



CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES
AVANZADOS, S.C.
POSGRADO

Diseño de un concentrador solar compacto de
foco fijo de alta eficiencia para aplicaciones de
alta temperatura

Tesis que como Requisito para obtener el Grado de
Maestro en Ciencia y Tecnología Ambiental presenta:

Juan Pablo González López

Director de Tesis: Dr. Ricardo Beltrán Chacón
Co-Director de Tesis: Dr. Alberto Díaz Díaz

Chihuahua, Chih., Agosto de 2018

Dedicatoria

A ustedes, padre y madre. Gracias a ustedes me he convertido en el hombre que soy. A ustedes no solo dedico este trabajo, si no cada una de mis actividades que realizo. A ustedes quiero agradecerles buscando crear el orgullo de ustedes hacia mí. A ustedes por inculcarme la educación, apoyo y comprensión necesarios durante el transcurso de mi vida. A ustedes dos les regalo mis triunfos, trabajos y logros. Gracias por absolutamente todo.

A ti madre, por regalarme incondicionalmente tu amor y protección. Agradezco las incontables horas de cuidado y amor, ya que gracias a ti he podido seguir adelante en incontables ocasiones.

A ti padre, figura de perseverancia y sabiduría. A ti te debo mi necesidad de sobresalir y competir. Gracias a ti por darme la fortaleza de una figura paterna que todo ser humano necesita.

Agradezco a la vida por darme a mis padres, dos seres humanos maravillosos, los cuales siempre estarán en mi mente y corazón. A ti vida por las experiencias y personas que has cruzado en mi camino, ya que cada una de ellas han sido infinitamente valiosas e inigualables.

Agradecimientos

A los Doctores Ricardo Beltrán y Alberto Díaz, por su apoyo, disponibilidad y enseñanza durante la realización de este trabajo.

A mi buen amigo, Rubén Castañeda, por su apoyo incondicional y guía a través de mi formación como Maestro en Ciencias.

A mi compañero, Axel Domínguez, por su disponibilidad y su tiempo de enseñanza hacia mí.

A mis compañeros, Yarely Rodríguez, Elizabeth Olivas y Víctor Medina, por el apoyo durante mi estancia en este centro de investigación y, sobretodo, por su valiosa amistad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para el desarrollo de este proyecto de maestría en ciencias.

Al Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), por el apoyo otorgado durante mi estancia en la institución.

A todos mis amigos, familiares, docentes e instituciones que contribuyeron en la realización de este proyecto.

Resumen

En este trabajo se desarrolla el diseño de un concentrador solar parabólico acoplado con un receptor térmico fijo para la cogeneración de energía eléctrica y calor de proceso de alta temperatura. Se desarrolla un concentrador solar el cual no requiere del movimiento de la unidad generadora de energía para la captación de radiación solar, generando así un diseño más ligero y compacto. En la simulación opto-geométrica del sistema se optimiza la captación de radiación solar en la unidad generadora de energía mediante simulación computacional de trazado de rayos usando el programa de modelado computacional COMSOL®. El concentrador solar parabólico utiliza un seguimiento solar tipo Scheffler, diferente al de concentradores parabólicos convencionales a través de los diversos escenarios solares. El concentrador solar Scheffler (de punto fijo) diseñado en este trabajo logra mayores concentraciones de energía solar que las reportadas con concentradores solares tipo Scheffler tradicionales, logrando así una fusión potencialmente exitosa con un motor tipo Stirling para la cogeneración de energía eléctrica y calor de proceso de alta temperatura.

Índice

Introducción	1
1.1 Antecedentes	4
1.2 Justificación	11
1.3 Hipótesis	14
1.4 Objetivos	15
Marco Teórico y Antecedentes	16
2.1 Disponibilidad Solar	17
2.2 Tipos de Radiación	19
2.3 Movimiento Solar	20
2.4 Tecnologías de concentración solar	24
2.5 Disco Scheffler	31
2.6 Almacenamiento térmico	39
2.7 Método de elemento finito	46
2.8 Optimización por método de Nelder-Mead	50
Metodología	53
3.1 Validación de simulaciones	54
3.2 Elección de la configuración del concentrador	64
3.3 Simulaciones ópticas	75
3.4 Optimización del seguimiento solar	80
Resultados	84
4.1 Validación de simulaciones	85
4.1.1 Eurodish®	85
4.1.2 WGA-500®	87
4.2 Simulación Ideal	89
4.3 Concentración y factores de intercepción (Orientación sur)	91
4.4 Concentración y factores de intercepción (Orientación norte)	122
Discusión	128
Conclusiones	137
6.1 Conclusiones	138
6.2 Recomendaciones	139

Lista de Figuras

Fig. 1. Diferentes concentraciones y temperaturas dadas por diferentes tecnologías de concentración solar (Serrano, 2017).	6
Fig. 2. a) Sistema Eurodish [®] por SBP [®] y b) Sistema Suncatcher [®] por SES [®]	7
Fig. 3. Análisis económico de tecnologías de concentración solar (SBP [®] , 2012).	8
Fig. 4. Sistemas de disco Stirling con almacenamiento térmico con material PCM. a) Sistema propuesto por Andraka et. al. (2013) y b) sistema propuesto por Infinia [®]	11
Fig. 5. Fuentes de energía disponibles diferentes a energías renovables (SBP [®] , 2012).	18
Fig. 6. Comparación de disponibilidad de energías renovables y recursos no renovables.	19
Fig. 7. Movimiento de la Tierra con respecto al sol a través de un año (Kalogirou, 2009).	21
Fig. 8. Trayectorias solares en el hemisferio norte en un año (Kalogirou, 2009)....	22
Fig. 9. Declinación de la Tierra a través de un año (Kalogirou, 2009).	23
Fig. 10. a) Ángulo cenital, inclinación, ángulo de la superficie y ángulo azimutal solar para una superficie inclinada. b) Vista del plano mostrando el ángulo azimutal solar (Duffie & Beckman, 2013).	24
Fig. 11. Sistema de disco parabólico Eurodish [®]	30
Fig. 12. Detalles del disco Scheffler (Reddy et. al., 2018).	33
Fig. 13. Planta de discos Scheffler "bi-orientados".	35
Fig. 14. Concentrador solar parabólico Scheffler.	36
Fig. 15. Receptor acoplado a un concentrador tipo Scheffler.	36
Fig. 16. a) Prototipo del colector de foco fijo de Bomin Solar [®] y b) Diagrama del concepto de foco fijo (Coventry & Andraka, 2017).	37
Fig. 17. a) Discos instalados en Sulaibyah, Kuwait y b) el receptor de aceite de punto focal fijo (Coventry & Andraka, 2017).	38
Fig. 18. Discos Thermax SolPac D160 [®] (Coventry & Andraka, 2017).	39
Fig. 19. Almacenamiento térmico de sales fundidas en la planta ANDASOL-1.....	43
Fig. 20. Sección hemisférica discretizada en muchos elementos (Liu & Quek, 2014).	48
Fig. 21. Mallado para el diseño de un modelo a escala de una aeronave para pruebas dinámicas en laboratorio (Liu & Quek, 2014).	48
Fig. 22. Aproximación por elementos finitos para un caso de una dimensión. Una función continua es aproximada usando funciones lineales por partes en cada subdominio/elemento (Liu & Quek, 2014).	49
Fig. 23. Sistema Eurodish [®]	58
Fig. 24. Vista lateral del sistema Eurodish [®]	58

Fig. 25. Modelo CAD utilizado para calibración de escenarios de simulación en COMSOL®	59
Fig. 26. Sistema WGA-500®	61
Fig. 27. Vista lateral del sistema WGA-500®	61
Fig. 28. Ilustración comparativa del WGA-500® entre sistema real y construido....	62
Fig. 29. Factor de intercepción para el concentrador WGA-500®	63
Fig. 30. Figura comparativa de digitalización del diagrama de factor de intercepción del WGA-500®	64
Fig. 31. Esquema del CSFF (Ruelas et. al., 2011).	65
Fig. 32. Forma y componentes del STSC (Ruelas et. al., 2016).	66
Fig. 33. Esquema de diseño para la determinación de factores de concentración mínimo y máximo (Reddy et. al., 2018).	68
Fig. 34. Diferentes distancias focales para diferentes ángulos de borde.....	68
Fig. 35. Paraboloide de 1 m de distancia focal.....	69
Fig. 36. Cortes a diferentes ángulos al paraboloide.	70
Fig. 37. Área de apertura en función del ángulo de corte.....	71
Fig. 38. Gráfica de máxima potencia en el plano focal contra ángulo de corte de parábola de diseño.....	72
Fig. 39. Sistema concentrador Scheffler.....	74
Fig. 40. Vista superior del sistema.....	74
Fig. 41. Vista lateral del sistema.	75
Fig. 42. Dominio solar durante el año 2017.	77
Fig. 43. Rotación "Solar" del concentrador Scheffler.....	78
Fig. 44. Rotación azimutal del concentrador Scheffler.....	79
Fig. 45. Rotación de altura del concentrador Scheffler.	79
Fig. 46. Comportamiento del plano focal en el WGA-500®	81
Fig. 47. Forma de función "ponderación"	82
Fig. 48. Forma de la función "ponderación" modificada.....	83
Fig. 49. Trazado de rayos de simulación del Eurodish®	85
Fig. 50. Flux de irradiancia solar sobre el plano focal del Eurodish®	86
Fig. 51. Simulación del factor de intercepción contra diámetro de apertura del WGA-500®	88
Fig. 52. Plano focal de simulación ideal con punto infinitesimal de intercepción....	90
Fig. 53. Gráfica 3D de plano focal de simulación ideal.	90
Fig. 54. Mapa de colores de densidad de potencia en el plano focal del receptor en el solsticio de verano a las 7 a.m.	92
Fig. 55. Densidad de potencia 3D en el plano focal en el solsticio de verano a las 7 a.m.	92
Fig. 56. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el solsticio de verano a las 7 a.m.....	93

Fig. 57. Mapa de colores de densidad de potencia en el plano focal del receptor en el solsticio de verano a las 11 a.m.....	94
Fig. 58. Densidad de potencia 3D en el plano focal del receptor en el solsticio de verano a las 11 a.m.....	94
Fig. 59. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el solsticio de verano a las 11 a.m.....	95
Fig. 60. Mapa de colores de densidad de potencia en el plano focal del receptor en el solsticio de verano a las 13 p.m.....	96
Fig. 61. Densidad de potencia 3D en el plano focal del receptor en el solsticio de verano a las 13 p.m.....	96
Fig. 62. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el solsticio de verano a las 13 p.m.....	97
Fig. 63. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el solsticio de verano a las 19 p.m.....	98
Fig. 64. Mapa de colores de densidad de potencia y mancha solar producida a las 7 a.m. del solsticio de verano con 2mrad de error de pendiente.....	99
Fig. 65. Mapa de colores de densidad de potencia y mancha solar producida a las 11 a.m. del solsticio de verano con 2mrad de error de pendiente.....	100
Fig. 66. Mapa de colores de densidad de potencia y mancha imagen solar producida a las 13 p.m. del solsticio de verano con 2mrad de error de pendiente.	100
Fig. 67. Desempeño del concentrador Scheffler en el plano focal (sin error) en el solsticio de verano sin error de pendiente.....	101
Fig. 68. Mapa de colores de densidad de potencia en el plano focal del receptor en el equinoccio de primavera a las 7 a.m.....	102
Fig. 69. Densidad de potencia 3D en el plano focal del receptor en el equinoccio de primavera a las 7 a.m.	102
Fig. 70. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el equinoccio de primavera a las 7 a.m.	103
Fig. 71. Mapa de colores de densidad de potencia en el plano focal del receptor en el equinoccio de primavera a las 10 a.m.	104
Fig. 72. Densidad de potencia 3D en el plano focal del receptor en el equinoccio de primavera a las 10 a.m.....	104
Fig. 73. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el equinoccio de primavera a las 10 a.m.	105
Fig. 74. Mapa de colores de densidad de potencia en el plano focal del receptor en el equinoccio de primavera a las 12 p.m.	106
Fig. 75. Densidad de potencia 3D en el plano focal del receptor en el equinoccio de primavera a las 12 p.m.....	106
Fig. 76. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el equinoccio de primavera a las 12 p.m.	107

Fig. 77. Mapa de colores de densidad de potencia y mancha solar producida a las 7 a.m. del equinoccio de primavera con 2mrad de error de pendiente.	108
Fig. 78. Mapa de colores de densidad de potencia y mancha solar producida a las 10 a.m. del equinoccio de primavera con 2mrad de error de pendiente.	109
Fig. 79. Mapa de colores de densidad de potencia y mancha solar producida a las 12 p.m. del equinoccio de primavera con 2mrad de error de pendiente.	109
Fig. 80. Desempeño del concentrador Scheffler en el plano focal (sin error) en el equinoccio de primavera sin error de pendiente.	110
Fig. 81. Mapa de colores de densidad de potencia en el plano focal del receptor en el solsticio de invierno a las 8 a.m.	111
Fig. 82. Densidad de potencia 3D en el plano focal del receptor en el solsticio de invierno a las 8 a.m.	111
Fig. 83. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el solsticio de invierno a las 8 a.m.	112
Fig. 84. Mapa de colores de densidad de potencia en el plano focal del receptor en el solsticio de invierno a las 10 a.m.	113
Fig. 85. Densidad de potencia 3D en el plano focal del receptor en el solsticio de invierno a las 10 a.m.	113
Fig. 86. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el solsticio de invierno a las 10 a.m.	114
Fig. 87. Mapa de colores de densidad de potencia en el plano focal del receptor en el solsticio de invierno a las 12 p.m.	115
Fig. 88. Densidad de potencia 3D en el plano focal del receptor en el solsticio de invierno a las 12 p.m.	115
Fig. 89. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el solsticio de invierno a las 12 p.m.	116
Fig. 90. Mapa de colores de densidad de potencia y mancha solar producida a las 8 a.m. del solsticio de invierno con 2mrad de error de pendiente.	117
Fig. 91. Mapa de colores de densidad de potencia y mancha solar producida a las 10 a.m. del solsticio de invierno con 2mrad de error de pendiente.	118
Fig. 92. Mapa de colores de densidad de potencia y mancha solar producida a las 12 p.m. del solsticio de invierno con 2mrad de error de pendiente.	118
Fig. 93. Desempeño del concentrador Scheffler en el plano focal (sin error) en el solsticio de invierno.	119
Fig. 94. Grafica de rendimiento del concentrador Scheffler en las simulaciones.	119
Fig. 95. Comportamiento de las rotaciones del disco Scheffler en el solsticio de verano.	121
Fig. 96. Comportamiento de las rotaciones del disco Scheffler en el equinoccio de primavera.	121
Fig. 97. Comportamiento de las rotaciones del disco Scheffler en el solsticio de invierno.	122

Fig. 98. Mapa de colores de densidad de potencia en el plano focal del receptor en el solsticio de verano a las 10, 12 y 13:10 horas, respectivamente, de izquierda a derecha.....	123
Fig. 99. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el solsticio de verano a las 10, 12 y 13:10 horas, respectivamente, de izquierda a derecha.	123
Fig. 100. Densidad de potencia 3D en el plano focal del receptor en el solsticio de verano a las 10, 12 y 13:10 horas, respectivamente, de izquierda a derecha.	123
Fig. 101. Mapa de colores de densidad de potencia en el plano focal del receptor en el solsticio de invierno a las 7, 10 y 12 horas, respectivamente, de izquierda a derecha.....	125
Fig. 102. Densidad de potencia 3D en el plano focal del receptor en el solsticio de invierno a las 7, 10 y 12 horas, respectivamente, de izquierda a derecha.	125
Fig. 103. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el solsticio de invierno a las 7, 10 y 12 horas, respectivamente, de izquierda a derecha.....	125
Fig. 104. Gráfica de rendimiento del concentrador Scheffler en las simulaciones con orientación norte.....	127
Fig. 105. Concentrador inclinado con orientación al sur en solsticio de invierno al medio día.	133
Fig. 106. Concentrador Scheffler inclinado en el medio día del solsticio de invierno.	133

Lista de Tablas

Tabla 1. Colectores solares (Kalogirou, 2009).....	27
Tabla 2. Plantas solares térmicas con sistemas de almacenamiento térmico (Kuravi et. al., 2017).....	41
Tabla 3. Características del Eurodish [®]	56
Tabla 4. Características del WGA-500 [®]	60
Tabla 5. Dimensiones de concentrador Scheffler.....	73
Tabla 6. Datos para función "ponderación" de la Fig. 50.....	82
Tabla 7. Tabla de resumen de resultados de las simulaciones del solsticio de verano del 2017.	98
Tabla 8. Tabla de resumen de resultados de las simulaciones del equinoccio de primavera del 2017.....	108
Tabla 9. Tabla de resumen de resultados de las simulaciones del solsticio de invierno del 2017.....	117
Tabla 10. Tabla de resumen de resultados de las simulaciones con orientación norte del solsticio de verano.	124
Tabla 11. Tabla de resumen de resultados de las simulaciones con orientación norte del solsticio de invierno.	126

1

Introducción

“La conservación es un estado de armonía entre el hombre y la Tierra”

Aldo Leopold – 1938

1.1 Antecedentes

1.2 Justificación

1.3 Hipótesis

1.4 Objetivos

1.4.1 General

1.4.2 Específicos

En las últimas décadas, la creciente preocupación ambiental ha llevado a la humanidad a buscar nuevas alternativas científicas y tecnológicas para combatir la

gran contaminación ambiental que se ha generado. Esto es debido a la utilización de tecnologías y técnicas no amigables con el medio ambiente, al gran crecimiento demográfico y al alza desmesurada de demanda de recursos para la vida en la Tierra. Desde las grandes revoluciones industriales, el incremento de contaminación emitido por grandes fuentes fijas, ha causado daños irreversibles en la naturaleza y en la salud de la población mundial. Las grandes revoluciones industriales comenzaron con el descubrimiento de las primeras máquinas de vapor introducidas por el Ingeniero James Watt. Estas máquinas, innovadoras para su tiempo, utilizaron como combustible el carbón extraído de las minas subterráneas. Dichas maquinas sustituyeron la mano de obra de muchas personas y fomentaron la producción en masa de productos para la sociedad. Sin embargo, ese descubrimiento llevaría a la humanidad a generar un gran desarrollo industrial décadas después mediante el desarrollo del motor de combustión interna, el cual era más eficiente ya que emitía más trabajo con menor energía introducida. Esta tecnología se desarrolló simultáneamente con el descubrimiento del petróleo y, posteriormente, evolucionó en conjunto con nuevos combustibles como la gasolina y el gas natural.

A finales del siglo XIX, también se desarrolló con fuerza la generación de energía eléctrica para el uso doméstico. Esto se logró, en principio, mediante el uso de centrales hidroeléctricas que aprovechaban la energía hidráulica generada en grandes presas.

La generación de energía eléctrica representa un problema medioambiental, ya que la creciente demanda energética mundial crea una necesidad de producir cada vez más energía mediante procesos de combustión, produciendo así más gases de efecto invernadero.

El hombre ha buscado mitigar esta demanda mediante nuevas técnicas de generación de energía eléctrica. Actualmente, las técnicas de generación de energía eléctrica más comunes son las plantas termoeléctricas, nucleares e hidroeléctricas. Debido al alto costo ambiental generado por estas técnicas, el ser humano ha optado por una opción más amigable ambientalmente como son las energías renovables.

Durante las últimas épocas, la investigación que se ha hecho en energías renovables no ha sido suficiente para sustituir totalmente las técnicas antiguas de generación de energía eléctrica. En lo que respecta al potencial de la cantidad de energía eléctrica que se puede producir, la energía solar es la que lleva ventaja con respecto a otras tecnologías de energías renovables (SBP[®], 2012). Este potencial de generación no ha sido explotado o implementado debidamente a nivel mundial por causa de la todavía inmadura tecnología, sus altos costos y la falta de confiabilidad (Promexico, 2016). Sin embargo, la tendencia de uso de esta tecnología en las últimas dos décadas ha crecido exponencialmente y se ha empezado a tomar como el camino más cuantitativamente viable para sustituir nuestras tecnologías actuales.

1.1 Antecedentes

Los concentradores solares son la alternativa que se ha desarrollado para la cogeneración de energía eléctrica y calor de proceso. Esta tecnología lleva investigándose ya desde hace unas cuantas décadas y sigue en una etapa de maduración. Sin embargo, en la carrera por la tecnología solar, los paneles fotovoltaicos han tomado ventaja sobre la energía solar térmica, a pesar de que esta tiene mayor capacidad al crear mayor cantidad de energía (Desideri & Campana, 2014). Además, posee la capacidad de proveer calor de alta temperatura.

Los concentradores solares parabólicos no han tenido tanto éxito comercial como lo son los concentradores solares en torre solar o canales parabólicos. Los colectores de disco parabólico es una tecnología relativamente joven, tanto que no se tiene información de ninguna planta en actividad (Pelay et. al., 2017), con excepción de plantas de concentradores de disco Scheffler.

A la fecha, no se obtienen las utilidades deseadas usando la tecnología de disco parabólico debido a varias dificultades (Serrano, 2017). El diseño de motores fehacientes para plantas grandes aún está en desarrollo. Además, el costo inicial de estos sistemas es grande en comparación con otras tecnologías de concentración termosolar (e.g. canales parabólicos, Fresnel y torre solar) y existen desafíos relacionados con su capacidad de almacenamiento térmico. Sin embargo, el sistema de disco parabólico en conjunto con un motor Stirling tiene la

eficiencia más alta en conversión de calor a electricidad, con una tasa neta media anual de rendimiento que es de 18-23 %, más alto que cualquier otro sistema de energía solar (Serrano, 2017). Además, los concentradores de disco Stirling son muy aplicables para sistemas de cogeneración en la industria, ya que es una tecnología de concentración solar alta y se encuentra en la gama de energía solar térmica de alta temperatura. En las plantas de disco parabólico, los reflectores concentran la luz solar en un punto focal con factores de concentración solar y temperaturas de operación más altos (Serrano, 2017). La tecnología de discos parabólicos alcanza relaciones de concentración mayores a 1000 lo cual produce temperaturas hasta de 1600 °C. En la Fig. 1 podemos observar las relaciones de concentración de diferentes tecnologías de concentración termosolar.

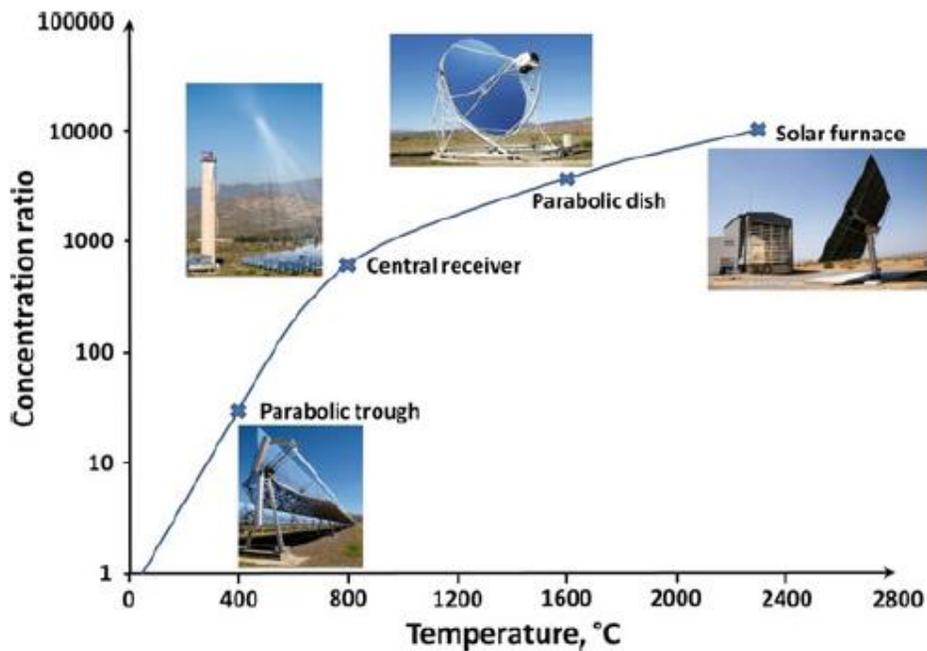


Fig. 1. Diferentes concentraciones y temperaturas dadas por diferentes tecnologías de concentración solar (Serrano, 2017).

Los concentradores solares parabólicos, reportados por Coventry y Andraka (2017), utilizan una estructura de soporte robusta debido a que requieren mover la UGE (unidad generadora de energía, i.e. motor, regenerador y receptor) buscando coleccionar la irradiancia directa emitida por el sol a través del día. En la Fig. 2a y 2b, podemos observar unas de las configuraciones comunes de concentradores de disco Stirling por Schlaich Bergermann und Partner® (SBP®) y la compañía Stirling Energy System® (SES®). En la Fig. 2a y 2b se indica encerradas en círculo rojo las UGE.



a)



b)

Fig. 2. a) Sistema Eurodish[®] por SBP[®] y b) Sistema Suncatcher[®] por SES[®].

Tanto los sistemas con armadura de anillo (e.g. Eurodish[®]) y con pedestal (e.g. Suncatcher[®]) requieren de una gran cantidad de material estructural para soportar el peso de la unidad generadora de energía, ya que este puede ser bastante considerable. Mancini et. al. reportan pesos de diferentes sistemas de disco parabólico, todos mayores a 2500 kg, con excepción de WGA Mod. 2[®]. El sistema más pesado reportado es de 8172 kg. En el caso de la unidad generadora SOLO 161[®] (utilizada por el sistema Eurodish[®]), su peso es de aproximadamente 460 kg. Asimismo, al tener sistemas más robustos y pesados, los sistemas de seguimiento conducidos por motores o servomotores deben tener una mayor capacidad para mover el sistema completo.

Las grandes dimensiones de la estructura son un aspecto importante que hay que tomar en cuenta en la decisión de los materiales que se emplearán para construir dicha estructura. Los materiales (comúnmente acero) para construir dichas estructuras deben ser durables y resistentes a la intemperie, por lo que el costo de la inversión inicial se eleva considerablemente al diseñar este tipo de estructuras.

Los concentradores parabólicos suelen utilizar una estructura grande de soporte, por lo cual esto implica un mayor costo y complejidad en el montaje de éstos.

La compañía alemana Schlaich Bergermann und Partner[®] (SBP[®]), lanzadora de proyectos de discos Stirling como el Distal-I[®], Distal-II[®] y más recientemente, el sistema Eurodish[®], cataloga al costo estructural como el costo de mayor medida en las tecnologías de concentración solar (Schlaich Bergermann und Partner[®], 2012). En la Fig. 3, SBP[®] describe un análisis económico de las tecnologías de concentración solar.

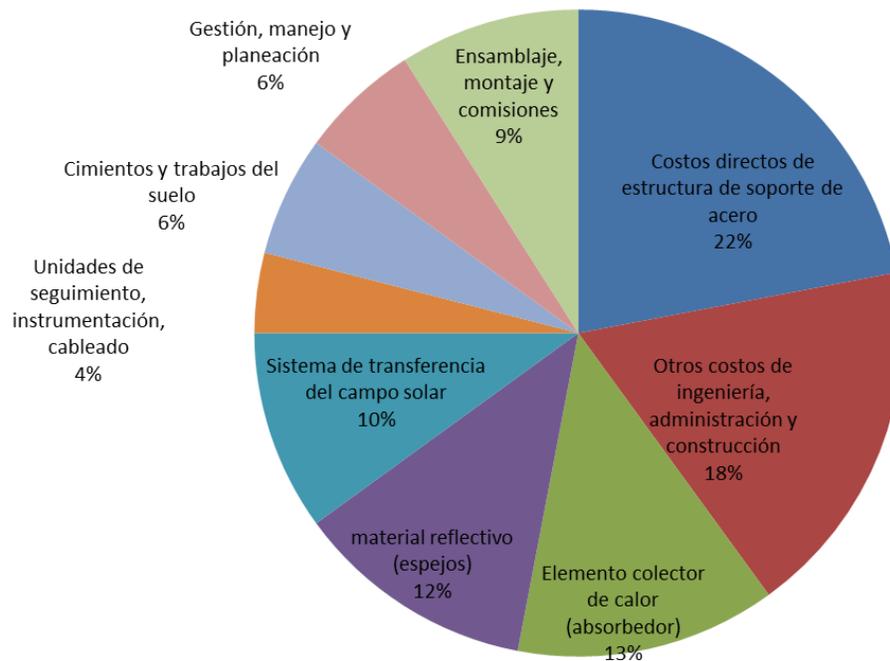


Fig. 3. Análisis económico de tecnologías de concentración solar (SBP[®], 2012).

La energía solar es un recurso de energía tiempo-dependiente (Duffie y Beckman, 2013). La demanda de energía que la población exige es constante, y esto es algo que no siempre se podrá abastecer mediante la energía solar. Esto último, debido a las irregularidades que puede llegar a tener por las condiciones climáticas. Consecuentemente, el almacenamiento de energía u otro producto de un proceso solar es necesario si la energía solar plantea proveer estas porciones de necesidades de energía (Duffie y Beckman, 2013). El diseño de un sistema de almacenamiento térmico puede variar dependiendo de muchas condiciones, tales como las cargas de energía demandadas, las temperaturas que se manejan, el tipo de técnica que se busque, el uso que se le va a dar, entre otros.

La función del almacenamiento térmico es maximizar las utilidades generadas por un sistema de energía solar y, con esto, buscar amortiguar los costos de operación y de inversión inicial de los sistemas. El parámetro que mide esta relación entre costos y energía producida durante todo su ciclo de vida es el costo nivelado de energía (levelized cost of energy; por sus siglas en inglés, LCOE). Este parámetro es un factor económico para medir el desempeño que tendrá una planta o un sistema de energía solar. El parámetro da una idea al inversionista de qué tanto le cuesta producir una unidad energética. De esta manera, este parámetro se convierte en una forma rápida de estimar qué tan barata es la energía que el sistema produce. Por lo tanto, la función principal del almacenamiento térmico es buscar disminuir a lo máximo el LCOE en los sistemas

de energía solar. Aparte de esto, con dicho almacenamiento se busca producir energía de una manera constante y regular.

La tecnología de disco Stirling no ha encontrado una fusión exitosa con la tecnología de almacenamiento térmico debido a la configuración propia de los discos Stirling y el comportamiento de su seguimiento solar. Ha sido difícil para los ingenieros e investigadores acoplar estas dos tecnologías por causa del constante movimiento que debe tener la unidad generadora de energía. Por lo tanto, el costo nivelado de energía relacionado a sistemas de disco Stirling no ha podido ser reducido al máximo como con otras tecnologías de concentración solar tales las torres solares y los canales parabólicos. Anteriormente, se han hecho investigaciones buscando vincular ambas tecnologías. Andraka (2013) e Infinia[®] (White et. al., 2013) propusieron un sistema de almacenamiento térmico incorporado a un sistema de disco Stirling. Sin embargo, dicho diseño crea un costo estructural superior y un mayor peso en la estructura total del sistema. En la Fig. 4 se muestra el sistema propuesto por Andraka (2013) e Infinia[®] (White et. al., 2013) con almacenamiento térmico con material de cambio de fase (PCM).

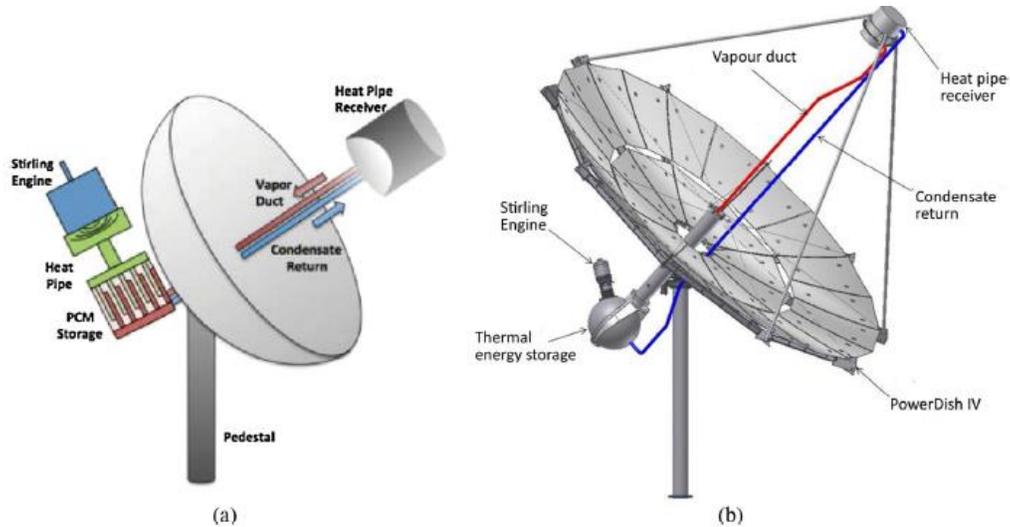


Fig. 4. Sistemas de disco Stirling con almacenamiento térmico con material PCM. a) Sistema propuesto por Andraka et. al. (2013) y b) sistema propuesto por Infinia®.

1.2 Justificación

Las tecnologías de concentración en disco con motor Stirling son capaces de alcanzar la mayor eficiencia de conversión de energía solar a eléctrica o química de todos los tipos de sistemas de concentración solar (IRENA, 2012 y Coventry & Andraka, 2017). Sin embargo, la investigación a nivel mundial tiene todavía un trabajo por hacer en cuestión de reducción de costos y maximización y regularización de producción energética.

Sin duda alguna, la estructura de soporte es el costo de mayor ponderación en lo que respecta al costo nivelado de energía. Las propuestas para concentración solar suelen ser elevadas en su inversión inicial conforme aumenta la concentración geométrica (Truscillo, 1979). Al reducir considerablemente la

estructura de un concentrador solar de tipo parabólico, se reduce, naturalmente, el costo de la inversión inicial. Asimismo, al bajar la estructura de un sistema de concentración de disco parabólico, se reduce también el costo de operación, ya que los motores o servomotores de seguimiento no requieren de una gran cantidad de energía para poder operar a lo largo del día.

En el caso de los discos parabólicos circulares, la estructura del sistema debe soportar el peso de la UGE. La UGE es el principal motivo por el cual la estructura debe ser más robusta, ya que es el componente de mayor peso dentro del sistema. Además de eso, la UGE suele generar vibraciones al operar el motor, por lo que los materiales usados para la estructura deben soportar la resonancia que se pueda suscitar a causa de la misma.

El sistema Eurodish[®] es uno de los sistemas de concentración solar más ligeros que se han construido. La intención de SBP[®] fue aligerar la estructura construyendo el sistema con una armadura de anillo. Dicha estructura soporta el disco parabólico y la UGE. Sin embargo, el peso total de la estructura sigue siendo elevado. Bravo et. al. (2012) reportaron que la estructura metálica por sí sola pesa 3700 kg. También Rodríguez et. al. (2016) reportaron que el peso total del concentrador incluyendo la estructura anular y la superficie reflectiva es de aproximadamente 1650 kg. Por lo tanto, la forma que se propone de minimizar el peso del sistema total es quitando la UGE del sistema y manteniéndolo en un punto fijo.

Andraka (2008) explica la relación entre el costo y el desempeño de los reflectores usados en los concentradores de disco, y mostró que, para sistemas de disco Stirling de altas temperaturas, un buen desempeño óptico es crítico para alcanzar un bajo costo de energía (Kaushika & Reddy, 1999). Los discos Scheffler tienen la característica de tener permanentemente un punto fijo, siempre y cuando éste tenga un buen seguimiento solar. Esto lo hace un reflector muy viable para fusionarlo con una UGE para cogeneración de energía eléctrica y calor. Al quitar la UGE de la estructura del sistema, obligaría a mantenerla como un punto o foco fijo que mantuviera la irradiancia solar incidente. Esto hace a los discos Scheffler una geometría idónea para fusión con una UGE. Sin embargo, los discos Scheffler convencionales no suelen tener una tasa de concentración muy elevada y, por lo tanto, alcanzan temperaturas de hasta solo 300 °C. Las UGE reportadas por Coventry y Andraka (2017), necesitan una alta temperatura, entre 550-750 °C (Kuravi et. al., 2017) para su funcionamiento y buena eficiencia. Mancini et. al. (2003) nos indican que la UGE de Kleinmotoren[®], SOLO 161[®], eleva su temperatura a aproximadamente 650 °C, en el caso del Eurodish[®]. El receptor es un componente clave en un sistema de disco Stirling porque éste debe convertir la energía solar concentrada a calor y transferirlo al fluido de trabajo del motor en condiciones de alto flujo de 75 a 100 W/cm² y temperaturas de 700-800 °C (Mancini et. al., 2003). Se requiere entonces estudiar la unión de un disco Scheffler con una UGE para evaluar si el ensamble tiene un funcionamiento adecuado para alcanzar estas concentraciones.

La dificultad para ensamblar la tecnología de discos parabólicos con almacenamiento térmico ha sido un obstáculo para el desarrollo de esta tecnología de concentración solar. Kuravi et. al. (2013), Pelay et. al. (2017) y Liu et. al. (2016) han reportado la dificultad que existe para unificar estas tecnologías y la falta de almacenamiento térmico en las plantas existentes de disco parabólico. Ya que la UGE debe moverse en conjunto con el concentrador de manera que ambos sigan al sol para seguir enfocando los rayos al punto focal, se genera entonces una problemática, ya que el movimiento no permite una instalación fija y, por lo tanto, no puede circular el fluido de trabajo a un tanque de almacenamiento térmico fuera del sistema de concentración solar.

Es por eso, que mediante el desarrollo de este proyecto se busca una alternativa para poder fusionar exitosamente estas dos tecnologías y así poder lograr una reducción en el costo nivelado de energía relacionado a esta técnica de concentración solar.

1.3 Hipótesis

Una nueva configuración del concentrador solar parabólico con receptor fijo permitirá la compatibilidad con almacenamiento térmico de alta temperatura sin aumentar los requerimientos estructurales del sistema de concentración solar.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de concentración solar en el rango de 2000 soles (700 °C) de foco fijo que permita almacenamiento térmico de alta temperatura mediante la entrega de alta concentración solar sin aumentar los requerimientos estructurales del sistema.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar la forma de concentrador óptima para foco fijo buscando el mayor factor de intercepción posible ($\phi \geq 80\%$).
- Sustentar la posibilidad de compatibilidad con almacenamiento térmico mediante un valor numérico promedio de concentración.

2

Marco Teórico y Antecedentes

*“Here comes the sun, and I say...
It’s alright”*

George Harrison – 1969

2.1 Disponibilidad Solar

2.2 Tipos de Radiación

2.3 Movimiento Solar

2.4 Tecnologías de Concentración Solar

2.5 Disco Scheffler

2.5.1 Antecedentes de concentradores de foco fijo

2.6 Almacenamiento térmico

2.6.1 Almacenamiento térmico con calor sensible

2.6.2 Almacenamiento térmico con calor latente

2.6.3 Almacenamiento termoquímico

2.7 Método de elemento finito

2.8 Optimización por método de Nelder-Mead

El Sol es la estrella que dio y ha mantenido la vida en nuestro planeta Tierra. Los seres vivos hemos requerido de la energía proveniente del Sol para haber realizado todas nuestras actividades. De él obtenemos la iluminación necesaria para sobrevivir, el calor necesario para vivir cómodamente y la radiación para que nuestras plantas puedan crecer y reproducirse. Además, gracias a esta gran estrella uno de los ciclos principales de la vida se lleva a cabo, el ciclo del agua.

La raza humana ha aprovechado esta energía de muchas maneras diferentes. Desde procesos de secado, evaporación, desalinización, sistemas de iluminación natural y, más recientemente, en tecnologías de energía solar, como la tecnología fotovoltaica y la solar térmica.

A través de este capítulo se ilustrará acerca de los fundamentos principales de energía solar y de las diferentes tecnologías relacionadas a la energía solar como energía renovable que se utilizará a lo largo del desarrollo de este trabajo.

2.1 Disponibilidad Solar

Todas las energías renovables cuentan con un potencial disponible que se puede aprovechar. Sin embargo, cuantitativamente analizando dichas energías, se obtiene a la energía solar como la energía de mayor ponderación entre las energías renovables. SBP[®] ha estudiado las provisiones energéticas disponibles en este momento en la Tierra que vienen de energías diferentes, como los

combustibles fósiles, y el Uranio que puede dar energía nuclear. Asimismo, ha dado un análisis cuantitativo del tiempo que se tendrá disponible estos recursos de acuerdo a la demanda energética mundial. En la figura Fig. 5 se muestra dicho estudio.

4 Weltweite fossile Energiereserven und dazugehörige statische Reichweite mit ausgewählten Energieströmen
Global fossil energy reserves and respective reserves to production ratio compared to selected energy flows

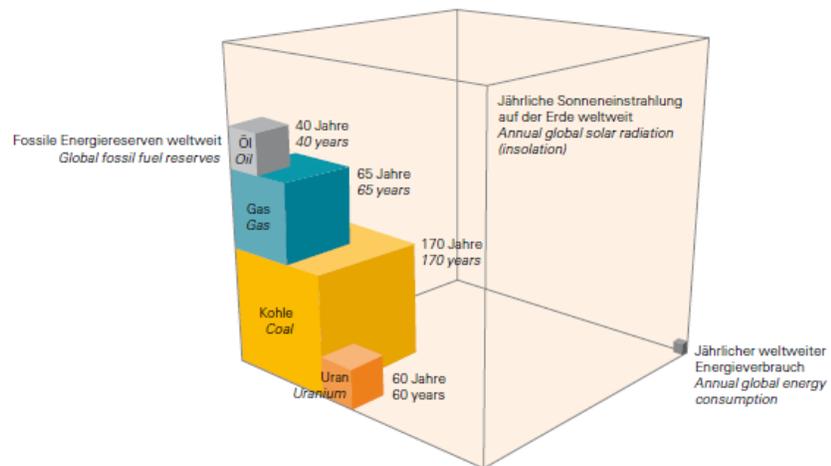


Fig. 5. Fuentes de energía disponibles diferentes a energías renovables (SBP[®], 2012).

Haciendo una comparación con las energías renovables, estos recursos, anteriormente mencionados, tendrán una fecha de agotamiento. En la Fig. 6 se presenta una comparación esquemática de estos recursos contra las energías renovables.

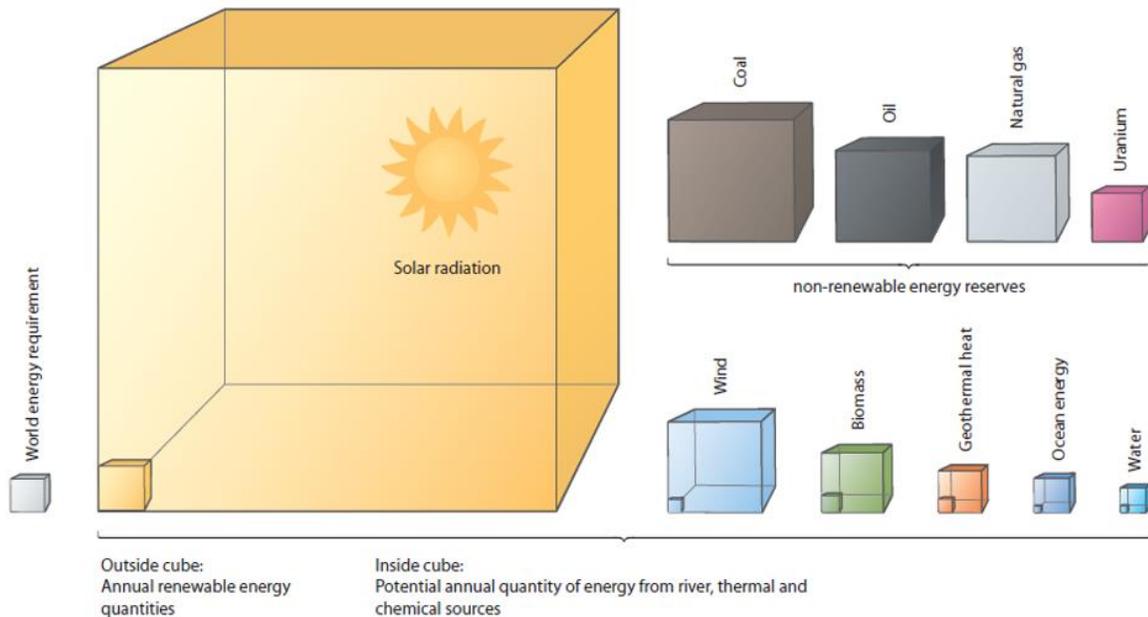


Fig. 6. Comparación de disponibilidad de energías renovables y recursos no renovables.

Es así, como se obtiene que la energía más disponible entre las energías renovables sea la energía solar.

2.2 Tipos de Radiación

La radiación solar cuando atraviesa la atmósfera sufre de una pérdida de energía ya que los gases que se encuentran en ella refractan, dispersan y absorben cierta cantidad de esa energía total extraterrestre.

Existen 3 componentes cuando se habla de la radiación en la superficie terrestre: directa, difusa y algunos autores consideran el albedo. Sin embargo, este último puede ser catalogado dentro de la radiación difusa.

Lo que normalmente conocemos como “la luz del sol”, esa porción de luz que parece venir directamente del sol, es llamada radiación directa (Boyle, 2004). La radiación directa es la radiación incidente en un punto en particular, habiendo viajado por una trayectoria recta desde el sol (Kaltschmitt et. al., 2010). La cantidad de radiación directa depende en la nubosidad y en la posición del sol y es obviamente más grande en días despejados (Goswami et. al., 2000).

En contraste, la radiación difusa es la radiación emergida por la difusión en la atmósfera y, por lo tanto, alcanza indirectamente un punto en particular en la superficie de la Tierra (Kaltschmitt et. al., 2010).

Las tecnologías de energía solar necesitan de la radiación solar para funcionar. Sin embargo, algunas tecnologías aprovechan solamente la radiación directa (e.g. tecnologías de concentración solar). Tanto como la radiación directa como la difusa son útiles para muchas aplicaciones solares térmicas, pero solo la radiación directa puede ser concentrada para generar altas temperaturas (Boyle, 2004).

2.3 Movimiento Solar

La Tierra hace una rotación en su propio eje cada 24 horas y completa una revolución con respecto al sol en un periodo de aproximadamente 365.25 días (Kalogirou, 2009). Esta revolución no es circular pero sigue una elipse con el sol como foco. La Fig. 7 muestra el movimiento de la Tierra con respecto al sol a través de esta revolución.

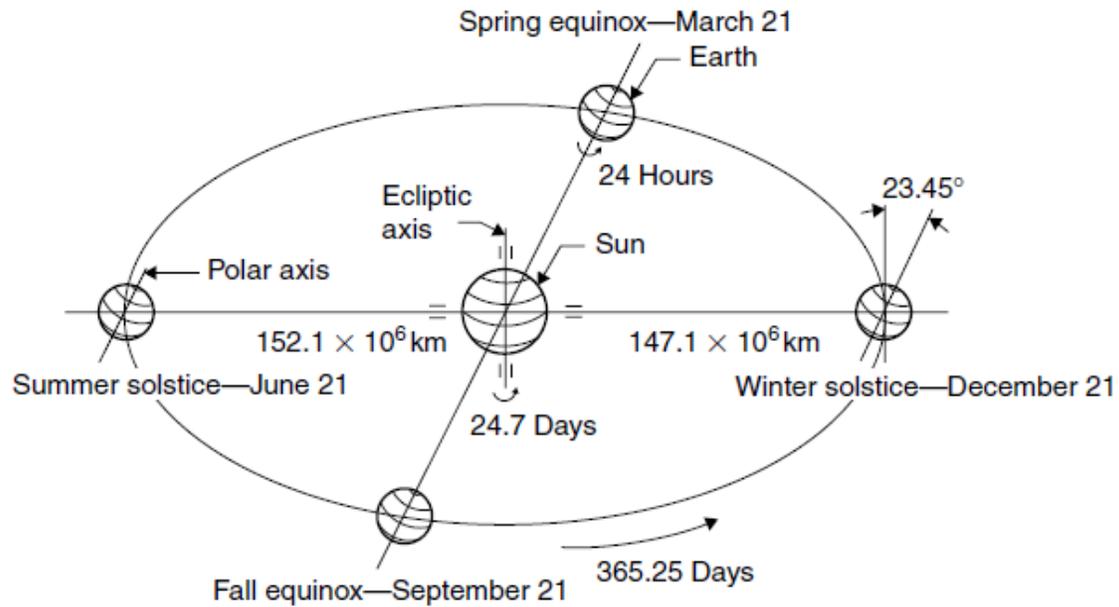


Fig. 7. Movimiento de la Tierra con respecto al sol a través de un año (Kalogirou, 2009).

El movimiento de seguimiento de disco Stirling suele ser robusto, ya que las aplicaciones para las que se usa no requieren de una alta precisión para su adecuado funcionamiento. El seguimiento que utiliza el disco Scheffler es un seguimiento o movimiento polar. Justo como la tierra gira alrededor de un eje a través de los polos norte y sur, el reflector Scheffler gira alrededor de un eje paralelo a este último, justo en la dirección contraria (Scheffler, 2006).

Es de conocimiento común que el sol está más arriba en el cielo en el verano que en el invierno. Los movimientos relativos del sol y la tierra no son simples, sin embargo son sistemáticos y, por lo tanto, predecibles.

El movimiento aparente más obvio del sol es que éste se mueve diariamente en un arco a través del cielo, alcanzando su punto más alto al medio día. A medida

de que el verano termina, el punto del amanecer y el atardecer se traslada hacia el sur, haciendo la trayectoria solar más corta (Kalogirou, 2009).

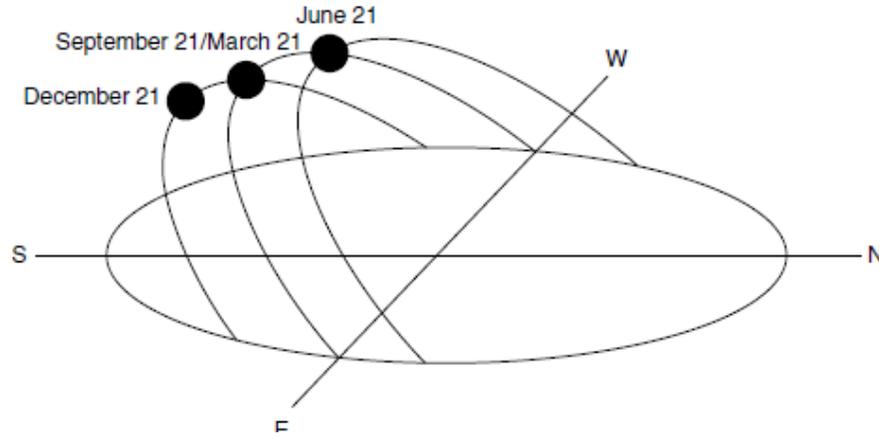


Fig. 8. Trayectorias solares en el hemisferio norte en un año (Kalogirou, 2009).

Al mismo tiempo, en el hemisferio norte, los días se vuelven más largos pues el sol amanece más temprano y atardece más tarde cada día y la trayectoria del sol se vuelve más alta en el cielo. En Junio 21, el sol está en su posición más hacia el norte con respecto a la tierra (Kalogirou, 2009). Esto es llamado el solsticio de verano y durante este día la duración del día es máxima. Seis meses después, en Diciembre 21, el solsticio de invierno, es el inverso del solsticio de verano y el sol se encuentra en su posición más hacia el sur. En las mitades de este rango de 6 meses, en Marzo 21 y Septiembre 21, la longitud del día es igual a la longitud de la noche. Estos son llamados los equinoccios de primavera y otoño, respectivamente (Kalogirou, 2009). En la Fig. 8 se presenta esquemáticamente la trayectoria del sol en el hemisferio norte a través de un año.

Para muchas aplicaciones de energía solar, se necesitan predicciones razonablemente precisas de dónde estará el sol en el cielo en un determinado tiempo del día y año (Kalogirou, 2009).

En la Fig. 9 se muestra un diagrama de la declinación de la tierra con respecto al sol a través de un año (Kalogirou, 2009).

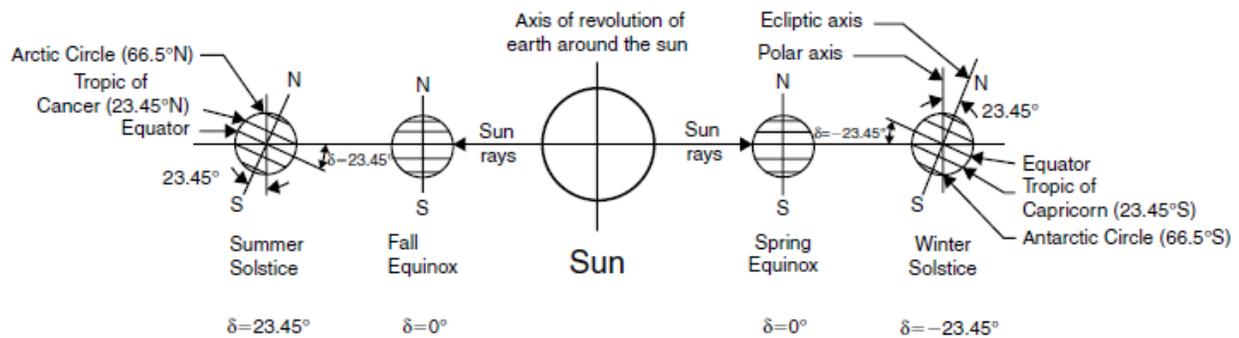


Fig. 9. Declinación de la Tierra a través de un año (Kalogirou, 2009).

Algunos de los ángulos que permiten ubicar al sol están indicados en la Fig. 10. Los ángulos y algunas convenciones de signos (Duffie & Beckman, 2013) se describen a continuación:

Angulo cenital o zenit (θ_z), el ángulo entre la vertical y la línea del sol, esto es, el ángulo de incidencia del haz de radiación en una superficie horizontal.

Angulo de altura solar (α_s), el ángulo entre la horizontal y la línea al sol, esto es, el complemento del ángulo cenital.

Angulo azimutal solar o azimut solar (γ_s), el desplazamiento angular al sur de la proyección del haz de radiación en el plano horizontal. Los desplazamientos al este del sur son negativos y al oeste del sur son positivos.

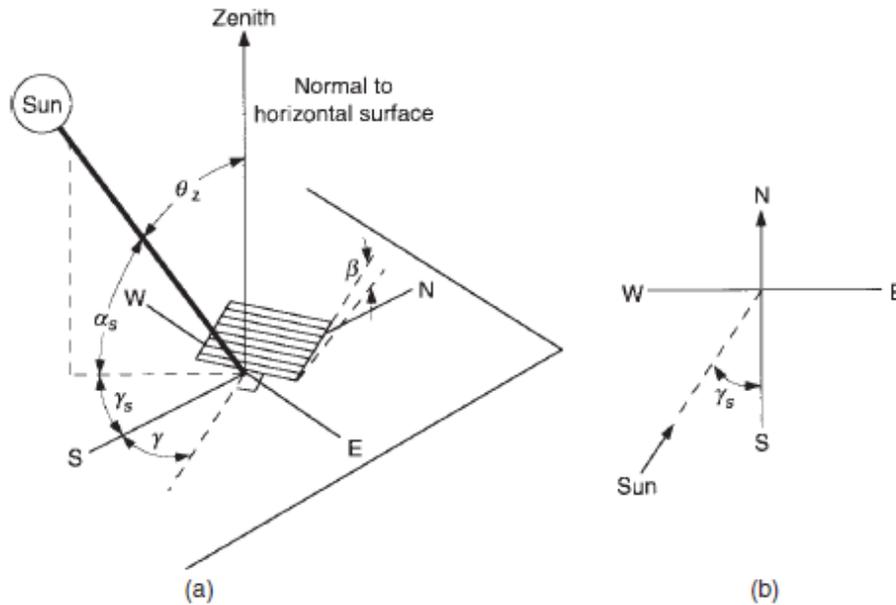


Fig. 10. a) Ángulo cenital, inclinación, ángulo de la superficie y ángulo azimutal solar para una superficie inclinada. b) Vista del plano mostrando el ángulo azimutal solar (Duffie & Beckman, 2013).

2.4 Tecnologías de concentración solar

Los colectores de energía solar son tipos especiales de intercambiadores de calor que transforman la radiación solar en energía interna del fluido de trabajo para después convertirla a energía eléctrica. El mayor componente de cualquier sistema solar es el colector solar. Este es un dispositivo que absorbe la radiación solar incidente, la convierte en calor y transfiere el calor a un fluido (usualmente aire, agua o aceite) que circula a través del colector. Hay básicamente dos tipos

de colectores solares: no concentradores o estacionarios y de concentración (Kalogirou, 2009).

Para muchas aplicaciones es deseable entregar energía a temperaturas más altas que las posibles con colectores planos. Las temperaturas de entrega de energía pueden ser incrementadas decreciendo el área en donde las pérdidas térmicas ocurren. Esto se hace interponiendo un dispositivo óptico entre la fuente de radiación y la superficie absorbadora de energía. El absorbedor pequeño tendrá pérdidas térmicas menores comparado con un colector de placa plana a la misma temperatura del absorbedor (Duffie & Beckman, 2013).

Hay muchos diseños de sistemas de concentración solar. Los concentradores pueden ser reflectores o refractores, pueden ser cilíndricos o superficies de revolución y pueden ser continuos o segmentados. Los receptores pueden ser convexos, planos o cóncavos y pueden ser cubiertos o no cubiertos. Muchos modos de seguimiento son posibles. Las tasas de concentración pueden variar en muchos órdenes de magnitud. Con este amplio rango de diseños, es difícil desarrollar análisis generales aplicables a todos los concentradores (Duffie & Beckman, 2013).

Además, las tecnologías CSP (Concentrating Solar Power, por sus siglas en inglés) pueden ser aplicadas en procesos industriales para desalinizar agua, mejorar la electrólisis del agua para la producción de hidrógeno, generar calor para calor combinado y aplicaciones de energía y apoyar operaciones mejoradas

de recuperación de aceite (Serrano, 2017). Consecuentemente, áreas áridas y semiáridas con cielos despejados son ubicaciones deseables donde plantas de CSP sean instaladas (Serrano, 2017).

Para evitar confusión en la terminología, durante el desarrollo de este proyecto se usará la palabra colector al sistema global (i.e., concentrador, UGE, mecanismo de seguimiento, estructura). El receptor es el dispositivo en donde la radiación se absorbe y se convierte en energía térmica para su utilización. Dentro del receptor está el absorbedor que es la parte por donde circula el fluido de trabajo. El concentrador es el sistema óptico que refleja la radiación incidente del sol hacia el receptor. Existen dos aperturas, una en la apertura del concentrador y la otra es la apertura del receptor. La apertura del concentrador es el plano a través del cual la radiación solar entra al concentrador. La apertura del receptor es el plano por donde entra la radiación reflejada proveniente del concentrador.

Para poder clasificar correctamente a los sistemas de CSP que existen actualmente, es necesario primero hablar y definir un término fundamental en la tecnología solar térmica: la tasa de concentración es la relación entre el área de apertura del concentrador y el área de apertura del receptor (Duffie & Beckman, 2013). La tasa de concentración se define mediante la Ec. (1).

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad \text{Ec. (1)}$$

También existe la concentración óptica, la cual solo considera el área generada por la imagen solar en el plano focal. La concentración óptica es el flujo de

irradiancia en el plano focal dividido entre el flujo en el área de apertura (comúnmente tomado como 1 kW/m²).

$$C_{opt} = \frac{\frac{1}{A_r} \int I_r D A_r}{I_o} \quad \text{Ec. (2)}$$

.La temperatura alcanzada en el receptor está relacionada a la tasa de concentración del colector (Serrano, 2017).

La Tabla 1 establece los diferentes tipos de colectores solares ordenados de acuerdo a su tasa de concentración (Kalogirou, 2009).

Tabla 1. Colectores solares (Kalogirou, 2009).

Movimiento	Tipo de colector	Tipo de absorbedor	Tasa de concentración	Rango de temperatura (°C)
Estacionario	Colector de placa plana (FPC)	Plano	1	30-80
	Colector de tubo evacuado (ETC)	Plano	1	50-200
	Colector parabólico compuesto (CPC)	Tubular	1-5	60-300
Seguimiento en un solo eje	Colector parabólico compuesto (CPC)	Tubular	5-15	60-300
	Reflector lineal Fresnel (LFR)	Tubular	10-40	60-250
	Colector de canal cilíndrico (CTC)	Tubular	15-50	60-300
	Colector de canal parabólico (PTC)	Tubular	10-85	60-400

Seguimiento en dos ejes	Reflector de disco parabólico (PDR)	Puntual	600-2000	100-1500
	Colector de campo de heliostatos (HFC)	Puntual	300-1500	150-2000

A mayor temperatura deseada, la tasa de concentración tendrá que ser mayor y la óptica tendrá que ser más precisa, tanto del concentrador como del sistema de orientación (Duffie & Beckman, 2013).

Debido al movimiento aparente del sol a través del cielo, los colectores de concentración convencionales deben seguir al sol en su movimiento diario. El movimiento del sol puede ser fácilmente rastreado por dos métodos. El primero es el método “altazimut”, el cual requiere que el dispositivo de seguimiento gire tanto en altitud como en azimut, i.e., cuando se ejecuta apropiadamente, este método permite al concentrador seguir al sol exactamente. Los colectores solares parabólicos generalmente utilizan este sistema. El segundo tipo de rastreo es de un solo eje: en éste, el colector rastrea al sol en solamente una dirección, ya sea de este a oeste o de norte a sur. Los sistemas de canal parabólico generalmente utilizan este sistema (Kalogirou, 2009).

La óptica de los concentradores solares debe ser muy precisa, ya que deben concentrar la radiación incidente en un foco de mucho menor tamaño. El factor de intercepción (γ) es definido como la fracción de la radiación reflejada que incide en

la superficie absorbadora del receptor (Duffie & Beckman, 2013). La Ec. (3) define al factor de intercepción.

$$\gamma = \frac{\int_A^B I(w)dw}{\int_{-\infty}^{+\infty} I(w)dw} \quad \text{Ec. (3)}$$

Los valores A y B son los límites del área en el plano focal. Mientras que el término mostrado en el denominador es la irradiancia total ingresada al área apertura. Es decir, se obtiene una fracción entre la energía que se captura en el plano focal y lo que se tiene como la energía total de entrada al sistema. Los valores de factor de intercepción mayores a 0.9 son comunes, para concentradores de alta calidad (Duffie & Beckman, 2013).

El error de pendiente es un parámetro clave que puede afectar la eficiencia óptica, la calidad y concentración de una imagen solar en el plano focal (Wang et. al., 2015). Estos dos factores están directamente relacionados con la calidad óptica de los concentradores solares parabólicos, ya que en conjunto afectan drásticamente la calidad de la imagen focal dependiendo de sus valores. El error de pendiente se define como la distorsión de la forma parabólica del concentrador (Kalogirou, 2009).

Un reflector de disco parabólico es un colector de foco puntual que rastrea al sol en dos ejes, concentrando la energía solar en el receptor ubicado en el punto focal del disco. La estructura de disco debe rastrear al sol totalmente para reflejar el haz

en el receptor térmico (Kalogirou, 2009). Esta tecnología ofrece muy altas tasas de concentración y temperaturas de operación (Serrano, 2017). El receptor absorbe la energía solar radiante, convirtiéndola a energía térmica en un fluido circulante. La energía térmica puede ser tanto convertida en electricidad usando un generador-motor acoplado directamente al receptor o transportada a través de tubos a un sistema central de conversión de energía. Los discos parabólicos permiten alcanzar temperaturas superiores a 1500 °C (Kalogirou, 2009). Por consiguiente, las principales ventajas de los sistemas de discos parabólicos incluyen: altas eficiencias (i.e., arriba de 30 %) y modularidad (i.e., 3-50 kW), lo cual es apropiado para generación distribuida (Serrano, 2017). Además, típicamente tienen tasa de concentración en el rango de 600 a 2000 (Kalogirou, 2009). En la Fig. 11 se muestra el sistema de disco parabólico Eurodish®.



Fig. 11. Sistema de disco parabólico Eurodish®.

2.5 Disco Scheffler

El disco Scheffler es un disco creado por Wolfgang Scheffler en 1986 para coleccionar energía solar. Actualmente, es una alternativa para concentración solar de baja temperatura debido a las bajas concentraciones que alcanzan. El fundamento de este tipo de disco parabólico es utilizar un segmento de una parábola más grande, la cual tiene un foco fijo, mediante el corte de dicha parábola con un plano (Véase *Fig. 12*). El disco Scheffler presenta al menos tres ventajas con respecto a los concentradores parabólicos circulares. Las ventajas son que tienen una curva de superficie flexible, un área focal no móvil (i.e. fijo), su absorbedor no genera sombra alguna en el reflector (Oelher and Scheffler, 1994), incluyen simplicidad de instalación, mantenimiento y operación de los sistemas receptores, ya que generalmente éstos se encuentran cerca del nivel del suelo. También presentan bajos costos de construcción y simplicidad en su seguimiento solar (Ruelas et. al., 2016).

El disco Scheffler se puede utilizar para procesos industriales que no requieren un calor de alta temperatura. Los procesos que pueden ser acoplados con el disco Scheffler son la esterilización, extracción, pasteurización, secado, refrigeración y aire acondicionado solar, hidrólisis, destilación y evaporación, lavado y aseado y polimerización. Los rangos de temperatura de todos estos procesos están entre 60 y 280 °C (A. Munir et. al., 2010). Actualmente no se ha utilizado un disco Scheffler típico en conjunto con un motor Stirling debido a la baja temperatura que éste puede generar, comúnmente, no mayor a 300 °C (MNRE-UNDP-GEF, 2014).

Estos concentradores son capaces de entregar temperaturas en el rango de 300 °C y son técnicamente adecuados para aplicaciones de temperatura media (Delaney, 2003). Su uso se está volviendo muy popular en el mundo, especialmente en la India (Scheffler, 2006). A pesar de que los concentradores Scheffler dan una eficiencia térmica más baja que otros, estos concentradores aun encuentran más aceptación a nivel mundial debido a su características superiores de diseño y bajo costo de mantenimiento (Reddy et. al., 2018). Además, el disco Scheffler ofrece una curvatura flexible, por lo que éste puede cambiar su curvatura o ángulo de borde. Esto último está relacionado a concentración que el reflector puede ofrecer y, por lo tanto, una temperatura más elevada. La relación de concentración cambia según la estación del año en que se esté. La tasa de concentración varía inversamente con la declinación del sol. Es decir, La concentración es máxima en invierno y mínima en verano (Reddy et. al., 2018).

A diferencia de un concentrador paraboloide convencional, el concentrador de foco fijo Scheffler es una parte lateral de un paraboloide (A. Munir et. al., 2010). En la Fig. 12 se muestra el esquema de la parábola que da origen a un concentrador Scheffler mediante un corte de un plano.

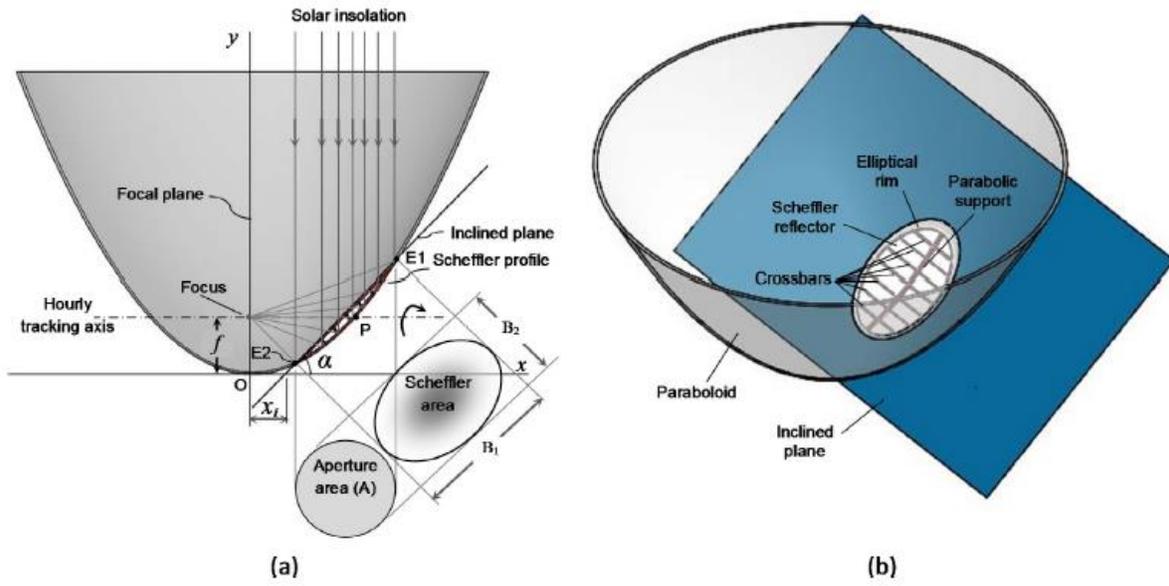


Fig. 12. Detalles del disco Scheffler (Reddy et. al., 2018).

La parábola que se muestra en la Fig. 12 es la sección media plana del paraboloides a partir del cual el reflector Scheffler se construye (Reddy et. al., 2018). Las siguientes ecuaciones reportadas por Reddy et. al. (2018) dan lugar a la construcción de un disco Scheffler convencional. La ecuación de la parábola que tiene una distancia focal f y su vértice en el origen está dada por:

$$x^2 = 4fy \tag{4}$$

La ecuación de la línea (plano inclinado) con una pendiente α y un intercepto $x-x_f$ puede ser tomada como:

$$y = \tan \alpha (x - x_i) \quad \text{Ec. (5)}$$

Si $E_1 (x_1, y_1)$ y $E_2 (x_2, y_2)$ son los puntos de intersección de la sección inclinada (plano inclinado) y parábola, los ejes mayor y menor del borde elíptico del concentrador Scheffler son respectivamente dados por:

$$B_1 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad \text{Ec. (6)}$$

$$B_2 = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad \text{Ec. (7)}$$

donde B_2 es también el diámetro de apertura del círculo. B_1 también puede obtenerse mediante:

$$B_1 = \frac{B_2}{\cos \alpha} \quad \text{Ec. (8)}$$

Usando las ecuaciones de (3) a (7), las siguientes relaciones pueden ser obtenidas:

$$x_1 = 2f \tan \alpha + \frac{B_2}{2} \quad \text{Ec. (9)}$$

$$x_2 = 2f \tan \alpha - \frac{B_2}{2} \quad \text{Ec. (10)}$$

$$y_1 = \frac{x_1^2}{4f} \quad \text{Ec. (11)}$$

$$y_2 = \frac{x_2^2}{4f} \quad \text{Ec. (12)}$$

$$x_i = f \tan \alpha - \frac{B_2^2}{16f \tan \alpha} \quad \text{Ec. (13)}$$

Existen plantas solares de discos Scheffler que consisten en arreglos de concentradores Scheffler "bi-orientados". Es decir, una serie de líneas de concentradores Scheffler orientados hacia el norte y otros orientados hacia el sur. En la Fig. 13 se presenta una planta de concentradores Scheffler "bi-orientados".



Fig. 13. Planta de discos Scheffler "bi-orientados".

En la Fig. 14 y 15 se muestran un concentrador de disco Scheffler y un receptor acoplado a este tipo de concentradores, respectivamente.



Fig. 14. Concentrador solar parabólico Scheffler.



Fig. 15. Receptor acoplado a un concentrador tipo Scheffler.

2.5.1 Antecedentes de concentradores de foco fijo

Bomin Solar GmbH[®] fue pionero en el concepto de usar espejos de membrana en rollos para concentración solar en el inicio de los 1970's (Coventry & Andraka, 2017). Después, en 1990, Bomin Solar[®] desarrolló un colector solar de foco fijo, basado en rotar el segmento de un paraboloide alrededor del punto focal (Coventry & Andraka, 2017). En la Fig. 16 se muestra el prototipo creado por Bomin Solar[®] (Coventry & Andraka, 2017).

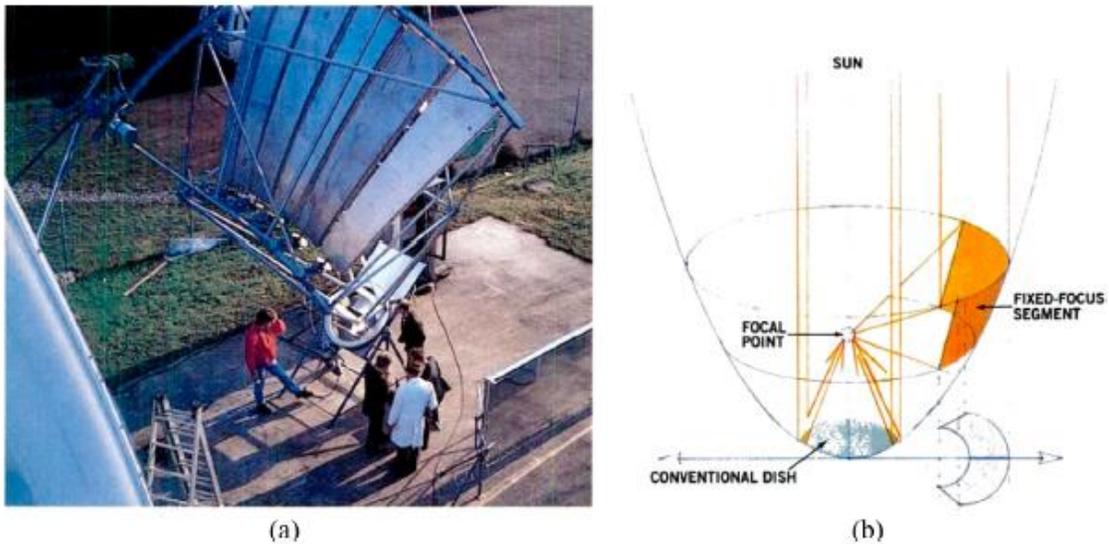


Fig. 16. a) Prototipo del colector de foco fijo de Bomin Solar[®] y b) Diagrama del concepto de foco fijo (Coventry & Andraka, 2017).

Messerschmitt-Boelkow-Blohm[®], en conjunto con el Instituto de Investigación Científica de Kuwait (KISR) desarrollaron un disco parabólico de foco fijo en 1979 (Coventry & Andraka, 2017). Una característica de este disco era que fue diseñado para rotar alrededor del punto focal, esto para evitar la necesidad de

tubería flexible al receptor (Coventry & Andraka, 2017). En la Fig. 17 se muestra el diseño desarrollado por el KISR (Coventry & Andraka, 2017).

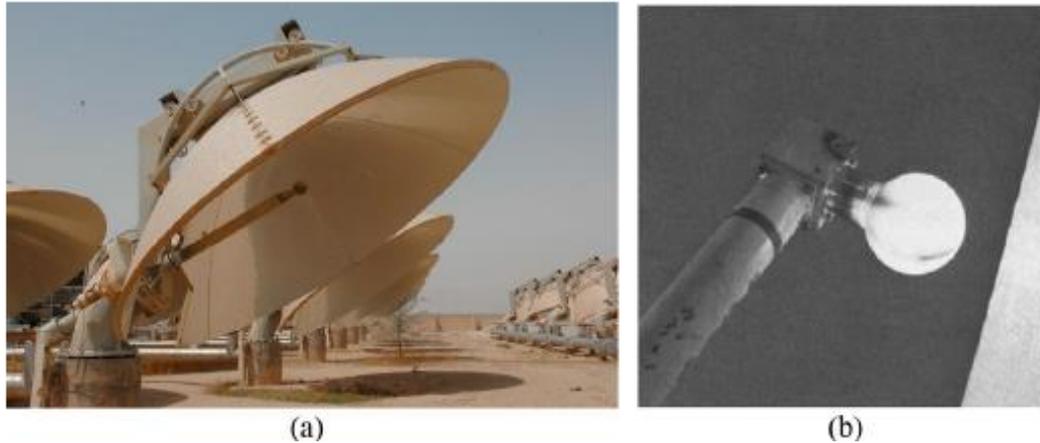


Fig. 17. a) Discos instalados en Sulaibyah, Kuwait y b) el receptor de aceite de punto focal fijo (Coventry & Andraka, 2017).

El Thermax SolPac D160[®] es un disco Scheffler, donde el foco está fijo y el reflector es un segmento de un paraboloide con un seguimiento diario de este a oeste. La geometría del reflector Thermax[®] es un diseño basado en una declinación solar = 0° (en el equinoccio), y a causa de que el disco y el receptor tienen alturas fijas, el reflector requeriría diferentes segmentos de un paraboloide para alcanzar un foco ideal ya que la declinación solar cambia a través del año. Esto no es práctico y debido a esto la calidad óptica se ve afectada. Sin embargo, para aplicaciones de procesos de calor de 150 °C para el cual el Thermax[®] fue desarrollado, su concentración es suficiente basado en el reflector de forma fija (Coventry & Andraka, 2017). En la Fig. 18 podemos observar un disco Scheffler Thermax[®].



Fig. 18. Discos Thermax SolPac D160[®] (Coventry & Andraka, 2017).

2.6 Almacenamiento térmico

El almacenamiento de energía se vuelve necesario siempre que hay un desajuste entre la energía disponible y la demanda (Goswami et. al., 2000). La radiación solar es una fuente de energía cuya intensidad varía determinadamente debido a la rotación de la Tierra (día/noche) y estocásticamente como un resultado de influencias meteorológicas actuales (nubes, aerosoles, etc.) (Kaltschmitt et. al., 2010). Una solución a esto es usar un sistema de almacenamiento de energía térmica (Thermal Energy Storage, por sus siglas en inglés, TES) para almacenar calor durante periodos de luz solar y usarla durante periodos de irradiación solar débil o nula (Pelay et. al., 2017). Un sistema de almacenamiento térmico consiste principalmente de 3 partes: un medio de almacenamiento, un mecanismo de transferencia de calor y un sistema contenedor (Kuravi et. al., 2017). El medio de almacenamiento de energía térmica almacena la energía térmica tanto en la forma de calor sensible, calor latente de fusión o vaporización o en la forma de reacciones químicas reversibles. Hoy en día, los materiales de calor sensible en la

forma de aceite sintético y sal fundida son los más extensamente usados en sistemas de CSP (Concentrating Solar Power por sus siglas en ingles) de gran escala, mientras los sistemas que utilizan calor latente, termoquímico y otros materiales de calor sensible todavía están siendo desarrollados. El propósito del mecanismo de transferencia de energía es suministrar o extraer calor del medio de almacenamiento. El sistema contenedor contiene el medio de almacenamiento así como el equipo de transferencia de energía y aísla el sistema de los alrededores. Dependiendo del tipo de almacenamiento, hay varios requerimientos que deben ser considerados para asegurar la dinámica de almacenamiento óptima y longevidad (Kuravi et. al., 2017). Del punto de vista técnico, los requerimientos cruciales son (Herrmann & Kearney, 2002):

- Densidad de energía alta (por unidad de masa o unidad de volumen) en el material de almacenamiento.
- Buena transferencia de calor entre el fluido de transferencia de calor (HTF, heat transfer fluid) y el medio de almacenamiento.
- Estabilidad mecánica y química del material de almacenamiento
- Compatibilidad química entre el HTF, el intercambiador de calor y/o el medio de almacenamiento.
- Reversibilidad completa para un largo número de ciclos de carga/descarga.
- Pérdidas térmicas bajas.
- Facilidad de control.

Los criterios de diseño más importantes para un almacenamiento térmico son (Herrmann & Kearney, 2002):

- Temperatura y caída de entalpía específica nominal en la carga.
- Carga máxima (energía térmica máxima que puede entregar el sistema en un intervalo de tiempo determinado).
- Estrategia operacional (e.g., construcción de tuberías)
- Integración con la planta de energía.

En la Tabla 2 podemos observar las plantas en operación que tienen almacenamiento térmico en el mundo reportadas por Kuravi et. al. (2017).

Tabla 2. Plantas solares térmicas con sistemas de almacenamiento térmico (Kuravi et. al., 2017).

Project	Type	Storage medium	Nominal temperature (°C)		Storage concept	Plant capacity	Storage capacity
			Cold	Hot			
SSPS-DCS test facility Almería, España	Parabolic trough	Santotherm 55	225	295	1 tank thermocline	1.2 MWth	5 MWht
Nevada Solar One Nevada, USA	Parabolic trough	Dowtherm A	318	393	Oversized field piping	64 MWe	0.5 h
Holaniku at Keahole Point Hawaii, USA	Parabolic trough	Water	n.a.	200	Indirect storage	2 MWth, 500 KWe	2 h
Planta Solar-10 Sevilla, Spain	Central receiver	Pressurized water	240	260	Steam accumulator	11 MWe	50 min/20 MWht
Planta Solar-20 Sevilla, Spain	Central receiver	Pressurized water	n.a.	250-300	Steam accumulator	20 MWe	50 min
La Florida Bajadoz, Spain	Parabolic trough	Molten solar salt	292	386	2-tank indirect	50 MWe	7.5 h
Andasol-1 Granada,	Parabolic trough	Molten solar salt	292	386	2-tank indirect	50 MWe	7.5 h/1010 MWht

Spain							
Andasol-2 Granada, Spain	Parabolic trough	Molten solar salt	292	386	2-tank indirect	50 MWe	7.5 h/1010 MWht
Extresol-1 Bajadoz, Spain	Parabolic trough	Molten solar salt	292	386	2-tank indirect	50 MWe	7.5 h/1010 MWht
Manchasol-1 Ciudad Real, Spain	Parabolic trough	Molten solar salt	292	386	2-tank indirect	50 MWe	7.5 h
Manchasol-2 Ciudad Real, Spain	Parabolic trough	Molten solar salt	292	386	2-tank indirect	50 MWe	7.5 h
La Dehesa Bajadoz, Spain	Parabolic trough	Molten solar salt	292	386	2-tank indirect	50 MWe	7.5 h
Puerto Errado 1 Murcia, Spain	Linear Fresnel	Saturated steam	n.a.	270	Steam accumulator	1.4 MWe	n.a.
Archimede Sicily, Italy	Parabolic trough	Molten solar salt	290	550	2-tank indirect	5 MWe	8 h/ 100 MWht
Torresol Gemasolar Seville, Spain	Central receiver	Molten solar salt	292	565	2-tank indirect	17 MWe	15 h
Dahan Beijing, China	Central receiver	Saturated steam/oil	220	350	Combined steam accumulator/con crete	1 MWe	1 MWht
n.a. = not available. Molten solar salt = 60% sodium nitrate 40% potassium nitrate.							

En la Fig. 19 se muestra el almacenamiento térmico usado por la planta de canales parabólicos ANDASOL 1. En ella utilizan dos tanques de sales fundidas, uno frío y el otro caliente.



Fig. 19. Almacenamiento térmico de sales fundidas en la planta ANDASOL-1.

Hoy en día existen 3 tipos de almacenamiento térmico: sensible, latente y termoquímicos.

2.6.1 Almacenamiento térmico de calor sensible

El almacenamiento térmico con calor sensible es la tecnología más madura (Pelay et. al., 2017). En almacenamiento de calor sensible, la energía térmica es almacenada durante la elevación o caída de temperaturas del medio de almacenamiento térmico, el cual puede ser tanto de estado sólido como líquido (Tian & Zhao, 2013). Los materiales sólidos que se usan en este tipo de almacenamiento son los minerales de arena-piedra, concreto, ladrillos de fuego y

materiales de ferroaleaciones (Tian & Zhao, 2013). Los materiales líquidos que se usan para este tipo de almacenamiento incluyen los aceites, sodio líquido y sales inorgánicas fundidas (Tian & Zhao, 2013). La cantidad de energía almacenada es dependiente de la cantidad de material de almacenamiento (m), la capacidad calorífica específica del material (C_p) y el incremento de temperatura (ΔT) del material de almacenamiento. Esta energía es determinada por la Ec. (14) (Liu et. al., 2016).

$$Q = mC_p\Delta T \quad \text{Ec. (14)}$$

2.6.2 Almacenamiento térmico de calor latente

El almacenamiento térmico de calor latente usa materiales de cambio de fase (PCM, phase change materials). Los PCM's pueden almacenar/liberar una gran cantidad de calor cuando reforman sus estructuras de fase durante los procesos de fusión/solidificación o gasificación/licuefacción, ya que las entalpías de transición de los PCM's son usualmente más altas (100-200 veces más) que el calor sensible. Por lo tanto, el almacenamiento de calor latente tiene mucha mayor densidad de almacenamiento que el almacenamiento de calor sensible (Tian & Zhao, 2013). La cantidad de energía almacenada es gobernada por el calor específico y la entalpía de cambio de fase y puede ser calculada por la Ec. (15) (Liu et. al., 2016):

$$Q = m[C_{p,s}(T_m - T_s) + h + C_{p,l}(T_l - T_m)] \quad \text{Ec. (15)}$$

Donde $C_{p,s}$ y $C_{p,l}$ son los calores específicos promedio del PCM en las fases sólido y líquido, respectivamente, T_m es la temperatura de fusión, h es la entalpía de cambio de fase y T_s y T_l son las temperaturas del PCM sólido y líquido, respectivamente (Liu et. al., 2016):

Debido a la significativa cantidad de energía convertida durante el cambio de fase, el sistema de almacenamiento latente ofrece un proceso de almacenamiento/liberación de calor isotérmico y una mayor densidad de almacenamiento comparado con el sistema de almacenamiento sensible con el mismo cambio de temperatura. Actualmente, ningún sistema de almacenamiento con PCM comercial se ha usado en aplicaciones de CSP en escala de utilidad (Liu et. al., 2016).

2.6.3 Almacenamiento termoquímico

Ciertos químicos pueden absorber/liberar a una gran cantidad de energía térmica cuando se rompen/forman ciertos enlaces químicos durante reacciones endotérmicas/exotérmicas (Tian & Zhao, 2013). Los materiales químicos pueden ser orgánicos o inorgánicos.

En el almacenamiento, la energía es almacenada por medio de un proceso de absorción reversible o reacción química (Liu et. al., 2016):



En la reacción endotérmica, el reactivo AB absorbe calor suministrado del campo solar y es disociado en los productos A y B los cuales pueden ser almacenados separadamente (Liu et. al., 2016). En el proceso inverso (reacción exotérmica), los reactivos A y B son puestos en contacto y el reactivo inicial AB se forma con una liberación de calor (Liu et. al., 2016).

El almacenamiento termoquímico posee densidad energética alta y pérdida de calor despreciable, lo cual constituye potencialmente una opción de almacenamiento de largo término con relativamente bajo volumen de almacenamiento (Liu et. al., 2016). Sin embargo, el almacenamiento químico no ha sido extensivamente investigado y su aplicación es limitada debido a los siguientes problemas: se requieren reactores complejos para realizar reacciones químicas específicas, baja durabilidad de largo término (reversibilidad) y estabilidad química (Tian & Zhao, 2013).

2.7 Método de elemento finito

El método de elemento finito (FEM, por sus siglas en inglés) ha sido desarrollado como una tecnología clave e indispensable en el modelado y simulación de sistemas de ingeniería avanzados en varios campos como construcción, transportación, comunicaciones, entre muchas otras. En construcción, que se tiene, en muchas ocasiones, sistemas de ingeniería avanzados, los ingenieros y diseñadores trabajan con un proceso complejo de modelado, simulación, visualización, análisis, diseño, creación de prototipos, pruebas y fabricación. Este

proceso es comúnmente iterativo en la naturaleza, significando esto que muchos procedimientos son repetidos basados en los resultados obtenidos en el escenario actual, esto para alcanzar un desempeño óptimo al menor costo de construcción del sistema. De ahí, las técnicas relacionadas al modelado y simulación de una manera rápida y efectiva juegan un papel importante, resultando en la aplicación de un método de elemento finito hecho numerosas veces debido a esto. El FEM fue primeramente usado para resolver problemas de mecánica estructural, después de esto ha sido aplicado a muchos otros problemas como análisis térmico, análisis de flujo de fluido, análisis piezoeléctrico y muchas otros. Básicamente, el analista busca determinar la distribución de alguna variable de campo como el desplazamiento, el esfuerzo, la temperatura o flujo de calor en el análisis térmico, la densidad de corriente eléctrica en el análisis eléctrico, entre otros. El FEM es un método numérico que busca una solución aproximada de la distribución de las variables de campo en el dominio del problema que es difícil obtenerlo analíticamente. Esto es hecho dividiendo el dominio del problema en un número finito de elementos de geometría simple (Liu & Quek, 2014). En las Fig. 20 y 21, aparecen dominios divididos en muchos elementos. Después de esto, leyes físicas conocidas son entonces aplicadas a cada pequeño elemento (Liu & Quek, 2014).

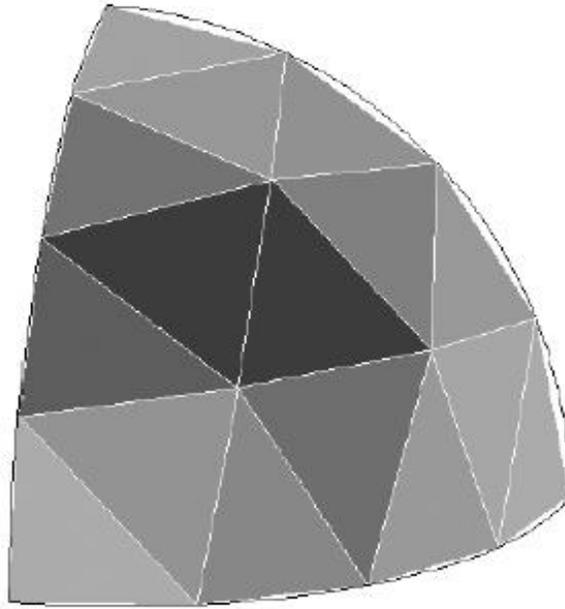


Fig. 20. Sección hemisférica discretizada en muchos elementos (Liu & Quek, 2014).

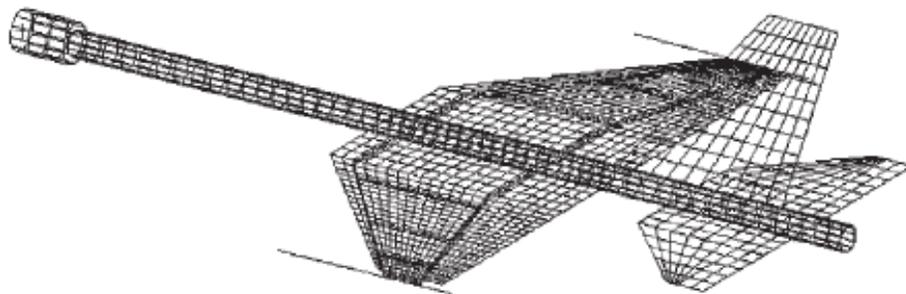


Fig. 21. Mallado para el diseño de un modelo a escala de una aeronave para pruebas dinámicas en laboratorio (Liu & Quek, 2014).

Una función continua de una variable de campo desconocida es aproximada en cada elemento por polinomios de las variables de espacio. Los coeficientes de

estos polinomios son funciones de los valores de la función incógnita en algunos puntos del elemento llamados nodos. Lo desconocido son entonces los valores de la variable de campo en los nodos. Después, se siguen principios para establecer ecuaciones para los elementos, después de lo cual los elementos son “atados” entre cada uno. Este proceso lleva a un conjunto de ecuaciones lineales algebraicas simultaneas para el sistema entero y que puede ser resuelto fácilmente para entregar la variable de campo requerida (Liu & Quek, 2014). La Fig. 22 muestra una aproximación de una función en un caso de una dimensión.

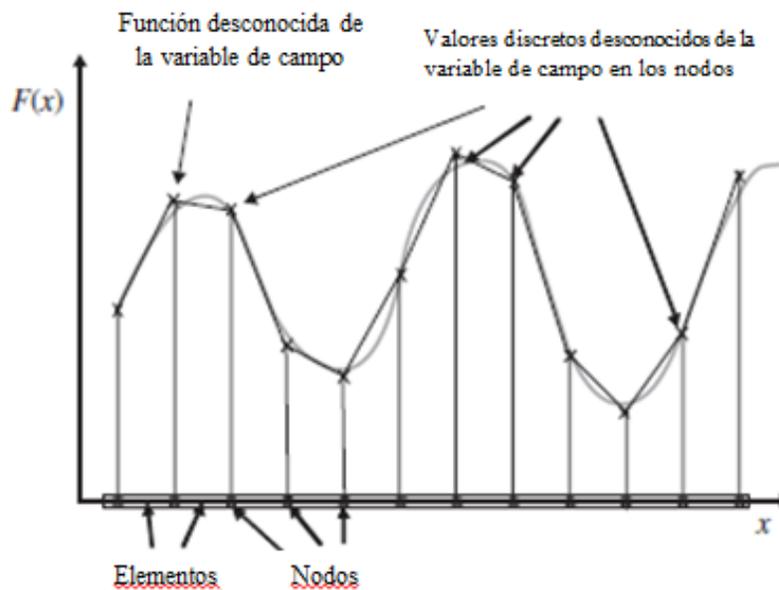


Fig. 22. Aproximación por elementos finitos para un caso de una dimensión. Una función continua es aproximada usando funciones lineales por partes en cada subdominio/elemento (Liu & Quek, 2014).

El comportamiento de un sistema depende de su geometría o dominio, la propiedad del material y las condiciones iniciales de frontera (Liu & Quek, 2014).

Los pasos básicos involucrados en cualquier análisis de elemento finito con un software comercial consisten en lo siguiente (Moaveni, 1999):

Fase de pre-procesamiento

- Definir la geometría y el tipo de fenómeno a estudiar (mecánica estructural, difusión de especies químicas, etc.)
- Mallar, es decir, discretizar el dominio en elementos.
- Aplicar condiciones de frontera y condiciones iniciales.

Fase de solución

- Proporcionar parámetros de cálculo requeridos en el método numérico (por ejemplo: precisión, paso de tiempo, etc.)
- Resolver.

Fase de post-procesamiento

- Visualizar y analizar los resultados numéricos.

2.8 Optimización por método de Nelder-Mead

Es un algoritmo de búsqueda directa que meramente compara valores funcionales; los valores de la función objetivo son tomados en un conjunto de puntos muestreados (simplex) y son usados para continuar el proceso. Desde su primera publicación en 1965, este algoritmo se ha convertido en uno de los métodos más ampliamente usados para la optimización no lineal sin restricciones (Universidad de Vigo-Departamento de Matemática Aplicada II).

El método Nelder-Mead trata de minimizar una función escalar de n variables usando sólo valores de la función, sin necesidad alguna de los valores de la derivada, ni implícita ni explícitamente (Universidad de Vigo-Departamento de Matemática Aplicada II).

Se define simplex n -dimensional como una figura geométrica en dimensión n de volumen no nulo, que es la envolvente convexa de $n+1$ puntos (Universidad de Vigo-Departamento de Matemática Aplicada II). Esto es, dados los puntos a_1, a_2, \dots, a_{n+1} , el simplex será (Universidad de Vigo-Departamento de Matemática Aplicada II):

$$\Delta = \left\{ x \in R^n / x = \sum_{i=1}^{N+1} \lambda_i \cdot a_i \text{ con } 0 \leq i \leq N + 1; 0 \leq \lambda_i \leq 1; \sum_{i=1}^{N+1} \lambda_i = 1 \right\} \quad \text{Ec. (16)}$$

Cada iteración de este método comienza con un simplex, especificado por sus $n+1$ vértices y los valores de la función asociados. Tras calcular uno o más puntos de prueba y evaluar la función en dichos puntos, la iteración dará como resultado un nuevo simplex, de tal manera que los valores de la función en los vértices satisfagan de alguna forma una condición de descenso o ascenso con respecto al simplex anterior (Universidad de Vigo-Departamento de Matemática Aplicada II).

Entre sus ventajas destacan (Universidad de Vigo-Departamento de Matemática Aplicada II):

- Experimenta grandes mejoras durante las primeras iteraciones.

- El método Nelder-Mead tiende a necesitar substancialmente menos evaluaciones de función que otros algoritmos de optimización.
- Es un algoritmo fácil de programar y sus etapas son sencillas de explicar.

Este método de optimización se encuentra ya implementado en el software COMSOL[®] como parte de su módulo de optimización.

3

Metodología

“Concentrate all your thoughts upon the work at hand. The sun’s rays do not burn until brought to a focus.”

Alexander Graham Bell – 1901

3.1 Validación de simulaciones

3.1.1 Eurodish[®]

3.1.2 WGA-500[®]

3.2 Elección de la configuración del concentrador

3.3 Simulaciones ópticas

3.4 Optimización del seguimiento solar

3.1 Validación de simulaciones

Para la simulación de nuestro sistema se utilizó el módulo de óptica del COMSOL[®], el cual hace un trazado de rayos y cuantifica energía recibida en forma de onda electromagnética en un cierto punto, dependiendo de la naturaleza de los objetos impactados con dicha irradiancia electromagnética.

COMSOL Multiphysics[®] es un software de simulación multiplataforma para aplicaciones de ingeniería. Se puede usar combinación de módulos para simular diseños y procesos basados en fenómenos electromagnéticos, mecánica estructural, acústica, mecánica de fluidos, transferencia de calor, ingeniería química, óptica, etc.

El módulo de óptica tiene la facilidad de liberar los rayos desde una fuente, desde una dirección dada o, incluso, mediante un horario solar establecido en ciertas coordenadas terrestres en determinada época del año. COMSOL[®] modifica la dirección de los rayos liberados mediante la Ec. (11):

$$n_r = n_i - 2 \cos(\theta_i) n_s \quad \text{Ec. (17)}$$

Dónde n_i es el vector de dirección de liberación de los rayos, n_s es el vector de dirección de la normal de la superficie reflectiva, θ_i es el ángulo de incidencia del rayo en la superficie reflectiva y n_r es el vector de dirección del rayo después de impactar con la superficie reflectiva. Asimismo, COMSOL[®] asigna a cada rayo una potencia de acuerdo a la potencia base establecida (se usó 1 kW/m² en todas las

simulaciones). Sin embargo, la evolución de la intensidad del rayo depende fuertemente a la curvatura del concentrador y al ángulo de incidencia en la superficie del concentrador para cada rayo. En las simulaciones de validación de metodología, los rayos solares fueron liberados en una dirección normal a la apertura de la parábola, por lo que no se necesitó orientar los concentradores en función de la posición solar en éstas simulaciones. A las simulaciones se agregaron parámetros de errores o disminución de energía que existen en la ingeniería solar, tales como el fenómeno de absorbanza, algunas perturbaciones angulares como el disco solar, la creación de conos de luz en los puntos de liberación, el error de pendiente, entre algunos otros como la polarización de la luz. Se mencionan estos últimos ya que son los que se usaron en el desarrollo de este trabajo.

Las simulaciones de validación se realizaron en base a dos discos parabólicos de los cuales se tiene suficiente información en la literatura: Eurodish[®] de SBP[®] y WGA-500[®] de WGAssociates[®]. Ambos discos parabólicos fueron modelados con las dimensiones que se reportaron en los trabajos aquí referenciados.

3.1.1 Eurodish[®]

El Eurodish[®] es un sistema de 12 paneles reflectivos idénticos, soportados del perímetro por una armadura de anillo. Cada panel consiste en dos capas de plástico de 1 mm de núcleo de espuma. En 2001, los primeros prototipos fueron instalados en la Plataforma Solar de Almería, España, equipados con el motor

Stirling Solo V-161[®], y desde entonces, varias unidades de Eurodish[®] han sido instaladas en muchos lugares alrededor del mundo (Coventry & Andraka, 2017).

Algunos de los datos de construcción y de desempeño del sistema Eurodish son los siguientes:

Tabla 3. Características del Eurodish[®]

Valores de construcción y desempeño	
Paraboloide de revolución	12 espejos
Área de espejos	60 m ²
Área proyectada	56.745 m ²
Diámetro	8.5 m
Distancia focal	4.5 m
Factor de intercepción	93%
Reflectividad	94 %
Área sombreada por las barras y el motor	3.3 m ² aproximadamente
Rendimiento total del concentrador	82 % ^a
Diámetro de apertura	15 cm ^b
Ángulo de borde	50.5°
Tasa de concentración pico	12730 ^c
^a = (Toscano, 2010). ^b = (Hafez et. al., 2017). ^c = (Mancini et. al., 2003).	

Tanto el sistema Eurodish[®] como el WGA-500[®] se dibujaron tanto en COMSOL[®] como en Solidworks[®] en base a la ecuación de distancia focal.

$$f = \frac{D}{4 \tan\left(\psi_{rim}/2\right)} \quad \text{Ec. (18)}$$

El diámetro del orificio central del Eurodish[®] se tomó como 1 m de longitud, ya que son 56.7 m² de área proyectada. Al obtener el área del orificio interno obtenemos un área de 3.1416 m².

$$D = \pi(1 \text{ m})^2 = 3.1416 \text{ m}^2 \quad \text{Ec. (19)}$$

Lo cual solo restaría 0.1584 m² de área sombreada por las barras de su misma estructura. Este dato fue de los pocos que no se pueden encontrar en la bibliografía.

La siguiente ecuación se utilizó para obtener valores de eficiencia óptica (Ec. 20):

$$\eta_{opt} = \varphi\rho\tau\alpha \quad \text{Ec. (20)}$$

Para obtener la eficiencia óptica se utilizan los valores de φ (factor de intercepción), ρ (reflectancia), τ (transmitancia) y α (absorbancia) dados por las características y el desempeño del colector.

A continuación se presentan imágenes del sistema Eurodish[®] en las Fig. 23 y 24 ya construido en base a los datos anteriores.

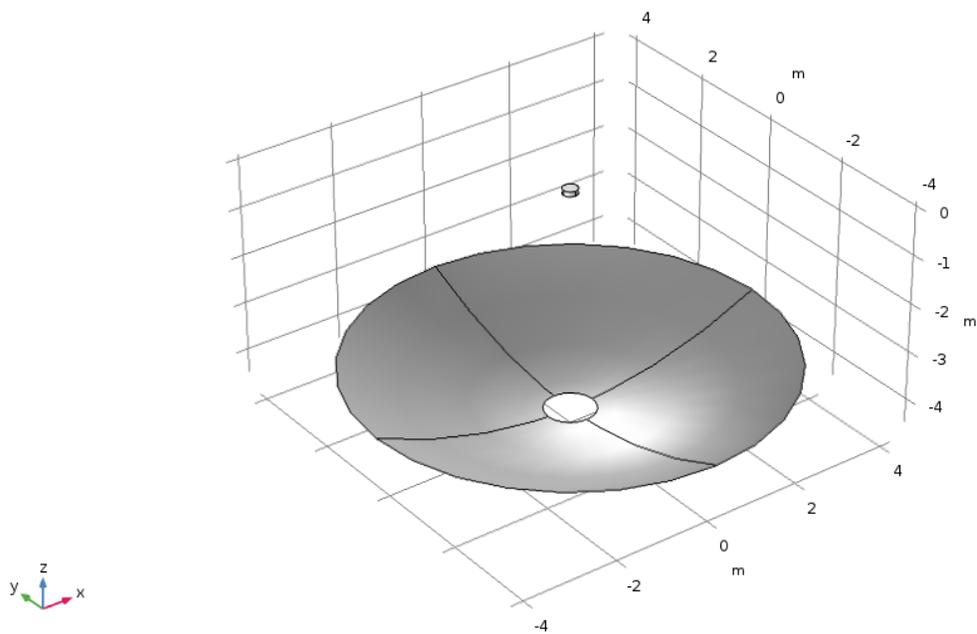


Fig. 23. Sistema Eurodish®.

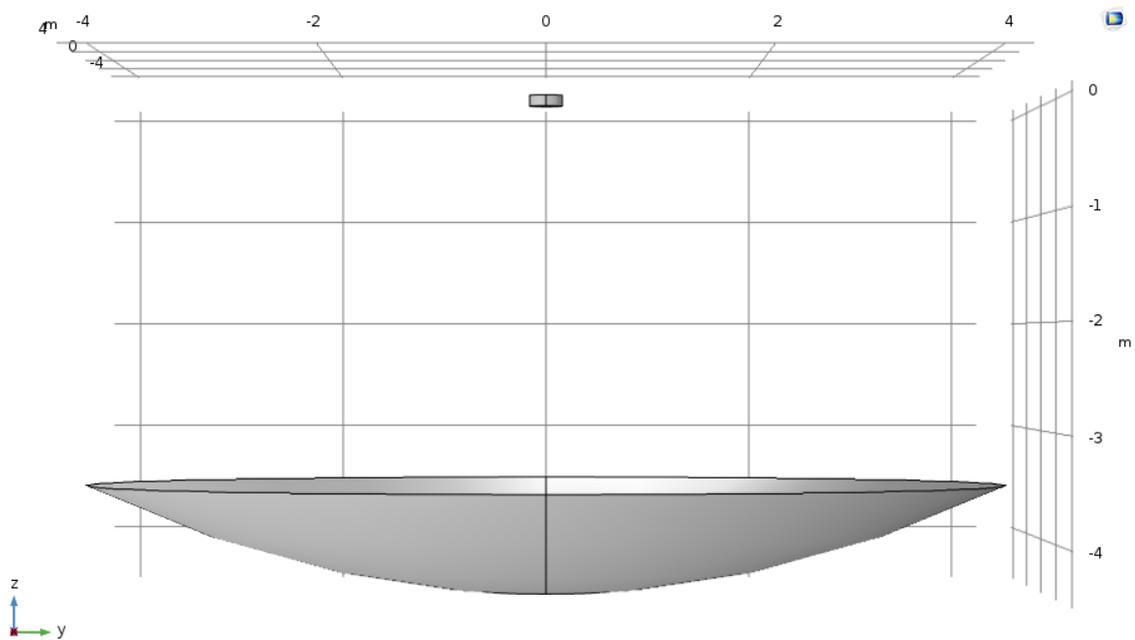


Fig. 24. Vista lateral del sistema Eurodish®.

Se muestra también en la Fig. 25 el parecido entre el sistema real y el construido.



Fig. 25. Modelo CAD utilizado para calibración de escenarios de simulación en COMSOL®.

Para modelar el sol como fuente de irradiación, se asumió el tamaño angular correspondiente al sol de 4.65 mrad. Para el error de pendiente del Eurodish® se estableció 2 mrad, de acuerdo a lo reportado por Wang et. al. (2015). El error de pendiente es la distorsión de la forma parabólica del concentrador debido a diversas cargas (por ejemplo, carga por viento)

La simulación consiste en un trazado de rayos que tiene como fuente el concentrador. Estos rayos se liberan en función de la posición solar establecida. Los rayos son cuantificados después en el plano focal.

3.1.2 WGA-500®

Los datos de construcción que se usaron para modelar el disco WGA-500® para el siguiente estudio son los siguientes:

Tabla 4. Características del WGA-500®.

Valores de construcción y desempeño	
Diámetro de apertura	8.7 m
Distancia focal	5.33 m
Ángulo de borde	45°
Área de apertura del concentrador	43.5 m ²
Reflectividad	94 %
Error de pendiente	1 mrad
Eficiencia óptica total	89 %
Factor de intercepción	<95 %
Tasa de concentración	>11000 a 1000 W/m ²
Datos reportados por WGAssociates	

A continuación se presentan imágenes en las Fig. 26 y 27 del sistema WGA-500® ya construido en base a los datos anteriores.

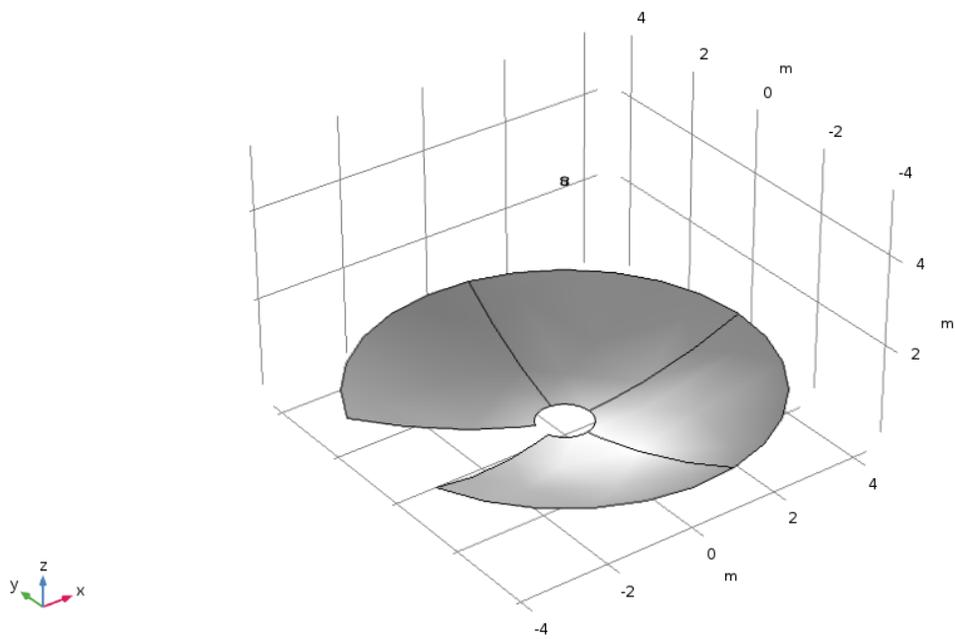


Fig. 26. Sistema WGA-500®.

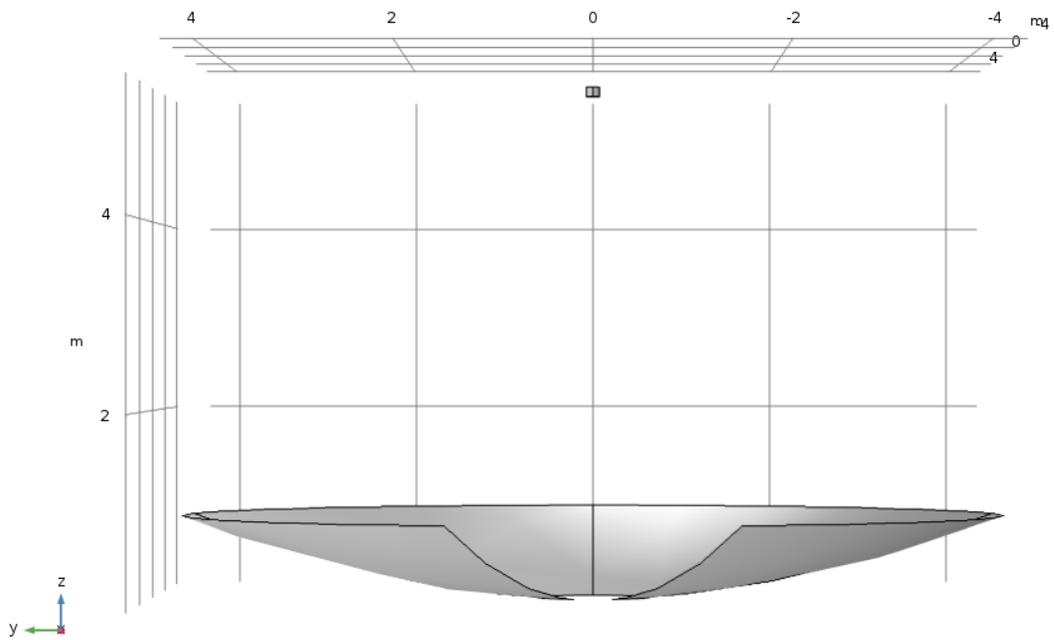


Fig. 27. Vista lateral del sistema WGA-500®.

En la Fig. 28 se puede apreciar el sistema real y el sistema construido en COMSOL®.

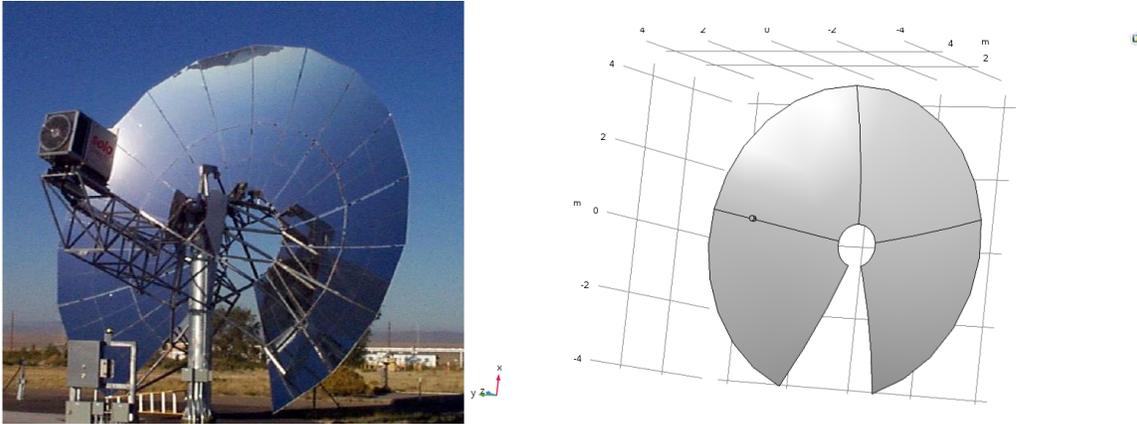


Fig. 28. Ilustración comparativa del WGA-500® entre sistema real y construido.

La simulación del sistema WGA-500® se ejecutó con 1 mrad de error de pendiente. Se estableció el mismo valor disco solar al de la simulación del Eurodish® (4.65 mrad).

Nuevamente, al igual que en el sistema Eurodish®, no se sabe con exactitud el tamaño de los cortes hechos en el sistema WGA-500®, por lo que el orificio y el corte al concentrador son aproximaciones al diseño original. Estos fueron aproximados con ayuda de las dimensiones del motor Stirling SOLO 161® y el número de facetas existentes en el disco, siendo cada una de ellas de 20°, aproximadamente. El valor que se tomó para su construcción fue de 20°.

Para validar el comportamiento del factor de intercepción se tomó una gráfica que muestra la evolución del mismo con respecto al diámetro de apertura seleccionado. La Fig. 29 muestra el comportamiento experimental del factor de intercepción del WGA-500[®] en función del diámetro de apertura.

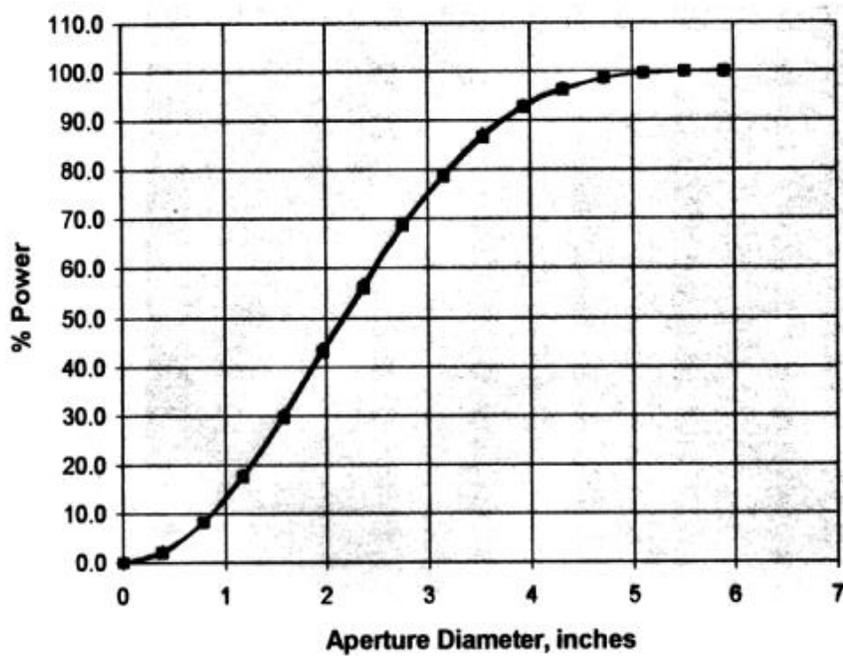


Fig. 29. Factor de intercepción para el concentrador WGA-500[®].

La Fig. 29 se digitalizó para poder tener valores precisos del comportamiento del factor de intercepción en función del diámetro de apertura.

El resultado de la digitalización de los datos provenientes de la literatura del WGA-500[®] se muestra en la Fig. 30.

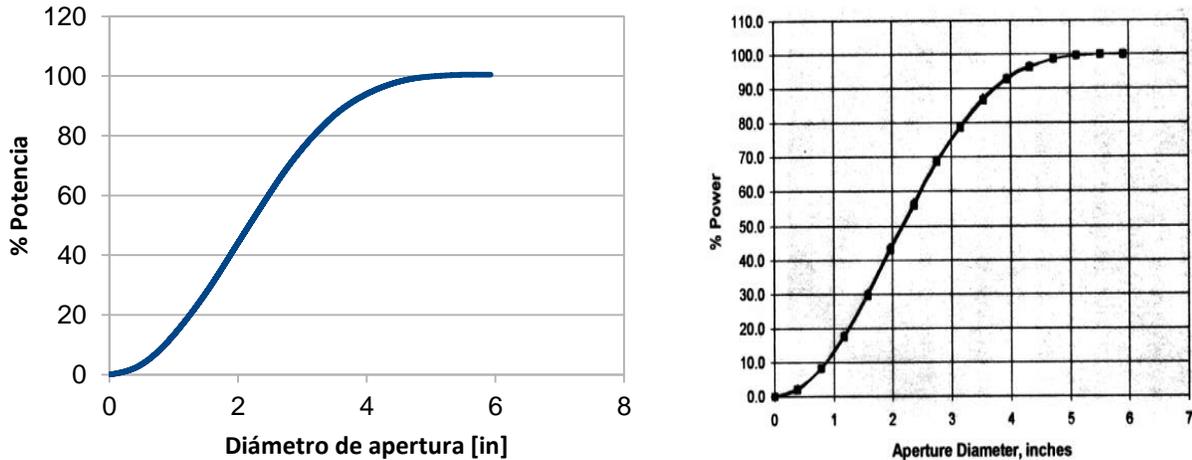


Fig. 30. Figura comparativa de digitalización del diagrama de factor de intercepción del WGA-500[®].

3.2 Elección de la configuración del concentrador

Al buscar una geometría o configuración de un concentrador solar de foco fijo se deben de tomar en cuenta ciertas condiciones que se deben respetar en este proyecto. Naturalmente, se debe crear un concentrador que busque evitar estructuras de soporte grandes y pesadas, ya que esto es uno de los costos más grandes que se tienen en la construcción de un sistema de alta concentración solar. Asimismo, se debe buscar una configuración que entregue buenos factores de concentración y un factor de intercepción elevado. Esto último debido a que se busca un concentrador de gama de temperatura alta lo que implica una buena eficiencia óptica total.

En un principio, se buscó emplear un disco parabólico convencional que siguiese el sol. Ruelas et. al. diseñaron un sistema concentrador de tipo Scheffler que utiliza un disco parabólico convencional que es orientado mediante una estructura de seguimiento hacia un receptor con 80.7° de inclinación (Ruelas et. al., 2016). En las Fig. 31 y 32 se muestran dos esquemas del STSC (Scheffler-Type Solar Concentrator).

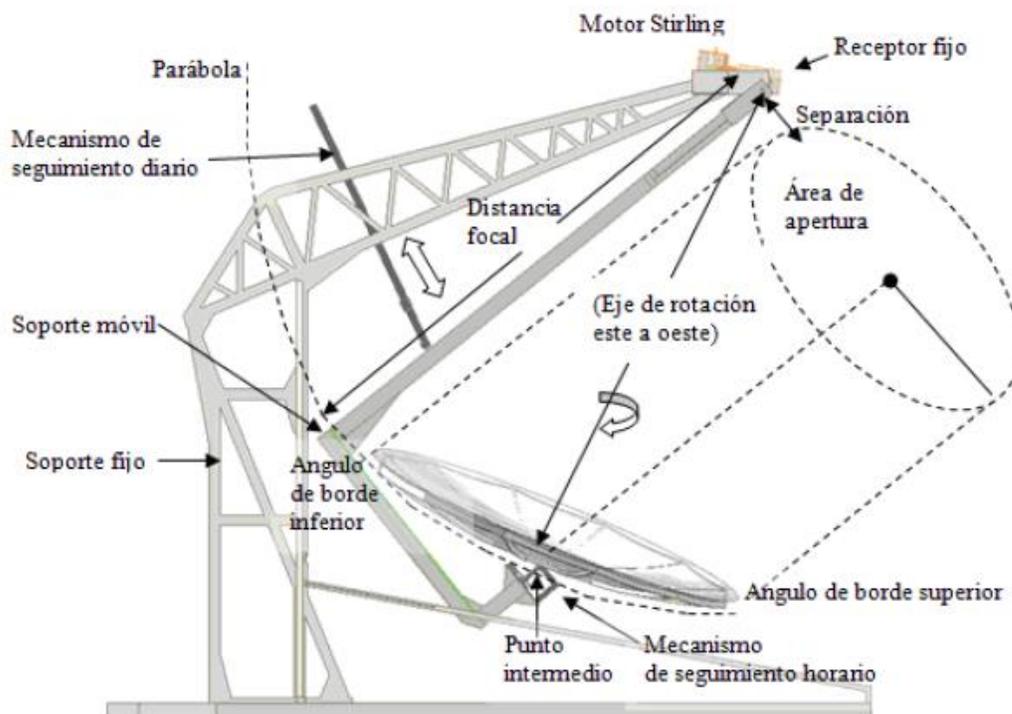


Fig. 31. Esquema del CSFF (Ruelas et. al., 2011).

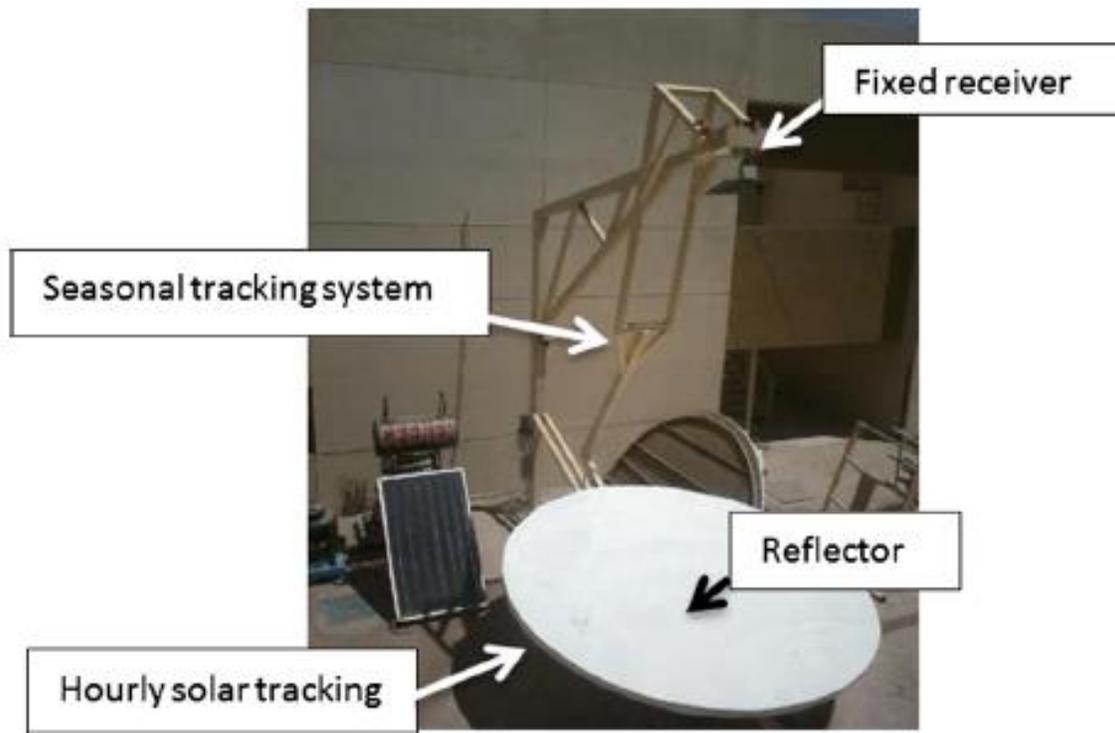


Fig. 32. Forma y componentes del STSC (Ruelas et. al., 2016).

Sin embargo, el diseño de este sistema no cumple con el requisito de una estructura ligera y compacta, a pesar de que cumple con la condición de siempre apuntar a un foco fijo.

Además de lo anterior, Ruelas et. al. reportaron la forma de la imagen solar y un fenómeno de alargamiento de la misma al medirla con una termografía (Ruelas et. al., 2014). Esto último puede afectar la concentración pico y la eficiencia óptica total de su sistema.

Durante el desarrollo de este trabajo se ha hablado de los concentradores Scheffler como una alternativa práctica y versátil para aplicaciones de temperatura media. Sin embargo, la curvatura de los discos Scheffler convencionales es, generalmente, muy poco pronunciada, generando factores pequeños de concentración y, por ende, temperaturas entre 200-300 °C.

Es por esto que se decidió diseñar un concentrador Scheffler para acoplarlo con un receptor de foco fijo de un motor Stirling y comprobar si se pueden alcanzar concentraciones similares al de discos parabólicos convencionales (de foco móvil) al aumentar más la profundidad del disco Scheffler. Reddy et. al. (2018) muestran en la Fig. 33 que entre más cercano el punto focal (f) se encuentre de la parábola de diseño mayor será el factor de concentración que se dé en el concentrador. Esto quiere decir que un paraboloides muy cerrado y alto es el más conveniente. En la Fig. 34 se muestra una figura que representa parábolas con diferentes distancias focales.

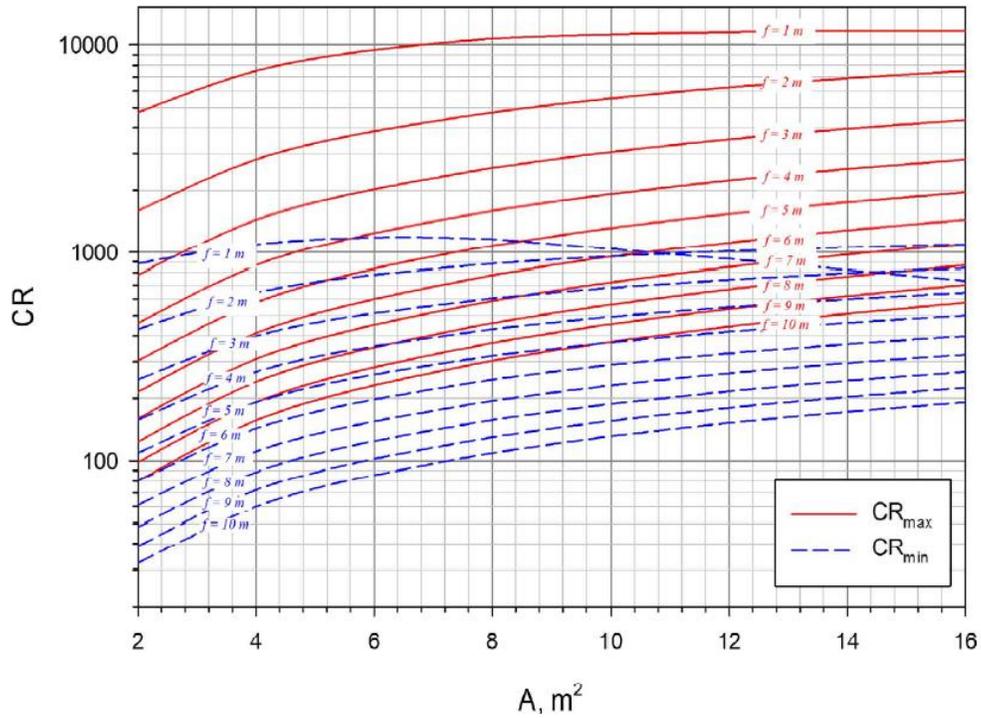


Fig. 33. Esquema de diseño para la determinación de factores de concentración mínimo y máximo (Reddy et. al., 2018).

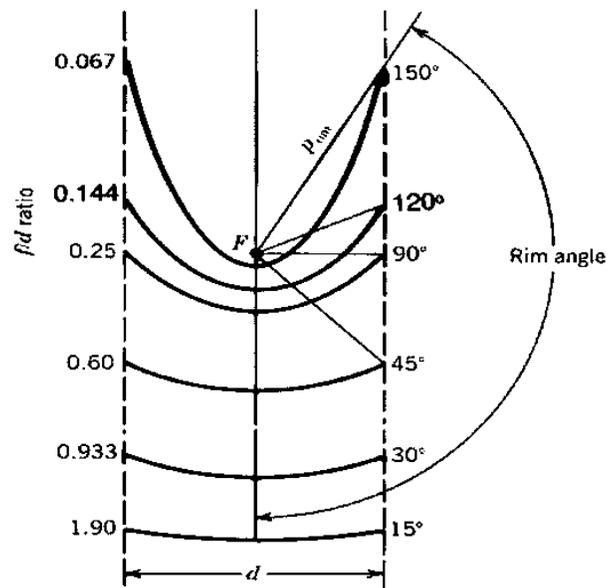


Fig. 34. Diferentes distancias focales para diferentes ángulos de borde.

La construcción de los discos parabólicos es regida por la ecuación general de la parábola y el concentrador Scheffler no es la excepción. Las ecuaciones de diseño de los concentradores Scheffler han sido especificadas en el Capítulo 2 en la sección 2.5.

La construcción del concentrador Scheffler fue basada en maximizar el área de apertura manteniendo una curva o ángulo de borde pronunciado y un sistema compacto. Estas condiciones darán lugar a una buena cantidad de energía introducida al sistema, una buena concentración y un sistema de concentración solar compacto y ligero.

Construyéndolo en COMSOL[®] con una distancia focal de 1 m, obtenemos el paraboloides que se representa en la Fig. 35.

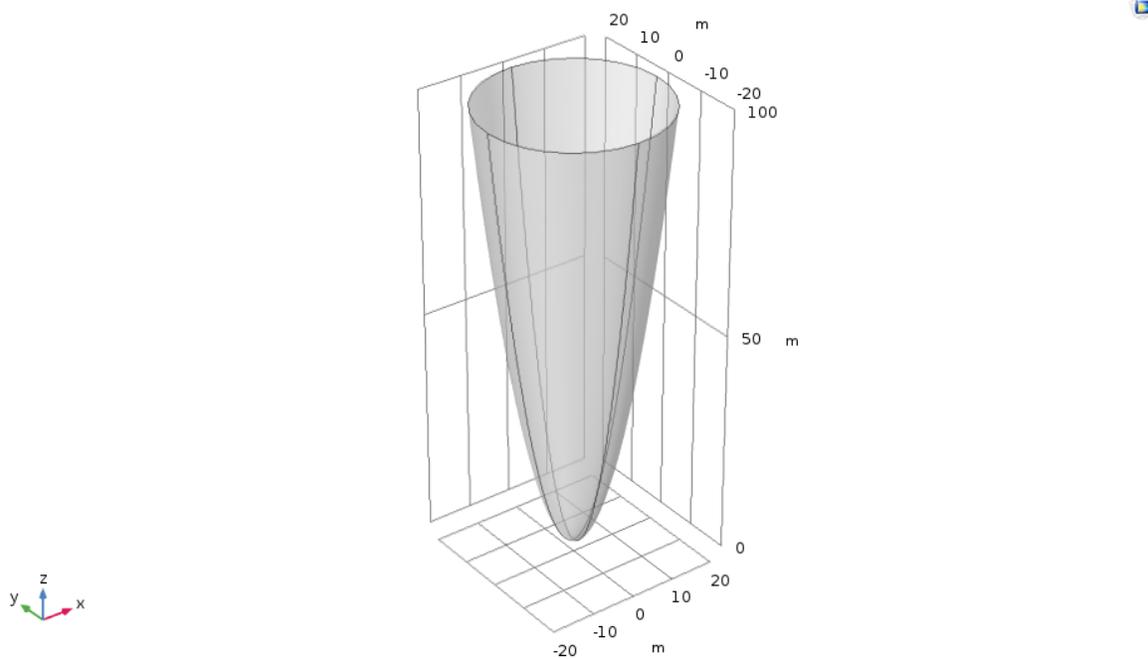


Fig. 35. Paraboloides de 1 m de distancia focal.

Después se procede a cortar el paraboloides para obtener la sección que se busca, dando como resultado el concentrador Scheffler. Se decidió hacer el corte a 45° . Esto debido a que mientras más se asemeje un disco Scheffler a un disco parabólico convencional, éste tendrá más factor de concentración. Sin embargo, se reduce el área de apertura del concentrador y, por lo tanto, menor energía ingresada al sistema. A continuación, en la Fig. 36, se presentan esquemas del paraboloides con cortes a diferentes ángulos.

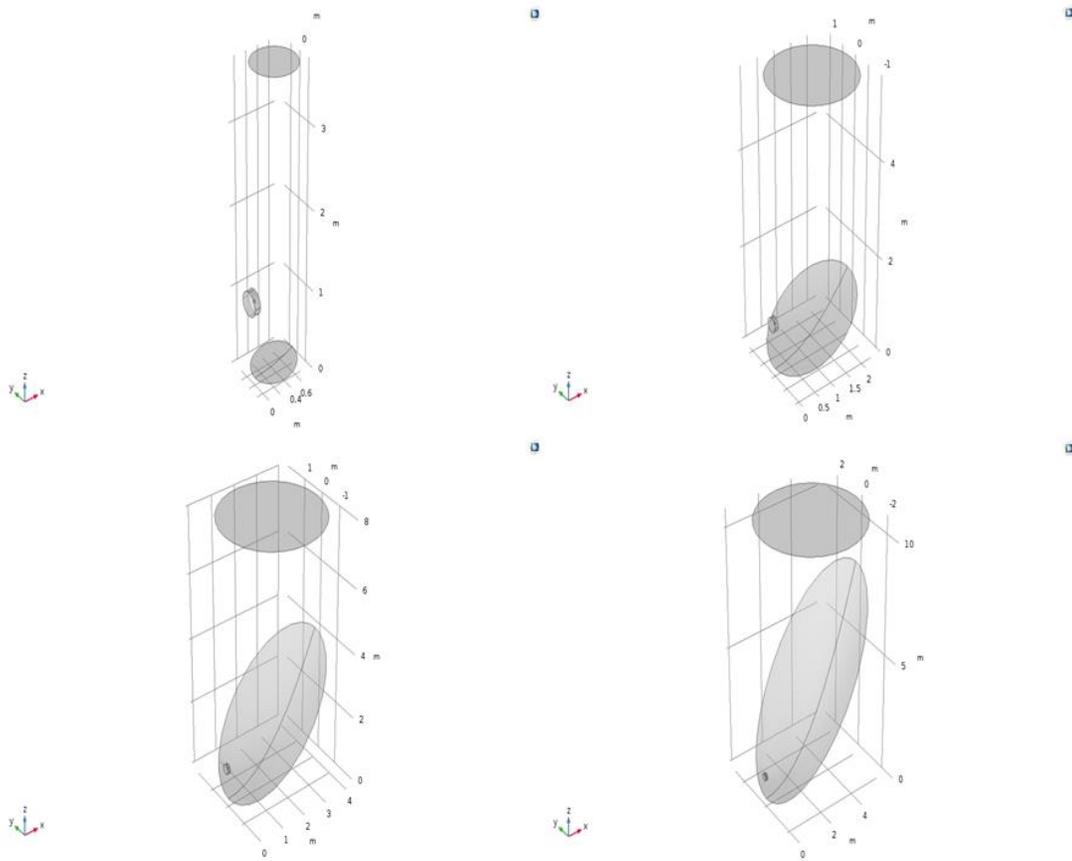


Fig. 36. Cortes a diferentes ángulos al paraboloides.

Para contabilizar el incremento el área de apertura se realizó una gráfica que cuantifica el diámetro de apertura creciente de acuerdo a los ángulos de corte del paraboloides (Véase Fig. 37).

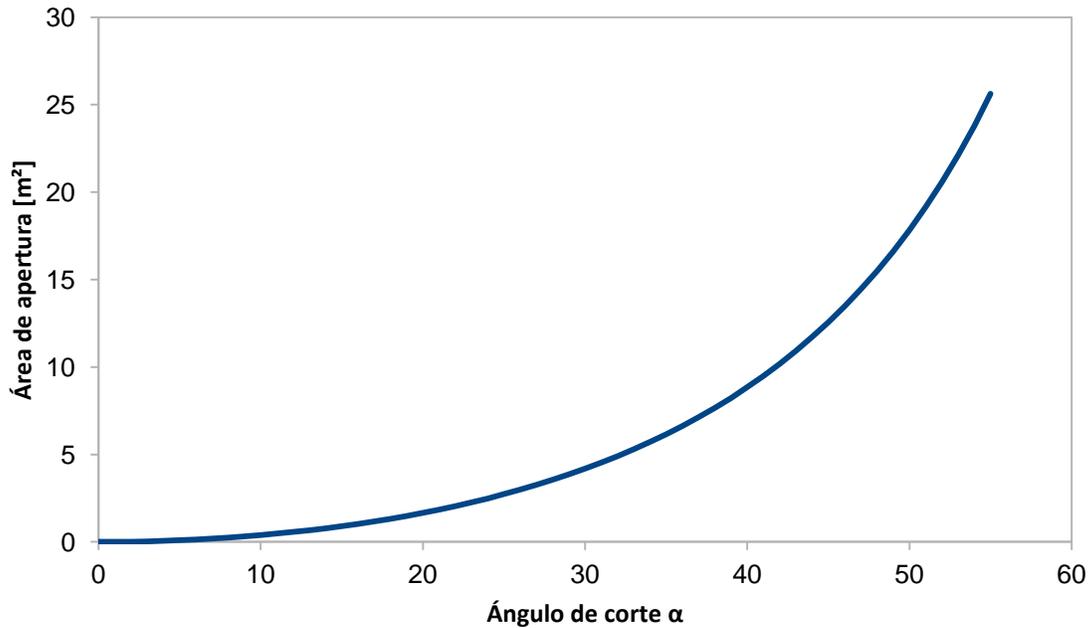


Fig. 37. Área de apertura en función del ángulo de corte.

Se tomó un área de apertura de 12.6 m². Los ejes mayor y menor del concentrador Scheffler son entonces $B_1 = 5.6644$ m y $B_2 = 4.0053$ m, respectivamente.

Para probar que la concentración decrece conforme se va alargando el concentrador Scheffler, es decir, cuando se aumenta el ángulo de corte del paraboloides, se realizaron simulaciones para cuantificar la disminución de la potencia entregada por los concentradores mostrados en la Fig. 36. Los resultados son mostrados en la Fig. 38. Las simulaciones para la Fig. 36 fueron iguales entre

ellas para los diferentes cortes. La dirección de los rayos incididos en el concentrador fue en dirección contraria a la normal de la apertura de la parábola. Esto último omite cualquier error relacionado a la orientación del concentrador, con el fin de obtener el resultado óptimo de concentración para los diferentes concentradores.

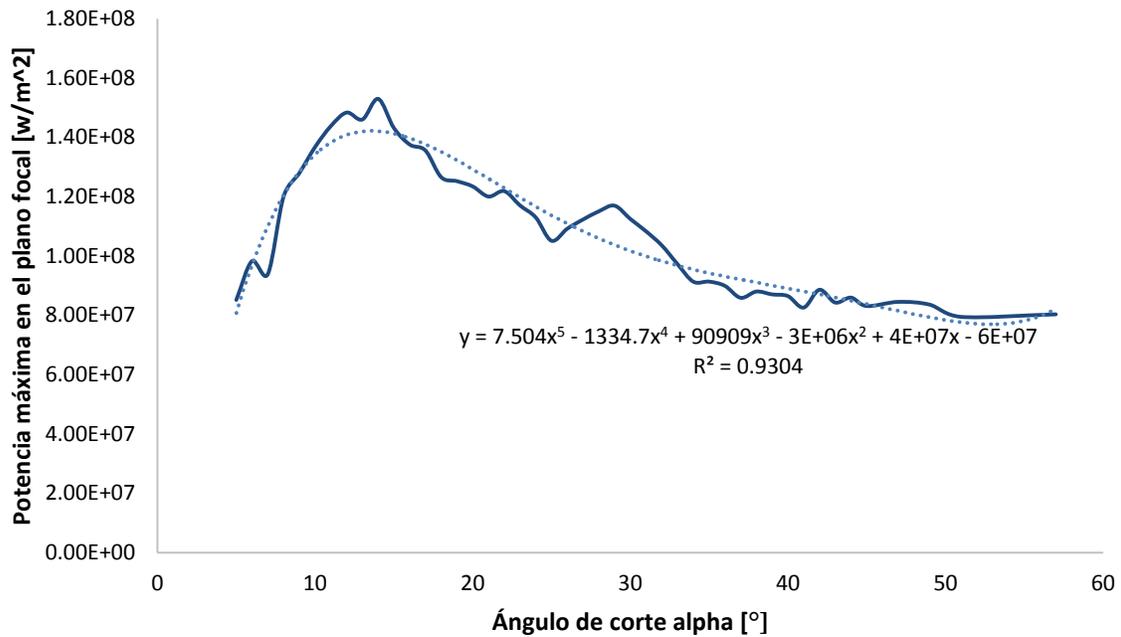


Fig. 38. Gráfica de máxima potencia en el plano focal contra ángulo de corte de parábola de diseño.

Las dimensiones finales de construcción del concentrador Scheffler escogido se encuentran en la Tabla 5. El corte de la parábola de diseño fue tomado así para tener un valor de 12.6 m^2 de área de apertura (esto quiere decir, una entrada de 12.6 kW al sistema a una irradiancia solar de 1 kW/m^2). La distancia focal fue tomada a 1 m con el fin de maximizar el factor de concentración que el

concentrador pudiera entregar. B_2 está en función del área de apertura, en base a la Ec. (6) del Capítulo 2.5. B_1 está en función de B_2 y el ángulo de corte de la parábola, según la Ec. (7) del Capítulo 2.5.

Tabla 5. Dimensiones de concentrador Scheffler

Dimensiones de construcción del concentrador Scheffler	
B_1	5.6644 m
B_2	4.0053 m
Área de apertura	12.6 m ²
alpha	45°
Distancia focal	0.9999 ≈ 1 m
Diámetro de apertura del receptor	30 cm

El concentrador Scheffler escogido se muestra en la Fig. 39, 40 y 41.

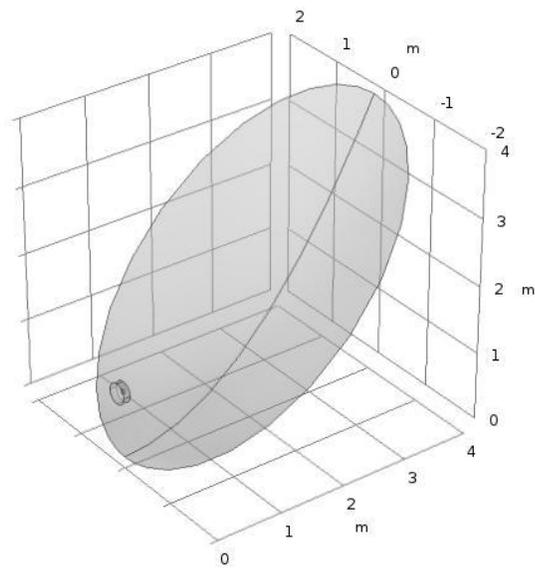


Fig. 39. Sistema concentrador Scheffler.

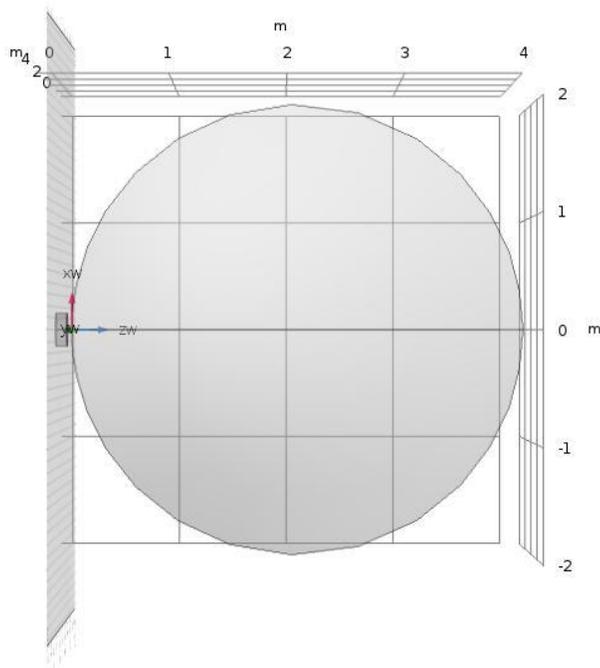


Fig. 40. Vista superior del sistema.

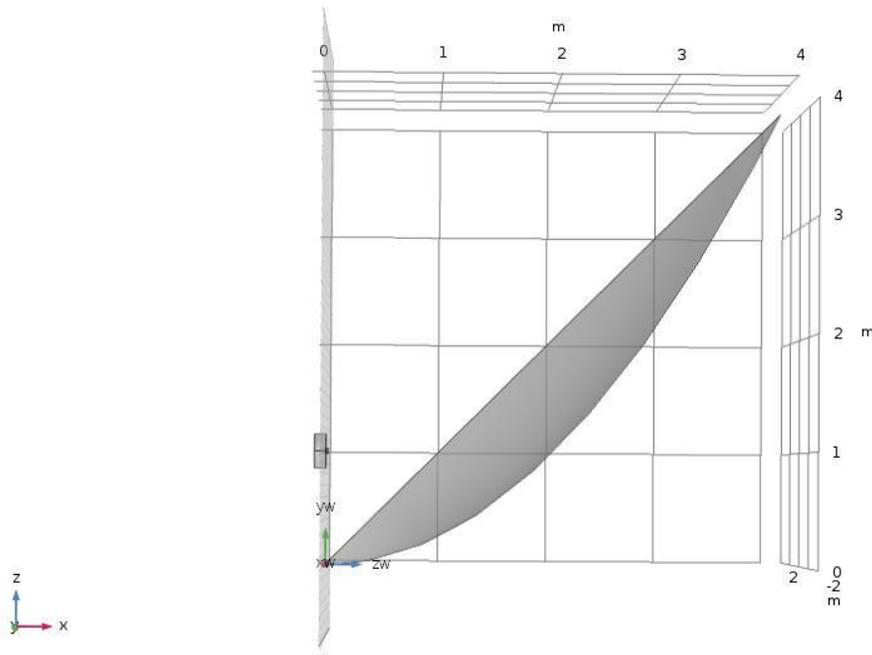


Fig. 41. Vista lateral del sistema.

El diámetro de apertura del receptor se dimensionó a 30 cm buscando maximizar el factor de intercepción del sistema y, por ende, la eficiencia óptica total del sistema. Sin embargo, durante el desarrollo de este proyecto no se realizó ninguna optimización de la posición receptor. Esto último incluye su área, conversión térmica, pérdidas térmicas, forma, materiales, etc.

3.3 Simulaciones ópticas

Primeramente se debía confirmar que sin ningún error incluido en la simulación todos los rayos debían concentrarse en el punto focal. De lo contrario, habría un error en el modelo. Se realizó una simulación sin errores para verificar que se empieza desde un punto en donde la simulación es ideal.

Las simulaciones del sistema Scheffler se realizaron en 3 escenarios diferentes del año: en ambos solsticios y en el equinoccio (21 de junio, 21 de diciembre y 20 de marzo, respectivamente, en el año 2017). Se realizó así ya que ambos solsticios determinan el dominio en el cual se va a mover el Sol durante todo el año para una ubicación geográfica determinada. Asimismo, el equinoccio representa la mitad entre ambos solsticios y, por tanto, nos da un comportamiento medio entre ambos. La ubicación que se tomó para la simulación de este trabajo fue en la ciudad de Chihuahua, Chihuahua, México. Las coordenadas geográficas que se tomaron fueron 28.633° en latitud y -106.069° en longitud. Las zonas horarias que se tomaron fueron las que se manejan en el estado de Chihuahua durante el año (-6 y -7 +UTC). En la Fig. 42 se muestra el dominio solar de esta ubicación. Durante el desarrollo de este proyecto se utilizó la calculadora solar proporcionada por Torsten Hoffmann, en el sitio www.sonnenerlauf.de, para obtener los ángulos solares a determinadas horas.

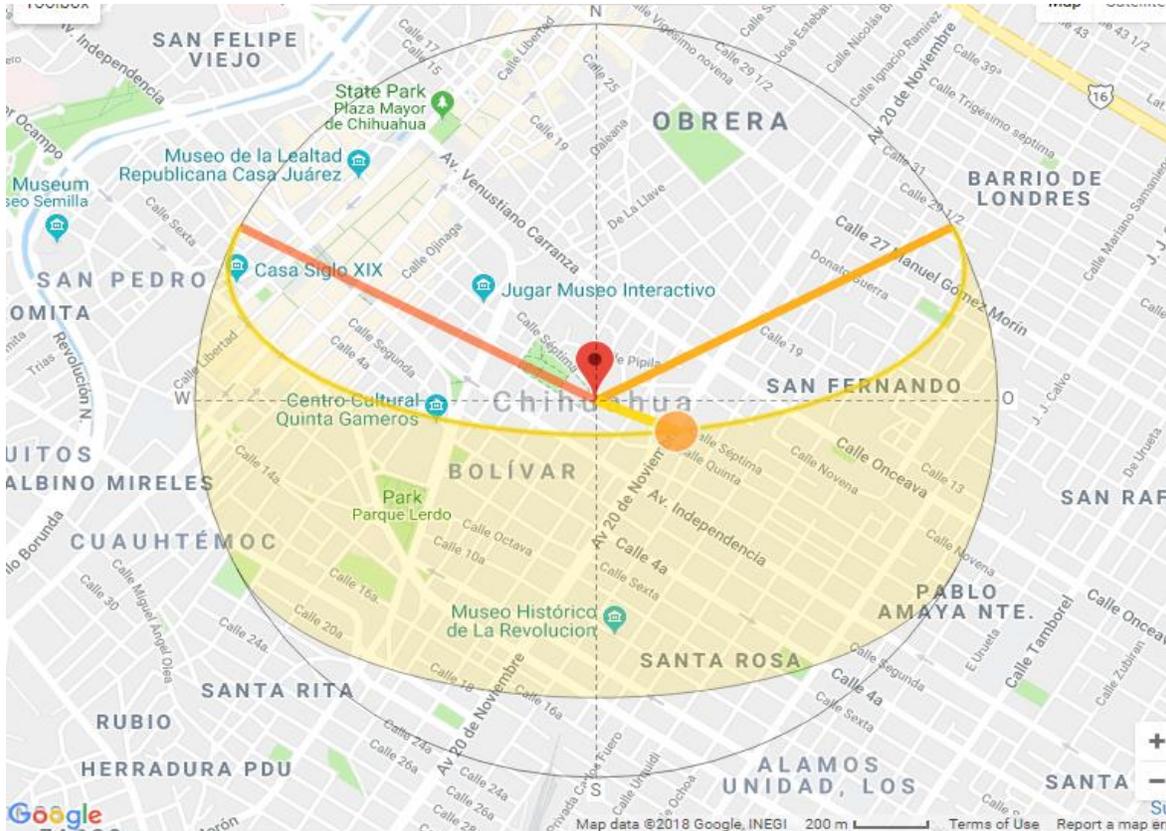


Fig. 42. Dominio solar durante el año 2017.

Se realizaron optimizaciones a 3 horas diferentes de cada uno de estos días con el fin de realizar un seguimiento solar óptimo. Ya que el movimiento a través de un solo día es simétrico, sólo bastan 3 simulaciones con diferente posición solar antes del medio día para conocer el movimiento del concentrador Scheffler a través de un día completo: una al principio de la mañana, otra entre el principio de la mañana y el medio día solar y otra al medio día solar.

El coeficiente de absorción que se tomó para la realización de las simulaciones fue de 0.06, ya que es el valor de una calidad de superficie buena en cuanto a superficies reflectivas (el sistema Eurodish® y WGA-500® tienen esta reflectividad-

absorción). El valor de la irradiancia que se tomó fue de 1000 W/m^2 , por lo que el concentrador Scheffler tendrá un desempeño menor al reportado en este trabajo al disminuir esta irradiancia solar.

Los errores que se tomaron fueron los mismos que se introdujeron a la simulación del Eurodish[®] y el WGA-500[®].

Durante la realización del proyecto se simuló el sistema con orientación sur. No obstante, se realizaron las mismas simulaciones con orientación norte, buscando verificar que la orientación del sistema hacia el sur era la mejor alternativa.

Se propusieron 3 rotaciones diferentes para orientar el disco Scheffler adecuadamente en función de la posición solar. En las Fig. 43, 44 y 45 se muestran las diferentes rotaciones propuestas en el disco Scheffler. La rotación solar se realiza con respecto al eje x, la rotación azimut con respecto al eje z y la rotación altura con respecto al eje y.

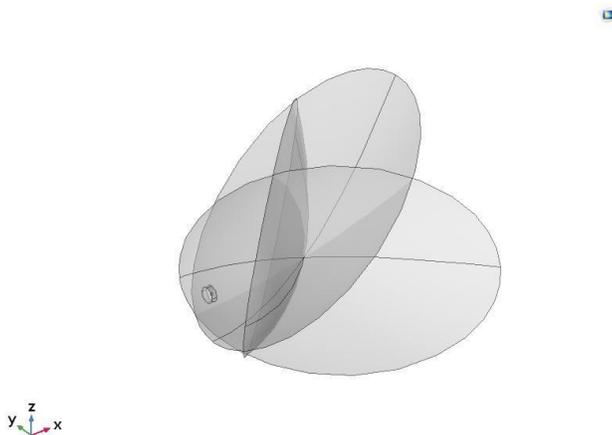


Fig. 43. Rotación "Solar" del concentrador Scheffler.

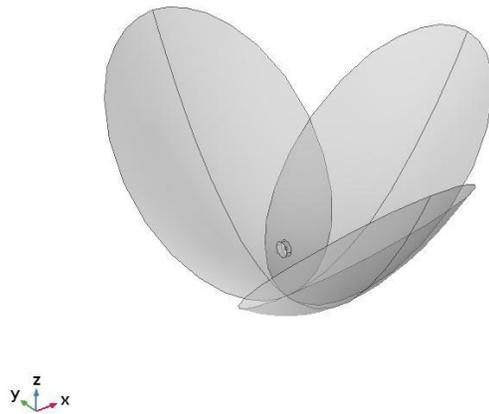


Fig. 44. Rotación azimutal del concentrador Scheffler.

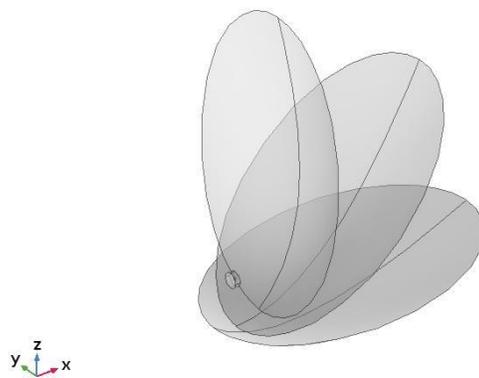


Fig. 45. Rotación de altura del concentrador Scheffler.

En un principio se optó por tener solamente el movimiento azimutal y de altura, como cualquier otro concentrador de disco parabólico convencional. Sin embargo,

éstos no fueron suficientes y se tuvo que agregar la rotación “solar” para tener un seguimiento adecuado del Sol.

3.4 Optimización del seguimiento solar

Para comprobar el potencial máximo del concentrador Scheffler se debía optimizar la posición e inclinación del mismo frente al movimiento solar. De lo contrario, jamás se podría comprobar la máxima concentración y factor de intercepción que alcanzaría este sistema.

Un aspecto clave de los discos Scheffler es que su área de apertura debe orientarse al sol. Es decir, el disco Scheffler debe parecer un círculo visto desde la perspectiva del sol.

Para lograr esto, se utilizó el módulo de optimización del COMSOL[®] para alcanzar los óptimos de estas dos variables. El método de optimización que se empleó fue el método numérico de Nelder-Mead.

Para poder optimizar el factor de concentración de una manera adecuada se tuvo que plantear una función objetivo que se acercara al comportamiento normal que se obtiene en el plano focal de un concentrador solar parabólico. Este comportamiento generalmente se da como una curva gaussiana en los planos focales de los concentradores parabólicos convencionales. En el sistema Eurodish[®] se obtiene una curva gaussiana en el plano focal (Véase Fig. 50). En la Fig. 46 se muestra la forma del comportamiento que se tiene en el plano focal del sistema WGA-500[®]. En esta figura se grafica la potencia interceptada en W/mm²

en el plano focal. Como podemos observar esta última también muestra un comportamiento de una curva gaussiana. Por lo tanto, es el comportamiento que se buscó en la modelación de la función objetivo para la optimización.

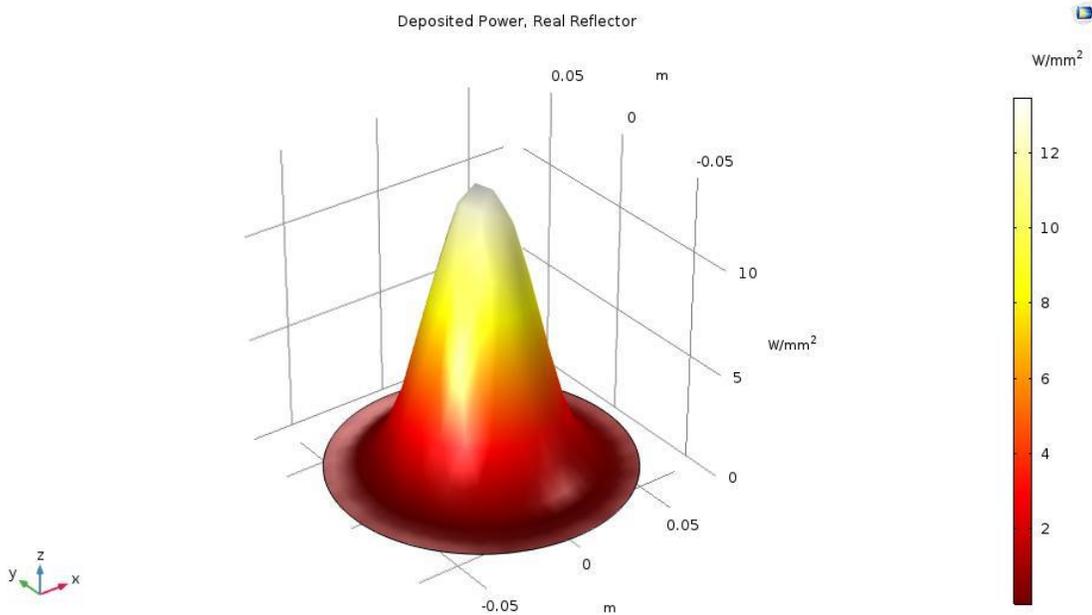


Fig. 46. Comportamiento del plano focal en el WGA-500®.

La función “ponderación” que se propuso fue la siguiente:

$$P(y, z) = e^{\left(\frac{-\sqrt{(y-y_{target})^2 + (z-z_{target})^2}}{diam}\right)^2} \quad \text{Ec. (212)}$$

La función ponderación tiene la forma de la Fig. 47 cuando se grafica con los datos de la Tabla 6. Las variables y_{target} y z_{target} son el centro del plano focal del sistema Scheffler. La variable $diam$ es el ancho de la curva gaussiana que se producirá, siendo esta última una variable muy importante para lograr una buena concentración en la optimización.

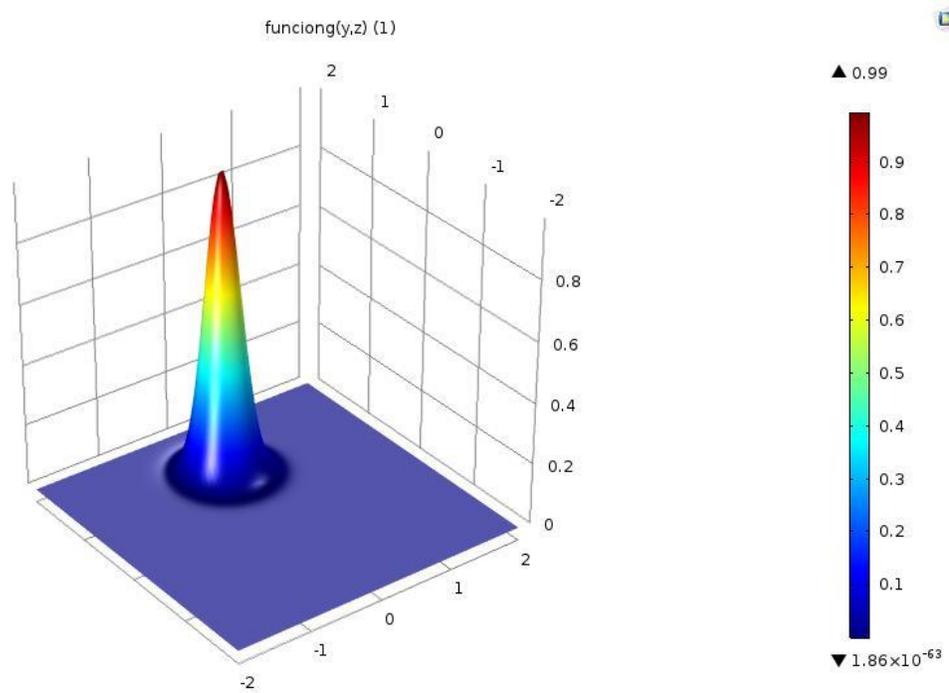


Fig. 47. Forma de función “ponderación”.

Tabla 6. Datos para función "ponderación" de la Fig. 50.

Datos de función “ponderación”	
y	Límite inferior = -2 Límite superior = 2
z	Límite inferior = -2 Límite superior = 2
ytarget	0 m
ztarget	1 m
diam	30 cm
n	2

Cuando se modifica la variable *diam* a 3 cm la gráfica que se produce es la Fig.

48.

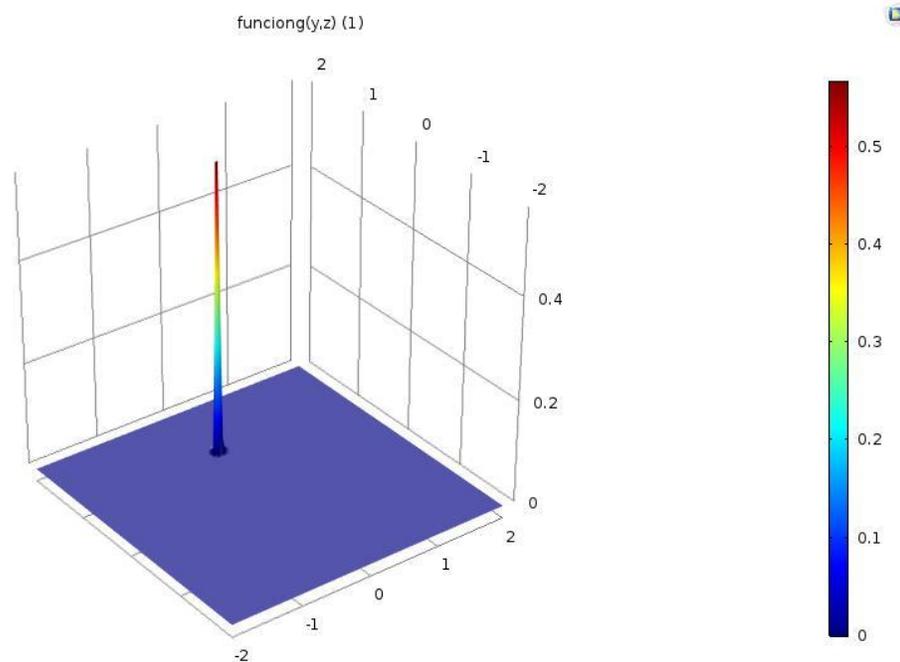


Fig. 48. Forma de la función “ponderación” modificada.

Como se puede observar, esta función puede modificar su ancho mediante la modificación de la variable *diam*. Esto quiere decir que se comporta idénticamente a un factor de concentración. Para obtener una concentración elevada se necesita introducir la mayor energía posible en la menor área posible. Es por eso que esta función “ponderación” propuesta es la función necesaria para optimizar la concentración en el plano focal y, por lo tanto, obtener los ángulos ideales de inclinación del concentrador Scheffler. Sin embargo, al empezar a optimizar, se encontró que optimizar esta función no era suficiente para un correcto desempeño del sistema, ya que el factor de intercepción no siempre fue el óptimo. Debido a esto, se añadió la variable de factor de intercepción a la optimización, optimizando así simultáneamente ambas variables.

4

Resultados

“Juzga a un hombre por sus preguntas más que por sus respuestas”

Voltaire

4.1 Validación de Simulaciones

4.1.1 Eurodish[®]

4.1.2 WGA-500[®]

4.2 Simulación ideal

***4.3 Concentración y factores de
intercepción (Orientación sur)***

***4.4 Concentración y factores de
intercepción (Orientación norte)***

4.1 Validación de simulaciones

4.1.1 Eurodish®

Al ejecutar la simulación de validación de metodología del Eurodish® podemos obtener resultados muy parecidos a los reportados en la literatura. Las Fig. 49 y 50 muestran dichos resultados.

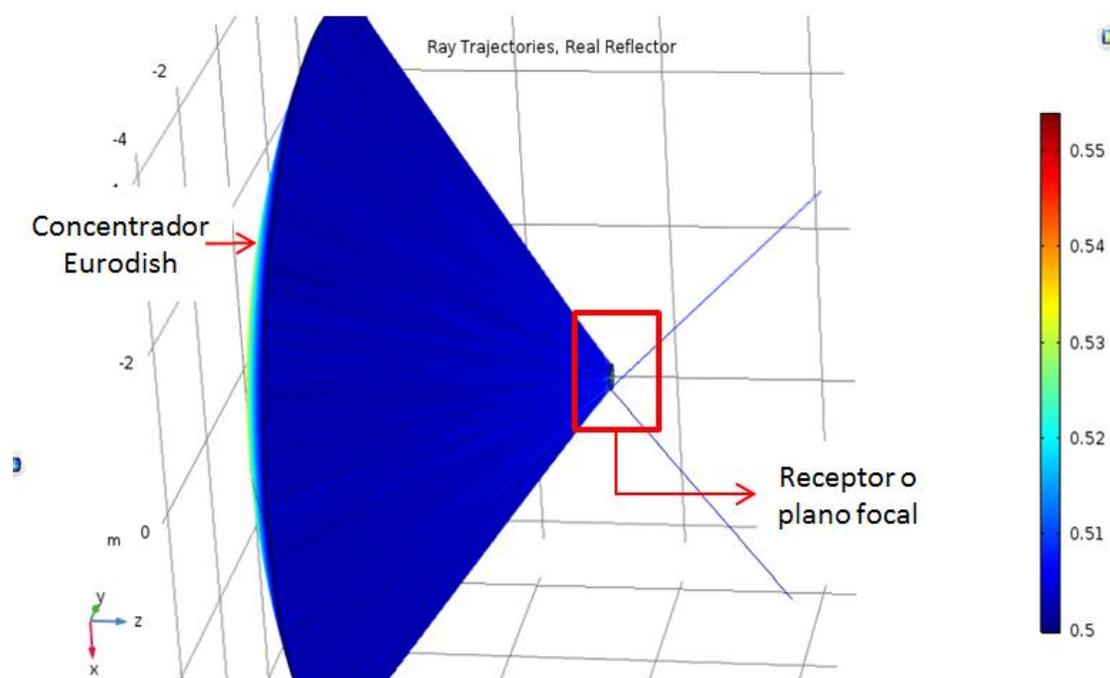


Fig. 49. Trazado de rayos de simulación del Eurodish®.

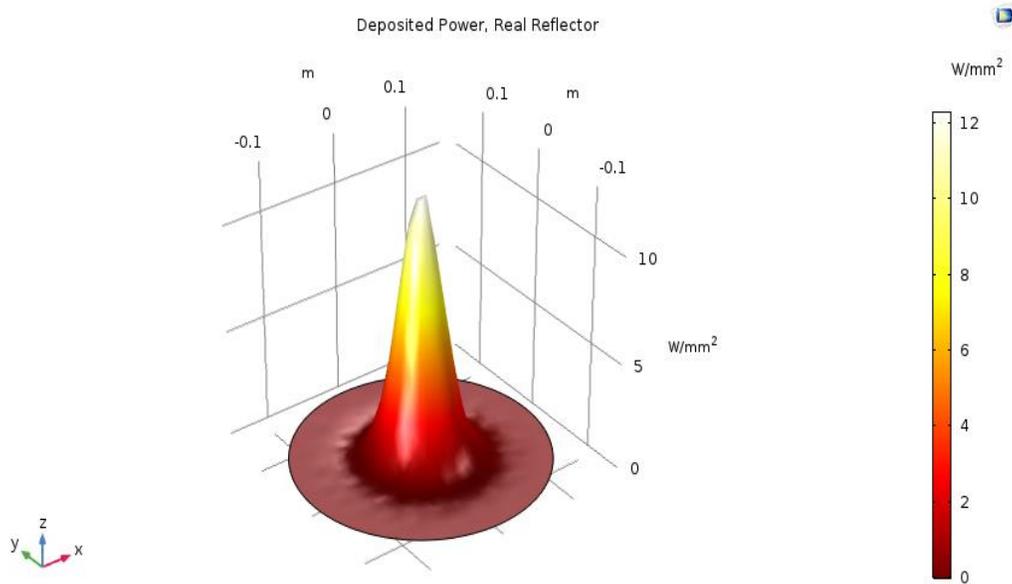


Fig. 50. Flux de irradiancia solar sobre el plano focal del Eurodish®.

La simulación resultó exitosa en cuanto al factor de concentración. En la simulación se obtiene un factor de intercepción de 0.9399, el cual solo supera por un pequeño porcentaje al valor reportado en literatura (93 %, reportado por Toscano et. al.).

$$\varepsilon_{abs} = |93 - 93.99| = 0.99 \quad \text{Ec. (22)}$$

$$\varepsilon_{rel} = \frac{\varepsilon_{abs}}{|valor\ real|} = \left(\frac{0.99}{93}\right) * 100 = 1.06 \% \quad \text{Ec. (23)}$$

Sin embargo, en la calidad o eficiencia óptica se presenta diferencia ya que el Eurodish® cuenta con 82% de eficiencia óptica total, mientras que en la simulación resulta con 88.36%.

Esta diferencia puede deberse a algunos errores que no se toman en cuenta en la simulación, como lo son los errores de seguimiento, estructurales, el del alineamiento del receptor, entre otros.

En cuanto a concentración, la simulación de validación de metodología ejecutada con 2 mrad de error de pendiente también fue exitosa ya que se obtuvieron 12865 soles de concentración, este dato coincide con el valor reportado por Mancini et. al. (12730 soles), a lo que corresponde una diferencia de 1.060 %.

Igualmente no se ve diferencia significativa en ninguno de estos dos valores.

4.1.2 WGA-500[®]

La simulación se ejecutó con los mismos datos reportados en la literatura del WGA-500[®]. La simulación reprodujo exitosamente el comportamiento del WGA-500[®] con diferencias que podían esperarse. En la Fig.51 podemos observar una gráfica comparativa entre los valores experimentales tomados de la bibliografía y los obtenidos en la simulación del WGA-500[®].

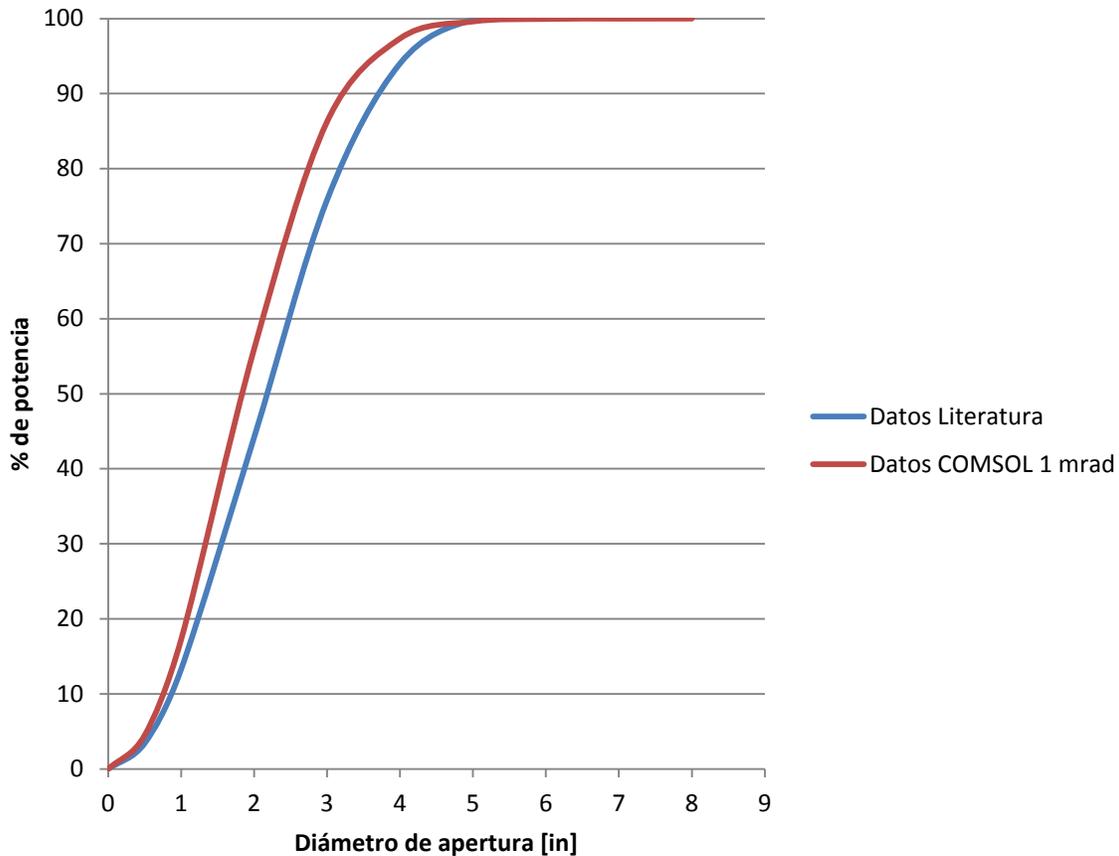


Fig. 51. Simulación del factor de intercepción contra diámetro de apertura del WGA-500[®].

Los datos que resultaron de la simulación tuvieron un comportamiento muy parecido a los datos reportados experimentalmente, según la Fig. 51. Esto se debe a que el módulo óptico no considera otro tipo de errores que pueden existir en la construcción de un sistema de concentración solar. Sin embargo, esto nos indica que el comportamiento “ideal” que resulta de la simulación y el comportamiento real del WGA-500[®] no son muy diferentes, por lo que se puede asumir al WGA-500[®] con muy pocos errores de seguimiento, de pendiente, de alineación, entre otros errores asociados a los sistemas de concentración solar.

En cuanto a la concentración solar, en la simulación se obtienen 13729 soles de concentración, lo cual coincide con el valor reportado en la bibliografía (tasa de concentración pico > 11000 a W/m², reportado por WGAssociates®)

Mediante esta comparativa se ha validado el método numérico empleado en COMSOL Multiphysics® y la metodología de simulación utilizada.

4.2 Simulación Ideal

Para poder sustentar una adecuada construcción del concentrador Scheffler se decidió realizar una simulación “ideal” para confirmar que en una simulación con ningún error (i.e. de seguimiento, de disco solar, de pendiente, de alineación, entre otros) se obtiene un punto de incidencia infinitesimal de alta concentración en el plano focal. Los errores que se eliminaron fueron los del tamaño angular solar (el cual está dado por el Sol), las correcciones de fuente finita (se eliminó la creación de conos de luz en los puntos de liberación), absorción y el error de superficie (i.e. error de pendiente). En las Fig. 52 y 53 se muestran las gráficas de la simulación ideal. Se obtuvo una simulación ideal y, por lo tanto, una correcta construcción y modelado del concentrador Scheffler. De aquí en adelante, se pudo proceder a efectuar cálculos con los errores que se habían establecido anteriormente, en las simulaciones posteriores del concentrador Scheffler.

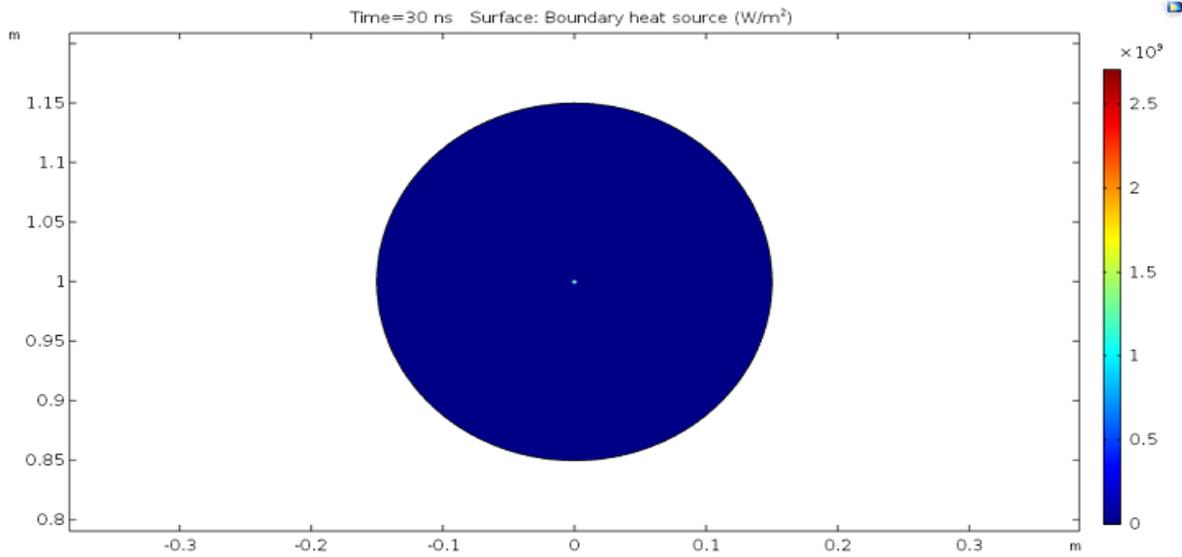


Fig. 52. Plano focal de simulación ideal con punto infinitesimal de intercepción.

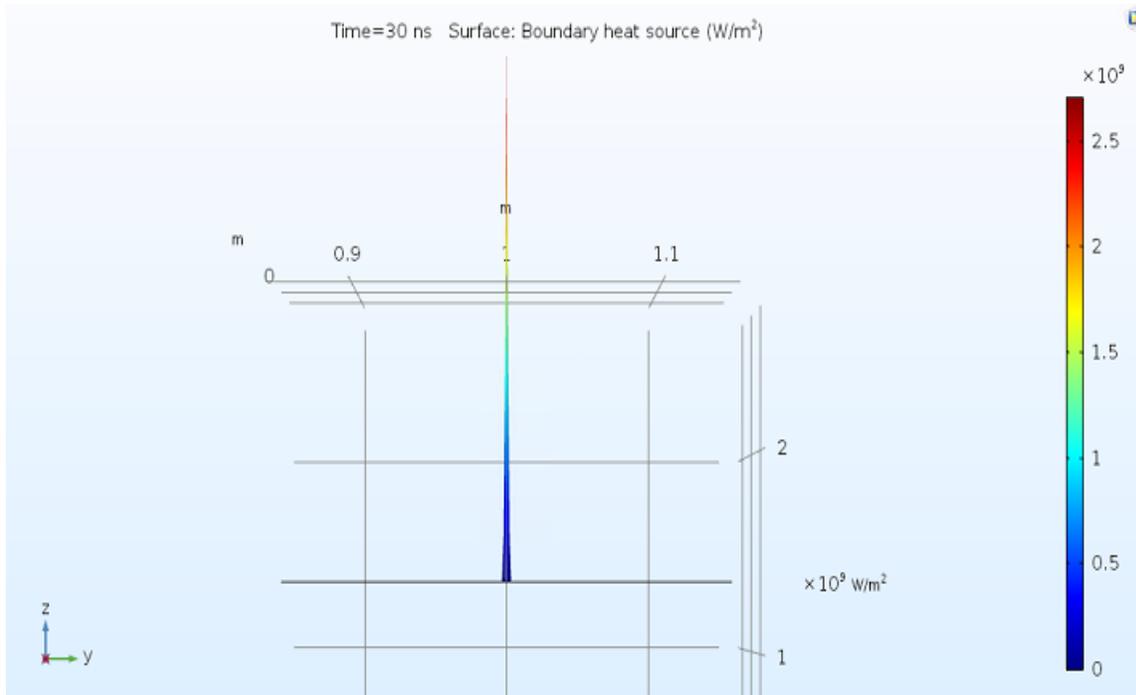


Fig. 53. Gráfica 3D de plano focal de simulación ideal.

La realización de esta simulación es relevante, ya que ésta confirma que efectivamente el concentrador Scheffler y su orientación con respecto a la fuente

producen un punto focal infinitesimal incidente en el plano focal. De ahí entonces, podemos confirmar una adecuada construcción del concentrador Scheffler.

4.3 Concentración y factores de intercepción (Orientación sur)

Se empezará mostrando los resultados que se dieron en la simulación del disco Scheffler orientado hacia el sur y en el solsticio de verano del 2017.

En general, los resultados que se tienen en verano son los mejores, ya que el sol alcanza su mayor altura durante este periodo y, por lo tanto, el disco no debe inclinarse en la rotación de altura para orientar su área de apertura hacia él. También, en el verano, el disco es funcional a cualquier hora del día, teniendo variaciones en su desempeño en función de la hora del día. En las Fig. 54, 55 y 56 se muestran mapas de colores de la densidad de potencia e imagen solar de la simulación en el solsticio de verano a las 7 a.m.

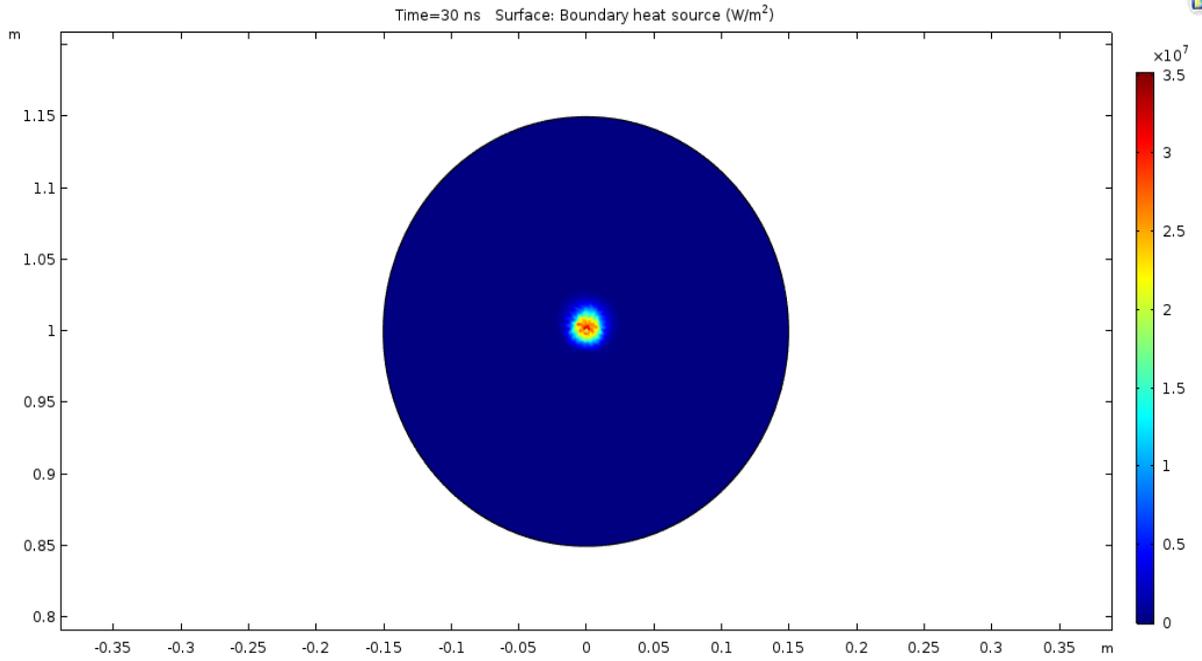


Fig. 54. Mapa de colores de densidad de potencia en el plano focal del receptor en el solsticio de verano a las 7 a.m.

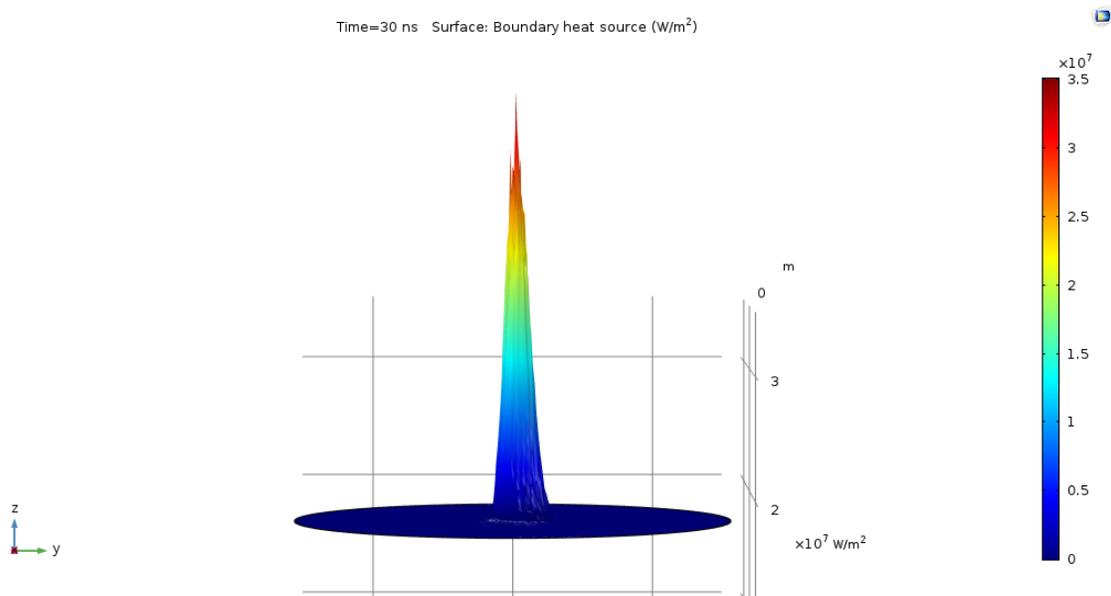


Fig. 55. Densidad de potencia 3D en el plano focal en el solsticio de verano a las 7 a.m.

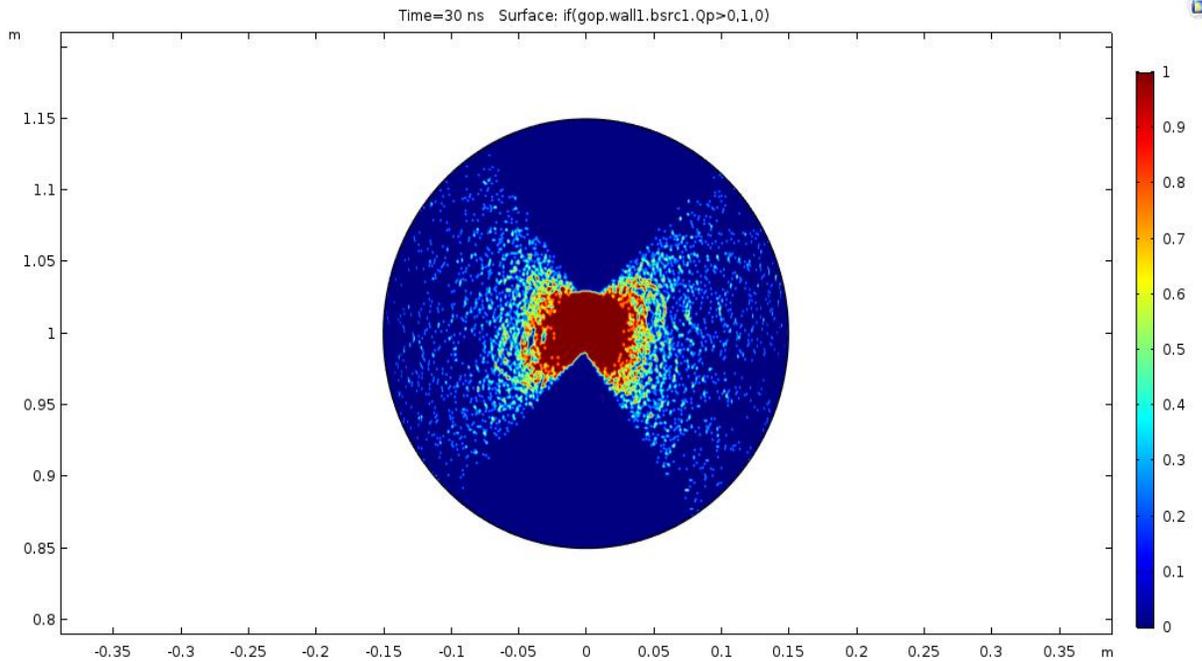


Fig. 56. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el solsticio de verano a las 7 a.m.

El término “mancha de la imagen solar” se refiere a solamente a la zona donde impactan los rayos solares. Los mapas de colores de las manchas solares no muestran potencia, solo demuestran la densidad de rayos incididos en una zona.

En las Fig. 57, 58 y 59 podemos observar el comportamiento de la densidad de potencia e imagen solar que entrega el concentrador Scheffler a las 11 horas del solsticio de verano del 2017.

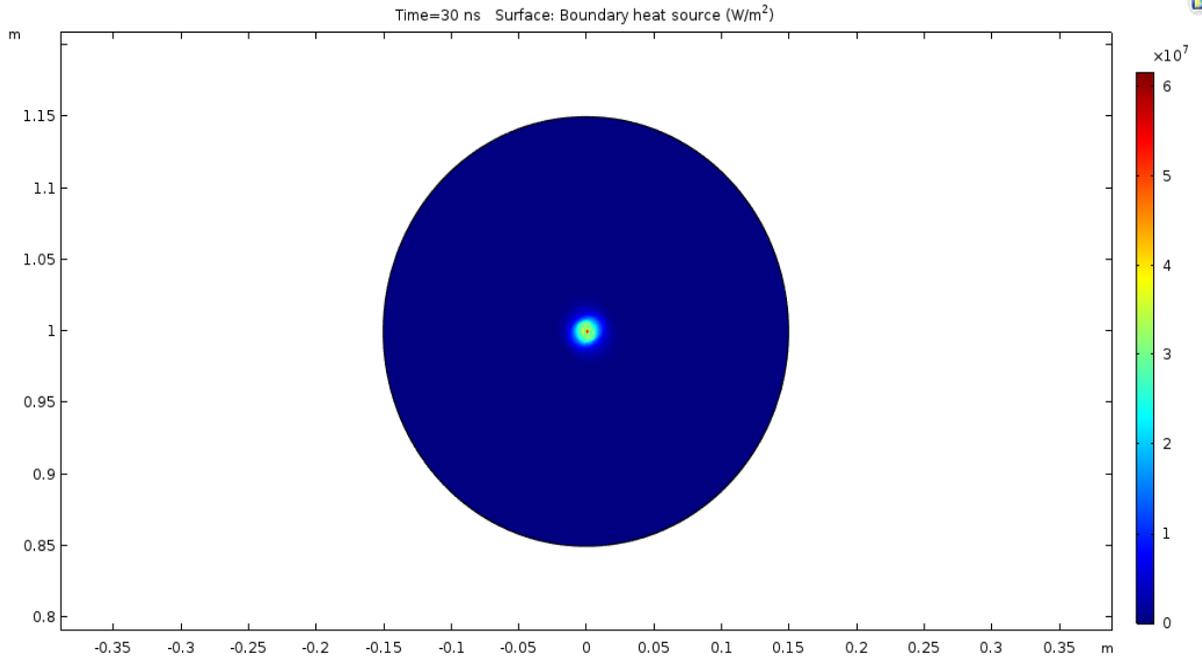


Fig. 57. Mapa de colores de densidad de potencia en el plano focal del receptor en el solsticio de verano a las 11 a.m.

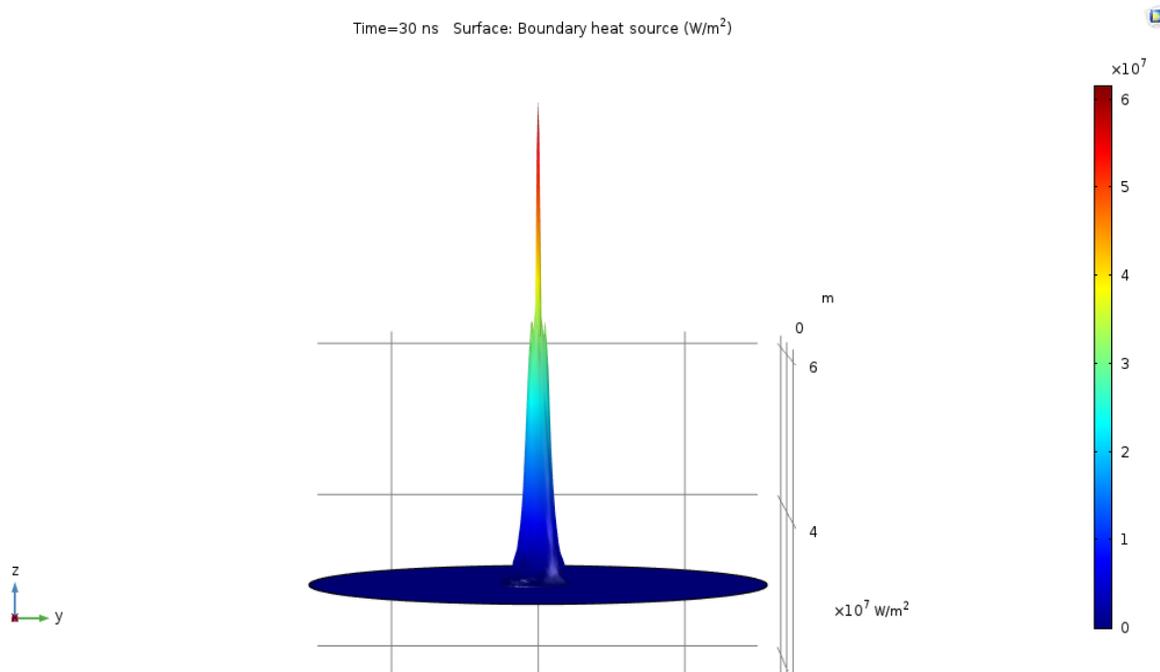


Fig. 58. Densidad de potencia 3D en el plano focal del receptor en el solsticio de verano a las 11 a.m.

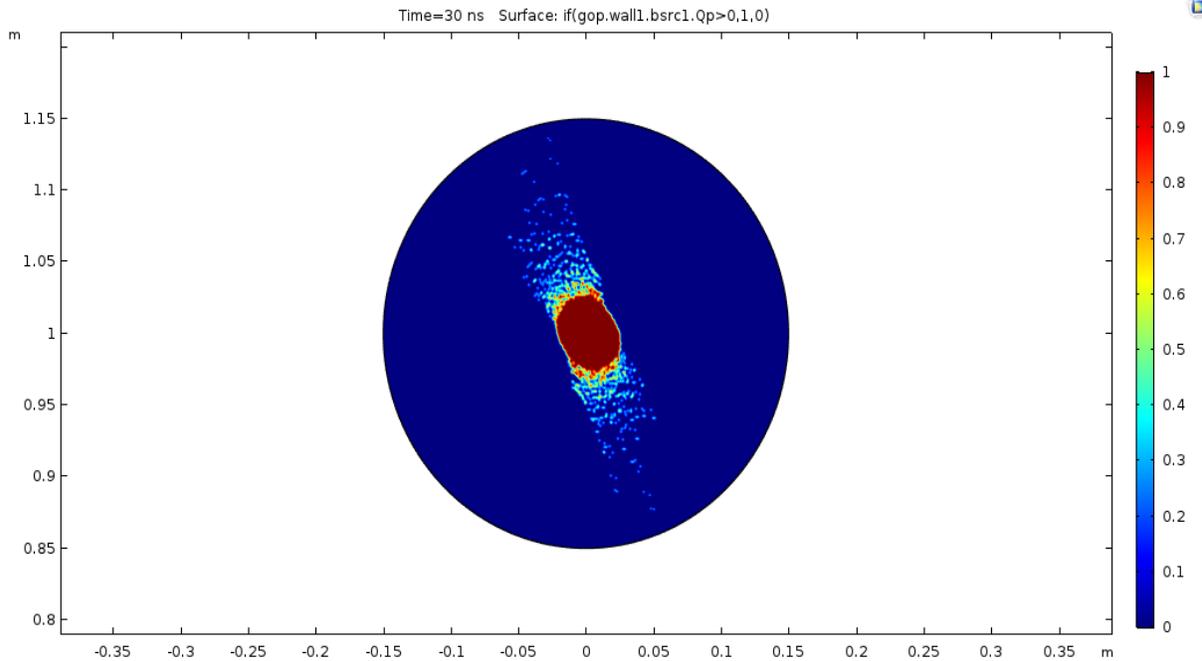


Fig. 59. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el solsticio de verano a las 11 a.m.

Esta última simulación fue la simulación que entrego un mejor desempeño entre todas. Reúne el factor de concentración e intercepción mayores y la menor cantidad de área de imagen solar.

En las Fig. 60, 61 y 62, se muestra el comportamiento de la densidad de potencia e imagen solar que entrega el concentrador Scheffler a las 13 horas del solsticio de verano del 2017.

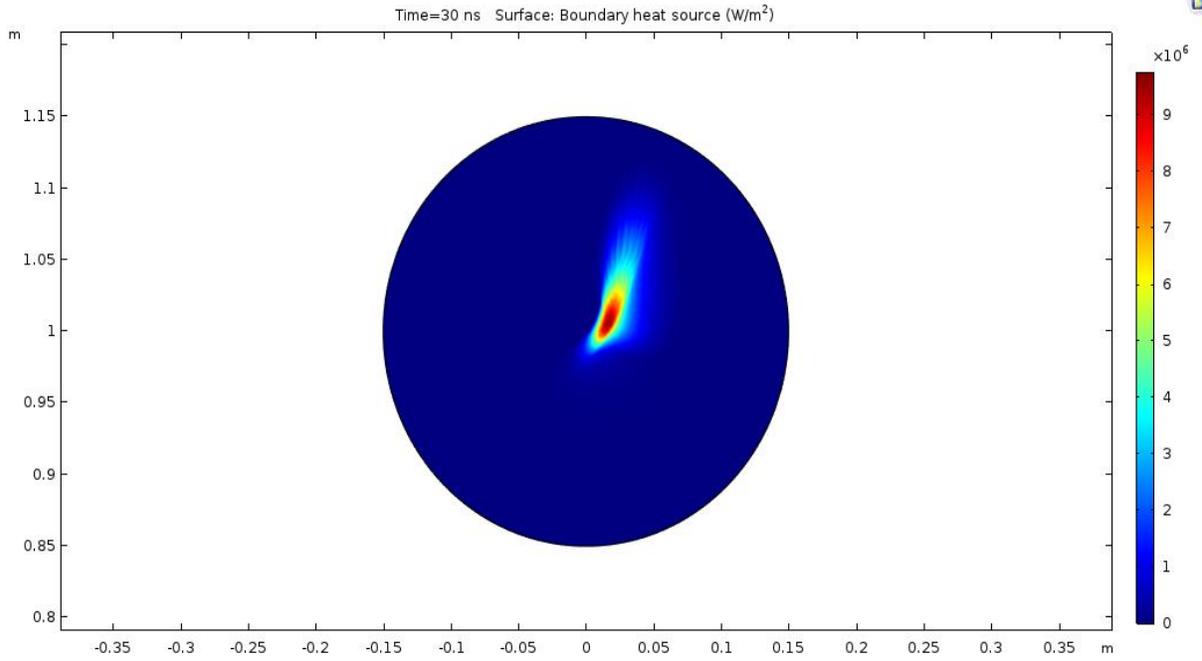


Fig. 60. Mapa de colores de densidad de potencia en el plano focal del receptor en el solsticio de verano a las 13 p.m.

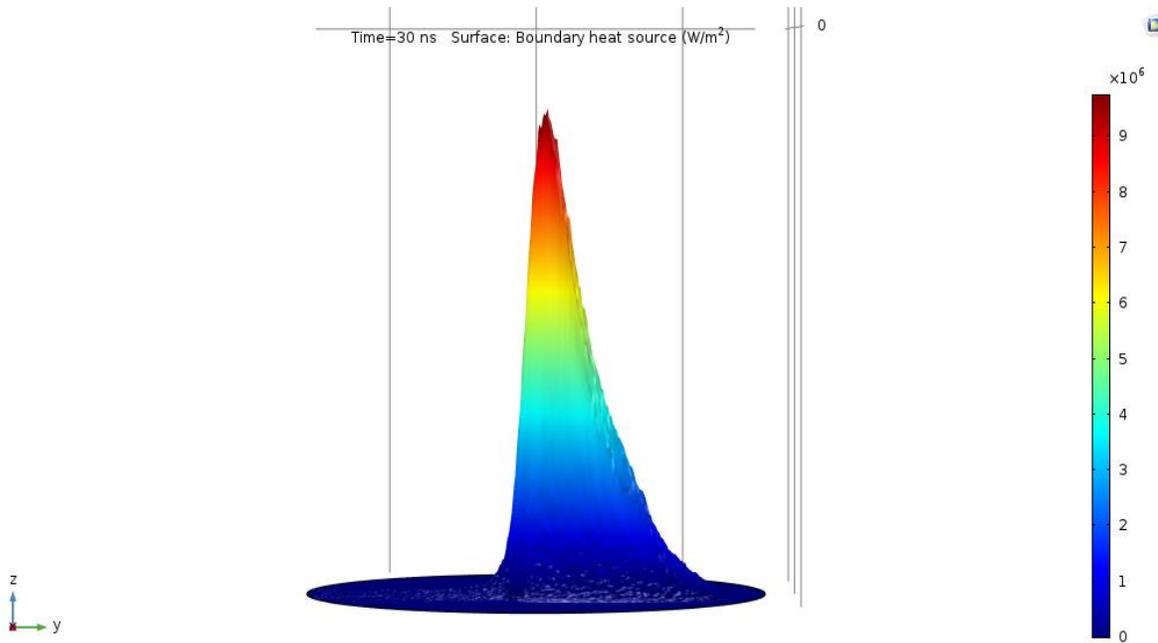


Fig. 61. Densidad de potencia 3D en el plano focal del receptor en el solsticio de verano a las 13 p.m.

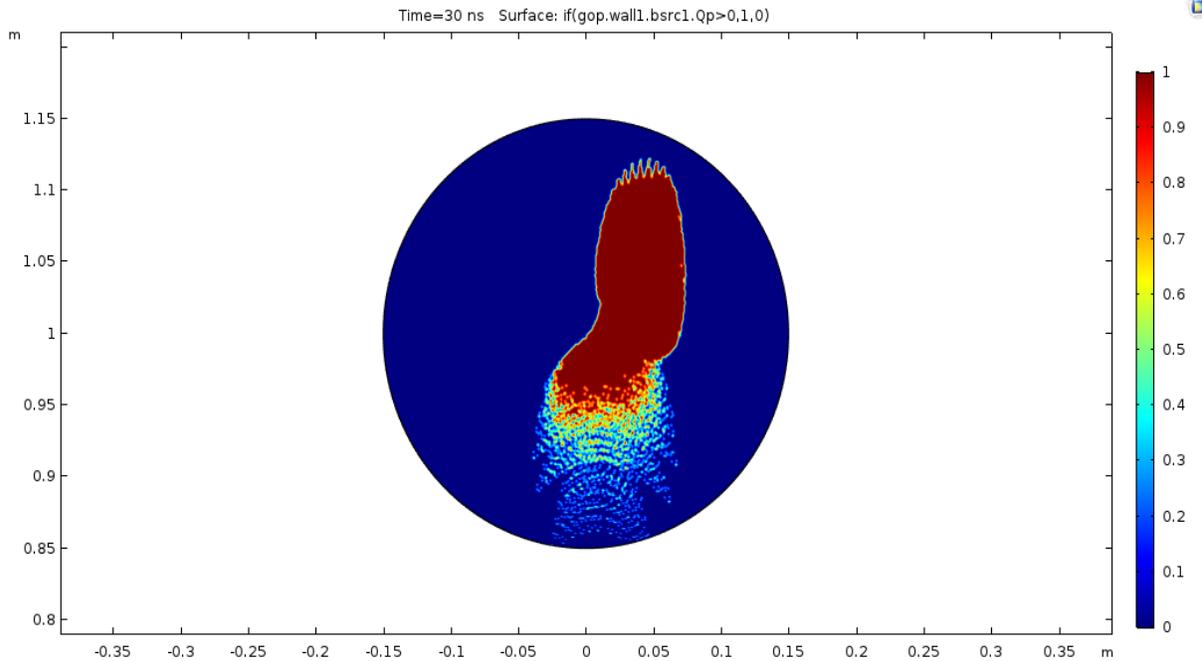


Fig. 62. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el solsticio de verano a las 13 p.m.

Para comprobar la simetría del movimiento solar a través del día, se realizó una simulación para comprobar que los mismos ángulos obtenidos en la optimización resultan para otra hora del día. Para este ejercicio, se tomó las 19 horas en el solsticio de verano. La imagen solar resultante tendría que ser idéntica a la imagen solar obtenida a las 7 a.m. La Fig. 63 muestra la mancha que deja la imagen solar a las 19 horas del solsticio de verano. Esta muestra una simetría con la Fig. 56. En esta simulación de comprobación no se realizó optimización, ya que solo es para comprobar que el comportamiento en un solo día es prácticamente simétrico.

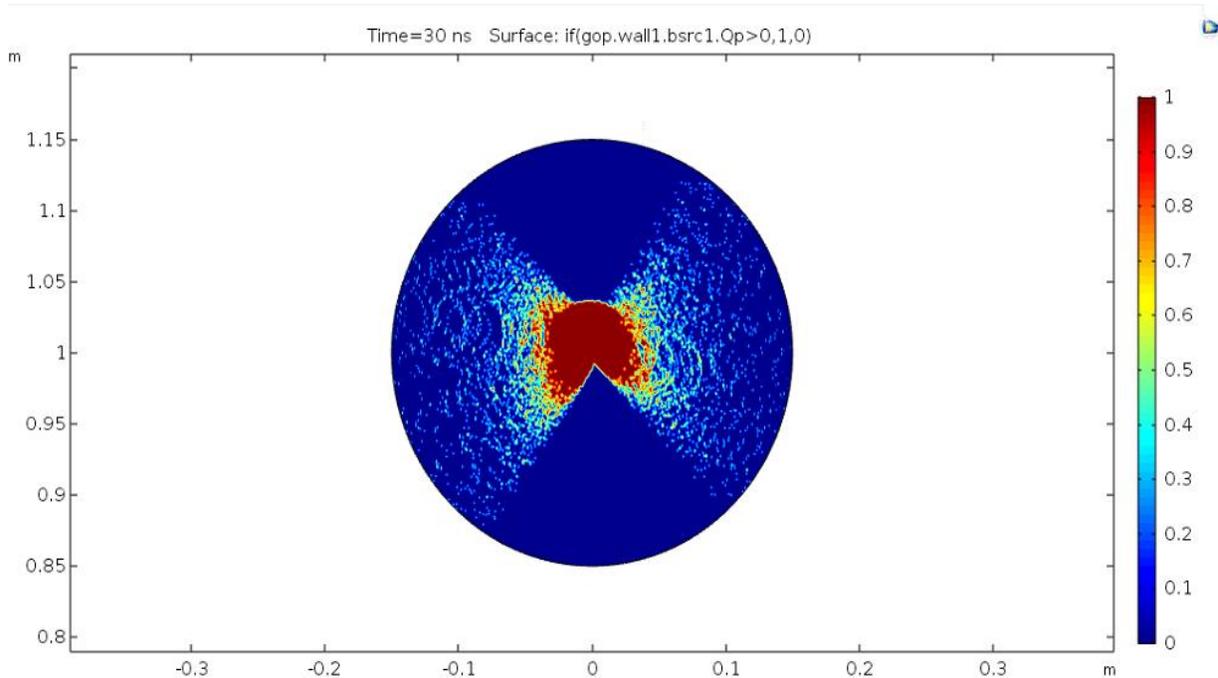


Fig. 63. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el solsticio de verano a las 19 p.m.

En la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos para cada simulación.

Tabla 7. Tabla de resumen de resultados de las simulaciones del solsticio de verano del 2017.

Datos de la simulación en el solsticio de verano						
Hora	Watts interceptados [W]	Factor de intercepción ϕ [%]	Área de imagen [m ²]	Q_{opt}	Potencia pico (COMSOL) [W/m ²]	Factor de concentración
7 horas	11793	93.59	0.007	10079	4.13E+07	41300
7 horas con 2 mrad	11740	93.144	0.013	8431.1	1.53E+07	15343
11 horas	11844	94	0.002	10551	1.32E+08	132000
11 horas con 2 mrad	11842	93.984	0.01	8947.9	1.89E+07	18800
13 horas	11843	93.992	0.012	3620.2	1.03E+07	10300
13 horas con 2 mrad	11829	93.88	0.018	3530.2	7.50E+06	7504.2

Área de receptor = 0.070 m²

Mediante esta primera simulación podemos observar el modo en como el error de pendiente o superficie afecta de drásticamente el factor de concentración que entrega el sistema Scheffler. Sin embargo, se obtiene que el disco es funcional en todas horas del día, ya que su factor de intercepción se encuentra siempre arriba del 93 % y los factores de concentración entregados son competitivos con respecto al Eurodish® y al WGA-500®. En la Fig. 64, 65 y 66 podemos observar el cambio de la densidad de potencia y de la imagen solar que se entrega al agregar los 2 mrad de error en la superficie.

El dato Q_{opt} es la integral de la función “ponderación” (establecida en el Capítulo 3.4) que se forma en cada combinación de rotaciones en la optimización. Entre más valor tiene Q_{opt} mayor es el valor de concentración en el plano focal.

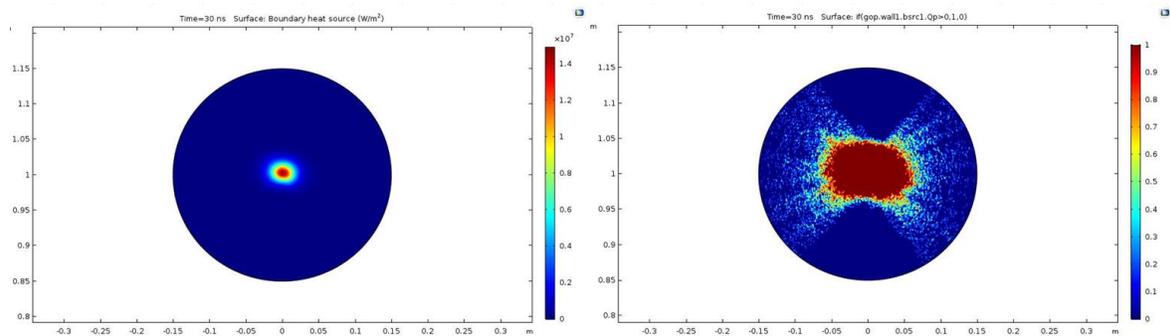


Fig. 64. Mapa de colores de densidad de potencia y mancha solar producida a las 7 a.m. del solsticio de verano con 2mrad de error de pendiente.

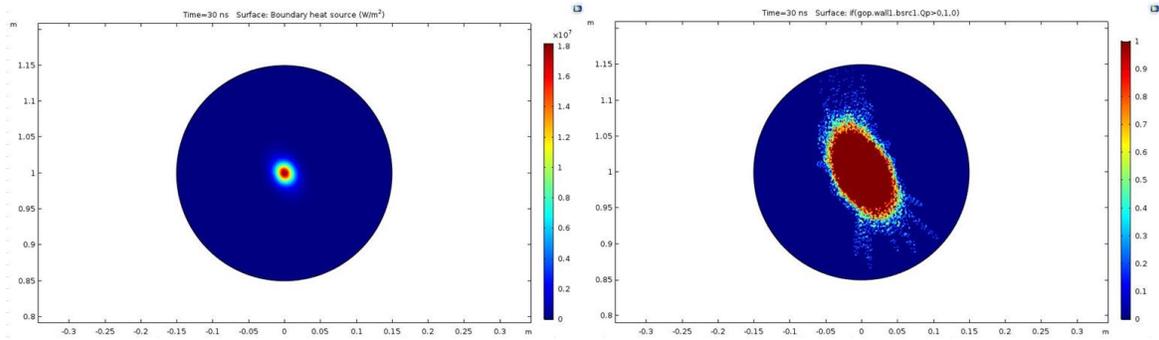


Fig. 65. Mapa de colores de densidad de potencia y mancha solar producida a las 11 a.m. del solsticio de verano con 2mrad de error de pendiente.

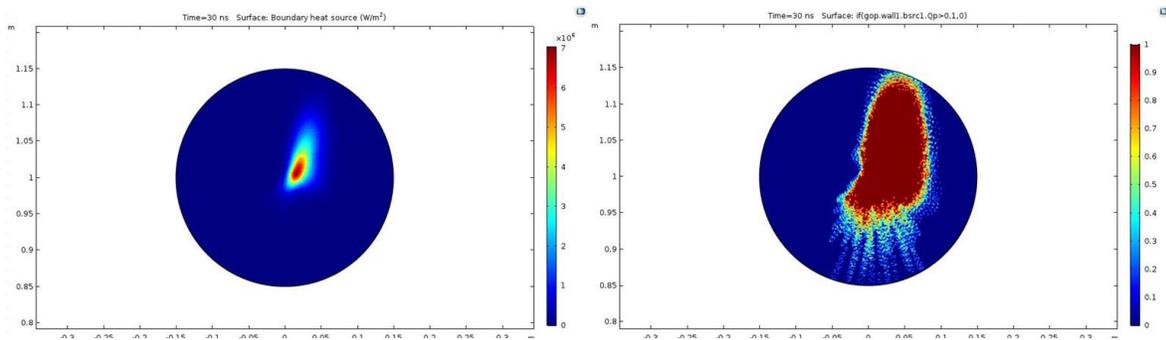


Fig. 66. Mapa de colores de densidad de potencia y mancha imagen solar producida a las 13 p.m. del solsticio de verano con 2mrad de error de pendiente.

En la Fig. 67 se hace una comparación del desempeño en cuanto a potencia entregada en el plano focal a las diferentes horas del día del solsticio de verano sin error de pendiente. Las curvas mostradas en esta figura son el perfil de la densidad de potencia que se tiene en el plano focal. Se puede observar que el peor comportamiento que se tiene es al medio día. Este comportamiento de disminución de concentración y factor de intercepción al medio día se repite en los 3 escenarios: ambos solsticios y equinoccio.

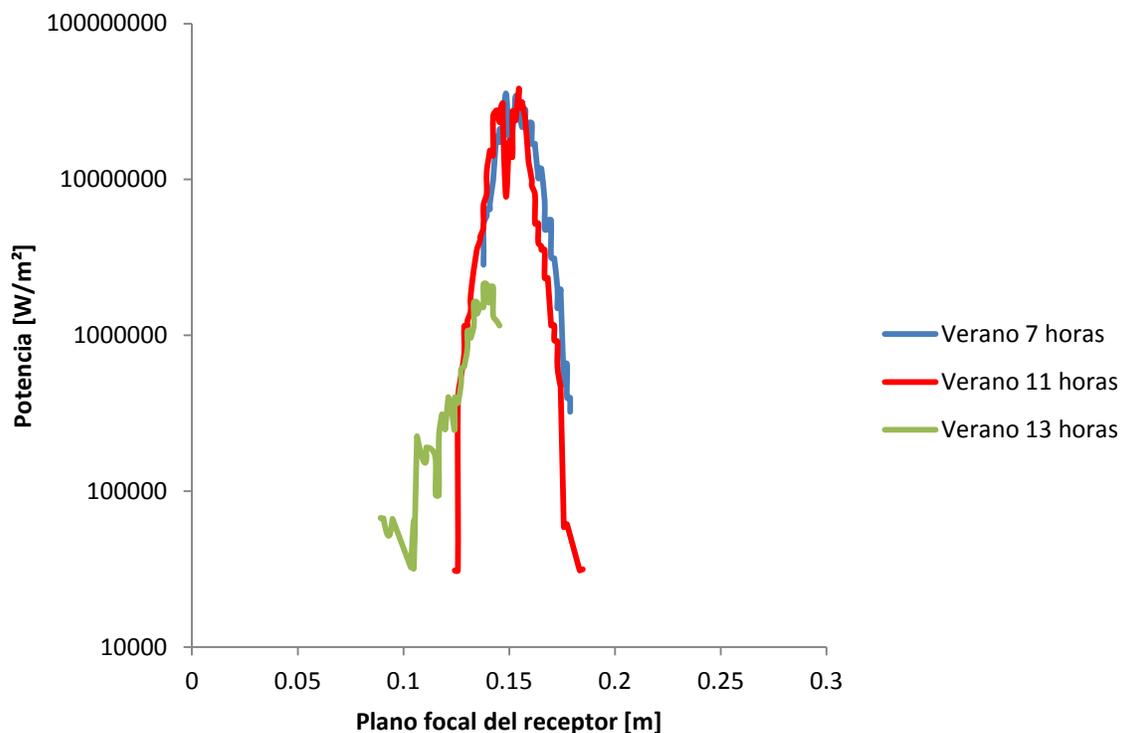


Fig. 67. Desempeño del concentrador Scheffler en el plano focal (sin error) en el solsticio de verano sin error de pendiente.

En las Fig. 68, 69 y 70 se muestran mapas de colores de densidad de potencia en el plano focal y mancha de la imagen solar del concentrador Scheffler en el equinoccio de primavera (20 de marzo 2017) a las 7 horas.

El comportamiento durante este equinoccio es equivalente al equinoccio de otoño (Véase Fig. 8 del Capítulo 2.3), por lo que no es necesario simular ambos equinoccios.

Debido al cambio de la trayectoria del sol durante el año, para simular el equinoccio se han tomado horas diferentes para simular el comportamiento del concentrador Scheffler. Esto con el fin de seguir cubriendo todo el día.

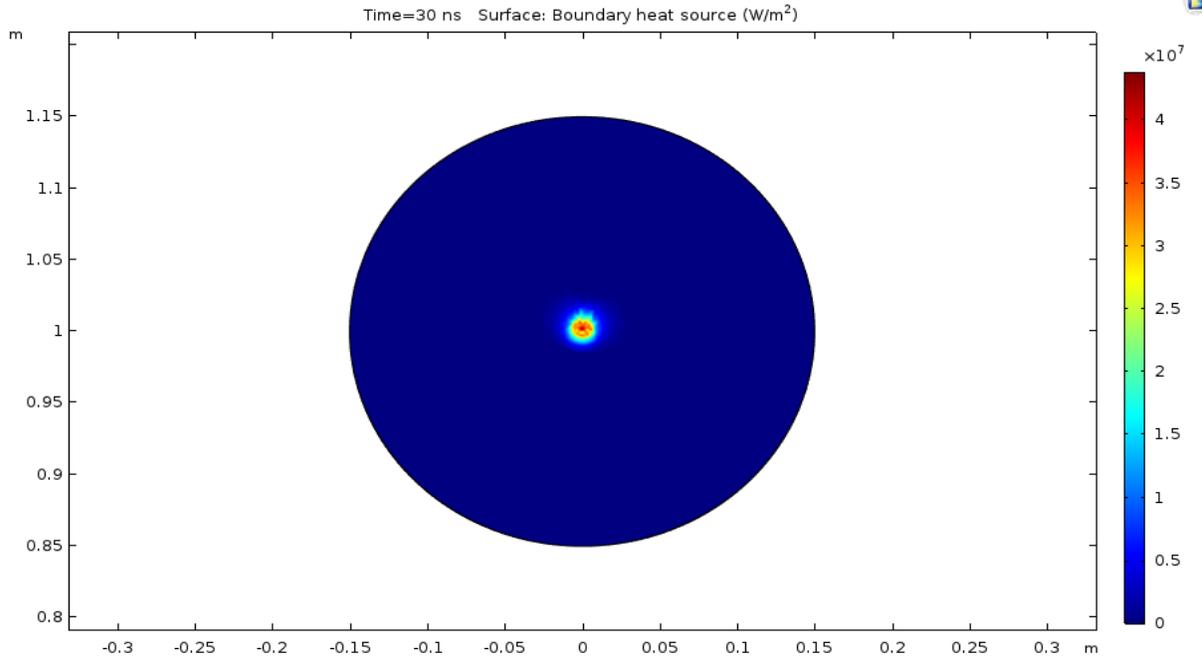


Fig. 68. Mapa de colores de densidad de potencia en el plano focal del receptor en el equinoccio de primavera a las 7 a.m.

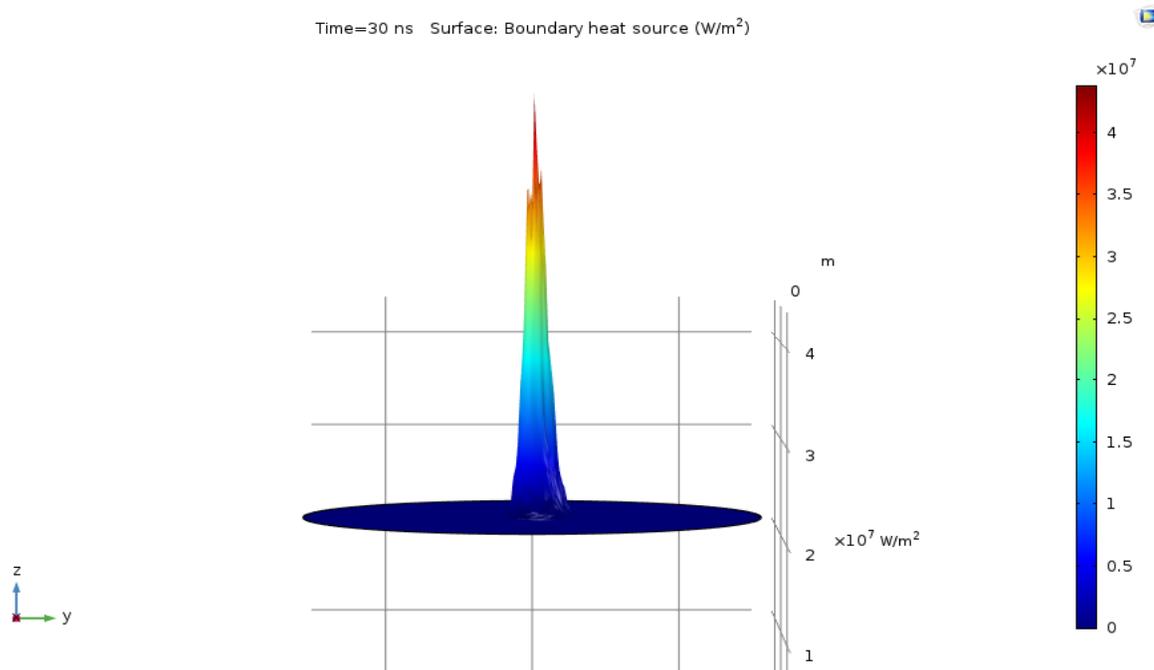


Fig. 69. Densidad de potencia 3D en el plano focal del receptor en el equinoccio de primavera a las 7 a.m.

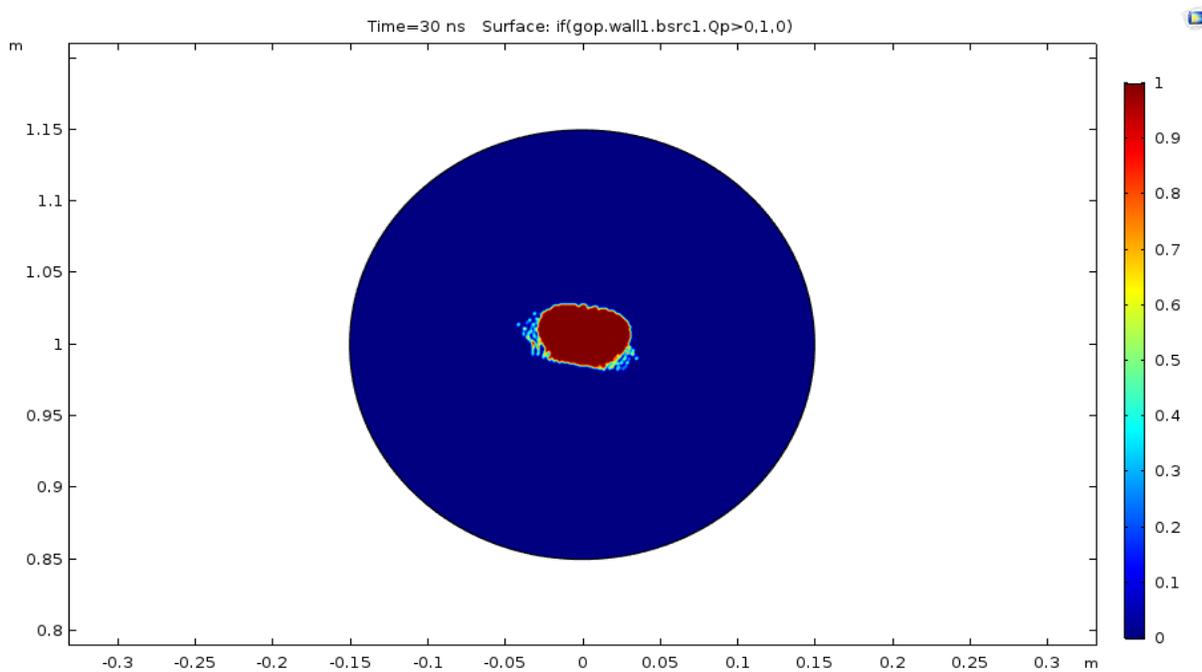


Fig. 70. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el equinoccio de primavera a las 7 a.m.

En las Fig. 71, 72 y 73 se muestran los mapas de colores del comportamiento de la densidad de potencia e imagen solar que entrega el concentrador Scheffler en el plano focal a las 10 horas del equinoccio de primavera.

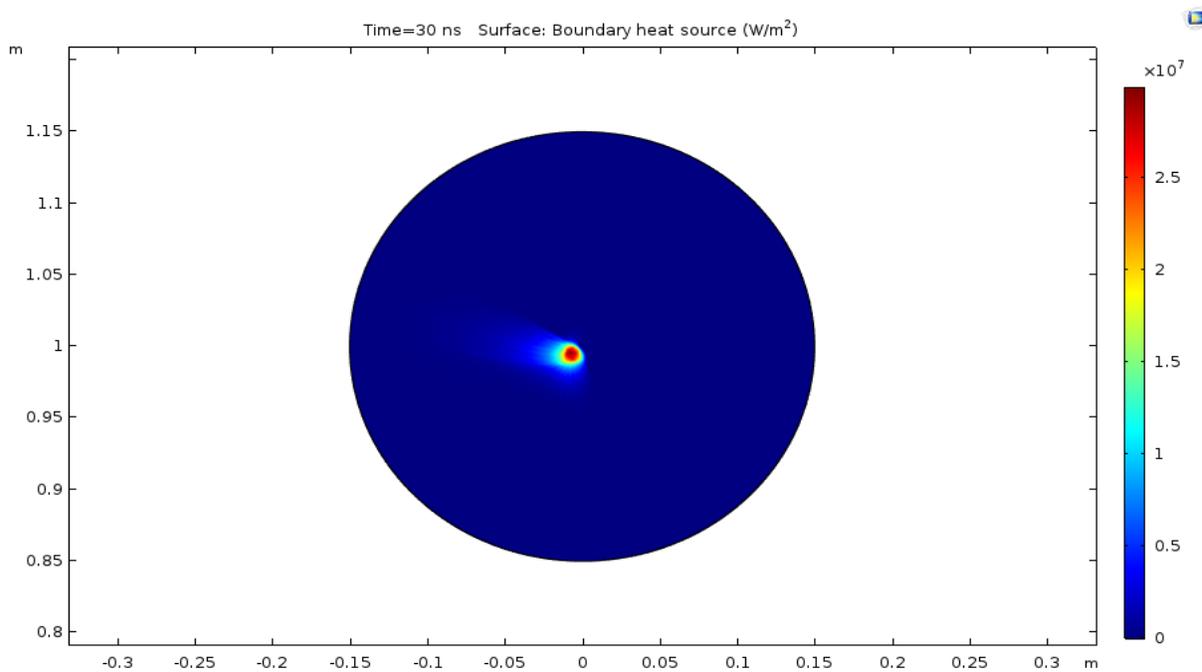


Fig. 71. Mapa de colores de densidad de potencia en el plano focal del receptor en el equinoccio de primavera a las 10 a.m.

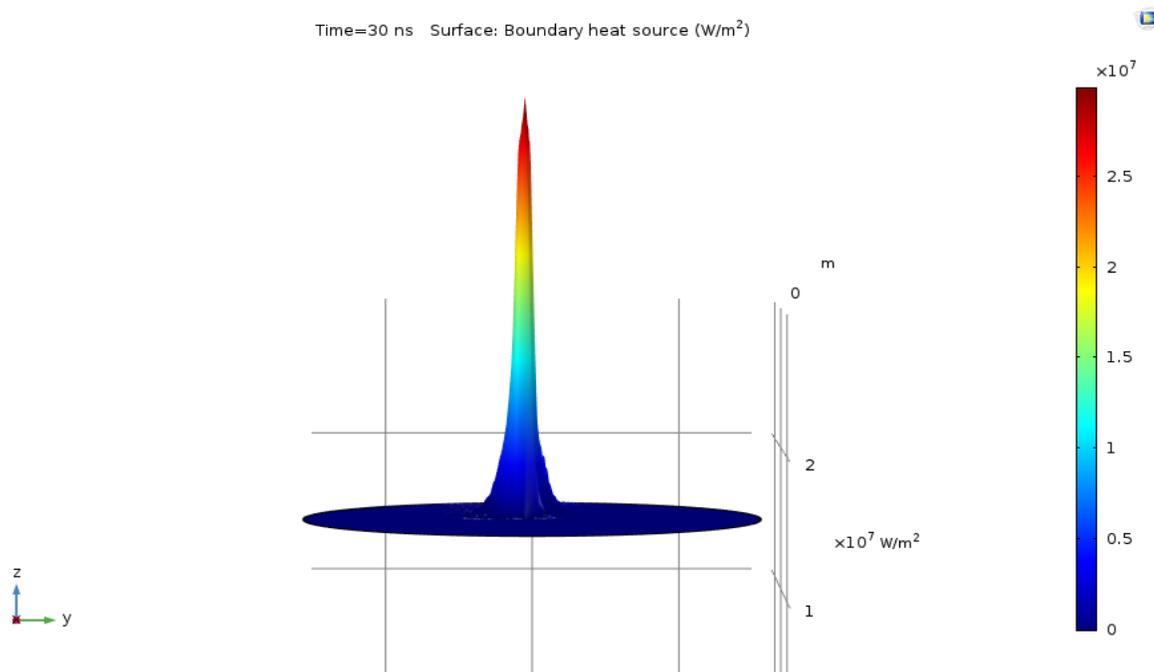


Fig. 72. Densidad de potencia 3D en el plano focal del receptor en el equinoccio de primavera a las 10 a.m.

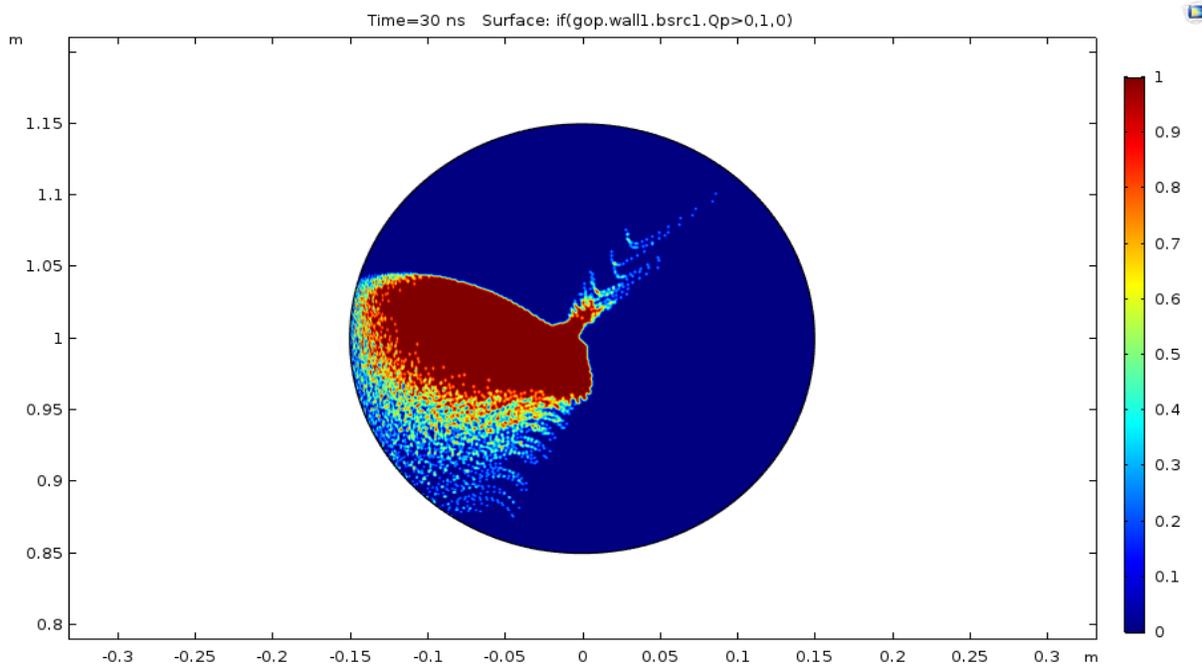


Fig. 73. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el equinoccio de primavera a las 10 a.m.

En las Fig. 74, 75 y 76 se muestran los mapas de colores del comportamiento de la densidad de potencia e imagen solar que entrega el concentrador Scheffler en el plano focal a las 12 horas del equinoccio de primavera.

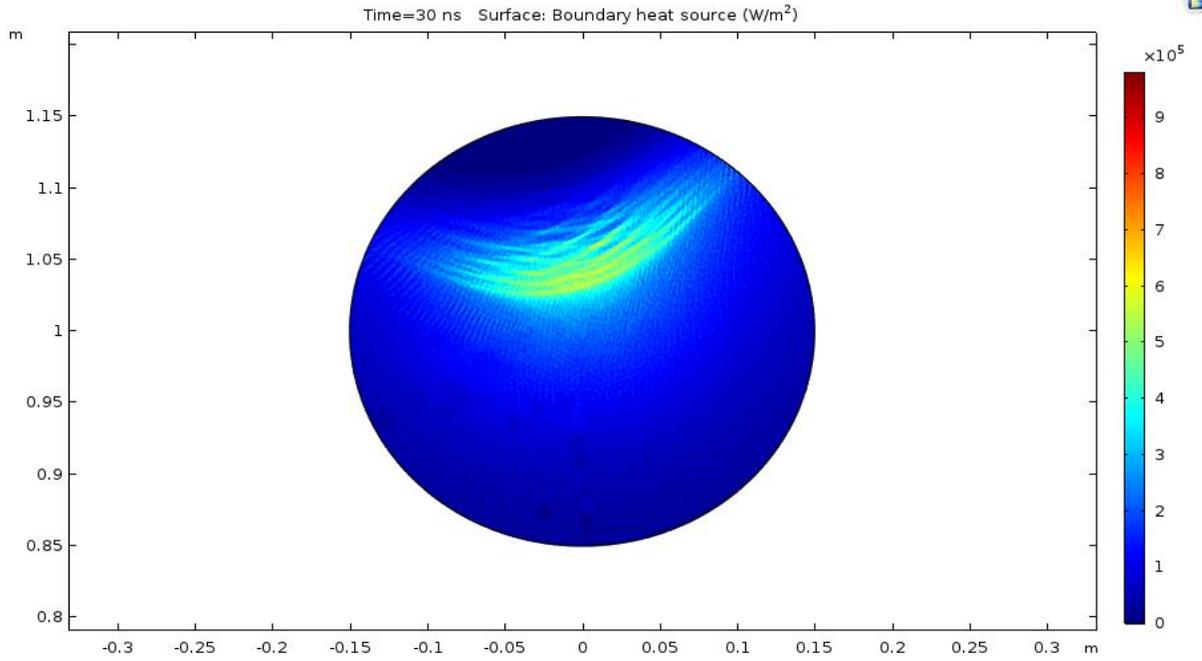


Fig. 74. Mapa de colores de densidad de potencia en el plano focal del receptor en el equinoccio de primavera a las 12 p.m.

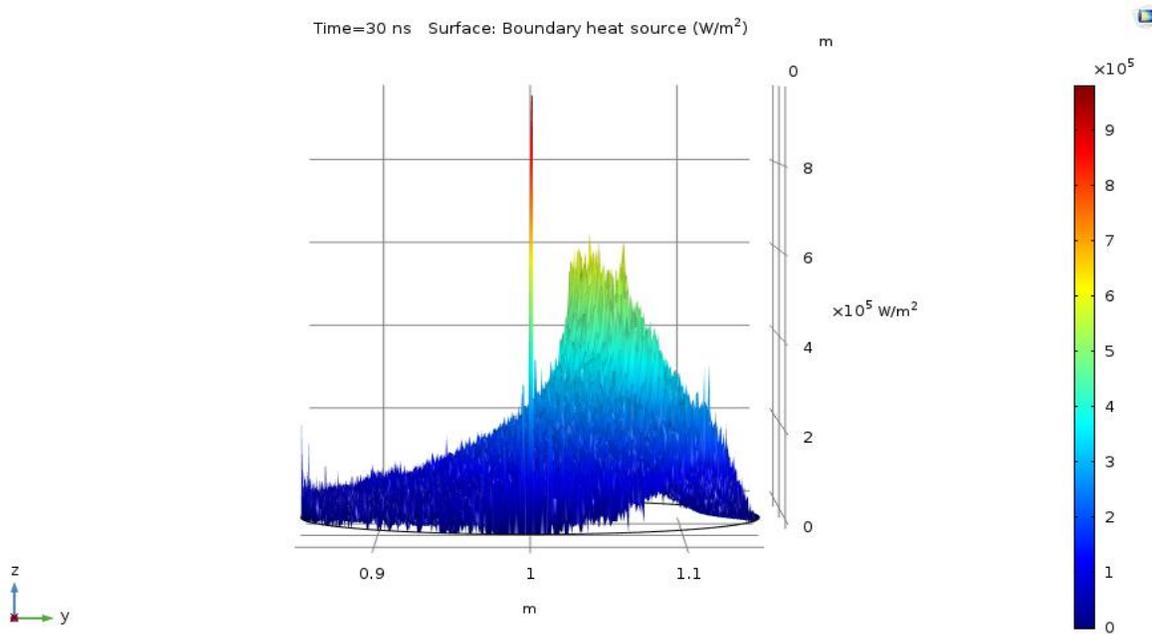


Fig. 75. Densidad de potencia 3D en el plano focal del receptor en el equinoccio de primavera a las 12 p.m.

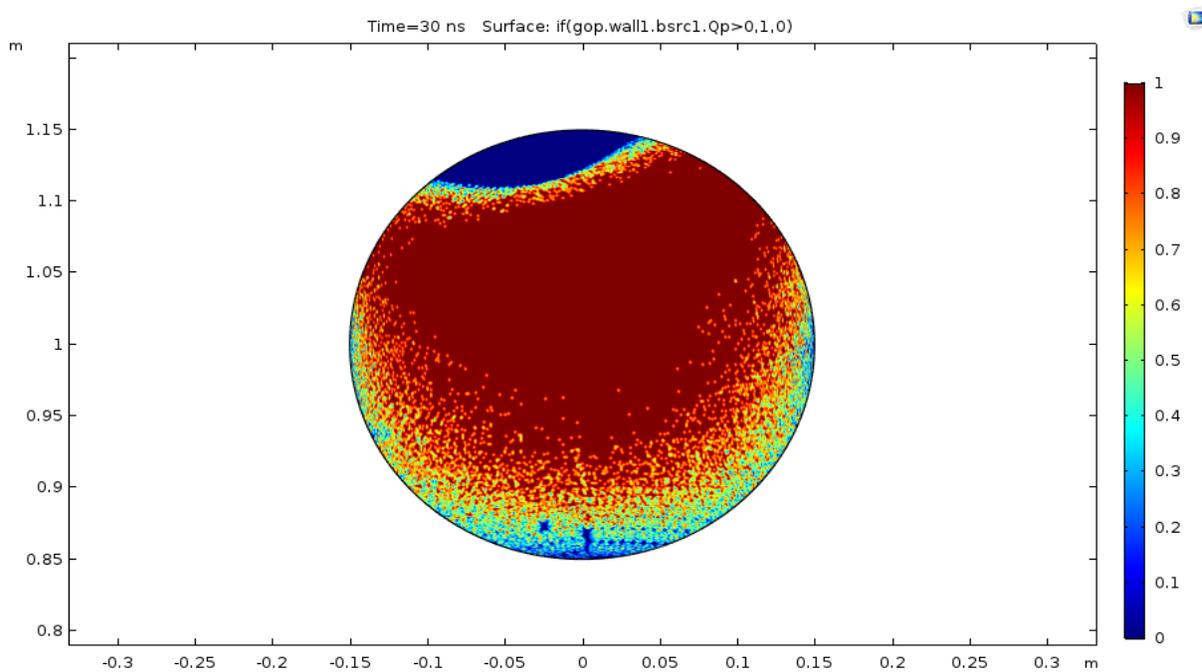


Fig. 76. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el equinoccio de primavera a las 12 p.m.

En el caso de las 12 horas del equinoccio de primavera, el concentrador Scheffler empieza a tener un funcionamiento menos eficiente del que se había reportado en el solsticio de verano. Para explicar esta caída en su desempeño se apoyará con gráficos que ilustren el movimiento del concentrador más detalladamente en estas horas del día en el Capítulo 5.

En la Tabla 8 se resumen los resultados obtenidos de las simulaciones del equinoccio de primavera.

Tabla 8. Tabla de resumen de resultados de las simulaciones del equinoccio de primavera del 2017.

Datos de la simulación en el equinoccio de primavera						
Hora	Watts interceptados [W]	Factor de intercepción ϕ [%]	Área de imagen [m ²]	Q_{opt}	Potencia pico (COMSOL) [W/m ²]	Factor de concentración
7 horas	11844	94	0.002	10399	4.27E+07	42700
7 horas con 2 mrad	11844	94	0.009	8848.8	1.95E+07	19500
10 horas	11764	93.36	0.012	6393.3	3.18E+07	31800
10 horas con 2mrad	11666	92.587	0.022	5793.5	1.50E+07	15026
12 horas	8805.8	69.88	0.059	679.65	1.96E+06	1960
12 horas con 2mrad	8684.6	68.925	0.06	787.89	7.75E+05	774.75

Área de receptor = **0.070 m²**

La tabla 8 describe una disminución considerable en el medio día tanto de factor de intercepción como en el factor de concentración. No obstante, en la mañana sigue conservando un buen desempeño en ambas variables.

En las Fig. 77, 78 y 79 se muestran los mapas de colores de la densidad de potencia e imagen solar que entrega el sistema Scheffler en el plano focal con 2 mrad de error de pendiente.

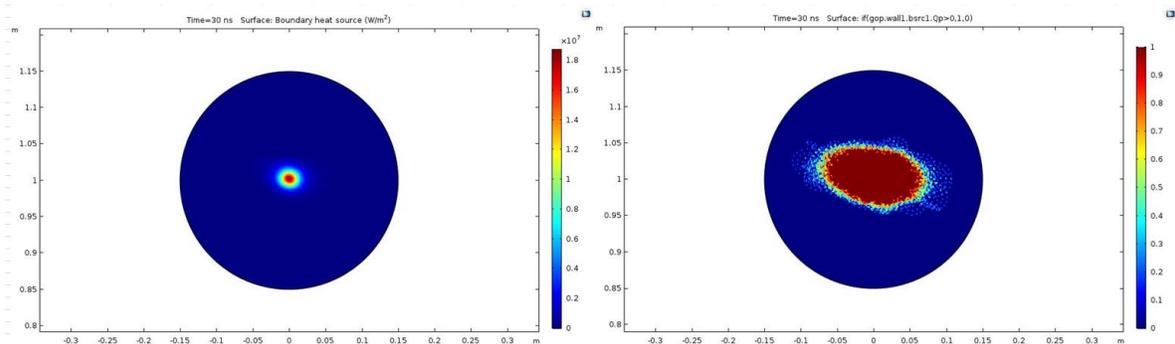


Fig. 77. Mapa de colores de densidad de potencia y mancha solar producida a las 7 a.m. del equinoccio de primavera con 2mrad de error de pendiente.

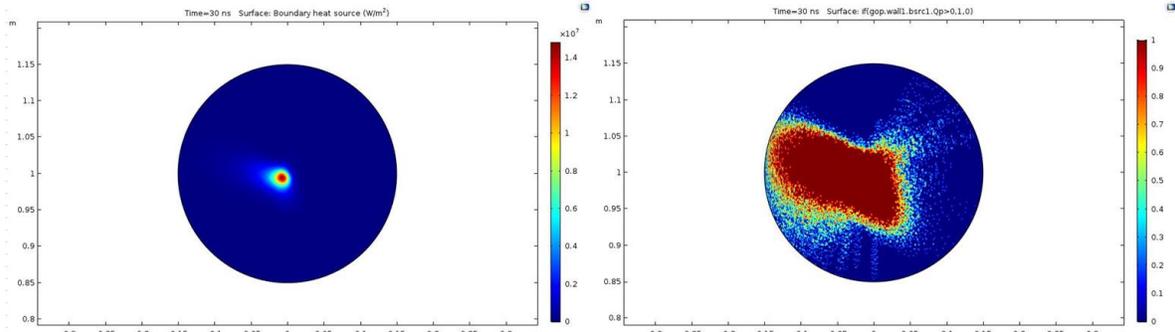


Fig. 78. Mapa de colores de densidad de potencia y mancha solar producida a las 10 a.m. del equinoccio de primavera con 2mrad de error de pendiente.

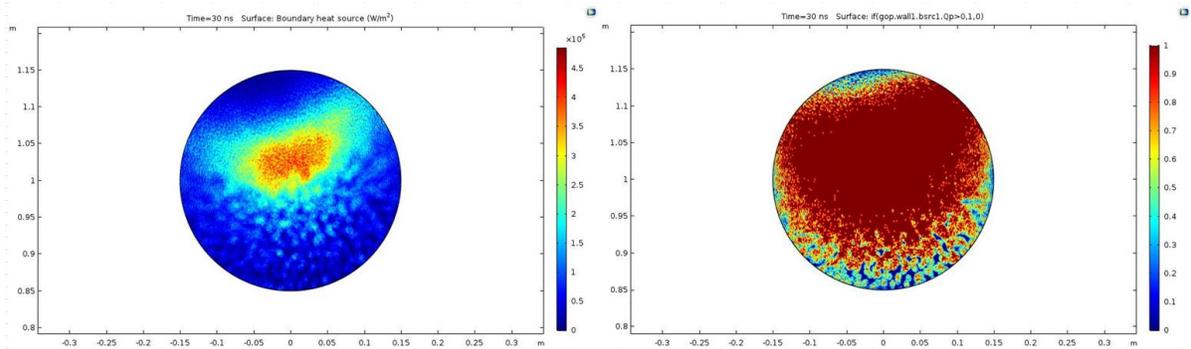


Fig. 79. Mapa de colores de densidad de potencia y mancha solar producida a las 12 p.m. del equinoccio de primavera con 2mrad de error de pendiente.

Al igual que en el solsticio de verano, se muestra una gráfica comparativa en la Fig. 80 del perfil de la densidad de la potencia entregada en el plano focal a través del equinoccio de primavera sin error de pendiente. Se observa una notoria disminución de rendimiento al medio día.

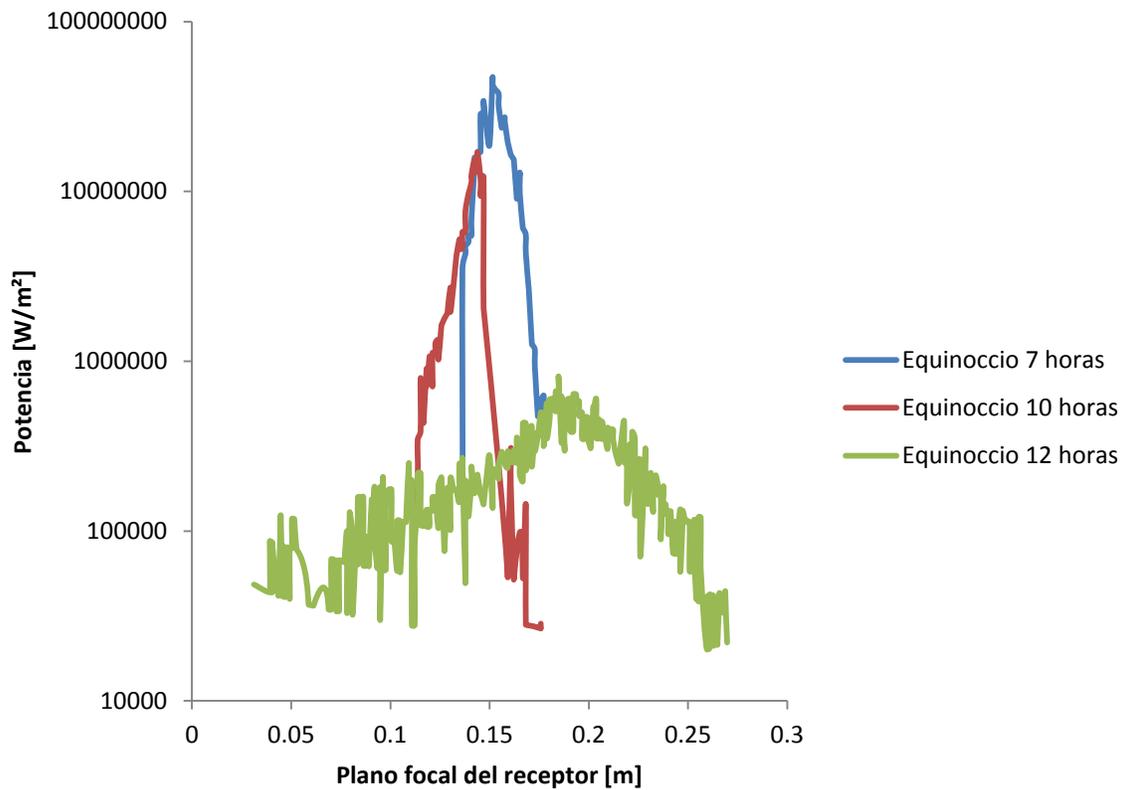


Fig. 80. Desempeño del concentrador Scheffler en el plano focal (sin error) en el equinoccio de primavera sin error de pendiente.

En las Fig. 81, 82 y 83 se muestran los mapas de colores del comportamiento de la densidad de potencia e imagen solar que entrega el concentrador Scheffler en el solsticio de invierno a las 8 horas.

Nuevamente se eligen nuevas horas para realizar las simulaciones debido a la reducción de horas solares que se tienen en invierno.

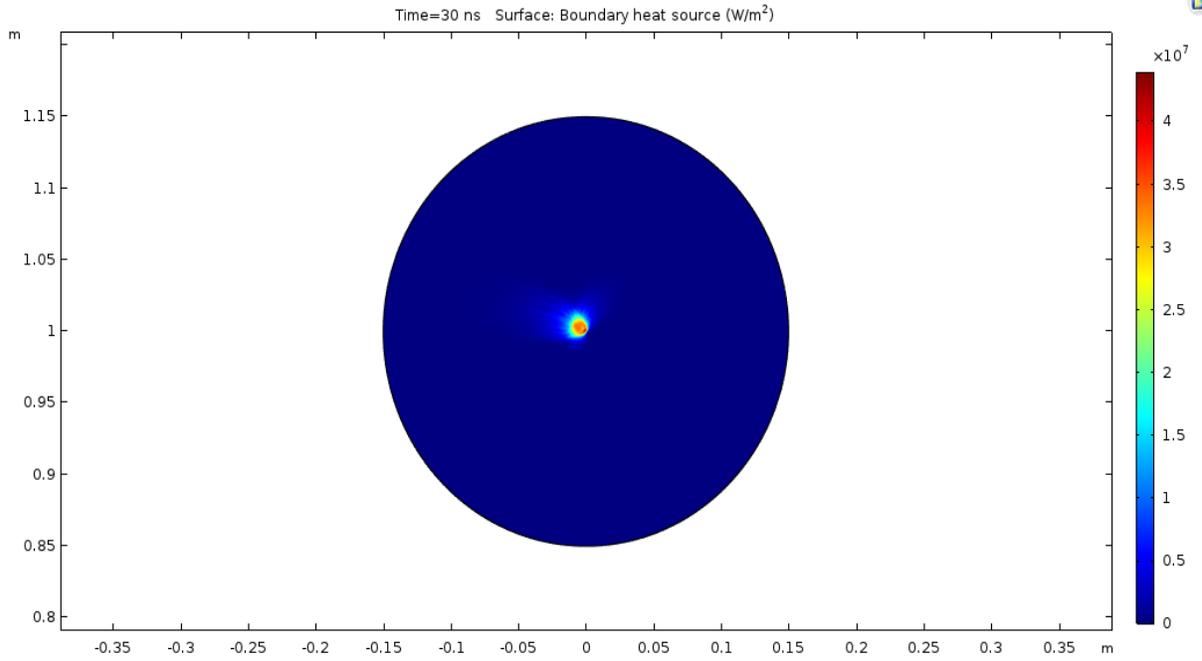


Fig. 81. Mapa de colores de densidad de potencia en el plano focal del receptor en el solsticio de invierno a las 8 a.m.

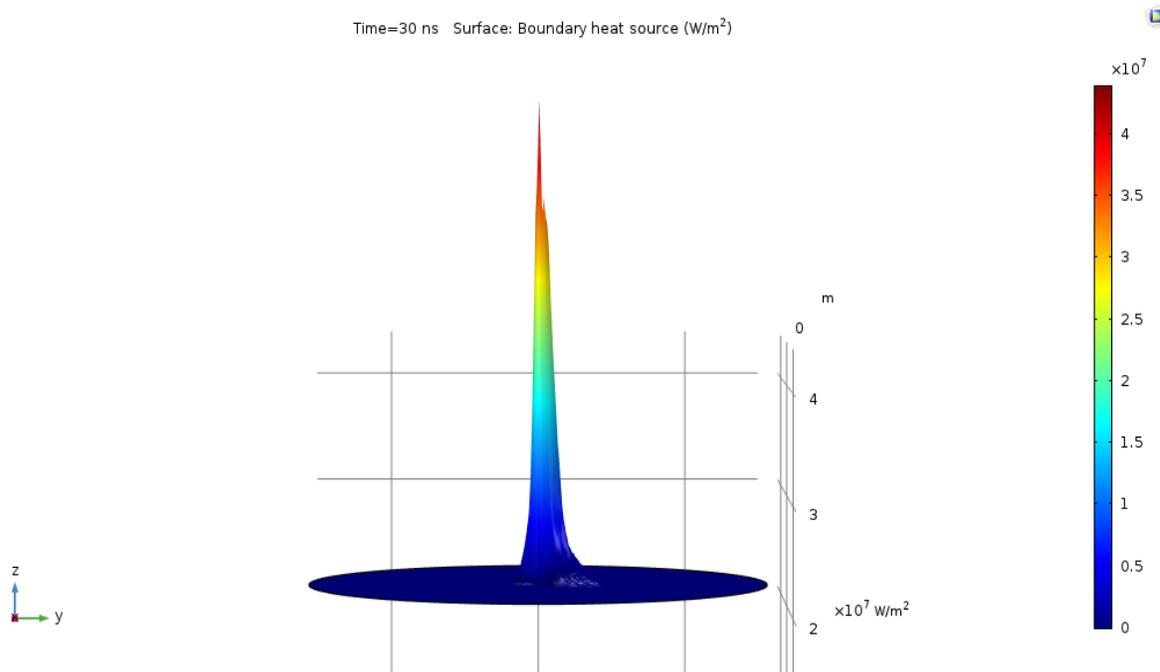


Fig. 82. Densidad de potencia 3D en el plano focal del receptor en el solsticio de invierno a las 8 a.m.

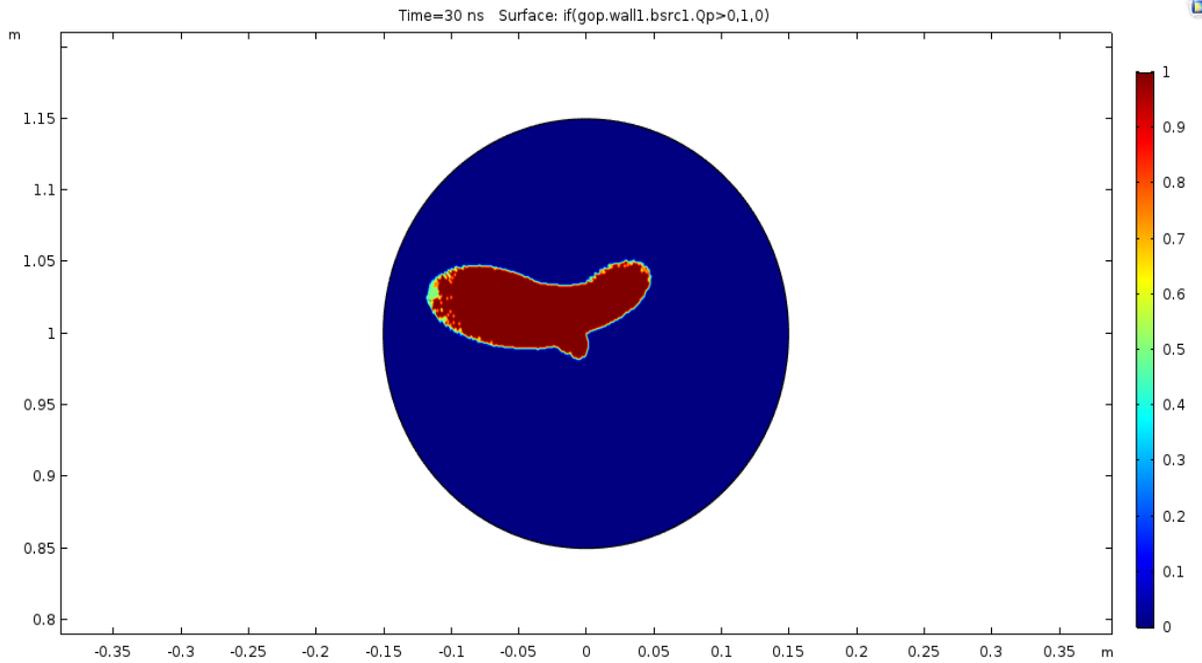


Fig. 83. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el solsticio de invierno a las 8 a.m.

En las Fig. 84, 85 y 86 se muestran los mapas de colores del comportamiento de la densidad de potencia e imagen solar que entrega el concentrador Scheffler correspondientes a las simulaciones a las 10 horas del solsticio de invierno.

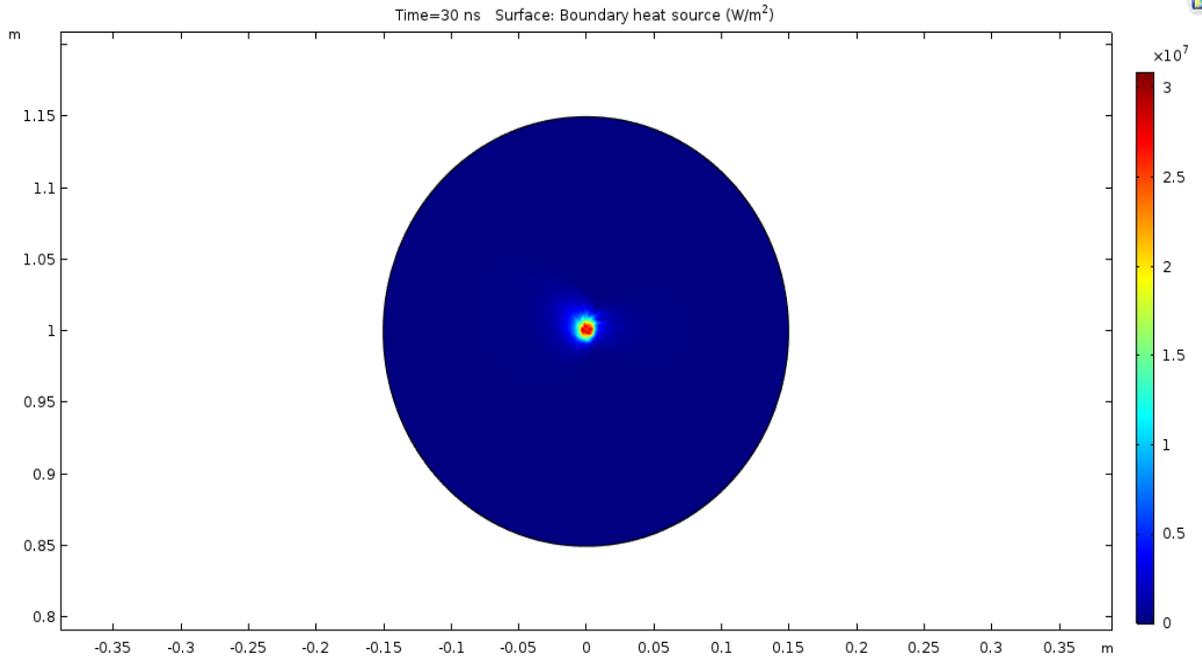


Fig. 84. Mapa de colores de densidad de potencia en el plano focal del receptor en el solsticio de invierno a las 10 a.m.

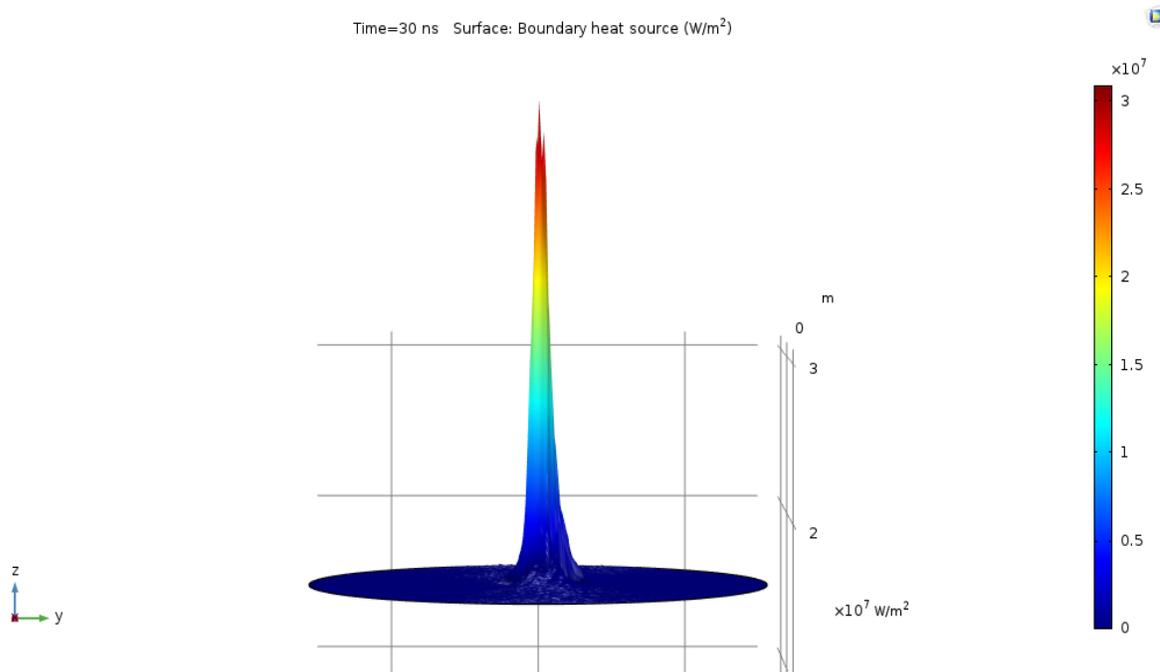


Fig. 85. Densidad de potencia 3D en el plano focal del receptor en el solsticio de invierno a las 10 a.m.

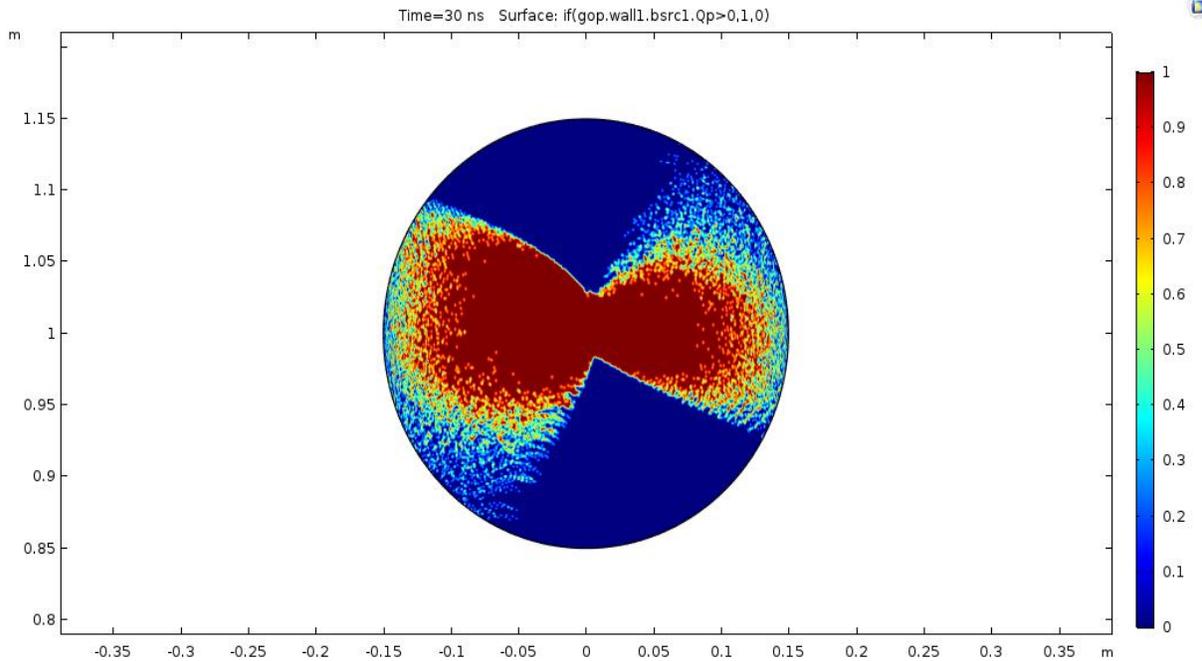


Fig. 86. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el solsticio de invierno a las 10 a.m.

Nuevamente el sistema empieza a disminuir su rendimiento al acercarse la mitad del día solar. Asimismo, el peor rendimiento del sistema se encuentra en el medio día del solsticio de invierno. En las Fig. 87, 88 y 89 se muestran los mapas de colores del comportamiento de la densidad de potencia e imagen solar que entrega el concentrador Scheffler correspondientes a la simulación de las 12 horas del solsticio de invierno.

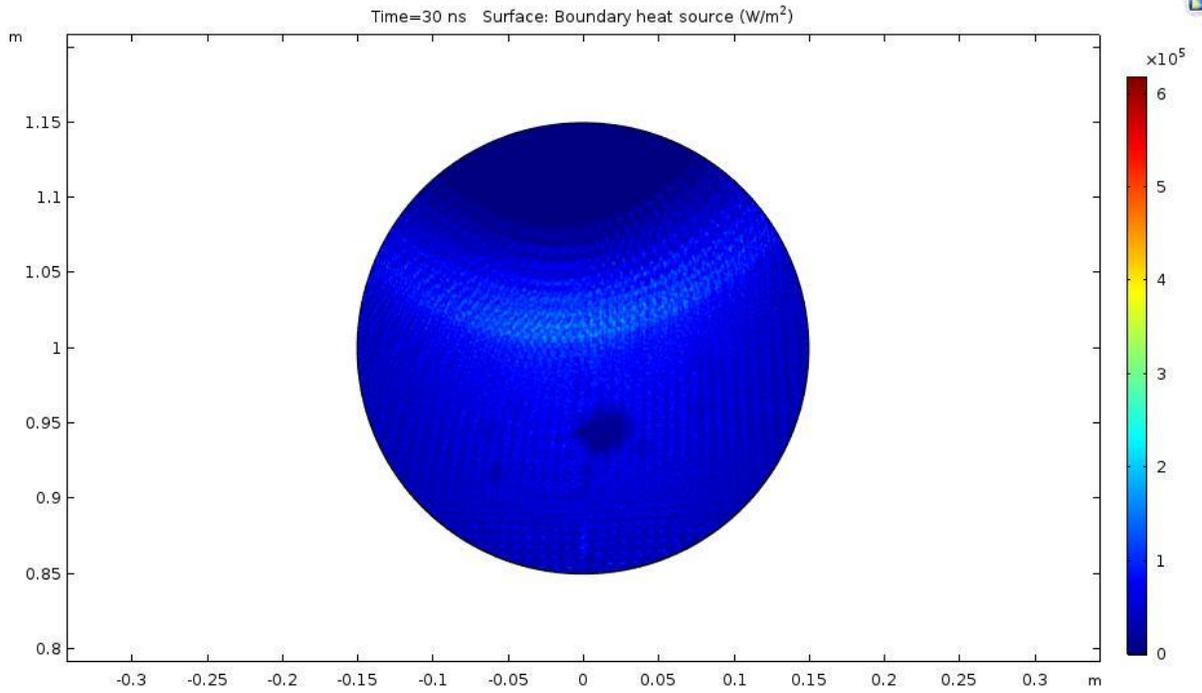


Fig. 87. Mapa de colores de densidad de potencia en el plano focal del receptor en el solsticio de invierno a las 12 p.m.

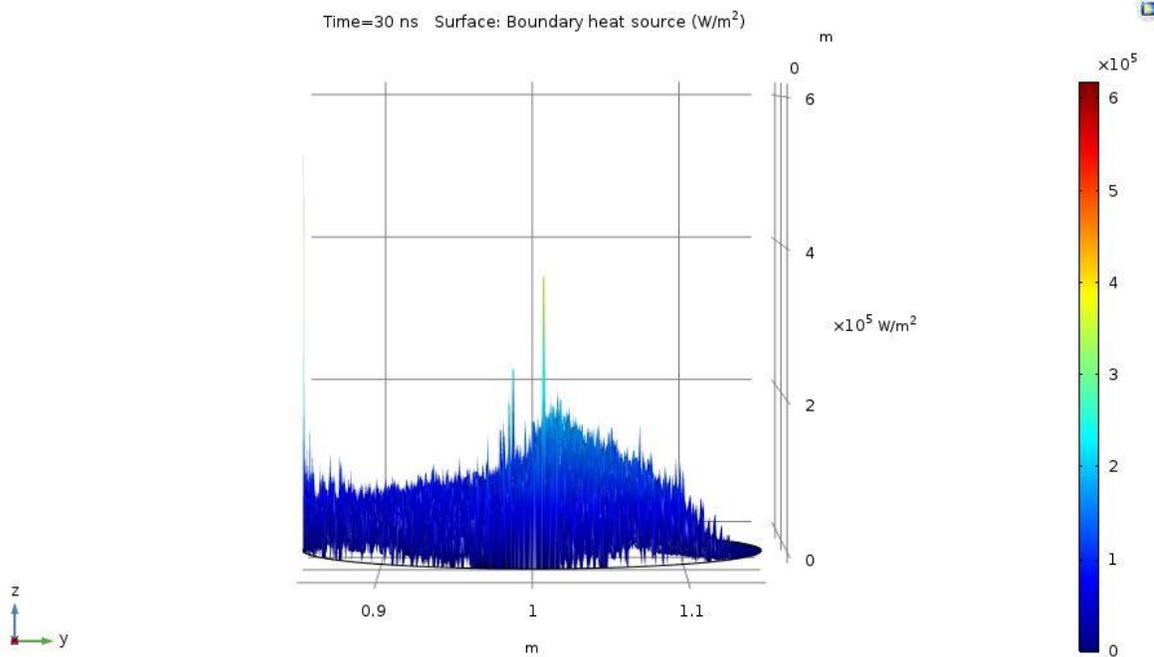


Fig. 88. Densidad de potencia 3D en el plano focal del receptor en el solsticio de invierno a las 12 p.m.

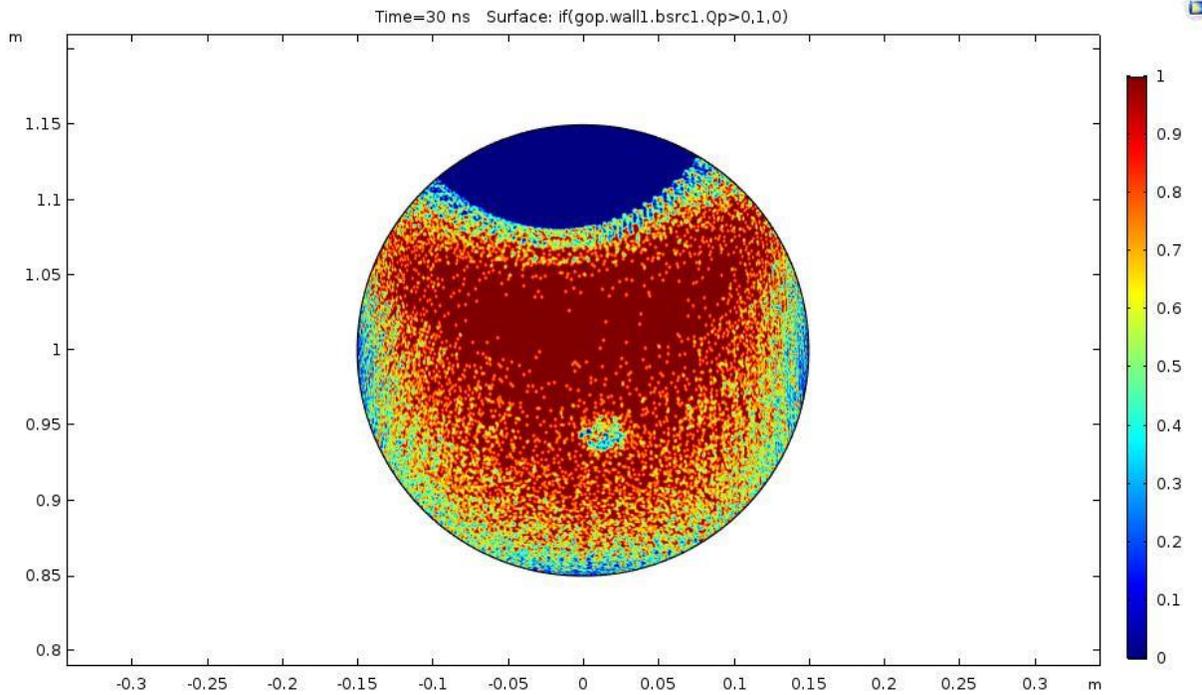


Fig. 89. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el solsticio de invierno a las 12 p.m.

En la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos en la simulación del solsticio de invierno a las 8, 10 y 12 horas.

Tabla 9. Tabla de resumen de resultados de las simulaciones del solsticio de invierno del 2017.

Datos de la simulación en el solsticio de invierno						
Hora	Watts interceptados [W]	Factor de intercepción ϕ [%]	Área de imagen [m ²]	Q_{opt}	Potencia pico (COMSOL) [W/m ²]	Factor de concentración
8 horas	11815	93.769	0.006	8060.6	5.87E+07	58708
8 horas con 2 mrad	11778	93.476	0.02	7039.7	1.76E+07	17595
10 horas	10689	84.83	0.028	6893.5	3.61E+07	36072
10 horas con 2mrad	10052	79.77	0.035	5634.2	1.48E+07	14831
12 horas	3538.3	28.081	0.05	278.6	1.26E+06	1263.1
12 horas con 2mrad	3443	27.325	0.051	258.94	8.35E+05	835.06

Área de receptor = 0.070 m²

En las Fig. 90, 91 y 92 se muestran los mapas de colores del comportamiento de la densidad de potencia e imágenes solares que entrega el concentrador Scheffler dadas en el solsticio de invierno con 2 mrad de error de pendiente agregado a la simulación.

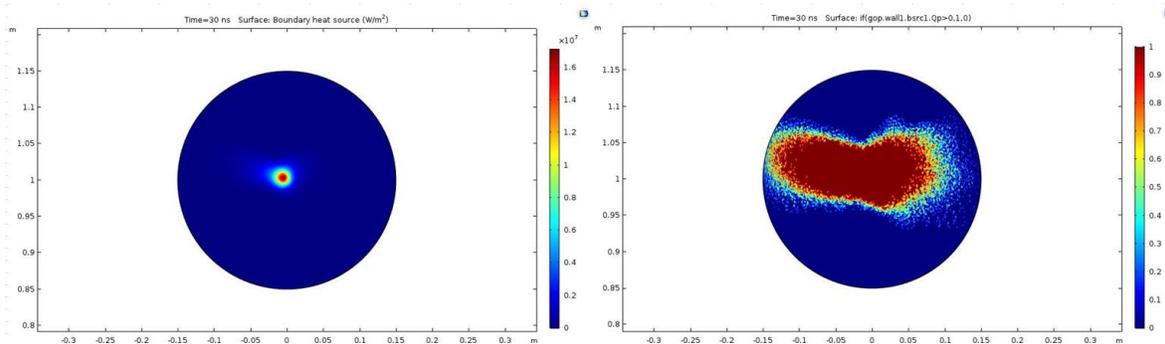


Fig. 90. Mapa de colores de densidad de potencia y mancha solar producida a las 8 a.m. del solsticio de invierno con 2mrad de error de pendiente.

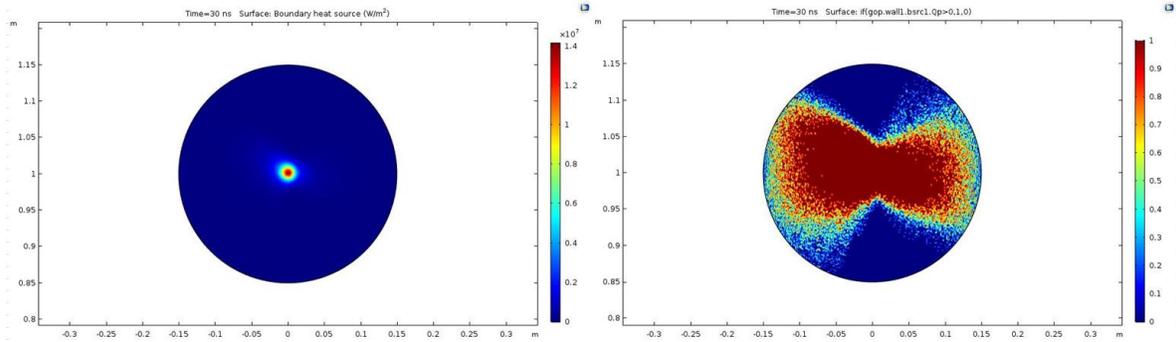


Fig. 91. Mapa de colores de densidad de potencia y mancha solar producida a las 10 a.m. del solsticio de invierno con 2mrad de error de pendiente.

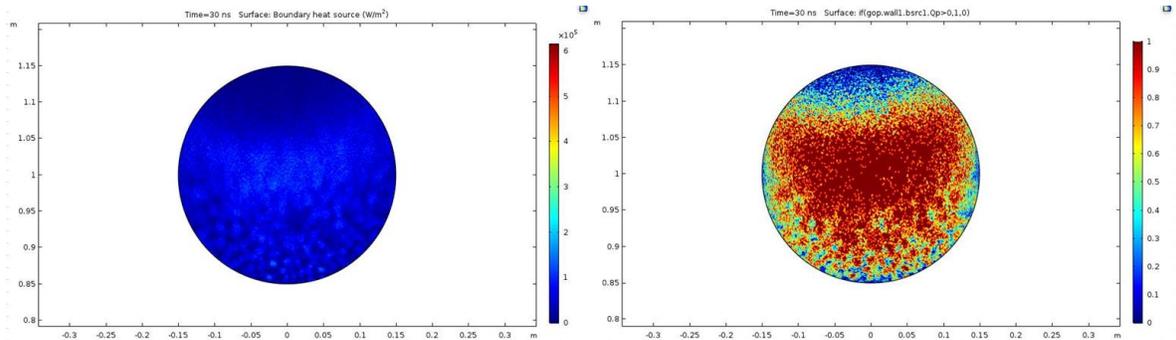


Fig. 92. Mapa de colores de densidad de potencia y mancha solar producida a las 12 p.m. del solsticio de invierno con 2mrad de error de pendiente.

La Fig. 93 muestra una gráfica comparativa del perfil del comportamiento de la densidad de potencia entregada al plano focal a través del solsticio de invierno sin error de pendiente. Se observa una notoria disminución de rendimiento al medio día.

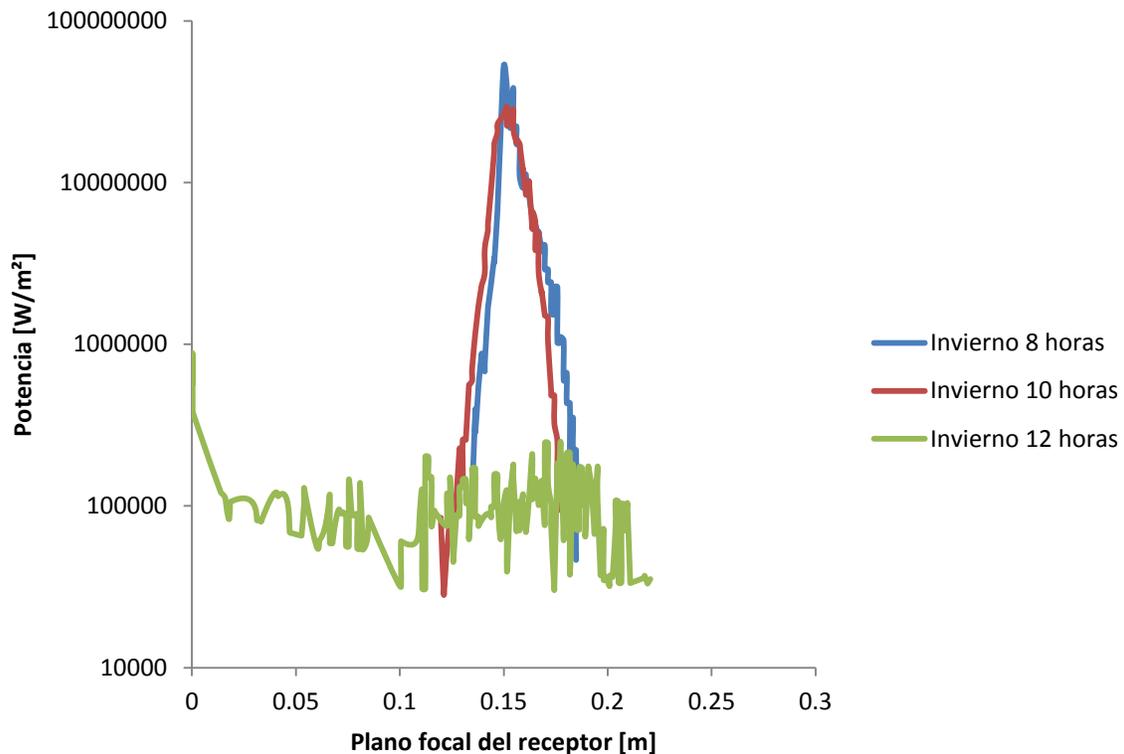


Fig. 93. Desempeño del concentrador Scheffler en el plano focal (sin error) en el solsticio de invierno.

En la Fig. 94 se muestra la diferencia de concentración óptica que se tiene a través de los 3 días simulados. En la figura podemos observar como en la mayor parte de los escenarios se supera el objetivo de 2000 soles. Asimismo, se supera en parte del día a la concentración máxima de los sistemas Eurodish[®] y WGA-500[®]. También se incluye las concentraciones dadas en las simulaciones sin error y con error de pendiente. Se puede apreciar cierto desfase de tiempo entre las simulaciones. Esto se debe al cambio de hora en la que se suscita el medio día solar entre los escenarios críticos.

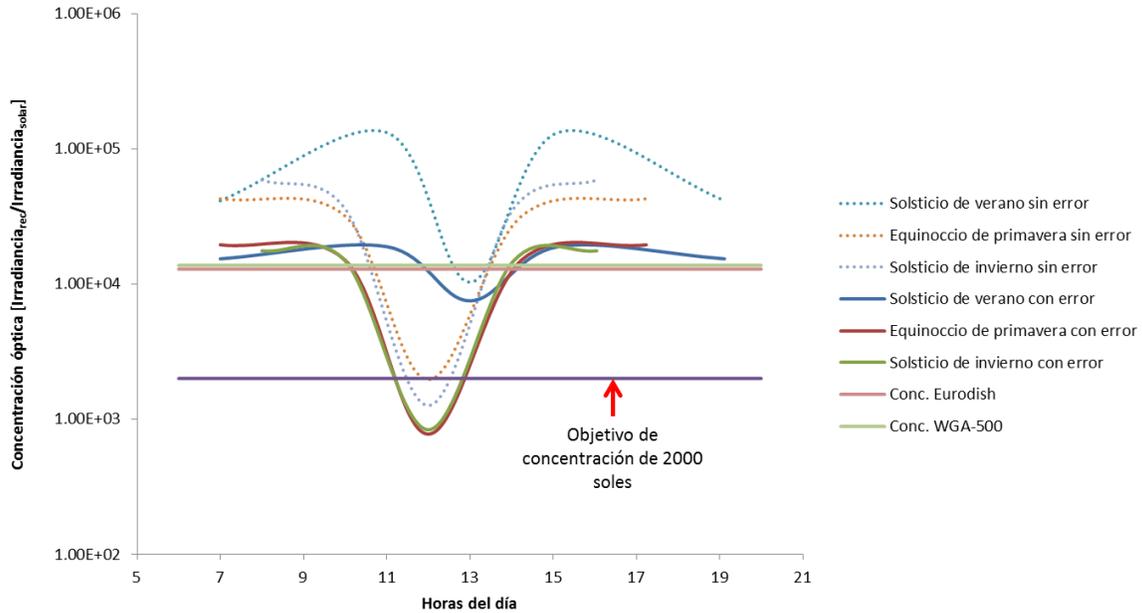


Fig. 94. Gráfica de rendimiento del concentrador Scheffler en las simulaciones con orientación sur.

El comportamiento de las rotaciones que realizó el disco Scheffler a través de los escenarios críticos es mostrado en las Fig. 95, 96 y 97. El ángulo de rotación a 0° posiciona al concentrador en su posición inicial, es decir, en la posición resultante justo después de realizar el corte de la parábola de diseño. En el caso de la rotación solar, el ángulo positivo corresponde a una inclinación hacia el este. En la rotación azimutal, el ángulo positivo corresponde a un giro con dirección al este. Por último, un ángulo positivo de la rotación altura corresponde a una menor inclinación del concentrador.

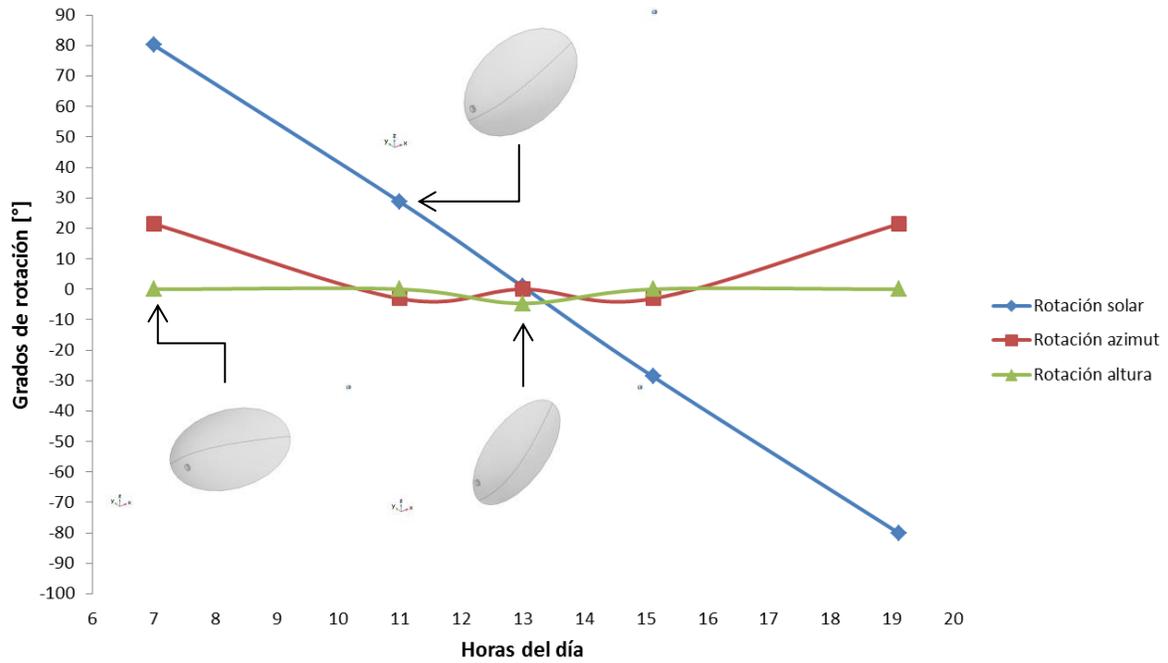


Fig. 95. Comportamiento de las rotaciones del disco Scheffler en el solsticio de verano.

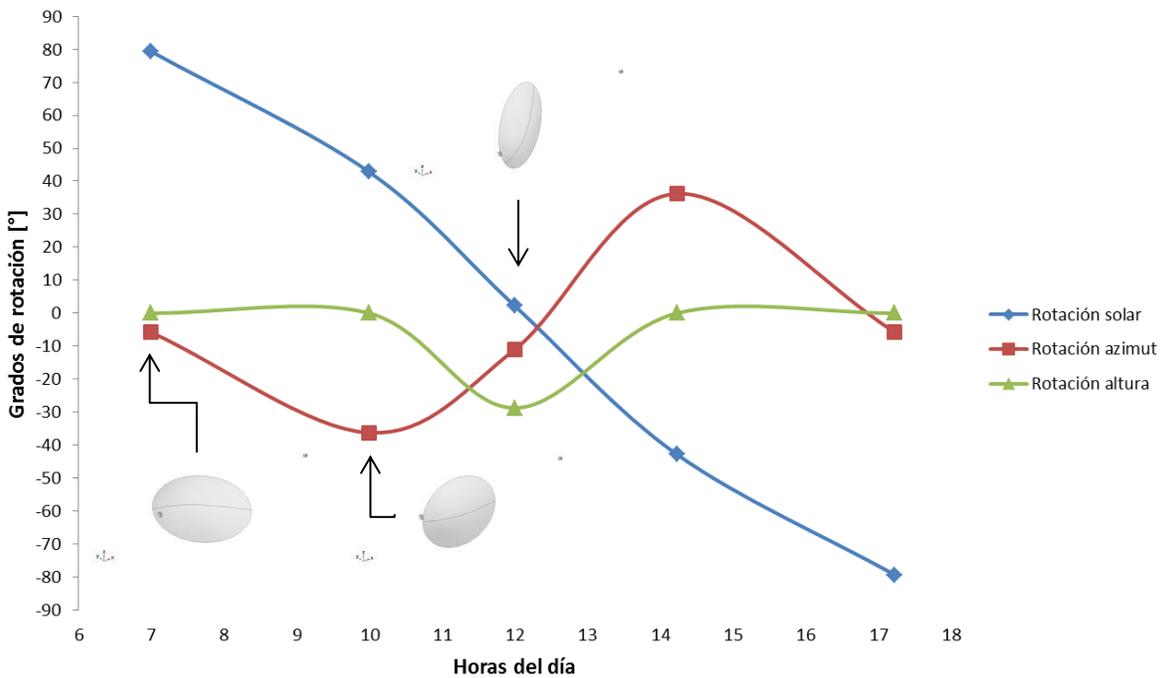


Fig. 96. Comportamiento de las rotaciones del disco Scheffler en el equinoccio de primavera.

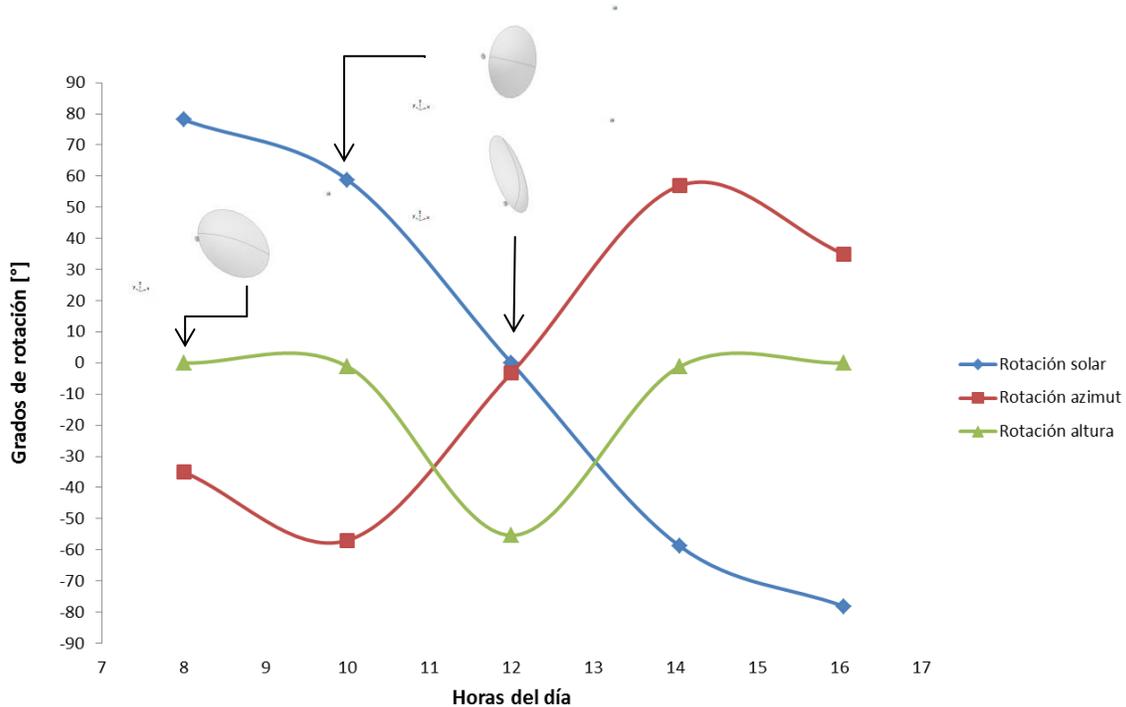


Fig. 97. Comportamiento de las rotaciones del disco Scheffler en el solsticio de invierno.

4.4 Concentración y factores de intercepción (Orientación norte)

Ya que la simulación con orientación sur fue la mejor, en esta sección del capítulo se mostrarán brevemente los resultados de la simulación con orientación norte. Esto, claro está, mostrando porqué fueron mejores los resultados en la simulación con orientación sur.

En la Fig. 98, 99 y 100 se muestra los mapas de colores del comportamiento de la densidad de potencia e imagen solar que se obtuvieron a las 10, 12 y 13:10 horas del solsticio de verano.

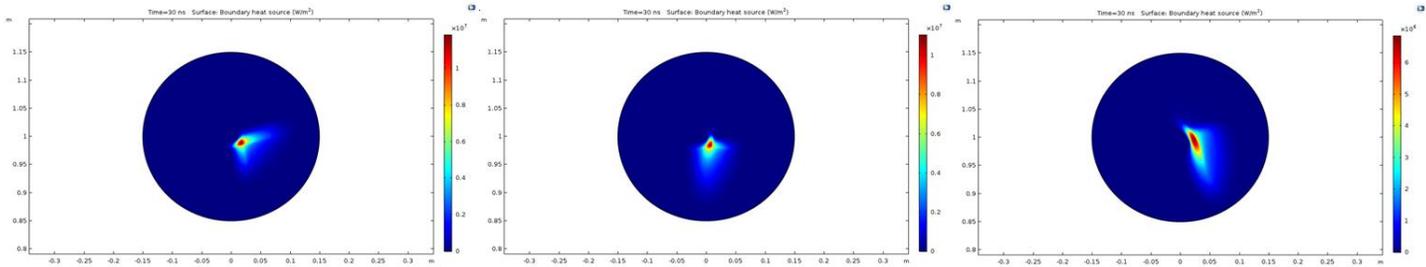


Fig. 98. Mapa de colores de densidad de potencia en el plano focal del receptor en el solsticio de verano a las 10, 12 y 13:10 horas, respectivamente, de izquierda a derecha.

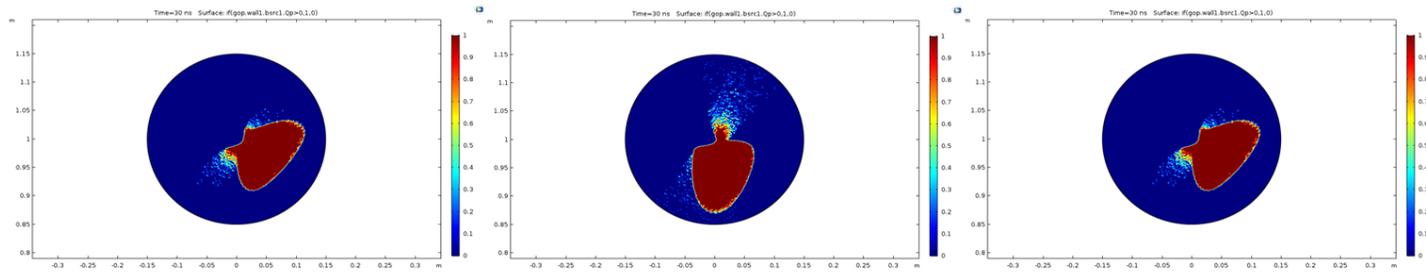


Fig. 99. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el solsticio de verano a las 10, 12 y 13:10 horas, respectivamente, de izquierda a derecha.

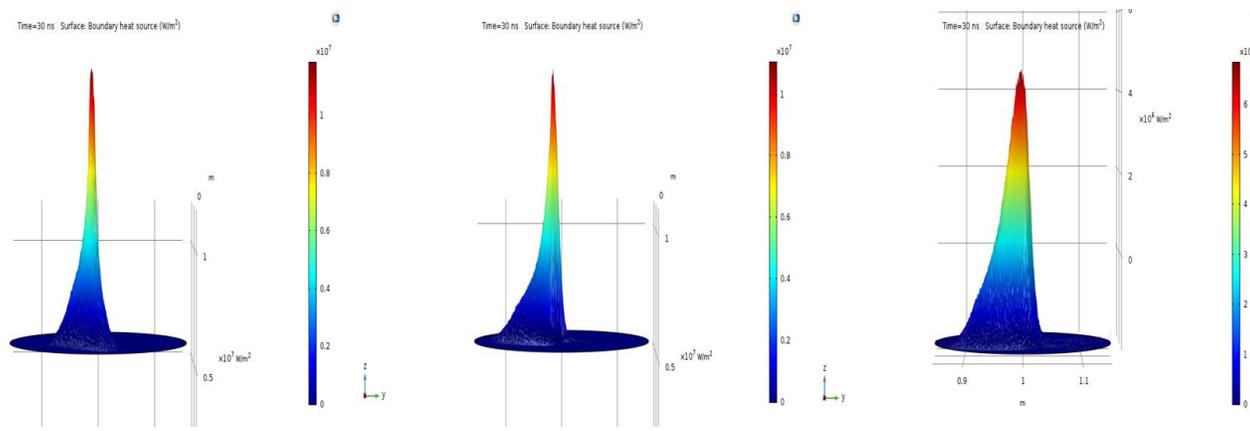


Fig. 100. Densidad de potencia 3D en el plano focal del receptor en el solsticio de verano a las 10, 12 y 13:10 horas, respectivamente, de izquierda a derecha.

Como se puede ver en las Fig. 98, 99 y 100, el factor de intercepción y concentración siguen siendo de buena calidad, aunque con un factor de concentración mucho menor a las simulaciones con orientación sur. La Tabla 10 contiene los resultados obtenidos en esta simulación. Sin embargo, los resultados obtenidos en la simulación con orientación norte son de menor calidad a los obtenidos en la simulación orientada hacia el sur. Por esto, se decidió optar por la simulación con orientación sur como la mejor alternativa de diseño. En las Fig. 101, 102 y 103 se muestran los mapas de colores del comportamiento de la densidad de potencia e imágenes solares de la simulación con orientación norte en el solsticio de invierno.

Tabla 10. Tabla de resumen de resultados de las simulaciones con orientación norte del solsticio de verano.

Datos de la simulación con orientación norte en el solsticio de verano						
Hora	Watts interceptados [W]	Factor de intercepción ϕ [%]	Área de imagen [m²]	Q_{opt}	Potencia pico (COMSOL) [W/m²]	Factor de concentración
10 horas	11844	94	0.0102	2972.5	1.24E+07	12400
12 horas	11826	93.85	0.0116	3426.7	1.16E+07	11600
13:10 horas	11753	93.27	0.0165	2244.3	7.35E+06	7350
Área de receptor = 0.070 m²						

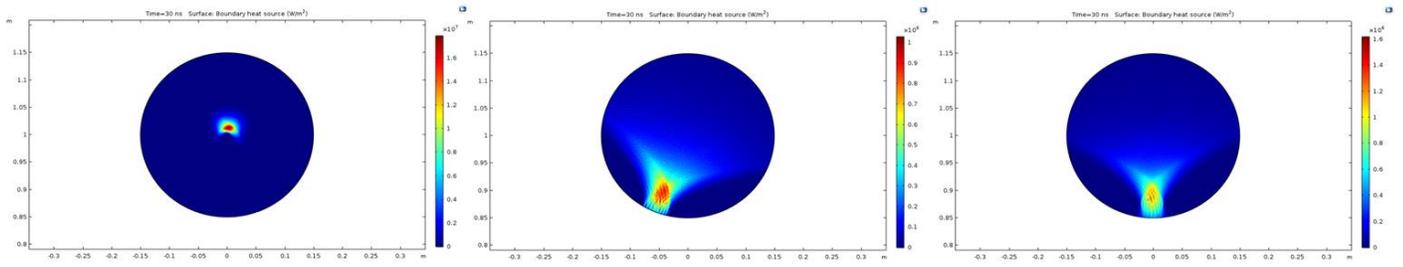


Fig. 101. Mapa de colores de densidad de potencia en el plano focal del receptor en el solsticio de invierno a las 7, 10 y 12 horas, respectivamente, de izquierda a derecha.

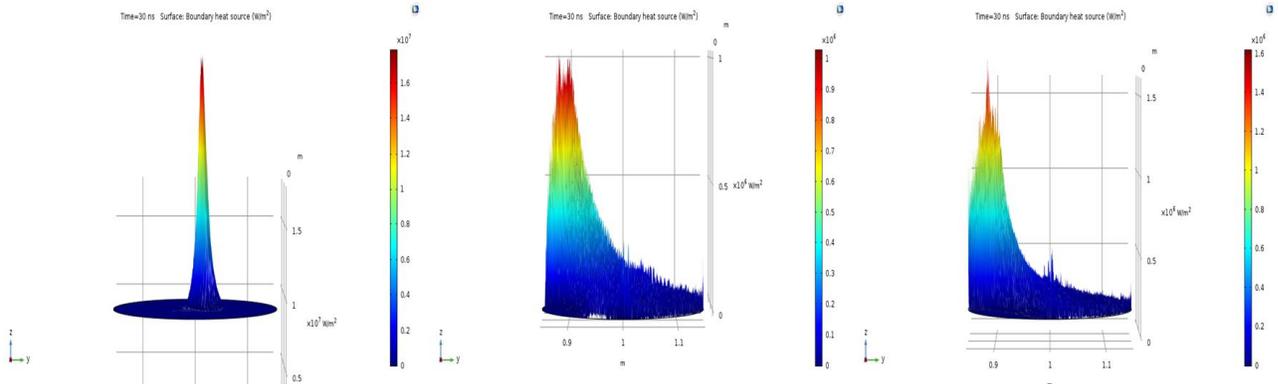


Fig. 102. Densidad de potencia 3D en el plano focal del receptor en el solsticio de invierno a las 7, 10 y 12 horas, respectivamente, de izquierda a derecha.

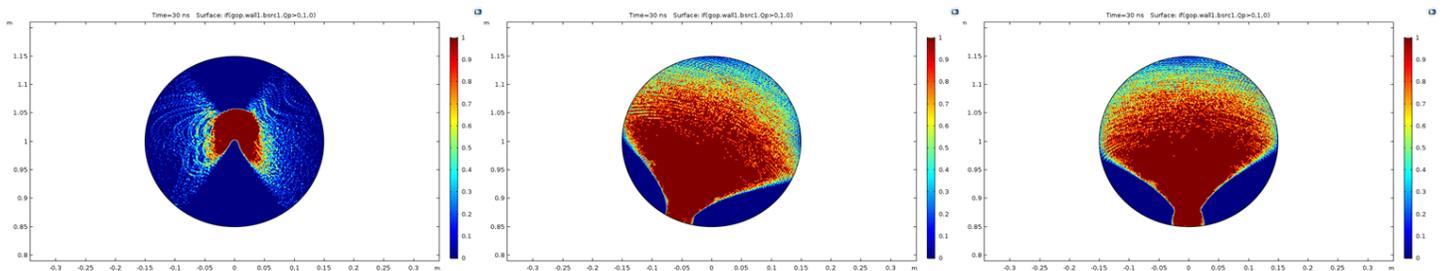


Fig. 103. Mancha de la imagen solar en el plano focal en el solsticio de invierno a las 7, 10 y 12 horas, respectivamente, de izquierda a derecha.

En la Tabla 11 podemos observar los resultados estimados de la simulación en el solsticio de invierno con orientación norte. Podemos observar que en 2 de las 3 horas del día, el sistema Scheffler tiene un rendimiento bajo. Por lo que si se realizara una estimación de kWh producidos durante todo un año, esta se reduciría considerablemente debido al factor de intercepción que se reporta en el solsticio de invierno. Incluso, hablando del factor de concentración, este es mucho menor igualmente en el solsticio de verano.

Tabla 11. Tabla de resumen de resultados de las simulaciones con orientación norte del solsticio de invierno.

Datos de la simulación con orientación norte en el solsticio de invierno						
Hora	Watts interceptados [W]	Factor de intercepción ϕ [%]	Área de imagen [m²]	Q_{opt}	Potencia pico (COMSOL) [W/m²]	Factor de concentración
7 horas	11764	93.36	0.01	6913.8	2.05E+07	20500
10 horas	6565.8	52.1	0.049	301.67	1.41E+07	14100
12 horas	7013.1	55.65	0.047	351.31	2.59E+06	2590
Área de receptor = 0.070 m ²						

En la Tabla 10 y 11 las simulaciones fueron realizadas sin error de pendiente, por lo que estos valores son los máximos que se podrían alcanzar en caso de no tener un error relacionado al sistema Scheffler. En la Fig. 104 se presenta la concentración óptica entregada durante el año en orientación norte. Se puede observar como en la mayoría del día es mayor a la concentración objetivo planteada al principio del proyecto. No obstante, en la mayor parte de los escenarios solares no se supera las concentraciones tanto del Eurodish[®] como del WGA-500[®]. Sin embargo, estos resultados son con simulación sin error de

pendiente, por lo que se espera una caída de desempeño en el sistema al agregar cierto error de pendiente.

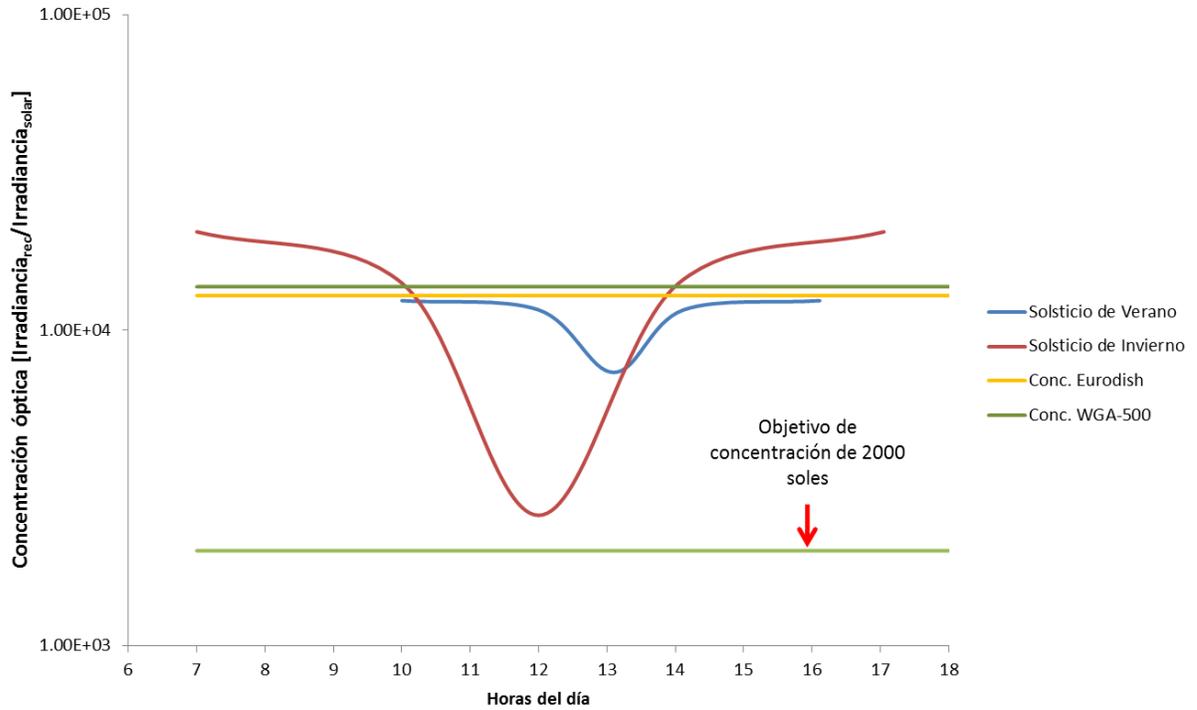


Fig. 104. Gráfica de rendimiento del concentrador Scheffler en las simulaciones con orientación norte.

5

Discusión

“There is a driving force more powerful than steam, electricity and nuclear power: the will”

Albert Einstein

Al principio del proyecto se buscó diseñar un disco parabólico convencional para el sistema de concentración solar. Sin embargo, el seguimiento solar era muy complejo, ya que además de orientar el disco, se tenía que mover para lograr buenas imágenes focales. Además, se han encontrado trabajos en la bibliografía reportada en este trabajo en los cuales se requiere de una estructura robusta con el fin de orientar adecuadamente este tipo de concentradores. Por esto, se ha decidido utilizar el disco Scheffler como la alternativa de diseño más adecuada para mantener un foco fijo sin aumentar los requerimientos estructurales del sistema. Actualmente, el disco Scheffler se encuentra en la bibliografía como un concentrador compacto y de fácil montaje. No obstante, se debe agregar otro

motor de seguimiento solar al sistema, ya que se usaron 3 rotaciones para el seguimiento.

El ángulo de corte de la parábola de diseño depende del objetivo que se busque. En el caso de este trabajo, se decidió realizar el corte a 45° con el fin de tener un balance en tener un área de apertura mayor sin decrecer aún más el factor de concentración potencial que pudiera entregar el sistema. En muchos de los diseños de sistemas de concentración solar, se busca maximizar el área de apertura, ya que ésta es la entrada de energía que tendrá el sistema. No obstante, durante el desarrollo de este trabajo se buscó el mayor potencial de concentración que el concentrador Scheffler pudiera alcanzar con el fin de usarlo en una aplicación de alta temperatura.

Por otra parte, el programa de simulación COMSOL[®] mostró una buena aproximación a los valores reportados en la bibliografía consultada para el desarrollo de este trabajo. Esto hace al software COMSOL[®] un programa adecuado para simular no solamente el fenómeno óptico, sino también el térmico y estructural que se presentan en los concentradores solares de disco parabólico convencionales. No obstante, existe cierto error entre los valores experimentales reportados en la bibliografía de los sistemas Eurodish[®] y WGA-500[®] y los resultados obtenidos en las simulaciones de validación de metodología del trabajo. Se ha relacionado esta pequeña variación a los diferentes errores ópticos que no se han añadido a las simulaciones. Además del error de pendiente, existen otro tipo de errores que se pueden presentar en los sistemas de disco parabólico. Existen errores por cargas de viento que pueden deformar la forma parabólica del

concentrador, errores debido a cierta rugosidad en las superficies reflectivas que pudieran desviar los rayos solares de su trayectoria, errores debido a la construcción o montaje del sistema o incluso desalineación entre el concentrador y el receptor, lo cual pudiera causar cierto desplazamiento de la imagen solar hacia un lado en el plano focal del receptor. El error de pendiente fue el error óptico relacionado a la distorsión de la forma parabólica del concentrador incluido en las simulaciones ópticas del proyecto. Por esto, se puede deducir un pequeño cambio en los resultados al incluir en la simulación otro tipo de errores ópticos comunes en los sistemas de concentración solar. Sin embargo, el software COMSOL[®] es un software programable, por lo que estos errores que no son considerados en estas simulaciones podrían modelarse para aplicarse en simulaciones de sistemas de concentración solar posteriores.

Los resultados de la simulación ideal salieron como se esperaban. Efectivamente, al eliminar los errores asociados a la fuente de los rayos y al concentrador Scheffler, se obtuvo una captura de un punto focal de alta concentración, por lo que se puede deducir que el modelado y la construcción del concentrador Scheffler es correcta.

Para simular el comportamiento del concentrador Scheffler a través de un año solar, se tomaron 3 escenarios críticos solares: ambos solsticios y el equinoccio de primavera, con el fin de abarcar todo el dominio solar a través de un año. Se realizaron solamente 3 simulaciones por día, lo cual nos da 5 resultados debido a la simetría de la trayectoria solar a través de un día. Sin embargo, si se realizara una mayor discretización de un día y se realizaran mayor número de simulaciones

se obtendrían resultados más precisos del comportamiento del sistema Scheffler a través del año.

El software COMSOL[®] es un software que trabaja a base de métodos numéricos para resolución de sistemas de ecuaciones. Por esto, COMSOL[®] tiene un cierto error numérico durante la resolución de sus sistemas de ecuaciones. Durante el desarrollo de este trabajo, no se ha tomado en cuenta el error numérico que pudieran tener los resultados reportados.

Para la parte de la optimización del seguimiento solar se ha utilizado la función “ponderación” como la función objetivo para calificar el valor de concentración mediante el método numérico Nelder-Mead. Al principio, se ha optimizado con la variable *diam* a 30 cm. Al simularlo con este valor de *diam*, se han obtenido resultados de muy pobre calidad en cuanto a concentración y factor de intercepción. Por lo cual, se modificó el valor de *diam* a 3 cm con el fin de afinar la forma de la función “ponderación” a una curva gaussiana más delgada.

La función de una curva gaussiana es frecuentemente reportada en los planos focales como la forma resultante más común de las densidades de potencia. Sin embargo, si se propusiera una función diferente, los resultados de las optimizaciones cambiarían. La variación de los resultados por el cambio de la función objetivo no se ha caracterizado durante la realización de este proyecto.

Se obtuvo un mejor desempeño en el sistema concentrador Scheffler con orientación sur, confirmando que los concentradores Scheffler se desempeñan mejor de cara al sol, dependiendo en qué hemisferio del planeta se encuentra el

sistema. El sistema con orientación sur supera tanto en factor de intercepción como en factor de concentración en el plano focal del receptor al sistema con orientación norte. No se realizaron simulaciones solares incluyendo el error de pendiente en las simulaciones de orientación norte, ya que al descubrir que tenía un menor rendimiento óptico que la orientación sur, éstas fueron descartadas como un parámetro de diseño y, por lo tanto, no se ahondó más en dichas simulaciones.

Conforme el sol baja su altura máxima al transcurrir el año, el concentrador Scheffler necesita inclinarse más con respecto a la posición solar, por lo que el receptor queda muy por debajo de la parte superior del concentrador y, en consecuencia, los rayos reflejados provenientes de esta parte, no impactan el plano focal. La Fig. 105 muestra el concentrador Scheffler inclinado hacia adelante en la rotación altura. En la Fig. 106 se muestra el trazado de los rayos solares en el solsticio de invierno a las 12 horas con orientación sur. En esta figura se muestra claramente como los rayos simplemente no impactan el plano focal. Debido a esta inclinación, el factor de concentración y el de intercepción se ven severamente afectados, disminuyendo drásticamente la eficiencia óptica total del sistema. Este problema está asociado a la curvatura tan pronunciada dada por la parábola de diseño (Véase Fig. 34). No obstante, se buscaba esta curvatura para alcanzar niveles de concentración más altos. Sin embargo, para cuantificar de una mejor manera esta disminución de potencial se requiere de un estudio térmico posterior para cuantificar realmente cuanto disminuye su potencial.

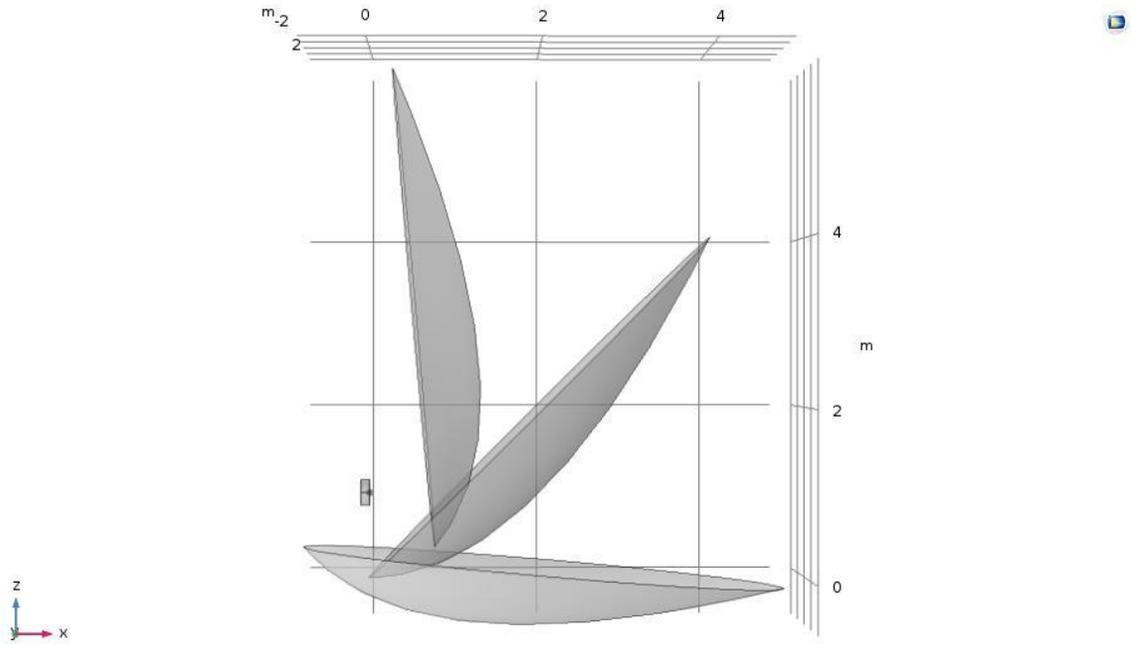


Fig. 105. Concentrador inclinado con orientación al sur en solsticio de invierno al medio día.

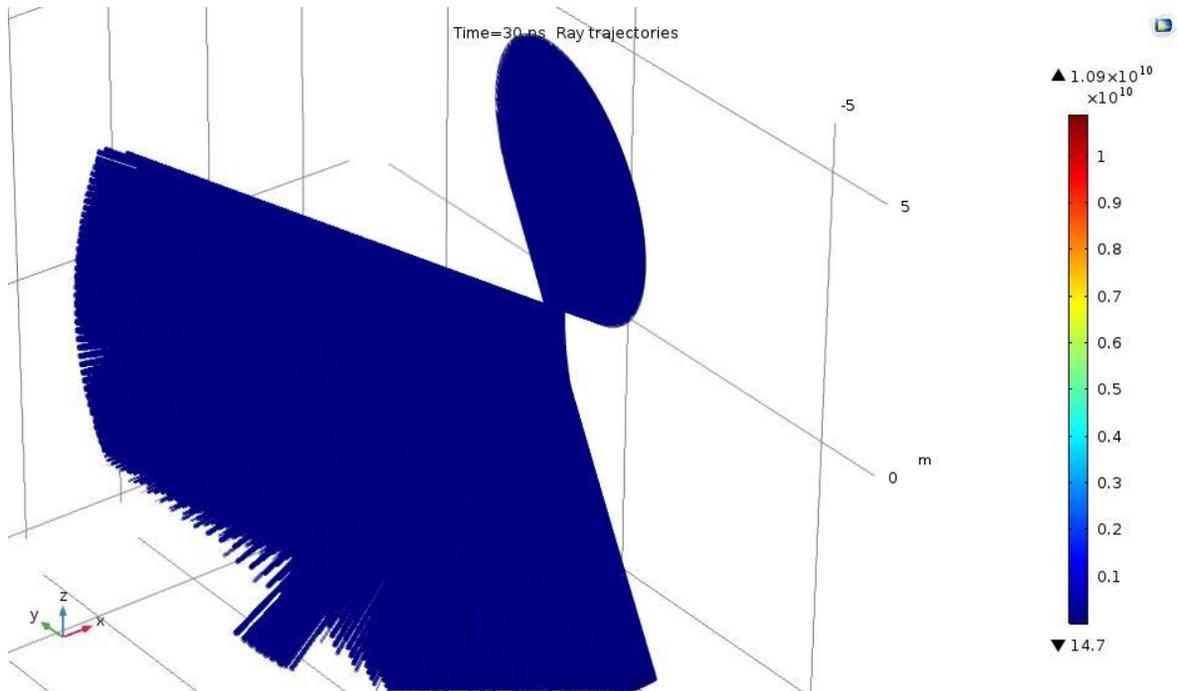


Fig. 106. Concentrador Scheffler inclinado en el medio día del solsticio de invierno.

A pesar de esta baja en su desempeño en medios días solares, el sistema Scheffler se desempeña de manera destacable en las mañanas y en las tardes en todo el transcurso del año.

Por los resultados que se obtuvieron en la concentración norte, podemos deducir que si se pudiera diseñar un sistema con dos concentradores Scheffler, en un arreglo “bi-orientado” (Véase *Fig. 13*), el concentrador secundario serviría para compensar el bajo desempeño del concentrador primario al incrementar su inclinación con respecto al receptor térmico. Esta solución daría más regularidad al desempeño del sistema global en su factor de intercepción y tasas de concentración.

La aplicación inicial que se buscaba satisfacer mediante el diseño de este sistema era la cogeneración de energía eléctrica y vapor de alta temperatura en un arreglo de planta solar de concentradores Scheffler. Sin embargo, en las simulaciones de los escenarios críticos solares, se han ejecutado simulaciones a primera hora solar, por lo que se tomó la primera solar como una hora disponible para la producción de energía eléctrica y térmica. No obstante, los concentradores solares, en arreglo de plantas solares, requieren cierta separación entre ellos para maximizar su producción, ya que las sombras provenientes de los concentradores contiguos pueden afectar el desempeño de los sistemas. Por esto, suele no tomarse la primera hora solar como una hora disponible para producción solar. Para este tipo de concentradores con diferente configuración debe buscarse otro tipo de arreglo para maximizar su producción o, en su defecto, puede buscarse otro tipo de aplicación como doméstica o semi-doméstica.

Este trabajo también aporta en el conocimiento del potencial del concentrador de disco Scheffler, ya que actualmente no es un concentrador que se tome en cuenta para aplicaciones termosolares de alta temperatura. Asimismo, no se tiene mucha información con respecto a su desempeño óptico y/o térmico.

Para las simulaciones solares no se han considerado pérdidas por condiciones meteorológicas o de contaminación, por lo que se asume una irradiancia solar sin perturbaciones a la entrada del área de apertura del concentrador Scheffler, es decir, una irradiancia constante de 1 kW/m^2 . Al considerarse cierta variación en la irradiancia a través de un día, podemos deducir que los valores de la tasa de concentración también cambiarán debido a la entrada de menor o mayor energía.

La manufactura del concentrador no fue un factor de consideración en el diseño de este trabajo. No se realizó ninguna estimación de los costos que podrían representar la construcción de este sistema concentrador. Se espera que mediante la implementación de un foco fijo, el costo de la inversión inicial, de operación y de producción del sistema bajen significativamente en comparación con otros sistemas de concentración solar. Usualmente, los concentradores de discos parabólicos suelen tener facetas idénticas como superficie reflectiva. Esto facilita la producción en línea de los concentradores parabólicos. Sin embargo, la curvatura de este concentrador Scheffler es muy variable, por lo que posiblemente las facetas de este tipo de concentradores deban ser más pequeñas buscando una manufactura más fácil de la superficie reflectiva.

En el diseño de este sistema Scheffler no se ha considerado una posible carga de viento incidente en el concentrador. Generalmente, en los concentradores solares suele construirse una pequeña abertura en el concentrador con el fin de dejar pasar el aire y servir como un alivio al concentrador debido a cargas de viento. En caso de no tener esta abertura, los concentradores pueden recibir más desgaste en su estructura y dificultar más el seguimiento solar. Como alternativa a futuro, puede considerarse en el diseño del sistema, una pequeña abertura transversal a través del concentrador, como suele diseñarse en los concentradores Scheffler. No obstante, esto generaría una pequeña reducción de energía colectada al no aprovechar esta área como superficie reflectiva.

Al desprender la unidad generadora de energía fuera de la estructura de soporte, se eliminan requerimientos estructurales debido a la disminución de peso del sistema global. No obstante, esta condición obligó a tener un seguimiento solar más preciso, por lo que se implementaron 3 rotaciones en el software COMSOL[®] para orientar el concentrador Scheffler adecuadamente en función de la posición solar. Esto involucraría agregar otro motor de seguimiento con respecto a los concentradores parabólicos convencionales (los cuales usan 2 motores de seguimiento), por lo cual incrementaría el gasto de energía eléctrica del sistema. Sin embargo, al reducir significativamente el peso del sistema global por el desprendimiento de la UGE, los motores de seguimiento serían de menor potencia, gastando así menor cantidad de energía eléctrica en el seguimiento solar diario. Además, los motores de seguimiento tendrían menores pérdidas por fricción debido a la disminución de la masa del sistema global.

6

Conclusiones

“If you can't explain it simply, you don't understand it well enough”

Albert Einstein

6.1 Conclusiones

6.2 Recomendaciones

6.1 Conclusiones

El sistema Scheffler diseñado superó en su concentración máxima a los 2000 soles que se plantearon superar en el desarrollo de este proyecto. Se mostró también un buen desempeño en la mayoría de los escenarios solares al agregar la condición de punto focal fijo a diferencia de los discos parabólicos convencionales manteniendo valores elevados de factor de intercepción o concentración.

Al obtener resultados elevados de concentración y de factor de intercepción ($\varphi > 80\%$) podemos deducir que este sistema se puede acoplar exitosamente con la tecnología de almacenamiento térmico de alta temperatura.

Los discos Scheffler tienen mayor potencial del que se usa hoy en día para aplicaciones de baja-media temperatura. Mediante el desarrollo de este trabajo se obtuvieron las concentraciones que puede alcanzar un disco Scheffler con parábolas de diseño de foco muy pequeño.

La concentración y factor de intercepción disminuye severamente cuando el disco empieza a inclinarse (conforme se acerca el solsticio de invierno en el hemisferio norte), teniendo una baja de desempeño significativa en los medios días solares.

El software COMSOL[®] es un software adecuado para simular sistemas de concentración solar, ya que no solo simula fenómenos ópticos, sino también térmicos y estructurales. Además, no se debió modificar los modelos que se tienen programados por defecto en el software, ya que las simulaciones mostraron

similitud con los datos reportados en la bibliografía que se utilizó en este trabajo. Dado esto, se puede continuar empleando COMSOL[®] para simular este diseño de concentrador solar de punto fijo.

6.2 Recomendaciones

Durante el desarrollo de este trabajo, no se trabajó con ninguna optimización o diseño del receptor. Al optimizar o diseñar un receptor solar se requiere de un gran número de factores a considerar. El diseño de la forma, de los materiales empleados, de las pérdidas térmicas estimadas, de la posición e inclinación del mismo, del absorbedor, entre algunas otras cosas, hacen del mismo una tarea compleja de realizar en poco tiempo. Sin embargo, se requiere de la conjunción de ambos sistemas para estimar un potencial más real del sistema de concentración solar. El verdadero potencial óptico que muestra este proyecto no se verá reflejado hasta diseñar y optimizar la parte del receptor. Por todo esto, se recomienda fuertemente continuar con el diseño y optimización del receptor térmico para maximizar el potencial del sistema generado aquí. Asimismo, se recomienda hacer análisis de energía creada por el sistema a través de un año contabilizando días no adecuados para producción solar.

Sin duda alguna, este trabajo requiere de un estudio posterior para cuantificar las pérdidas debido a la baja de rendimiento óptico del concentrador Scheffler en ciertas horas y épocas del año.

En trabajos futuros, puede caracterizarse el cambio de desempeño del sistema al variar las funciones objetivo usadas durante la optimización, ya que estos cambios

pueden resultar en una mejora de la concentración y factor de intercepción reportados en este trabajo.

Se recomienda también realizar un diseño de un sistema con dos concentradores Scheffler y un receptor de doble cara para comprobar si un concentrador secundario puede compensar las pérdidas obtenidas durante los medios días solares.

Asimismo, se requiere de un análisis para considerar que tipo de arreglo de planta solar se ajusta mejor a este tipo de concentradores solares.

Este trabajo se realizó para la ciudad de Chihuahua, Chihuahua. No obstante, puede automatizarse la optimización del seguimiento solar del concentrador, de tal forma que no deban realizarse ajustes manuales a la optimización. El fin de esta automatización sería una fácil optimización del seguimiento solar del concentrador en cualquier parte del mundo.

Referencias

Andraka, C.E., 2008. Cost/Performance tradeoffs for reflectors used in solar concentrating dish systems. In: ASME 2nd International Conference on Energy Sustainability. Jacksonville, Florida.

Andraka, C. E. (2014). Dish Stirling advanced latent storage feasibility. *Energy Procedia*, 684-693. Retrieved from ScienceDirect.

"Anexo 1: Algoritmos de optimización para funciones con ruido." *Departamento de Matemática Aplicada II*, Universidad de Vigo, www.dma.uvigo.es/~aurea/transparencias3.pdf. Accessed 2018.

Balz, M., Keck, T., Schiel, W., & Weinrebe, G. (2012). SonneSun. In *Schlaich Bergermann und Partner*. Retrieved from https://www.sbp.de/fileadmin/sbp.de/sonne/sbp_Themenheft_SonneSun_2012_Ir.pdf

Boyle, G. (2004). *Renewable Energy. Power for a sustainable future* (2nd ed., p. 22). N.p.: Oxford University Press.

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. . (n.d.). *Plot Extractor* (2.0nd ed.). Programa desarrollado por Juan Pablo González, Mario González y Mateo González. Su función es digitalizar imágenes de graficas mediante interpolación como método numérico.

Coventry, J., & Andraka, C. (2017, August). Dish systems for CSP. *Solar Energy*, 152, 140-170. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.056>.

De Laquil, P., Kearney, D., Geyer, M., Diver, R., 1993. Solar-Thermal Electric Technology. In: Johanson, T.B., Kelly, H., Reddy, A.K.N., Williams, R.H. (Eds.) *Renewable energy: Sources for fuels and electricity*. Earthscan, Island Press, Washington DC, pp. 213–296.

Delaney, D., 2003. Scheffler's community solar cooker. <<http://www.solarbruecke.org>>.

Desideri, U., & Campana, P. E. (2014, January). Analysis and comparison between a concentrating solar and a photovoltaic power plant. *Applied Energy*, 113, 422-433. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.046>

Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.

Goswami, Y., Kreith, F., & Kreider, J. F. (2000). *Principles of Solar Engineering* (2ndnd ed., p. 6, 173-180). N.p.: CRC Press, Taylor & Francis Group.

Goswami, Y., & Kreith, F. (Eds.). (2007). *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy* (pp. 21-1-21-97). Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group.

G.R. Liu and S.S. Quek, Chapter 1 - Computational Modeling, In *The Finite Element Method* (Second Edition), Butterworth-Heinemann, Oxford, 2014, Pages 1-11, ISBN 9780080983561, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098356-1.00001-1>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080983561000011>)

Hafez, A. Z., Soliman, A., El-Metwally, K. A., & Ismail, I. M. (2016, October 25). Design analysis factors and specifications of solar dish technologies for different systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 1019-1036. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.077>

Herrmann, U., & Kearney, D. W. (2002, April 24). Survey of Thermal Energy Storage for Parabolic Trough Power Plants. *Journal of Solar Energy Engineering*, 124, 145-152. doi: doi:10.1115/1.1467601

https://mnre.gov.in/file-manager/UserFiles/CST-Manuals/Scheffler%20Dish_E.pdf

IRENA Working Paper, 2012, Concentrating Solar Power.

José Ruelas, Nicolás Velázquez, Ricardo Beltrán, Opto-geometric performance of fixed-focus solar concentrators, *Solar Energy*, Volume 141, 2017, Pages 303-310, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.040>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X16305801>)

Kaltschmitt, M., Streicher, W., & Wiese, A. (Eds.). (2007). *Renewable Energy. Technology, Economics and Environment* (pp. 34-35, 123-124). N.p.: Springer.

Kaushika, N. D., & Reddy, K. S. (1999, August 17). Performance of a low cost solar paraboloidal dish steam generating system. *Energy Conversion & Management*.

Kelley, C T. *Iterative Methods for Optimization*. Philadelphia, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999, pp. 135-42, https://www.siam.org/books/textbooks/fr18_book.pdf. Accessed 2018.

Kuravi S, et al., Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants, *Progress in Energy and Combustion Science* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2013.02.001>.

Liu, M., Tai, S., Bell, S., Belusko, M., Jacob, R., Will, G., & Saman, W. (2016, January). Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1411-1432. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.026>.

Mancini T, Heller P, Butler B, et al. Dish-Stirling Systems: An Overview of Development and Status. *ASME. J. Sol. Energy Eng.* 2003;125(2):135-151. doi: 10.1115/1.1562634.

Munir, A., Hensel, O., & Scheffler, W. (2010, August). Design principle and calculations of a Scheffler fixed focus concentrator for medium temperature applications. *Solar Energy*, 84(8), 1490-1502. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.05.011>.

Pelay, U., Luo, L., Fan, Y., Stitou, D., & Rood, M. (2017, November). Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 82-100. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.139>.

Pilotta, Elvio A. "El metodo de Nelder-Mead para minimización irrestricta sin derivadas." *Revista de Educación Matemática*, 2002, <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/REM/article/viewFile/10873/11464>. Accessed 2018.

Promexico. Unidad de Inteligencia de Negocios. (2016, April). Diagnóstico Sectorial. In *Promexico*. Retrieved June 21, 2018, from <http://www.promexico.gob.mx/documentos/diagnosticos-sectoriales/energias-renovables.pdf>

Reddy, D. S., Khan, M. K., Alam, M. Z., & Rashid, H. (2018, March 15). Design charts for Scheffler reflector. *Solar Energy*, 163, 104-112. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.081>

Rodriguez, J., Cañadas, I., & Zarza, E. (2016). New PSA High Concentration Solar Furnace SF40. *AIP AIP Conference Proceedings*. doi: <https://doi.org/10.1063/1.4949175>

Ruelas, J., Velázquez, N., & Beltrán, R. (2011). Diseño de un Concentrador Solar Acoplado a un Motor Stirling Fijo. In *Revista Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo*. Retrieved from <http://www.revistas-conacyt.unam.mx/revistasomim/index.php/IMTyD/article/view/12/12>

Scheffler dish based solar system. Operations and maintenance manual. (2014, November). In *Ministry of New & Renewable Energy*.

Serrano, M. R. (2017). Concentrating Solar Thermal Technologies. Analysis and Optimization by CFD Modelling. *Green Energy and Technology*. Retrieved from Springer.

Soteris A. Kalogirou, Chapter one - Introduction, In *Solar Energy Engineering*, Academic Press, Boston, 2009, Pages 1-48, ISBN 9780123745019, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374501-9.00001-7>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123745019000017>)

S. Moaveni, *Finite Element Analysis Theory and Applications with ANSYS*, 1999.

Toscano, J. R. (2010). Estudio Económico y Termodinámico del disco Stirling Eurodish de la E.S.I. de Sevilla. In *e-REdING. Trabajos y proyectos fin de estudios de la E.T.S.I.*. Retrieved from <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4801/>

Truscello, V.C., 1979. The Parabolic Concentrating Collector: A Tutorial. Jet Propulsion Laboratory. Report number JPL Pub. 79-7.

Ulrich Oelher, Wolfgang Scheffler, The use of indigenous materials for solar conversion, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 33, Issue 3, 1994, Pages 379-387, ISSN 0927-0248, [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(94\)90239-9](https://doi.org/10.1016/0927-0248(94)90239-9). (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0927024894902399>)

Wang, W., Ragnolo, G., Aichmayer, L., Strand, T., & Laumert, B. (2015, May). Integrated design of a hybrid turbine-receiver unit for a solar dish system. *Energy Procedia*, 69, 583-592. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.067>

WGAssociates. (n.d.). Introduction to WGAssociates and Solar Dish/Stirling Power Systems. In *Pointfocus*. Retrieved from <http://pointfocus.com/images/pdfs/wga.pdf>

White M, Qiu S, Galbraith R. Phase Change Salt Thermal Energy Storage for Dish Stirling Solar Power Systems. ASME. Energy Sustainability, ASME 2013 7th International Conference on Energy Sustainability ():V001T03A010. doi:10.1115/ES2013-18292.

W. Scheffler, Introduction to the revolutionary design of scheffler reflectors, in *Solar Cookers and Food Processing Conf.*, Granada, July (2006).

Y. Bravo, M. Carvalho, L.M. Serra, C. Monné, S. Alonso, F. Moreno, M. Muñoz, Environmental evaluation of dish-Stirling technology for power generation, *Solar Energy*, Volume 86, Issue 9, 2012, Pages 2811-2825, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.06.019>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X12002319>)

Y. Tian, C.Y. Zhao, A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications, *Applied Energy*, Volume 104, 2013, Pages 538-553, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.051>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912008549>)