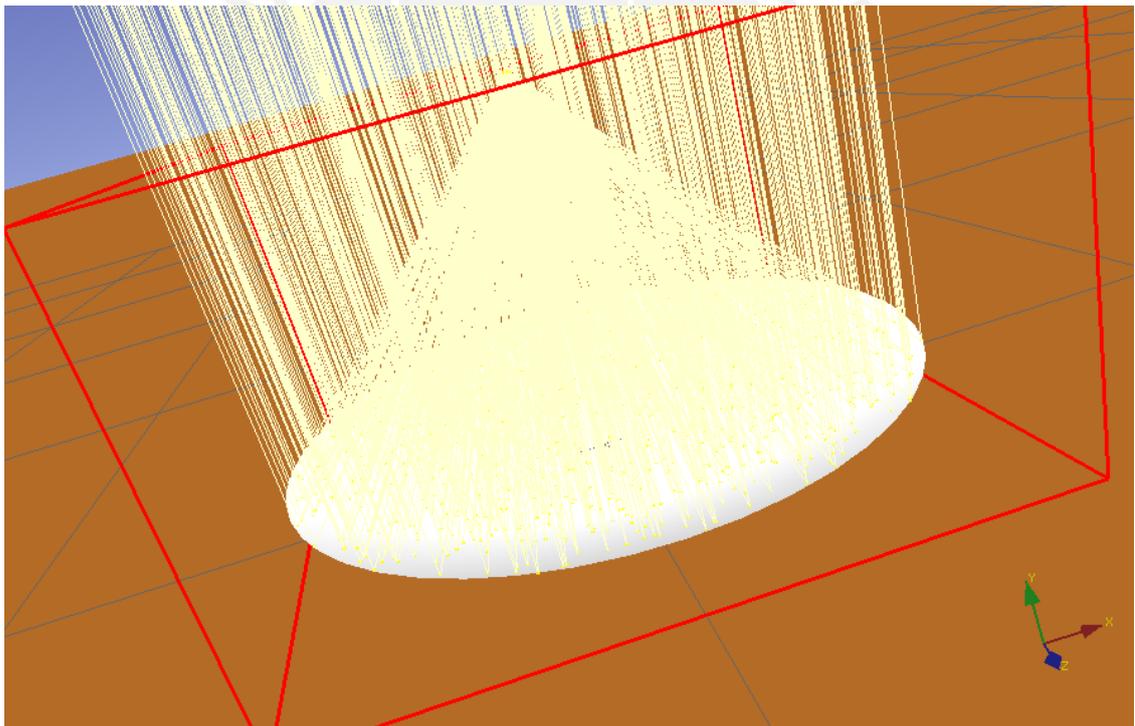
$$I_t = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) [(1 + \cos \beta_c) / 2] [1 + f \text{ seno } 3 (\beta_c / 2)] + I \rho_g [(1 - \cos \beta_c) / 2] \quad (1.55)$$

### 1.5. Técnica de trazado de rayos incidentes-reflejados (Ray-tracing)

En la actualidad gracias a los avances de las ciencias computacionales, es posible contar con herramientas que pueden procesar gran cantidad de datos estadísticos, para llegar a modelar con técnicas probabilísticas las propiedades y comportamientos de fenómenos complejos. Para la óptica de los concentradores solares existe la metodología de Trazado de Rayos (Ray-tracing), que aplica un tratamiento fundamentado en el cálculo estocástico para el seguimiento de la condición energética de cada rayo proyectado, a partir de un

grupo de rayos incidentes sobre los espejos de concentración primarios. La técnica hace uso del Método de Montecarlo, generando números aleatorios de fotones, los cuales son seguidos probabilísticamente a través de sus cambios de dirección, por fenómenos de reflexión o refracción óptica en los componentes del sistema concentrador, para calcular sus pérdidas de energía hasta llegar a su destino en el elemento receptor, obteniendo así acumulativamente la cantidad de flujo final conseguido. Esta técnica tiene un nivel de precisión alto con gran aproximación a los resultados experimentales.

En este trabajo se utilizará la técnica de Ray-tracing haciendo uso del software de código abierto Tonatiuh desarrollado por el Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) de España, en virtud de la experiencia de sus desarrolladores y colaboradores, respaldado por las múltiples investigaciones llevadas a cabo.



**Figura 1.12 – Muestra de Técnica de Ray-tracing para un Concentrador de Disco parabólico en Tonatiuh (Fuente: CENER, 2016).**

### **1.6. Tópicos seleccionados de Transferencia de Calor y Termodinámica**

Para evaluar el proceso de la transferencia energética hacia el elemento receptor se deben realizar balances de calor y masa, conduciendo a plantear las ecuaciones que

describan la interacción de ganancias y pérdidas de energía entre elementos. Los mecanismos de transporte de calor se manifiestan de 3 formas conocidas: conducción, convección y radiación. Estos fenómenos ocurren en la mayoría de casos en forma simultánea, por lo que suele complicarse muchas veces la solución de las ecuaciones que describen su comportamiento exacto. Para superar este impase que puede dar lugar a invertir tiempo no fructífero para encontrar diferencias no representativas, es recomendable realizar simplificaciones, que sin detrimento del error relativo ayuden de manera fácil a obtener resultados aceptables y lógicos.

En el presente trabajo se van a realizar ciertas suposiciones razonables de tratamiento aislado, que ayudarán a simplificar la solución de las ecuaciones planteadas para los fenómenos que interesa tratar.

### 1.6.1. Transferencia de calor por conducción

Corresponde a la transferencia de energía calórica entre cuerpos sólidos debido a la diferencia de temperaturas entre ellos; esta se encuentra regida por la Ley de Fourier de la conducción de calor:

$$\dot{Q}_{cond} = -k \left( \frac{dT}{dx} \right) \quad (1.56)$$

Para la condición de transferencia calorífica entre las paredes de la Cubierta de Vidrio o entre las paredes de la Tubería de Absorción, la ecuación aplicable a este mecanismo de transmisión quedaría dispuesta de la siguiente forma:

$$\dot{Q}_{cond\_tub} = \frac{2\pi kL(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (1.57)$$

Donde:

$\dot{Q}_{cond}, \dot{Q}_{cond\_tub}$	Calor por conducción, Calor por conducción en Tubería de Absorción (W/m <sup>2</sup> )
$T, T_1, T_2$	Temperatura, Temperatura interna, Temperatura externa (K)
$k$	Coefficiente de conductividad térmica del material (W/m K)
$L$	Pared o espesor (m)
$R_1, R_2$	Radio interior, Radio exterior (m)

### 1.6.2. Transferencia de calor por convección

Corresponde a la transferencia de energía calórica entre la superficie de un cuerpo sólido y un fluido cuando existe un gradiente de temperatura, conformando en su frontera una capa de límite térmico; se encuentra regida por la Ley de Newton para enfriamiento:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s (T_s - T_\infty) \quad (1.58)$$

Donde:

$\dot{Q}_{conv}$  Calor transferido por convección (W/m<sup>2</sup>)

$T_s$  Temperatura de la superficie (K)

$T_\infty$  Temperatura del fluido (K)

$h$  Coeficiente de convección térmica del medio (W/m<sup>2</sup> K)

Números adimensionales requeridos:

- Número de Reynolds

$$Re_D = \frac{\rho v L_c}{\mu} = \frac{v L_c}{\nu} \quad (1.59)$$

- Número de Prandtl

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (1.60)$$

- Número de Nusselt

$$Nu_D = \frac{h L_c}{k} \quad (1.61)$$

a) Convección forzada flujo externo:

Correlación de Zhukauskas

$$Nu_D = C Re_D^m Pr^n \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0.25} \quad (1.62)$$

para:  $1 < Re_D < 10^6$ ,  $0.7 < Pr \leq 500$ ,  $n = 0.37 (Pr \leq 10)$ ,  $n = 0.36 (Pr > 10)$

**Cuadro 1.1. Valores de  $Re_D$ , C y m, correlación Zhukauskas (Fuente: [5]).**

$Re_D$	C	m
1 - 40	0.75	0.4
40 - 1000	0.51	0.5
$10^3 - 2 \times 10^5$	0.26	0.6
$2 \times 10^5 - 10^6$	0.0076	0.7

b) Convección forzada flujo interno:

Correlación de Gnielinski

$$Nu_D = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{0.5}(Pr^{0.67} - 1)} \quad (1.63)$$

*Turbulento, completamente desarrollado,  $Re_D > 1000$ ,  $0.7 \leq Pr < 16700$ ,  $\left(\frac{L}{D}\right) > 10$*

Correlación de Petukhov

$$f = (0.790 \ln(Re_D) - 1.64)^{-2} \quad (1.64)$$

*Turbulento, completamente desarrollado, superficie no rugosa,  $3000 \leq Re_D \leq 5 \cdot 10^6$*

Donde:

$\rho$  Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)

$V$  Velocidad corriente superior (m/s)

$L_c$  Longitud característica (m)

$\mu$  Viscosidad dinámica (N-s/m<sup>2</sup>)

$\nu$  Viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)

$\alpha$  Difusividad térmica (m<sup>2</sup>/s)

$f$  Coeficiente de fricción

### 1.6.3. Transferencia de calor por radiación

Corresponde a la transferencia de energía calórica entre superficies que se encuentran a diferentes temperaturas a través de ondas electromagnéticas, entre un cuerpo emisor y otro absorbedor sin necesitar un medio de propagación; está regida por la Ley de Stephan-Boltzman.

La ecuación general aplicada a un cuerpo gris emisor viene dada por la expresión:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1.65)$$

En nuestro caso en particular, la ecuación es modificada para transferencia de calor entre un cuerpo gris y sus alrededores y para el caso de intercambio de energía entre cuerpos grises como en el caso de la Tubería de Absorción y la Cubierta de Vidrio.

$$\dot{Q}_{rad.ext} = \varepsilon_{ext} \sigma A_{ext} (T_{ext}^4 - T_{alred}^4) \quad (1.66)$$

$$\dot{Q}_{rad.int} = \frac{\varepsilon \sigma A_s (T_{int}^4 - T_{ext}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{int}} + \frac{1 - \varepsilon_{ext}}{\varepsilon_{ext}} \left( \frac{D_{int}}{D_{ext}} \right)} \quad (1.67)$$

Donde:

$\dot{Q}_{rad}, \dot{Q}_{rad.ext}, \dot{Q}_{rad.int}$  Calor por radiación, Calor por radiación exterior, Calor por radiación interior (W/m<sup>2</sup>)

$T, T_{int}, T_{ext}$  Temperatura, Temperatura interior, Temperatura exterior (K)

$T_{alred}$  Temperatura de la superficie circundante (K)

$\varepsilon, \varepsilon_{int}, \varepsilon_{ext}$  Emisividad del cuerpo, Emisividad del cuerpo interior, Emisividad del cuerpo exterior

$D_{int}, D_{ext}$  Diámetro interior, Diámetro exterior (m)

$A_s$  Área superficial (m<sup>2</sup>)

$\sigma$  Coeficiente de Stefan-Boltzmann (W/m<sup>2</sup>-K<sup>4</sup>)

#### 1.6.4. Balance Energético del Sistema

La 1° Ley de la Termodinámica determina que el balance final entre la energía que ingresa a un sistema cualquiera, menos la energía que sale del mismo, es igual al cambio neto de la energía interna del sistema, esta ley es también conocida como el principio general de la conservación de la energía.

$$E_{ing} - E_{sal} = \Delta E_{sist} \quad (1.68)$$

Para flujo estacionario sin desarrollar trabajo, la ecuación es reducida y queda determinada en la forma:

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T \quad (1.69)$$

Donde:

$\dot{Q}$  Velocidad neta de transferencia de Calor (W)

$\dot{m}$  Flujo másico (kg/s)

$C_p$  Calor específico a presión constante (kJ/kg-K)

$\Delta T$  Variación de temperatura (K)

Aplicando este primer principio en la Tubería de Absorción, se irán a conformar las ecuaciones que describan las relaciones de transferencia de masa y energía, con el objetivo de hallar las temperaturas finales alcanzadas por el Fluido de Trabajo, la Tubería de Absorción y la Cobertura de vidrio de la Tubería.

Para simplificación del análisis se adoptarán las siguientes suposiciones:

- El flujo dentro de la Tubería de Absorción está totalmente desarrollado.
- Estado estacionario, en pequeños periodos tiempo
- La temperatura tiene distribución uniforme en el tubo y en la Cubierta de Vidrio.
- No se considera la variación de la temperatura en la longitud de tubería.
- Los cuerpos sólidos y el fluido tienen propiedades que solo dependen de la temperatura.

El vínculo que existe entre la parte óptica y térmica confluye en las siguientes ecuaciones:

$$\dot{q}_i = A_{net} \cdot DNI \cdot \eta_{opt} \cdot IAM(\theta) \cdot ELF \quad (1.70)$$

$$\dot{Q}_i = \sum_{i=1}^n \dot{q}_i \quad (1.71)$$

$$ELF = 1 - \frac{\left(\frac{H_F}{\tan \theta_i}\right)}{L_F} \quad (1.72)$$

Donde:

$\dot{q}_i$  Flujo radiante reflejado por cada espejo ( $W/m^2$ )

$A_{net}$  Área neta de espejo reflector ( $m^2$ )

$\dot{Q}_i$  Flujo de calor total que ingresa a la Tubería de Absorción ( $W/m^2$ )

$ELF$  Factor de pérdida final por angulación

$H_F$  Altura de Cavidad Receptora del LFC (m)

$L_F$  Longitud de espejo reflector (m)

$\theta$  Ángulo de incidencia ( $^\circ$ )

En la Figura 1.13 se ilustra el flujo energético que ocurre en una de las Tuberías Receptoras, haciendo un balance por estratos podemos tener lo siguiente:

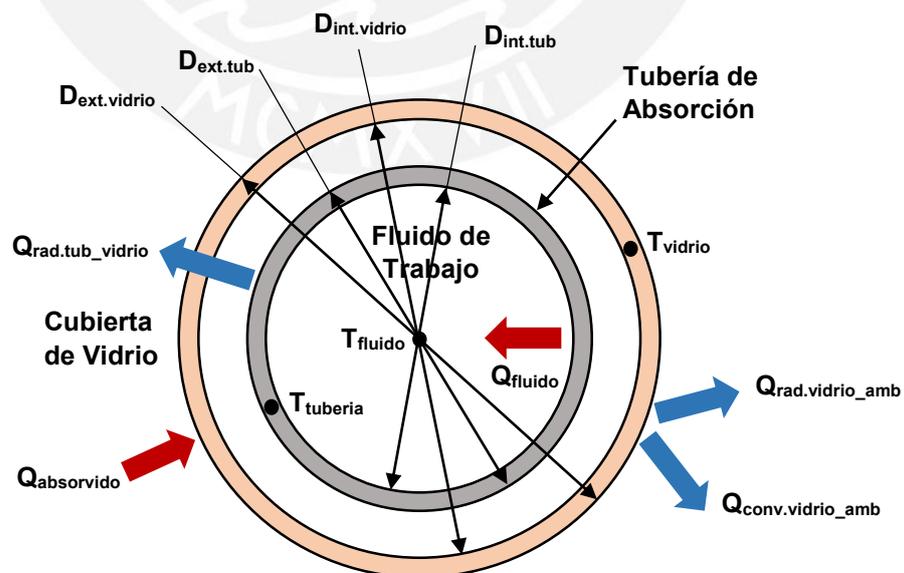


Figura 1.13 – Flujo energético en la Tubería de Absorción del CPC (Fuente: [2])

El balance de energía en la cobertura de vidrio:

$$\dot{Q}_{rad.tub.vidrio} \pi D_{ext.vidrio} dx + \dot{Q}_{abs.vidrio} \pi (r_{ext.vidrio}^2 - r_{int.vidrio}^2) dx - (\dot{Q}_{conv.vidrio_{amb}} + \dot{Q}_{rad.vidrio_{amb}}) dx = m_{vidrio} C_{p_{vidrio}} \frac{\partial T_{vidrio}}{\partial t} \quad (1.73)$$

El balance de energía en la Tubería de Absorción:

$$(\dot{Q}_{abs} - \dot{Q}_{rad.tub.vidrio}) \pi D_{ext.tub} dx - h_{conv.tub.fluido} (T_{int.tub} - T_{fluido}) \pi D_{int.tub} dx = m_{tub} C_{p_{tub}} \frac{\partial T_{tub}}{\partial t} \quad (1.74)$$

El balance de energía para la transferencia de calor al Fluido de Trabajo:

$$h_{conv.tub.fluido} (T_{int.tub} - T_m) \pi D_{int.tub} dx - \dot{Q}_{ing} + \dot{Q}_{sal} = m_{fluido} C_{p_{fluido}} \frac{\partial T_{fluido}}{\partial t} \quad (1.75)$$

Resolviendo estas ecuaciones podríamos encontrar los valores de las variables objetivo.

Aplicando la 1° Ley de la Termodinámica, se estimará en una primera fase los aportes y pérdidas de energía en un modelo de superficie de control con flujo másico (concentrador secundario - receptor) y posteriormente los rendimientos térmicos.

$$\eta_{ef} = \frac{Q_{util}}{Q_{total}} \quad (1.76)$$

Donde:

$\eta_{ef}$  Eficiencia térmica

$Q_{util}$  Calor aprovechado para el proceso (W)

$Q_{total}$  Calor total suministrado (W)

### 1.6.5. Análisis Exergético del Sistema

La 2° Ley de la Termodinámica se ocupa de demostrar el grado de irreversibilidad que tienen los procesos energéticos y cuanto trabajo neto reversible es posible extraer de un sistema. La energía tiene dos componentes, la anergia que es la parte que no puede pasar de una forma a otra y la exergía que si puede hacerlo. La exergía es la parte de la

energía que tiene valor y puede perderse si crecen las irreversibilidades, es por esa razón que resulta importante cuantificarla.

La exergía ( $Ex_{salida}$ ) para el caso de análisis viene dada por la expresión siguiente:

$$Ex_{salida} = Q_{util} \left(1 - \frac{T_a}{T_r}\right) \quad (1.77)$$

Donde:

$Q_{util}$  Calor aprovechado para el proceso (W)

$T_a$  Temperatura ambiente (K)

$T_r$  Temperatura en la superficie del receptor (K)

La eficiencia exergética ( $\eta_{ex}$ ) viene dada por la ecuación:

$$\eta_{ex} = \frac{Q_{util} \left(1 - \frac{T_a}{T_r}\right) - W_p}{Q_{total} \left(1 - \frac{T_a}{T_{sol}}\right)} \quad (1.78)$$

$$W_p = \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho} \quad (1.79)$$

$$\Delta P = f \frac{\rho V_{prom}^2 L}{2D_i} \quad (1.80)$$

Donde:

$W_p$  Trabajo de bombeo (J/s)

$T_{sol}$  Temperatura del Sol (K)

$\dot{m}$  Flujo másico (kg/s)

$\Delta P$  Caída de presión (Pa)

$\rho$  Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)

$f$  Coeficiente de fricción del tubo receptor

$V_{prom}$  Velocidad promedio del fluido (m/s)

$D_i$  Diámetro interior del tubo colector (m)

## CAPÍTULO 2

### METODOLOGÍA DE MEJORAMIENTO TÉCNICO DEL NUEVO CPC

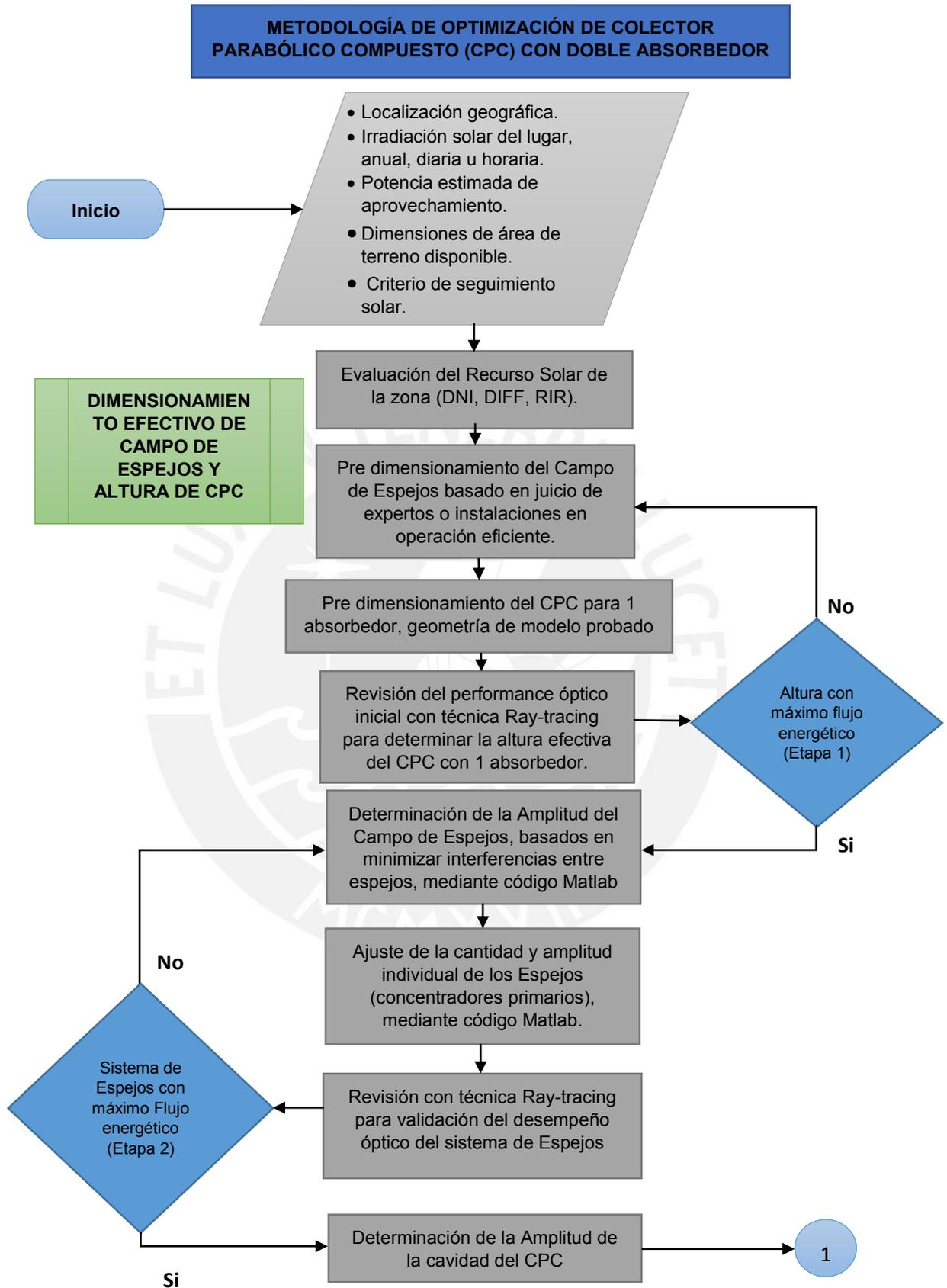
#### 2.1. Procedimiento desarrollado para el modelamiento del CPC

Para llevar a cabo el proceso de mejoramiento del CPC que será aplicado al LFC para la localidad de Pilpichaca, Huancavelica como Caso de Estudio, se ha desarrollado una metodología de análisis y evaluación, que se detalla en el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 2.1 y 2.2, en ella se puede ver la ruta que seguirá el presente trabajo, el cual se encuentra dividido en 3 bloques básicos:

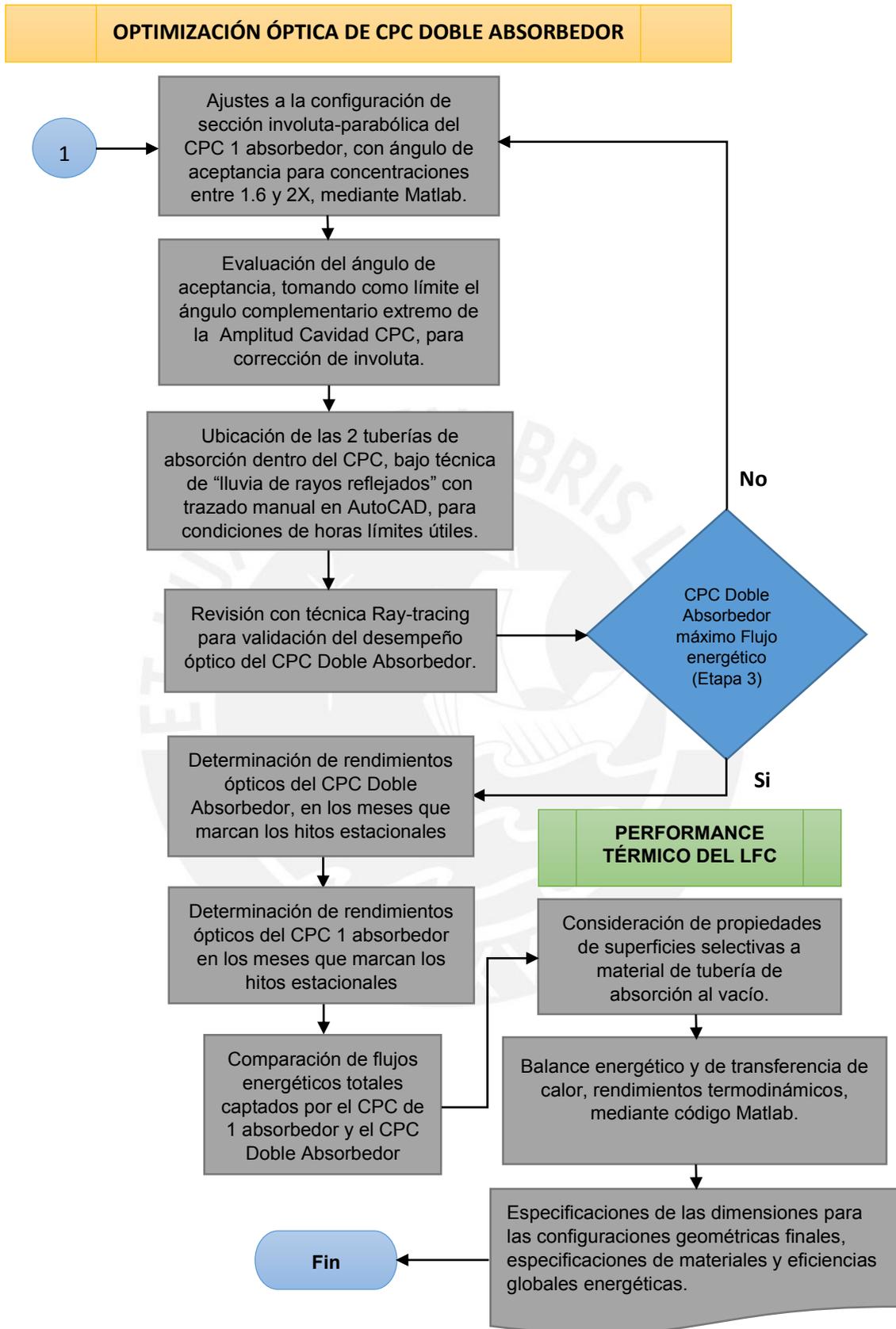
- Dimensionamiento efectivo del Campo Especular y altura del CPC.
- Mejoramiento óptico del Concentrador Doble Absorbedor.
- Performance Térmico final.

#### 2.2. Aclaraciones Importantes para el modelamiento del CPC

El diseño optimizado de un CPC de un LFC no es posible concebirlo como un ente independiente del Sistema, ya que es una construcción a medida, que depende de la condición previa de optimización del Campo de Espejos y la determinación de la altura más eficiente de la Cavidad Receptora, ya que si no fuera así, caería en la condición de un dispositivo intrascendente por su aporte final disminuido. La forma final de su configuración geométrica es función directa de los ángulos límite de reflexión, el número y las dimensiones de los espejos concentradores primarios, si existiera una variación en alguno de estos elementos, cambiaría la geometría aplicable al CPC, habiendo que replantear su diseño. La interdependencia de las partes que forman el Sistema LFC está bien marcada, por lo que se requiere muy buena precisión en el afinamiento del conjunto, para que opere el Sistema de forma sincronizada. Es importante también señalar que el tipo de seguimiento solar que se le asigne al LFC, resultante de la situación estereográfica del sitio Caso de Estudio, tiene un aporte relevante en el factor de rendimiento óptico representado en el Ángulo de Incidencia Modificado (IAM), que es el indicador vinculado al aprovechamiento transversal y longitudinal de los rayos solares que rebotan en el Campo Especular y que luego se redireccionan hacia la cavidad reflectante del CPC como componentes vectoriales importantes. Por lo que se puede afirmar que esta cadena de transporte energético está íntimamente relacionado a la efectividad angular de sus componentes en todas las etapas y especialmente en el CPC.



**Figura 2.1 – Diagrama de Flujo Optimización de CPC Doble Absorbedor – Parte 1 (Fuente: Elaboración propia).**



**Figura 2.2 – Diagrama de Flujo Optimización de CPC Doble Absorbedor – Parte 2 (Fuente: Elaboración propia).**

## CAPÍTULO 3

### EVALUACIÓN DEL RECURSO SOLAR Y DIMENSIONAMIENTO DE LAS INSTALACIONES DEL LFC

#### 3.1. Potencial Energético Solar de la localidad Caso de Estudio

Se ha escogido para el presente trabajo de investigación como Caso de Estudio, la localidad Huancavelicana de Pilpichaca perteneciente a la Provincia de Huaytará, localizada a una altitud de 4300 msnm, como representativa de la realidad climática y socioeconómica alto andina con potencial solar, donde aplicaremos nuestra propuesta de optimización técnica.

Considerando los datos de radiación mínima y máxima proporcionados por el “Atlas Solar del Perú” elaborado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), se ha tomado el interés de plantear un camino de investigación para aprovechamiento termosolar y en ese sentido analizar las posibilidades del uso de esta fuente natural disponible que tiene la comunidad de Pilpichaca por su ubicación geográfica.

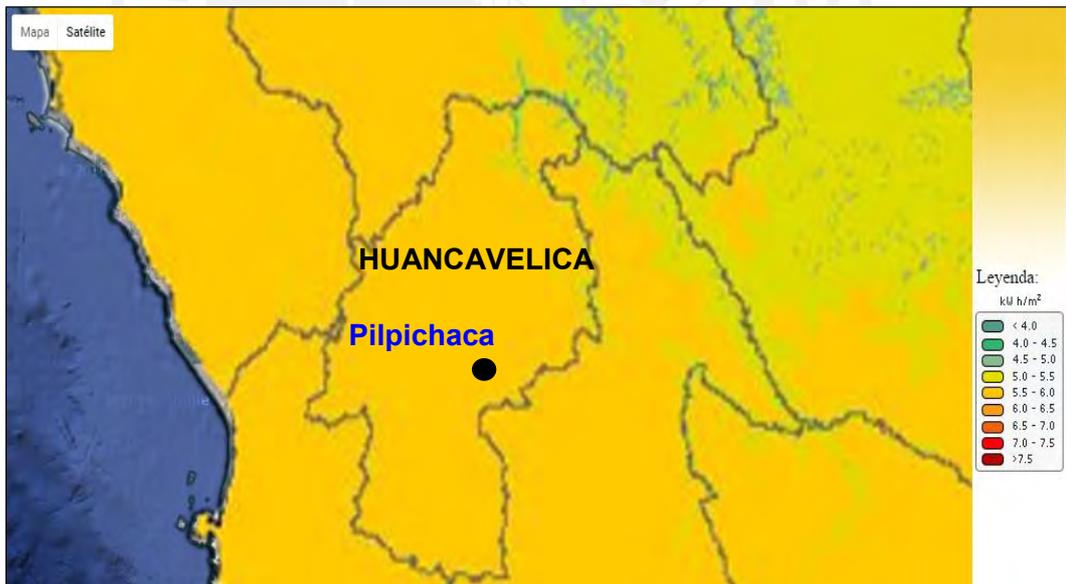
En las figuras 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 se muestran las irradiaciones mensuales registradas y proyectadas mediante un modelo meteorológico por el SENAMHI para los meses que marcan las estaciones del año.



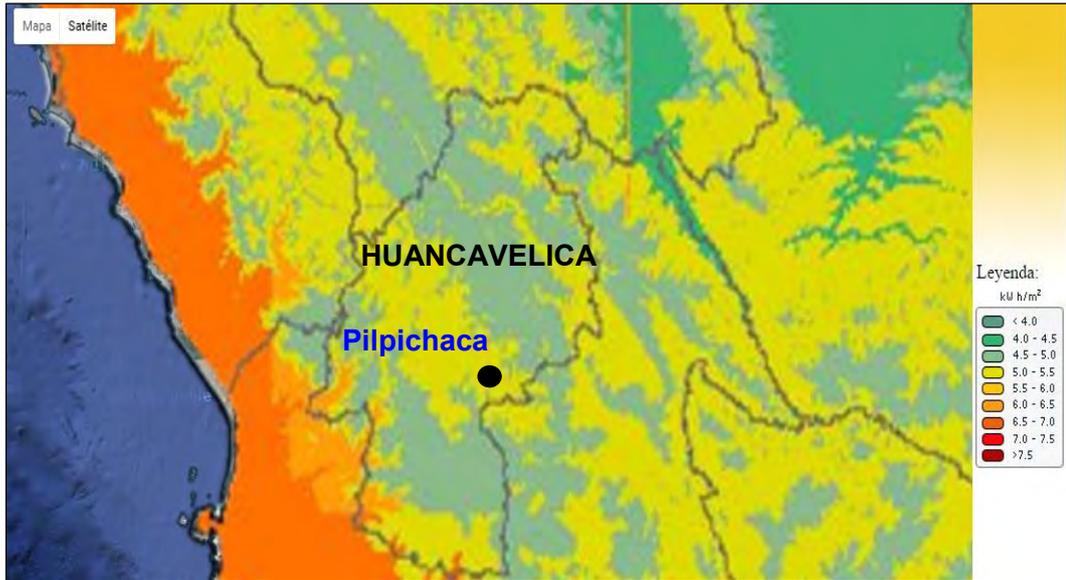
Figura 3.1 - Nivel de Irradiación Solar en el mes de Marzo (Fuente: Atlas Solar del Perú – SENAMHI, 2003).



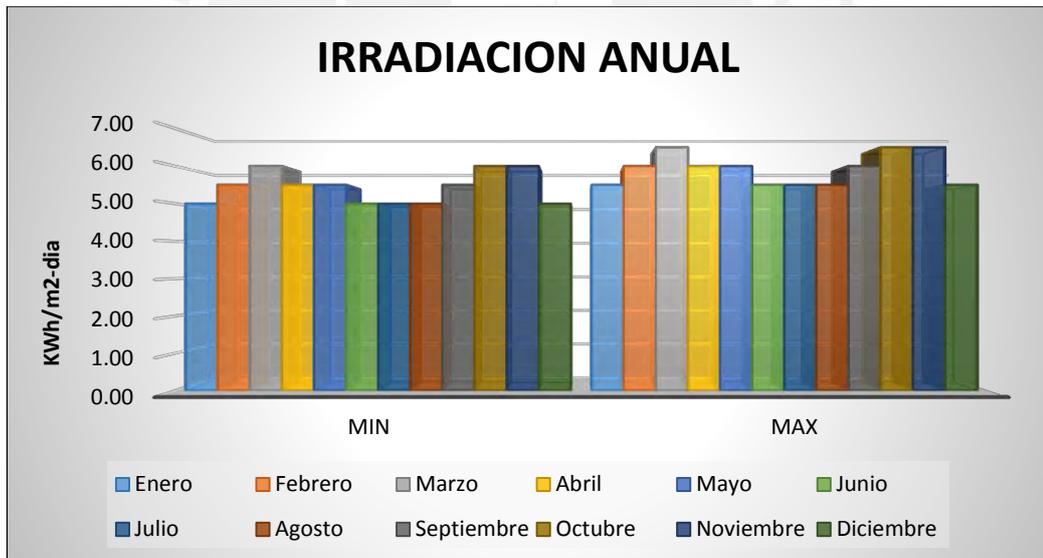
**Figura 3.2 - Nivel de Irradiación Solar en el mes de Junio**  
(Fuente: Atlas Solar del Perú – SENAMHI, 2003).



**Figura 3.3 - Nivel de Irradiación Solar en el mes de Septiembre**  
(Fuente: Atlas Solar del Perú – SENAMHI, 2003).

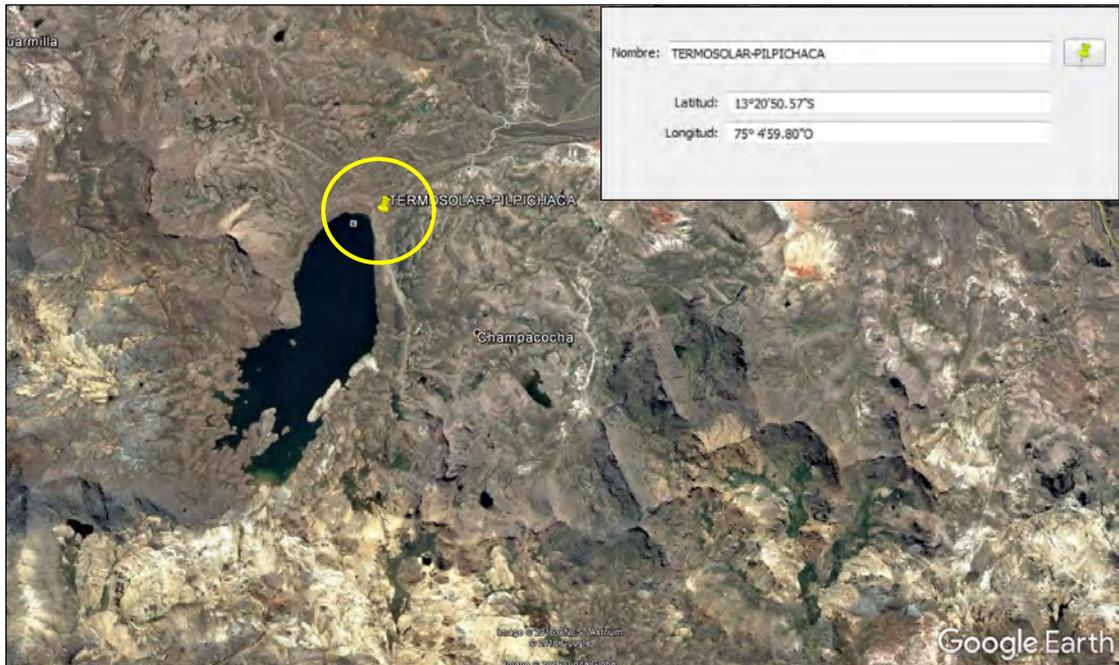


**Figura 3.4 - Nivel de Irradiación Solar en el mes de Diciembre (Fuente: Atlas Solar del Perú – SENAMHI, 2003).**



**Figura 3.5 – Histograma de Irradiación anual en la localidad de Pilpichaca (Fuente: Elaboración propia).**

La localización geográfica elegida para realizar los estudios energéticos se sitúa en la Latitud  $-13^{\circ}347'$ , Longitud  $-75^{\circ}083'$  y Altitud 4300 msnm, sector de pastizales de ichu próximo al embalse de Ccaracocha, con cercanía a suministro de agua en punto alto con proyección para distribución por gravedad del fluido colector, hacia el uso final ya sea para confort térmico humano o para procesos industriales a pequeña escala.



**Figura 3.6 - Coordenadas específicas del punto geográfico Caso de Estudio (Fuente: Google Earth, 2017).**

### **3.2. Climatología de la localidad Caso de Estudio**

Para llevar a cabo la evaluación del performance del Sistema LFC con el modelo de CPC mejorado propuesto, es necesario definir un escenario de análisis cercano a las condiciones térmicas y ópticas reales de la locación geográfica, que sirva además para interactuar con el modelo matemático, que será construido para los cálculos del rendimiento energético, el cual finalmente dará lugar a poder identificar las características logradas, y los puntos que requieren atención para nuevas mejoras en el elemento de análisis.

El escenario de evaluación, deberá contener fundamentalmente 3 variables intrínsecas que son las siguientes: primero, la base de periodo de tiempo a considerar, segundo el flujo radiante total que llega al área geográfica o Irradiación en el periodo base de análisis y tercero las condiciones climáticas referidas a sus parámetros influyentes para el cálculo como son: temperatura, velocidad de viento y nubosidad estimada promedio del sitio.

Dado que el estudio concierne a una actividad de monitoreo por horas útiles de operación que iniciaría tentativamente a las 8:00 am y terminaría a las 16:00 horas, la base deberá ser horaria, respecto a las radiaciones se debe tomar un criterio limitativo sobre los valores de los registros energéticos oficiales en otras palabras tomar el flujo energético

promedio mínimo. Respecto a la climatología se deberá elaborar una matriz climática que combine los parámetros importantes citados, que afectan directamente al proceso. En el Cuadro 3.1 se presenta la integración de todos los criterios manifiestos, para el planteamiento del escenario termodinámico de evaluación.

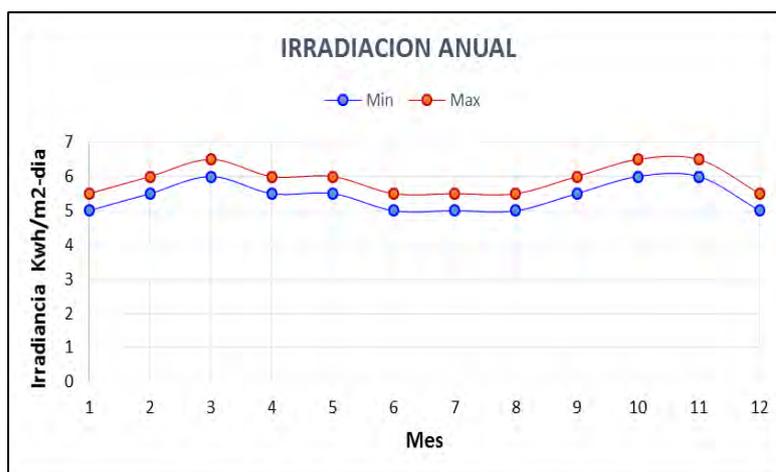
**Cuadro 3.1. Escenario de Evaluación del Modelo (Fuente: Elaboración propia).**

ESCENARIO	IRRADIACIÓN	CONDICIONES CLIMÁTICAS		
		Mínima Temperatura	Velocidad Viento Promedio	Porcentaje de Nubosidad
Horario	Promedio bajo mensual	2.5 C	2.5 – 10.0 m/s	0 - 10%

### 3.3. Evaluación del Recurso solar en la Localidad Caso de Estudio

La localidad de Pilpichaca escogida como Caso de Estudio presenta condiciones muy favorables para la implementación de instalaciones termosolares, como se mencionó anteriormente, el valor de la radiación diaria promedio es de 5,670 W/m<sup>2</sup>-día, es decir anualmente puede llegar a 2,069.55 W/m<sup>2</sup>, si se tomara el promedio de la radiación diaria promedio más baja es decir 5420 W/m<sup>2</sup>-día se llegaría a 1,978 W/m<sup>2</sup>. En cuanto a nubosidad por los registros de SENAMHI, se conocen temporadas malas de constantes lluvias, las que se dan en los meses de diciembre hasta mediados de marzo, descartando este periodo los días restantes presentan condiciones manejables donde las horas de "Sol aprovechable" se inician a las 9:00 am y se prolongan hasta las 15:00 pm, es decir 7 horas, si consideramos una incertidumbre pesimista del 20% se tendrían una estimación anual de 1,540 horas de aprovechamiento, que es un valor aceptable de nivel medio. Respecto al área disponible y la topografía, existen llanos altoandinos (pampas) en Pilpichaca que pueden albergar las instalaciones sin inconvenientes con amplitud de terreno rocoso sin utilidad. Sobre los accesos y el recurso hídrico disponible estos requisitos se pueden cumplir fácilmente por las cercanías hacia lagunas y embalses de agua, así como el acceso por trochas existentes que pueden mejorarse.

IRRADIANCIA (Kwh/m2_dia)		
Meses	Min	Max
Enero	5.00	5.50
Febrero	5.50	6.00
Marzo	6.00	6.50
Abril	5.50	6.00
Mayo	5.50	6.00
Junio	5.00	5.50
Julio	5.00	5.50
Agosto	5.00	5.50
Septiembre	5.50	6.00
Octubre	6.00	6.50
Noviembre	6.00	6.50
Diciembre	5.00	5.50
<b>Promedio</b>	<b>5.42</b>	<b>5.92</b>



**Figura 3.7 - Irradiación a lo largo del año en la localidad de Pilpichaca (Fuente: Elaboración propia, con registros SENAMHI, 2003).**

### 3.3.1 La Trayectoria Solar en la localidad de Pilpichaca

Cuando se evalúa cuantitativamente el recurso solar, la primera tarea a realizar es construir el mapa de la trayectoria que sigue el sol durante el año, éste representa la perspectiva (“como se mira”) del punto geográfico propuesto respecto al Sol. La construcción del mapa se hace calculando los puntos que corresponden a los ángulos característicos de azimut y elevación solar a partir de las ecuaciones (1.12) al (1.20) en un periodo horario, tomando un día representativo de cada mes evaluado, plasmando posteriormente la secuencia de puntos encontrados en un sistema de coordenadas cilíndricas. La finalidad de esta tarea es conocer la variabilidad del movimiento de Sol en la zona, lo cual debe ayudar a identificar los meses más favorables desde el punto de vista óptico, también servirá para definir las posibilidades de ocurrencia de sombras por interferencias naturales del terreno.

Para realizar la construcción del mapa particular de la trayectoria solar para las coordenadas del área de interés de Pilpichaca, se ha implementado un código en Matlab que tiene la función de generación de manera automática del mapa solar tomando como datos de ingreso, las coordenadas geográficas de Latitud y Longitud de la zona de análisis, el día y el mes del año.

Los datos de entrada son los que siguen:

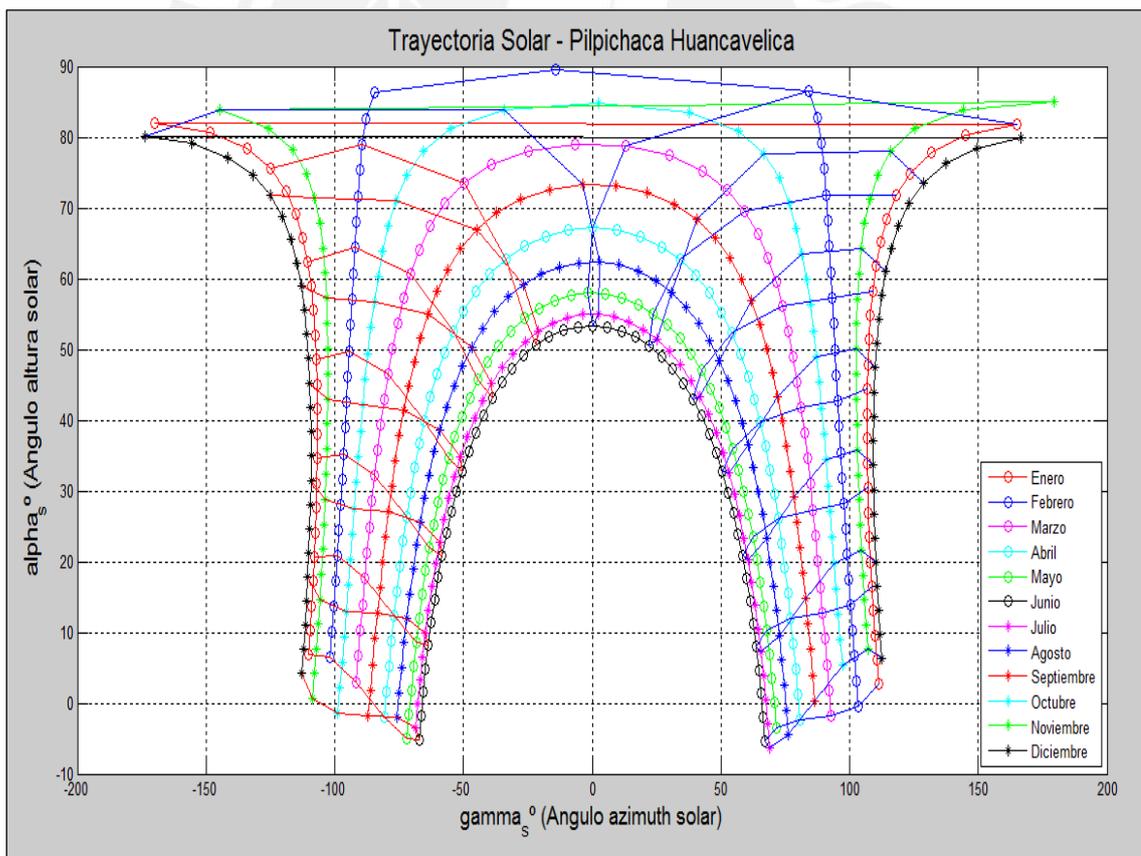
Latitud: -13.347°

Longitud: -75.083°

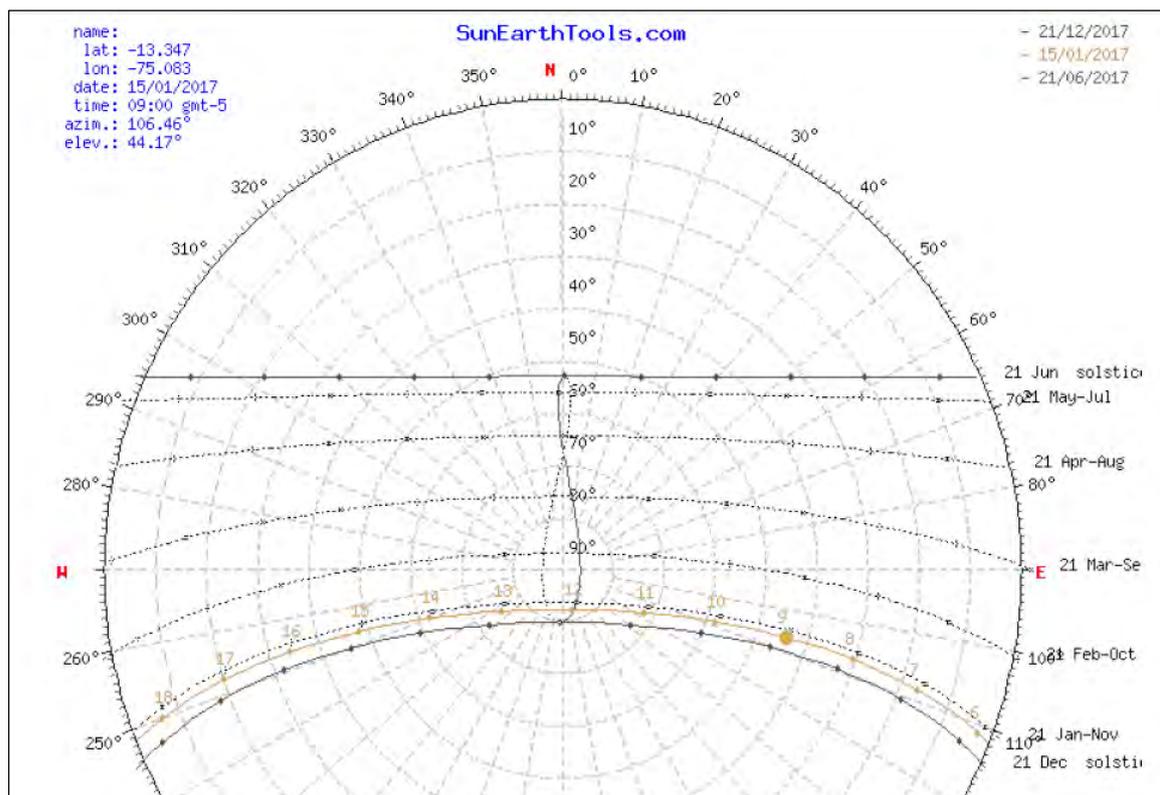
Día representativo del mes: 15

Inclinación del plano irradiado: 0°

Por otro lado usando los mismos puntos obtenidos para el mapa de la trayectoria solar cilíndrica, se ha de elaborar el mapa de la estereografía solar, el cual no es más que una vista de planta, de los puntos proyectadas en un sistema de coordenadas esféricas, este grafico proporciona la proyección plana del camino que sigue el sol durante el año, el cual servirá principalmente para conocer el grado de inflexión de la curvatura de la trayectoria, para determinar la orientación cardinal más adecuada, para el sistema de captación LFC. En la Figura 3.8 se presenta el mapa de trayectoria solar y en la Figura 3.9 se presenta la estereografía solar del sitio de interés.



**Figura 3.8 – Mapa de trayectoria solar durante el año en la localidad de Pilpichaca (Fuente: Elaboración propia).**



**Figura 3.9 – Estereografía solar anual de la localidad de Pilpichaca (Fuente: SunEarthTools.com, 2016).**

Como puede verse en la Figura 3.8 referido al Mapa de trayectoria solar local, Diciembre es el mes cuando existe más proximidad a la mira del punto geográfico y Junio el más alejado de la perspectiva, esto se da por estar marcado por los solsticios de verano e invierno en el hemisferio Sur. Por otro lado puede notarse también que cualquier interferencia de radiación por efecto de obstáculos (arbustos, montículos de terreno, formaciones rocosas, árboles, postes eléctricos, etc.) deben de situarse por debajo de 30° de elevación solar, ya que es la coordenada frontera que corresponde al inicio del horario solar útil de las 9:00 am. La trayectoria anual del Sol en Pilpichaca vista desde la estereografía solar muestra una franja (Diciembre-Junio) casi regular con curvatura poca pronunciada, mostrando que una orientación de seguimiento Este-Oeste del Sistema LFC favorecería la captación.

### 3.3.2 Estimaciones de Radiaciones

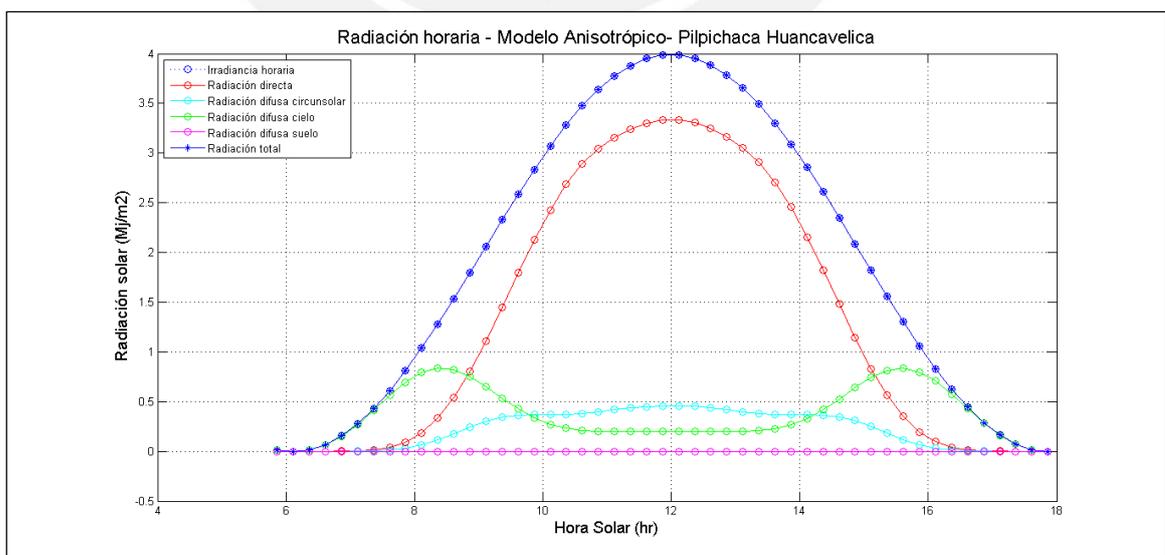
Las radiaciones mensuales promedios más baja de cada mes, serán las que se utilizarán para los cálculos desarrollados en el presente trabajo, tomadas así con la finalidad de verificar la capacidad de respuesta con la ocurrencia energética más desfavorable.

Considerando las ecuaciones (1.34) al (1.55) del Capítulo 1, se realizaron los cálculos mediante un código Matlab implementado para ello, haciendo el tratamiento de los datos de manera matricial, el periodo horario de la evaluación fue de 6:00 a 18:00 horas con un paso periódico de 15 minutos. Luego de calcular los ángulos solares característicos se hallaron los valores de la Radiaciones en base horaria con los Métodos Isotrópico y Anisotrópico HDKR, para los meses claves que corresponden a los Solsticios de Verano (Diciembre 21), Invierno (Junio 21), Equinoccio de Otoño (Marzo 21) y Primavera (Septiembre 21), con los resultados que se muestran en las Figuras 3.10, 3.11, 3.12 y 3.13.

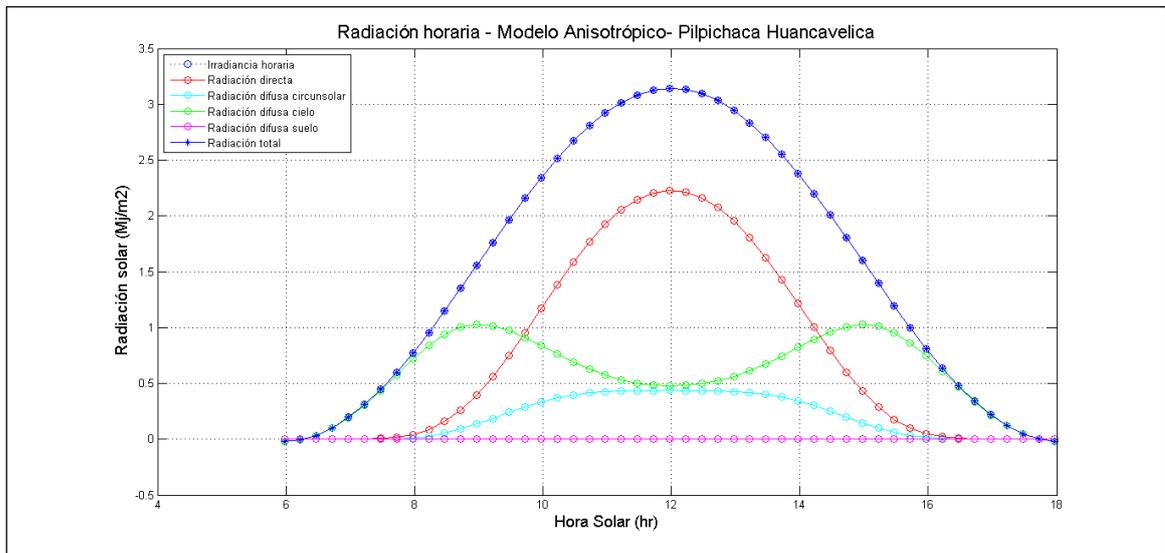
La Radiación directa horaria mínima se da en el mes de Junio con un valor pico de 2.214 MJ/m<sup>2</sup> (615.00 Wh/m<sup>2</sup>) al mediodía y la Radiación directa horaria máxima se da en el mes de Noviembre con un valor pico de 3.4516 MJ/m<sup>2</sup> (958.79 Wh/m<sup>2</sup>) al mediodía.

En este punto es importante señalar que los meses de más baja Radiación Directa que son Junio, Julio y Agosto, coinciden con la temporada seca de lluvias en la zona, por tal circunstancia en este periodo donde el sistema esta disminuido en absorción, resulta favorecido indirectamente. Los meses restantes que presentan mejores condiciones de captación de energía también coincidirían con escenarios climáticos más exigidos.

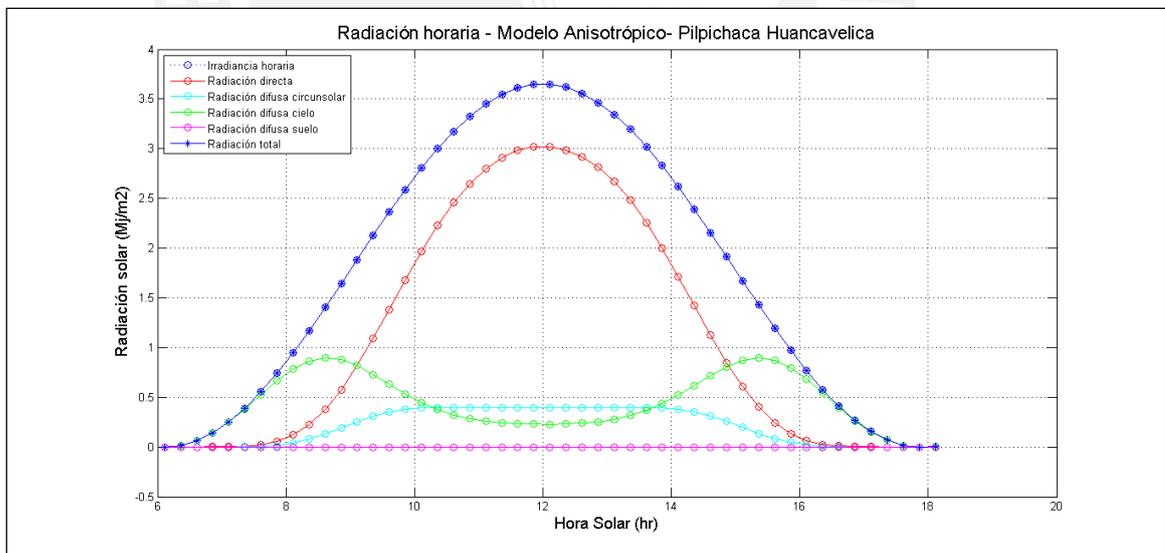
En resumidas cuentas contamos con el recurso solar, con una distribución anual que se acomoda bastante bien al clima de la región y con ello nos presenta cierta facilidad para su aprovechamiento.



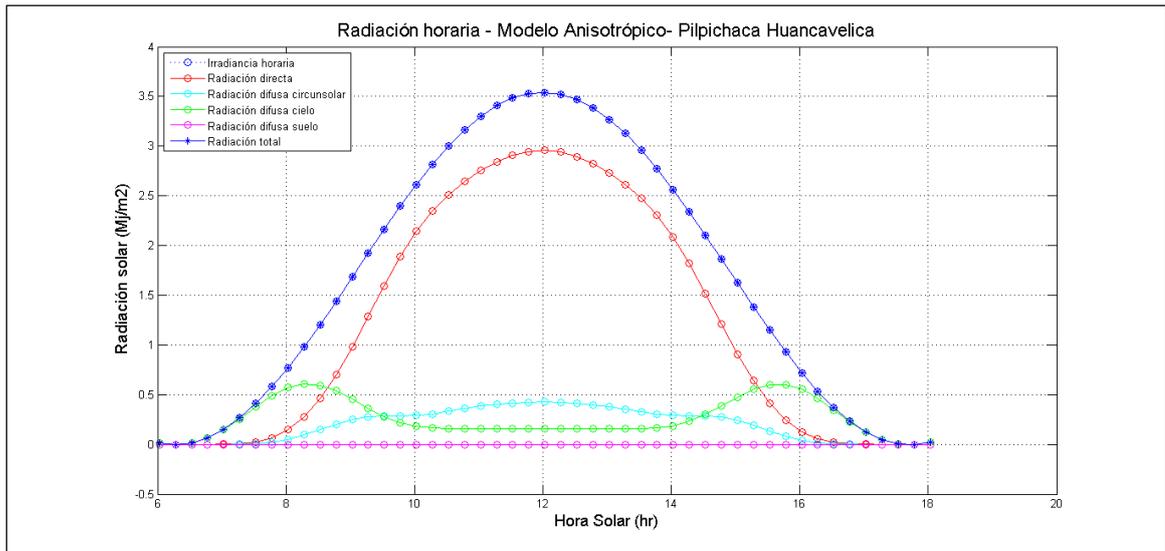
**Figura 3.10 – Distribución de Radiaciones en el Mes de Marzo (Fuente: Elaboración propia).**



**Figura 3.11 – Distribución de Radiaciones en el Mes de Junio**  
(Fuente: Elaboración propia).

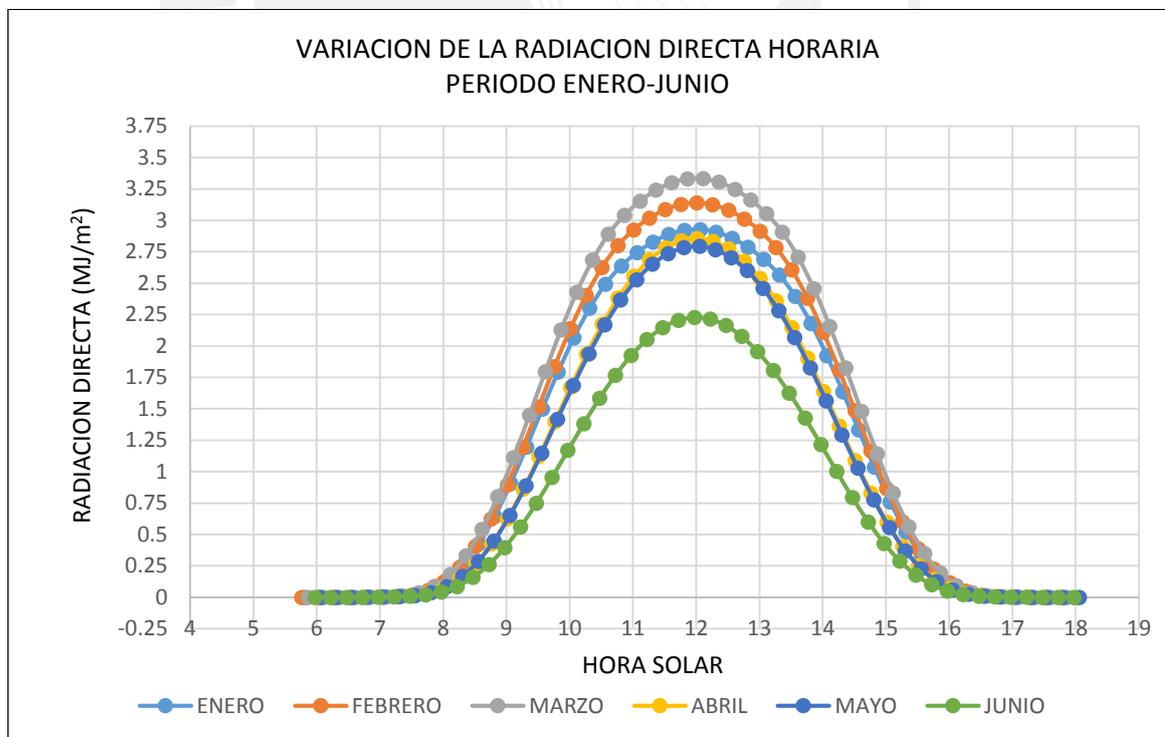


**Figura 3.12 – Distribución de Radiaciones en el Mes de Septiembre**  
(Fuente: Elaboración propia).

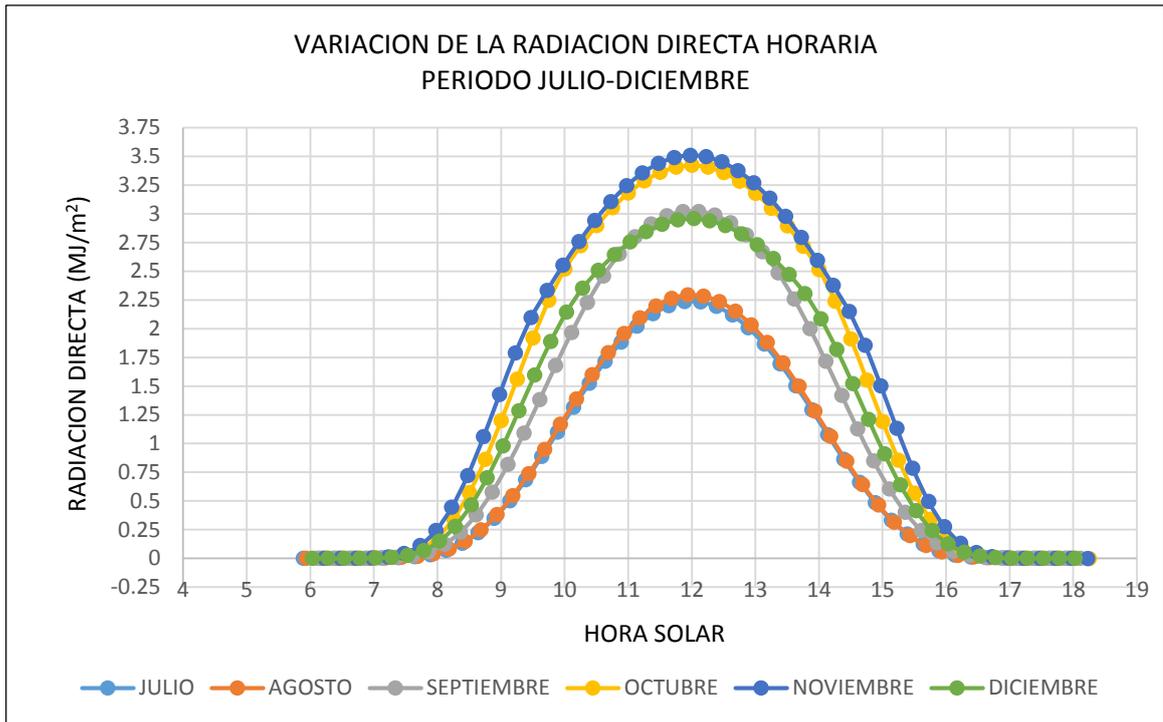


**Figura 3.13 – Distribución de Radiaciones en el Mes de Diciembre (Fuente: Elaboración propia).**

La evolución de la Radiación directa (DNI) mes a mes por semestre del año, se muestra en los gráficos 3.14 y 3.15.



**Figura 3.14 – Variación de la Radiación Directa en el 1° Semestre del año (Fuente: Elaboración propia).**



**Figura 3.15 – Variación de la Radiación Directa en el 2º Semestre del año (Fuente: Elaboración propia).**

### 3.4. Dimensionamiento de las Instalaciones del LFC

Con el objetivo de contar con un área patrón de aprovechamiento solar, hemos fijado una extensión de terreno de 1000 m<sup>2</sup> (50 m de largo y 20 m de ancho). En las Figura 3.16 se presenta la forma verificación hecha para determinar las distancias mínimas para evitar bloqueos y sombras requeridas por la locación geográfica, por mes, día y una hora representativa, la cual fue elaborada para el presente trabajo utilizando un código Matlab, implementado para el cálculo del giro angular de espejos para seguimiento solar, y su implicancia con la separación mínima necesaria. Como es lógico pensar las horas con mayor probabilidad de interferencias son las primeras y las ultimas del día. Luego de la construcción del grafico 3.16, a partir de sucesivas evaluaciones para encontrar el valor que cubra las distancias mínimas requeridas entre espejos, se llegó a definir que para un periodo de operación entre 9:30 am y 14:30 pm, viene bien usar un paso de 0.80 m. guardando una separación mínima entre espejos (Gap) de 0.30 m.

En relación a la altura en que estará situada la Cavidad Receptora se ha encontrado mediante sucesivas simulaciones cuyos resultados aparecen graficados en la Figura 3.17, que por el grado de flujo de energía que llega a la tubería receptora, que 14.00 m

es el valor más adecuado, con el sustento de limitarse a no tener más de  $51^\circ$  para el ángulo de reflexión de los espejos extremos del LFC.

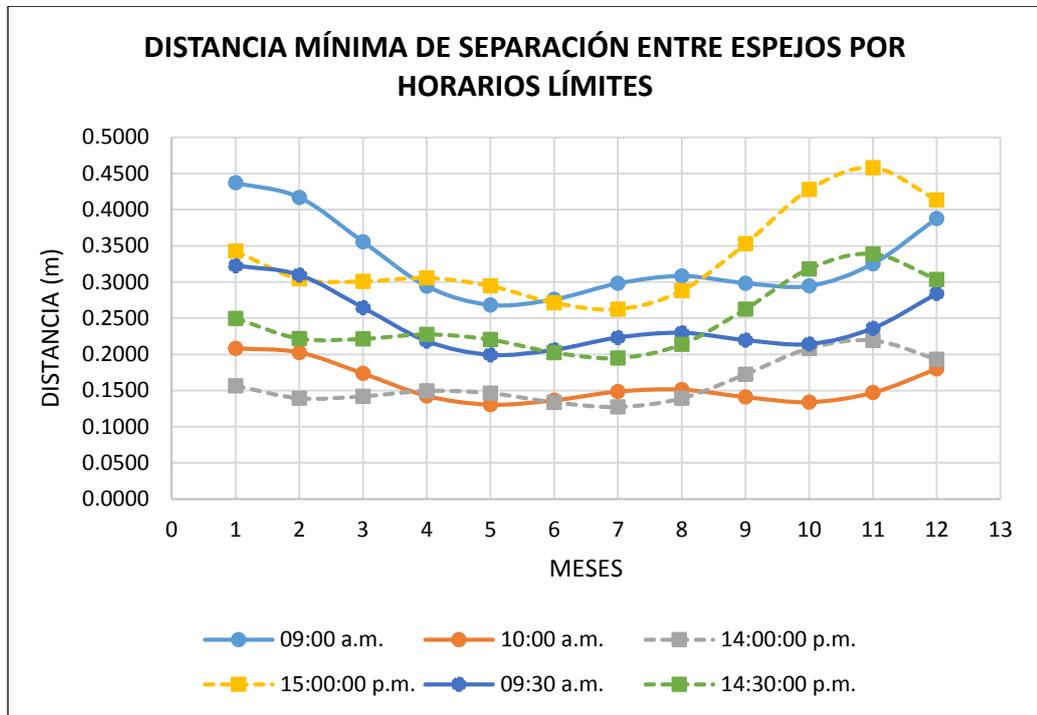


Figura 3.16 – Verificación de las distancias mínimas del Campo Especular (Fuente: Elaboración propia).

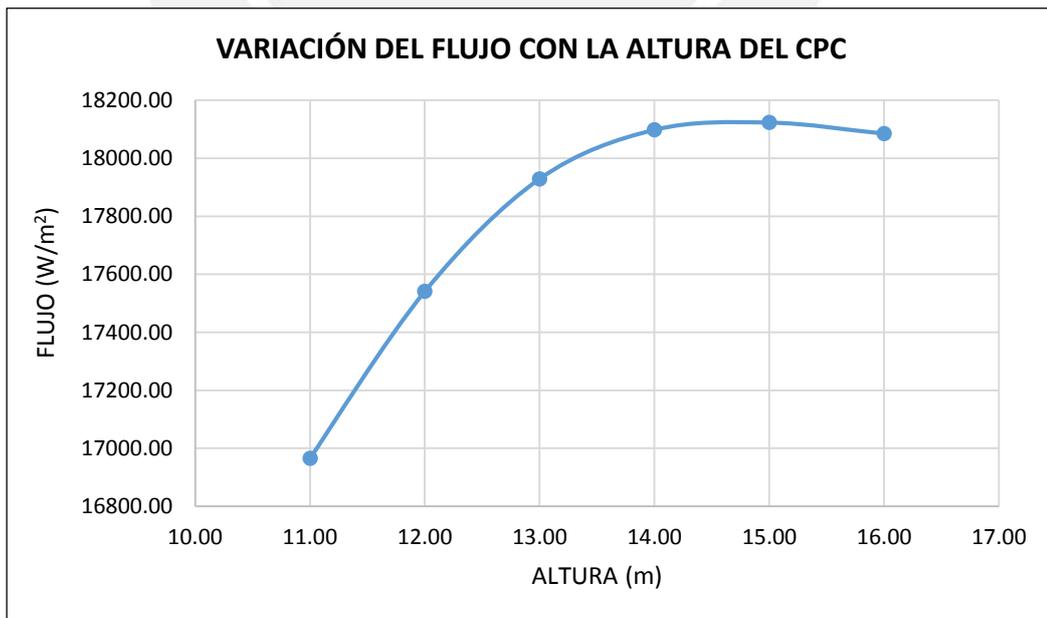


Figura 3.17 – Verificación de la Altura de máximo aprovechamiento óptico (Fuente: Elaboración propia).

En cuanto a las tuberías receptoras, estas se asumirán como tuberías de cobre de 0.076 m (3") con mejoramiento por recubrimiento de superficie selectiva, y también Cubierta de Vidrio al vacío, materiales con buenas características ópticas y térmicas que actualmente se disponen comercialmente en el mercado peruano.

El Fluido de Trabajo será el agua a las condiciones climáticas del sitio, proveniente del embalse natural de Ccaracocha, próximo a las coordenadas del punto escogido para evaluación.

El LFC para fines de simulación se considerará que cuenta con un mecanismo de seguimiento solar (tracker) para asegurar la captación máxima posible. En el presente trabajo no especificaremos sus características particulares como mecanismo controlador de la angulación de los espejos, el tenerlo presente solo nos servirá para alimentar de datos a un código Matlab creado como herramienta matemática, para la determinación de los ángulos de cada uno de los espejos de concentración primaria a cualquier hora, día y fecha del año, lo que facilitará los cálculos ópticos y térmicos.

La orientación del LFC sustentada en la estereografía solar del sitio analizado será de Norte-Sur (a donde apunta el tubo receptor visto de planta), para seguimiento Este-Oeste.

Respecto a la estructura soporte, esta únicamente será considerada para estimar los efectos de sombras proyectadas, más no para conocer su comportamiento mecánico en particular.

**Cuadro 3.2 – Resumen de datos de componentes LFC para modelamiento**  
(Fuente: Elaboración propia).

ÍTEM	ELEMENTOS	CARACTERÍSTICAS	DIMENSIONES	CANTIDAD
1	Campo de Espejos	Terreno plano de dimensiones 20 m ancho y 50 m de longitud	1000 m <sup>2</sup>	1
			Paso entre espejos 0.80 m	
2	Espejos	Tipo planos de espesores de 6.35 mm	0.50 x 50 m	24
3	Tuberías de Absorción	Material de cobre con superficie selectiva y Cubierta de Vidrio al vacío. 0.076 m (3") diámetro	Altura ubicación 14 m	2
			Longitud 70 m.	
4	Cavidad Receptora	Concentrador parabólico secundario	Altura ubicación 14 m	1
			Longitud 70 m.	
5	Fluido de Trabajo	Agua-Vapor de agua	-	-

6	Sistema de Seguimiento Solar	Mecatrónico	-	24
7	Orientación del Sistema	Azimut 0° Norte-Sur Seguimiento Este-Oeste	-	-
8	Estructura soporte para Cavity Receptora	Perfiles y cables de acero de alta resistencia	-	15



## CAPÍTULO 4

### MODELAMIENTO GEOMÉTRICO Y ÓPTICO DEL CPC

#### 4.1. Modelamiento Geométrico

El cálculo de la geometría inicialmente es sencillo ya que el perfil del CPC se trata de una forma bidimensional con ecuaciones explícitas, con las cuales se pueden hallar los valores de las variables dependientes que se buscan, de acuerdo a ciertas condiciones de borde, pero esta etapa no es determinante para el resultado final, porque está rodeada de gran incertidumbre respecto a la manera de como llegarán a impactar los rayos reflejados por los concentradores primarios, que tienen propagación tridimensional, por lo que se deberán emplear procesos iterativos de cálculo con herramientas de cálculo probabilísticos, para llegar al resultado final que es saber quién presenta las mejores prestaciones.

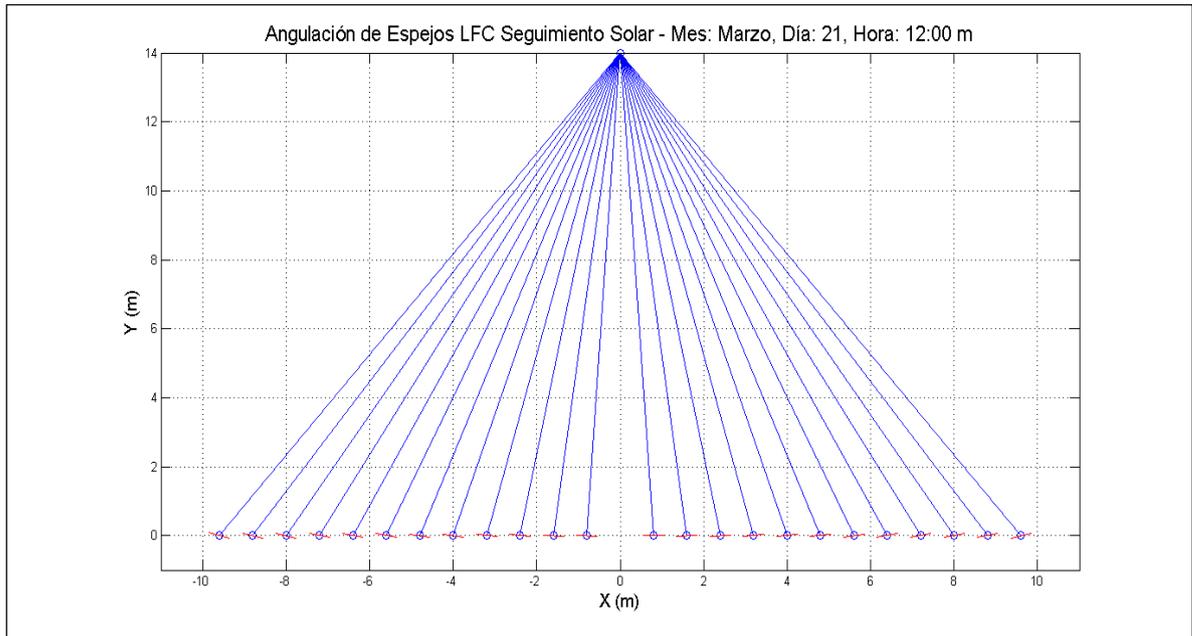
El modelamiento de la cavidad reflectante del CPC con doble Tubería de absorción, se iniciará teniendo en cuenta como primera suposición analítica, que el aprovechamiento mayor de la geometría para concentración se da cuando el “blanco objetivo” está ubicado en el foco de la parábola, por lo tanto es correcto pensar que las Tuberías de Absorción deberán situarse en ese punto o cercanos a él. Por otro lado según la distribución de espejos paralelos del campo especular y su modulación de 0.80 m, los espejos últimos extremos se encuentran situados a 9.60 m respecto al eje central donde se ubica la Cavidad Receptora CPC, como se puede ver en la Fig. 4.1.

El ángulo constante que tienen estos rayos reflejados de cualquiera de los últimos espejos, respecto a la horizontal es:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{14}{9.6}\right) = 55.56^\circ \cong 56^\circ$$

En consecuencia el Ángulo Límite ( $A_L$ ) en los filos extremos de los últimos espejos simétricos del colector solar, reorientados hacia el receptor será también de máximo de  $56^\circ$ . Este parámetro determinará el valor asumido para el Ángulo de Aceptancia, que es la primera variable que se requiere determinar, para enlazar con las ecuaciones del perfil de la cavidad CPC en 2-D. Por otro lado la dimensión del Radio Generatriz ( $R_g$ ) que es la segunda variable para el perfilamiento, por sentido práctico la estimaremos con un valor equivalente al diámetro de la cubierta de vidrio de las Tuberías de Absorción, como si

estuvieran contenidas o circunscritas a ella, ya que de esa manera se asegura la llegada del flujo solar.



**Figura 4.1 – Esquema de irradiaación centrada de espejos del LFC respecto al CPC (Fuente: Elaboración propia).**

$r_{\text{cvidrio}} = 62.5 \text{ mm}$  y  $R_g = 2 * r_{\text{cvidrio}} = 125 \text{ mm}$

Para los primeros cálculos, el Ángulo de Aceptancia podría considerarse como el ángulo complementario del Ángulo Límite, es decir:

$$\theta_a = 90 - \gamma = 90^\circ - 56^\circ = 34^\circ$$

Aplicando la ecuación (1.11)

$$C_g = \frac{1}{\text{seno}34^\circ} = 1.79$$

Sobre el índice de concentración  $C_g$  para los CPCs se han realizado diversas investigaciones, dentro de las cuales el trabajo de Tiba y Fraidenaich, 2011 [23], aporta que el índice de concentración óptimo se encuentra en el rango de 1.6 a 2.0, por lo visto anteriormente, el  $\theta_a$  preliminar cumpliría con esta premisa sin embargo la validación final y su implicancia sobre la concentración, se verá comprobada con técnicas Ray-tracing que generan el mapa de distribución de flujo sobre las tuberías usuarias, viendo además en el detalle los valores picos de la energía lograda y la uniformidad de la transferencia, para de esta manera definir cuál es la alternativa más conveniente.

Los ángulos del rango de concentraciones óptimas, serán:

Si  $C_g = 1.6$

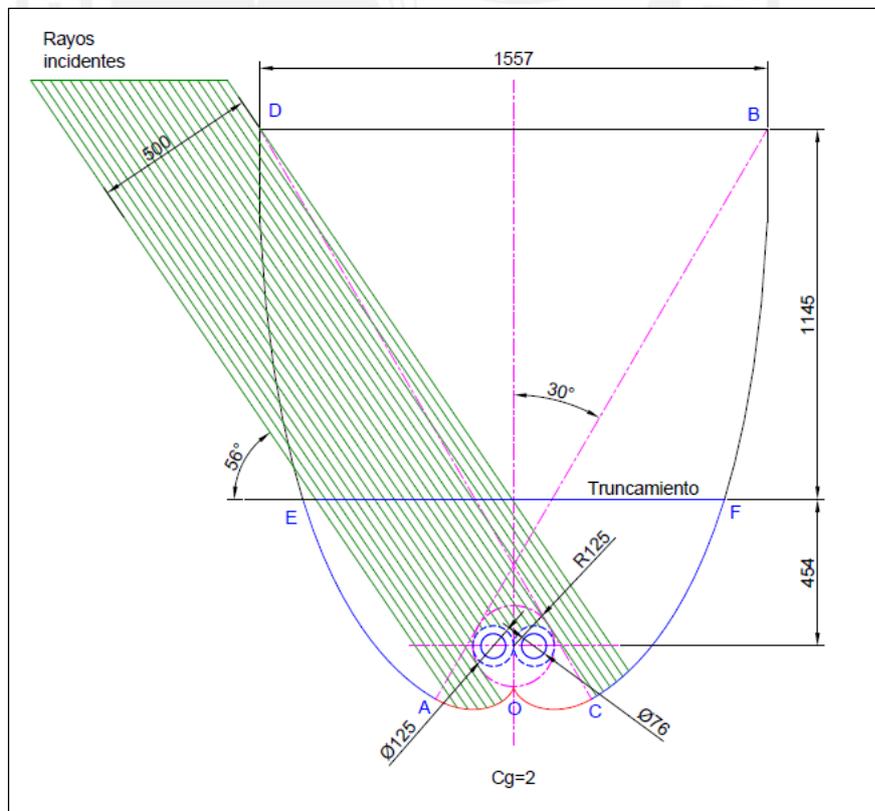
$$\theta_a = \arcseno\left(\frac{1}{C_g}\right) = \arcseno\left(\frac{1}{1.6}\right) = 38.68^\circ \cong 39^\circ$$

Si  $C_g = 2$

$$\theta_a = \arcseno\left(\frac{1}{C_g}\right) = \arcseno\left(\frac{1}{2}\right) = 30^\circ$$

Dado que la forma completa de la sección parabólica del CPC, cubre el ingreso de los rayos incidentes con Ángulo Límite, al “blanco objetivo” definido de llegada que es el punto central de la generatriz, se ha visto necesario realizar un truncamiento a la altura más próxima que permita el acceso libre a la cavidad reflectora.

Se ha elaborado un código en Matlab para automatizar los cálculos de la forma del CPC, cuyos resultados han sido graficados en las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4. Estas configuraciones pasarán a ser evaluadas en una siguiente etapa mediante la técnica de Trazado de Rayos (Ray-tracing), para verificar cual es la que entrega mejores prestaciones ópticas.



**Figura 4.2 – Configuración geométrica de CPC con  $\theta_a = 30^\circ$   
(Fuente: Elaboración propia).**

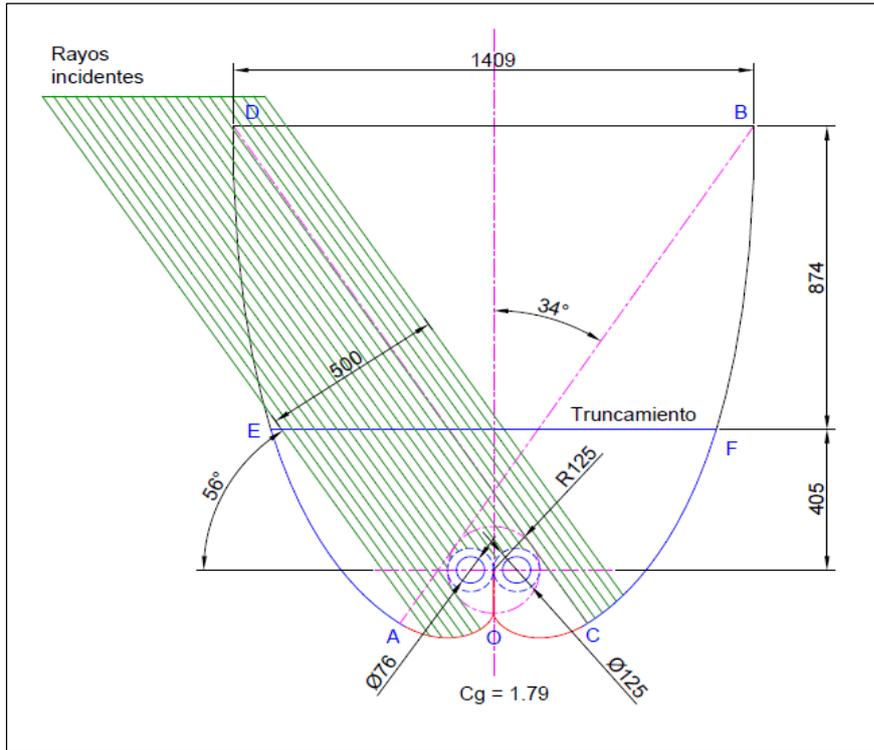


Figura 4.3 – Configuración geométrica de CPC con  $\theta_a = 34^\circ$   
(Fuente: Elaboración propia).

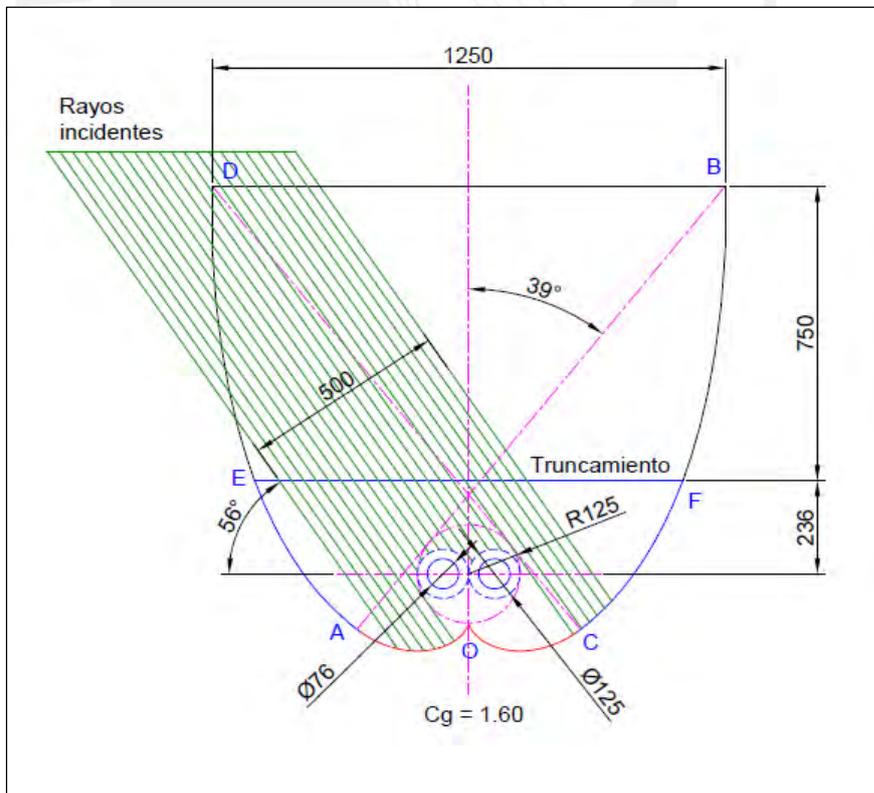
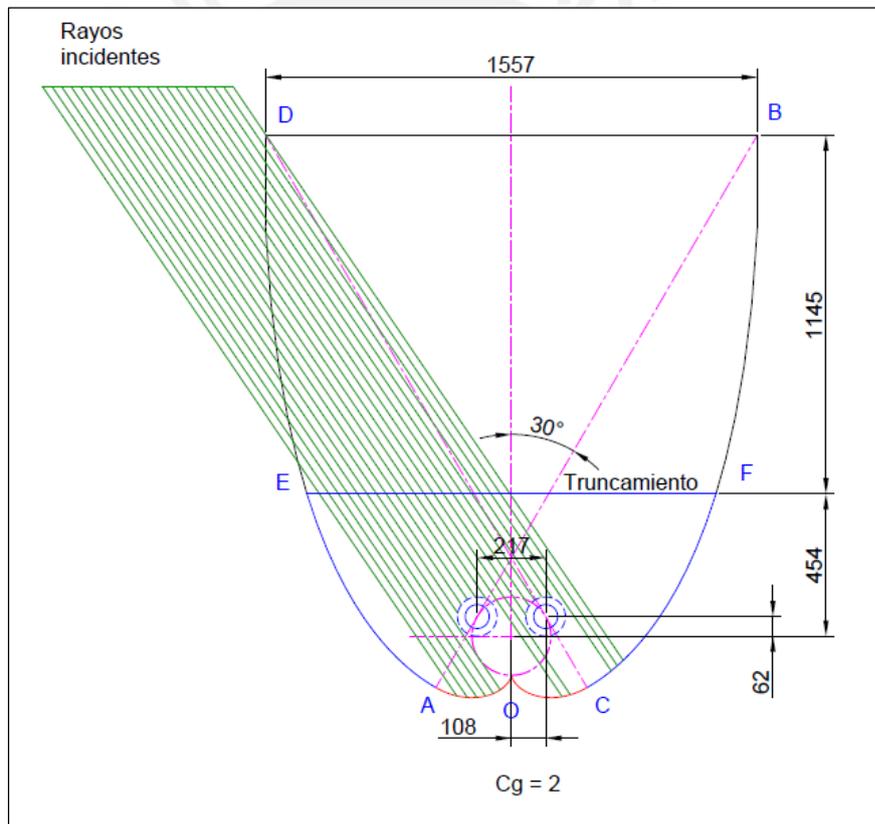


Figura 4.4 – Configuración geométrica de CPC con  $\theta_a = 39^\circ$   
(Fuente: Elaboración propia).

Como segunda suposición analítica el otro lugar geométrico con buenas posibilidades de captación de flujo radiante, por la confluencia de rayos reflejados dado su perfilamiento para el caso particular de la reflexión en los últimos espejos, sería el punto de tangencia o intersección del radio generatriz  $R_g$  y la línea que determina el Ángulo de Aceptancia. Entonces sobre las opciones de evaluación de la primera suposición analítica, también deberán evaluarse las variantes con las Tuberías de Absorción reubicadas en los puntos indicados en la segunda suposición analítica.

Los resultados de la configuración geométrica para estas variantes se muestran en las Figuras 4.5, 4.6 y 4.7. Estas también luego pasarán a ser evaluadas con la técnica de Trazado de Rayos (Ray-tracing) como en el caso anterior.



**Figura 4.5 –Configuración geométrica de CPC con  $\theta_a = 30^\circ$  Variante (Fuente: Elaboración propia).**

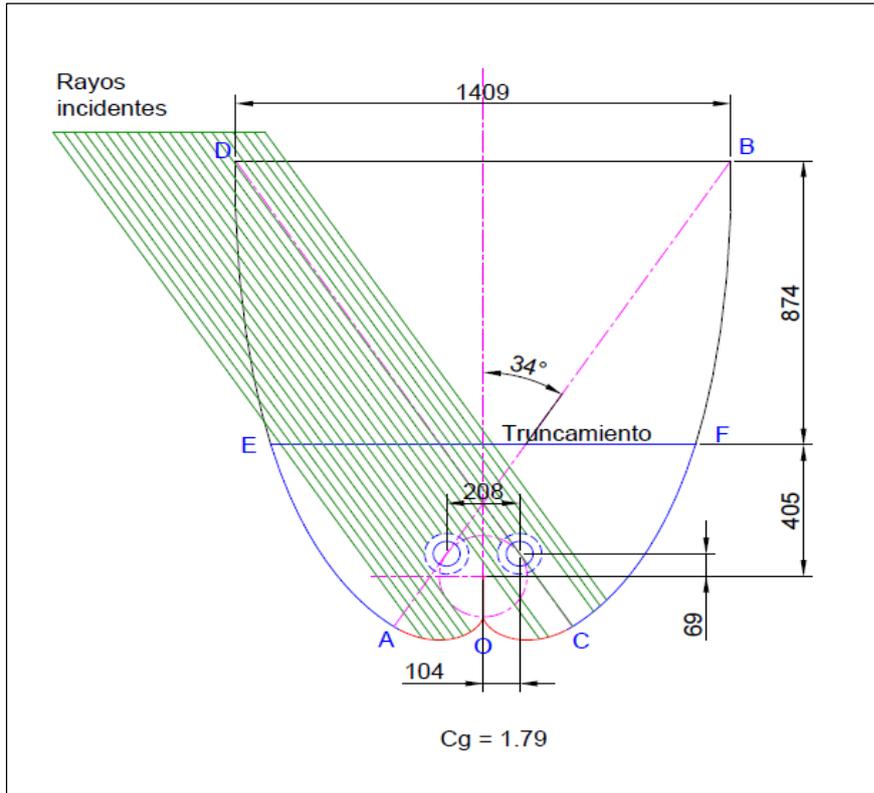


Figura 4.6 –Configuración geométrica de CPC con  $\theta_a = 34^\circ$  Variante  
(Fuente: Elaboración propia).

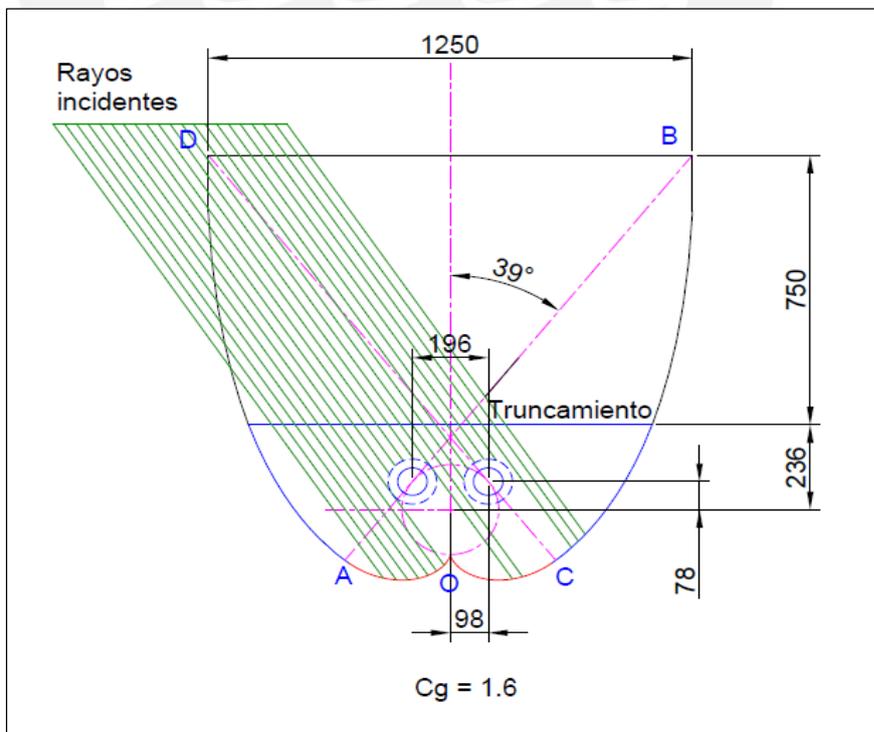


Figura 4.7 –Configuración geométrica de CPC con  $\theta_a = 39^\circ$  Variante  
(Fuente: Elaboración propia).

## **4.2. Modelamiento Óptico**

Existen 2 requisitos fundamentales en la optimización del diseño de concentradores en general para aplicaciones solares, el primero radica en obtener la máxima transferencia de flujo, y el segundo en distribuir de forma uniforme y controlada la radiación captada.

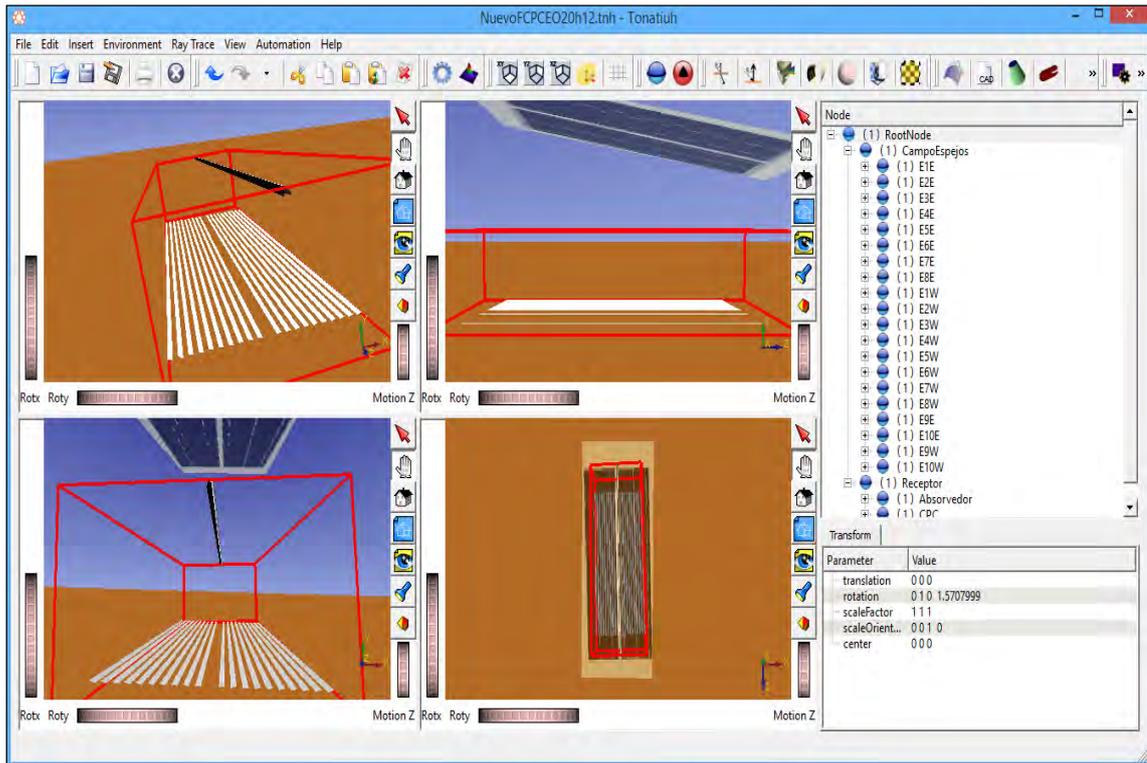
El primer requisito es posible de lograrse mediante el diseño de la forma geométrica y los arreglos complementarios necesarios, pero el segundo requisito depende de la pericia de configurar la línea de “blanco objetivo” en la cavidad receptora, es decir hacia qué punto debe de apuntar la mira del dispositivo de seguimiento solar en los espejos primarios, para tener como resultado la mejor distribución energética posible sobre la superficie de las Tuberías de Absorción, sin disminución del flujo incidente.

### **4.2.1. Ray-tracing para ajuste de la geometría del CPC**

El método de Trazado de rayos (Ray-tracing) es una herramienta de cálculo de tipo probabilístico muy efectiva para la determinación del flujo energético que llega a la(s) tubería(s) de absorción, por consiguiente a través de ella también podemos determinar la eficiencia óptica lograda al comparar la energía reflejada en los concentradores y el valor de la energía incidente.

Tonatiuh es un software libre especializado, que ayuda en la tarea de modelar el comportamiento óptico de todo tipo de concentradores solares, tiene una interface sencilla para diversas geometrías, un ingreso de datos muy práctico y obtención de resultados aceptablemente precisos muy cercanos a los experimentales, la única desventaja que presenta tiene que ver con el post-procesamiento de los resultados entregados en base binaria, porque requiere elaborar un código informático usando otro software de soporte como “R” o “Mathematica”, para la interpretación y gráfico de los resultados.

Esta herramienta nos permitirá modelar el Sistema LFC completo y luego analizar de modo particular lo que ocurre con las configuraciones de CPCs, presentados en el modelamiento geométrico, ahora estos serán evaluados en su desempeño óptico, teniendo como parámetros indicadores de aptitud técnica, el flujo entregado al receptor y la uniformidad de distribución del mismo en los receptores.



**Figura 4.8 – Modelamiento de la geometría del LFC en software Tonatiuh  
(Fuente: Elaboración propia).**

#### 4.2.2. Cálculo de flujo incidente en modelos geométricos CPC Doble Absorbedor

El desarrollo de la simulación mediante el software de Trazado de Rayos, será realizada considerando la hora pico de aprovechamiento solar del año marcado para la localidad Caso de Estudio, es decir para el 21 de marzo a la hora solar del cenit 12 del mediodía.

#### Suposiciones adoptadas:

- Existen condiciones estacionarias de operación, es decir no varía con el transcurrir de periodos cortos de tiempo.
- Los elementos reflectantes no presentan imperfecciones significativas, es decir su geometría es ideal y su capacidad reflectiva es uniforme.
- El escenario meteorológico es de cielo despejado, sin alteración notable.

Las propiedades ópticas de los materiales y del medio consideradas serán las siguientes:

**Cuadro 4.1 – Propiedades ópticas de los elementos de Recepción**  
**(Fuente: Elaboración propia, datos [5]).**

<b>Parámetros</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Unidad</b>
<b>Campo de Espejos</b>		
Reflectancia ( $\xi_{\text{espejos}}$ )	0.80	
<b>Cubierta de Vidrio</b>		
Diámetro exterior ( $D_{\text{ext.vidrio}}$ )	0.125	m
Emitancia ( $\epsilon_{\text{vidrio}}$ )	0.090	
Transmitancia ( $T_{\text{vidrio}}$ )	0.810	
Absortancia ( $\alpha_{\text{vidrio}}$ )	0.088	
Reflectancia ( $\xi_{\text{vidrio}}$ )	0.102	
<b>Tubería de Cobre</b>		
Diámetro exterior ( $D_{\text{ext.vidrio}}$ )	0.081	m
Emitancia, con superficie selectiva ( $\epsilon_{\text{cu}}$ )	0.750	
Absortancia, con superficie selectiva ( $\alpha_{\text{cu}}$ )	0.890	
Reflectancia, con superficie selectiva ( $\xi_{\text{cu}}$ )	0.110	
<b>Medio ambiente</b>		
Transmitancia del medio ( $T_{\text{medio}}$ )	0.90	

Luego de realizada las simulaciones, se elegirá la configuración que mejor desempeño óptico presente y se continuará con la etapa de afinamiento de mejora final.

En las Figuras 4.9 al 4.14 se pueden ver los resultados de las simulaciones Tonatiuh para cada uno de los casos.

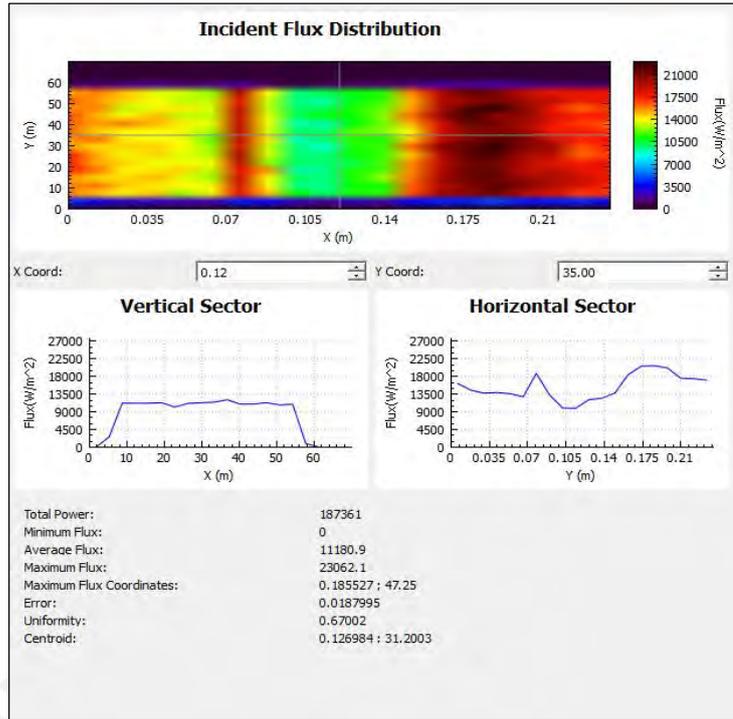


Figura 4.9 – Flujo energético en Tubería de Absorción 1 - CPC Doble Absorbedor ( $\theta_a=30^\circ$ ) (Fuente: Tonatiuh).

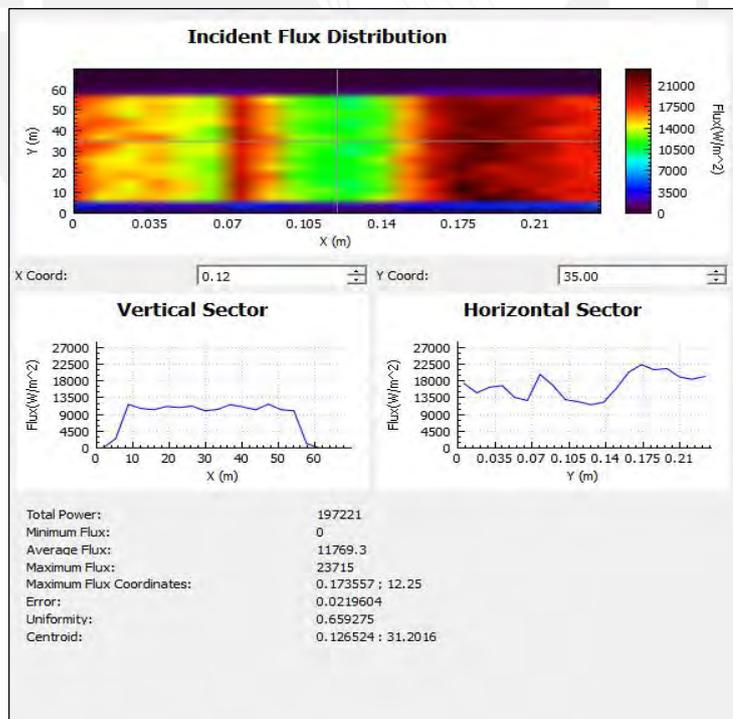


Figura 4.10 – Flujo energético en Tubería de Absorción 1 - CPC Doble Absorbedor ( $\theta_a=34^\circ$ ) (Fuente: Tonatiuh).

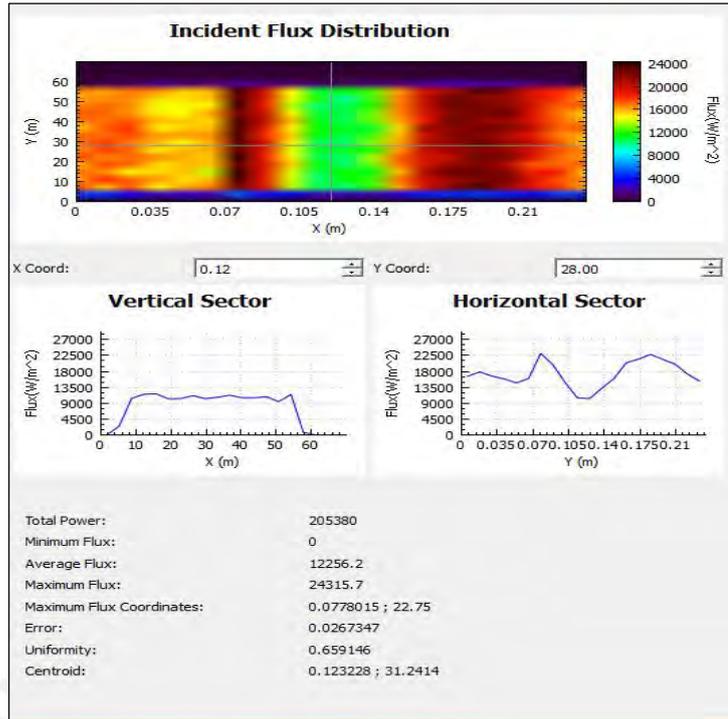


Figura 4.11 –Flujo energético en Tubería de Absorción 1 - CPC Doble Absorbedor ( $\theta_a=39^\circ$ ) (Fuente: Tonatiuh).

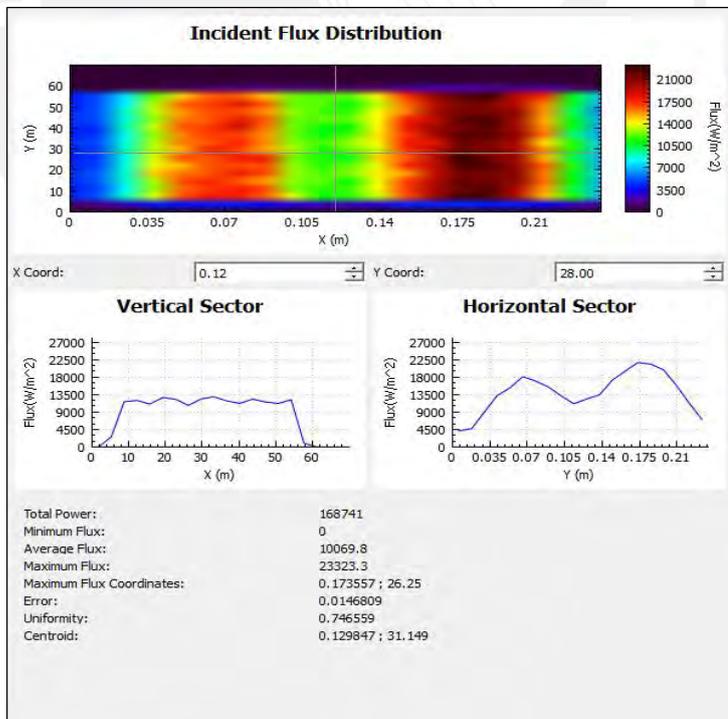


Figura 4.12 –Flujo energético en Tubería de Absorción 1 - CPC Doble Absorbedor ( $\theta_a=30^\circ$ ) Variante (Fuente: Tonatiuh).

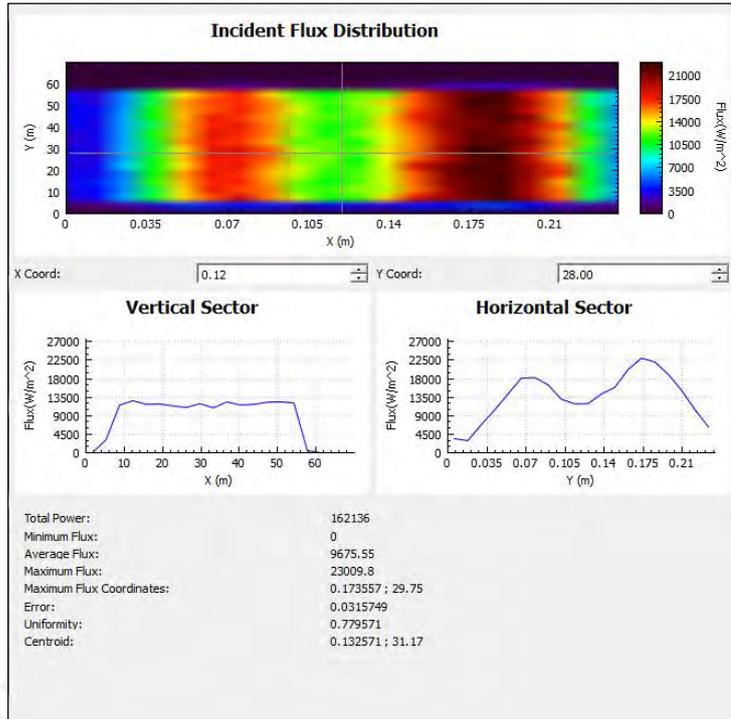


Figura 4.13 –Flujo energético en Tubería de Absorción 1 - CPC Doble Absorbedor ( $\theta_a=34^\circ$ ) Variante (Fuente: Tonatiuh).

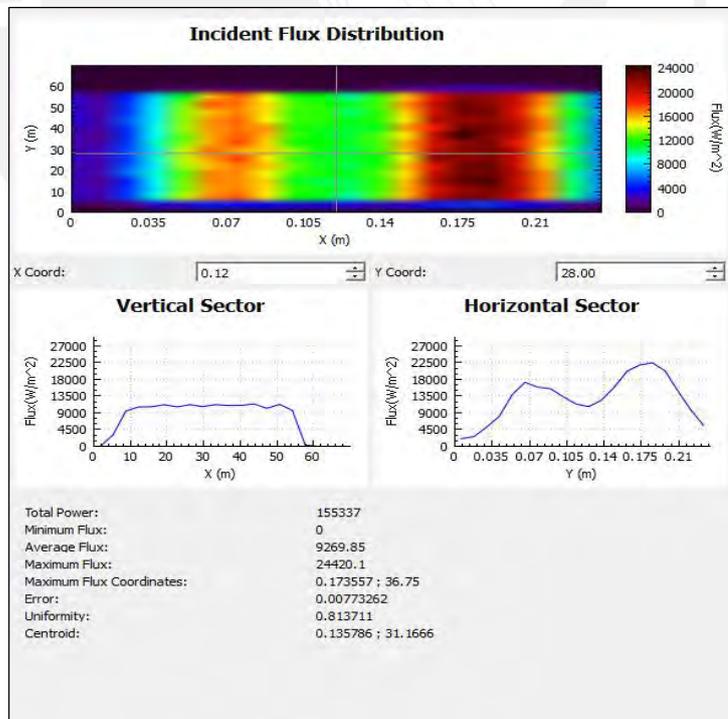


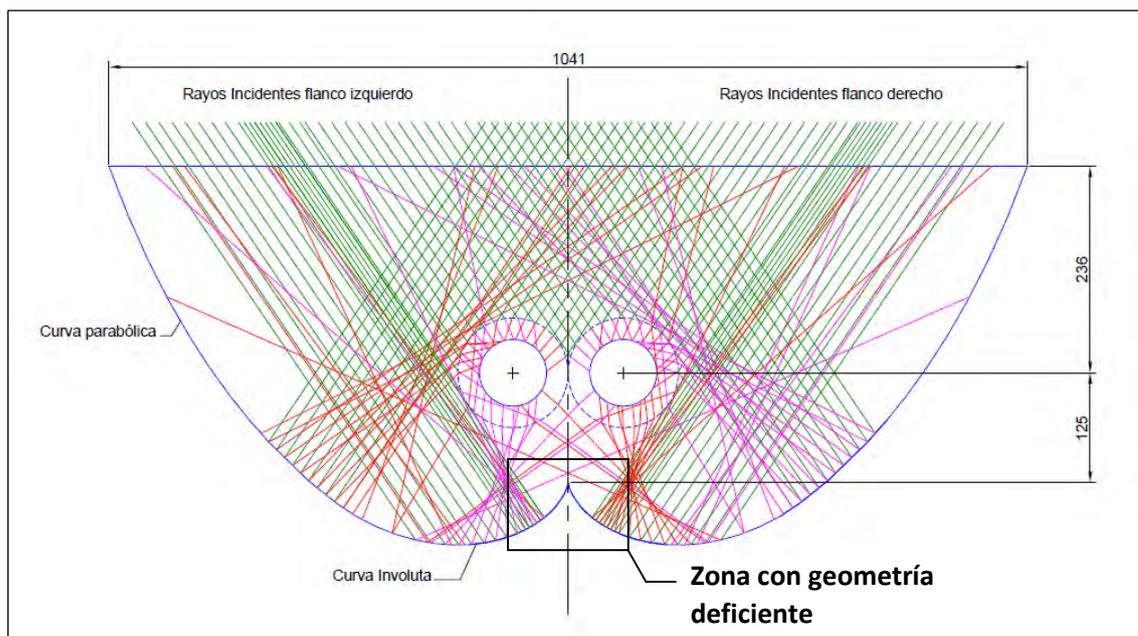
Figura 4.14 – Flujo energético en Tubería de Absorción 1 - CPC Doble Absorbedor ( $\theta_a=39^\circ$ ) Variante (Fuente: Tonatiuh).

**Cuadro 4.2 – Resumen de resultados de evaluación de alternativas de CPC**  
**(Fuente: Elaboración propia).**

Angulo de Aceptancia $\theta_a$ (°)	Flujo incidente $W/m^2$	Energía Total $W$	Uniformidad	Error
30°	11180.90	187361.00	0.67	0.02
34°	11769.30	197221.00	0.66	0.02
39°	12256.20	205380.00	0.66	0.03
30° variante	10069.80	168741.00	0.75	0.02
34° variante	9675.55	162136.00	0.78	0.03
39° variante	9269.85	155337.00	0.81	0.01

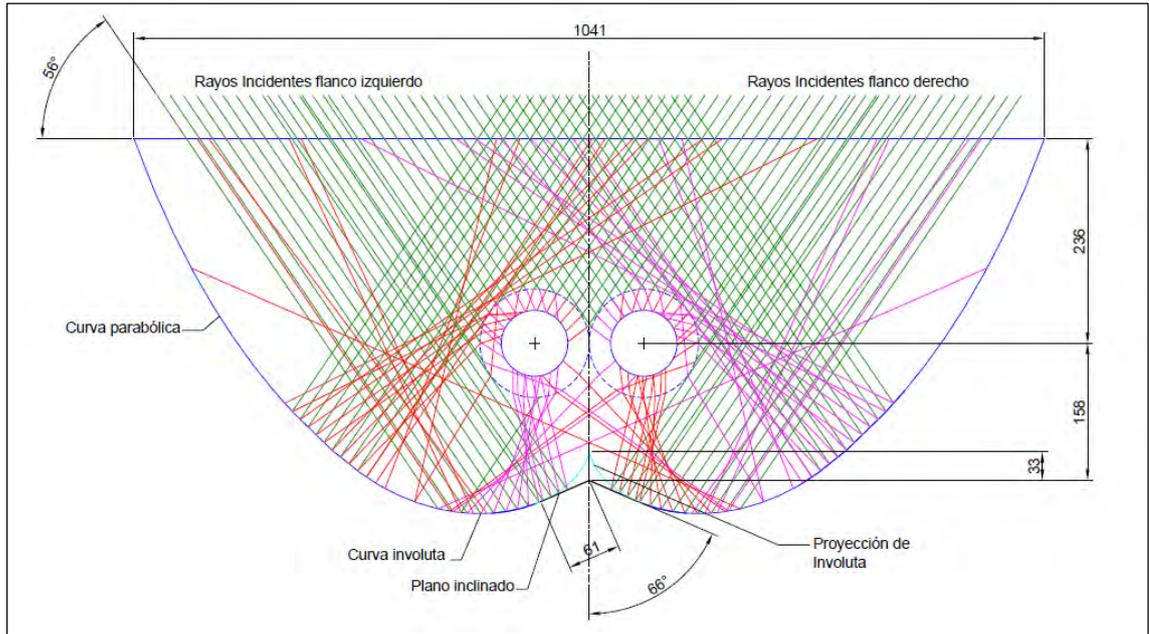
Como se puede ver en el Cuadro 4.2, la mejor opción de prestación le corresponde al CPC con Ángulo de Aceptancia de 39°, con disposición de las tuberías ubicadas dentro de la circunferencia del radio generatriz de la involuta, por consiguiente se adoptará esta configuración para el siguiente paso que corresponderá a la optimización de su uniformidad, para ello analizaremos mediante Trazado de Rayos en AutoCAD las áreas que requieren mejoras para llegar a cumplir este objetivo.

En la Figura 5.15 se ha graficado esquemáticamente las líneas de trayectoria de los rayos incidentes en la cavidad CPC con  $\theta_a=39^\circ$ , utilizando para ello los principios básicos de la reflexión y refracción para las áreas especulares y para la cubierta de vidrio de la tubería receptora, con la finalidad de revisar cómo llega el flujo energético a la Tubería de Absorción y de esta forma identificar qué sectores quedan con o sin cobertura. Vale mencionar aquí que el gráfico solo muestra el aporte de los últimos espejos, sin embargo estos representan la condición más exigida de captación por las áreas de la cavidad que quedan ocultas del punto de mira. El esquema total tendría que incluir lo que aporta los 24 espejos en simultáneo, lo cual resulta difícil para una técnica gráfico-matemática, por lo que en general para esa condición es preferible recurrir a técnicas probabilísticas como Ray-tracing.



**Figura 4.15 – Trazado en AutoCAD de rayos de flujo energético en CPC Doble Absorbedor ( $\theta_a=39^\circ$ ) (Fuente: Elaboración propia).**

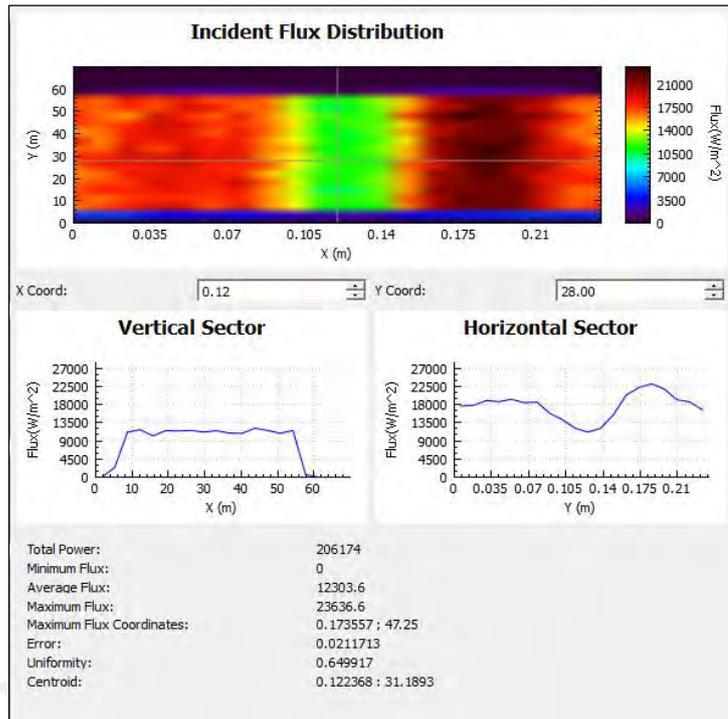
En el gráfico 4.15 se puede apreciar que el perfil de la zona que se encuentra cercana al inicio de la involuta no llega a sumar confluencia al conjunto de rayos que llega, por el contrario resulta divergente. Este sector requiere atención porque necesita nivelación del flujo incidente a la par del conjunto, dado que es una zona de difícil llegada directa y que siempre se encuentra en desventaja en reflejar los aportes de energía, que le llegan de todos los ángulos. Pensando en ello luego de sucesivas iteraciones de geometría analítica en combinación con gráficos de posicionamiento de perfiles que ayuden a superar este problema, se ha visto que incorporando una superficie plana con angulación adecuada, como pantalla de rebote de los rayos incidentes en el CPC, es posible redireccionar los rayos que se pierden hacia la Tubería de Absorción y conseguir un incremento adicional al flujo energético captado, lo que también influiría en mejorar la distribución de la energía capturada en el elemento absorbedor. En la Figura 4.16, se puede observar los resultados:



**Figura 4.16 – Trazado en AutoCAD de rayos de flujo energético en CPC Doble Absorbedor ( $\theta_a=39^\circ$ ) modificado (Fuente: Elaboración propia).**

Para verificar el efecto de la geometría añadida en el CPC, a continuación se realizará la simulación completa de Ray-tracing que dará luces sobre lo ganado. En la Figura 4.17 se puede apreciar el cambio que ocurre en el espectro de flujo, reportado por el software Tonatiuh.

En el Cuadro 4.3 se presenta un resumen comparativo de los resultados obtenidos entre la versión inicial y la modificada del perfil del CPC, que confirman un ligero incremento en el flujo y lo principal, un mejoramiento de la uniformidad de la transferencia. Se debe señalar al respecto que el indicador de uniformidad, es resultado de la aplicación de un estadístico empleado por el método Montecarlo, que como tratamiento de valor cuanto menor sea, la distribución del flujo en el área receptora estará mejor balanceada.



**Figura 4.17 – Flujo energético en Tubería de Absorción ( $\theta_a=39^\circ$ ) modificado (Fuente: Tonatiuh).**

**Cuadro 4.3 – Comparación de resultados de la evaluación de CPCs  $\theta_a=39^\circ$  (Fuente: Elaboración propia).**

Angulo de Aceptancia $\theta_a$ ( $^\circ$ )	Flujo incidente $W/m^2$	Energía Total $W$	Uniformidad	Error
$39^\circ$	12256.20	205380.00	0.66	0.03
$39^\circ$ modificado	12303.60	206174.00	0.64	0.02
Incremento	47.40	794.00	0.01	-

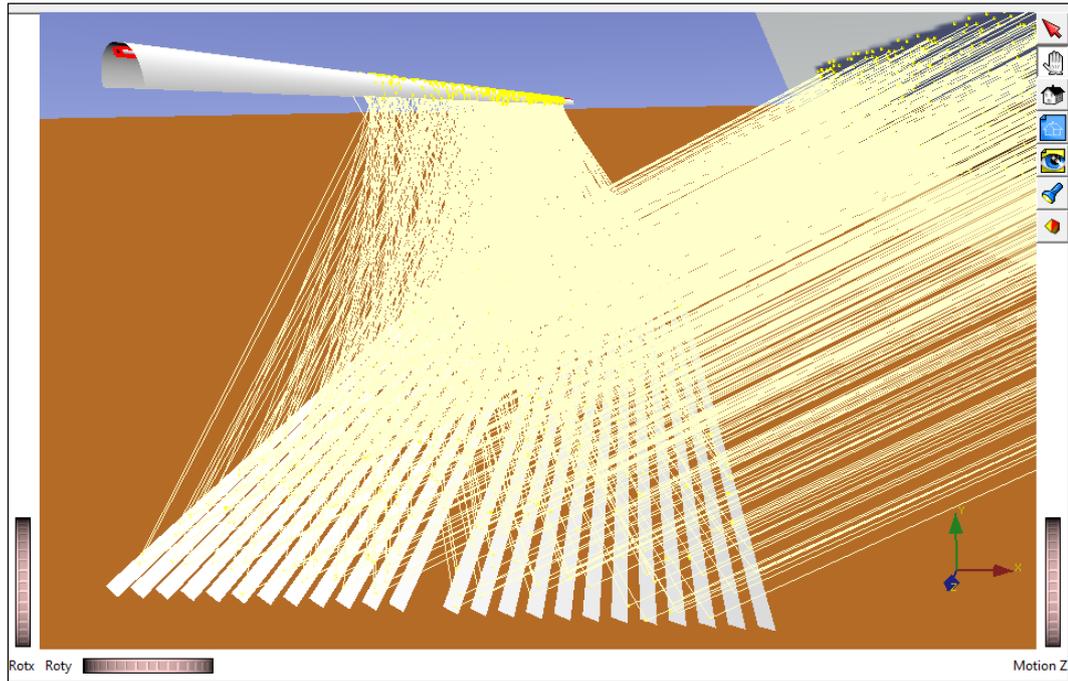
Como siguiente paso, ahora corresponde evaluar el rendimiento óptico de un LFC con un CPC estándar optimizado, para conocer sus prestaciones de transmisión del flujo energético captado. Esta evaluación se debe realizar para las fechas más importantes del año que marcan la trayectoria solar, es decir los cambios de estación, por la sencilla razón de que los ángulos de azimut solar son muy influyentes en el IAM del LFC y pueden ser determinantes para las pérdidas ópticas longitudinales. Posteriormente de igual forma se

procederá para el LFC con CPC Doble Absorbedor, con la finalidad luego de realizar el contraste entre ambos modelos.

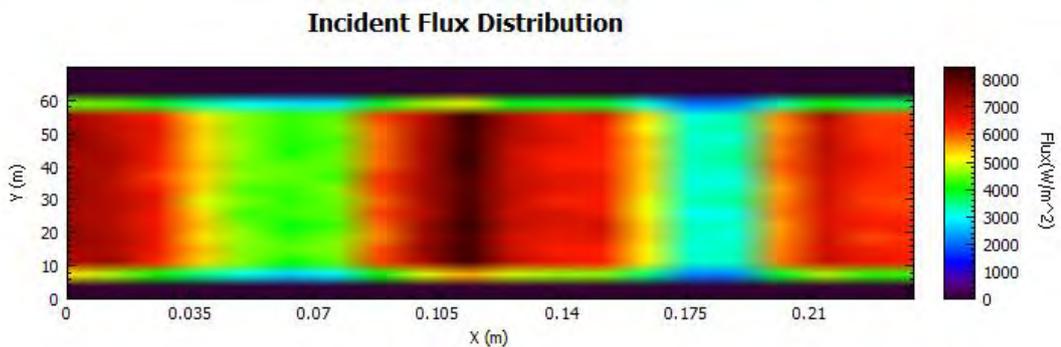
#### **4.2.3. Cálculo de flujo incidente en el modelo estándar optimizado de CPC**

A fin de conocer en la localidad Caso de Estudio el performance del LFC con CPC estándar, es decir con una sola Tubería de Absorción, se realizarán simulaciones en el software Tonatiuh, que comprenderá encontrar los espectros de flujo para los días 21 de los meses de Marzo, Junio, Septiembre y Diciembre, fechas que marcan las estaciones del año, en las horas 8:00 am, 10:00 am, 12:00 m, 14:00 pm y 16:00 pm, que son representativas del horario operativo del Sistema; asimismo se desarrollará a manera de ejemplo los gráficos de trazado de rayos para el LFC y el espectro de flujo energético para el caso del mes de Marzo. Como es de entender los otros meses seguirán la misma metodología, luego los resultados obtenidos se presentarán en una tabla que detalle los flujos alcanzados. Sobre la lectura de los mapas de flujo obtenidos, un aspecto a aclarar es que el eje horizontal representa el perímetro de la tubería y el eje vertical la longitud de esta.

En las Figuras 4.18 y 4.19 se muestran a partir de la simulación, cómo ocurre la captación en el Campo de Espejos en el mes de Marzo a horas 8:00 am, los rayos solares incidentes llegan con un ángulo solar transversal de  $27^\circ$  respecto al nivel 0 del piso, produciendo en la Tubería de Absorción un espectro de distribución de flujo energético. Sobre los resultados obtenidos podemos comentar que el flujo en el tramo útil se mantiene en un rango de 3,000 a 8,000  $W/m^2$ , el flujo promedio es de 4,213.54  $W/m^2$ , con un índice de uniformidad de 0.65, también es relevante mencionar que la longitud efectiva de captación es de 50.00 m de los 70 m totales. Esto ocurre porque la reflexión en los concentradores primarios, no es únicamente transversal sino también longitudinal, esto hace que haya un corrimiento de la radiación reflejada en la Tubería de Absorción.



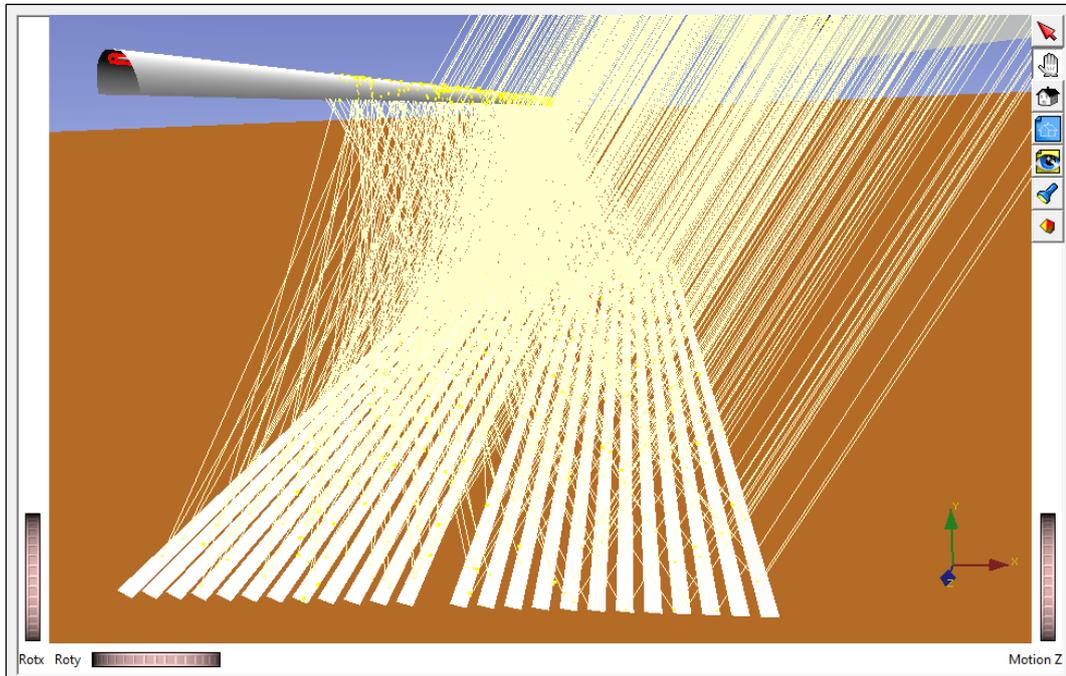
**Figura 4.18 – Flujo incidente LFC con CPC estándar, Marzo 21 - 8:00 am.**  
**(Fuente: Tonatiuh).**



**Figura 4.19 – Flujo Incidente en Tubería de Absorción CPC, Marzo 21 - 8:00 am**  
**(Fuente: Tonatiuh).**

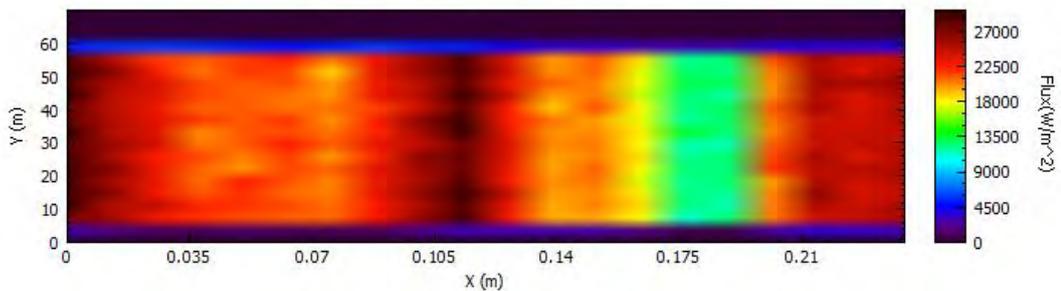
En las Figuras 4.20 y 4.21 se presentan como opera el LFC a las 10 am. En este horario los rayos incidentes sobre el Campo de Espejos tienen un ángulo solar transversal de  $57^\circ$  respecto al nivel 0 del piso. Como en el caso anterior se puede notar que la longitud efectiva irradiada sigue siendo de 50 m, el flujo energético está en aumento y se mantiene dentro del rango de 10,000 a 27,000  $W/m^2$ , el flujo promedio es de 15,689.8  $W/m^2$ , con un índice de uniformidad de 0.66. El lado derecho presenta un color más claro señalando así un menor flujo, debido a que corresponde a la parte superior del tubo, la que se

encuentra próximo al pico de la involuta del CPC, donde el acceso de los rayos solares es estrecho.



**Figura 4.20 – Flujo incidente LFC con CPC estándar, Marzo 21 - 10:00 am**  
(Fuente: Tonatiuh).

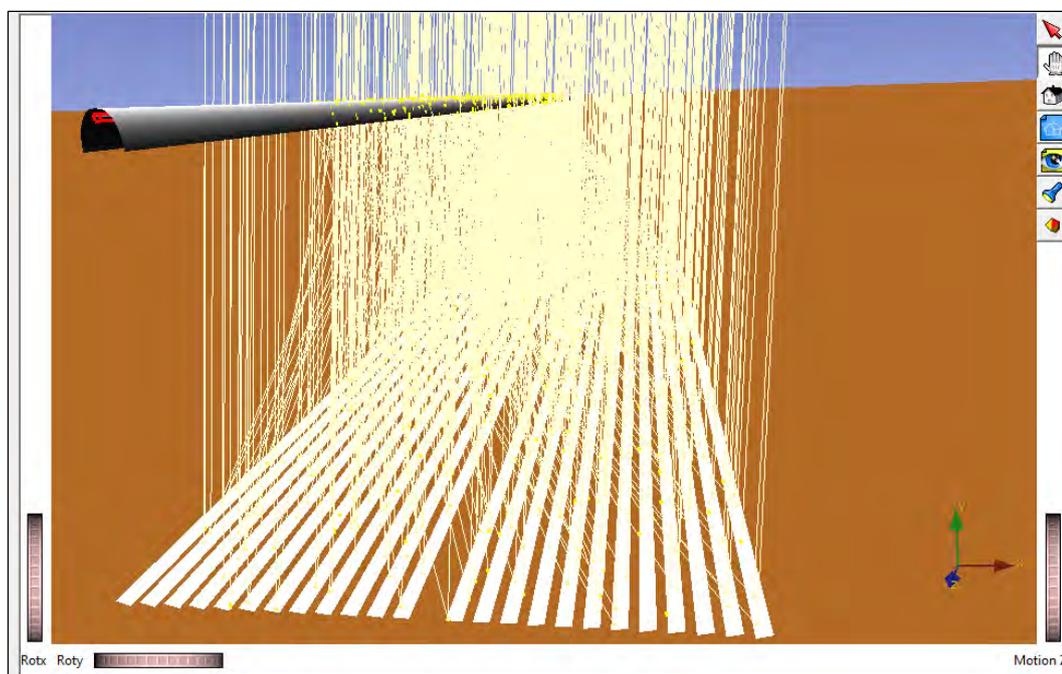
**Incident Flux Distribution**



**Figura 4.21 – Flujo Incidente en Tubería de Absorción CPC, Marzo 21 - 10:00 am**  
(Fuente: Tonatiuh).

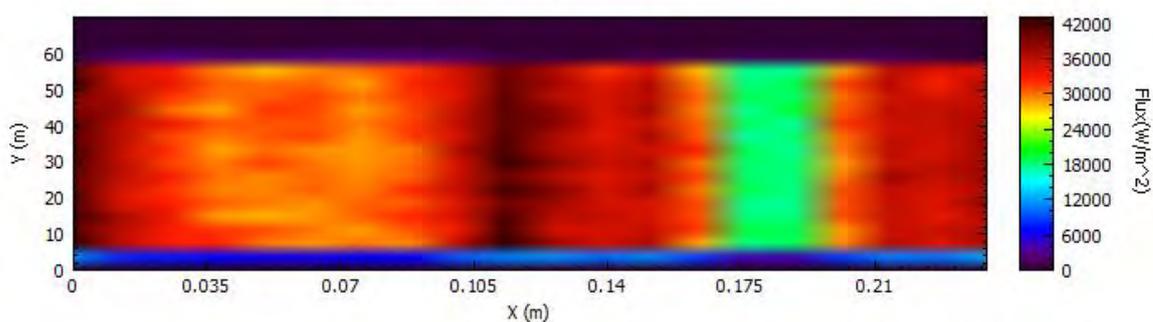
El flujo de energía al momento del mediodía, se muestran en las Figuras 4.22 y 4.23, donde puede notarse que el flujo alcanza una mejor distribución en uniformidad y también en su valor máximo encontrándose en el rango de 16,000 a 42,000  $W/m^2$ , el flujo promedio es de 23,111.20  $W/m^2$ , con un índice de uniformidad de 0.66. El ángulo transversal solar es de  $89.8^\circ$  respecto al nivel del suelo, la longitud efectiva irradiada no sufre alteración siendo 50 m, se puede notar además que el sector que marca la diferencia por menor

flujo es el área posterior cercana al receptor. Este fenómeno resulta difícil de revertir por la estrechez de la cavidad del CPC, como ya se comentó anteriormente.



**Figura 4.22 – Flujo incidente LFC con CPC estándar, Marzo 21 - 12:00 am**  
(Fuente: Tonatiuh).

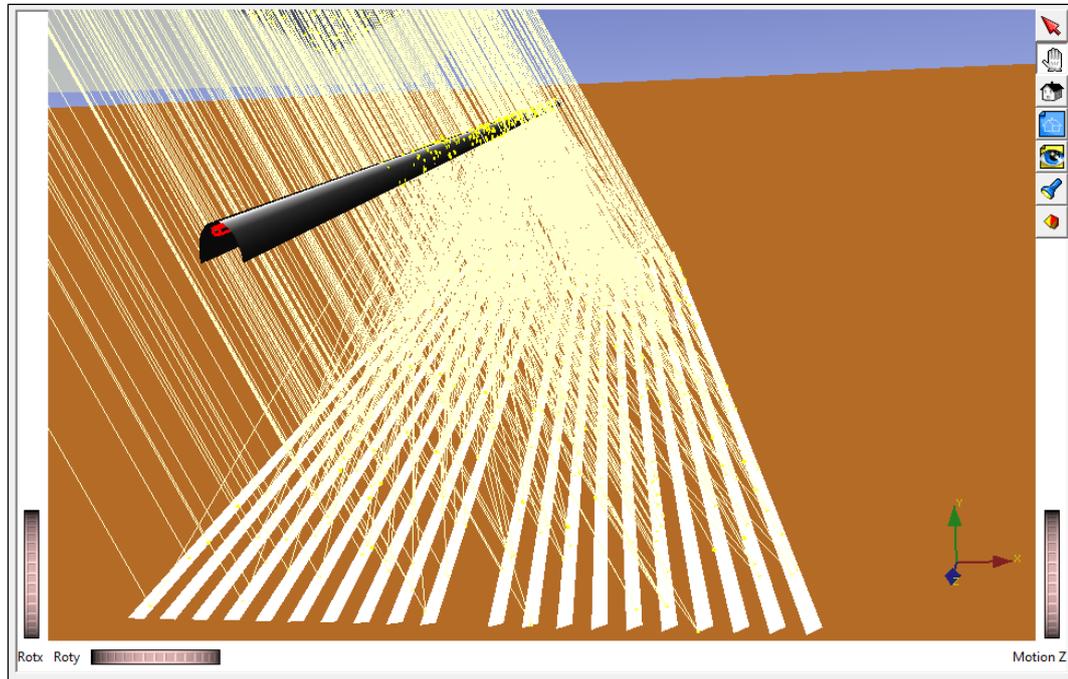
#### Incident Flux Distribution



**Figura 4.23 – Flujo Incidente en Tubería de Absorción CPC, Marzo 21 - 12:00 m**  
(Fuente: Tonatiuh).

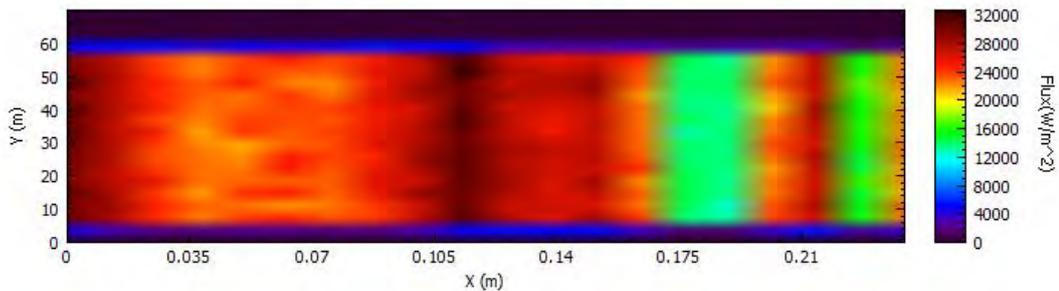
En horas de la tarde se repite casi la misma situación a la presentada durante la mañana, solo que ahora ocurre una disminución de la longitud irradiada, la uniformidad del espectro se conserva mayormente, pero en la parte superior e inferior del espectro de flujo, se forman sendas franjas de color azulado de 3.00 m aproximadamente que nos indica que

existe una línea frontera de transición con bajo flujo de energía como consecuencia de la influencia del factor coseno.



**Figura 4.24 – Flujo incidente LFC con CPC estándar, Marzo 21 - 14:00 am**  
(Fuente: Tonatiuh).

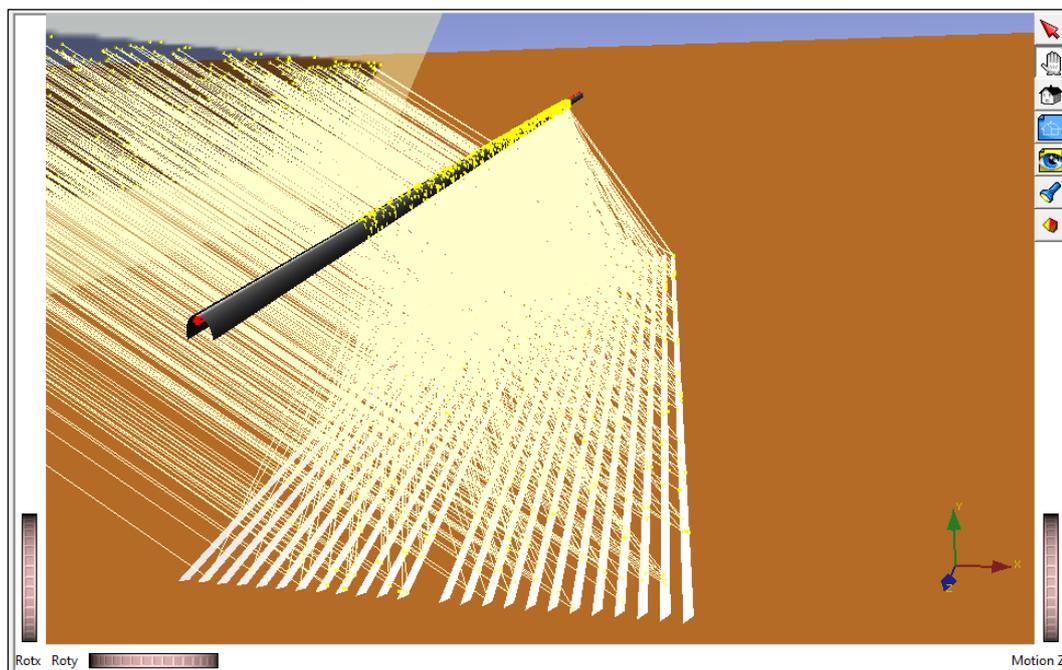
**Incident Flux Distribution**



**Figura 4.25 – Flujo Incidente en Tubería de Absorción CPC, Marzo 21 - 14:00 pm**  
(Fuente: Tonatiuh).

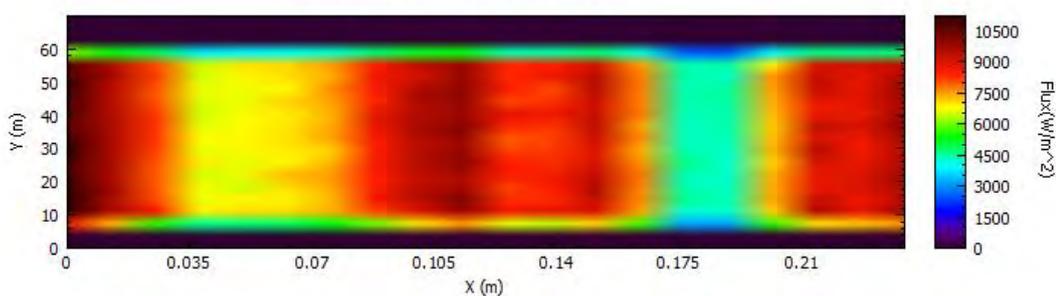
En las Figuras 4.24, 4.25, 4.26 y 4.27 se pueden ver cómo queda pintado el espectro de flujo para las horas de la tarde, en el caso de las 14:00 horas cuando el Sol tiene un ángulo transversal de  $61.4^\circ$  respecto al terreno, el rango máximo de flujo de energía radiante esta entre 16,000 y 28,000  $W/m^2$ , el flujo promedio es de 17,100.90  $W/m^2$ , con un índice de uniformidad de 0.66 y en el caso de las 16:00 horas cuando el ángulo solar

transversal es de  $31.3^\circ$  respecto al nivel 0 del piso. El intervalo de flujo está entre  $4,000$  y  $10,500 \text{ W/m}^2$ , el flujo promedio es de  $5,757.41 \text{ W/m}^2$ , con un índice de uniformidad de  $0.66$ . La longitud efectiva de la Tubería de Absorción sigue igual manteniéndose en  $50.00 \text{ m}$  para ambos horarios.



**Figura 4.26 – Flujo incidente LFC con CPC estándar, Marzo 21 - 16:00 am**  
(Fuente: Tonatiuh).

**Incident Flux Distribution**

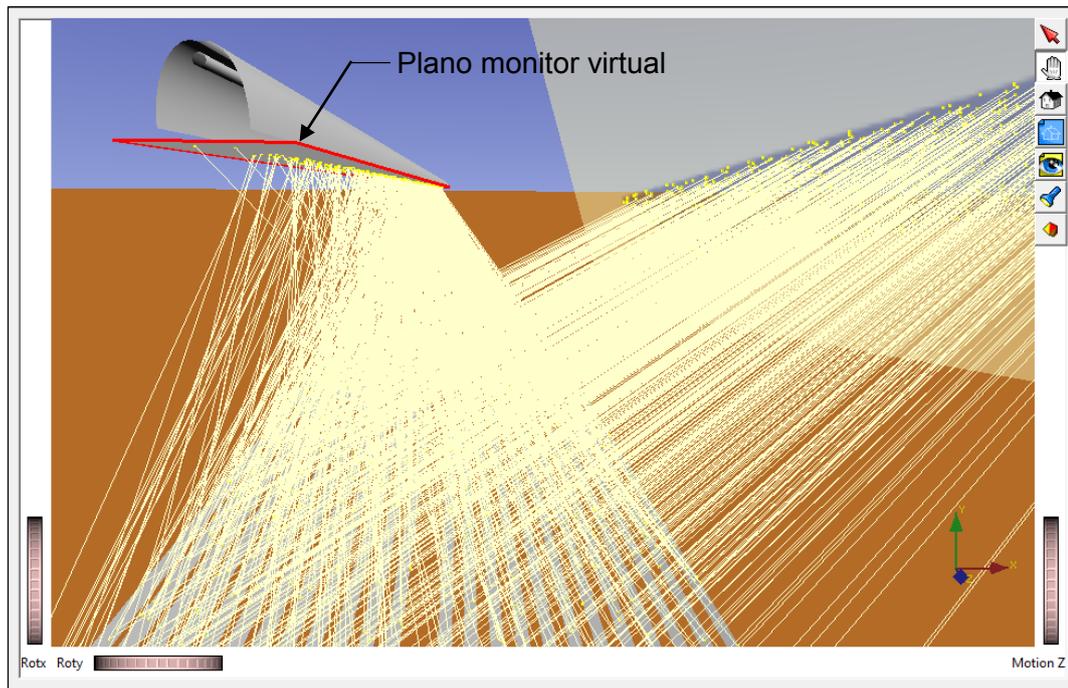


**Figura 4.27 – Flujo Incidente en Tubería de Absorción CPC, Marzo 21 - 16:00 pm**  
(Fuente: Tonatiuh).

Con el objetivo de hallar el flujo reflejado por el Campo de Espejos antes del ingreso de la cavidad del CPC, colocaremos un “plano virtual” a manera de monitor en el modelo

construido en Tonatiuh, y reportaremos sus resultados para compararlos con el flujo promedio alcanzado sobre la tubería receptora, para obtener directamente la eficiencia óptica-geométrica del CPC estándar. En la Figura 4.28 se puede ver el detalle de su localización en el LFC.

En el Cuadro 4.4 se presenta un resumen con los resultados de las evaluaciones realizadas para los meses restantes, es decir Junio, Septiembre y Diciembre, con base en el Flujo Energético Total incidente sobre la Tubería de Absorción del CPC estándar.



**Figura 4.28 – Ubicación de monitor virtual para reporte en modelo LFC (Fuente: Tonatiuh).**

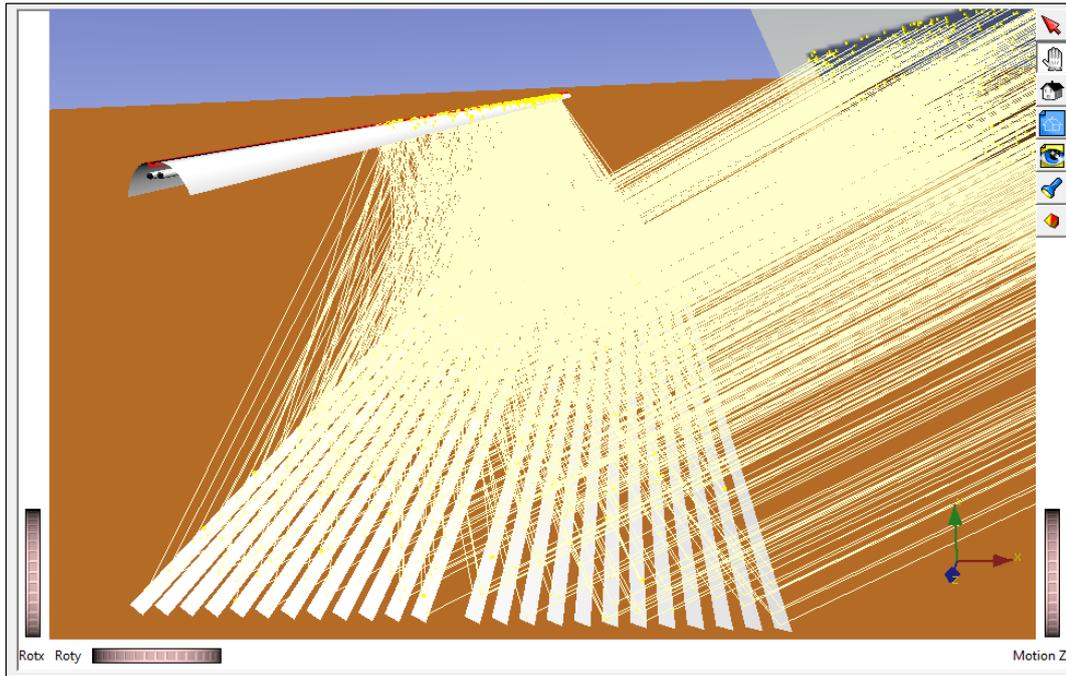
**Cuadro 4.4 – Rendimiento óptico en el Modelo LFC con CPC (Fuente: Elaboración propia)**

Hora	Flujo total reflejado sobre la Tubería de Absorción (W)	Flujo total reflejado por el Campo de Espejos (W)	Eficiencia Óptico-Geométrica CPC
<b>MARZO</b>			
08:00	70540.6	94250.1	0.75
10:00	262109	403359	0.65
12:00	388117	594720	0.65
14:00	285914	445564	0.64
16:00	96509.5	133066	0.73

<b>JUNIO</b>			
08:00	53265.1	69860.6	0.76
10:00	176379	279137	0.63
12:00	242263	385519	0.63
14:00	180391	281998	0.64
16:00	57493.1	81488.9	0.71
<b>SEPTIEMBRE</b>			
08:00	85924	118838	0.72
10:00	259418	401930	0.65
12:00	354775	548035	0.65
14:00	241982	373787	0.65
16:00	66908.1	89310.9	0.75
<b>DICIEMBRE</b>			
<b>Hora</b>	<b>Flujo total reflejado sobre la Tubería de Absorción (W)</b>	<b>Flujo total reflejado por el Campo de Espejos (W)</b>	<b>Eficiencia Óptico-Geométrica CPC</b>
08:00	69180.6	99392	0.70
10:00	242263	381899	0.63
12:00	348311	557396	0.62
14:00	241249	370552	0.65
16:00	64253.4	92001.8	0.70

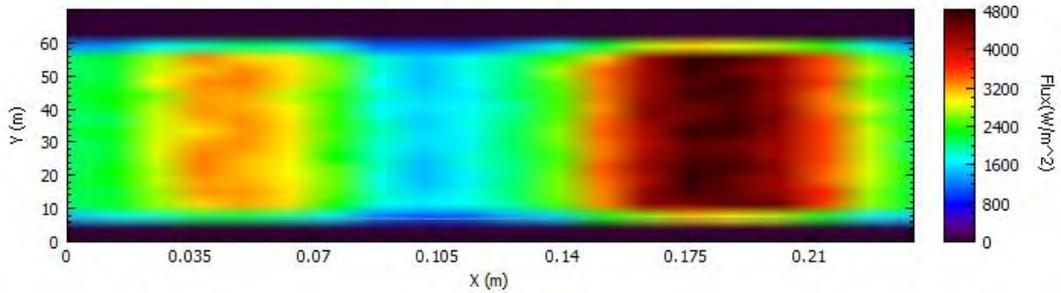
#### **4.2.4. Cálculo de flujo incidente en modelo optimizado CPC con Doble Absorbedor**

De forma similar a la evaluación anterior, para el LFC con CPC Doble Absorbedor las simulaciones que se llevarán a cabo, corresponderán a los meses de solsticios y equinoccios del año es decir Marzo, Junio, Septiembre y Diciembre para los días 21 y para las horas de 8:00 am, 10 am, 12:00 m, 14:00 pm y 16:00 pm.

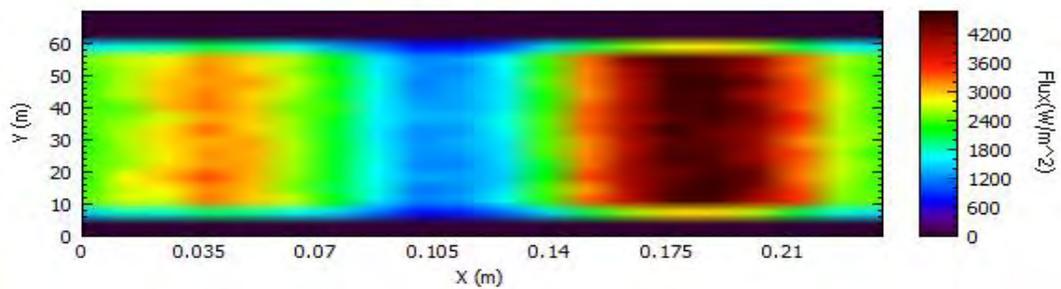


**Figura 4.29 – Flujo incidente LFC con CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 8:00 am (Fuente: Tonatiuh).**

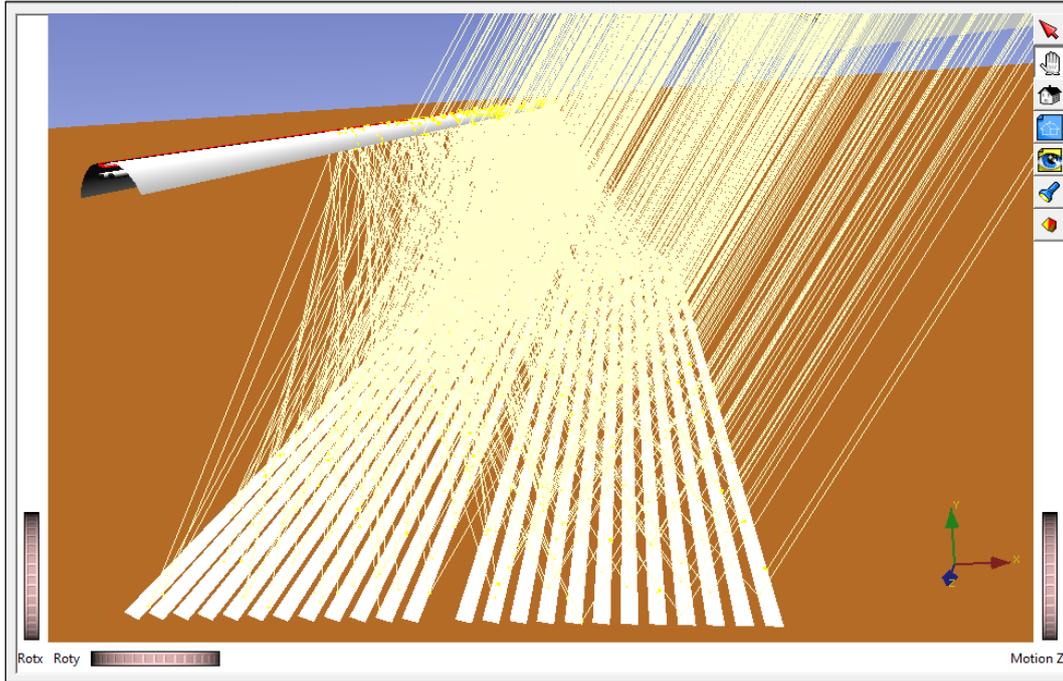
**Incident Flux Distribution**



**Incident Flux Distribution**

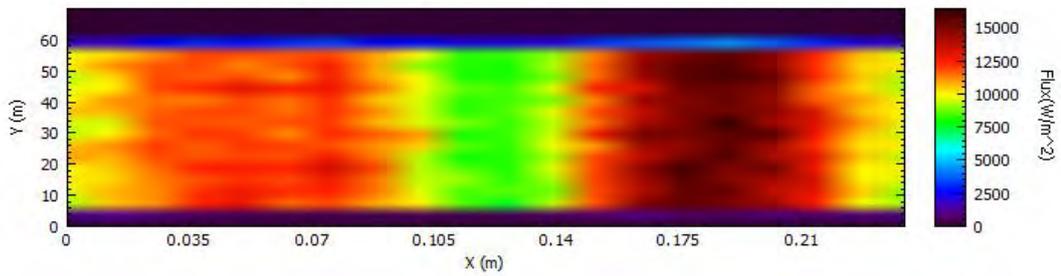


**Figura 4.30 – Flujo en Tuberías de Absorción CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 8:00 am (Fuente: Tonatiuh).**

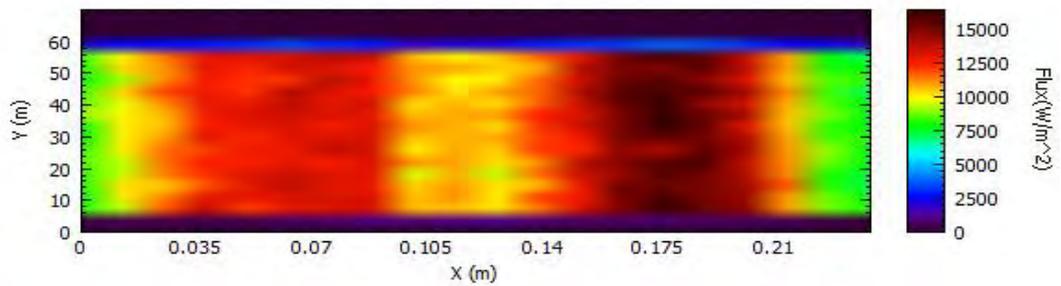


**Figura 4.31 – Flujo incidente LFC con CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 10:00 am (Fuente: Tonatiuh).**

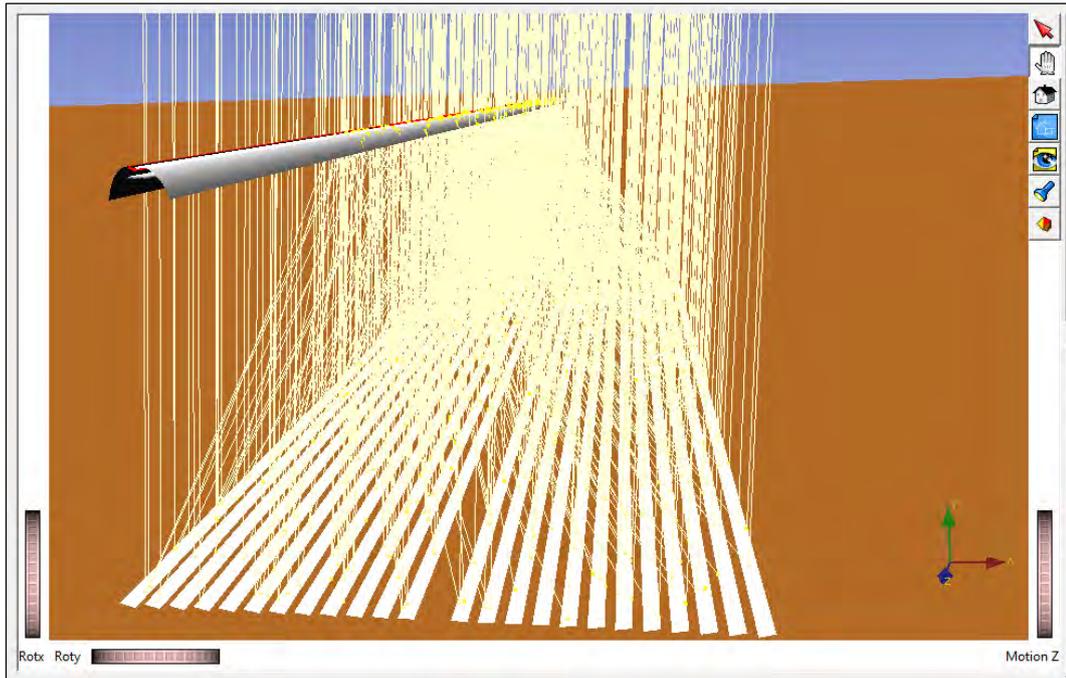
**Incident Flux Distribution**



**Incident Flux Distribution**

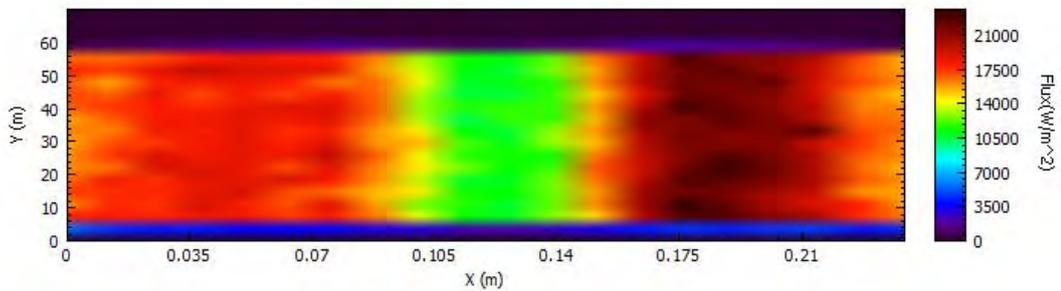


**Figura 4.32 – Flujo en Tuberías de Absorción CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 10:00 am (Fuente: Tonatiuh).**

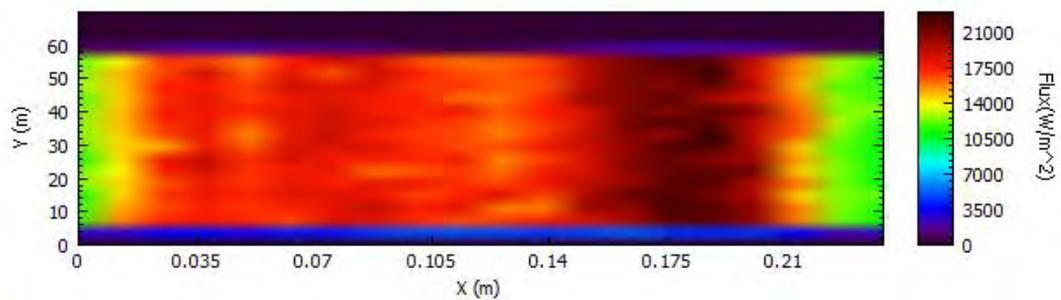


**Figura 4.33 – Flujo incidente LFC con CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 12:00 m (Fuente: Tonatiuh).**

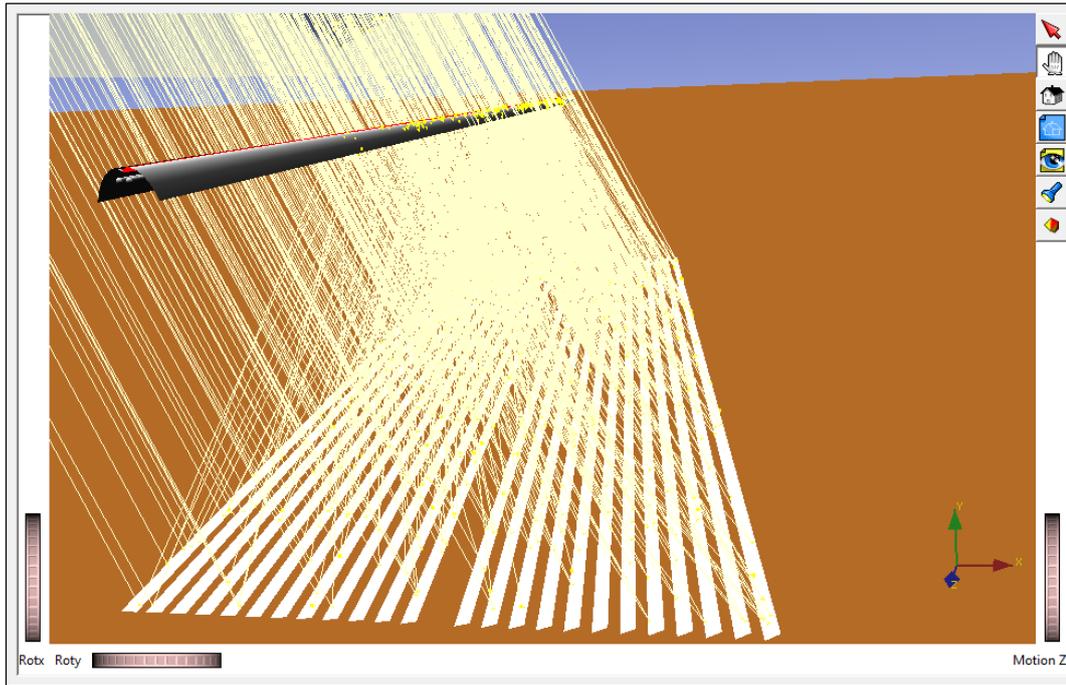
**Incident Flux Distribution**



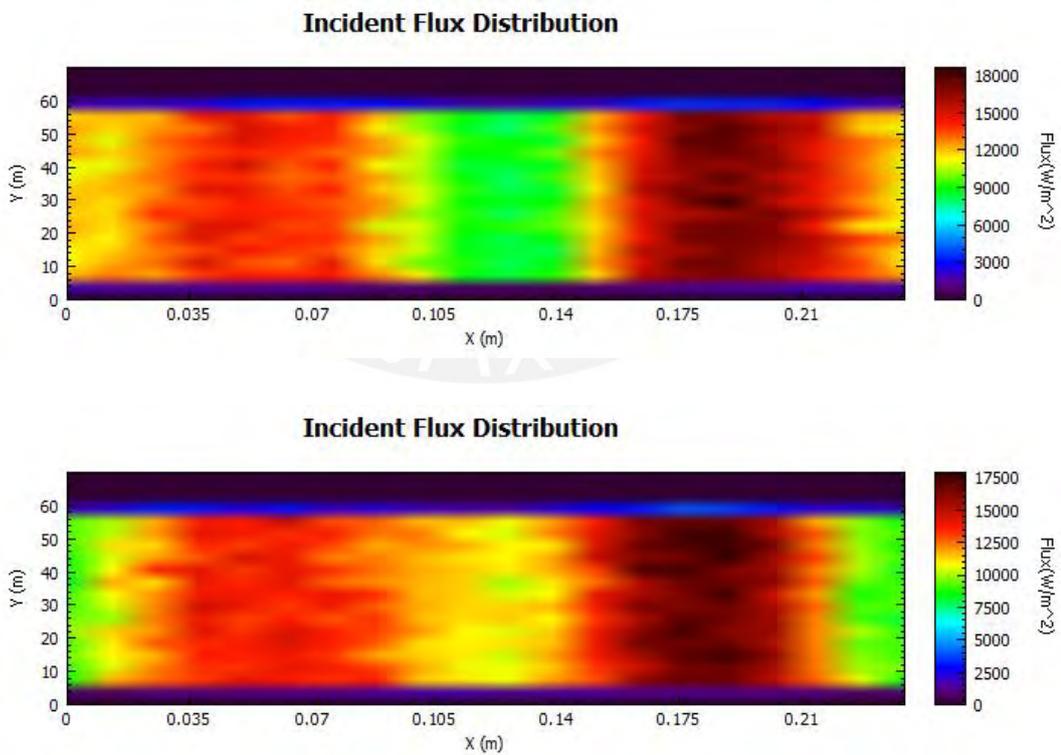
**Incident Flux Distribution**



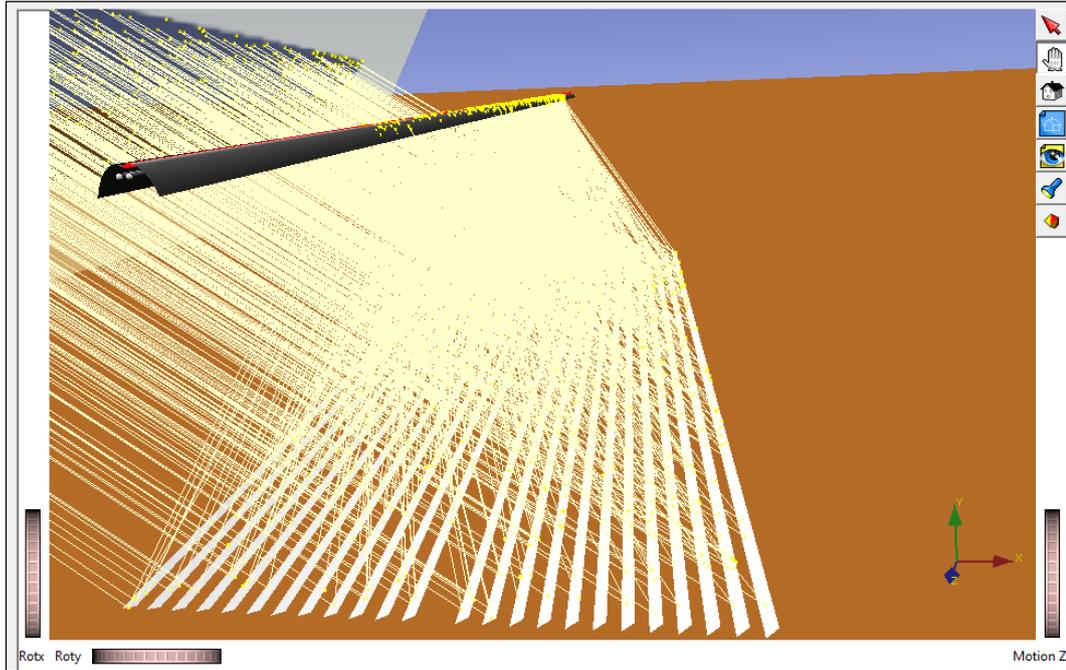
**Figura 4.34 – Flujo en Tuberías de Absorción CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 12:00 m (Fuente: Tonatiuh).**



**Figura 4.35 – Flujo incidente LFC con CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 14:00 pm (Fuente: Tonatiuh).**

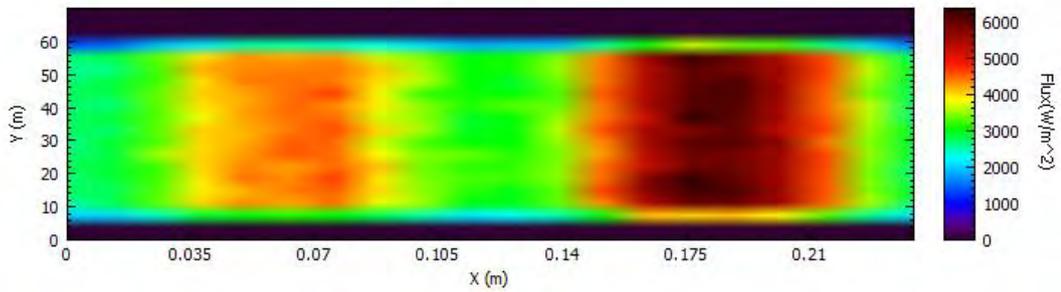


**Figura 4.36 – Flujo en Tuberías de Absorción CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 14:00 m (Fuente: Tonatiuh).**

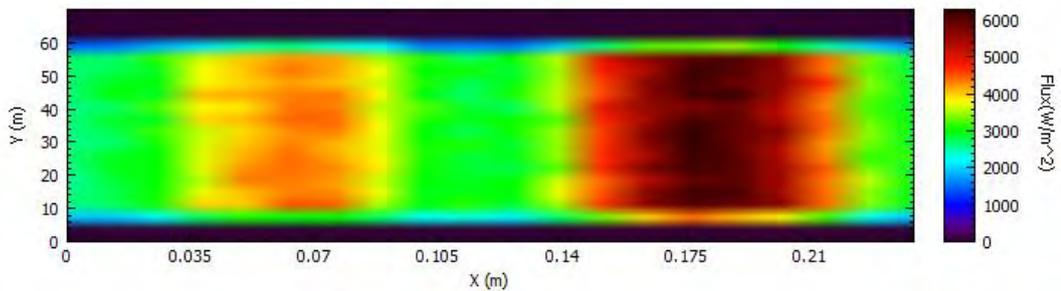


**Figura 4.37 – Flujo incidente LFC con CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 16:00 pm (Fuente: Tonatiuh).**

**Incident Flux Distribution**



**Incident Flux Distribution**



**Figura 4.38 – Flujo en Tuberías de Absorción CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 16:00 m (Fuente: Tonatiuh).**

En el Cuadro 4.5, se ha tabulado los resultados de las simulaciones realizadas, con base en el Flujo Total entregado por el nuevo CPC. En el Cuadro 4.6, se ha plasmado la diferencia de rendimientos ópticos-geométricos entre el CPC Doble Absorbedor y el CPC estándar, para mayor claridad del mejoramiento alcanzado.

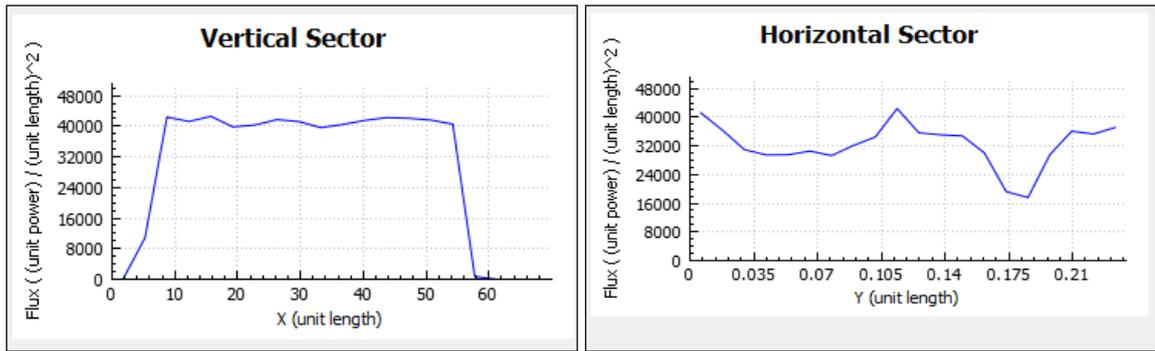
**Cuadro 4.5 – Rendimiento óptico en el Modelo LFC con CPC Doble Absorbedor**  
(Fuente: Elaboración propia)

Hora	Flujo total reflejado sobre las 2 Tuberías de Absorción (W)	Flujo total reflejado por el Campo de Espejos (W)	Eficiencia Óptico-Geométrica
<b>MARZO</b>			
08:00	67804	94250.1	0.72
10:00	279803	403359	0.69
12:00	411171	594720	0.69
14:00	305775	445564	0.69
16:00	95823.7	133066	0.72
<b>JUNIO</b>			
08:00	49425.1	69860.6	0.71
10:00	191609.7	279137	0.69
12:00	264408	385519	0.69
14:00	195326.2	281998	0.69
16:00	54029.9	81488.9	0.66
<b>SEPTIEMBRE</b>			
08:00	85207.6	118838	0.72
10:00	277611	401930	0.69
12:00	376902	548035	0.69
14:00	259795	373787	0.70
16:00	64153.3	89310.9	0.72
<b>DICIEMBRE</b>			
08:00	71508.7	99392	0.72
10:00	262864	381899	0.69
12:00	380560	557396	0.68
14:00	258067	370552	0.70
16:00	66180.9	92001.8	0.72

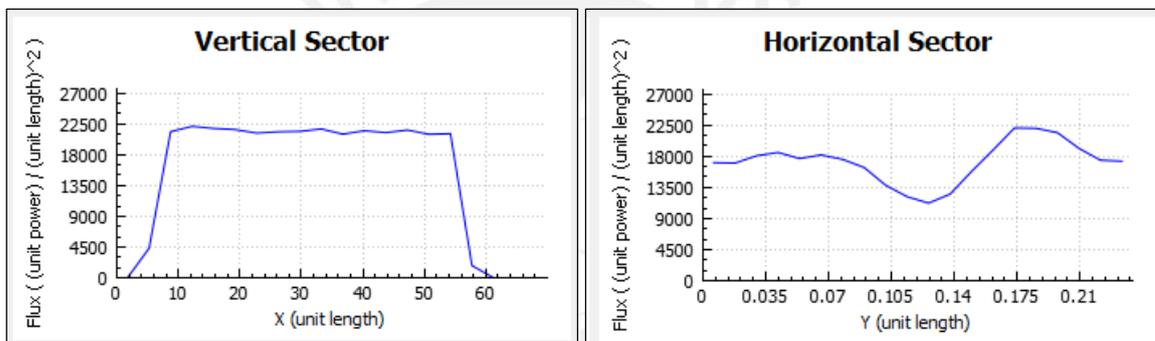
**Cuadro 4.6 – Comparación de Rendimientos Óptico-Geométrico entre CPCs**  
(Fuente: Elaboración propia)

<b>Hora</b>	<b>Eficiencia Óptico-Geométrica CPC Doble Absorbedor</b>	<b>Eficiencia Óptico-Geométrica CPC estándar</b>	<b>Diferencia Incremental</b>
<b>MARZO</b>			
08:00	72%	75%	-3%
10:00	69%	65%	4%
12:00	69%	65%	4%
14:00	69%	64%	4%
16:00	72%	73%	-1%
<b>JUNIO</b>			
08:00	71%	76%	-5%
10:00	69%	63%	5%
12:00	69%	63%	6%
14:00	69%	64%	5%
16:00	66%	71%	-4%
<b>SEPTIEMBRE</b>			
08:00	72%	72%	-1%
10:00	69%	65%	5%
12:00	69%	65%	4%
14:00	70%	65%	5%
16:00	72%	75%	-3%
<b>DICIEMBRE</b>			
08:00	72%	70%	2%
10:00	69%	63%	5%
12:00	68%	62%	6%
14:00	70%	65%	5%
16:00	72%	70%	2%

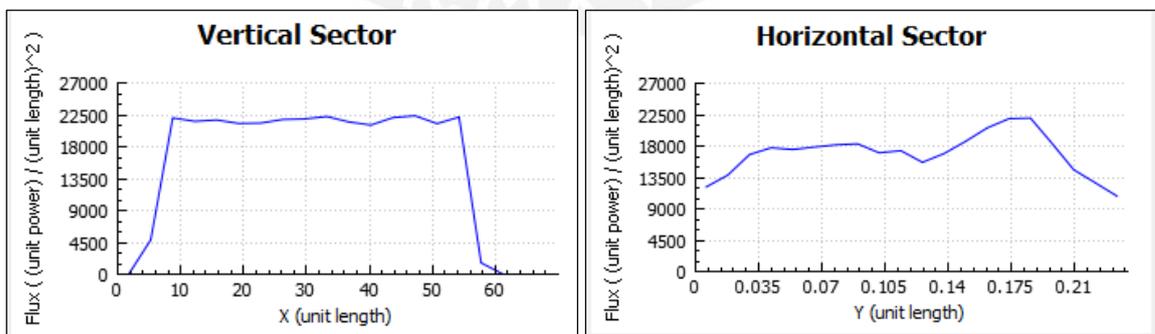
Es importante mencionar que el horario efectivo de operación de un Sistema LFC típico en producción se inicia a las 10:00 am, por lo que la mejora en el rendimiento óptico obtenido resulta de todas formas significativo. Corresponde ahora realizar la verificación de la uniformidad lograda en la transmisión energética del LFC con nuevo CPC.



**Figura 4.39 – Perfil de Distribución de flujo en Tubería de Absorción CPC estándar, Marzo 21 – 12:00 m (Fuente: Tonatiuh).**

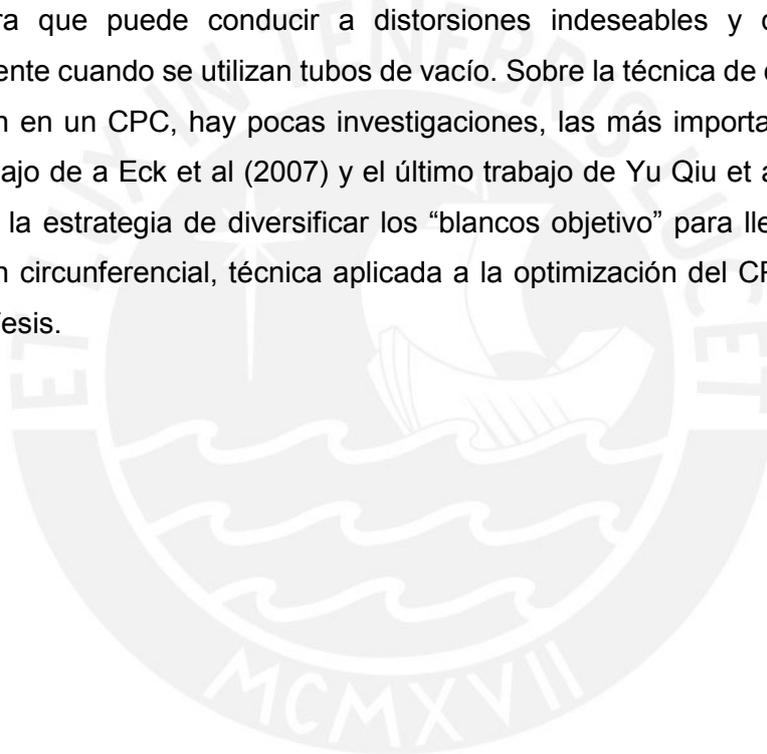


**Figura 4.40 – Perfil de Distribución de Flujo en Tubería de Absorción 1 de CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 12:00 m (Fuente: Tonatiuh).**



**Figura 4.41 – Perfil de Distribución de Flujo en Tubería de Absorción 2 de CPC Doble Absorbedor, Marzo 21 - 12:00 m (Fuente: Tonatiuh).**

En las Figuras 4.39, 4.40 y 4.41 se muestran los perfiles de distribución de flujo, en el lado izquierdo se aprecia el flujo longitudinal y en el lado derecho el flujo circunferencial, el índice de uniformidad global señalado por el reporte del software, nos indica que el CPC estándar logra un valor de 0.66 y en el caso del nuevo CPC 0.64. Como puede notarse en los gráficos el perfil de este último para las 2 tuberías, tiene menores inflexiones y presentan transiciones suaves comparativamente con el primer modelo, lo que resulta mucho más conveniente para la operación del Sistema LFC, en cuanto a evitar presentar los 2 problemas frecuentes que ocurren por una mala distribución, que son en primer lugar la alta temperatura local que puede acelerar la degradación del recubrimiento de los tubos y en segundo lugar la gran tensión térmica causada por el gradiente de temperatura que puede conducir a distorsiones indeseables y daños al receptor, especialmente cuando se utilizan tubos de vacío. Sobre la técnica de como uniformizar la distribución en un CPC, hay pocas investigaciones, las más importantes de mencionar son el trabajo de Eck et al (2007) y el último trabajo de Yu Qiu et al (2017), donde se profundiza la estrategia de diversificar los “blancos objetivo” para llegar a balancear la distribución circunferencial, técnica aplicada a la optimización del CPC propuesto en la presente Tesis.



## CAPITULO 5

### MODELAMIENTO Y BALANCE TÉRMICO

#### 5.1. Configuración operativa del Modelo

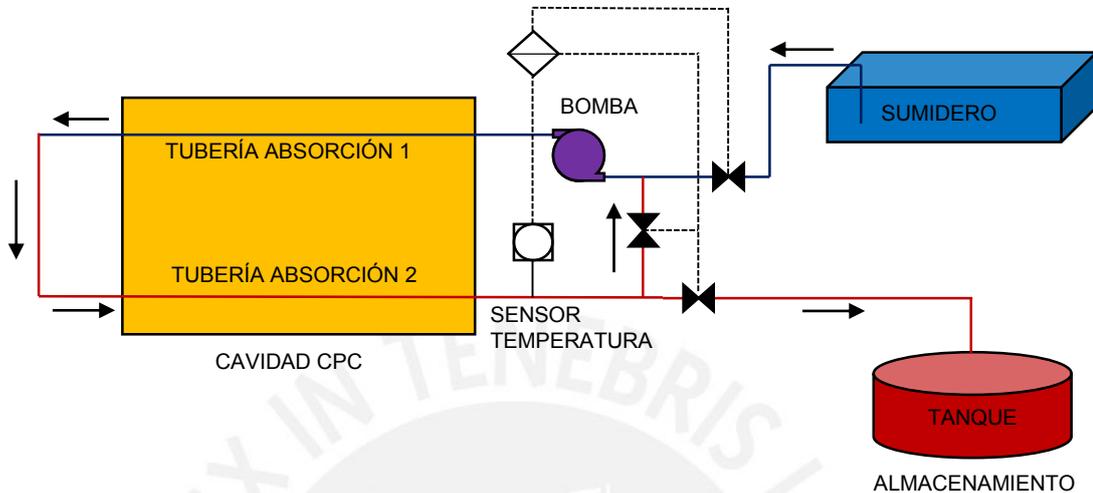
En esta etapa se probará el LFC con cavidad receptora CPC con Doble Absorbedor, en el escenario simulado de las condiciones térmicas restrictivas de la zona geográfica escogida. Por ello deberemos marcar claramente las condiciones de borde del problema, determinando en orden de prioridad los valores que caracterizan térmicamente al Sistema LFC y al medio donde se desarrollan las acciones termodinámicas, estos datos para mejor manejo en la parte matemática resulta conveniente agruparlos en matrices de trabajo, de tal forma de facilitar su operación en bloque y también luego su convergencia numérica durante el procesamiento de las ecuaciones aplicables al caso.

La evaluación se desarrollará en un periodo horario para adquirir información cuasi dinámica de la interacción entre las condiciones climáticas del sitio y el potencial solar aprovechado en el transcurrir de las horas y minutos de un día representativo del año. Las horas de interés para la evaluación corresponden al periodo de 9:00 am a 15:00 pm, lapso de tiempo en que existen condiciones reales de aprovechamiento solar en el sitio de análisis.

El planteamiento operativo para el LFC, será de un dispositivo con 2 tuberías conectadas en serie para tener la opción a recirculación continua, con este arreglo se tiene la alternativa a realizar varios pases sobre el área de exposición de captación solar. Se ha fijado un caudal volumétrico tentativo de 5 gpm para el fluido de trabajo, con la idea de trabajar con base en un estándar de bomba comercial disponible para aplicaciones solares. Las simulaciones se harán para un solo pase en la cavidad receptora, infiriendo que el incremento de temperatura ganado para el fluido, pueda ser un valor referencial para calcular el número de pases necesarios para llegar a la temperatura deseada, en la Figura 5.1 se ha esquematizado la disposición descrita.

La resolución de las ecuaciones para encontrar los valores de las temperaturas logradas, las eficiencias finales características y su representación gráfica en cuadros de funciones, se desarrollaran mediante un código Matlab, elaborado con base en todas las ecuaciones declaradas en el Marco Teórico, con vínculos en bases de datos creadas en Excel para la climatología, propiedades del fluido, propiedades térmicas el medio ambiente y los

flujos energéticos de entrada provenientes de la optimización óptica, para interactuar entre sí y luego procesar los resultados automáticamente.



**Figura 5.1 – Esquema del proceso de aprovechamiento solar LFC**  
(Fuente: Elaboración propia).

## 5.2. Matriz climática de Evaluación

Como se mencionó en la parte inicial del presente documento, se hace necesario conformar un modelo numérico que describa de manera aproximada las condiciones climáticas de la zona de análisis, por esta razón en primer lugar vamos a conformar una matriz de temperaturas en frecuencia horaria por día representativo del mes, para cada uno de los meses del año, en segundo lugar vamos a conformar una matriz de velocidades de viento con rango entre 2.5 y 10 m/s (promedio diario de registro en 5 años por el SENAMHI) y finalmente conformaremos una matriz de atenuación energética por nubosidad con efecto en la radiación directa en el rango de 1.5% a 10% de disminución. Como mencionamos anteriormente, los meses entre Diciembre a Marzo son los meses de presencia de lluvias en la zona, este trimestre lo consideraremos para fines prácticos de producción limitada, para restringirnos únicamente en lo realmente productivo. En el Cuadro 5.1 se muestra a manera de ejemplo, cómo está constituida la matriz climática conceptualizada para los cálculos a desarrollarse en el presente Capítulo.

**Cuadro 5.1 – Ejemplo de matriz climática empleada en el análisis térmico  
(Fuente: Elaboración propia).**

MARZO			
Horario	Temperatura (°C)	Viento (m/s)	Nubosidad (%)
08:00 a.m.	5.20	4.00	5 %
08:15 a.m.	5.65	4.00	5 %
08:30 a.m.	6.10	4.00	5 %
08:45 a.m.	6.55	4.00	5 %
09:00 a.m.	7.00	4.00	5 %
09:15 a.m.	7.50	4.00	5 %
09:30 a.m.	8.00	4.00	5 %
09:45 a.m.	8.50	4.00	5 %
10:00 a.m.	9.00	4.00	5 %
10:15 a.m.	9.38	4.00	5 %
10:30 a.m.	9.75	4.00	5 %
10:45 a.m.	10.13	4.00	5 %
11:00 a.m.	10.50	4.00	5 %
11:15 a.m.	11.18	4.00	5 %
11:30 a.m.	11.85	4.00	5 %
11:45 a.m.	12.53	4.00	5 %
12:00 p.m.	13.20	6.00	1.5 %
12:15 p.m.	12.50	6.00	1.5 %
12:30 p.m.	11.80	6.00	1.5 %
12:45 p.m.	11.10	6.00	1.5 %
01:00 p.m.	10.40	6.00	1.5 %
01:15 p.m.	9.85	6.00	1.5 %
01:30 p.m.	9.30	6.00	1.5 %
01:45 p.m.	8.75	6.00	1.5 %
02:00 p.m.	8.20	6.00	1.5 %
02:15 p.m.	7.90	6.00	1.5 %
02:30 p.m.	7.60	6.00	1.5 %
02:45 p.m.	7.30	6.00	1.5 %
03:00 p.m.	7.00	6.00	1.5 %
03:15 a.m.	6.63	6.00	1.5 %
03:30 p.m.	6.25	6.00	1.5 %
03:45 p.m.	5.88	6.00	1.5 %
04:00 p.m.	5.50	6.00	1.5 %

### 5.3. Planteamiento de los parámetros de la transferencia térmica

A continuación se definirán los parámetros térmicos de la Tubería de Absorción y Fluido de Trabajo, que nos servirán para realizar el balance energético y resolver las ecuaciones que describen, los procesos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación, en la superficie receptora.

**Cuadro 5.2 – Propiedades de elementos de captura y transmisión de calor**  
(Fuente: Elaboración propia).

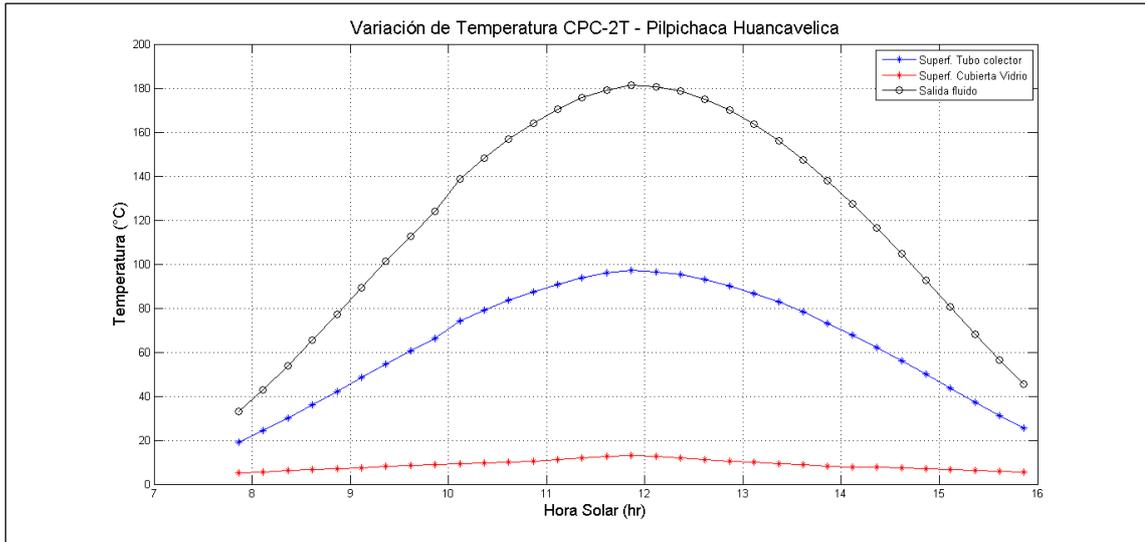
<b>Datos generales</b>		
<b>Parámetros</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Unidad</b>
Longitud total de receptor	70.000	m
Longitud máxima efectiva de reflexión	50.000	m
<b>Cubierta de Vidrio</b>		
Diámetro interior ( $D_{int.vidrio}$ )	0.119	m
Espesor de cubierta	0.003	m
Diámetro exterior ( $D_{ext.vidrio}$ )	0.125	m
Conductividad térmica ( $K_{vidrio}$ )	0.810	W/m-K
Emitancia ( $\epsilon_{vidrio}$ )	0.090	
Transmitancia ( $T_{vidrio}$ )	0.810	
Absortancia ( $\alpha_{vidrio}$ )	0.088	
Reflectancia ( $\xi_{vidrio}$ )	0.102	
<b>Tubería de Cobre</b>		
Diámetro interior ( $D_{int.tub}$ )	0.076	m
Espesor del material	0.003	m
Diámetro exterior ( $D_{ext.vidrio}$ )	0.081	m
Conductividad térmica ( $K_{cu}$ )	375.000	W/m-K
Emitancia, con superficie selectiva ( $\epsilon_{cu}$ )	0.750	
Absortancia, con superficie selectiva ( $\alpha_{cu}$ )	0.890	
Reflectancia, con superficie selectiva ( $\xi_{cu}$ )	0.110	
<b>Concentrador Secundario CPC</b>		
Amplitud de la cavidad	0.760	m
Profundidad al foco de la involuta	0.520	m
<b>Fluido de Trabajo</b>		
Capacidad calorífica del agua ( $Cp_{agua}$ )	4.213	KJ/Kg-K
Viscosidad dinámica del agua ( $\mu_{agua}$ )	1766 E-06 a 281.9 E-06	Ns/m <sup>2</sup>
Conductividad térmica del agua ( $K_{agua}$ )	567.2 E-03 a 679.3 E-03	W/m-K
Número de Prandtl del agua ( $Pr_{agua}$ )	13.12 a 1.749	

Densidad del agua ( $\rho_{\text{agua}}$ )	1000 a 958.5	Kg/m <sup>3</sup>
<b>Medio ambiente</b>		
Presión atmosférica de la zona	59.28	Kpa
Temperatura del aire ( $T_{\text{aire}}$ )	3 a 11	°C
Transmitancia del medio ( $T_{\text{medio}}$ )	0.90	
Número de Prandtl del aire hasta 10°C ( $Pr_{\text{aire}}$ )	0.73	
Densidad del aire hasta 10°C ( $\rho_{\text{aire}}$ )	1.25	Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad cinemática del aire hasta 10°C ( $v_{\text{aire}}$ )	0.00001426	m <sup>2</sup> /s
Conductividad térmica del aire hasta 10°C ( $k_{\text{aire}}$ )	0.02439	W/m-K
Temperatura del suelo ( $T_{\text{suelo}}$ )	4.00	°C
Temperatura promedio del Sol ( $T_{\text{sol}}$ )	5778.00	K

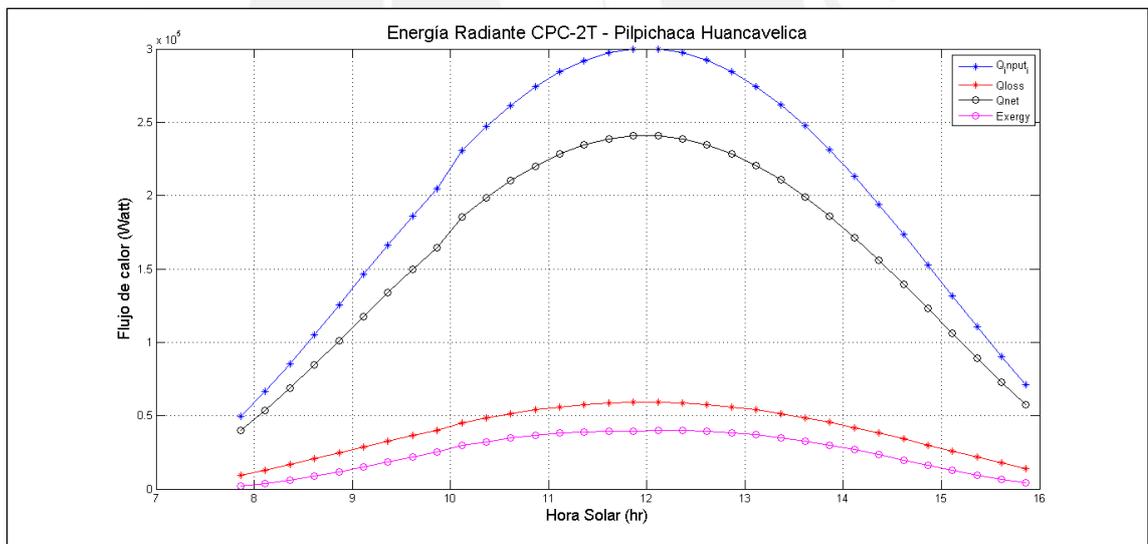
#### 5.4. Resolución de las ecuaciones de desempeño energético y exergético

Esta tarea se realizará mediante un script elaborado en Matlab para tal fin, que contiene las ecuaciones declaradas (1.56) al (1.80), en el algoritmo creado se han volcado, los datos geométricos, los materiales involucrados, las matrices climáticas y los mecanismos de transferencia de calor actuantes, por la condición del periodo de tiempo que se irá a manejar, asumido en intervalos de tiempo de 15 minutos, nuestro estudio planteado en estado estacionario, adquirirá un carácter casi de estado transitorio, lo cual será de mucha ayuda para ver la evolución de la respuesta térmica del sistema en el transcurrir del tiempo.

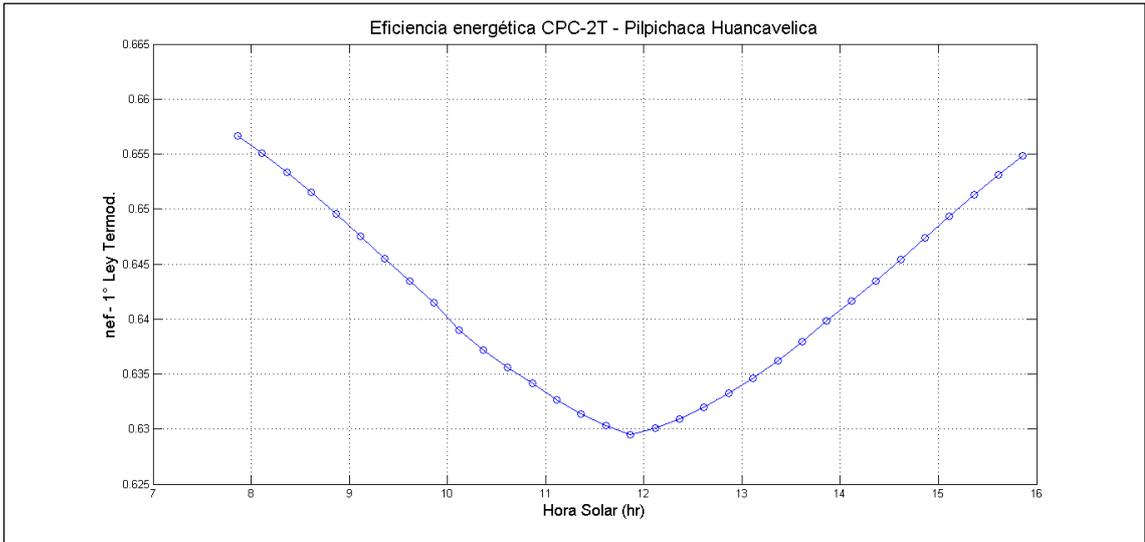
Tras realizar la ejecución del código Matlab de Balance Térmico para los meses de Marzo y Junio, que como se aclaró anteriormente son los meses con mayor y menor aprovechamiento en el año, se han obtenido los siguientes resultados que se presentan para mejor entendimiento de manera gráfica en las Figuras del 5.2 al 5.9. Al final de ellas se incluirán los cuadros resumen con los resultados de los parámetros de mayor interés operativo energético, para los 4 meses estacionales del año, para luego emitir opinión sobre los valores obtenidos.



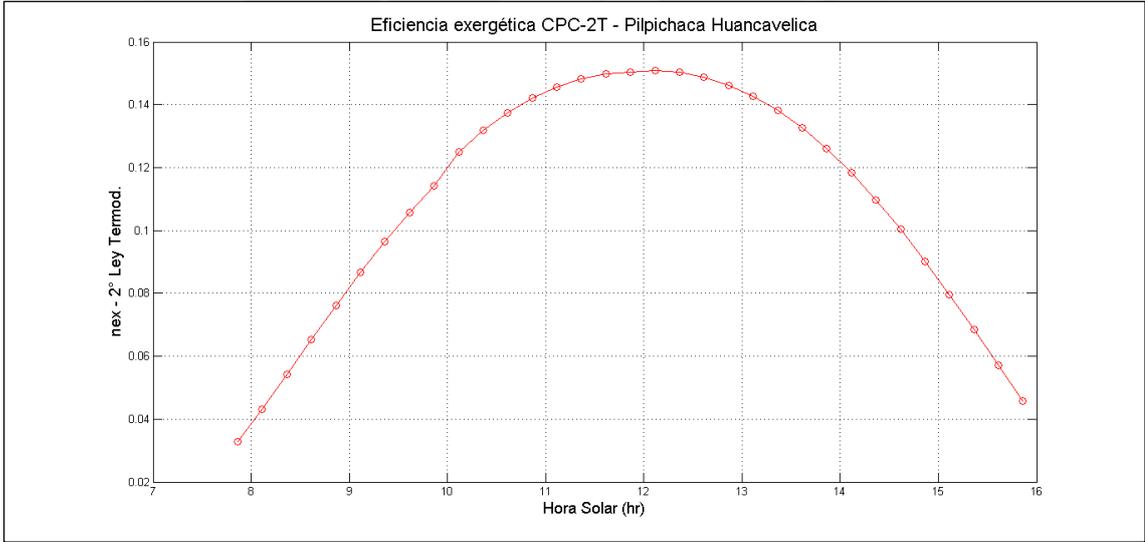
**Figura 5.2 – Evolución horaria de temperaturas alcanzadas - Marzo 21**  
(Fuente: Elaboración propia).



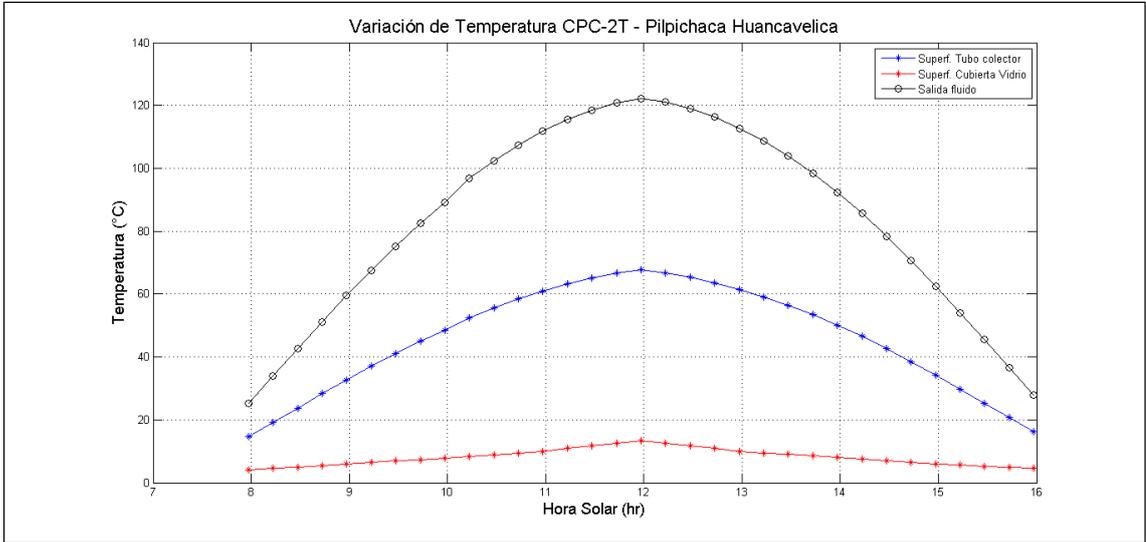
**Figura 5.3 – Evolución horaria de flujo de calor alcanzado - Marzo 21**  
(Fuente: Elaboración propia).



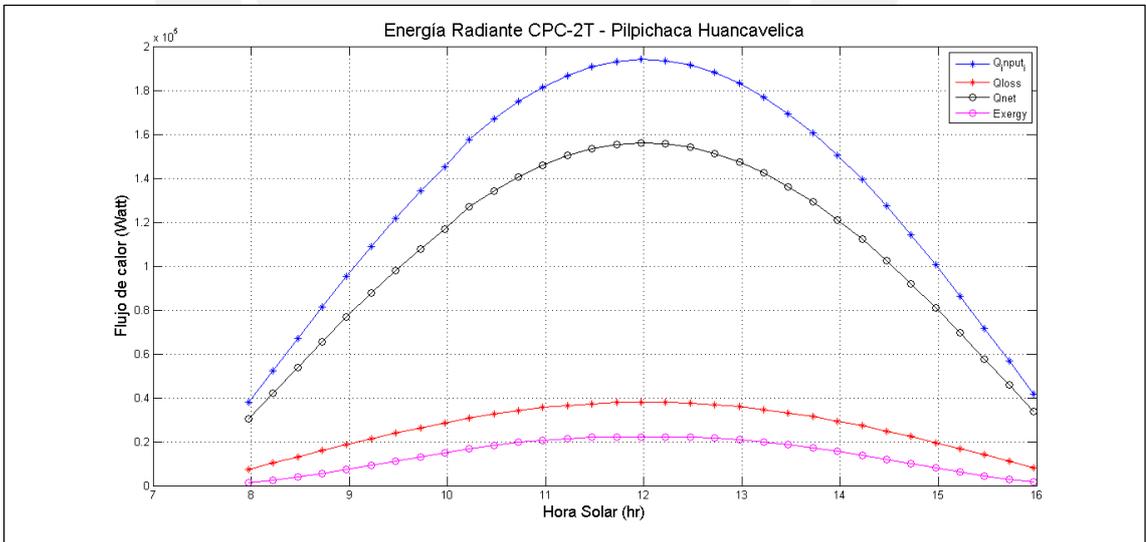
**Figura 5.4 – Evolución horaria de la eficiencia térmica alcanzada - Marzo 21 (Fuente: Elaboración propia).**



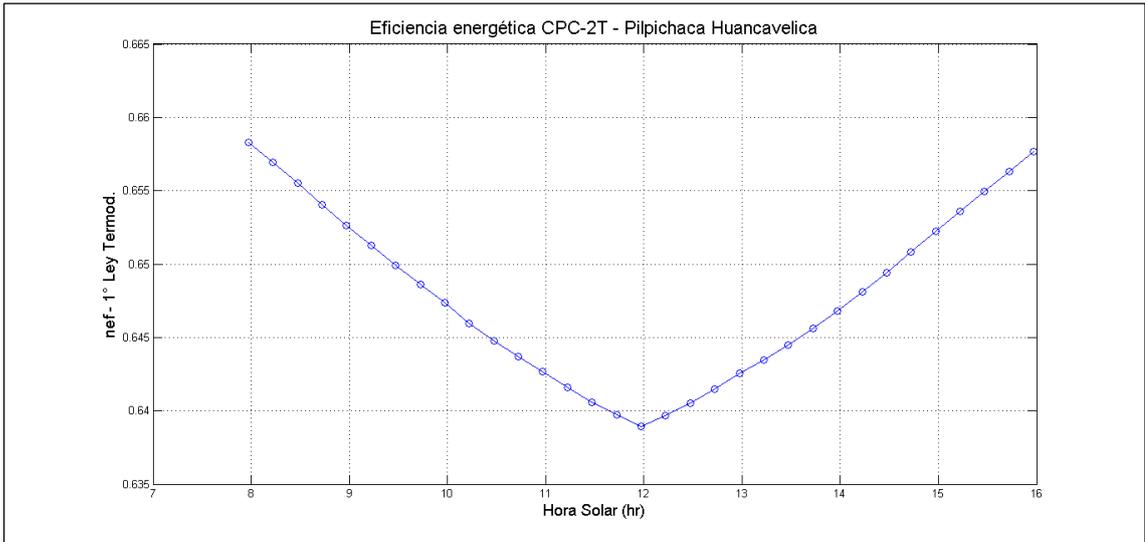
**Figura 5.5 – Evolución horaria de la eficiencia exergetica alcanzada - Marzo 21 (Fuente: Elaboración propia).**



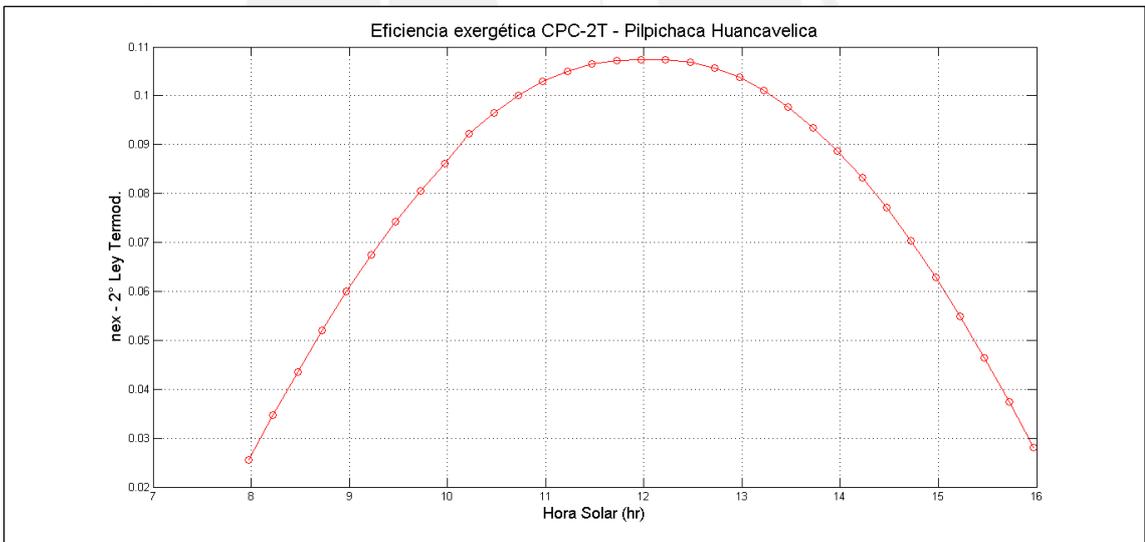
**Figura 5.6 – Evolución horaria de la temperatura alcanzada - Junio 21**  
(Fuente: Elaboración propia).



**Figura 5.7 – Evolución horaria del flujo de calor alcanzado - Junio 21**  
(Fuente: Elaboración propia).



**Figura 5.8 – Evolución horaria de la eficiencia térmica alcanzada - Junio 21**  
**(Fuente: Elaboración propia).**



**Figura 5.9 – Evolución horaria de la eficiencia exergética alcanzada - Junio 21**  
**(Fuente: Elaboración propia).**

**Cuadro 5.3 – Resumen de desempeño térmico de LFC con CPC Doble Absorbedor  
Hora de Control: 12 m (Fuente: Elaboración propia).**

Meses	Longitud efectiva (m)	Flujo másico (kg/s)	$Q_{\text{incidente}}$ (W)	$Q_{\text{absorbido}}$ (W)	$T_{\text{ingreso}}$ (°C)	$T_{\text{salida}}$ (°C)	Increment. Temp. (°C)	nef	nex
Marzo	50.00	0.31	299955.00	188810.00	13.20	181.35	168.15	0.63	0.15
Junio	50.00	0.31	194030.00	123970.00	13.40	122.17	108.77	0.64	0.11
Septiembre	50.00	0.31	271540.00	171394.00	14.30	166.52	152.22	0.63	0.14
Diciembre	50.00	0.31	262400.00	165936.00	13.90	161.00	147.10	0.63	0.13

**Cuadro 5.4 – Resumen de desempeño térmico de LFC con CPC estándar Hora de Control: 12 m (Fuente: Elaboración propia).**

Meses	Longitud efectiva (m)	Flujo másico (kg/s)	$Q_{\text{incidente}}$ (W)	$Q_{\text{absorbido}}$ (W)	$T_{\text{ingreso}}$ (°C)	$T_{\text{salida}}$ (°C)	Increment. Temp. (°C)	nef	nex
Marzo	50.00	0.31	283900.00	170830.00	13.20	172.35	159.15	0.60	0.23
Junio	50.00	0.31	179610.00	112000.00	13.40	114.09	100.69	0.62	0.17
Septiembre	50.00	0.31	261260.00	158240.00	14.30	160.76	146.46	0.61	0.22
Diciembre	50.00	0.31	248910.00	151530.00	13.90	153.44	139.54	0.61	0.21

De acuerdo al Cuadro 5.3 podemos notar que en los meses de Marzo y Septiembre se logran los mejores resultados térmicos, esto esencialmente a causa de las condiciones climáticas reinantes que marcan la diferencia en ambos meses; las eficiencias alcanzadas sufren variaciones relativas por cada trimestre y si pensamos como promedio anual, estas quedarían en 0.63 en eficiencia térmica y 0.13 en eficiencia exergética, sobre este último valor lo que se puede entender es que existen bajos niveles de tendencia a conservación de la reversibilidad del proceso y siendo así, esto resulta limitativo para pensar en la conversión a otras formas de energía como la electricidad por ejemplo. En el caso del mes de Junio a pesar que se llega a alcanzar los 100°C con poco margen hasta antes de las 12:00 horas, podemos indicar que el incremento de la temperatura marca un buen precedente, si se piensa en aprovechar más la energía disponible con una segunda o tercera pasada del fluido en las Tuberías de Absorción, para ganar calor en horas más tempranas o en su defecto realizar un precalentamiento al inicio de las operaciones si las condiciones de temperatura ambiente son muy bajas. Por otro lado comentar que la energía ganada por el fluido depende del caudal volumétrico con el que se puede trabajar,

a mayor caudal menor transferencia, en este estudio estamos usando un caudal menor aplicable a actividades que no demandan un gran volumen de agua caliente o vapor como producto final.

En términos del proceso mismo de captación energética del Sistema LFC, para cualquier forma de uso final del recurso, debe de plantearse una secuencia de operaciones que siendo flexible, pueda dar la facilidad de escoger la calidad de producto final logrado, con esto se quiere decir sacar el máximo provecho del equipo, teniendo en claro que el recurso disponible puede variar rápidamente con el tiempo, debido a las condiciones meteorológicas que puedan presentarse.



## CAPITULO 6

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Habiendo realizado los análisis del performance óptico y térmico para cuantificar las capacidades técnicas del nuevo CPC con Doble Absorbedor de un LFC, se abordarán ahora algunos puntos resaltantes no comentados todavía sobre los resultados obtenidos.

En primer lugar, sobre los aspectos geométricos y ópticos, hemos verificado a través de las simulaciones, que la eficiencia en el nuevo diseño crece en promedio en un 5%, este incremento en realidad resulta ligero, si pensamos en el solo hecho de que 2 Tuberías de Absorción debieran captar el doble de una sola, lo que no resulta cierto porque se depende de una fuente única que es el Campo de Espejos, que es quien determina la energía en concentración que llega al CPC sea de cualquier tipo, por lo tanto el incremento logrado cobra validez, porque no resulta fácil llegar a obtener mejoras con elementos de tratamiento numérico complejo. Por otro lado el valor que hace propicio el uso del nuevo diseño del CPC es la distribución equilibrada de la energía captada por los concentradores primarios sobre las 2 Tuberías de Absorción, lo que debería tener repercusión esencialmente en proteger del deterioro temprano a los materiales por sobrecalentamiento de los tubos receptores. Pero la ventaja más importante de este diseño, radica en que el sistema puede operar con opción a recirculación de manera continua, hasta alcanzar la temperatura deseada, lo que resulta ventajoso y oportuno por la temporalidad del recurso. Sobre este particular cabe preguntarse porque invertir en el doble de materiales en tuberías de absorción de una instalación estándar, la respuesta a esta interrogante radica en la gran funcionalidad de la instalación, porque proporciona la alternativa de no construir otro Campo de Espejos, lo que trae a cola a no necesitar más terreno para nuevas instalaciones.

Como se hizo mención anteriormente el mejoramiento de un CPC debe realizarse a la par de las instalaciones de captación primaria, adoptando por ello un criterio de amplio panorama, que no se restrinja únicamente a componentes, sino a bloques sincronizados. Asimismo se debe por ejemplo prestar atención a detalles que parecen tener irrelevancia, como los cambios de dirección continuados de los rayos solares reflejados, los cuales a pesar de poder llegar a su “blanco objetivo”, pierden energía y van disminuyendo la eficiencia óptica del sistema, por tal razón en el dimensionamiento de las instalaciones se debe procurar evitar configuraciones demasiadas anchas del Campo de Espejos respecto a la altura de ubicación del CPC, trae menos complicaciones posteriores, aumentar la

longitud de Campo de Espejos para ganar área de captación solar si se dispone de espacio libre o en su defecto crecer en altura para disminuir el Factor de pérdida final por angulación (ELF).

El Angulo de Incidencia Modificado (IAM) que se encuentra directamente vinculado al rendimiento óptico del Campo Especular, es el factor de entrada para la eficiencia óptica del CPC, por lo que se debe asegurar que este llegue con el valor más alto posible, para conseguir que las pérdidas ópticas disminuyan y llegar con buen flujo a las tuberías receptoras, la orientación de seguimiento solar y el horario escogido de inicio para precalentamiento puede jugar un papel importante para ello.

Sobre las eficiencias ópticas logradas, están han resultado en grado medio alto, como se esperaba para el LFC, en el orden del 69%, denotando con ello el buen dimensionamiento geométrico del CPC y los demás componentes, también sobre el mismo particular se ha puesto en evidencia a partir del análisis de espectros de incidencia, la existencia de pérdidas longitudinales por el corrimiento de la energía irradiada a lo largo de las tuberías receptoras según los meses del año, para compensar estos impases se adoptó la previsión del aumento de la longitud de la Tubería de Absorción a 70 m.

En segundo lugar sobre los detalles de aprovechamiento térmico, se ha verificado vía simulaciones, el desempeño adecuado del Sistema LFC con CPC Doble Absorbedor consiguiendo una eficiencia térmica aproximada del 63%, luego de todos los pasos exigidos por la transferencia de calor e intercambio termodinámico en los meses que marcan hitos en el año. Con vista a saber del uso posterior del recurso solar ya captado, surge el comentario aclaratorio de que las formas energéticas de calor, deben de seguir preferentemente como formas de calor para procesos, donde su uso es más eficiente y además existen múltiples aplicaciones, el hecho de convertirlas a otras formas de energía como la electricidad degrada la exergía y demanda un gran volumen energético de captación y por ende resulta caro.

Como cierre de este capítulo hallaremos 2 indicadores finales importantes, para el Sistema LFC completo, que son la Concentración Total y el Rendimiento Global del Sistema.

**a) Factor de Concentración Total ( $C_T$ )**

$$C_T = C_{prim} \times C_{sec}$$

$$C_{prim} = \frac{A_{camp.espejos}}{A_{cav.CPC}} = \frac{600 \text{ m}^2}{52.05 \text{ m}^2} = 11.52X$$

$$C_{sec} = 1.6X$$

$$C_T = 11.52 \times 1.6 = 18.44X$$

**b) Rendimiento Global ( $R_T$ )**

$$R_T = R_{opt} \times R_{term}$$

$$R_T = 0.69 \times 0.63 = 0.44$$

Por tanto la Concentración Total alcanzada es de 18.44X y el Rendimiento Global es 44%.

**Cuadro 6.1 – Resumen de dimensiones finales del CPC Doble Absorbedor**  
(Fuente: Elaboración propia).

ÍTEM	VARIABLES	DIMENSIONES
1	Diámetro nominal de las Tuberías de Absorción ( $D_{ta}$ )	76 mm.
2	Angulo de aceptación ( $\theta_a$ )	39°
3	Radio generatriz ( $R_g$ )	125 mm.
4	Distancia entre Tuberías de Absorción ( $d_{ap}$ )	125 mm.
5	Distancia X respecto al foco de la parábola ( $X_{ap}$ )	62.5 mm.
6	Distancia Y respecto al foco de la parábola ( $Y_{ap}$ )	0
7	Altura de truncamiento respecto al foco ( $H_{trunc}$ )	236 mm.
8	Ancho de la Cavidad Receptora CPC ( $A_{CR}$ )	1041 mm.
9	Longitud de la Cavidad Receptora CPC ( $L_c$ )	70 m.
10	Altura de ubicación del CPC respecto al Campo Especular ( $H_{CPC}$ )	14 m.
11	Curvas del perfil CPC	Involuta, parábola y línea c/pendiente
12	Eficiencia óptica	0.69
13	Eficiencia térmica	0.63
14	Rendimiento Global	0.44

## CONCLUSIONES

- I. Enfocados en demostrar la hipótesis propuesta, se llegaron a cumplir todos los objetivos específicos comprometidos para el presente trabajo de investigación:  
En primer lugar, se llegó a cuantificar el recurso solar existente basado en registros experimentales y en modelos matemáticos, determinando la Radiación Directa (DNI) y las categorías de la Radiación Difusa (DIF) existentes en la localidad escogida como Caso de Estudio, en un periodo horario.  
En segundo lugar, se llegó a dimensionar el Campo Especular y la altura de ubicación del CPC, basado en la disposición geométrica más adecuada de componentes, verificados por criterios de análisis de interferencias y pérdidas energéticas por reflexión y refracción lumínica, apoyándose para esta tarea en técnicas de métodos numéricos y análisis estadístico como el Método Montecarlo.  
En tercer lugar se cumplió con hallar la configuración del CPC, que da las mejores prestaciones ópticas de reemplazo del modelo estándar, el cual resulta un equivalente a contar con 2 concentradores individuales en un solo diseño integrado, con facilidad además de estar preparado para realizar recirculación continua.  
En cuarto lugar se llegó a caracterizar la matriz climática de la localidad geográfica de evaluación, por hora, día representativo y mes del año, el cual nos sirvió como base de datos dinámica para combinarse mediante las ecuaciones de balance energético, con los datos de las propiedades térmicas y ópticas de los materiales empleados, y así obtener los resultados numéricos para su posterior análisis.  
En quinto lugar, se llegó a realizar el balance energético en periodo horario, basado en las leyes de la termodinámica y la transferencia de calor, luego de la resolución de las ecuaciones representativas declaradas, se lograron determinar los valores de los parámetros que nos interesaba conocer para el modelo del CPC Doble Absorbedor y el modelo de CPC estándar, tales como: la energía ganada por el Sistema, las pérdidas de energía en los alrededores del área de recepción, las temperaturas finales en el Fluido Trabajo, en la Tubería de Absorción, en la Cubierta de Vidrio y los rendimientos energéticos y exergéticos.
- II. Tras haber realizado las comprobaciones de las capacidades logradas por el modelo propuesto de Concentrador Parabólico Compuesto (CPC) de Doble Absorbedor para un Colector Lineal Fresnel (LFC), en el escenario geográfico de Pilpichaca en el departamento de Huancavelica, es posible afirmar que desde el

punto de vista óptico y térmico, representa una buena alternativa para reemplazar al CPC estándar, al demostrar que supera a éste en un 5% en rendimiento óptico y en un 3% en el rendimiento térmico, y además logra un mejor balance en la distribución del flujo incidente con un indicador de 0.64 respecto al estándar de 0.66. Desde el punto de vista operativo el factor más relevante y que marca la diferencia respecto al modelo estándar, es la funcionalidad para hacer el máximo aprovechamiento del espacio físico de instalación (terreno), que combina las ventajas de un receptor de Cavidad Trapezoidal (TDR), por su disposición de montaje preparado para la recirculación continua.



## RECOMENDACIONES

- I. La tecnología LFC no es posible aplicarse de manera estandarizada a todas las locaciones geográficas por igual, porque es un “traje a medida” que debe diseñarse tomando en cuenta, la geometría personalizada del equipo mismo y su posicionamiento en el entorno geográfico, en este último rubro juega un factor determinante la orientación que se ha de elegir respecto a la trayectoria solar, en el caso particular del estudio realizado, la orientación cardinal conveniente para seguimiento solar se dio de Este-Oeste, según estudio de la estereografía solar y posterior comprobación por Ray-tracing para verificar la eficiencia óptica. En otras zonas geográficas inclusive dentro de nuestro propio país como por ejemplo la costa esta orientación no podría funcionar bien y se lograría mejores resultados con orientación de seguimiento Norte-Sur. Como comentario final sobre el tema, para la localidad de nuestro Caso de Estudio, por inspección se evaluaron también orientaciones intermedias en la búsqueda de mejoras en la captura de radiación solar, revisando angulaciones de 30°, 45° y 60° respecto al Norte, y los resultados no fueron positivos, por la lógica citada anteriormente.
- II. El desarrollo de ingeniería de detalle, para una propuesta técnica asociada con el CPC Doble Absorbedor, va a requerir análisis más exhaustivos en el campo de otras especialidades diferentes al campo energético mismo, como por ejemplo tendrán que ver con la mecánica de fluidos para el planteamiento los equipos de bombeo necesarios para el sistema, con los dispositivos electrónicos de instrumentación y control, con la optimización de los procesos para obtener el producto final determinado, entre otros rubros importantes afines.
- III. Como parte de un trabajo futuro a desarrollar queda en tapete, la evaluación económica de esta propuesta como un proyecto de inversión, que ponga mayor evidencia de que su implementación real también es factible desde la perspectiva económica.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Acuña, F., & Jose, C. (2016). Diseño de una planta de poligeneración solar con colectores lineales fresnel para generación de electricidad, frío y calor para procesos industriales y agua desalinizada. *Tesis*. Santiago, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [2] Ahmed, M., & Amin, A. (2016). Thermal Analysis of Performance or Lineal Fresnel Solar Concentrator. *Journal of Clean Energy Technologies*, (págs. 316-320). El Cairo.
- [3] Barale, G., Heimsath, A., Nitz, P., & Toro, A. (2010). Optical Design of a Linear Fresnel Collector for Sicily. *16th International Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems*. Perpignan, Francia.
- [4] Canavarro, D., Chaves, J., & Collares-Pereira, M. (2014). Simultaneous Multiple Surface method for Linear Fresnel concentrators with tubular receiver. *Solar Energy*, 105-116.
- [5] Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa - Un enfoque práctico*. New York: McGraw-Hill.
- [6] Cengel, Y., & Boles, M.A. (2012). *Termodinámica* (7 ed.). New York: McGraw-Hill.
- [7] Cengel, Y., & Cimbala, J.M. (2014). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. New York: McGraw-Hill.
- [8] Duffie, J., & Beckman, W.A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4 ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [9] Feldhoff, J. (2012). Linear Fresnel Collectors -A Technology Overview. *DLR SFERA Summer School*, 1-59.
- [10] Gea, M., Saravia, L., Altamirano, M., Placco, C., Bárcena, H., & Hongn, M. (2010). ASPECTOS ÓPTICO GEOMÉTRICOS DE UN CONCENTRADOR SOLAR FRESNEL LINEAL PARA APLICACIONES TÉRMICAS. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 03.215-03.222.
- [11] Gordon, J. M., & Ries, H. (1993). Tailored edge-ray concentrators as ideal second stages for Fresnel reflectors. *Applied optics*, 2243-2251.
- [12] Group, W. B. (2016). *Global Solar Atlas*. Obtenido de <http://globalsolaratlas.info/>
- [13] Häberle, A., Berger, M., Luginsland, F., & Zahler, C. (2006). Linear concentrating Fresnel collector for process heat applications. *13th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies*, (págs. 20-23). Sevilla, España.

- [14] Jradi, M., & Riffat, S. (2012). Medium temperature concentrators for solar thermal applications. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 9(3), 214-224.
- [15] Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 231-295.
- [16] Moghimi, M. A., Craig, K. J., & Meyer, J. P. (2015). A novel computational approach to combine the optical and thermal modelling of Linear Fresnel Collectors using the finite volume method. *Solar Energy*, 407-427.
- [17] Montes, M. J., Rubbia, C., Abbas, R., & Martínez-Val, J. M. (2014). A comparative analysis of configurations of linear Fresnel collectors for concentrating solar power. *Energy*, 192-203.
- [18] Muñoz, J., Martínez-Val, J. M., & Ramos, A. (2011). Thermal regimes in solar-thermal linear collectors. *Solar Energy*, 857-870.
- [19] Nixon, J., & Davies, P.A. (2010). Cost-exergy optimisation of linear Fresnel reflectors. *Solar Energy*, 147-156.
- [20] Singh, P., Ganesan, S., & Yadav, G.C. (1999). Performance Study of a Linear Fresnel Concentrating Solar Device. *Renewable Energy Focus*, 409-416.
- [21] Tapia, S., & Del Rio, J.A. (2009). Concentrador Parabólico Compuesto: Una descripción opto-geométrica. *Revista Mexicana de Física*, 141-153.
- [22] Tarquini, P., & Grena, R. (2011). Solar Linear Fresnel Collector Using Molten Nitrates as Heat Transfer Fluid. *Energy*, 1048-1056.
- [23] Tiba, C., & Fraidenraich, N. (2011). Optical and thermal optimization of stationary non-evacuated CPC solar concentrator with fully illuminated wedge receivers. *Renewable energy*, 2547-2553.
- [24] Yu, Q., Ming-Jia, L., & Zhan-Bin, L. (2017). Aiming strategy optimization for uniform solar flux distribution in the receiver of a linear Fresnel reflector using genetic algorithm. *Hal archives-ouvertes*.