

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Análisis de la influencia y limitaciones en el diseño del campo de heliostatos de las centrales de torre y en la eficiencia de la planta al usar concentradores secundarios



Grado en Ingeniería
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Francisco Javier Iñigo Labairu

Coro Alberdi Odriozola y Amaia Mutuberria Larrayoz

Pamplona, 29 de junio de 2015



RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado ha sido desarrollado en CENER (Centro Nacional de Energías Renovables) y se encuentra enmarcado en el programa de prácticas curriculares del grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Universidad Pública de Navarra.

Dentro del progreso generalizado que han experimentado las energías renovables a nivel mundial, ha sido la energía solar térmica una de las que mayor crecimiento ha tenido, siendo las centrales solares de torre una de las tecnologías que más posibilidades ofrece. Su funcionamiento se basa en el calentamiento de un fluido del que se aprovecha su energía térmica para producir electricidad.

Para conseguir una elevada eficiencia en las centrales solares de torre se necesitan altas temperaturas en el receptor al que es dirigida la radiación solar, sin provocar por ello que las pérdidas térmicas adquieran una elevada magnitud. Por lo tanto se requerirá concentrar la radiación solar lo máximo posible.

El uso de concentradores secundarios, gracias a los mayores niveles de concentración introducidos, a las modificaciones producidas sobre el perfil del flujo solar y a su capacidad para transferir en mayor medida energía al fluido caloportador, ha sido muchas veces considerado para conseguir la reducción de las pérdidas térmicas así como el incremento de la eficiencia del ciclo termodinámico. Sin embargo, la utilización de estos sistemas también conlleva una serie de limitaciones que han sido pocas veces analizadas. Entre ellas encontramos las pérdidas debidas a las reflexiones adicionales que se producen en los concentradores y las debidas a factores de tipo geométrico que hacen que la radiación pueda ser rechazada a su llegada al concentrador provocando por ello la disminución de la eficiencia de la planta.

El objetivo de este trabajo consiste en estudiar la influencia y las limitaciones que la utilización de estos sistemas ejerce sobre la eficiencia de la planta y sobre la distribución del campo de heliostatos de las centrales de torre, de manera que estas limitaciones e influencia sean tenidas en cuenta a la hora de diseñar una planta solar comercial con concentradores secundarios y sean consideradas para evaluar la forma de obtener el mayor rendimiento posible del uso de los mismos.

El trabajo ha sido estructurado de modo que primero ha sido descrito el estado del arte de la energía solar térmica y centrales solares de torre. Posteriormente se han explicado que son los concentradores secundarios. Más tarde se recoge el desarrollo del trabajo donde se pueden ver los resultados obtenidos y se hace una valoración del uso de los concentradores secundarios, también denominados reconcentradores.

PALABRAS CLAVE

Energía solar térmica; tecnologías solares de concentración; centrales solares de torre; concentrador secundario, reconcentrador; concentración, ángulo de aceptación, radiación solar, reflectividad; aiming point, spillage, lay-out del campo de heliostatos, pérdidas térmicas, ángulo de incidencia, flujo térmico.

ÍNDICE

OBJETIVOS	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2. ENERGÍA SOLAR TÉRMICA	11
2.1 INTRODUCCIÓN	11
2.2 TIPOS DE CENTRALES TERMOSOLARES	12
2.2.1 SISTEMAS LINEALES FRESNEL	13
2.2.2 COLECTORES CILINDRO-PARABÓLICOS	14
2.2.3 CENTRALES SOLARES DE TORRE	16
2.2.4 DISCO PARABÓLICO	17
2.3 ESTADO Y EVOLUCIÓN	18
3. CENTRALES SOLARES DE TORRE	21
3.1 INTRODUCCIÓN	21
3.2 DESCRIPCIÓN	21
3.2.1 CAMPO DE HELIOSTATOS	22
3.2.2 RECEPTOR	22
3.2.3 TORRE	24
3.3 FUNCIONAMIENTO	25
3.4 FACTORES DE INFLUENCIA EN LA PLANTA	26
3.5 ESTADO Y EVOLUCIÓN	30
4. CONCENTRADORES SECUNDARIOS	32
4.1 INTRODUCCIÓN	32
4.2 CONCENTRACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR	32
4.3 TIPOS DE CONCENTRADORES	35
4.4 CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO (CPC)	37
4.4.1 DESCRIPCIÓN	37
4.4.2 ÁNGULO DE ACEPTANCIA	40
4.4.3 ECUACIÓN DEL CPC	44
4.4.4 RAZÓN DE CONCENTRACIÓN GEOMÉTRICA	44
4.4.5 TRUNCAMIENTO	44
4.5 CONCENTRADORES SECUNDARIOS	46
4.5.1 INTRODUCCIÓN	46

4.5.2 DESCRIPCIÓN	47
4.5.3 ECUACIONES QUE DEFINEN UN CONCENTRADOR SECUNDARIO	50
4.5.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS CONCENTRADORES SECUNDARIOS.....	51
5. METODOLOGÍA.....	57
5.1 PROGRAMACIÓN EN R	57
5.2 TONATIUH	58
6. RESULTADOS	60
6.1 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS CONCENTRADORES SECUNDARIOS MEDIANTE PROGRAMACIÓN EN R	60
6.1.1 HIPÓTESIS CONSIDERADAS	60
6.1.2 NOMENCLATURA.....	62
6.1.3 MODELO BIDIMENSIONAL.....	63
6.1.4 MODELO TRIDIMENSIONAL – RECEPTOR CILÍNDRICO	69
6.1.5 MODELO TRIDIMENSIONAL – RECEPTOR ESFÉRICO	75
6.1.6. CÁLCULO DEL RADIO NECESARIO EN UN RECEPTOR CILÍNDRICO CON CONCENTRADORES SECUNDARIOS PARA TENER LA MISMA EFICIENCIA ÓPTICA QUE EN UN RECEPTOR QUE NO LOS TIENE	77
6.2 SIMULACIONES EN TONATIUH	82
6.2.1 CENTRAL DE TORRE ANALIZADA	82
6.2.2 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL FLUIDO EN FUNCIÓN DE LOS CAMBIOS INTRODUCIDOS POR LOS RECONCENTRADORES EN CUANTO A CONCENTRACIÓN Y EFICIENCIA ÓPTICA.....	91
6.2.3 ANÁLISIS RECONCENTRADORES CON SEMIÁNGULO DE ACEPTANCIA 32°	93
6.2.4 ANÁLISIS RECONCENTRADORES CON SEMIÁNGULO DE ACEPTANCIA 40°	107
6.2.5 ANÁLISIS REFLECTIVIDAD RECONCENTRADORES.....	115
6.2.6 ANÁLISIS RECONCENTRADORES SEGÚN HORA DEL DÍA	116
6.2.7. ANÁLISIS CONCENTRADORES SECUNDARIOS INCLINADOS HACIA EL CAMPO DE HELIOSTATOS	118
6.2.8. OTRAS VALORACIONES	126
7. CONCLUSIONES	127
8. GLOSARIO Y NOMENCLATURA	132
BIBLIOGRAFÍA.....	136
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	138
ÍNDICE DE TABLAS	142

ANEXOS	143
ANEXO 1: Programa en R para simular una central de torre con reconcentradores, caso bidimensional	143
ANEXO 2: Programa en R para diferentes ángulos α , caso bidimensional	144
ANEXO 3: Programa en R en el que varían el semiángulo de aceptación y la distancia a la torre, caso bidimensional.....	145
ANEXO 4: Programa en R para la simulación de una central de torre con receptor cilíndrico	146
ANEXO 5: Programa en R en el que varían el semiángulo de aceptación y la distancia al receptor siendo el receptor cilíndrico.....	147
ANEXO 6: Eficiencia de los concentradores secundarios según H , α , el semiángulo de aceptación y la distancia a la torre, siendo el radio del receptor cilíndrico de 4 metros	149
ANEXO 7: Programa en R para la simulación de una central de torre con receptor esférico	157
ANEXO 8: Programa en R para el cálculo del radio de un receptor cilíndrico con reconcentradores para que la eficiencia de los mismos tenga valor 1	158
ANEXO 9: Coordenadas en Tonatiuh de un campo de heliostatos similar al de Gemasolar	159
ANEXO 10: Script en Tonatiuh para los campos de heliostatos analizados	163
ANEXO 11: Script en Tonatiuh para la torre.....	165
ANEXO 12: Script en Tonatiuh para el receptor.....	166
ANEXO 13: Script en Tonatiuh para los concentradores secundarios	167
ANEXO 14: Programa en R para la lectura de los archivos binarios resultantes de la simulación en Tonatiuh de una central de torre con receptor cilíndrico	171
ANEXO 15: Programa en R para la lectura de los archivos binarios resultantes de la simulación en Tonatiuh de una central de torre con un receptor de 6 superficies planas inclinadas hacia el campo de heliostatos.....	174

OBJETIVOS

Este Trabajo de Fin de grado analiza el empleo de concentradores secundarios en las centrales solares de torre. El uso de estos dispositivos viene motivado por la alta concentración de la radiación, con las altas temperatura que ello conlleva, que son capaces de conseguir en el receptor pero a su vez también tienen un conjunto de limitaciones que muchas veces se pasan por alto y que es conveniente estudiar. El trabajo tiene una serie de objetivos a alcanzar para poder llevar a cabo el estudio de los concentradores secundarios:

- Evaluar la eficiencia óptica de los concentradores secundarios según los diferentes parámetros que definen tanto una central solar de torre como los propios reconcentradores.
- Analizar el aumento de la concentración de la radiación que se consigue gracias a los concentradores secundarios.
- Comparar la potencia que llega al receptor con y sin reconcentradores para diferentes casos y analizar cómo afectan las pérdidas ópticas, debidas al ángulo de aceptación y reflectividad de los concentradores secundarios, al valor de dicha potencia. La central analizada para ello en este trabajo ha sido una similar a la de Gemasolar.
- Estudiar la influencia de la distribución del campo de heliostatos en la eficiencia de los concentradores secundarios y cuál ha de ser este lay-out del campo para que la potencia y eficiencia conseguidas sean las máximas posibles.
- Obtener y comparar la distribución del flujo térmico en el receptor cuando este es cilíndrico externo y cuando este está rodeado de concentradores secundarios. Considerar cuales han de ser el tipo, características y forma del receptor para que el flujo que resulta de la implantación de los reconcentradores sea beneficioso desde un punto de vista térmico, es decir, en lo referente a pérdidas térmicas, gradientes térmicos y temperaturas conseguidas.
- Proponer variaciones en el diseño de la geometría del receptor y de los concentradores secundarios de cara a optimizar el uso de los mismos. Realizar el estudio y simulación del nuevo modelo para obtener conclusiones acerca de su funcionamiento.
- Valorar todas las limitaciones y la influencia introducidas con la utilización de reconcentradores, exponerlas para que sean tenidas en cuenta en el diseño de una central de torre y en base a ellas, y por comparación con los beneficios introducidos, concluir acerca de si el uso de concentradores secundarios es conveniente en una central de torre y bajo qué condiciones.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores retos de la humanidad a día de hoy consiste en la transformación del modelo energético actual por otro sostenible, limpio y seguro.

Año tras año la demanda energética mundial crece ocasionando por ello una serie de riesgos medioambientales y sociales a los que las tecnologías mayoritariamente empleadas en la actualidad no son capaces de hacer frente. Se hace necesaria la aparición de nuevas maneras de producir energía. La investigación, desarrollo e implantación de energías renovables juega un papel fundamental en este desafío.

Se prevé que la demanda energética aumente en un tercio para el año 2035 siendo superior el incremento que se experimentará en los países en desarrollo. Sin embargo, a pesar de la rápida expansión de las energías renovables, los combustibles fósiles van a seguir siendo el componente de mayor cuota de producción de energía primaria, siendo su peso superior al 75% en el año 2035 [1].

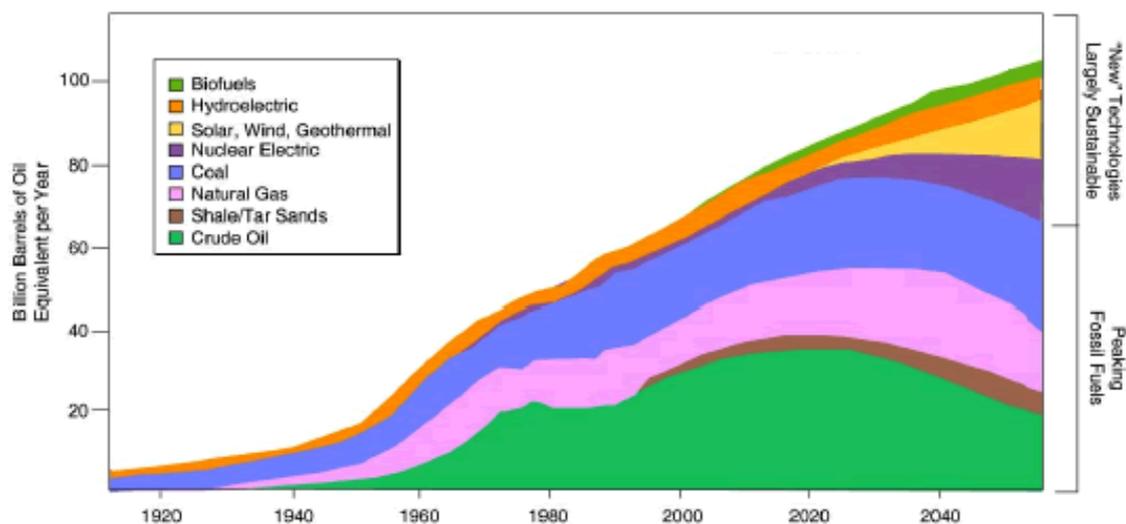


Ilustración 1: Evolución de la demanda energética mundial [Universidad de Stanford]

A pesar de los grandes avances experimentados en los últimos años en materia de energías renovables, estas aún suponen únicamente el 11% del total de la demanda mundial de energía primaria. Las predicciones auguran que en el año 2035 esta cantidad puede llegar al 20% [1]. Para ello se requieren acuerdos internacionales y fuertes inversiones en tecnología que permitan su correcta integración en el sistema. Asimismo, la cada vez mayor concienciación social acerca de la trascendencia de este tipo de energía contribuye a que los esfuerzos dedicados sigan aumentando consiguiendo que la competitividad de la misma se supere día tras día.

En cuanto a la demanda eléctrica, esta también sufrirá un alto crecimiento, que se estima de dos tercios para el año 2035 a nivel mundial, y que será mayor que el del resto de energías finales [1]. La contribución de las renovables también se incrementará con un crecimiento relativo del 45% en el año 2020, habiendo sido la cuarta parte del total en 2014.

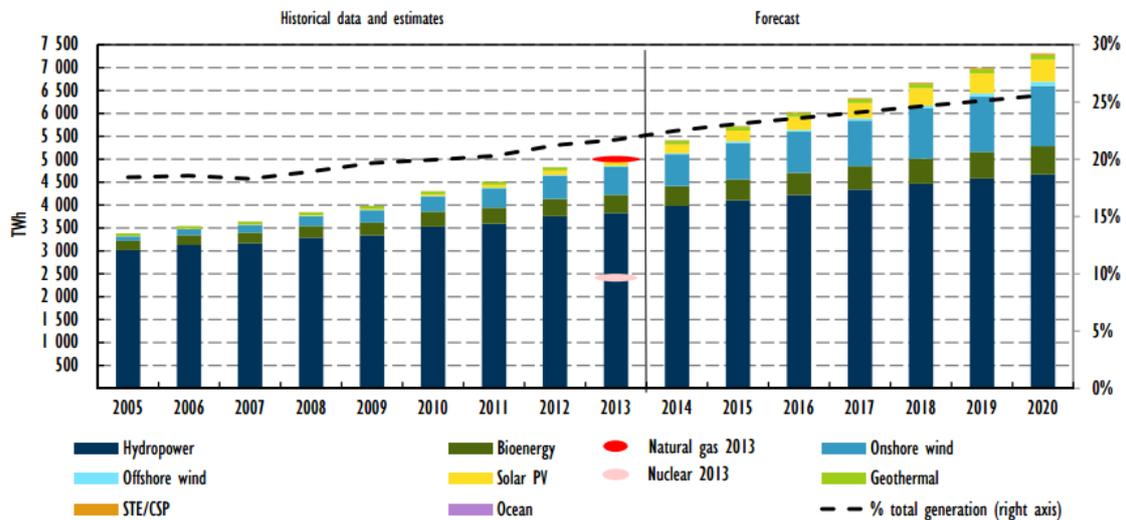


Ilustración 2: Producción eléctrica mundial renovable [IEA]

En lo referente a España la producción de energía primaria en España en 2014 fue de 118234 ktep mientras que la producción eléctrica fue de 277758 GWh, con una potencia instalada de 102259MW [IDAE]. La crisis económica y la mejora de la eficiencia energética han provocado el estancamiento en el valor de estas magnitudes. Otro aspecto fundamental que afecta al sistema español es su gran dependencia energética con el exterior. La implantación de energías renovables permite reducir dicha dependencia.

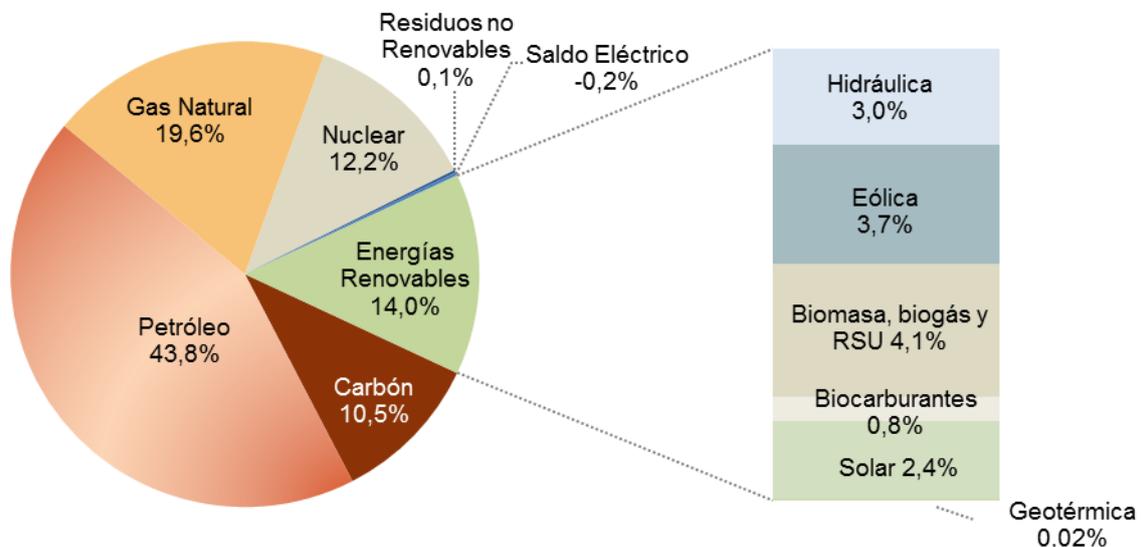


Ilustración 3: Consumo energía primaria en España en 2014 [IDAE]

En España las energías renovables son un sector en crecimiento aunque la crisis económica ha supuesto un freno a su tendencia ascendente. En 2014 representaron un 14,2% de la cobertura de energía primaria de la que casi el 75% se debe a la contribución de la energía hidráulica, biomasa y eólica, esta última con una alta tasa de crecimiento. Por otra parte, las tecnologías solares son las que más rápido se están expandiendo y ya suponen el 18% del total de las renovables. La energía solar termoeléctrica, en la que se emplaza este trabajo, tuvo en 2014 un crecimiento interanual que alcanzó el 10%, al igual que en años anteriores [1].

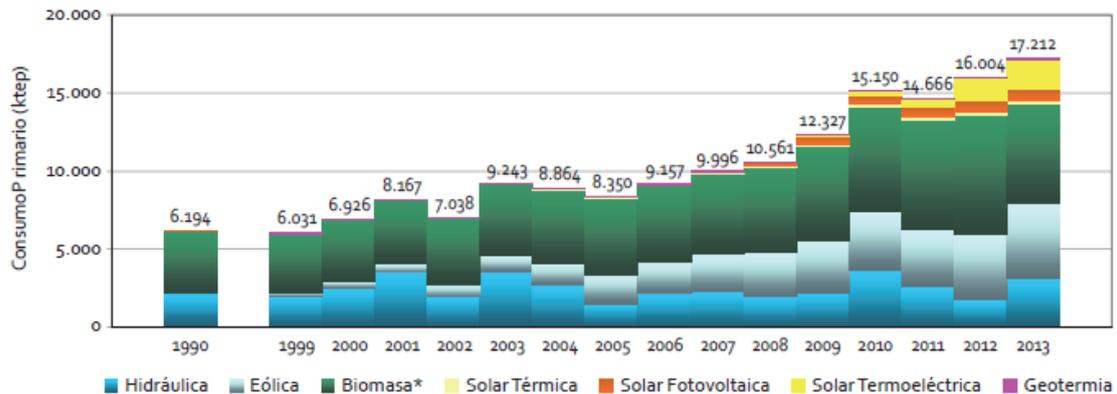


Ilustración 4: Evolución del consumo de energías renovables en España [1]

En cuanto a la demanda eléctrica en 2014, las energías renovables constituyeron el 42.8% del total de la producción eléctrica. La energía solar térmica cubrió el 5% de la demanda y tuvo una potencia instalada de 2300 MW [2].

Balance eléctrico anual (1)	Sistema peninsular		Sistemas no peninsulares		Total nacional	
	GWh	% 14/13	GWh	% 14/13	GWh	% 14/13
Hidráulica	35.685	5,0	0	-	35.685	5,0
Nuclear	57.179	0,6	-	-	57.179	0,6
Carbón	43.859	10,2	2.405	-7,2	46.264	9,1
Fuel/gas (2)	-	-	6.620	-5,5	6.620	-5,5
Ciclo combinado (3)	21.979	-12,4	3.890	8,6	25.869	-9,8
Consumos generación (4)	-6.518	4,0	-742	-5,4	-7.260	2,9
Hidroeólica	-	-	1	-	1	-
Resto hidráulica (5)	7.053	-0,7	3	14,5	7.056	-0,6
Eólica	51.032	-6,1	407	10,2	51.439	-6,0
Solar fotovoltaica	7.801	-1,5	410	0,2	8.211	-1,4
Solar térmica	5.013	12,9	-	-	5.013	12,9
Térmica renovable	4.739	-6,4	10	11,7	4.749	-6,4
Cogeneración y resto	25.903	-19,1	283	9,1	26.186	-18,9
Generación neta	253.724	-2,5	13.288	-1,1	267.012	-2,5
Consumos en bombeo	-5.403	-9,3	-	-	-5.403	-9,3
Enlace Península-Baleares (6)	-1.293	1,9	1.293	1,9	0	-
Intercambios internacionales (7)	-3.543	-47,4	-	-	-3.543	-47,4
Demanda (b.c.)	243.486	-1,2	14.581	-0,9	258.067	-1,2

(1) Asignación de unidades de producción según combustible principal. (2) En el sistema eléctrico de Baleares se incluye la generación con grupos auxiliares. (3) Incluye funcionamiento en ciclo abierto. (4) Consumos en generación correspondientes a la producción hidráulica, nuclear, carbón, fuel/gas y ciclo combinado. (5) Incluye todas aquellas unidades menores de 50 MW que no pertenecen a ninguna unidad de gestión hidráulica (UGH). (6) Valor positivo: entrada de energía en el sistema; valor negativo: salida de energía del sistema. (7) Valor positivo: saldo importador; valor negativo: saldo exportador.

Tabla 1: Balance energético España 2014 [2]

Potencia instalada a 31 de diciembre

	Sistema peninsular		Sistemas no peninsulares		Total nacional	
	MW	% 14/13	MW	% 14/13	MW	% 14/13
Hidráulica	17.786	0,0	1	0,0	17.787	0,0
Nuclear	7.866	0,0	-	-	7.866	0,0
Carbón	10.972	-1,4	510	0,0	11.482	-1,4
Fuel/gas	520	0,0	2.979	0,0	3.498	0,0
Ciclo combinado (1)	25.353	0,0	1.854	0,0	27.206	0,0
Hidroeléctrica	-	-	12	-	12	-
Resto hidráulica (2)	2.105	0,0	0,5	0,0	2.106	0,0
Eólica	22.845	0,0	158	0,0	23.002	0,0
Solar fotovoltaica	4.428	0,1	244	0,5	4.672	0,1
Solar térmica	2.300	0,0	-	-	2.300	0,0
Térmica renovable	1.010	3,6	5	0,0	1.016	3,6
Cogeneración y resto	7.075	-0,1	121	0,0	7.196	-0,1
Total	102.259	-0,1	5.884	0,2	108.142	-0,1

(1) Incluye funcionamiento en ciclo abierto. (2) Incluye todas aquellas unidades menores de 50 MW que no pertenecen a ninguna unidad de gestión hidráulica (UGH).
 Fuente: Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC) en los datos de potencia de resto hidráulica, eólica, solar fotovoltaica, solar térmica, térmica renovable y cogeneración y resto.

Tabla 2: Potencia instalada en España a 31 diciembre de 2014 [2]

Como se ha venido indicando, dentro de las energías renovables la energía solar es una de las que tiene mayor proyección y futuro. Hay que distinguir la energía solar fotovoltaica y la energía solar térmica. Mientras que la energía termosolar se basa en el empleo de la radiación del sol para producir energía térmica que posteriormente podrá ser empleada para obtener electricidad, la fotovoltaica aprovecha esta radiación para conseguir directamente electricidad gracias a las características químicas de algunos materiales, por ejemplo ciertos semiconductores. Por lo tanto, no se deben confundir los paneles fotovoltaicos con los captadores solares dentro de los cuales habrá diversas variantes en función de la concentración. Cuando se trata de alta temperatura hablamos de tecnologías solares de concentración.

Existen diferentes tipos de plantas termosolares de concentración (CSP). Entre ellas encontramos las centrales solares de torre, que están experimentando un rápido progreso. Sobre ellas versará este trabajo.

Para conseguir una buena eficiencia de las centrales solares de torre se requiere una alta concentración. Los concentradores secundarios, elementos estudiados en este trabajo, posibilitan conseguirla, sin embargo, tienen una serie de desventajas que deben ser analizadas. Por ello, se estudiarán con profundidad a lo largo de este TFG con el objetivo de obtener conclusiones acerca de la idoneidad de su implantación.

2. ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

2.1 INTRODUCCIÓN

La energía solar térmica (STE) resulta una de las tecnologías más exitosas y que más velozmente está progresando en la actualidad. En esta década se ha instalado gran cantidad de potencia en todo el mundo siendo España uno de los territorios donde la demanda cubierta por la misma y la innovación llevada a cabo son mayores.

Se distingue entre alta y baja temperatura. En alta temperatura las plantas termosolares se basan en la concentración de los rayos solares que llegan a la superficie terrestre para calentar un fluido que acciona directa o indirectamente una turbina que generará electricidad. La concentración de los rayos permite que la temperatura del fluido sea lo suficientemente elevada para que de este modo la eficiencia al convertir el calor en electricidad sea buena y las pérdidas térmicas sean limitadas.

Además de los beneficios ecológicos que el desarrollo de esta energía implica, al fin y al cabo el recurso solar es ilimitado, presenta otras ventajas que la hacen más competitiva frente a otros tipos de técnicas.

Las energías renovables se encuentran supeditadas a ciertos factores como las condiciones climatológicas, la época del año o el momento del día en el que estemos. No siempre hay el viento necesario para conseguir el adecuado funcionamiento de un aerogenerador ni a la noche tenemos la radiación solar que permita trabajar a las placas fotovoltaicas. Sin embargo, debido a las altas temperaturas conseguidas como consecuencia de la elevada concentración alcanzada en una central termosolar es posible el almacenamiento de energía. El fluido puede permanecer caliente y mantener su energía que podrá ser aprovechada cuando se desee para obtener electricidad, es decir, no está limitada la producción de energía a las horas de sol y, por ejemplo, de este modo sí es posible atender la demanda de energía al atardecer y amanecer, que son momentos en los que la demanda es mayor que en el resto del día, así como en horario nocturno o con cielo nuboso.

Otros beneficios son la diversificación energética que introducen y el descenso de la dependencia con el exterior. Esto último es especialmente notorio en España donde la ausencia de combustibles fósiles hace que se precisen otras fuentes de generación de energía.

Por otra parte, la energía solar térmica tiene un conjunto de objetivos a cumplir en el futuro. Entre ellos están la reducción del coste de la electricidad, disminuir su impacto ambiental, la mejora del almacenamiento y una mayor integración en la red.

2.2 TIPOS DE CENTRALES TERMOSOLARES

Existen cuatro tipos distintos de plantas CSP que se distinguen por su diseño óptico, la forma del receptor, la capacidad de almacenamiento de energía y por la naturaleza del fluido de transferencia. Las cuatro variantes se denominan reflectores Fresnel, centrales solares de torre, discos parabólicos y colectores cilíndrico-parabólicos.

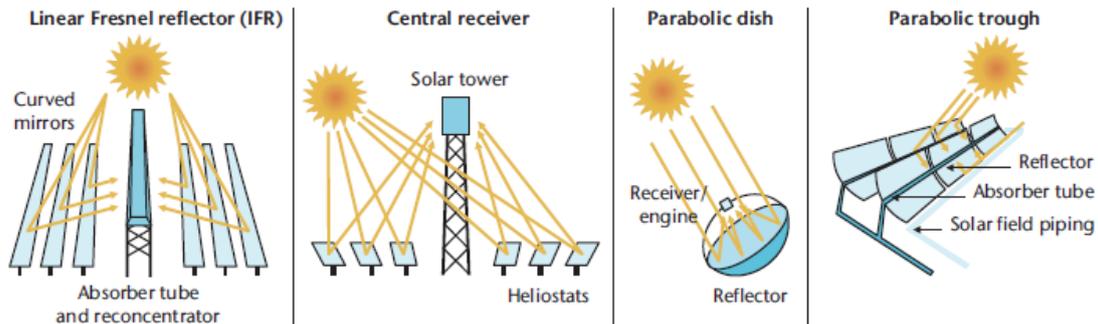


Ilustración 5: Tipos de centrales CSP [3]

Esta clasificación puede ser hecha según dos criterios: El tipo de foco al que dirigen los rayos los concentradores, es decir, si es puntual o lineal, y por otra parte si el receptor se puede catalogar como fijo o como móvil.

		Foco	
		FOCO LINEAL	FOCO PUNTUAL
Receptor	FIJO Son dispositivos estacionarios independientes de los concentradores. Se facilita el transporte del calor hasta el bloque de potencia	Los colectores siguen al sol a lo largo de un único eje y concentran la radiación en un receptor lineal. Esto hace el seguimiento del sol más sencillo.	Los colectores siguen al sol a lo largo de dos ejes y concentran la radiación en un único punto. Esto hace que las eficiencias a alta temperatura sean mayores.
	MÓVIL El receptor se mueve junto al dispositivo de enfoque. La energía captada es mayor.	Reflectores lineales Fresnel	Centrales solares de torre
		Colectores cilindro-parabólicos	Disco parabólico

Tabla 3: Criterios clasificación centrales CSP [3]

2.2.1 SISTEMAS LINEALES FRESNEL

Los reflectores lineales tipo Fresnel están formados por un conjunto de espejos planos o ligeramente curvados de larga longitud que concentran la radiación a lo largo de un receptor lineal atravesado por una tubería por la que circula un fluido que será calentado y del que se aprovechará posteriormente dicha energía térmica.



Ilustración 6: Planta reflectores Fresnel

Los espejos rotan según un eje a lo largo del día para orientarse hacia la posición del sol y poder dar una mayor potencia. Este sistema de seguimiento es fundamental para asegurar el buen funcionamiento de la instalación y el bajo coste de la electricidad.

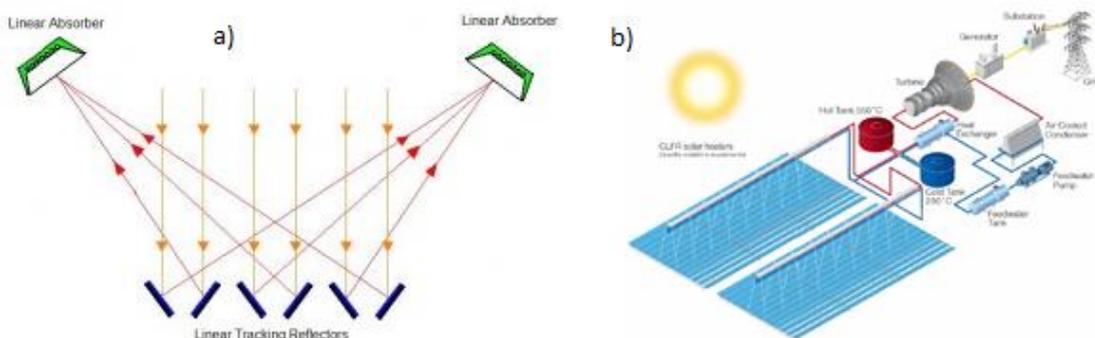


Ilustración 7: a) Funcionamiento reflector Fresnel b) Funcionamiento planta reflectores

En las plantas de reflectores Fresnel el fluido es calentado subiendo su temperatura poco (250-300 °C). El fluido es agua o vapor que va directamente acoplado a una turbina.

Los sistemas Fresnel destacan por su bajo coste, mejor aprovechamiento del terreno y su baja sensibilidad a accidentes. Sin embargo, las temperaturas de trabajo son menores y por lo tanto la eficiencia también es más baja y no es posible el almacenamiento térmico.

Se distinguen dos tipos: el modelo compacto y el clásico. El primero permite dirigir la radiación hacia dos receptores distintos según cual sea la posición del sol reduciendo así las pérdidas ópticas. El segundo, por el contrario, incorpora reflectores secundarios junto al receptor.

En cuanto a su situación en el mercado están todavía en una fase experimental en comparación con otras tecnologías CSP. No hay prácticamente plantas comerciales a excepción de alguna como la de Kimberlina de 5 MW o la de Puerto Errado de 1.4 MW. A pesar de ello se espera un gran desarrollo durante la próxima década multiplicándose por 10 la potencia instalada en el mundo [4].

2.2.2 COLECTORES CILINDRO-PARABÓLICOS

Los colectores cilindro-parabólicos (CCP) son la tecnología termosolar más avanzada en la actualidad y la que cuenta con una mayor potencia instalada y presencia en el mercado. De hecho su empleo comenzó hace dos décadas y desde entonces no ha parado de crecer.

Esta técnica utiliza gran cantidad de espejos paralelos con forma parabólica para concentrar la radiación solar en un receptor lineal. Rotan sobre un eje con el objetivo de coleccionar la mayor cantidad de rayos solares posible. La orientación más común de los espejos es norte-sur con movimiento de rotación este-oeste aunque también es posible ver justo lo contrario.

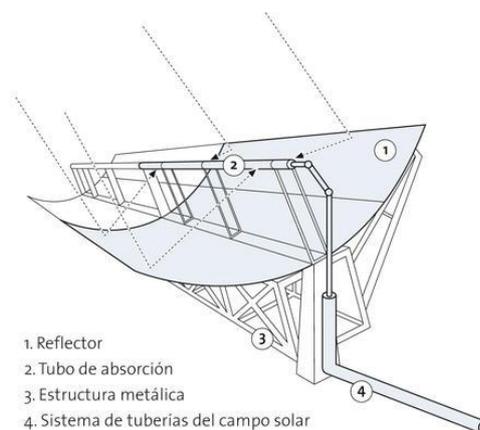


Ilustración 8: Colector cilindro-parabólico [Solar Millenium]

Por el interior de los tubos del receptor circula un aceite que es calentado hasta los 400°C proporcionando el calor necesario para la generación del vapor que pondrá en marcha una turbina. Este sistema sí posibilita el almacenamiento de energía y por ello la producción estable de energía eléctrica todo el día.

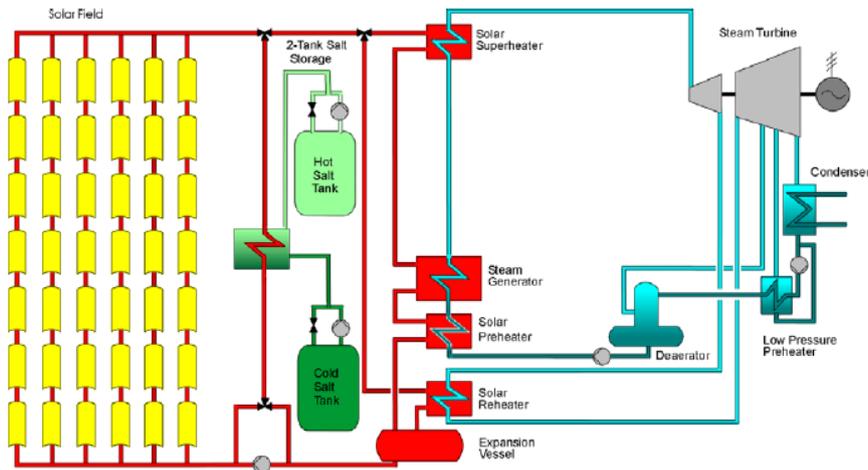


Ilustración 9: Funcionamiento planta CCP [4]

Como hemos dicho esta tecnología está bastante desarrollada y dispone de bastante potencia instalada. En España ya se cuenta con 1000 MW y es junto a Estados Unidos el principal productor. Además el precio de la electricidad resultante es de los más baratos en lo que renovables se refiere y por ello es ya una tecnología competitiva y capaz de enfrentarse a plantas térmicas convencionales.

Entre las plantas comerciales de mayor importancia están la de SEGS (354 MW) y Nevada Solar One (72 MW). En España destacan las plantas de Andasol, Solnova, Extresol o Puertollano [4].



Ilustración 10: Planta de colectores cilindro-parabólicos

2.2.3 CENTRALES SOLARES DE TORRE

Las centrales solares de torre se basan en el empleo de unos espejos, llamados heliostatos, que rotan según dos ejes y que concentran la radiación en lo alto de una torre en la que se encuentra un receptor. Este absorbe la radiación y la transforma en energía térmica mediante el calentamiento de un fluido que recorre la instalación y cuya alta temperatura permite la generación de vapor que producirá electricidad mediante su expansión en una turbina.

Es el sistema que permite conseguir una potencia más elevada. El almacenamiento de energía es bueno gracias a la considerable magnitud que adquiere la temperatura del fluido. Podemos encontrar diferentes tipos según el fluido utilizado que podrá ser vapor, aire o sales fundidas.

Es la tecnología solar que más rápido está progresando y que más potencia instalada ha de incorporar en los próximos años. Existen varias centrales todavía en fase de experimentación pero ya existen plantas comerciales.

Sobre este tipo de plantas termosolares tratará este trabajo y serán posteriormente analizadas con mayor detenimiento.



Ilustración 11: Central solar de torre [5]

2.2.4 DISCO PARABÓLICO

El disco parabólico, también conocido como disco Stirling, es el único de los tipos de centrales solares de concentración que en lugar de utilizar un fluido emplea energía mecánica para obtener electricidad.

En este sistema, un espejo de grandes dimensiones con forma de disco parabólico concentra los rayos de sol que recibe en un punto en el que se encuentra situado el receptor y que coincide con el foco del espejo. El receptor está integrado con un motor de alta eficiencia, comúnmente de tipo Stirling que gracias a la utilización de helio o hidrógeno es puesto en marcha accionando un generador mediante el cual se produce electricidad.

Las centrales de este tipo están formadas por un conjunto de unidades compuestas por el disco y el bloque convertidor de potencia. La potencia que puede alcanzar cada unidad varía entre los 10-25 KW. No obstante estos sistemas dejan de trabajar al dejar de recibir radiación solar y en ellos no es posible el almacenaje de energía.

Presentan desventajas en comparación al resto de centrales termosolares al ser su coste mayor, no estar implementado el almacenamiento de energía y no ofrecer la posibilidad de combinarlo con otros sistemas. A pesar de ello tienen ventajas: su eficiencia es buena, el tamaño de la central puede variar en gran medida gracias a estar compuesto por gran cantidad de unidades, no precisan de un fluido y el tiempo de fabricación es corto.



Ilustración 12: Discos parabólicos

La tecnología aún se encuentra en fase de experimentación. No hay centrales que operen a nivel comercial pero sí que hay algunas que se encuentran en desarrollo.

2.3 ESTADO Y EVOLUCIÓN

El desarrollo de la energía solar térmica ha contribuido a una mejora de sus prestaciones y al incremento de la eficiencia. La eficiencia global de la planta viene determinada por la eficiencia óptica, térmica y eléctrica de la central. La ilustración 13 muestra el rango de valores de estas para las diferentes tecnologías solares de concentración. Los concentradores secundarios en centrales de torre veremos más tarde que afectan a la eficiencia óptica y térmica.

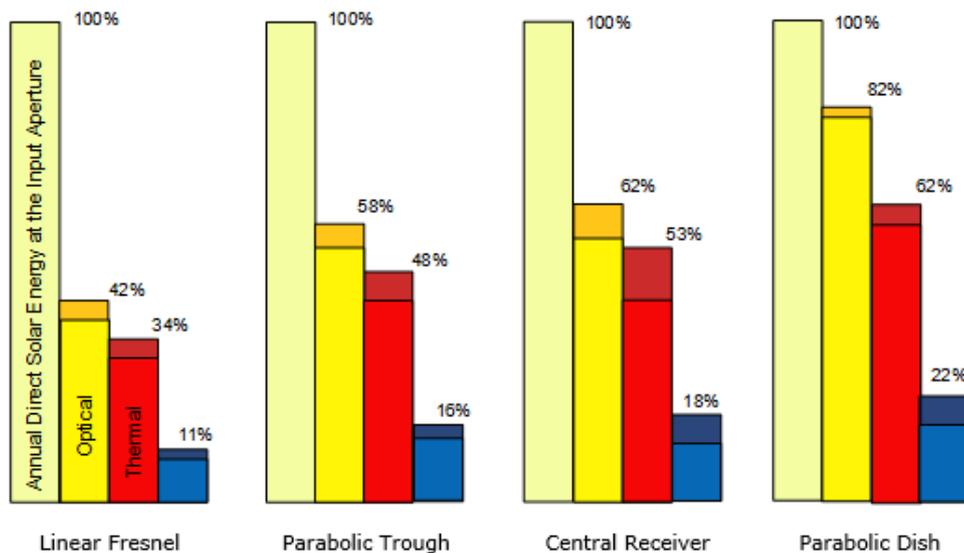


Ilustración 13: Comparación de la eficiencia de cada subsistema de las distintas tecnologías. Óptica (amarillo), térmica (rojo) y eléctrica (azul). [4]

Los recursos destinados a la investigación hacen que se progrese rápidamente y que los avances conseguidos hayan sido notables. A pesar de ello, todavía queda mucho camino por recorrer y es presumible un salto cualitativo importante en esta década. De hecho en el período comprendido entre 2013 y 2020 se espera lograr que la eficiencia suba más del 10% en todas las tecnologías, especialmente en los reflectores Fresnel [4].

A día de hoy solo los colectores cilindro-parabólicos y las centrales de torre han superado la fase de investigación. Los costes de la electricidad están dificultando la introducción en el mercado de la tecnología aunque se observa una gran relación entre el país en el que la planta está situada y el precio de la electricidad. Disminuir estos costes se hace por tanto imprescindible. La producción en masa y la automatización de los procesos ha de contribuir en gran medida a ello y puede hacer que, en el año 2020, los costes de fabricación disminuyan entre el 35-40%. Igualmente se hace necesaria la estandarización de la tecnología, importante debido a la fase de gestación que atraviesa esta energía y que también significaría una reducción de los costes cercana al 10%. Otros objetivos son la mejora de los procesos de fabricación, la reducción de los gastos de mantenimiento y operación, mayores potencias y el incremento del número de horas de operación de la planta.

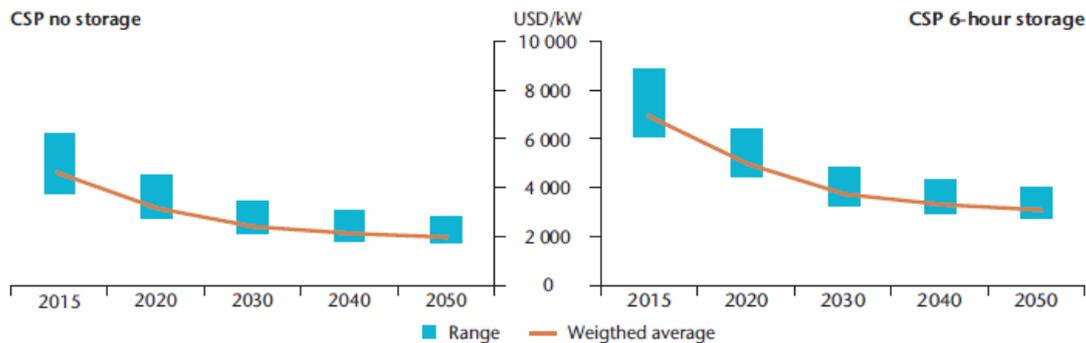


Ilustración 14: Predicción evolución coste CSP [3]

Una de las mayores desventajas en este momento de la tecnología solar es su fuerte dependencia de la inversión pública. La correcta evolución de las centrales CSP requiere que exista financiación para abaratar los costes de investigación. Igualmente la existencia de barreras económicas dificulta la introducción en el mercado de estas centrales. Por ello el precio de la electricidad debe ser acorde al estado de desarrollo en el que se encuentra la tecnología porque de este modo la competitividad de la misma es mayor.

Otras barreras a la expansión de las centrales termosolares son la insuficiencia de datos sobre la radiación y el medio en determinados lugares, políticas inciertas y la interferencia de fenómenos climatológicos.

Desde el año 2010 la generación eléctrica a partir de energía solar térmica se ha multiplicado en todo el mundo. Las primeras plantas comerciales surgieron en California en la década de 1980 pero ha sido en la última década cuando se ha expandido a escala global [3]. Esta va a ser la tónica también en años venideros.

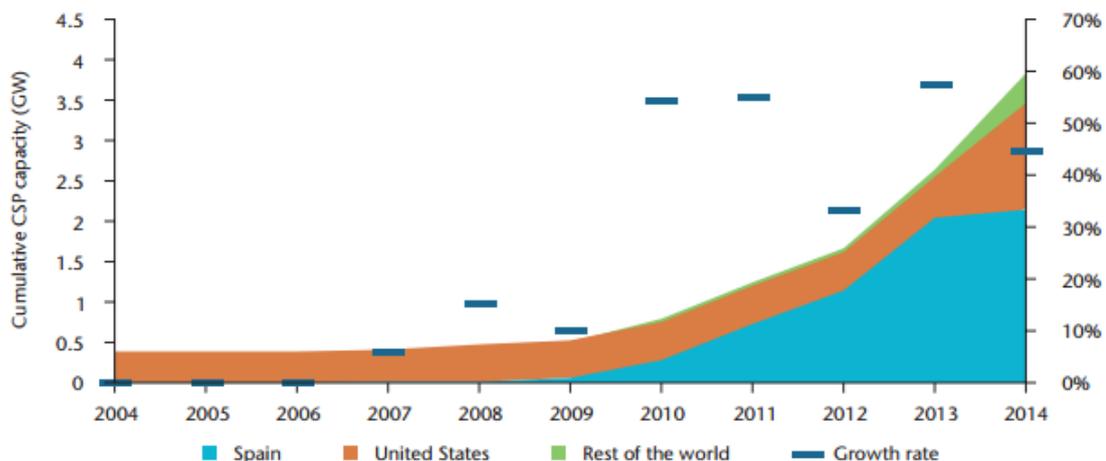


Ilustración 15: Evolución mundial capacidad CSP [3]

España y Estados Unidos son los principales productores de esta energía pero también se está viviendo un fuerte desarrollo en aquellos países beneficiados por una mayor intensidad solar como Australia, China, India, Oriente Medio, el norte de África y Sudáfrica. La IEA pretende que en el año 2050 la demanda eléctrica que cubra sea del 11% con una capacidad de 1000 GW y con la reducción de emisiones que ello conlleva. El descenso de los precios, los progresos técnicos y el empleo de sales fundidas para el almacenamiento están ayudando a cumplir con la meta [3].

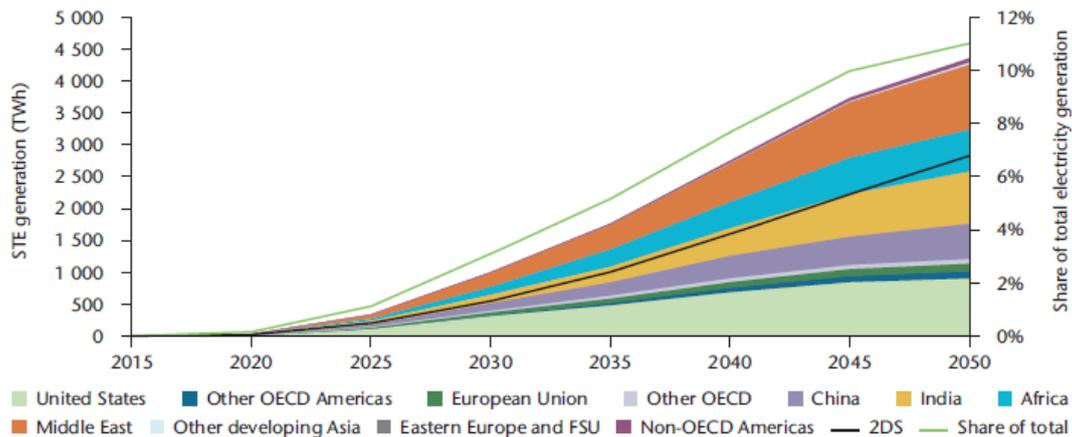


Ilustración 16: Predicción regional de la producción de STE [3]

Al final de 2013, de los 3600 MW de potencia instalados en el mundo 2300 pertenecían a España, haciendo de ella el principal abanderado de la tecnología y el único país donde estadísticamente esta producción eléctrica es reseñable. El objetivo para el año 2020 son 5 GW pero la crisis económica ha hecho que la inversión decrezca y existan mayores dificultades para el nacimiento y desarrollo de nuevos proyectos. Aun así las empresas productoras han comenzado su internacionalización y la capacidad exportadora del país se ha incrementado.

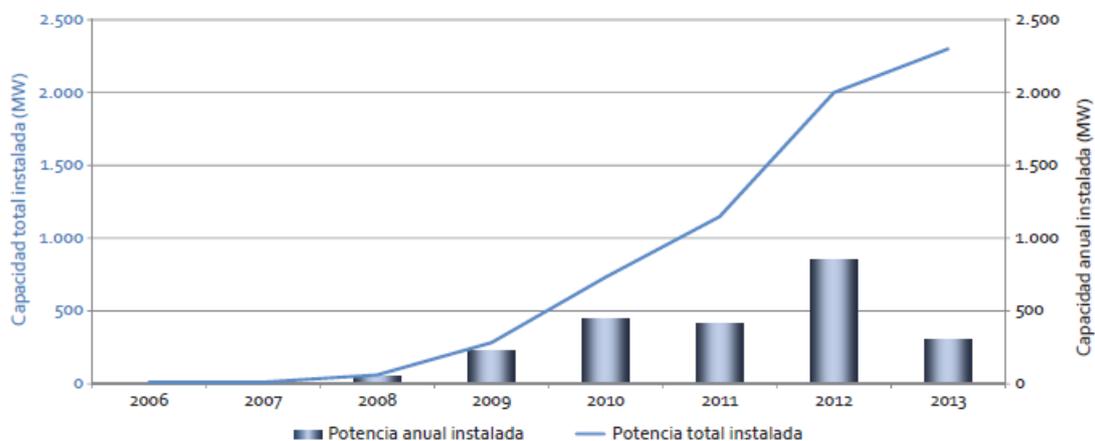


Ilustración 17: Evolución de la capacidad termosolar en España [1]

3. CENTRALES SOLARES DE TORRE

3.1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de concentración solar de torre son aquellos que permiten conseguir una mayor temperatura en el receptor y gracias a ello una potencia más elevada. También debido a estas altas temperaturas se producirían unas pérdidas térmicas superiores por lo que es el tipo de central que precisa una mayor concentración de la radiación para así reducir el área del receptor y con ello las pérdidas. De este modo se consigue una buena eficiencia que supera la de los colectores cilindro-parabólicos. Además son menos sensibles a los cambios estacionales.

Incorpora otras ventajas ya que el precio de la electricidad es más barato, el almacenaje de energía es más sencillo y su integración en sistemas híbridos es más fácil en comparación con el resto de centrales termosolares.

Todo esto ha provocado que sea una de las tecnologías solares en más rápida expansión y con más futuro.

3.2 DESCRIPCIÓN

Los sistemas centrales de torre están formado por varios componentes: campo de heliostatos, receptor, torre, bloque de potencia y sistema de almacenamiento térmico. En el caso que se estudia en el presente trabajo sería preciso añadir los concentradores secundarios.



Ilustración 18: Central solar de torre de Gemasolar [5]

3.2.1 CAMPO DE HELIOSTATOS

Son los elementos encargados de reflejar la radiación solar y concentrarla en el receptor gracias a la alta reflectividad de su superficie.

Los heliostatos están formados por una serie de espejos, llamados facetas, fabricados en vidrio y cubiertos con un revestimiento de plata o aluminio reflectivo que asegura su protección. Este conjunto de espejos se disponen para que actúen como un solo sistema con el mismo foco y soportado por una estructura, habitualmente en forma de T, que incorpora un sistema de seguimiento de la luz solar de manera que la eficiencia de los heliostatos sea en todo momento la máxima posible. El mecanismo que asegura el movimiento de los heliostatos consiste en dos ejes (azimut y elevación) cuya rotación ha de ser programada en función de la posición solar a cada momento. Estos mecanismos serán el componente más caro de la planta.

El punto al que dirigen la radiación los heliostatos es conocido como aiming point.

El diseño de la distribución espacial del campo de heliostatos (lay-out) es uno de los factores de mayor influencia en el rendimiento de la planta. La introducción de concentradores secundarios también tendrá consecuencias en la distribución que serán estudiadas.

Es posible encontrar heliostatos de muy diversos tamaños, desde 1 hasta 160 m², y existe cierta discusión al respecto sobre el tamaño óptimo aunque lo más común es que sean de gran tamaño. En cualquier caso su elección será consecuencia de las características que se quieran conseguir en la planta y ejercerá una poderosa influencia sobre el lay-out de heliostatos.



Ilustración 19: Heliostato [4]

3.2.2 RECEPTOR

El receptor, también llamado colector o absorbedor, es el componente encargado de recibir la radiación solar reflejada por los heliostatos y transformarla en la energía térmica que posteriormente será convertida en energía eléctrica.

El receptor ha de tener una alta absorptividad que le permita actuar como un cuerpo negro consiguiendo así que el fluido que circule por su interior alcance altas temperaturas del orden de 300-1200 °C así como un valor del flujo de 200-1200 kW/m² en función de las características de la central y de las propiedades del fluido. Asimismo, el colector se ve sujeto a altos valores de tensiones que provocarían fatiga y disminuirían su vida útil.

Los receptores se encuentran normalmente en lo alto de la torre y tienen un diseño en el que se considera el fluido que contienen, el material del que están fabricados, la temperatura y presión que han de soportar y su configuración [4]. En función de esta última los podemos agrupar en tres grupos distintos:

- Receptor de tubos: La transferencia de calor se produce en tubos sobre los que inciden los rayos reflejados por los heliostatos y la transmiten al fluido que los recorre. Se distinguen los receptores de cavidad y los externos. Los externos están formados por una serie de tubos verticales que reciben la radiación concentrada que calentará un fluido. Por su parte, en los de cavidad, como su nombre indica, la radiación entra por una cavidad cerrada por una ventana que permite reducir las pérdidas térmicas. Por el contrario a partir de cierto ángulo de incidencia la radiación no llega al receptor por lo que se deben situar gran cantidad de receptores.

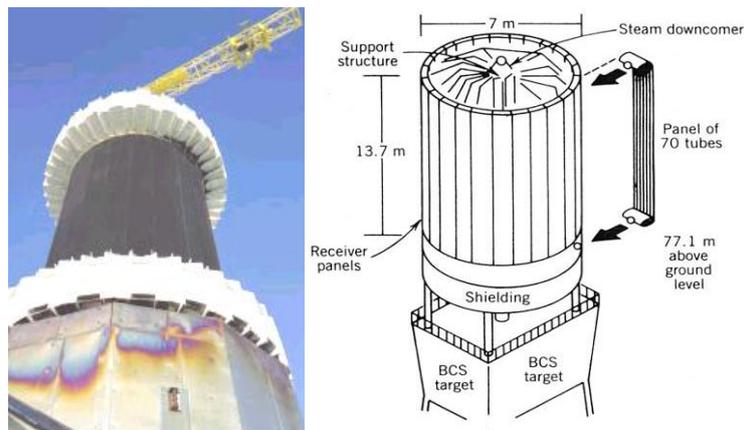


Ilustración 20: Receptor cilíndrico externo [6] [4]

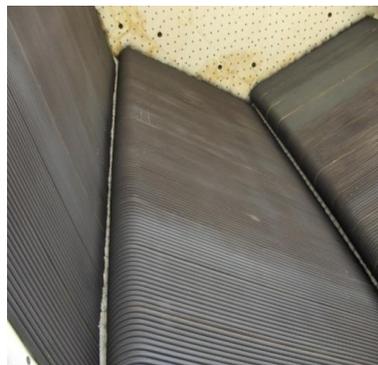


Ilustración 21: Receptor de cavidad [6]

- Receptor volumétrico: Se produce el intercambio térmico mediante la convección producida con un flujo de aire que se introduce por el interior del receptor. Admiten temperaturas superiores a los 1300°C pero una menor presión. Usan aire como fluido.

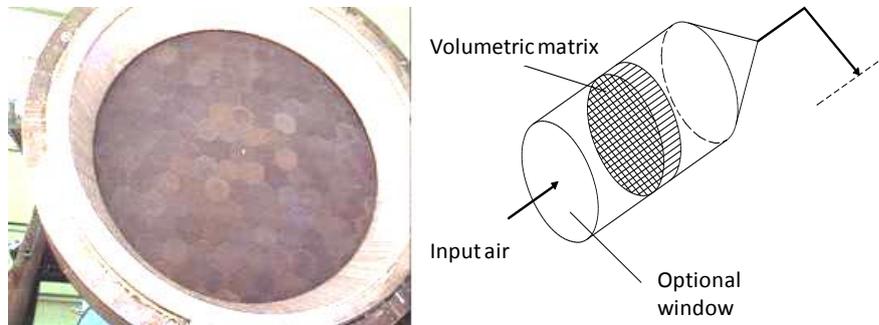


Ilustración 22: Receptor volumétrico [6] [4]

- Receptor de partículas: Emplea fluidos o flujos de partículas que reciben la radiación directamente a modo de intercambiador térmico.

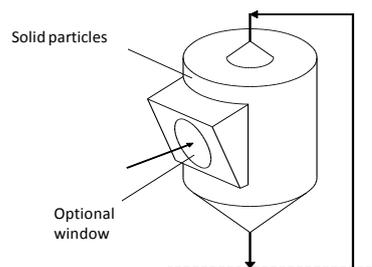


Ilustración 23: Receptor de partículas [4]

3.2.3 TORRE

Componente de la planta sobre el que se ubica el receptor y que ha de tener una gran altura que permita que la radiación que reflejan los espejos no sea interceptada por otros heliostatos. La altura depende de la potencia de la planta, del tipo de receptor y de fluido y de la distribución del campo.

Deberá soportar tanto las cargas a las que se vea sometido al receptor como aquellas que se deban a las condiciones ambientales. Por otro lado, debe albergar en su interior el equipamiento mecánico y eléctrico necesario para el correcto funcionamiento del sistema. Normalmente las centrales están compuestas por una torre con una turbina pero también es posible comunicar varias torres con una sola turbina para limitar las pérdidas térmicas y ópticas.

Además, estas torres, fabricadas bien en hormigón o bien en acero, son causantes de pérdidas de radiación debido a la sombra que generan sobre algunos heliostatos.

3.3 FUNCIONAMIENTO

El proceso llevado a cabo en una central de torre central comprende una serie de etapas.

En primer lugar la radiación solar es reflejada por los heliostatos gracias a su mecanismo de dos ejes y dirigida hacia el receptor, donde es calentado un fluido. En la actualidad se emplean diversos tipos de fluidos: agua (vapor), sales fundidas y aire. Tradicionalmente se ha empleado agua pero debido a las mejores propiedades térmicas (alta conductividad térmica y capacidad calorífica) de las sales fundidas estas han ido ganando paulatinamente protagonismo.

Las sales fundidas suben desde un tanque donde están a baja temperatura hasta lo alto del receptor donde serán calentadas hasta elevadas temperaturas. Posteriormente circulan hasta un nuevo depósito donde será posible el almacenamiento térmico. Esto supone uno de los grandes beneficios de las centrales solares de torre respecto a otros tipos de centrales termosolares ya que al no existir en las demás tan altas temperaturas dicho almacenamiento es mucho más limitado. Al existir este almacenamiento el funcionamiento de la instalación no será exclusivo en horas de sol.

En el siguiente paso el fluido circulará ahora hacia un generador de vapor del que se obtendrá el vapor que posteriormente se expandirá en una turbina permitiendo así la generación de energía eléctrica. Se suelen incluir varios intercambiadores de calor a lo largo del proceso para mejorar la eficiencia del ciclo.

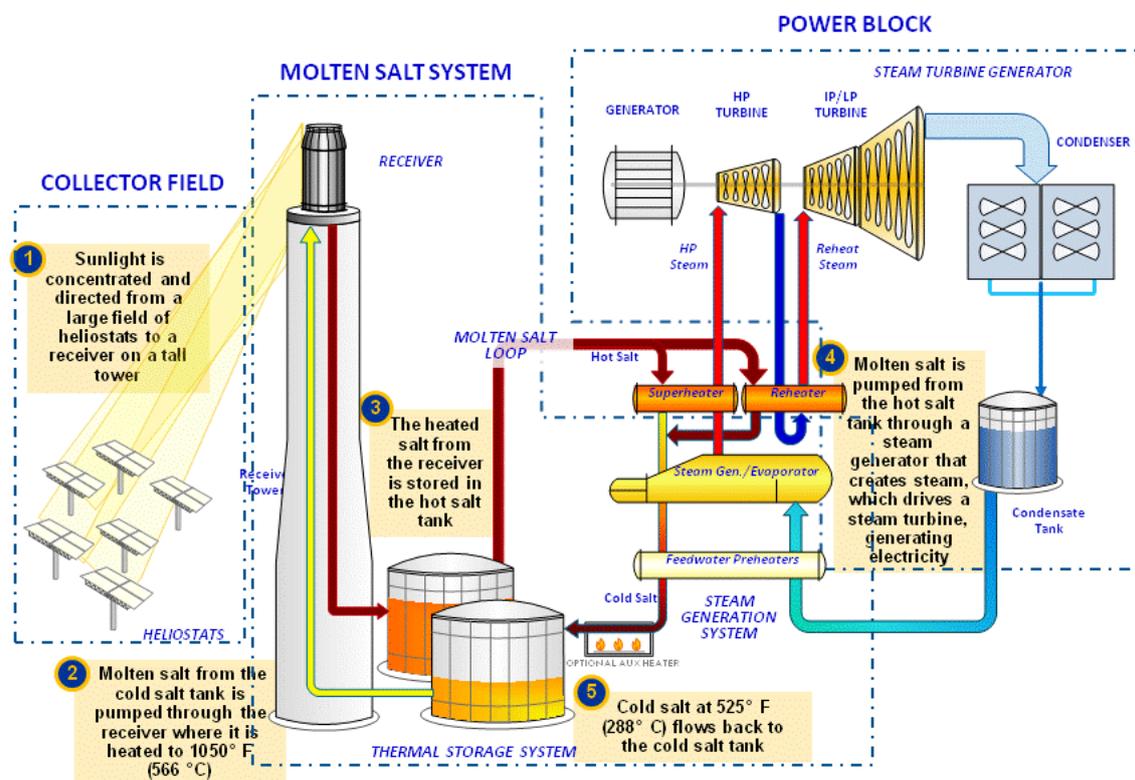


Ilustración 24: Etapas de una central solar de torre de sales fundidas [4]

Si el fluido fuese agua en lugar de sales se genera vapor directamente en el receptor y este va a la turbina donde se genera la electricidad. Para evitar las problemas térmicos que se pueden producir se suele incluir un tanque de almacenaje de energía.

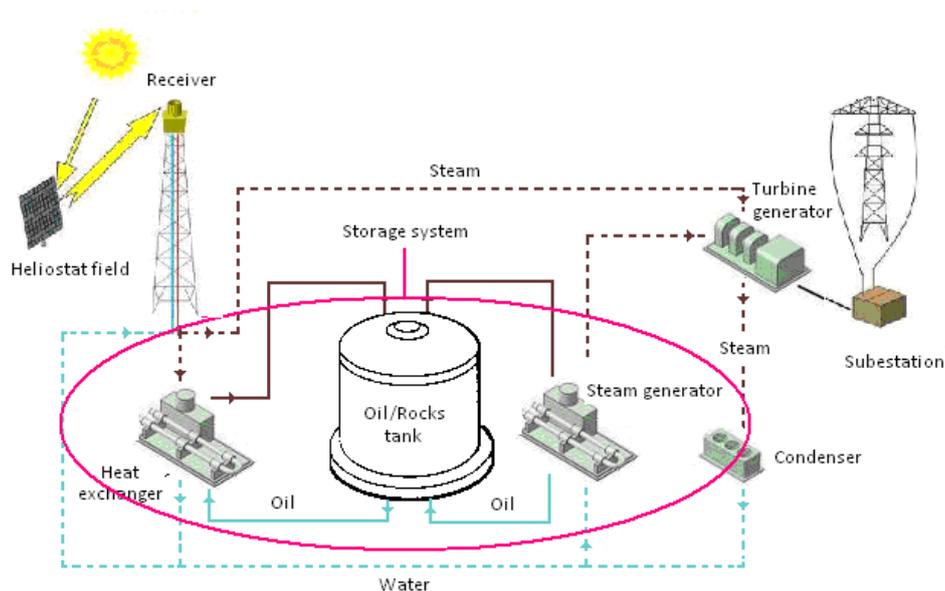


Ilustración 25: Central solar de torre con agua como fluido de trabajo [4]

3.4 FACTORES DE INFLUENCIA EN LA PLANTA

Existen una serie de factores en una central solar de torre que merman la eficiencia de la misma. Estos factores han sido tenidos en cuenta a la hora de ejecutar las simulaciones e intervienen en la eficiencia bien óptica o bien térmica de la central.

- Efecto coseno

Se trata del factor de mayor peso en el diseño de un campo de heliostatos y resulta fundamental su optimización de cara a aumentar la potencia alcanzada en el receptor. El efecto coseno es consecuencia de la posición del sol y de la orientación del heliostato respecto de este.

Mediante la segunda ley de la reflexión sabemos que el ángulo de incidencia sobre la superficie de un heliostato es igual al ángulo de reflexión. Por lo tanto, la normal al heliostato ha de situarse en la bisectriz formada por el rayo incidente y reflejado. En la ilustración 26 podemos ver cómo cuanto menor sea el ángulo que forma el rayo con la normal al heliostato la cantidad de radiación que podrá reflejar será mayor y por ello permitirá dar una mayor potencia.

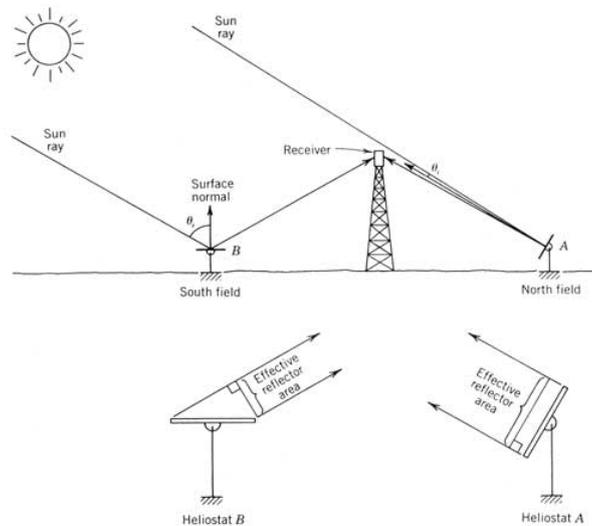


Ilustración 26: Efecto coseno [7]

Las pérdidas sufridas por este efecto son proporcionales al coseno de este ángulo y tiene gran influencia en el diseño del lay-out de la planta. Así en centrales solares situadas en el hemisferio norte será conveniente situar una mayor cantidad de heliostatos al norte de la torre debido a la reducción de las pérdidas debidas a este efecto. En el hemisferio sur, por el contrario, los heliostatos deberán estar en mayor medida al sur de la torre.

En cualquier caso podemos encontrar campos de heliostatos de diferentes distribuciones, bien aquellos en las que los heliostatos rodean la torre o bien aquellos en los que se encuentran en una única dirección. En aquellos lugares de la Tierra donde la latitud es baja convendrá un campo circular mientras que si las latitudes son mayores será preferible que el campo se construya en una sola dirección debido al gran valor del efecto coseno que tendrían los heliostatos que estén más cercanos a la línea del Ecuador. En campos de heliostatos muy grandes la distribución suele ser circular de cara a disminuir la distancia al receptor y reducir la atenuación atmosférica. En estos casos, además, la torre tiene una menor altura.

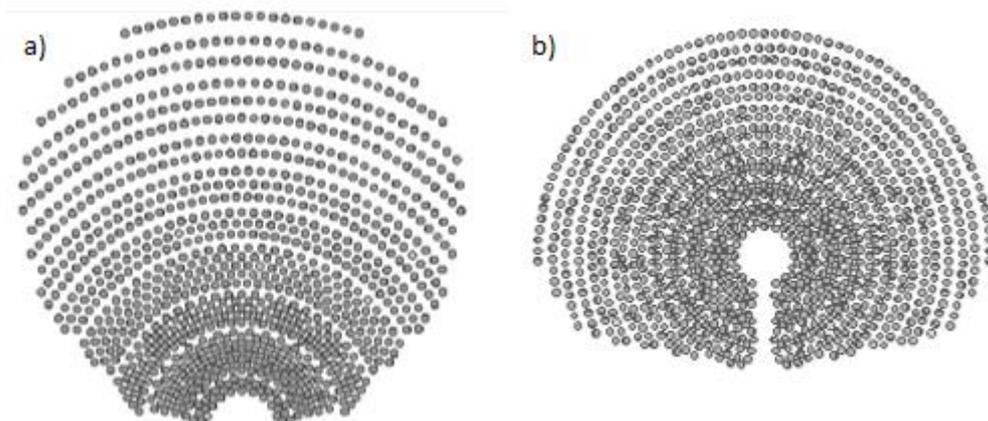


Ilustración 27: Distribución campo heliostatos a) Norte b) Circular [7]

- Pérdidas por sombras

Rayos de sol que no llegan a un heliostato porque otro heliostato los intercepta en su camino. Son pérdidas que varían a lo largo del día y que dependen del lay-out del campo de heliostatos. También puede provocar estas pérdidas la sombra de la torre.

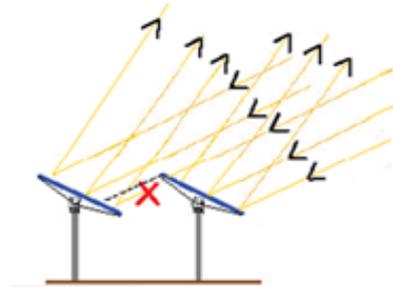


Ilustración 28: Pérdidas por sombras [8]

- Pérdidas por bloqueos

Rayos reflejados por un heliostato que no llegan al receptor porque otro heliostato los intercepta en su camino. Al igual que en las pérdidas por sombras dependen de la distribución del campo y de la posición de la torre.

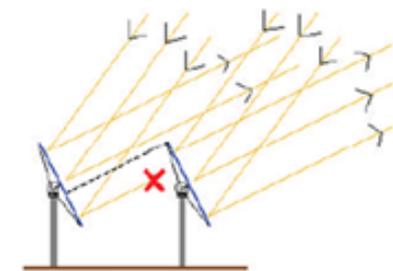


Ilustración 29: Pérdidas por bloqueos [8]

La suma de las pérdidas por bloqueos y de las ocasionadas por sombras es de mayor magnitud en las filas de heliostatos más cercanas a la torre al estar los heliostatos más juntos.

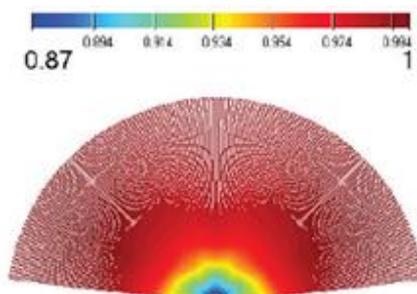


Ilustración 30: Valor pérdidas por sombras y bloqueos en campo heliostatos [8]

- Pérdidas ópticas ocasionadas por los heliostatos

Los heliostatos no son perfectos sino que incorporan defectos en su superficie. Distinguimos entre el error de curvatura, el de ondulamiento y la rugosidad. Estos provocan un cambio en la normal de la superficie que da lugar a errores en la dirección de los rayos.

Existen otros errores como los provocados por un mal funcionamiento del mecanismo de seguimiento y los debidos a que la reflectividad del heliostato no es de valor 1.

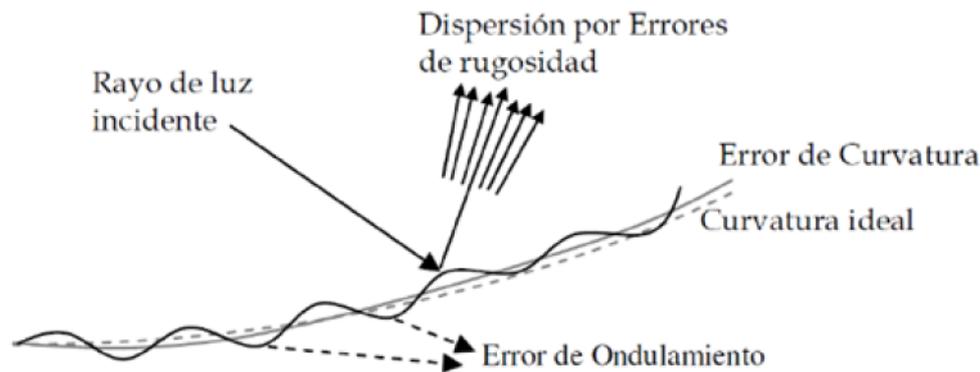


Ilustración 31: Errores heliostatos [9]

- Atenuación atmosférica

El campo de heliostatos de una central abarca una gran superficie. Los heliostatos más lejanos a la torre pueden llegar a situarse a una gran distancia de la misma. Esto implica la desventaja derivada de la atenuación atmosférica que sufrirá la radiación desde que es reflejada por los heliostatos hasta que llega a la torre.

Este factor es importante para determinar hasta donde puede extenderse la central y para diseñar el campo.

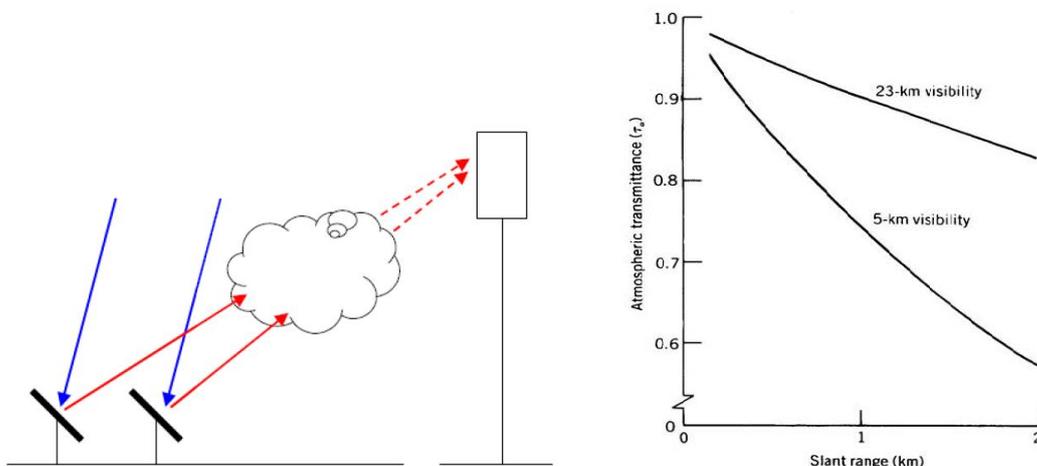


Ilustración 32: Atenuación atmosférica y sus valores para una atmósfera despejada y para una atmósfera brumosa [9] [7]

- Spillage

Son las pérdidas producidas cuando los rayos solares reflejados por los heliostatos no son interceptados por el receptor. Se deben a errores superficiales del heliostato, a la dispersión de la luz, a un mal diseño, al fallo del sistema de seguimiento y a la geometría del receptor.

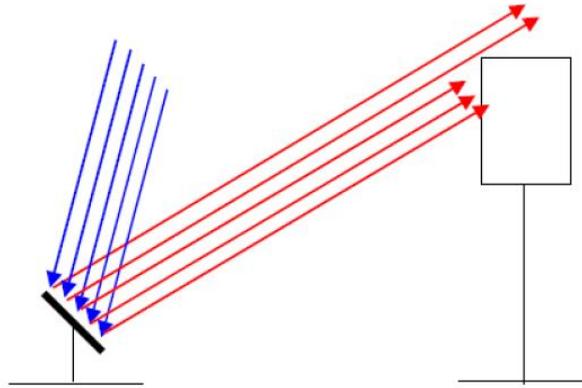


Ilustración 33: Spillage [9]

- Pérdidas térmicas en el receptor

En el receptor se producen pérdidas térmicas debidas a la conducción, convección y radiación. Debido a las altas temperaturas alcanzadas las pérdidas predominantes son las debidas a la radiación.

3.5 ESTADO Y EVOLUCIÓN

Aunque sigue habiendo centrales en estado de investigación ya existen plantas que producen electricidad a nivel comercial.

En España destacan las plantas de Abengoa llamadas PS10 y PS20 de 11 Y 20 MW respectivamente. La PS10 fue la primera central de mundo en llegar al mercado. El fluido utilizado es vapor saturado por lo que el tiempo de almacenamiento es escaso. En lo que se refiere a la tecnología de sales fundidas la primera central en aparecer fue Gemasolar (Ilustración 18). Su potencia de 20 MW se consigue gracias a 2650 heliostatos de 115 m² mientras que el almacenamiento térmico es de 15 horas. Existen otras centrales innovadoras como la de eSolar en Estados Unidos, de 46 MW, formada por 16 torres con heliostatos de 1.4 m². Además hay otras centrales en el mundo de gran potencia como la de Ivanpah de 440 MW, la de Crescent Dunes de 110 MW o la de Abengoa Solana de 280 MW y otras en desarrollo y construcción como la de Rice Solar de 150 MW [4].



Ilustración 34: Centrales PS10 y PS20 [Abengoa]

Vemos por lo tanto que el progreso de las centrales de torre es fuerte y que ha de prolongarse en el tiempo, al igual de lo que ocurre con las energías renovables. La vida de las centrales está diseñada para durar más de 25 años aunque al ser una tecnología todavía novedosa no se ha podido demostrar aún.

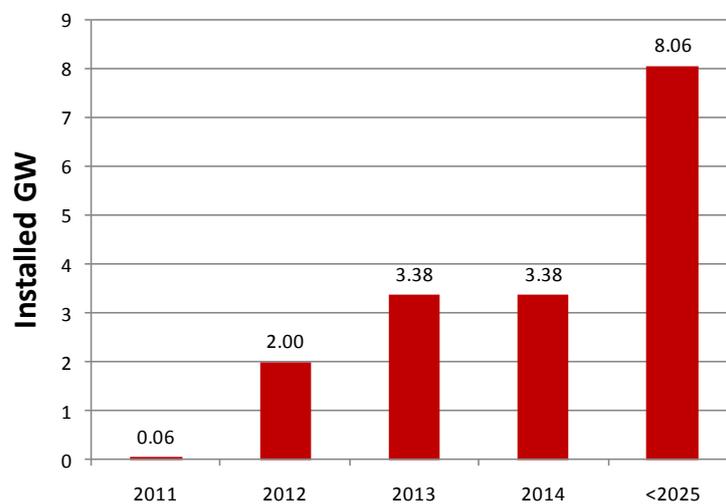


Ilustración 35: Potencia instalada en centrales solares de torre [4]

4. CONCENTRADORES SECUNDARIOS

4.1 INTRODUCCIÓN

La densidad energética de la radiación que llega a la Tierra es baja. Para solucionar este problema y poder trabajar con potencias elevadas se emplean sistemas termosolares de concentración ya que de este modo es posible utilizar receptores de menor tamaño y disminuir así las pérdidas térmicas además de permitir unas altas temperaturas en el receptor [10].

En las centrales de torre los heliostatos son los encargados de realizar la función concentradora pero a veces su capacidad de concentración no es la suficiente debido a que el tamaño del receptor está condicionado por la imagen de la radiación solar que son capaces de proyectar. La distancia de los heliostatos al receptor y la calidad óptica de los mismos limitan la concentración haciendo que sean necesarias mejoras en el diseño de la distribución del campo y en las cualidades de los heliostatos. Sin embargo, esto no es siempre posible ni recomendable por lo que se precisa de un nuevo sistema de concentración que asegure que el funcionamiento de la instalación sea el adecuado. Para cumplir con este cometido nacen los concentradores secundarios. Sobre ellos habla este trabajo.

4.2 CONCENTRACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

Como hemos visto en el apartado 2 de este trabajo la mayoría de las tecnologías de energía solar térmica basan su funcionamiento en la concentración de radiación. Superficies de alta reflectividad reflejan la radiación en un punto donde está situado el receptor, que contiene un fluido al que se le dotará de la energía térmica necesaria para que se pueda realizar finalmente su conversión a energía eléctrica. Se emplean espejos como superficies reflectivas en lugar de otros materiales ópticos por razones de índole económica. Se deberá realizar un estudio tanto energético como óptico de los sistemas de concentración y determinar la estimación de la radiación incidente, reflejada, transmitida y absorbida.

Antes de todo debemos saber cuándo es necesaria la concentración solar. Simplificando la respuesta se puede decir que el uso de concentradores solares es requerido cuando se esté trabajando con sistemas a altas temperaturas ($>93^{\circ}\text{C}$) ya que en ellos las pérdidas por radiación (proporcionales al área) van a ser las de mayor magnitud en comparación con el resto de pérdidas térmicas, es decir, que las pérdidas por conducción y por convección [11]. Además de estos motivos existen otros de tipo práctico como pueden ser consideraciones económicas o disponibilidad tecnológica.

Cuanto más altas sean las temperaturas de operación que se precisen, mayor ha de ser la concentración. Por ello, las centrales solares de torre serán las que requieran una mayor concentración ya que habitualmente se superan los 1000°C en el receptor y, además, si el área no es pequeña las pérdidas serán grandes. Tecnologías como los CCP suelen tener temperaturas que rondan los 300°C así que a pesar de ser necesaria la concentración no se debe conseguir en el mismo grado que en las centrales de torre.

Para demostrar los beneficios de la concentración comenzamos aproximando al receptor a un cuerpo negro en el que toda la radiación que llega se absorbe siendo despreciables las pérdidas debidas a la reflectividad. Por otro lado como consecuencia de las altas temperaturas de trabajo se considera que las pérdidas térmicas son mayoritariamente causadas por radiación pudiendo llegar a considerar al resto despreciables. Denominando T_{rec} a la temperatura del absorbedor y T_a a la temperatura ambiente podemos determinar la potencia calorífica útil que conseguirá finalmente el receptor.

$$\begin{aligned}
 q_{\text{útil}} &= q_{\text{absorbido}} - q_{\text{pérdidas}} = \\
 &= q_{\text{absorbida}} - q_{\text{radiación}} - q_{\text{convección}} - q_{\text{conducción}} = \\
 &= F \times \alpha \times I \times A \times E - \varepsilon \times A_{rec} \times \sigma \times (T_{rec}^4 - T_a^4) - U \times (T_{rec} - T_a) \times A_{rec}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

donde:

- F es el factor considerado debido al efecto coseno, si la dirección de propagación es perpendicular al receptor este valor será igual a 1. En centrales de torre cada heliostato tendrá su propio efecto coseno.
- α es la absortancia del receptor. Este valor ha de ser próximo a 1 ya que el comportamiento del absorbedor ha de ser similar al de un cuerpo negro.
- I es la irradiancia que llega sobre la superficie de los concentradores, que en las centrales de torre, serán los heliostatos.
- A es el área del concentrador, es decir, el área total de los heliostatos en sistemas centrales.
- E denominamos al conjunto de errores de la instalación, por ejemplo: sombras, bloqueos, atenuación atmosférica, spillage, etc.
- ε es la emisividad el receptor, al aproximarse a un cuerpo negro será 1.
- A_{rec} es el área del receptor que tendrá pérdidas térmicas por radiación.
- σ es la constante de Stefan-Boltzmann y equivale a $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$.
- U es el coeficiente de transmisión de calor debida a la conducción y convección.

El uso de concentradores tiene como objetivo direccionar la radiación que incide sobre la superficie de captación, A_c , y concentrarla sobre otra área de menor tamaño, A_{rec} , en la que está situado el receptor. Esto permite definir la razón de concentración geométrica que se define como el cociente entre ambas áreas.

$$C_g = \frac{A_c}{A_{rec}} \quad (4.2)$$

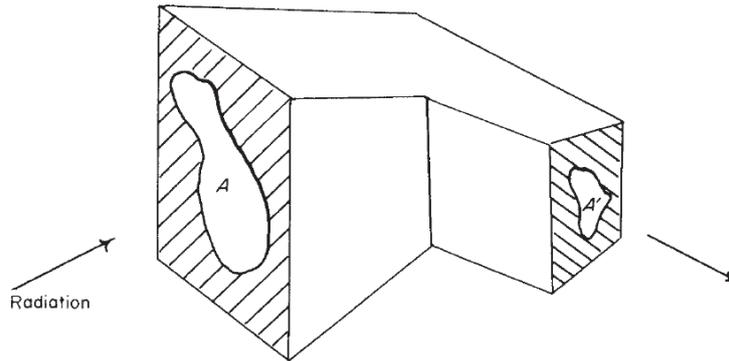


Ilustración 36: Razón de concentración [10]

A su vez también podemos calcular la razón de densidad del flujo medio, C_f , que resulta del cociente entre la densidad de potencia que llega el receptor y la densidad de potencia que incide sobre la superficie concentradora.

$$C_f = \frac{\frac{P_{rec}}{A_{rec}}}{\frac{P_c}{A_c}} = \eta_{\text{optico}} \times C_g \quad (4.3)$$

donde P_{rec} es la potencia total que llega el receptor, P_c es la potencia que capta el concentrador y η_{optico} es la fracción de potencia que incide sobre el receptor respecto a la captada. Como vemos, la razón de concentración geométrica, si no consideramos el caso ideal, va a ser siempre mayor que la razón de concentración de la densidad de potencia.

Si introducimos un concentrador en el receptor la expresión (4.1) cambia. Si consideramos α igual a 1 ($P_{rec}=P_{abs}$), el rendimiento óptico constante ($P_{abs} = \eta_{\text{optico}} \times P_c$) y empleamos la expresión (4.2), dividiendo todos los términos de (4.1) entre P_c es posible relacionar el rendimiento térmico con la razón de concentración mediante (4.4). Vemos que las pérdidas térmicas son inversamente proporcionales a la razón de concentración geométrica por lo que se puede concluir que una mayor concentración geométrica significa un mayor rendimiento térmico. Esta ventaja justifica por lo tanto el uso de sistemas concentradores [11].

$$\eta_{\text{térmico}} \times \eta_{\text{optico}} = \eta_{\text{optico}} - \left(\frac{\varepsilon \times \sigma}{I_{en\ sup.\ captadora}} \times (T_{rec}^4 - T_a^4) \right) \times \frac{1}{C_g} \quad (4.4)$$

Además, siempre que la eficiencia óptica no disminuya al aumentar la concentración, la temperatura necesaria para conseguir el máximo rendimiento de conversión de energía solar en trabajo también se incrementará. Por todo ello un sistema solar de concentración bien diseñado requerirá altas temperaturas y por lo tanto una buena concentración.

A pesar de estas ventajas existen limitaciones en la concentración solar. Los rayos solares no son paralelos sino que forman una especie de cono de direcciones en el que el eje es el segmento que une el punto considerado y el centro del sol. Esto dificulta la concentración solar y su estudio.

4.3 TIPOS DE CONCENTRADORES

La radiación solar al incidir sobre un cuerpo no solo puede ser absorbida sino que también podrá ser reflejada, refractada o difractada. El comportamiento óptico de los concentradores es una buena manera de clasificarlos. Los dividimos en formadores y no formadores de imagen. Los concentradores secundarios forman parte del segundo grupo, que también se pueden denominar concentradores anidólicos.

Los concentradores formadores de imagen son aquellos que concentran toda la radiación que proviene de un mismo punto de la fuente de radiación en un mismo punto de la apertura de salida. Se basan en un objeto y la imagen que la óptica crea del objeto. El objeto se toma como un conjunto de puntos que emiten en todas las direcciones y en el que posteriormente la luz es captada por el sistema óptico dando lugar a una imagen [12]. En los concentradores no formadores de imagen en lugar de un objeto tenemos una fuente de luz y en lugar de una imagen tenemos un receptor. La óptica anidólica dota de una mayor flexibilidad en el diseño óptico ya que no es necesario que los puntos del objeto y de la imagen se correspondan. Por ello se consigue optimizar la transferencia de energía, lo cual les permite ser un componente adecuado para la transferencia de radiación.

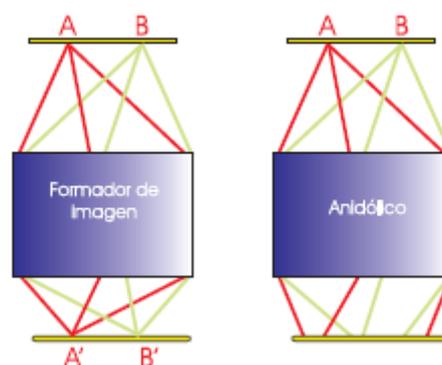


Ilustración 37: Sistema formador de imagen y sistema anidólico [12]

Respecto al uso de sistemas formadores de imagen como concentradores se ha de decir que los espejos cóncavos han sido tradicionalmente empleados como colectores de radiación solar. Sin embargo, el comportamiento real de los concentradores formadores de imagen dista mucho del ideal aunque existen modelos como la lente de Luneburg que son muy válidos. Por otra parte, los concentradores formadores de imagen son compatibles con los concentradores anidólicos para formar nuevos concentradores.

Los sistemas anidólicos resultan una mejor aplicación como concentradores. Podemos encontrarlos de diferentes tipos aunque los más comunes son los concentradores parabólicos compuestos. Otros tipos son los concentradores elípticos compuestos y los hiperbólicos.

Un concentrador parabólico compuesto (CPC) es un sistema anidólico capaz de concentrar rayos de sol que no son paralelos o que no estén alineados con el eje del concentrador. Es un sistema muy eficaz como concentrador y es el empleado como concentrador secundario. Se tratará con mayor detenimiento en el próximo apartado.

En los concentradores elípticos compuestos los espejos adquieren forma elíptica. Son útiles cuando el orden de magnitud de la longitud característica de la superficie de entrada al concentrador no difiere mucho de la distancia total hasta la fuente de emisión [11].

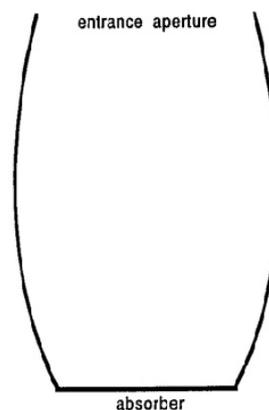


Ilustración 38: Concentrador elíptico compuesto

Los concentradores hiperbólicos o de tipo trompeta se suelen utilizar cuando el tamaño de la apertura es significativo en relación a la distancia a la fuente. Su funcionamiento es peor cuando la concentración a producir es moderadamente alta [11].

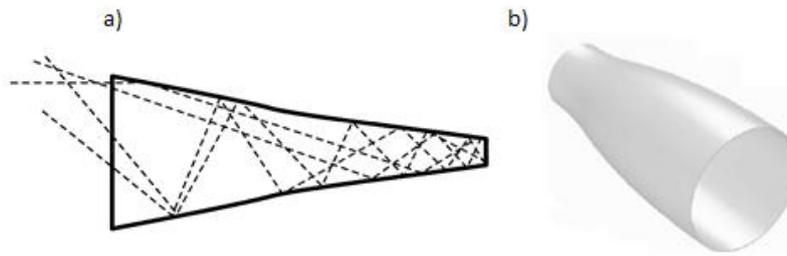


Ilustración 39: a) Funcionamiento y b) representación de un concentrador de tipo trompeta

4.4 CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPUESTO (CPC)

4.4.1 DESCRIPCIÓN

El tipo de concentrador en el que se centra este trabajo es el concentrador parabólico compuesto, CPC, ya que es el modelo empleado en los concentradores secundarios. Las características de los CPC que se describirán en este apartado 4.4 son extrapolables a las características de los concentradores secundarios. Los CPC tienen un comportamiento muy similar al ideal y se aproximan a la máxima razón de concentración teórica.

Como se ha dicho antes los CPC son sistemas ópticos no formadores de imágenes. Los rayos que provienen de una misma fuente de radiación y llegan a la apertura del concentrador a diferentes puntos y con diferentes ángulos, no van a terminar tras su paso por él en los mismos puntos de la superficie de salida. Por ello no formarán imágenes, lo cual, en este caso, es una ventaja ya que su objetivo no es este sino que es el de dirigir la radiación a la superficie más pequeña posible.

En los CPC los rayos más importantes a la hora de abordar su diseño son los rayos extremos del cono de radiación incidente. Se deberá imponer en el diseño del concentrador que todos los rayos que lleguen a la superficie de apertura lo hagan también a la de salida consiguiendo así la mayor eficiencia posible. Este principio será el que marque la concentración máxima con la que se puede dotar a los concentradores ya que a partir de cierto valor no toda la radiación llegará hasta la salida.

Para comprender la forma de un CPC es útil apoyarse en las ilustraciones 40 y 41. En la ilustración 40 vemos dos parábolas, una a la derecha que está más inclinada hacia el sol (su superficie es menos perpendicular al sol, tiene menos área proyectada) y otra a la izquierda que se aleja del sol. En la de la izquierda los rayos son dirigidos a un punto situado por encima del foco mientras que en la de la derecha el punto hacia el que son dirigidos los rayos está por debajo del foco, esto es lo que nos interesa.

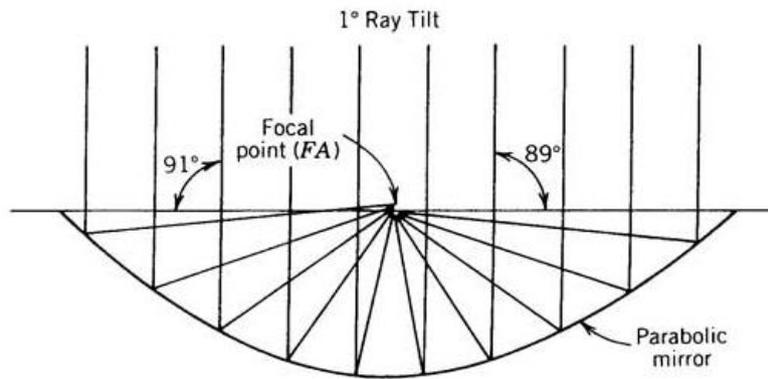


Ilustración 40: Generación CPC [7]

Ahora podrá sustituirse la parábola de la izquierda por otra inclinada hacia la radiación lo que nos permitirá situar el receptor por debajo de su foco por ser ahí donde va a ir la radiación. Si observamos la imagen 41 vemos que se han utilizado dos parábolas cuyo foco se encuentra en el extremo de la parábola contraria. Si se sitúa el receptor en el segmento que une el fin de ambas parábolas la radiación acabará en él ya que son puntos por debajo del foco y, como hemos visto antes, si el ángulo que forma la radiación incidente con la perpendicular al eje de las parábolas es menor que 90 grados, la radiación que cada parábola refleja irá a parar a un lugar por debajo de su propio foco. Por ello la forma final de un CPC es la de la ilustración 41. Que el ángulo sea menor o no de 90 grados dependerá del ángulo de aceptación (punto 4.4.2).

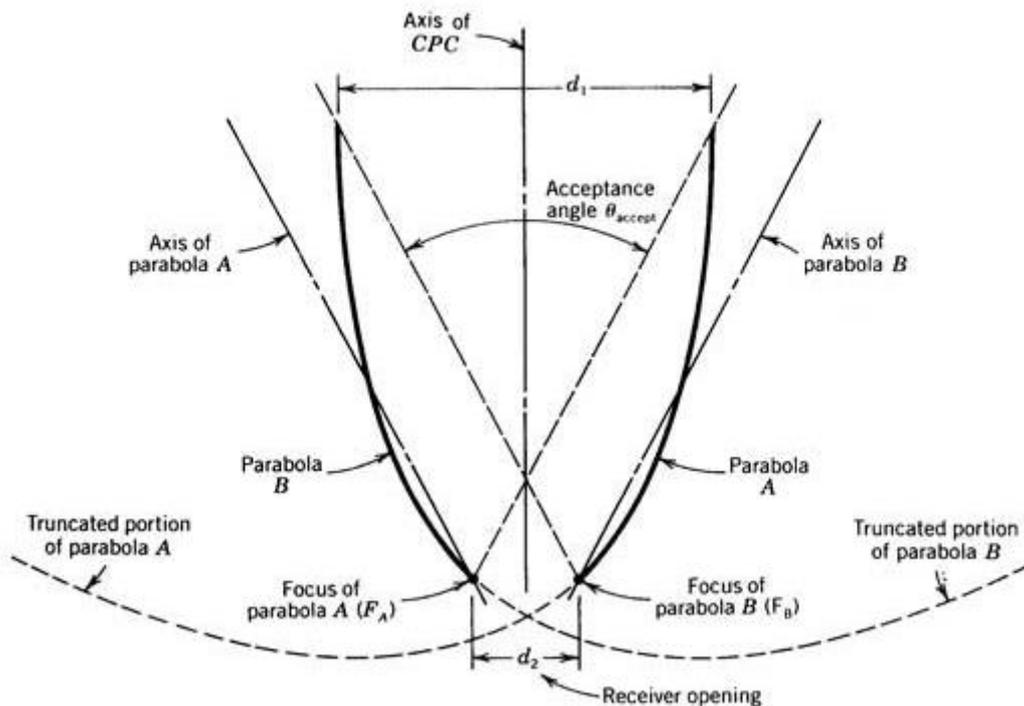


Ilustración 41: CPC [7]

En la ilustración 41 podemos ver las parábolas que componen el CPC, de ahí su nombre. La revolución de una parábola sobre el eje del concentrador nos da el CPC con volumen. Se puede ver que el área de salida es menor permitiendo la concentración. Esta vendrá marcada por el ángulo de aceptación, cuanto menor sea este ángulo la concentración será mayor, lo cual es positivo pero, como veremos, también tiene sus desventajas. Las distancias d_1 y d_2 (según ilustración 41) de las que dependen respectivamente el área de entrada y salida, son también parámetros importantes en un CPC. Posteriormente veremos las ecuaciones con las que se pueden definir los parámetros de un concentrador secundario en base a su forma de CPC.

En la siguiente ilustración se puede comprobar el efecto de variar el ángulo de aceptación de un CPC sin modificar el área de salida. El área de entrada y la altura del concentrador son dependientes de estos dos parámetros. Como es lógico para un menor ángulo de aceptación tendremos una altura superior ya que le cuesta más a cada parábola cruzarse con el eje de la parábola contraria.

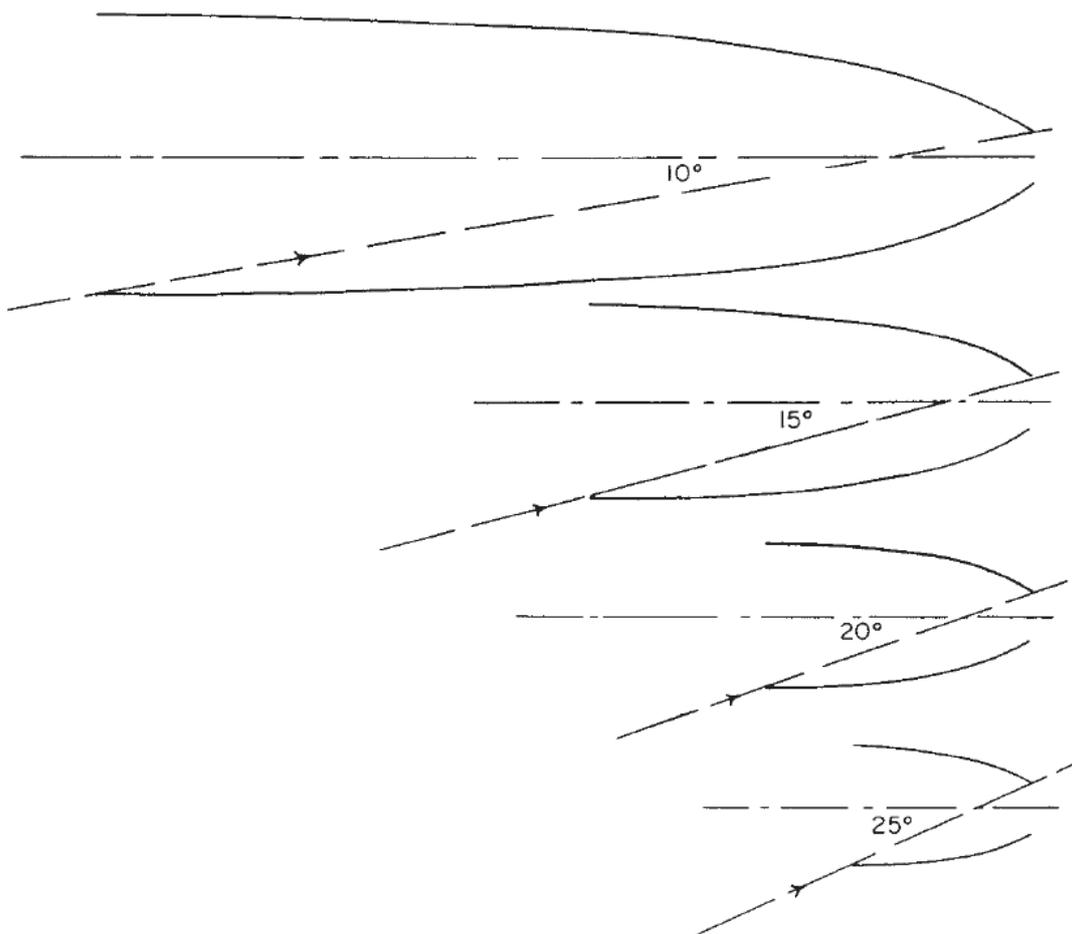


Ilustración 42: CPC con diferentes ángulos de aceptación manteniendo constante el área de salida [10]

4.4.2 ÁNGULO DE ACEPTANCIA

El aspecto fundamental que define los CPC es el ángulo de aceptación. Este es el ángulo que forman entre sí los ejes de las parábolas. Llamaremos semiángulo de aceptación al valor del ángulo formado entre el eje del concentrador y el eje de una de las parábolas. Decimos que es fundamental ya que **si el ángulo de incidencia**, es decir, el ángulo con el que entra el rayo al concentrador y que es el formado por el eje del concentrador y el propio rayo, **es mayor que el semiángulo de aceptación** entonces **la radiación** al ser reflejada en el concentrador **será rechazada hacia fuera de él**. Por el contrario, **si el ángulo de incidencia es menor que el semiángulo de aceptación** la radiación **llegará hasta el receptor**. Este es uno de los factores más importantes sobre los concentradores secundarios y que más se ha tenido en cuenta durante la realización del trabajo.

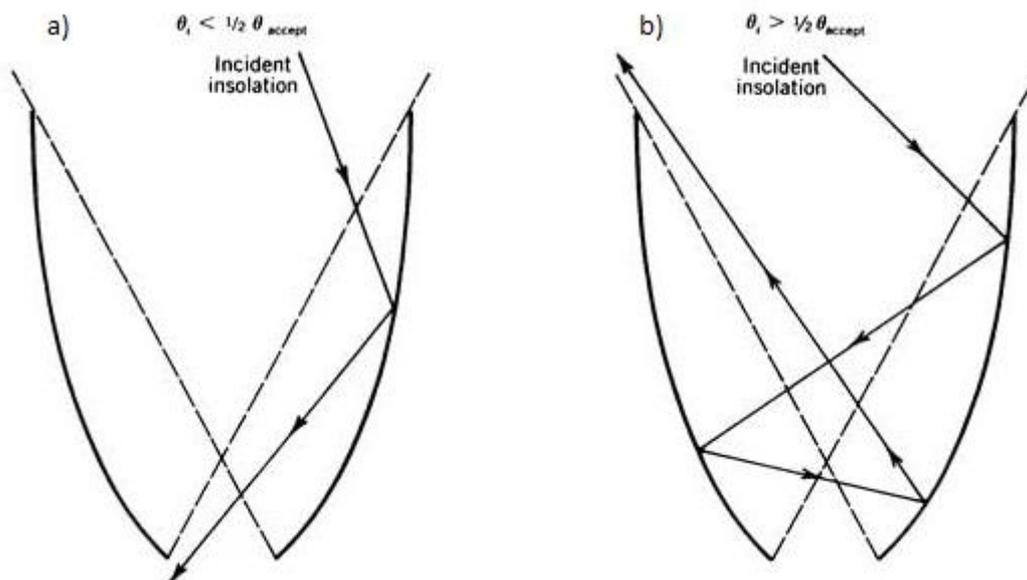


Ilustración 43: Comportamiento CPC cuando a) ángulo de incidencia menor que semiángulo de aceptación b) ángulo de incidencia mayor que semiángulo de aceptación [7]

A raíz de la afirmación anterior podemos decir que si la radiación solar que llega al CPC es completamente paralela a un eje de parábola terminarán los rayos en el foco de dicha parábola (Ilustración 44). No obstante, la radiación solar no es completamente paralela de por sí, sino que tiene cierto error angular. Por otra parte, debido a esta fuerte condición que el ángulo de aceptación impone sobre el concentrador, es conveniente inclinar los CPC hacia el lugar desde el que recibe la radiación para así conseguir que el ángulo de incidencia sea menor.

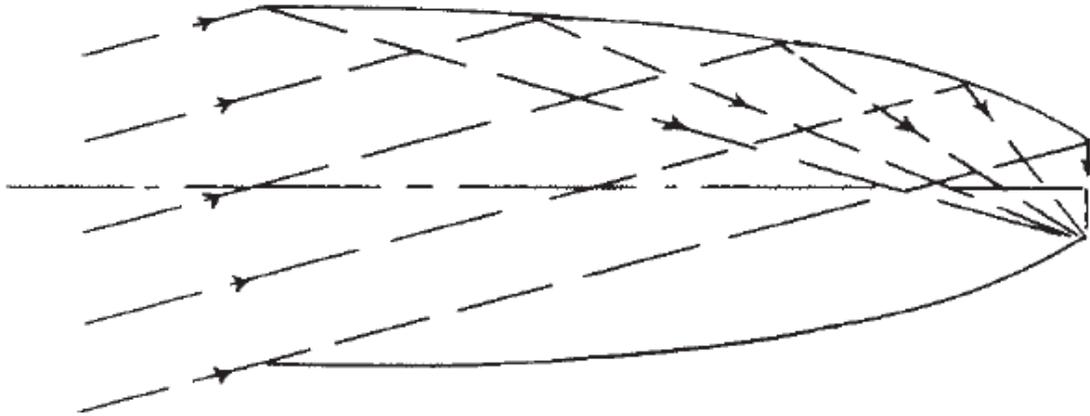


Ilustración 44: Rayos paralelos a eje parábola [10]

En el caso de que el ángulo de aceptación fuese de 180 grados sería equivalente a un plano mientras que si es 0 sería como tener una sola parábola. Estas magnitudes ni valores cercanos a ellas se contemplan a la hora de diseñar un CPC.

Realmente, en un CPC, no se pasa de una transmisión de la radiación del 100% al 0% justo en el momento en el que el ángulo de incidencia alcanza el valor del semiángulo de aceptación sino que existe un pequeño intervalo angular menor de 3° en el que la radiación transmitida varía desde su totalidad hasta que es nula (Ilustraciones 45 y 46, tabla 4).

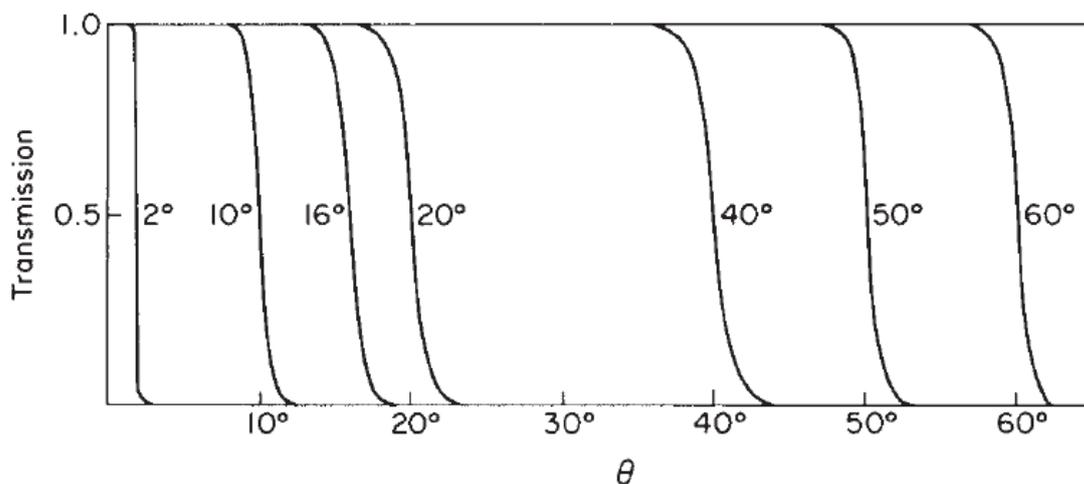


Ilustración 45: Variación de la transmisión de la radiación solar en función del semiángulo de aceptación [10]

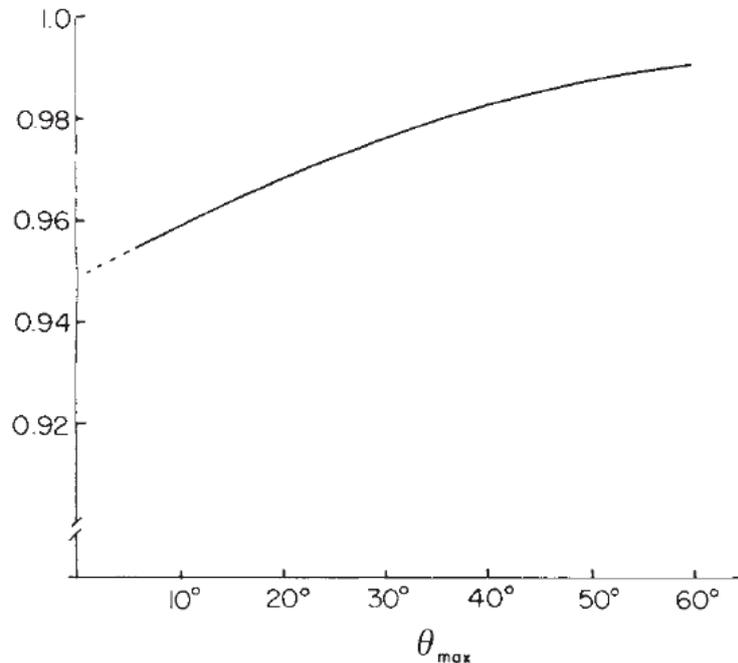


Ilustración 46: Porcentaje de la radiación de ángulo de incidencia menor que el semiángulo de aceptación que llega a la salida para ciertos semiángulos de aceptación [10]

$\theta_{\text{máx}}$	2°	10°	16°	20°	40°	60°
$\Delta\theta$	0.4°	1.5°	2°	2.5°	2.7°	2°

Tabla 4: Intervalo angular en el que se pasa del 10% al 90% de radiación que llega a la salida [10]

Se va a emplear la ilustración 47 para ver cómo afecta el ángulo de incidencia a un CPC con semiángulo de aceptación de 10°. Los rayos solares considerados son paralelos y se dirigen horizontalmente hacia la derecha. En los casos dibujados los rayos tienen respectivamente un ángulo de incidencia de 8, 9, 9.5, 10, 10.5 y 11. Las figuras muestran el área de apertura del CPC dividida en regiones según el número de veces que va a ser reflejado en su interior un rayo que accede al concentrador por esa sección. Si el número está acompañado de una F y el área está sombreada el rayo será finalmente rechazado tras dicho número de reflejos. Podemos comprobar como conforme el ángulo de incidencia sube la radiación que se pierde es mayor al estar acercándonos al semiángulo de aceptación hasta que finalmente toda sea rechazada.

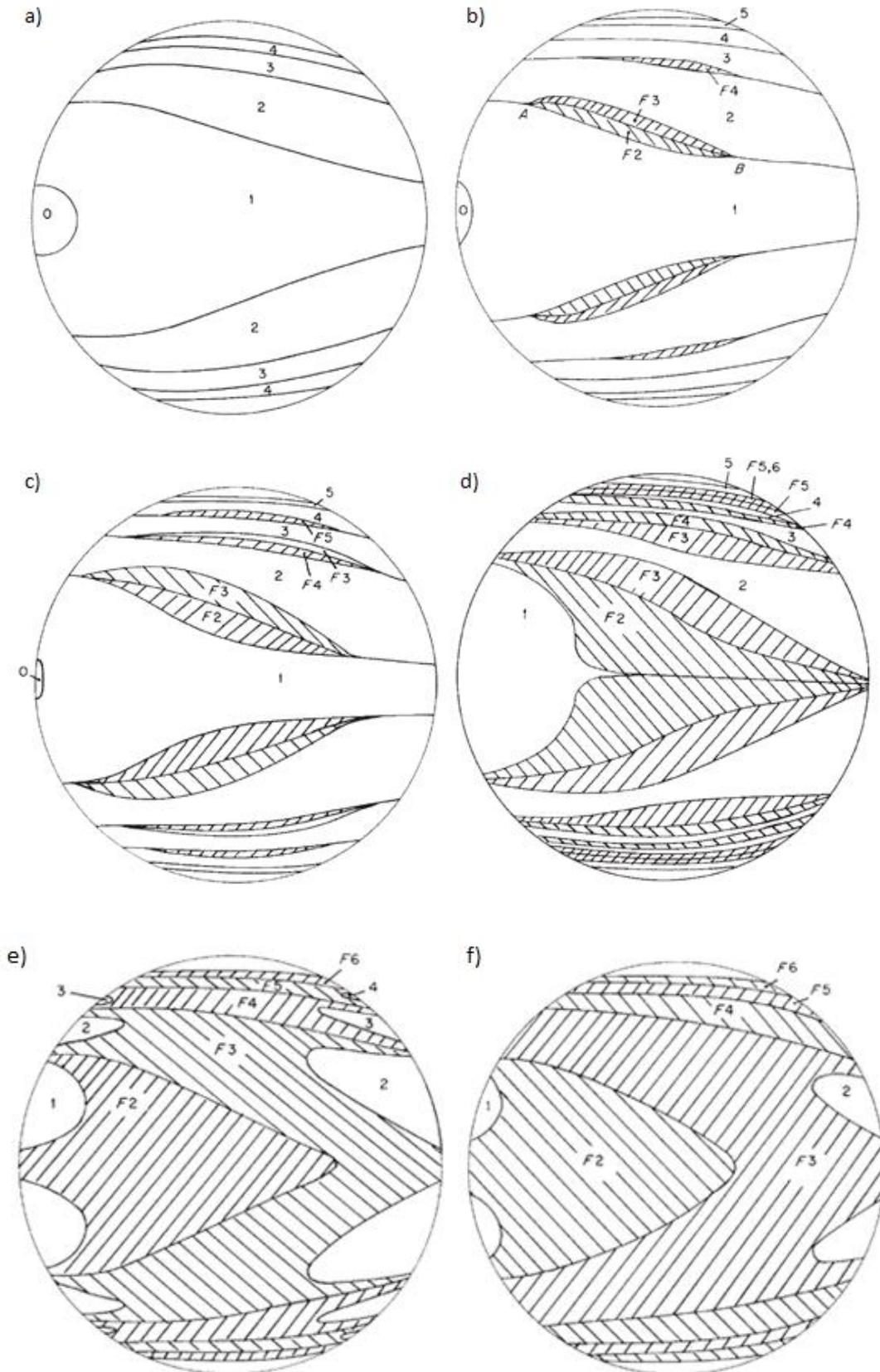


Ilustración 47: Apertura de un CPC de semiángulo de aceptación 10° para ángulos de incidencia de a) 8° b) 9° c) 9.5° d) 10° e) 10.5° f) 11° [10]

4.4.3 ECUACIÓN DEL CPC

Denominando a' al radio de salida y α al semiángulo de aceptación y siguiendo la convención de signos de la ilustración 48. Podemos escribir la ecuación de la parábola de un CPC [10].

$$(r \times \cos \alpha + z \times \sin \alpha)^2 + 2 \times a' \times (1 + \sin \alpha)^2 \times r - 2 \times a' \times \cos \alpha \times (2 + \sin \alpha)^2 \times z - a'^2 \times (1 + \sin \alpha) \times (3 + \sin \alpha) = 0 \quad (4.5)$$

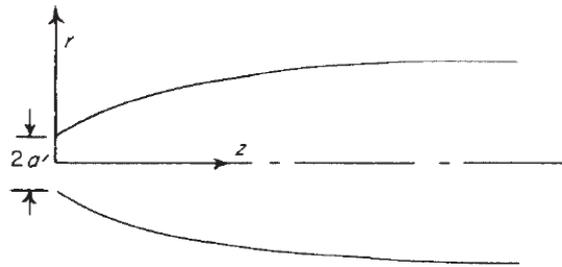


Ilustración 48: Convenio signos ecuación [10]

4.4.4 RAZÓN DE CONCENTRACIÓN GEOMÉTRICA

Los CPC tienen su propia razón de concentración geométrica bidimensional. Al ser el cociente entre el radio de salida y el de apertura igual al semiángulo de aceptación podemos deducir C_g (4.6):

$$C_g = \frac{1}{\text{sen}(\text{semiángulo de aceptación})} \quad (4.6)$$

4.4.5 TRUNCAMIENTO

La mayor desventaja de un CPC reside en su gran longitud en comparación con su diámetro de apertura. Por ello muchas veces es conveniente reducir la superficie reflectiva de los CPC y hacer que este disponga de unas menores dimensiones. Para conseguirlo se trunca el concentrador. De esta manera se ahorra en área y costes de fabricación, y las cargas ocasionadas por la presencia del concentrador son menores. Sin embargo, eso supone ciertas desventajas debido a que la razón de concentración también disminuye y entonces ya no es tan cercana a la ideal.

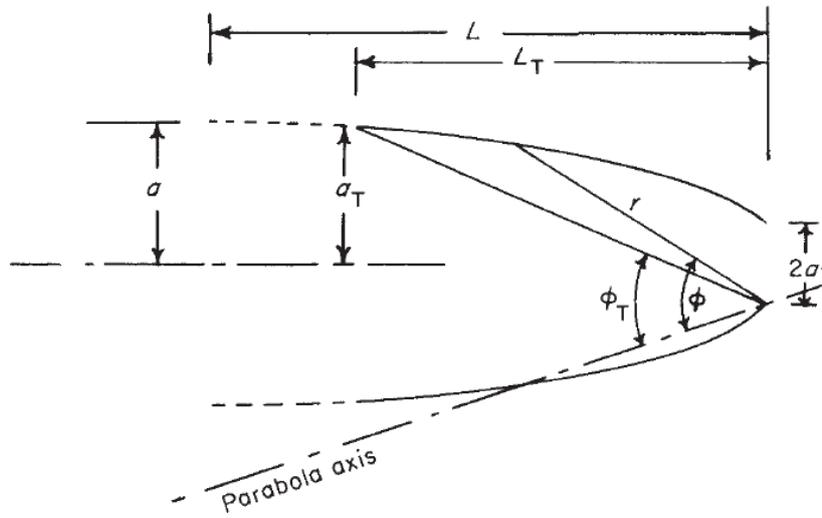


Ilustración 49: Truncamiento CPC [10]

Se puede observar en las ilustraciones 49 y 50 que una importante disminución de la longitud conlleva tan solo una pequeña pérdida en la capacidad de concentración al variar escasamente el área de apertura.

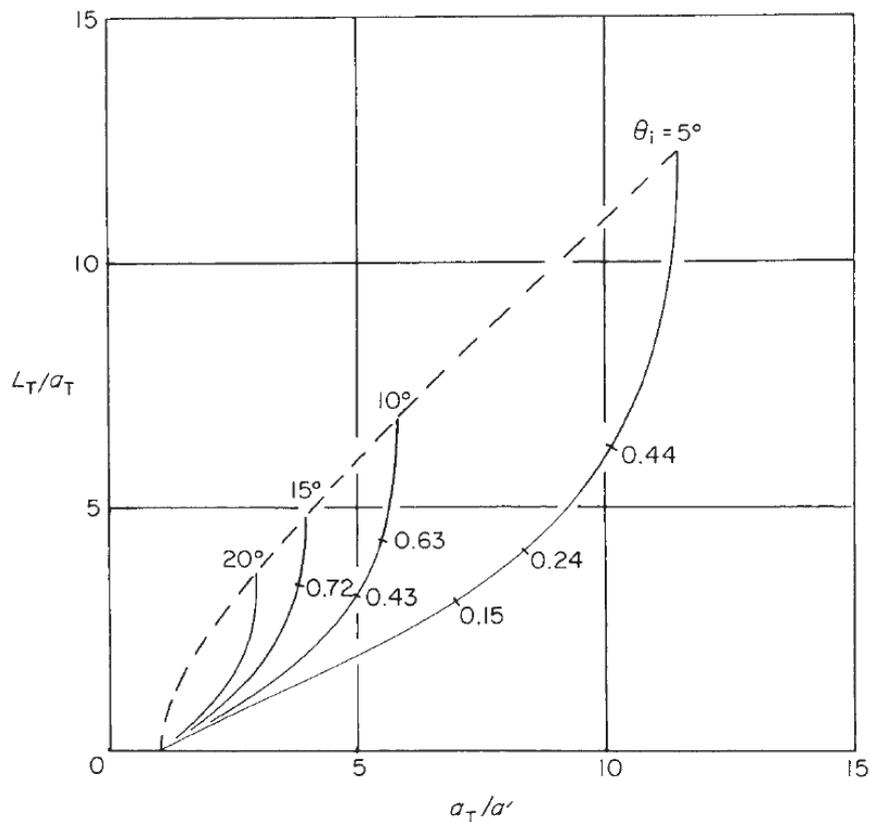


Ilustración 50: Variación de la concentración (a/a') para ciertos semiángulos de aceptación si se produce truncamiento. Los números de la gráfica indican I truncamiento / I [10]

4.5 CONCENTRADORES SECUNDARIOS

4.5.1 INTRODUCCIÓN

La radiación debe llegar muy concentrada al receptor en una central de torre para conseguir las elevadas temperaturas ($>800^{\circ}\text{C}$) necesarias para alcanzar el mejor rendimiento posible. Estas temperaturas tan altas pueden provocar que se dispare el valor de las pérdidas térmicas, sobre todo las debidas a la radiación, que como hemos visto son las mayores, por ello el tamaño del receptor tiene que reducirse para poder disminuir el área emisora de radiación sin que por ello se incremente el spillage. Por lo tanto, la concentración de la radiación se hace imprescindible tanto para llegar a unas temperaturas suficientes como para limitar las pérdidas térmicas. Los heliostatos no son capaces siempre de alcanzar los valores requeridos y, como antes se ha indicado, a veces no es suficiente o económica su mejora. Ante esta necesidad de elevada concentración surgen los concentradores secundarios.

Los concentradores secundarios, también conocidos como reconcentradores, basan su diseño en los CPC vistos en la anterior sección aunque se introducen ligeras modificaciones en su diseño para facilitar la fabricación. Su uso, como su propio nombre indica, viene determinado por la necesidad de concentración de la radiación solar en el receptor. Concentraciones no especialmente altas consiguen importantes incrementos de la temperatura del fluido que recorre la instalación y con ello de la eficiencia a la hora de convertir energía térmica en energía eléctrica.

Además los concentradores secundarios introducen modificaciones en el perfil del flujo solar que llega al receptor ya que este es suavizado produciendo asimismo la minoración de los gradientes térmicos. Esto es importante para un buen rendimiento térmico al igual que la disminución de las pérdidas térmicas ya mencionada.

Sin embargo no todo son ventajas, la implantación de concentradores secundarios también implica una serie de limitaciones que merman la eficiencia óptica de la central y que deben ser consideradas. Este aspecto muchas veces no es tenido en cuenta y será el objeto de estudio de este trabajo. Estas limitaciones se producen debido a reflexiones adicionales que se puedan dar en los reconcentradores y por factores de tipo geométrico que hagan que parte de la radiación que llega a los concentradores secundarios sea devuelta sin terminar en el receptor. Ello hará que el rendimiento de la central baje.

Por otro lado la introducción en la central de reconcentradores provocará grandes cambios en el lay-out de la planta. Todo esto se analizará a lo largo del trabajo.

Antes de explicar las modificaciones que introduce un concentrador secundario se ha de recordar la importancia del ángulo de aceptación. Al estar fundamentados los reconcentradores en los CPC, cuando el ángulo de incidencia sea superior al semiángulo de aceptación el rayo será rechazado y no llegará al receptor. Esto explica las limitaciones y cambios que los concentradores secundarios suponen respecto al caso de cuando no los hay.

4.5.2 DESCRIPCIÓN

Los concentradores secundarios aunque pueden ir asociados a un receptor tubular es habitual encontrarlos formando un binomio con un receptor volumétrico. Se forma una unión entre un concentrador secundario hexagonal y un receptor volumétrico dando lugar a módulos. Estos módulos se emplazan componiendo un panel. Este es el motivo de que los reconcentradores sean hexagonales ya que al formar un panel de concentradores, de esta manera, no quedan huecos entre ellos ni se pierden rayos. El número de uniones que han de rodear a la torre dependerá de las características del campo de heliostatos y del receptor.

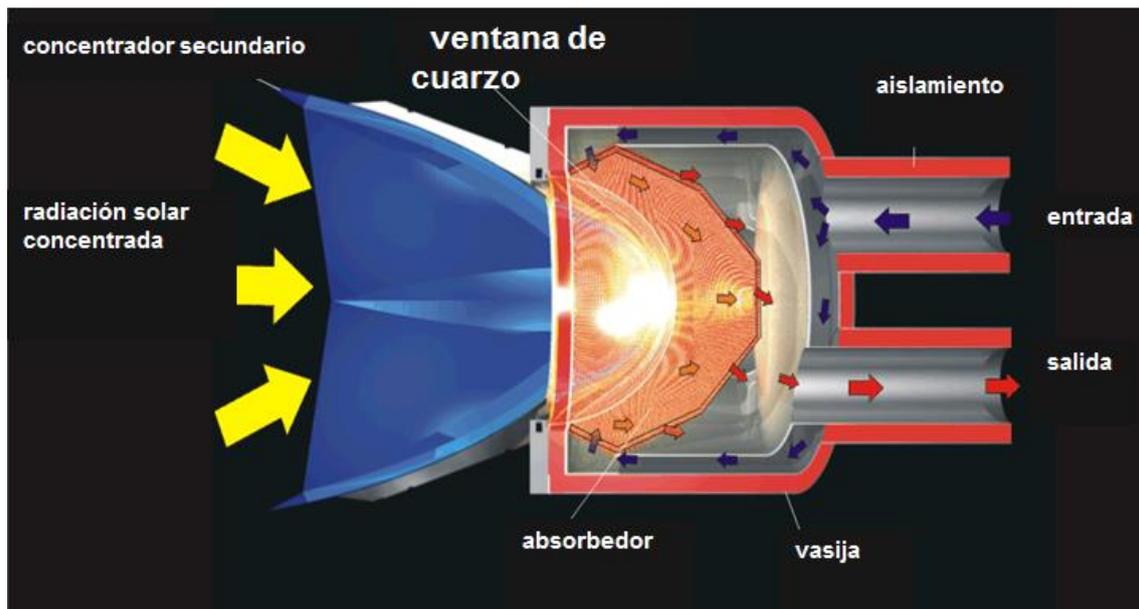


Ilustración 51: Módulo concentrador secundario hexagonal - receptor volumétrico (HCPC) [6]

El receptor es una cavidad que contiene en su interior una matriz cerámica por la que circula el fluido de trabajo (habitualmente aire). La radiación solar que llega al receptor lo calienta permitiendo que el fluido aumente su temperatura al circular por él.

Para el correcto funcionamiento del receptor, este ha de trabajar a una alta temperatura y a una presión superior a la atmosférica (por ejemplo, el conocido como REFOS, a 15 bares). La segunda condición es facilitada por la ventana de cuarzo o vasija que vemos en la figura. Para posibilitar la implantación de la ventana así como la primera condición se precisa de un concentrador secundario ya que sino ni la concentración es suficiente ni las restricciones de tamaño y forma de la apertura del receptor permiten colocar la ventana de cuarzo. Esta vasija, de forma esferoidal, tiene otra ventaja ya que gracias a ella las pérdidas por convección disminuyen. Además, los concentradores secundarios también ayudan a proteger la vasija.

En el caso de que el receptor fuese tubular la salida del reconcentrador iría a parar a un tubo en el que un fluido, véase agua o véase sales fundidas, sería calentado.

El modelo de concentrador secundario más común y el utilizado en las simulaciones hechas durante la realización de este trabajo es el hexagonal de tipo CPC (HCPC). Está compuesto por seis superficies reflectivas de tipo CPC que forman un concentrador que además será truncado. Las seis placas son iguales y están orientadas y unidas formando una cavidad hexagonal.

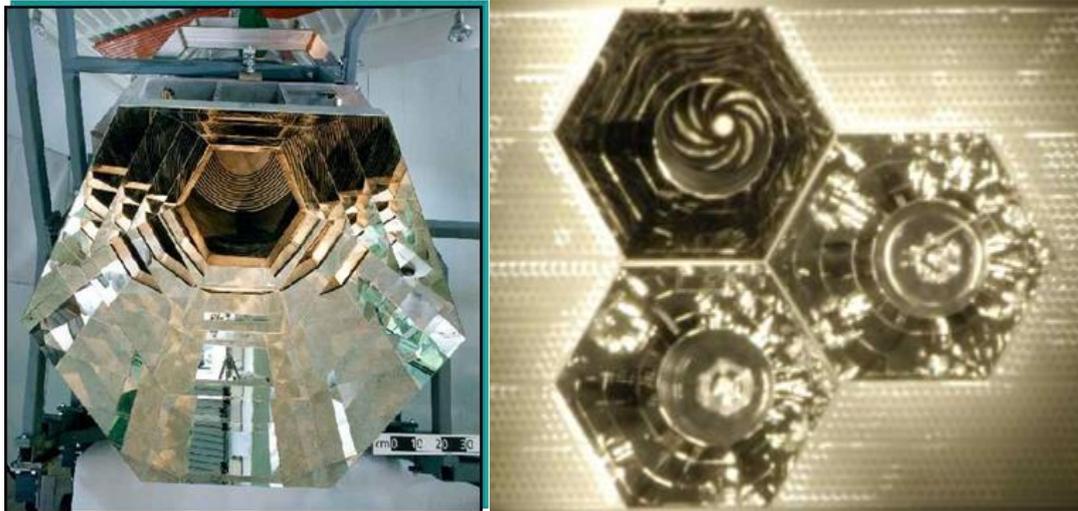


Ilustración 52: HCPC [6]

La entrada y salida del reconcentrador será un hexágono debido a motivos puramente geométricos ya que así varios pueden ser dispuestos juntos. Los parámetros que definen un HCPC obedecen a unas ecuaciones que se expondrán en el apartado 4.5.3. Estos parámetros son la longitud del lado hexagonal de salida y de entrada, la profundidad del concentrador y la razón de concentración geométrica (función del ángulo de aceptación).

Ya hemos visto en el apartado 4.4.2 que el factor más importante de un reconcentrador es el ángulo de aceptación. Este deberá ser optimizado para alcanzar un compromiso entre la concentración del HCPC (a menor ángulo de aceptación más concentración) y la energía que llega al receptor (a mayor ángulo de aceptación más posibilidades de que la energía llegue al receptor). De por sí la altura del receptor ya implica un considerable ángulo de incidencia, mayor cuanto más cerca de la torre estemos, recordamos que si este ángulo de incidencia supera el valor del semiángulo de aceptación la radiación no va hasta la salida del concentrador. Una variante para hacer frente a este hecho son reconcentradores inclinados hacia abajo pero esto impide que el receptor sea cilíndrico e implica otras limitaciones geométricas. Se han analizado ambos casos.

Para evitar que las paredes de los reconcentradores se calienten en exceso y no puedan actuar correctamente suelen tener un sistema de refrigeración de su superficie. Por ejemplo se puede tener unos tubos por los que circule agua que entra a temperatura ambiente. Hay que tener en cuenta que la zona del reconcentrador que está a mayor temperatura es su salida por lo que será en ella por donde deba entrar el agua de refrigeración.

El estudio de los materiales en los que se han de fabricar los concentradores secundarios también es importante. Estos materiales reflectantes se encuentran sometidos a altas radiaciones y temperaturas y expuestos al ambiente (humedad, polvo, etc.) por lo que soportan cargas y se degradan con el paso del tiempo. Además todos estos factores provocan la pérdida de reflectancia del material. Asimismo una insuficiente refrigeración del concentrador puede provocar la destrucción del material haciendo que se funda. Además, la degradación puede ser consecuencia de la sinergia de factores fototérmicos o fotohidrolíticos [14]. Todo ello se ha de tener en cuenta a la hora de simular su funcionamiento.

La vida estimada de un sistema de torre central está estimada entre 20-30 años mientras que una renovación de los concentradores secundarios de 2-4 veces durante ese periodo está considerada como aceptable. El coste y facilidad para cambiar los reconcentradores han de ser tenidos en cuenta en el diseño.

Se pueden observar diferentes alternativas en cuanto a los materiales en los que puede estar fabricado el reconcentrador. Una buena opción es fabricarlos en aluminio ya que este material es el más empleado en el sistema de refrigeración por lo que las tensiones serán menores. No obstante la reflectividad será peor (0.86). Otro material podría ser una capa de vidrio recubierta de plata. En este caso la reflectividad es mejor (0.95) aunque resiste peor las condiciones ambientales. También podemos encontrar superficies de bronce cubiertas con níquel y plata, esta alternativa resiste bien las altas temperaturas.

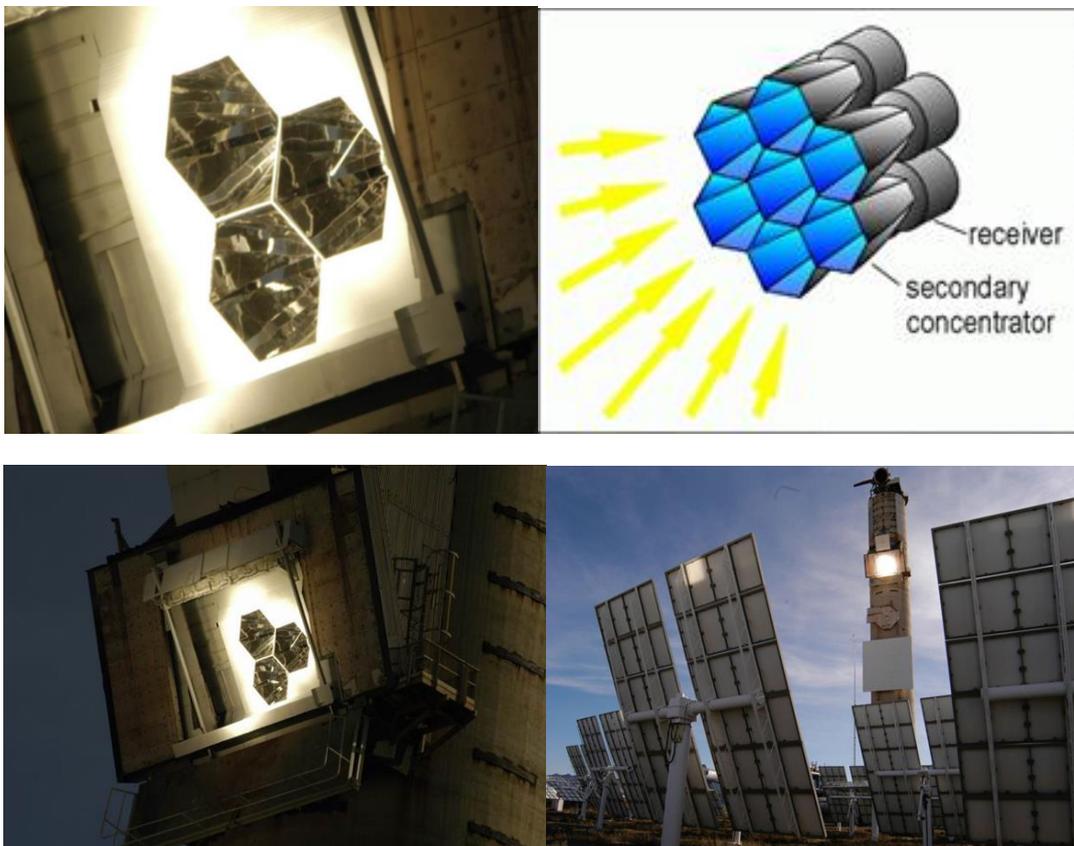


Ilustración 53: Disposición de concentradores secundarios hexagonales en una torre [6]

4.5.3 ECUACIONES QUE DEFINEN UN CONCENTRADOR SECUNDARIO

Los concentradores secundarios que se han estudiado en el presente trabajo son CPC truncados de forma hexagonal. En base a esa condición existen una serie de ecuaciones que definen sus parámetros fundamentales.

El programa en el que se han hecho las simulaciones, llamado Tonatiuh, pide como parámetros para definir un HCPC: la razón de concentración geométrica máxima de un CPC, la altura, la apotema del hexágono de salida y los lados de los hexágonos de entrada y salida. Con 3 de ellos bastará para definir el resto mediante el empleo de estas ecuaciones:

$$\begin{aligned} \text{Razón de concentración geométrica máxima de un CPC } (C_g) \text{ (bidimensional)} \\ = \frac{A_{\text{entrada}}}{A_{\text{salida}}} = \frac{1}{\text{sen}(\text{semiángulo de aceptación})} \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} \text{Razón de concentración geométrica de un concentrador secundario} &= \frac{A_{\text{entrada}}}{A_{\text{salida}}} = \\ &= \frac{1}{(\text{sen}(\text{semiángulo de aceptación}))^2} \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\text{Razón de concentración de flujo } (C_f) = \frac{\frac{P_{\text{salida}}}{A_{\text{salida}}}}{\frac{P_{\text{entrada}}}{A_{\text{entrada}}}} = \eta_{\text{CPC}} \times C_g \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} \text{theta mínima} &= \cos^{-1} \left(h^2 - 4 \times \sqrt{ \left(a^2 \times \left(\cos\left(\frac{\text{acep}}{2}\right) + \sin\left(\frac{\text{acep}}{2}\right) \right)^2 \times ((a+h) \right. \right. \\ &\quad \times \cos\left(\frac{\text{acep}}{2}\right) + (a-h) \times \sin\left(\frac{\text{acep}}{2}\right) \left. \right) \times \sin(\text{acep})^2 + a \times (2 \times \cos(\text{acep}) \\ &\quad + \sin(2 \times \text{acep}))) / (6 \times a^2 + h^2 - 2 \times a^2 \times (\cos(2 \times \text{acep}) - 4 \\ &\quad \times \sin(\text{acep})) + 4 \times a \times h \times \cos(\text{acep}) \times (1 + \sin(\text{acep}))) \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$xT = \frac{2 \times a \times (1 + \sin(\text{acep})) \times \sin(\text{theta mínima} - \text{acep})}{1 - \cos(\text{theta mínima})} - a \quad (4.11)$$

$$yT = \frac{2 \times a \times (1 + \sin(\text{acep})) \times \cos(\text{theta mínima} - \text{acep})}{1 - \cos(\text{theta mínima})} \quad (4.12)$$

$$\text{Longitud del lado del hexágono de entrada} = \frac{xT}{\cos 30} \quad (4.13)$$

$$\text{Longitud del lado del hexágono de salida} = \frac{a}{\cos 30} \quad (4.14)$$

$$\text{Distancia focal} = a \times (1 + \sin(\text{acep})) \quad (4.15)$$

donde:

- ‘acep’ es el semiángulo de aceptación (en radianes).
- ‘a’ es la apotema del hexágono de salida.
- ‘h’ es la altura del reconcentrador.
- ‘xT’ e ‘yT’ son los valores de la forma de la parábola.
- ‘theta mínima’ es el menor ángulo en la formación de la parábola.

Con las ecuaciones 7, 10, 11, 13 y 14 y los valores tomados para ‘a’, ‘h’ y ‘acep’ es suficiente para definir el reconcentrador.

4.5.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS CONCENTRADORES SECUNDARIOS

El empleo de concentradores secundarios en los sistemas de torre central tiene una serie de consecuencias sobre las centrales y su eficiencia debido a la influencia directa en aspectos tanto térmicos como ópticos.

La consecuencia directa más evidente es el aumento de la concentración que da en el receptor. Como se ha venido indicando a lo largo del TFG esto resulta positivo por diversos motivos entre los que destaca las mayores temperaturas conseguidas que, al fin y al cabo, son el principal objetivo a cumplir por el campo de heliostatos.

Por otro lado, en lo referente a las pérdidas térmicas, se consigue una notable bajada de las mismas debido a la disminución de área radiante que es permitida gracias al aumento de la concentración, la cual hace que las pérdidas térmicas debidas tanto a la radiación, las más importantes, como a la convección presenten un valor inferior. Este es otro de los principales motivos de la implantación de los concentradores secundarios ya que la disminución de estas pérdidas térmicas conlleva un sustancial incremento de la eficiencia de la instalación.

Además, los concentradores secundarios en estas plantas CSP implican la modificación del perfil que presenta el flujo solar ya que permiten que este se vea suavizado y homogeneizado y se consigue que el valor del gradiente térmico sobre el receptor sea menor que en el caso de no existir estos concentradores secundarios. Este hecho posibilita alargar la vida del receptor con el consiguiente beneficio económico que supone. No obstante, estas modificaciones introducidas en el flujo solar dependen de cual sea el tipo de receptor que esté situado en lo alto de la torre, no es igual si el receptor es volumétrico o tubular ya que en el segundo caso pueden no ser positivas según cual sea la disposición de las tuberías que contienen el fluido. En los resultados del trabajo se analizará las diferencias existentes.

Asimismo ya se ha comentado que la adición de concentradores secundarios al sistema también introduce unas limitaciones nuevas ya que supone la aparición o aumento de pérdidas ópticas en los reconcentradores.

Podemos encontrar diferentes tipos de pérdidas ópticas que supondrán un claro empeoramiento en la eficiencia que el sistema nos permite alcanzar. Se pueden clasificar en:

- Pérdidas por absorción y transmitancia: El reconcentrador no tiene una reflectancia del 100% sino que existe una parte de la radiación que es absorbida o transmitida por el concentrador que no llegará, por lo tanto, al receptor. Cuanto mayor sea el número de reflejos que se produzcan en el interior del reconcentrador las pérdidas por absorción crecerán. Será importante que el concentrador tenga una reflectividad lo más alta posible por lo que la investigación en materiales adquiere especial transcendencia.
- Pérdidas debidas al rechazo de parte de la radiación solar que incide sobre los concentradores secundarios y que es expulsada hacia el exterior. Estas pérdidas pueden ser ocasionadas por la configuración geométrica u orientación del dispositivo. Se producen cuando el ángulo de incidencia es mayor que el semiángulo de aceptación. Las pérdidas debidas a este efecto pueden ser cuantiosas por lo que se exige un riguroso estudio de la orientación de los reconcentradores para optimizar su funcionamiento así como del lay-out del campo de heliostatos. Estas pérdidas van a ser el principal factor estudiado en este trabajo ya que son un factor que muchas veces se pasa por alto y que conviene tener en cuenta cuando se desea la presencia de concentradores secundarios. En receptores cilíndricos, si se desea reducir este efecto, hay que aumentar el radio del receptor pero esto va en contra del aumento perseguido en concentración.
- Pérdidas por spillage a la entrada del concentrador secundario: Una parte de la radiación solar que es reflejada por los heliostatos no alcanza los concentradores secundarios con la suficiente precisión y por lo tanto no llegará al receptor. Son ocasionadas por fallos en la superficie del heliostato, la dispersión del haz de luz y errores en la en la orientación de dicho heliostato.

Estas pérdidas no tienen por qué aumentar al introducir un concentrador secundario respecto a las pérdidas existentes en la situación original. De hecho en el caso de que tengamos un receptor cilíndrico el radio total de apertura va a ser más grande y por ello las pérdidas por spillage en heliostatos lejanos bajarán.

Por lo tanto, mediante los concentradores secundarios habremos conseguida un posible crecimiento de la temperatura, la bajada de las pérdidas térmicas y la modificación del perfil del flujo pero también un incremento en la magnitud de las pérdidas ópticas. Esto implica cambios en el rendimiento.

El cálculo de la eficiencia variará debido a la presencia de concentradores secundarios. Consideramos el conjunto formado por concentrador secundario y receptor cuya eficiencia depende tanto de las pérdidas ópticas como de las térmicas. Se puede aproximar esta eficiencia mediante la siguiente fórmula según lo considerado hasta ahora:

$$\eta_{receptor} = \frac{\alpha \times (P_{ap} - P_{rej} - P_{abs}) - P_{rad} - P_{cn}}{P_t} \quad (4.16)$$

- α : Absorbancia efectiva del receptor. Porcentaje de energía que absorberá el receptor y que pasaría al fluido que circula por la instalación. Se ha dicho que el receptor debe actuar como un cuerpo negro, para ello la absorbancia debe ser alta.
- P_{ap} : Potencia que llega al reconcentrador menos la que se pierde debido al spillage a la entrada del mismo, es decir, es la potencia que hay en su apertura.
- P_{rej} : Potencia que se pierde debido a los rayos que son rechazados por el concentrador y devueltos al exterior. Pérdidas ocasionadas por un ángulo de incidencia mayor que el semiángulo de aceptación.
- P_{abs} : Potencia que absorben las paredes del concentrador secundario debido a que este no tiene una reflectancia total. Las reflexiones que se producen dentro del concentrador hacen que parte de la radiación sea transmitida o absorbida por dichas paredes del reconcentrador.
- P_{rad} : Pérdidas que se producen por radiación en el receptor.
- P_{cn} : Pérdidas que se dan en el receptor por convección natural.
- P_t : Potencia total que llega a la apertura del concentrador.

Se considera al receptor bien aislado y se suelen despreciar las pérdidas asociadas a la conducción de calor.

Se pueden reducir de manera considerable las pérdidas debidas a la convección natural mediante la ventana transparente situada a la salida del concentrador que se mostraba en la ilustración 51. Aparecerán nuevas pérdidas por convección de magnitud muy inferior a las anteriores.

Un receptor bien aislado, isoterma y sin esta ventana se puede considerar que se trata de un cuerpo negro con ϵ eficaz de valor aproximadamente 1. Si añadiésemos la ventana para reducir las pérdidas por convección esta emisividad reduciría su magnitud siendo dependiente de la temperatura promedio en el receptor y dejando de actuar como un cuerpo negro.

Se puede emplear la dependencia entre los distintos componentes de la ecuación antes mostrada para extraer una nueva expresión para la eficiencia [15]:

$$\eta_{receptor} = \alpha \times \eta_{\text{optico}} \times f_{ap} - \frac{\sigma \times T_{rec}^4 \times A_{rad}}{P_t} - \frac{C_h \times A_h \times (T_{rec} - T_a)}{P_t} \quad (4.17)$$

- η_{optico} : Eficiencia óptica del concentrador CPC. Resulta del cociente entre la potencia total que llega al receptor y la potencia total que alcanza la entrada del reconcentrador.
- f_{ap} : Cociente entre la potencia que llega a la apertura del concentrador y la potencia total reflejada por los heliostatos. Es el factor que evalúa las pérdidas debidas al spillage, sombras, bloqueos, atenuación atmosférica y errores en la superficie del heliostato.
- σ : Constante de Stefan-Boltzmann.
- T_{rec} : Temperatura media del receptor.
- C_h : Coeficiente de convección dependiente de la geometría y características del aire.
- A_{rad} y A_h : Área del receptor implicada en la radiación y en la convección natural.
- T_a : Temperatura ambiente.

Si quisiéramos analizar la eficiencia del CPC el cociente sería entre la potencia que llega al reconcentrador, P_{ap} , y no habría que considerar f_{ap} .

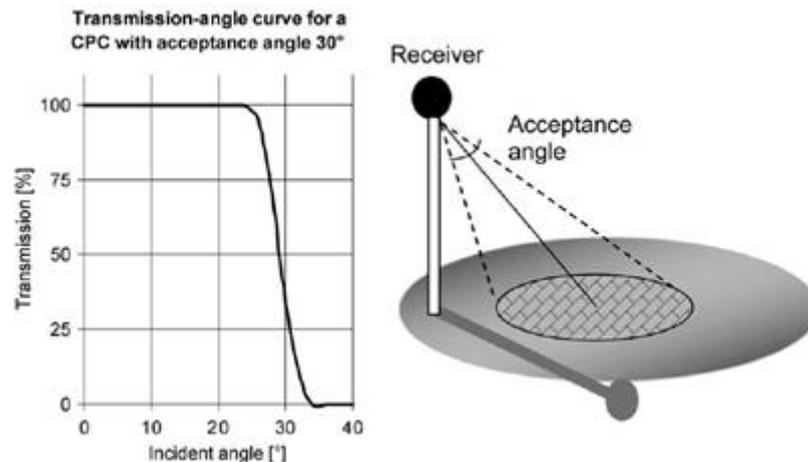


Ilustración 54: Influencia ángulo de aceptación en la eficiencia óptica en una central de torre [16]

En el diseño de un concentrador secundario se debe alcanzar un compromiso entre su coste, facilidad de fabricación y capacidad para cumplir con su cometido. Las dimensiones totales del mismo y el número de reflejos que se producen en su interior han de ser mínimos mientras que la forma ha de ser sencilla.

Sin embargo una de las mayores consecuencias que se puede observar al introducir concentradores secundarios es la modificación que impone sobre la distribución espacial del campo de heliostatos de la planta. No debe ser el mismo el lay-out cuando hay reconcentradores que cuando no los hay ya que la eficiencia del campo varía mucho en un caso respecto a otro.

Un heliostato no va a reflejar más potencia en el receptor cuando hay reconcentradores que cuando no los hay, sí termina llegando más concentrada pero no en más cantidad. Para que el funcionamiento sea el correcto deberá dar la misma aunque en ocasiones sí que puede dar más por disminución del spillage. No obstante ya hemos visto que debido a las restricciones que el ángulo de aceptación impone no va a ser posible dar siempre igual potencia que cuando no hay concentradores secundarios.

Si tenemos un campo de heliostatos pequeño el diseño de este dependerá de la altura de la torre, el ángulo de aceptación y el ángulo de inclinación entre el eje del concentrador secundario y el eje de la torre central. En este caso no será necesario el empleo de muchos reconcentradores mientras que la dirección de los mismos dependerá del lugar geográfico en el que nos encontremos. Si estamos en el hemisferio norte los heliostatos deberán apuntar hacia el sur.

Si, por el contrario, el campo de heliostatos es grande, harán falta muchos concentradores ya que, sino, se requerirá aumentar el ángulo de aceptación con la pérdida de efectividad que esto supone. Son más importantes los concentradores secundarios en este tipo de campos donde, además, las pérdidas debidas al spillage y a la atenuación atmosférica son tan importantes como las debidas al efecto coseno.

Por lo tanto la implantación de concentradores secundarios en el sistema conlleva efectos en la forma, tamaño y disposición espacial óptimos de los heliostatos. Cada reconcentrador tiene una especie de vista de cono en la que los heliostatos situados dentro tendrán efecto pero no los que están fuera. El área que resulta de la proyección del cono en el suelo tendrá forma elíptica, parabólica o hiperbólica. Los heliostatos situados dentro de esta área conseguirán que la radiación que reflejan llegue completamente al receptor pero no así los que están fuera. Esto ha sido analizado en el TFG.

Otra ventaja de los concentradores secundarios es que permiten el uso de turbinas de gas, cuya eficiencia en un ciclo combinado es muy buena [16]. Estas turbinas de gas necesitan el uso de receptores volumétricos presurizados debido a su fiabilidad, buen funcionamiento y su capacidad de integración con las turbinas de gas. Para conseguir esta presurización es necesario el uso de concentradores secundarios ya que permiten usar aire como fluido de trabajo. Este también puede ser uno de los motivos del uso de concentradores secundarios.

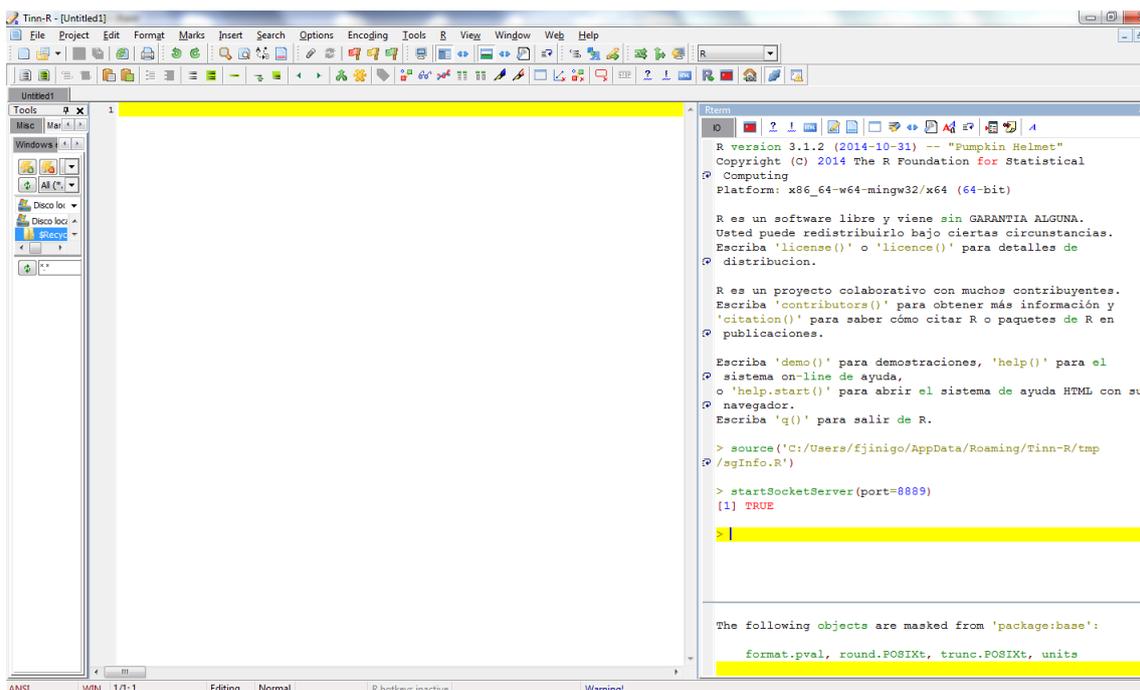
5. METODOLOGÍA

El desarrollo del TFG ha seguido dos caminos. Por un lado se han realizado primero una serie de programas en lenguaje de programación R para analizar de manera matemática el comportamiento y eficiencia de los concentradores secundarios y, por otro lado, se ha empleado después el software Tonatiuh para simular el funcionamiento de centrales de torre y obtener datos físicos sobre las mismas. Todo ello se ha hecho partiendo de modelos simples a los que se ha ido introduciendo complejidad para poder analizar y comprender los efectos que se dan por el uso de reconcentradores. Asimismo se ha usado Mathematica para interpolar y obtener gráficas. En base a los resultados obtenidos se han obtenido conclusiones acerca de la idoneidad del uso de concentradores secundarios.

5.1 PROGRAMACIÓN EN R

R es un software libre que consiste en un lenguaje y entorno de programación que permite el análisis matemático y gráfico. Se trata de una herramienta muy popular y ampliamente implementada en diversos campos científicos.

Durante la elaboración del trabajo se ha empleado el editor de código de R, denominado Tinn-R y que facilita un uso más cómodo y sencillo del mismo.



```

R version 3.1.2 (2014-10-31) -- "Pumpkin Helmet"
Copyright (C) 2014 The R Foundation for Statistical
Computing
Platform: x86_64-w64-mingw32/x64 (64-bit)

R es un software libre y viene sin GARANTIA ALGUNA.
Usted puede redistribuirlo bajo ciertas circunstancias.
Escriba 'license()' o 'licence()' para detalles de
distribucion.

R es un proyecto colaborativo con muchos contribuyentes.
Escriba 'contributors()' para obtener más información y
'citation()' para saber cómo citar R o paquetes de R en
publicaciones.

Escriba 'demo()' para demostraciones, 'help()' para el
sistema on-line de ayuda,
o 'help.start()' para abrir el sistema de ayuda HTML con su
navegador.
Escriba 'q()' para salir de R.

> source('C:/Users/fjinigo/AppData/Roaming/Tinn-R/tmp
/sgInfo.R')
> startSocketServer(port=8889)
[1] TRUE

The following objects are masked from 'package:base':
  format.pval, round.POSIXt, trunc.POSIXt, units
  
```

Ilustración 55: Tinn-R

Mediante programación en R se ha simulado utilizando fórmulas matemáticas una central de torre. Se ha comenzado partiendo de un caso bidimensional para ir posteriormente aumentando la complejidad. Se ha definido un receptor bien circular, bien cilíndrico o bien esférico. Se ha calculado la eficiencia de la utilización de concentradores secundarios respecto a cuándo no los hay y se ha evaluado la influencia de los parámetros que intervienen en el valor de este rendimiento.

Los resultados conseguidos se analizarán posteriormente en el análisis de resultados.

Además se ha empleado R para procesar los datos obtenidos en las simulaciones en Tonatiuh al no incorporar esta dicha función.

5.2 TONATIUH

Tonatiuh es un programa computacional libre que utiliza el método de trazado de rayos Montecarlo para simular el comportamiento óptico de los sistemas solares de concentración y proveer información detallada acerca de la distribución del flujo en las distintas superficies sobre las que incide la radiación solar.

Tonatiuh nace en el año 2004 pero desde 2006 es desarrollado por CENER.

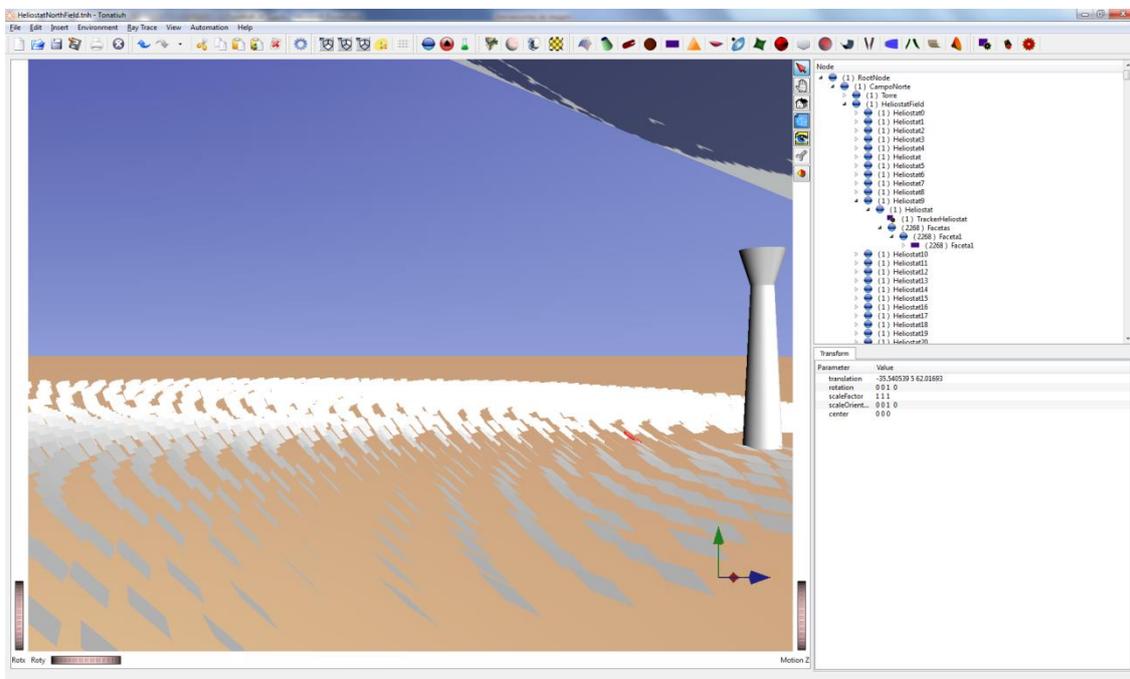


Ilustración 56: Tonatiuh

Permite la simulación de las tecnologías solares de concentración habituales y de diferentes materiales. Se pueden definir mediante barras de comandos o mediante script. En nuestro caso se ha hecho mediante script debido a la gran cantidad de heliostatos y concentradores secundarios que se debe poner. De esta forma se automatiza el proceso.

Otra característica del programa es la posibilidad de simular la radiación solar para cualquier lugar del mundo y a cualquier día y hora del día al permitir simular para cada azimut y cada elevación.

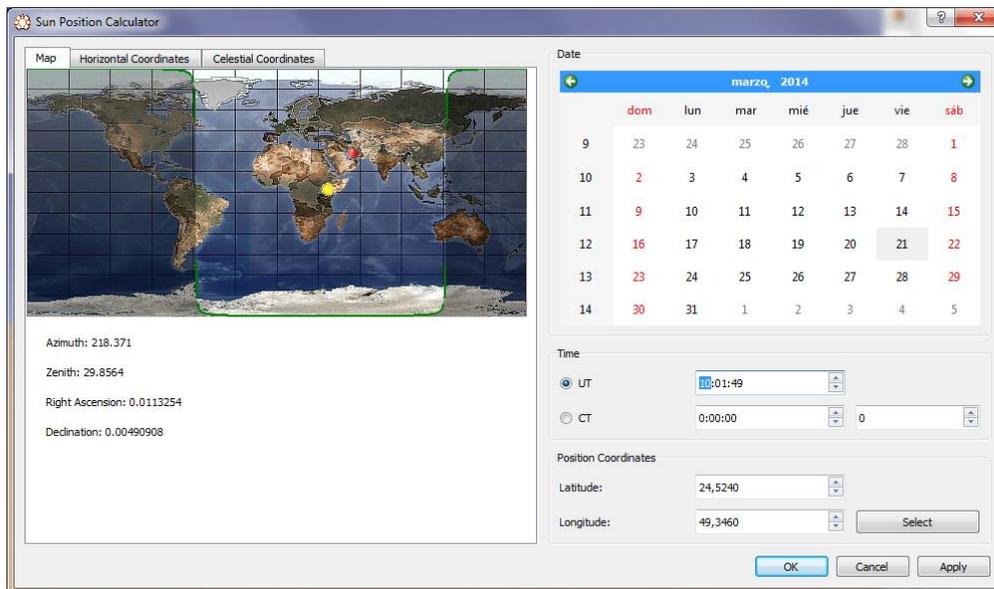


Ilustración 57: Calculador posición solar

Los rayos se generan en la superficie solar (calculada por Tonatiuh gracias a las coordenadas del azimut y elevación dadas) y recorren el sistema óptico. Los datos de las intersecciones que se producen con las superficies se almacenan en un mapa de fotones.

En este trabajo Tonatiuh ha sido utilizado para simular centrales de torre de diferentes características y comparar el uso de concentradores secundarios con el de un receptor cilíndrico externo. Los resultados de las simulaciones se han leído posteriormente con R y de ellos se ha hecho el análisis.

6. RESULTADOS

Primero se muestran los resultados obtenidos tras la programación en R y más tarde los que resultan de la simulación en Tonatiuh. Se ha hecho un análisis de ambos.

Los programas de mayor interés diseñados se incluyen en los anexos.

6.1 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS CONCENTRADORES SECUNDARIOS MEDIANTE PROGRAMACIÓN EN R

Hemos visto en el apartado 4 que los concentradores secundarios tienen una importante limitación. No admiten aquellos rayos cuyo ángulo de incidencia sea mayor que el semiángulo de aceptación de los reconcentradores. Este efecto ha sido cuantificado mediante programación en R. Se ha comparado para diferentes casos la eficiencia del uso de reconcentradores respecto a la ausencia de los mismos. Se ha analizado el valor de este rendimiento para diferentes formas de los receptores y para ciertos parámetros que intervienen en el diseño de la planta.

Se ha comenzado estudiando un caso plano para, más tarde, ir aumentando la complejidad con un caso tridimensional en el que el receptor es cilíndrico tal y como es en la realidad. Se ha analizado también un receptor esférico.

6.1.1 HIPÓTESIS CONSIDERADAS

Se han hecho un conjunto de hipótesis iniciales para la elaboración de los programas en R que se cumplen en todos ellos.

- El sistema considerado está formado por un receptor en lo alto de una torre y un heliostato.
- La radiación solar que llega al heliostato es perpendicular a él. Esto equivaldría a decir que estamos al mediodía (en el caso bidimensional: sol, heliostato y receptor en el mismo plano). En realidad para evaluar la eficiencia de los concentradores secundarios la posición solar no importa. Según donde esté el sol la potencia será mayor o menor por el efecto coseno y la irradiancia solar del momento pero la eficiencia del concentrador no cambia ya que los rayos siguen el mismo camino desde el heliostato hasta el receptor sin cambiar el ángulo de incidencia sobre el concentrador, es decir, la potencia se ve igualmente afectada con y sin reconcentradores.

- Se ha considerado que la radiación que incide sobre el heliostato no es reflejada por este de manera perfecta sino que debido a errores superficiales y de precisión del propio heliostato, y a que los rayos solares no son perfectamente paralelos, la refleja con cierto ángulo de error de valor máximo α .
- La radiación reflejada por el heliostato se ha supuesto uniforme, de modo que si en un caso tridimensional la radiación reflejada por el heliostato es cónica, para incrementos angulares $\Delta\beta$ iguales respecto al eje del cono tendremos a cada incremento la misma radiación. Esto no es como en la realidad ya que en la práctica se aproxima más a una distribución normal, como se ha hecho en Tonatiuh, pero de cara a hacer más sencilla la programación en R se ha aplicado esta distribución uniforme.
- Debido a esta radiación uniforme se ha realizado cada simulación mediante un barrido de los rayos desde el heliostato ya que es desde ahí de donde parte la radiación uniforme y no desde el receptor, donde a cada punto no llega la misma radiación.
- El cálculo del radio se ha realizado mediante el empleo de la tangente del máximo ángulo de error de los rayos reflejados por el heliostato. De este modo se asegura que para una determinada distancia entre receptor y heliostato todos los rayos lleguen al receptor y no se produzcan pérdidas por spillage. Otra forma de calcular el radio sería con el seno dando lugar a un receptor más pequeño en el que las pérdidas por radiación serían menores aunque en ángulos de error tan pequeños no hay diferencia. Cuando se han analizado varios casos a la vez hay que dejar el radio fijo, en este caso se ha tomado como radio el del caso más desfavorable.
- La eficiencia calculada en cada caso no es la eficiencia del sistema sino la eficiencia de los concentradores secundarios respecto a cuándo no hay dichos concentradores. Se considera que si no hay reconcentradores la eficiencia es del 100% mientras que cuando estos se introducen se pueden producir pérdidas ópticas que den lugar a una disminución en dicha eficiencia.
- Se considera que la transmisión de radiación en un concentrador es del 100% (eficiencia 1) cuando el semiángulo de aceptación supera al de incidencia y en caso contrario es 0. No se toma una variación que se produzca en un intervalo angular.

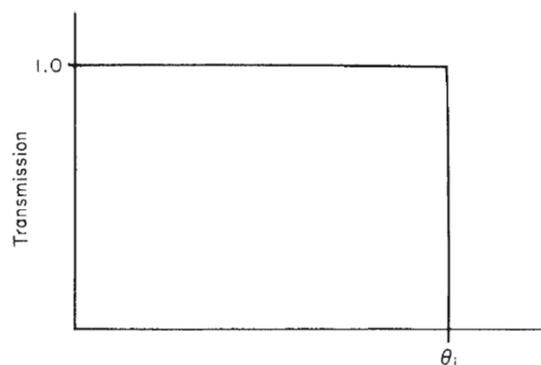


Ilustración 58: Transmisión según ángulo de incidencia [10]

- Se suponen infinitos concentradores secundarios.
- La radiación es reflejada por el heliostato desde su centro.
- En los modelos analizados (receptor plano, cilíndrico y esférico) se ha considerado que el eje del concentrador secundario coincide con el segmento que une el punto del receptor al que llega cada rayo en cuestión con el centro del receptor. En el caso de receptor plano circular el centro del receptor es el centro del círculo mientras que si el receptor es cilíndrico se toma como centro el punto del eje del cilindro que hace que el eje del concentrador sea horizontal. Se mostrará luego una ilustración para hacer esto más gráfico.

6.1.2 NOMENCLATURA

Se ha empleado el siguiente convenio de símbolos en los programas de R y que será el que se emplee para hacer referencia a estas magnitudes en el trabajo.

- α : Ángulo máximo de error en la radiación reflejada por el heliostato. Sería el ángulo entre el eje del cono de radiación y su generatriz.
- l : Ángulo de incidencia de cada rayo sobre el concentrador secundario al que llega. Es el que forman el rayo y el eje del concentrador.
- Acep: Semiángulo de aceptación de los concentradores secundarios.
- Dref: Distancia entre el heliostato y el centro de la torre. En un caso plano coincidirá con la distancia entre receptor y heliostato.
- R: Radio del receptor.
- β : Ángulo formado por cada rayo reflejado por el heliostato respecto a la normal del propio heliostato.
- γ : En el caso plano, ángulo formado por el segmento que une el heliostato y receptor y el segmento que une el centro del receptor y cada punto del receptor al que llega un rayo.
- ϵ : En el receptor cilíndrico ángulo formado por la proyección horizontal del segmento que une heliostato y receptor y el segmento horizontal que une el punto del receptor al que llega un rayo y el centro del receptor.

- H : Altura de la torre. En receptor cilíndrico se denomina altura a la que se produce en la intersección entre el eje de la torre y el eje del cono de radiación, es decir, no es la altura máxima de la torre como tal.
- δ : En el caso tridimensional es el ángulo de inclinación del segmento que une heliostato y receptor respecto al suelo. Esto es lo mismo que el ángulo de inclinación de la normal al heliostato.
- σ : Primer ángulo de barrido del cono de radiación.
- λ : Segundo ángulo de barrido del cono de radiación.
- x, y, z : Coordenadas del punto del receptor al que llega un rayo respecto al centro de la base de la torre.

Para hacer más sencilla la comprensión de los significados de estas magnitudes se incluirá un dibujo en sus respectivos apartados.

6.1.3 MODELO BIDIMENSIONAL

Se ha realizado un primer análisis de la eficiencia de los concentradores secundarios considerando ciertos valores para unos parámetros determinados. El modelo analizado con sus correspondientes parámetros es el mostrado en la siguiente figura.

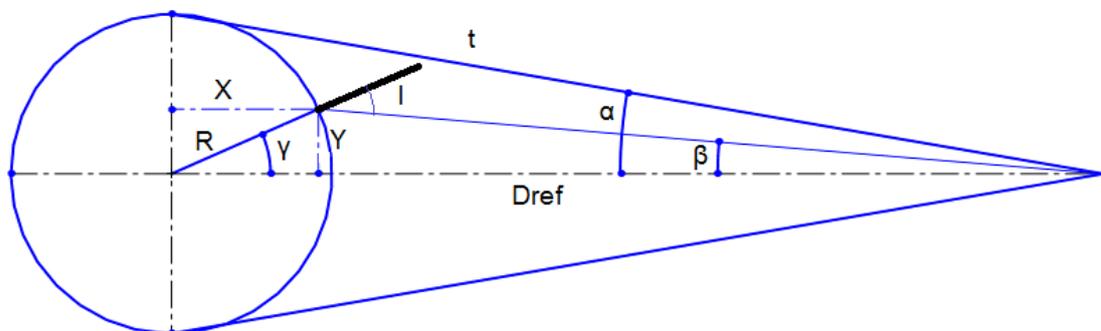


Ilustración 59: Esquema modelo 2D

Como hemos indicado el cálculo del radio se ha realizado mediante la tangente de la siguiente manera:

$$R = D_{ref} \times \tan \alpha \quad (6.1.1)$$

Este radio es el que asegura que llegue toda la radiación reflejada por el heliostato hasta el receptor cuando el receptor es cilíndrico externo, es decir, cuando no hay concentradores. De este modo se le puede asignar eficiencia 1 a este caso y se calcula el mismo modelo cuando hay reconcentradores para calcular la eficiencia de los mismos.

Aunque se pueda emplear el seno en lugar de la tangente, la diferencia teniendo en cuenta el orden de magnitud de los valores de ángulos y distancias no va a ser apreciable. En cualquier caso hacerlo con la tangente permite un radio algo mayor que será más efectivo para una distribución normal de la radiación.

Se quiere calcular el ángulo de incidencia de cada rayo (i) sobre el receptor para lo cual se analiza la situación para cada ángulo $\beta(i)$ de manera que se realiza un barrido entre los 0 grados y el ángulo α de modo que solo se evalúe la radiación reflejada por el heliostato.

Para poder calcular el ángulo de incidencia se hará necesario calcular el ángulo $\gamma(i)$ que tengamos para cada $\beta(i)$. Para ello se debe calcular la longitud de cada rayo producida a cierto $\beta(i)$ para la cual se produce la intersección entre el mismo y el receptor. Denominamos a esta longitud del rayo como $t(i)$. A esta longitud se dará una coordenada 'x(i)' y una coordenada 'y(i)' cartesianas que dan lugar a ese punto del receptor en el que se producirá la intersección. Emplearemos esto tanto para el caso plano como para el de receptor esférico.

$$x = D_{ref} - t \times \cos \beta \quad (6.1.2)$$

$$y = t \times \sin \beta \quad (6.1.3)$$

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (6.1.4)$$

$$(D_{ref} - t \times \cos \beta)^2 + (t \times \sin \beta)^2 = r^2 \quad (6.1.5)$$

Si despejamos esta distancia t:

$$t = D_{ref} \times \cos \beta - \sqrt{D_{ref}^2 \times \cos^2 \beta - D_{ref}^2 + r^2} \quad (6.1.6)$$

La raíz tiene signo negativo ya que matemáticamente el rayo corta al receptor en dos puntos al ser una circunferencia pero en la realidad solo lo hace en uno, y este es al que el rayo llega, es decir, el más cercano. Por ello se escoge la distancia más pequeña.

Además lo que aparece dentro de la raíz nunca va a ser negativo al ser $R = \tan \alpha$ por lo que como poco será 0 y no habrá problemas de solución.

Si empleamos la siguiente ecuación:

$$t \times \sin \beta = r \times \sin \gamma \quad (6.1.7)$$

Introduciendo el valor de 't' obtenido podemos despejar el valor de γ por lo que ya podríamos calcular el ángulo de incidencia.

$$\gamma = \sin^{-1} \left(\frac{D_{ref} \times \cos \beta - \sqrt{D_{ref}^2 \times \cos^2 \beta - D_{ref}^2 + r^2}}{r} \times \sin \beta \right) \quad (6.1.8)$$

El ángulo de incidencia de cada rayo será el compuesto por la suma de sus ángulos β y γ . Como antes hemos visto este ángulo ha de ser menor que el semiángulo de aceptación para conseguir que dicha radiación llegue al receptor, en caso contrario no lo hará.

$$I = \beta + \gamma \quad (6.1.9)$$

Por lo tanto, se ha evaluado para todos los ángulos β hasta α el ángulo de incidencia realizando los cálculos convenientes y en caso de que fuese menor que el semiángulo de aceptación se ha considerado una eficiencia igual a 1 y en el caso opuesto una eficiencia igual a 0. Debido a la simetría basta con hacer el barrido hasta el ángulo α .

El cálculo de la eficiencia consiste en hacer la media de las eficiencias de todos los rayos. Es decir la suma de todas las eficiencias 0 y 1 divididos entre el número de rayos simulados.

Otra manera de calcular la eficiencia es igualando la suma de estos dos ángulos β y γ (ya que conocemos la relación entre ellos) al de aceptación en una ecuación y calculando la incógnita que será el beta límite para el que la aceptación es mayor que la suma de ambos ángulos. Posteriormente se puede dividir este gamma límite entre α para calcular la eficiencia global del nuevo sistema.

Se ha realizado un primer ejemplo con parámetros fijos para calcular la eficiencia. El programa se incluye en el primer anexo. Los datos elegidos son los siguientes:

- Dref = 100 metros.
- Semiángulo de aceptación = 32 grados
- Ángulo α debido a los errores del heliostato = 4.65 miliradianes.

La eficiencia obtenida tras ejecutar el programa en R respecto al caso de no haber concentradores secundarios ha sido del 53%.

Como vemos la eficiencia no es buena. Habría que aumentar el radio para que mejorase la eficiencia pero ya hemos visto que esto no es positivo porque disminuye la concentración y no se alcanzan las temperaturas requeridas.

Para ver cómo afecta cada parámetro a la eficiencia se ha elaborado un programa en el que se calcula la eficiencia para variaciones de cada uno de los parámetros (D_{ref} , α y α). Esto permite ver la importancia de cada uno de ellos.

Primero vamos a analizar el ángulo α . Se realiza un programa en R (anexo 2) en el que para una distancia al receptor y ángulo de aceptación se ve la influencia de un aumento del ángulo α . Se toma un radio fijo de 0.8 metros ya que este es el suficiente para que no haya spillage en el caso más desfavorable, es decir, cuando α es 8 miliradianes, y así ver solo las pérdidas por el ángulo de aceptación, que son las que se añaden por introducir reconcentradores.

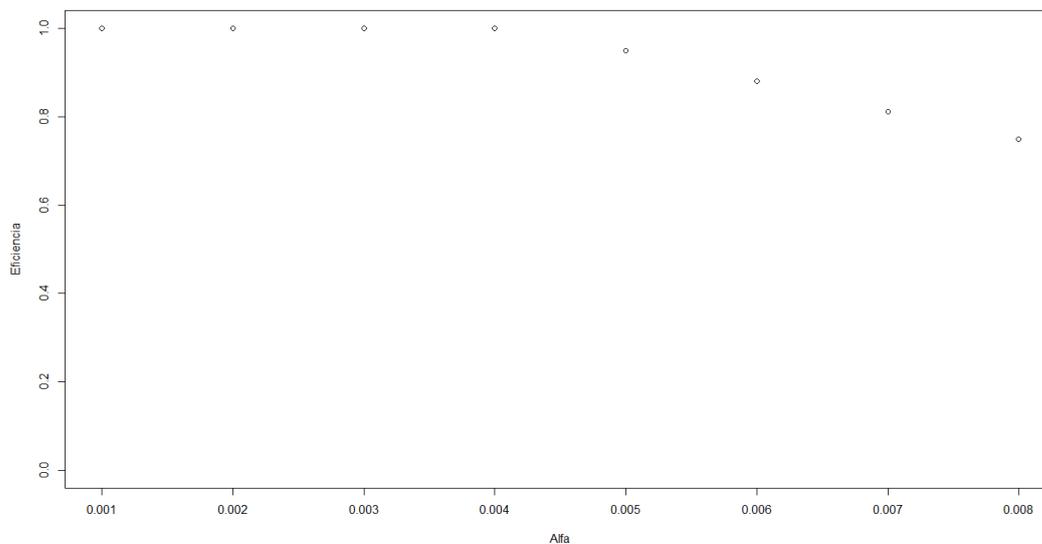


Ilustración 60: Eficiencia según α en caso 2D

Vemos que conforme aumenta el ángulo de error de la radiación reflejada por el heliostato la eficiencia disminuirá ya que estamos haciendo que los ángulos de incidencia sean mayores y por lo tanto haya más radiación que sea rechazada por los concentradores secundarios. A todo esto habría que añadir que aquí estamos considerando un receptor al que llega toda la radiación (estaría sobredimensionado cuando α es bajo) pero podría darse el caso de que al aumentar α se produzcan además pérdidas por spillage por lo que será un factor muy a tener en cuenta.

Se puede concluir por tanto que resulta fundamental controlar los errores del heliostato, más aún si hay concentradores secundarios ya que un mal control puede reportar aumentos significativos en el área y por lo tanto una peor concentración y mayores pérdidas térmicas.

Se analiza también en el caso plano que ocurre cuando cambia Dref y el semiángulo de aceptación (Anexo 3). Se aumenta progresivamente Dref y acep y se recogen los valores en una matriz. Se ha hecho lo mismo para el receptor cilíndrico y al ser este más próximo a la realidad será el caso que se analice más detenimiento y del que se recogen los valores.

A pesar de ello sirve como primera aproximación a la influencia que ejercen estos parámetros. Para ello se ha considerado un radio fijo para el que no hubiese pérdidas por spillage en ninguno de los casos analizados. Es decir el radio será el que tengamos cuando Dref es máximo. Este radio será de 14 metros.

La variación de la eficiencia para un radio y semiángulo de aceptación fijos se puede ver en la siguiente gráfica.

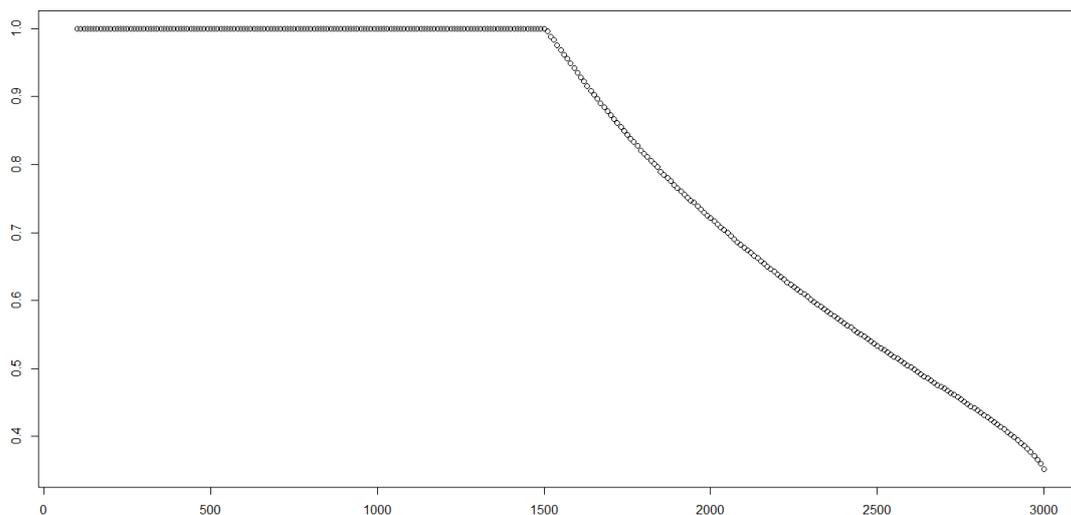


Ilustración 61: Eficiencia según Dref cuando el semiángulo de aceptación es 30° en un caso 2D

Vemos como la eficiencia disminuye si aumentamos Dref ya que ahora estarán llegando los rayos a una zona más amplia del receptor y también más alejados del eje que une el centro del receptor con el heliostato. De esta manera el ángulo de incidencia será mayor al incrementarse Dref y por lo tanto la eficiencia bajará. Asimismo existirán otros fenómenos negativos si aumentamos la Dref ya que estamos haciendo que la atenuación atmosférica sea mayor y también estamos provocando o bien un aumento del receptor como en este caso con el aumento de las pérdidas térmicas y disminución de la temperatura que ello conlleva o bien que crezca la radiación que se pierde debido al spillage.

Por su parte podemos ver en la siguiente ilustración como es modificada la eficiencia para un radio y Dref fijos cuando varía el semiángulo de aceptación.

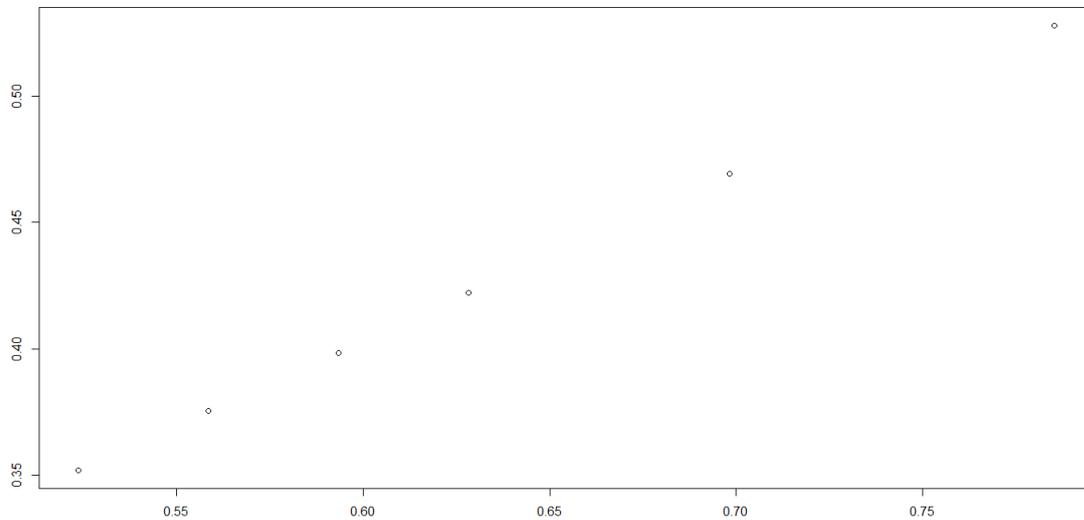


Ilustración 62: Eficiencia según el semiángulo de aceptación cuando Dref es 3000 en un caso bidimensional

Por otro lado también podemos ver cómo cuanto mayor es el ángulo de aceptación la eficiencia será mayor ya que para cierto ángulo de incidencia dado cuanto mayor es el ángulo de aceptación mayores serán las probabilidades de que lleguen al receptor. Sin embargo también hay inconvenientes ya que estaremos haciendo que la concentración con la que llegan los rayos al receptor sea menor y por lo tanto se consigan unas temperaturas menores y unas mayores pérdidas térmicas.

De cualquier modo radio, Dref, accep y α están estrechamente relacionados y la importancia de la variación de uno de estos parámetros dependerá en gran medida del rango de valores en los que nos encontremos en todos ellos y de las características de la central de torre en cuestión. Asimismo en un caso tridimensional se introducen nuevos efectos que se verán en los siguientes apartados.

6.1.4 MODELO TRIDIMENSIONAL – RECEPTOR CILÍNDRICO

Una vez hemos visto la influencia que los distintos parámetros ejercen sobre la central de torre se ha desarrollado un modelo tridimensional en el que podamos ajustar los programas a la realidad. El receptor se ha supuesto cilíndrico ya que es el más habitual y con el que se han hecho las simulaciones de Tonatiuh.

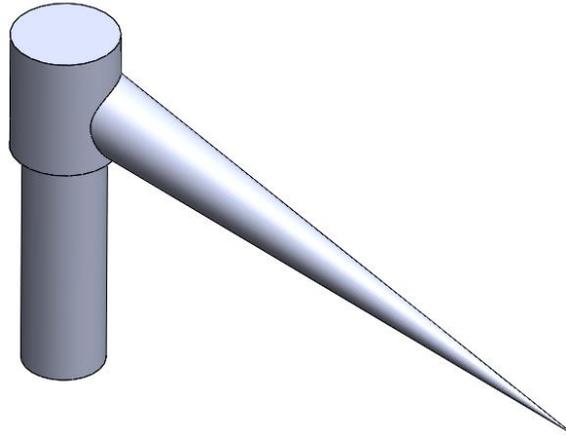


Ilustración 63: Intersección del cono de radiación con un receptor cilíndrico

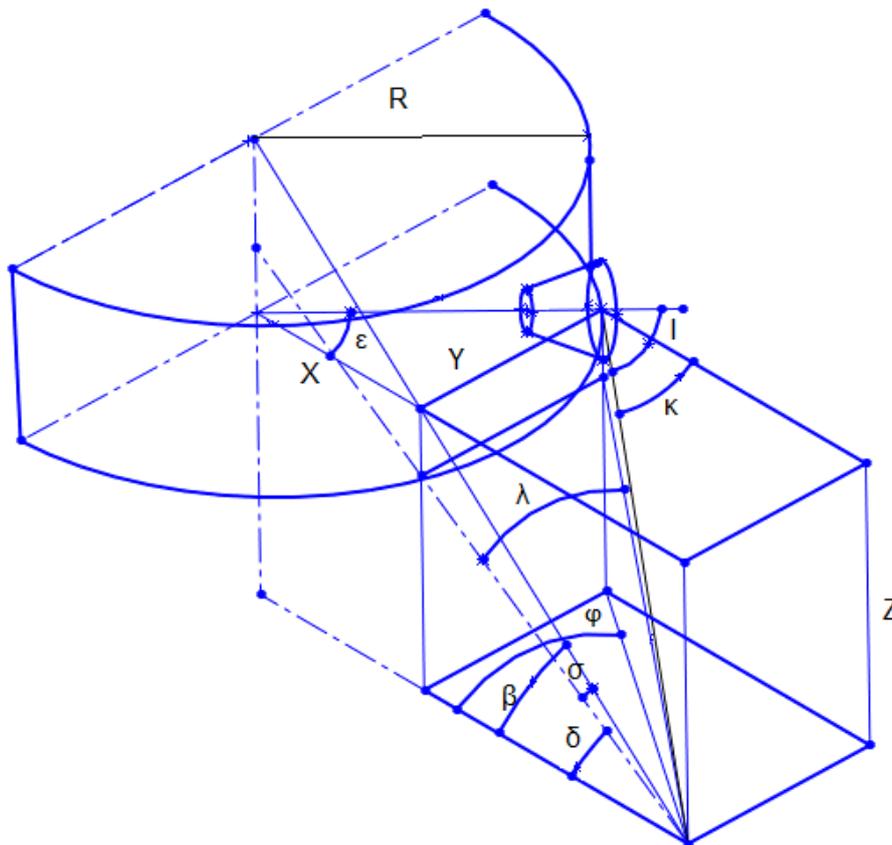


Ilustración 64: Esquema del receptor cilíndrico para la simulación en R

Se tiene ahora en lo alto de la torre un receptor cilíndrico al que llega la radiación de un heliostato inclinado dando lugar a un cono que intersectará con dicho cilindro de manera oblicua. Esta oblicuidad complica severamente la resolución de la intersección entre ambos cuerpos.

Los concentradores secundarios se ha considerado que tienen sus ejes paralelos al suelo y que la dirección de estos va desde el eje del receptor hasta el punto del receptor al que llega cada rayo en cuestión.

La altura del receptor es la de la intersección de los ejes del cono y cilindro. Esta será la altura que definamos como parámetro pero la altura total de la torre va a ser más. También es la altura del aiming point ya que se coge este punto por mayor sencillez en el cálculo.

$$H = Dref \times \tan \delta \quad (6.1.10)$$

$$R = \sqrt{H^2 + Dref^2} \times \tan \alpha \quad (6.1.11)$$

Por simetría solo se analiza la mitad del cono que resulta si se parte con un plano vertical.

A la hora de hacer el barrido del cono se emplean dos ángulos que se pueden ver en la ilustración. Por un lado tenemos el ángulo σ que es el que forman el eje del cono con la proyección de cada rayo en el plano vertical que pasa por el eje del cono. Deberá ir desde $-\alpha$ hasta α ya que en este caso no hay simetría ya que el cono está inclinado respecto al cilindro. Por otro lado, tenemos el ángulo λ es el que forma horizontalmente cada rayo con el eje del cono. Este ángulo no es respecto el suelo sino respecto del eje. Se define su límite de modo que la radiación forme un cono. (Ilustración 64).

$$\lambda \text{ máxima} = \sqrt{\alpha^2 - \sigma^2} \quad (6.1.12)$$

A partir de estos dos ángulos se pueden calcular los ángulos β y φ . El primero es el ángulo que forma cada rayo con el suelo en el plano vertical en el que está el eje del cono. El segundo es el que forman en el suelo las proyecciones en el suelo del rayo y del eje del cono. Se deducen las siguientes ecuaciones:

$$\beta = \delta + \sigma \quad (6.1.13)$$

$$\varphi = \tan^{-1} (\tan \lambda / \cos \delta) \quad (6.1.14)$$

Asimismo podemos deducir las siguientes ecuaciones que nos ayudan a resolver el sistema:

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (6.1.15)$$

$$\tan \varphi \times (Dref - x) = y \quad (6.1.16)$$

Tenemos por lo tanto 4 ecuaciones (6.1.13, 14, 15 y 16) para 4 incógnitas (x , y , β y φ). Podemos despejar el valor de x sustituyendo la 16 en la 15.

$$x = \frac{Dref \times (\tan \varphi)^2 + \sqrt{R^2 \times (1 + (\tan \varphi)^2) - (Dref^2 \times (\tan \varphi)^2)}}{1 + (\tan \varphi)^2} \quad (6.1.17)$$

$$y = \sqrt{R^2 - x^2} \quad (6.1.18)$$

Con estas dos magnitudes calculamos el ángulo ε :

$$\varepsilon = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (6.1.19)$$

Obteniendo los valores de estas incógnitas se puede calcular el ángulo κ . Este es el formado por cada rayo con la paralela a la línea que une la base de la torre y el heliostato. Primero hace falta hallar las expresiones a partir de la cual obtenerla:

$$z = (Dref - x) \times \tan \beta \quad (6.1.20)$$

Sustituyendo los valores de x , y , z que conocemos gracias a las 4 ecuaciones que se habían obtenido previamente y a la 6.1.20 sacamos la expresión del ángulo κ :

$$\kappa = \tan^{-1} \frac{\sqrt{y^2 + z^2}}{Dref - x} \quad (6.1.21)$$

Conociendo los ángulos κ y ε podemos saber ya el ángulo de incidencia. Necesitamos saber la distancia L de la siguiente ilustración.

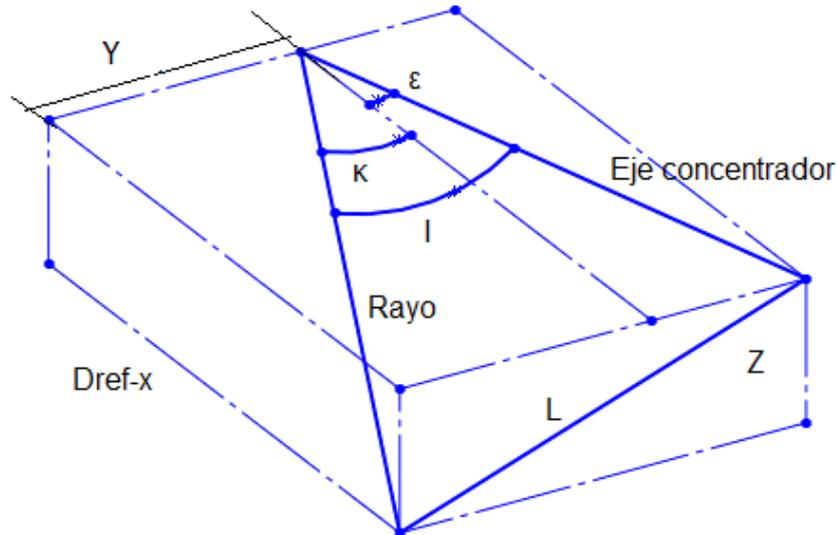


Ilustración 65: Cálculo ángulo incidencia receptor cilíndrico

$$l = \sqrt{z^2 + (y + (\tan \varepsilon) \times (Dref - x))^2} \quad (6.1.22)$$

Para hallar el ángulo de incidencia vemos que tenemos un triángulo del que conocemos sus tres lados pero no los ángulos. Empleando la expresión que permite resolver los ángulos en este caso podemos calcular el ángulo de incidencia sustituyendo los valores de los lados que son conocidos gracias a su resolución con las ecuaciones realizadas.

$$I = \cos^{-1} \frac{\left(\frac{Dref - x}{\cos \varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{Dref - x}{\cos \kappa}\right)^2 - l^2}{2 \times \frac{(Dref - x)^2}{\cos \varepsilon \times \cos \kappa}} \quad (6.1.23)$$

Se ha distinguido el caso en el que ε es 0 ya que en dicho caso la anterior ecuación no es resoluble. Cuando ε es 0 el ángulo de incidencia es igual a β .

Cuando el ángulo de incidencia sea menor que el semiángulo de aceptación la radiación llegará al receptor y la eficiencia será 1, en caso contrario será 0. Al igual que en el caso plano se hace la media de todas las eficiencias para calcular la eficiencia total de los concentradores respecto a cuándo no los hay.

El programa que recoge estas ecuaciones y que nos posibilita calcular la eficiencia para unos datos determinados se encuentra en el anexo 4. Además se ha hecho nuevamente la resolución de la eficiencia para la variación de determinados parámetros. El anexo 5 muestra el programa en R mientras que el anexo 6 recoge los resultados.

Se ha evaluado la eficiencia para diferentes alturas (60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200), distancias a la torre en función del radio (r , $25r$, $50r$, $75r$, $100r$, $125r$, $150r$, $175r$ y $200r$), ángulo de error α (1, 2, 3, 4 y 5 miliradianes) y semiángulos de aceptación (30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48 y 50). El radio se ha tomado fijo de 4 metros al ser suficiente para que no hubiese spillage y ser el radio del caso estándar simulado en Tonatiuh.

El único caso en el que se produce spillage es cuando D_{ref} es $200r$ y α es 5 miliradianes. Para tener en cuenta las pérdidas por spillage se ha hecho otro programa en el que cuando λ supere el λ máximo para el que no se produzca spillage, la eficiencia sea 0. También hay problemas de resolución cuando D_{ref} es igual a r al no ser la ecuación 6.1.23 resoluble. κ es igual entonces a β . En este caso siempre va a ser eficiencia 0.

Análisis de resultados

Los resultados obtenidos son suficientes como para extraer algunas conclusiones acerca de las consecuencias de la introducción de concentradores secundarios.

Una de las valoraciones más interesantes es cómo afectan los reconcentradores al lay-out del campo de heliostatos. Vemos como para distancias cortas a la torre la eficiencia es 0. Este efecto se acentúa cuanto más alta sea la torre. Esto se debe a que cuando estamos cerca de la torre el ángulo de incidencia es muy alto. Este valor tan alto no se debe aquí al ángulo de error α sino a lo que hemos llamado ángulo δ (nomenclatura páginas 62 y 63). Al estar los heliostatos cerca de la torre tienen que tener una gran inclinación hacia el receptor y entonces este ángulo δ hace que el ángulo de incidencia sea elevado y supere al semiángulo de aceptación haciendo que los rayos sean rechazados. Si la torre se hace más alta la distancia a partir de la cual comienza a llegar radiación se incrementará, sin embargo, no se puede poner una torre baja porque entonces habrá grandes pérdidas por bloqueos y sombras

Por lo tanto una primera conclusión es el gran poder de influencia de los concentradores secundarios sobre el diseño de la torre y el lay-out del campo de heliostatos. Podemos ver que no tiene sentido poner heliostatos muy cercanos a la torre si el receptor es cilíndrico ya que no van a servir de nada por lo que esto ya implica cambios en la distribución espacial.

Si continuamos desplazándonos cada vez más lejos de la torre vemos que una vez el ángulo δ pasa a ser menor que el semiángulo de aceptación la eficiencia sube hasta alcanzar un máximo. A partir de ese momento comienza de nuevo lentamente la eficiencia a bajar conforme nos situamos más lejos del receptor. Esto se debe a que a cuanto mayor distancia estemos, el cono de radiación de los heliostatos es mayor y cuando llega al receptor los ángulos de incidencia serán mayores debido a que el rayo se ha separado más de su eje. Al ser el ángulo de incidencia mayor habrá cada vez más casos en los que la radiación sea rechazada por superar al semiángulo de aceptación.

Además al aumentar D_{ref} se producen otros efectos. Hay una mayor atenuación atmosférica y los heliostatos deberán estar más separados ya que ahora δ es más bajo y se pueden producir pérdidas por bloqueos y sombras.

Respecto al ángulo de aceptación, como es previsible, la eficiencia será mayor si el ángulo de aceptación sube. Esto es positivo para la eficiencia pero no para la concentración, que es el objetivo de implantar reconcentradores. Se hará necesario optimizar el ángulo de aceptación para que se llegue a un equilibrio entre la concentración y la eficiencia óptica.

En lo relativo al ángulo de error α se puede comprobar la gran transcendencia de su control ya que cuanto más significativo sea este la eficiencia será peor. Si α es alto el cono formado es mayor. Esto conlleva que haya que aumentar el radio, es decir, el área y, por ello, las pérdidas térmicas. Este es un parámetro que no permite dudas acerca de su valor idóneo. Cuanto menor sea mejor.

En cualquier caso vemos que el aspecto de mayor significancia es la eficiencia nula a distancias cortas. Esto supone un gran problema ya que son filas que dan bastante potencia y la pérdida que ello supone es alta. Una alternativa sería inclinar los reconcentradores hacia el campo de heliostatos. Habría que optimizar este ángulo de inclinación pero en cualquier caso se impediría utilizar un receptor cilíndrico por motivos geométricos, deberían ser planos.

Para el resto del campo de heliostatos si se calculase el radio suficiente para que no haya spillage en las últimas filas vemos como la eficiencia es superior al 90% a la mayor parte de las distancias. Habría que evaluar si los beneficios térmicos conseguidos son los suficientes para compensar la pérdida de potencia que llega al receptor.

Si queremos que la potencia que llegue sea la misma que cuando no hay concentradores secundarios habrá que hallar el incremento de radio que disminuya los ángulos de incidencia lo necesario para que la eficiencia sea 1 para todos los casos. En el apartado 6.1.6 se ha realizado el programa que muestra este radio y se ha estudiado lo que ello implica.

6.1.5 MODELO TRIDIMENSIONAL – RECEPTOR ESFÉRICO

Se ha estudiado también la eficiencia en un receptor esférico para analizar efectos como el ángulo de inclinación del reconcentrador.

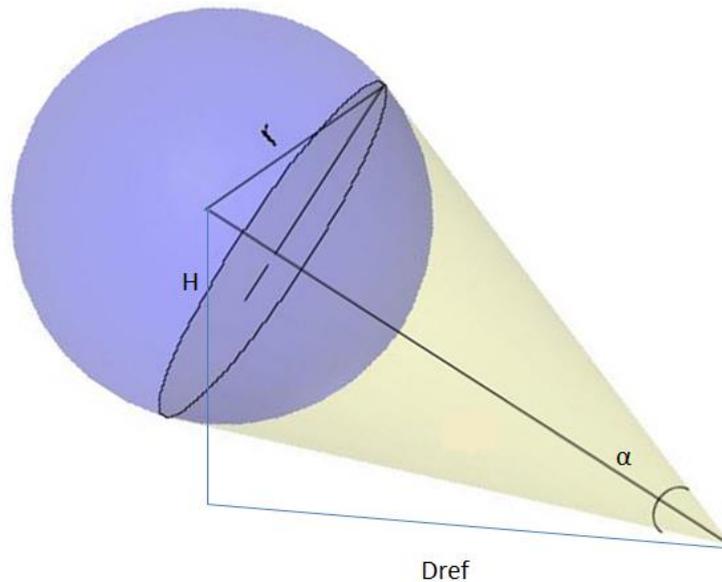


Ilustración 66: Esquema para R de receptor esférico

Ahora por simetría vale con hacer una cuarta parte del cono. Se emplean dos ángulos para hacer el barrido (σ y λ). Cada rayo forma un ángulo β con el eje del cono. Para rayos con ángulos iguales la eficiencia es la misma. Según aumenta este ángulo la probabilidad de que sea rechazado se incrementa. Al considerar distribución uniforme será mayor la radiación que tenga un ángulo alto respecto al eje.

$$r = \tan \alpha \times \sqrt{H^2 + Dref^2} \quad (6.1.24)$$

$$\sigma_{\text{máximo}} = \sqrt{\alpha^2 - \lambda^2} \quad (6.1.25)$$

$$\beta = \sin^{-1} \sqrt{(\sin \sigma)^2 + (\sin \lambda)^2 \times (\cos \sigma)^2} \quad (6.1.26)$$

La orientación de cada concentrador secundario se ha considerado como hasta ahora. El eje de cada concentrador secundario coincidirá con el segmento que une el centro del receptor con el punto del receptor que estemos considerando a cada instante. El ángulo γ se calcula con la misma fórmula que en el caso bidimensional.

Las consecuencias de variar los parámetros son las mismas que en el receptor cilíndrico aunque ahora, al estar los reconcentradores inclinados hacia el campo de heliostatos, en distancias cortas sí que llega la radiación al receptor. Esta inclinación hacia el campo se ha estudiado en Tonatiuh. Sin embargo un receptor esférico no es útil con reconcentradores ya que en puntos alejados del eje del cono, la dirección de los concentradores secundarios hace que el ángulo de incidencia suba de manera importante.

La ilustración 67 muestra como es la radiación barrida. Cada punto es un rayo. Vemos la sección resultante de cortar el un cuarto de cono (por simetría) perpendicularmente a su eje. Se aprecia que esta radiación se ha supuesto uniforme.

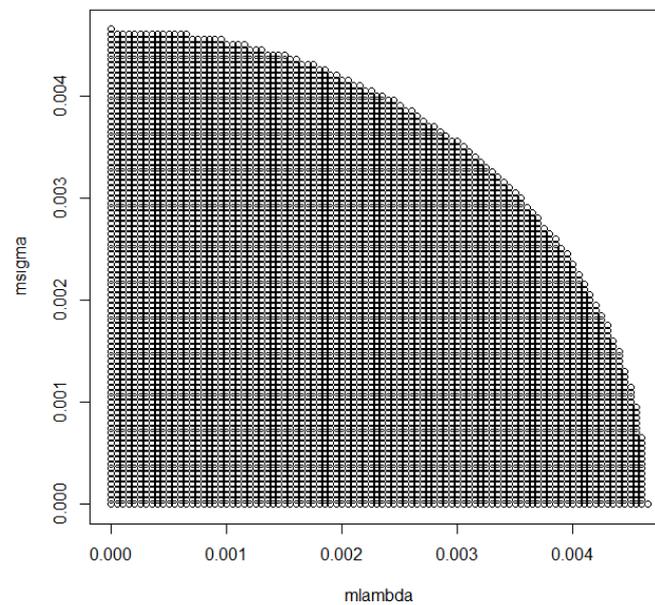


Ilustración 67: Radiación uniforme tomada en R

6.1.6. CÁLCULO DEL RADIO NECESARIO EN UN RECEPTOR CILÍNDRICO CON CONCENTRADORES SECUNDARIOS PARA TENER LA MISMA EFICIENCIA ÓPTICA QUE EN UN RECEPTOR QUE NO LOS TIENE

El objetivo de este ejercicio es comparar la ganancia en concentración producida cuando hay concentradores secundarios debido a su razón de concentración geométrica respecto al aumento de radio que se tiene que dar para que no haya pérdidas de potencia.

Como se ha comentado en el apartado de concentradores secundarios una mayor concentración supone una reducción del área y con ello un aumento de la temperatura y la reducción de las pérdidas térmicas. Sin embargo durante la simulación con R se ha visto también que hay que aumentar el radio del receptor para que no se produzcan pérdidas ópticas por el semiángulo de aceptación.

Mediante este ejercicio se ha pretendido saber si los beneficios en concentración compensan el aumento de radio que se produce ya que si el área total del receptor sube en mayor proporción a la concentración tendremos una mayor cantidad de área donde se producen pérdidas por radiación y una menor temperatura.

Se ha desarrollado un nuevo programa en R (Anexo 8) que nos dice el factor por el que se debe multiplicar el radio para ciertos parámetros del sistema. Se comparará este factor, al que se ha llamado 't', con la concentración. Recordamos que la concentración es igual a la inversa del cuadrado del semiángulo de aceptación.

Se ha evaluado el valor de 't' y la concentración para tres Dref distintas (3000, 400 y 150 metros), un ángulo α de 0.005 y un semiángulo de aceptación que varía desde 30 hasta 90 en incrementos de 2 grados. La altura se ha tomado de 120 metros.

El valor 't' es independiente de Dref y del ángulo α ya que el radio depende de ellos, sin embargo, el valor del radio necesario sí será menor cuanto más pequeño sea Dref y cuanto más pequeño es el ángulo α . En distancias cortas a la torre se va a ver como Dref influye sobre el valor que va a tener 't'. Recordamos las expresiones antes vistas del valor del radio y de la concentración en un modelo tridimensional:

$$R = \tan \alpha \times \sqrt{H^2 + D_{ref}^2}$$

$$Concentración = \frac{1}{\text{sen}(\text{semiángulo de aceptación})^2}$$

Datos
 α : 0,005
 Dref: 3000
 Denominamos 't' al valor por el que se ha de multiplicar el radio para tener eficiencia 1

Semiángulo de aceptación (°)	Concentración	t	Comparación: Aumento de concentración conseguido
30	4.000	2.005	1.995
32	3.561	1.891	1.883
34	3.198	1.792	1.785
36	2.894	1.704	1.699
38	2.638	1.627	1.622
40	2.420	1.558	1.553
42	2.233	1.496	1.493
44	2.072	1.441	1.438
46	1.933	1.392	1.388
48	1.811	1.347	1.344
50	1.704	1.307	1.304
52	1.610	1.270	1.268
54	1.528	1.237	1.235
56	1.455	1.207	1.205
58	1.390	1.180	1.178
60	1.333	1.155	1.154
62	1.283	1.133	1.132
64	1.238	1.113	1.112
66	1.198	1.095	1.094
68	1.163	1.079	1.078
70	1.132	1.065	1.063
72	1.106	1.052	1.051
74	1.082	1.041	1.040
76	1.062	1.031	1.030
78	1.045	1.023	1.022
80	1.031	1.016	1.015
82	1.020	1.010	1.010
84	1.011	1.006	1.005
86	1.005	1.003	1.002
88	1.001	1.001	1.000
90	1.000	1.000	1.000

Tabla 5: Incremento radio necesario para eficiencia 1 cuando Dref es 3000 y α es 0.005

Datos
 α : 0,005
 Dref: 400
 Denominamos 't' al valor por el que se ha de multiplicar el radio para tener eficiencia 1

Semiángulo de aceptación (°)	Concentración	t	Comparación: Aumento de concentración conseguido
30	4.000	2.341	1.709
32	3.561	2.152	1.655
34	3.198	1.997	1.601
36	2.894	1.868	1.549
38	2.638	1.760	1.499
40	2.420	1.666	1.453
42	2.233	1.586	1.408
44	2.072	1.515	1.368
46	1.933	1.453	1.330
48	1.811	1.398	1.295
50	1.704	1.349	1.263
52	1.610	1.306	1.233
54	1.528	1.267	1.206
56	1.455	1.232	1.181
58	1.390	1.201	1.158
60	1.333	1.173	1.137
62	1.283	1.148	1.117
64	1.238	1.125	1.100
66	1.198	1.105	1.084
68	1.163	1.087	1.070
70	1.132	1.071	1.057
72	1.106	1.057	1.046
74	1.082	1.045	1.036
76	1.062	1.034	1.027
78	1.045	1.025	1.020
80	1.031	1.017	1.014
82	1.020	1.011	1.009
84	1.011	1.006	1.005
86	1.005	1.003	1.002
88	1.001	1.001	1.000
90	1.000	1.000	1.000

Tabla 6: Incremento radio necesario para eficiencia 1 cuando Dref es 400 y α es 0.005

Datos
 α : 0,005
 Dref: 150
 Denominamos 't' al valor por el que se ha de multiplicar el radio para tener eficiencia 1

Semiángulo de aceptación (°)	Concentración	t	Comparación: Aumento de concentración conseguido
30	4.000	∞	0.000
32	3.561	∞	0.000
34	3.198	∞	0.000
36	2.894	∞	0.000
38	2.638	∞	0.000
40	2.420	5.179	0.467
42	2.233	3.257	0.686
44	2.072	2.571	0.806
46	1.933	2.190	0.882
48	1.811	1.940	0.933
50	1.704	1.762	0.967
52	1.610	1.626	0.990
54	1.528	1.519	1.006
56	1.455	1.433	1.015
58	1.390	1.362	1.021
60	1.333	1.302	1.024
62	1.283	1.252	1.025
64	1.238	1.209	1.024
66	1.198	1.172	1.022
68	1.163	1.140	1.020
70	1.132	1.113	1.017
72	1.106	1.089	1.015
74	1.082	1.069	1.012
76	1.062	1.052	1.010
78	1.045	1.038	1.007
80	1.031	1.026	1.005
82	1.020	1.017	1.003
84	1.011	1.010	1.001
86	1.005	1.004	1.001
88	1.001	1.001	1.000
90	1.000	1.000	1.000

Tabla 7: Incremento radio necesario para eficiencia 1 cuando Dref es 150 y α es 0.005

Los resultados muestran hechos de gran interés. En la tabla 5 vemos como para cada semiángulo de aceptación la razón de concentración de los reconcentradores es igual al cuadrado del valor del parámetro 't' por el que hay que multiplicar el radio. Esto quiere decir que la reducción de área del receptor consecuencia de la introducción de reconcentradores es mayor que el aumento de radio del que hay que dotar al receptor para que no se pierdan rayos por un ángulo de incidencia mayor al de aceptación. Por lo tanto, la mejora real de la concentración al implantar concentradores secundarios es igual al valor del cociente de 1 entre el semiángulo de aceptación. Cuanto menor sea el semiángulo de aceptación mayor será el beneficio en concentración conseguido.

De la deducción anterior podríamos concluir que cuanto menor sea el ángulo de aceptación mejor funcionará la instalación pero esto no es así. Esto lo comenzamos a ver en la tabla 6 donde Dref es 400 metros. En este caso, para semiángulos de aceptación pequeños el valor de 't' comienza a incrementarse. Esto hace que la disminución de área ya no sea tan evidente. Este efecto es consecuencia del mayor ángulo de inclinación del heliostato hacia la torre, con el incremento de los ángulos de incidencia que ello significa.

Si nos acercamos cada vez más a la torre, con Dref 150 metros en la tabla 7, comprobamos como para los semiángulos de aceptación más pequeños el radio deberá ser infinito para que llegase toda la radiación al receptor. Por lo tanto, como ya habíamos intuido en la sección 6.1.4, definitivamente no tiene sentido colocar heliostatos tan cercanos a la torre si el receptor es cilíndrico.

Por ello, a lo largo del campo de heliostatos, según cual sea el valor de Dref y del semiángulo de aceptación, los concentradores secundarios podrán conseguir reducir el área del receptor o no.

En cualquier caso los concentradores secundarios podrán tener grandes beneficios en concentración ya que los valores de concentración que introducen son muy altos. Sin embargo para evitar que para un radio determinado del receptor se produzcan pérdidas ópticas se hará obligatorio un buen diseño de los reconcentradores y de la distribución del campo de heliostatos.

Otra modificación producida a tener en cuenta es que la potencia llegará a cierta área (menor si el diseño es bueno) pero no lo hará del mismo modo que antes por la óptica de los reconcentradores. El flujo térmico habrá cambiado su perfil. Por ello se han realizado simulaciones en Tonatiuh para conocer los cambios que se producen en el aspecto térmico y saber si son positivos o no.

Este programa se ha utilizado posteriormente al simular con Tonatiuh para saber el radio del receptor que se debe tener al añadir concentradores secundarios.

6.2 SIMULACIONES EN TONATIUH

Se ha empleado el software Tonatiuh para simular el comportamiento de un central termosolar de torre bajo diferentes condiciones.

A partir de un campo de heliostatos dado se han analizado diferentes casos con y sin concentradores secundarios en un receptor cilíndrico. Se ha simulado con reconcentradores de semiángulo de aceptación de 32° y de 40°. En ambos casos se ha comparado con un receptor cilíndrico externo. Los radios del receptor que se han empleado han sido: 4 metros; el radio necesario para que llegue toda la radiación sin spillage si no hay reconcentradores; y el radio necesario con reconcentradores para que no haya pérdidas ópticas en la radiación reflejada por el heliostato más lejano (para 32° y 40°). Se ha estudiado la potencia que llega al receptor, la distribución del flujo y la influencia en el lay-out de introducir concentradores secundarios.

Asimismo se ha realizado la simulación de la misma central de torre pero con un receptor formado por superficies planas e inclinadas hacia el campo para disminuir el ángulo de incidencia de los rayos reflejados por los heliostatos.

6.2.1 CENTRAL DE TORRE ANALIZADA

Se ha utilizado una central de torre semejante a la de Gemasolar con algunas modificaciones para hacer las simulaciones. Las coordenadas de los heliostatos se pueden ver en el anexo 9. Antes ya se ha mencionado esta planta. Se trata de la primera central de torre que produjo electricidad a escala comercial. Además aplica la tecnología de almacenamiento térmico en sales fundidas que le permite funcionar durante 15 horas sin recibir radiación solar. Se encuentra localizada en la provincia de Sevilla, en el municipio de Fuentes de Andalucía.



Ilustración 68: Fotografía central Gemasolar [5]

Campo de heliostatos

El campo está formado por 2750 heliostatos organizados en 41 filas cada una de las cuales se encuentra a una distancia a la torre. Las filas forman circunferencias alrededor de la torre. Cada fila tiene un determinado número de heliostatos. Al estar la central en Sevilla nos encontramos en el hemisferio norte por lo que serán más útiles los heliostatos que apuntan hacia el sur, es decir, habrá más heliostatos al norte de la torre. Las distancias a la torre pueden ser francamente grandes, la última fila se encuentra a 800 metros. De norte a sur el campo se expande 1200 metros.

Fila	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Número de heliostatos	23	30	36	42	48	55	61	68	75	82	91	99	77	76
Distancia a la torre	55.95	70.28	84.6	98.93	113.25	127.58	141.91	157.15	173.37	190.7	209.23	229.09	250.39	261.83
Fila	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Número de heliostatos	77	76	77	76	77	76	77	76	77	72	66	62	59	56
Distancia a la torre	273.28	285.58	297.89	311.13	324.39	338.65	352.94	368.32	383.73	400.31	416.94	434.83	452.78	472.11
Fila	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	
Número de heliostatos	33	102	95	90	85	80	75	70	65	58	49	38	23	
Distancia a la torre	491.49	512.37	533.31	555.87	578.5	602.88	627.35	653.71	680.17	708.68	737.29	768.12	799.07	

Tabla 8: Número de heliostatos y distancia a la torre de cada fila del campo

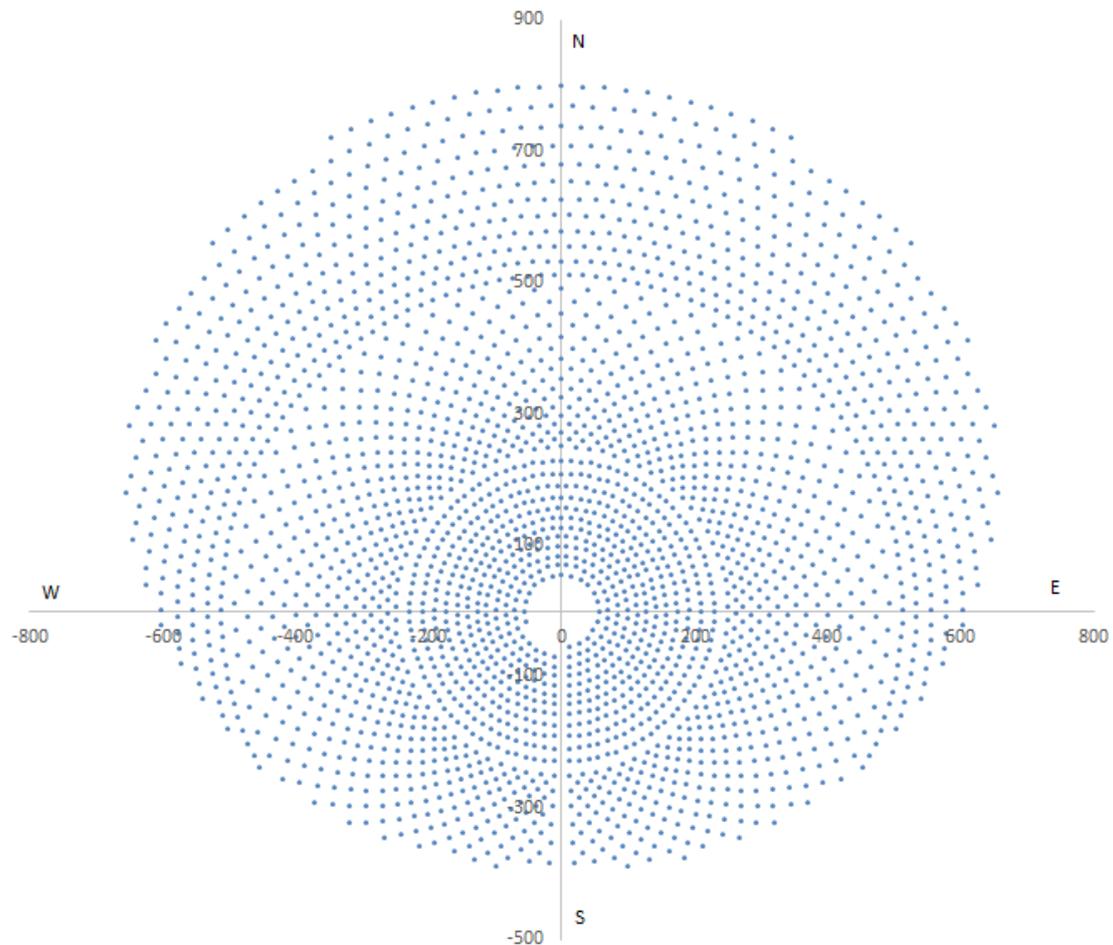


Ilustración 69: Campo heliostatos similar al de Gemasolar

Se han tomado para los heliostatos una serie de propiedades con el objetivo de aproximar su comportamiento a la realidad en las simulaciones:

- Sus dimensiones son de 11.415 x 10.42 m², su área es por lo tanto grande (118.9443 m²) lo que provoca que las distancias entre ellos deban ser grandes.
- El aiming point de cada heliostato se encuentra en la superficie del receptor. Está en todos los casos a una altura de 125.63 metros (altura en el medio del receptor) y en el punto del receptor más cercano a cada heliostato. Por lo tanto los aiming point de todos los heliostatos formarán una circunferencia de radio igual al del receptor a la altura señalada. Según el radio del receptor estos puntos cambiarán su posición. Cuando hay reconcentradores el aiming point está en la apertura de los concentradores secundarios.
- Los heliostatos no son planos, tienen un radio de curvatura igual al doble de la distancia del heliostato a su aiming point. Estos radios son muy grandes por lo que prácticamente son planos.
- Se ha considerado reflectividad de los heliostatos igual a 1. Esto se ha hecho para considerar únicamente las pérdidas producidas en los concentradores secundarios.
- La radiación reflejada por el heliostato sigue una distribución normal de error igual a 1.55 miliradianes.

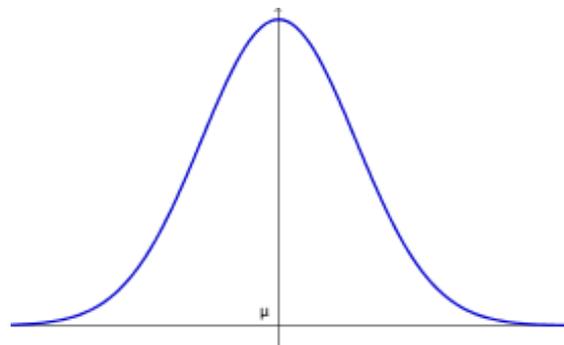


Ilustración 70: Distribución normal

- Los heliostatos tienen un sistema de seguimiento (tracker) que los orienta a la posición solar que estamos analizando.

El script hecho en Tonatiuh para simular el campo de heliostatos se recoge en el anexo 10. Este script ha sido cambiado según el radio del receptor. Basta con sustituir los nuevos valores de los radios y aiming points de los heliostatos. Las coordenadas de los heliostatos se mantienen.

El estar el aiming point bien en la superficie del receptor o bien en la entrada de los reconcentradores hace que para variaciones de radio se den cambios en la posición del aiming point. Se debe calcular para cada heliostato donde está su aiming point. Para ello se calcula el ángulo en el que se encuentra el heliostato respecto al sistema de coordenadas. Se multiplica el coseno y seno de ese ángulo por el radio del receptor y así sabemos las dos coordenadas del aiming point para cada heliostato. Se hace esto con todos los heliostatos.

Receptor

El receptor se ha diseñado siempre cilíndrico y de altura total 10 metros ya que en todos los casos analizados esta altura es suficiente para que no haya spillage. Se encuentra en lo alto de la torre y su radio varía en función del caso estudiado. Su reflectividad se ha supuesto nula para que actúe así como cuerpo negro y absorba toda la radiación que le llegue.

El script se adjunta en el anexo 11. Se debe cambiar el radio del receptor según el caso en el que estemos.

Torre

La torre tiene una altura total de 130.63 metros. En los últimos 10 metros la rodea el receptor. Se ha hecho cilíndrica y su radio se ha modificado según el radio del receptor ya que este influye en las cargas que la torre ha de soportar. Hay que tener en cuenta que radios muy elevados para la torre producirían una sombra grande que hace que llegue menos radiación a los heliostatos.

El script de Tonatiuh que permite simular la torre se encuentra en el anexo 12. Al igual que en la torre y heliostatos cada vez que se quiera un nuevo radio del receptor se deberán cambiar los valores.

Concentradores secundarios

En lo referente a los concentradores secundarios también se han diseñado de acuerdo a unos parámetros. Se definen según las ecuaciones vistas en la sección 4.5.3. Recordamos que Tonatiuh necesita saber los valores de la concentración máxima, la apotema del hexágono de salida, la altura del reconcentrador y las magnitudes de los lados del hexágono de entrada y salida. Mediante un script en Tonatiuh se han implementado las ecuaciones para que baste con introducir el semiángulo de aceptación, la altura y la apotema del hexágono de salida para obtener todos los parámetros.

Al semiángulo de aceptación se le ha dado bien valor 32° o bien valor 40° mientras que la altura de los reconcentradores ha sido de 0.61 metros y la apotema 0.26 metros. De esta manera se ha podido analizar las modificaciones que se producen según el semiángulo de aceptación. De todas formas los tamaños de los reconcentradores estarían muy influenciados por la forma, tamaño y tipo (volumétrico, tubos) del receptor. Se deberían ajustar al caso en el que estemos. En este trabajo se ha tomado como referencia los empleados en la referencia [11].

Las paredes del reconcentrador se han considerado de reflectividad 1 para que se pueda analizar únicamente las pérdidas debidas al semiángulo de aceptación. Para cuantificar las pérdidas debidas a las reflectividad se ha realizado otro ejercicio.

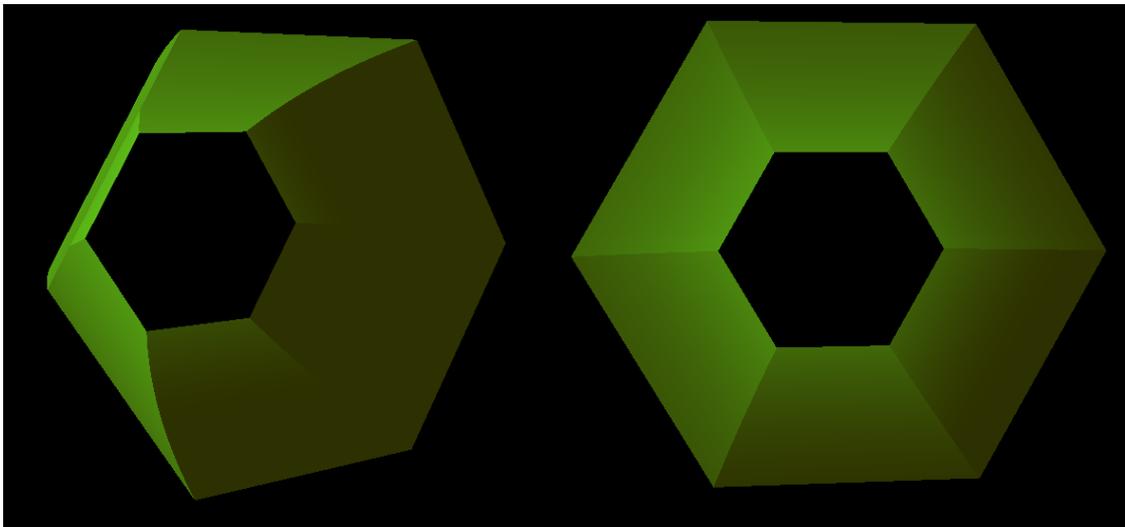


Ilustración 71: Concentradores secundarios diseñados en Tonatiuh de semiángulo de aceptación 32°

Los ejes del reconcentrador son paralelos al suelo. Además las 6 caras están giradas respecto al mismo de modo que en la parte superior haya una cara, no una arista. Esto es así porque la radiación incide desde abajo y conviene que rebote en la superficie más parecida a un CPC posible y donde la probabilidad de que los rayos sean rechazados es menor, por ello se escoge esta forma, por su mejor eficiencia óptica.

Como no siempre el radio del receptor va a ser el mismo, en el script realizado se ha hecho que los reconcentradores adopten su posición geométrica en función del radio de modo que no queden huecos entre ellos. Entre los concentradores de los extremos sí que va a haber un hueco, se diseñarán los reconcentradores para que este se encuentre orientado hacia el 'pasillo' del campo de heliostatos y así no llegue radiación a él.

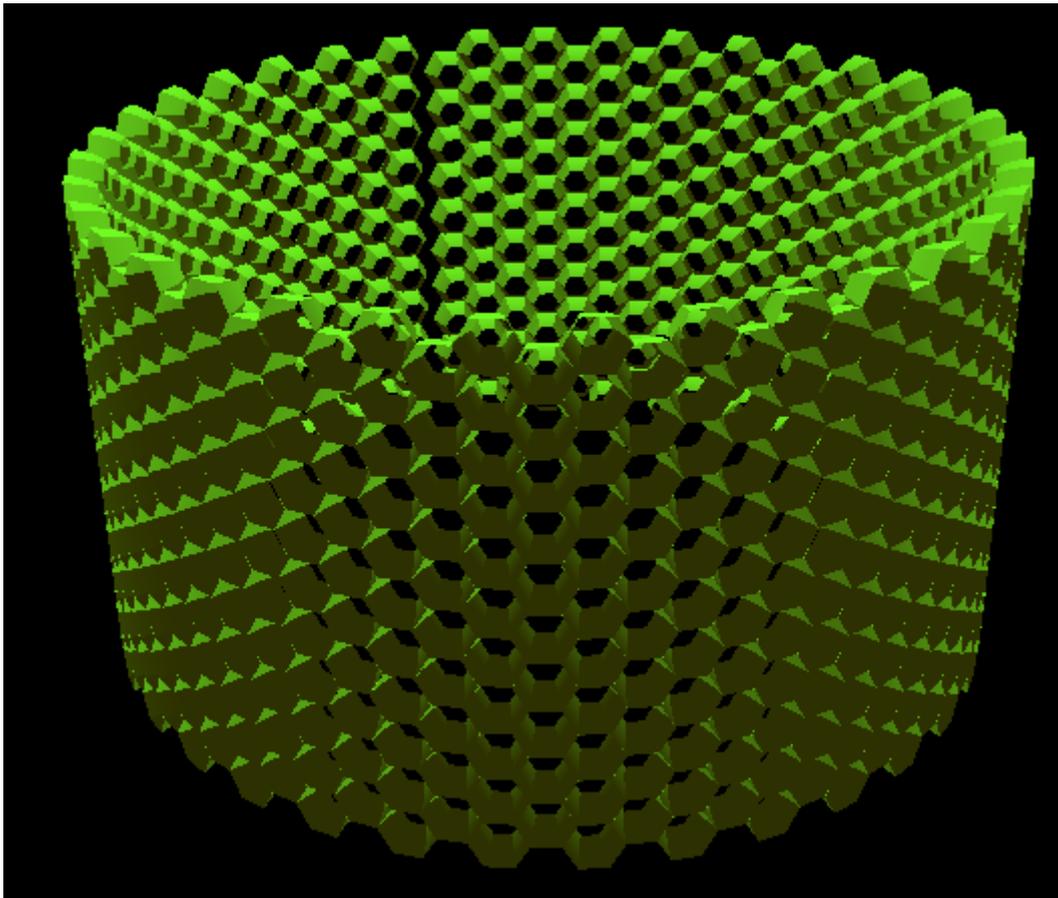


Ilustración 72: Diseño realizado en Tonatiuh de los concentradores secundarios para radio de apertura de 8.756 y semiángulo de aceptación de 32°

El número de filas de reconcentradores que se ha diseñado ha sido de 21 y 23 según semiángulo de aceptación (32° y 40°) al ser este número el que permite cubrir los 10 metros de altura del receptor.

EL script de Tonatiuh (anexo 13) desarrollado posibilita la simulación de estos concentradores para diferentes parámetros. Además de las ya conocidas ecuaciones de un reconcentrador se han llevado a cabo otros cálculos para un diseño correcto.

Número de concentradores por fila

$$= \text{entero} \left(\frac{2 \times \pi \times (\text{radio receptor} + \text{altura reconcentrador})}{3 \times \text{lado hexágono entrada}} \right) \quad (6.2.1)$$

Giro entre concentradores respecto al eje del receptor

$$= \frac{3 \times \text{lado hexágono entrada}}{\text{radio receptor} + \text{altura reconcentrador}} \quad (6.2.2)$$

Las filas contiguas están giradas entre ellas la mitad del ángulo calculado (6.2.2).

$$Distancia\ vertical\ entre\ filas = \frac{\sqrt{3}}{2} \times lado\ hexágono\ entrada \quad (6.2.3)$$

$$Altura\ primera\ fila = 125.63 - \frac{\sqrt{3} \times (n^o\ filas - 1) \times lado\ hexágono\ entrada}{4} \quad (6.2.4)$$

Radiación y posición solar

La radiación solar es de distribución tipo Pillbox ya que los rayos no son completamente paralelos sino que tienen un error cuyo valor máximo es de 4.65 miliradianes. La irradiancia solar es de 1000 W/m².

Un factor clave es la posición solar. Esta depende del día del año, la hora del día y el lugar del mundo en el que estemos. Introduciendo los valores del azimut y la elevación es posible obtener la posición para cualquier momento. Se requiere conocer estos conceptos.

La posición geográfica de un punto de la superficie terrestre se determina mediante la latitud, la longitud y la elevación. La latitud mide la distancia en grados desde el Ecuador hasta el lugar en el que estemos (norte y sur). Por su parte la longitud lo hace respecto al meridiano de Greenwich (este y oeste). La altitud mide la distancia vertical respecto al nivel del mar. Con estas magnitudes será posible saber la trayectoria solar que se dará en un punto.

Para describir la posición del sol se usan dos coordenadas angulares: azimut y elevación. El azimut es el ángulo formado por el punto cardinal norte y la proyección vertical del sol sobre el horizonte del observador. La elevación es el ángulo formado por el sol y el horizonte del observador.

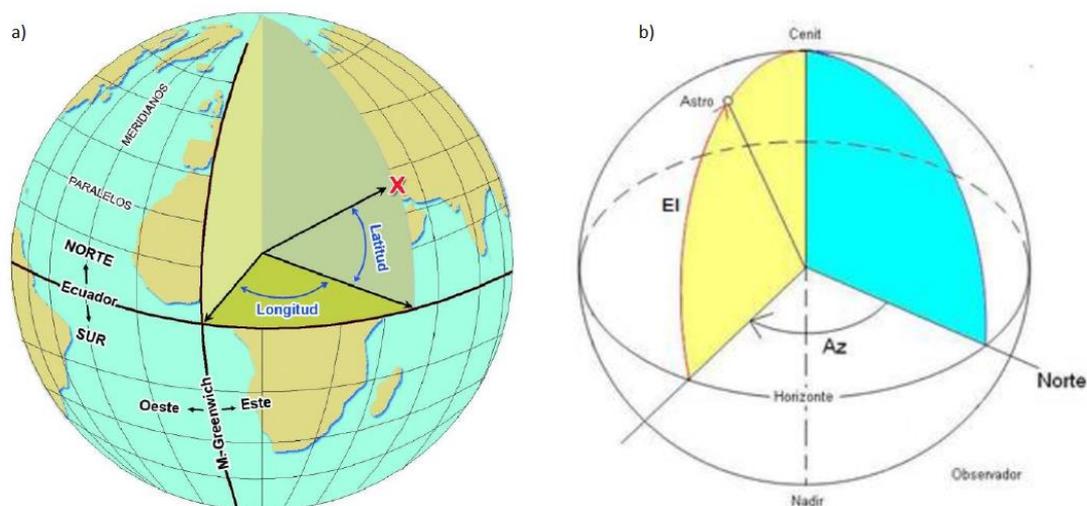


Ilustración 73: a) Latitud y longitud b) Azimut y elevación

En nuestro caso el día evaluado ha sido en el que se da el equinoccio de primavera (la trayectoria del sol sigue en este día el Ecuador). Se produce cada año el 20 o 21 de marzo. Durante este día las horas de día y noche se igualan. Al amanecer tendremos por lo tanto azimut igual a 90°, al mediodía 180° y al anochecer 270°

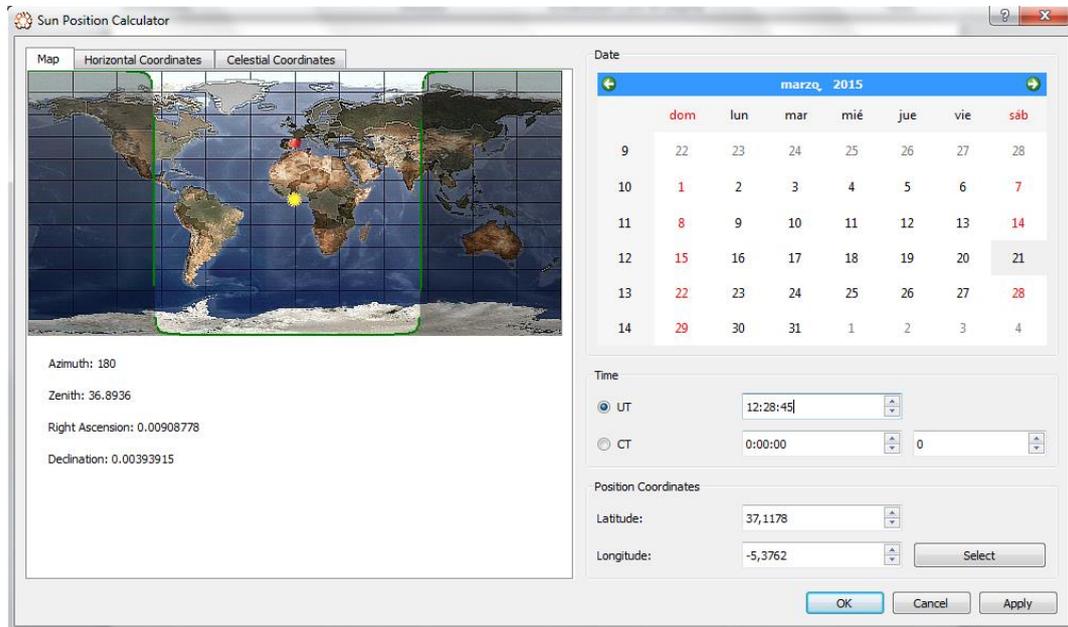


Ilustración 74: Día, fecha y lugar simulados en Tonatiuh

Se ha simulado la central cuando se encuentra al mediodía (13:30, 12:30 en Tonatiuh). Al trabajar bajo estas condiciones nuestro campo de heliostatos tendrá el sol justo en sur y será el momento en que la potencia dada sea máxima y el efecto coseno menor. Además al mediodía se puede aplicar simetría en el campo.

Por lo tanto, conociendo la fecha y hora y la localización geográfica (Sevilla) se ha simulado con un azimut de 180° y una elevación de 52.5°. También se ha hecho un ejercicio en el que se evalúa el comportamiento de la central a lo largo del día.

Simulación y lectura de resultados

Se puede escoger el número de rayos con los que hacer la simulación. Se han empleado 5000000 con 500x500 divisiones. Cuando solo se ha evaluado la potencia de un heliostato o fila se han utilizado 3000000 de rayos con las mismas divisiones y dirigidos solo a esa fila.

Los datos resultantes de la simulación se exportan como archivo binario a un directorio y se leen con R. La superficie exportada es la del receptor y en coordenadas locales. Gracias a R se podrá obtener la potencia que llega a dicha superficie y la distribución de su flujo.

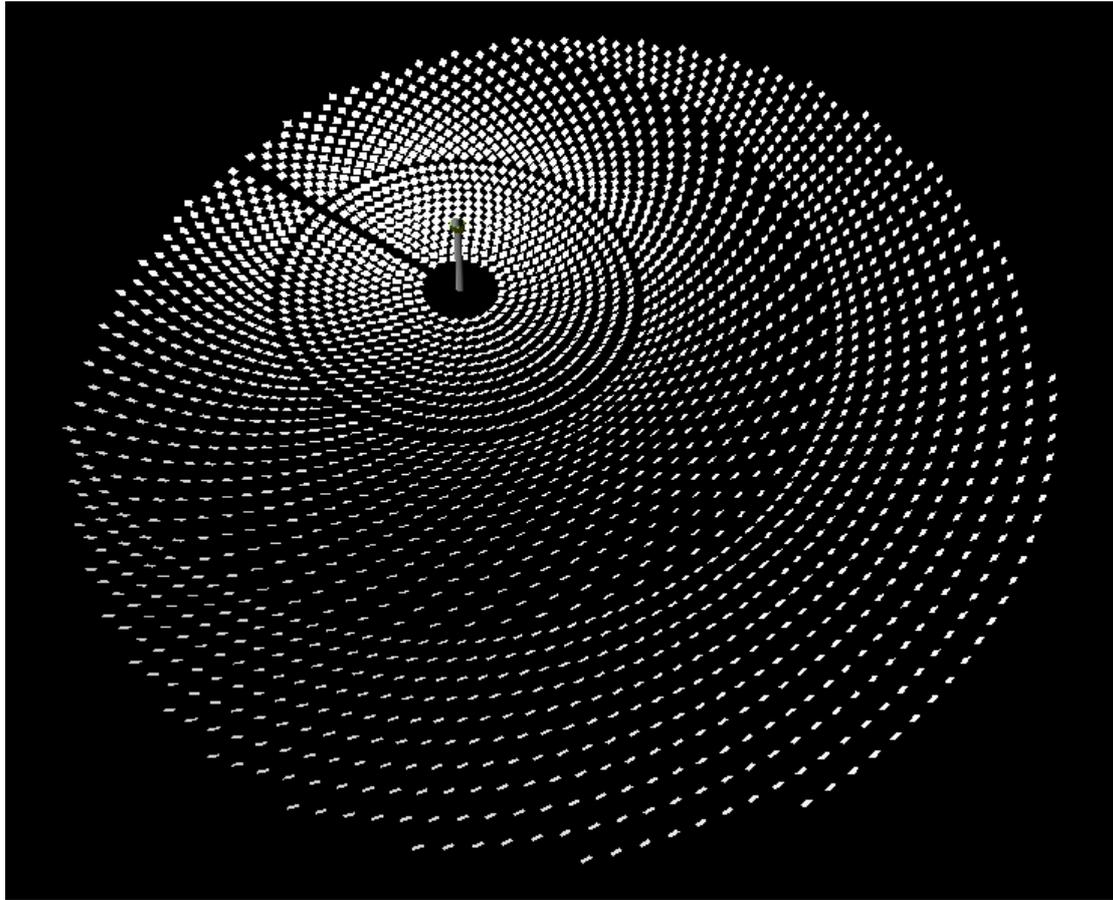


Ilustración 75: Diseño en Tonatiuh de la central de torre empleada

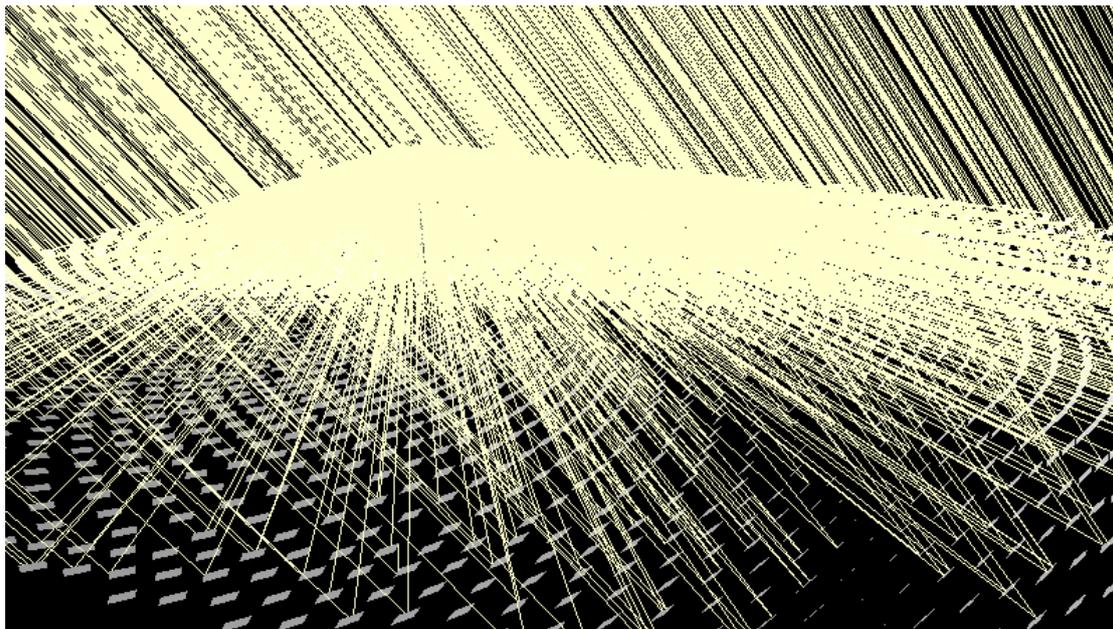


Ilustración 76: Comportamiento central (con pocos rayos para mejor visualización)

6.2.2 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL FLUIDO EN FUNCIÓN DE LOS CAMBIOS INTRODUCIDOS POR LOS RECONCENTRADORES EN CUANTO A CONCENTRACIÓN Y EFICIENCIA ÓPTICA

Aunque este trabajo analiza los concentradores secundarios desde un punto de vista óptico y estudia las modificaciones que esta óptica produce en el funcionamiento de una central solar de torre, también se ha considerado que resulta interesante evaluar los aspectos térmicos relativos a estos reconcentradores. Esto no es solo necesario en el análisis de la distribución del flujo térmico sino además en la variación de temperatura alcanzada en el receptor. Para ello en este apartado se describe un método aproximado para poder interpretar las modificaciones producidas en la temperatura.

Al fin y al cabo, el objetivo principal mediante los concentradores secundarios es aumentar la temperatura del fluido ya que el rendimiento de la instalación se puede aproximar mediante el rendimiento de Carnot. Este es:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_F}{T_C} \quad (6.2.5)$$

donde T_c es la temperatura del foco caliente, es decir, en una central de torre sería la temperatura que alcanza el fluido en el receptor. Esta temperatura puede ser incrementada aumentando la concentración, de ahí la utilidad de los concentradores secundarios.

Queremos saber de modo cualitativo si realmente estamos aumentando la temperatura gracias a los concentradores secundarios. Ya hemos visto que los concentradores secundarios provocan que haya una serie de pérdidas ópticas en la central. Estas pérdidas hacen que la temperatura disminuya. Sin embargo, al mismo tiempo, los reconcentradores están permitiendo alcanzar una mayor concentración de la radiación en el receptor por lo que en este sentido se está consiguiendo un aumento de la temperatura del fluido. Para saber si realmente la temperatura está subiendo y por ello los reconcentradores están cumpliendo con su objetivo habrá que hallar un método que nos permita conocer como variará la temperatura en función de cómo varíen estos dos parámetros.

Para saber la temperatura del fluido necesitamos saber la potencia que llega al receptor (calculada con Tonatiuh), la potencia calorífica que pasa al fluido y las pérdidas térmicas.

$$q_{\text{útil}} = q_{\text{incidente}} - q_{\text{pérdidas}} \quad (6.2.6)$$

La potencia calorífica útil dependerá de la manera en que sea transferido el calor. El mecanismo de transferencia será por convección. La potencia calorífica incidente es la calculada en Tonatiuh. Para comparar los casos con y sin reconcentradores es multiplicada por la eficiencia óptica de los reconcentradores. Las pérdidas son principalmente debidas a la radiación pero también hay por convección y conducción (despreciable).

Desarrollando la ecuación (6.2.6) obtenemos la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 & h_1 \times A_{\text{contacto}} \times (T_{\text{rec}} - T_{\text{fluido}}) \\
 = & \eta_{\text{óptico}} \times q_{\text{apertura reconcentrador}} - h_2 \times A_{\text{ext}} \times (T_{\text{rec}} - T_a) \\
 & - \varepsilon \times \sigma \times A_{\text{ext}} \times (T_{\text{rec}}^4 - T_a^4) \quad (6.2.7)
 \end{aligned}$$

donde:

- h_1 y h_2 son los coeficientes de convección interior y exterior.
- A_{contacto} y A_{ext} son las áreas interiores y exteriores. Vamos a considerarlas iguales.
- T_{rec} es la temperatura del receptor, T_{fluido} es la del fluido y T_a la ambiente.
- $\eta_{\text{óptica}}$ es la eficiencia óptica del reconcentrador.
- $q_{\text{apertura reconcentrador}}$ es la potencia que llega a las aperturas de los reconcentradores.
- ε es la emisividad del receptor.
- σ es la constante de Stefan-Boltzmann

A partir de la ecuación (6.2.7) no podemos obtener la relación directa entre $\eta_{\text{óptico}}$, A y T_{fluido} . Esta relación nos interesa ya que nos permite comparar la ganancia en concentración respecto a las pérdidas ópticas para saber si la disminución de área que conseguimos compensa las pérdidas ópticas. Haciendo una aproximación a gran escala y gracias a que sabemos que reduciendo el área aumenta la temperatura del receptor, podríamos decir que se cumple la siguiente relación de proporcionalidad:

$$\eta_{\text{óptico}} \propto A \times f(T_{\text{rec}}, T_{\text{rec}}^4) \quad (6.2.8)$$

Sabemos que si aumenta T_{rec} lo hace también T_{fluido} . La expresión (6.2.8) es una aproximación fuerte pero nos sirve para ver de modo cualitativo que si el aumento de la concentración supera a las pérdidas ópticas, la temperatura, y con ello la eficiencia de la planta, aumentarán. De este modo será posible comparar las pérdidas ópticas con la ganancia en concentración para los diferentes casos y así evaluar, a falta de considerar otros factores, la implantación de concentradores secundarios. En cualquier caso, mediante este trabajo se estudia cómo afectan estas pérdidas ópticas a la central y analizar cómo hacer frente a ellas mediante el diseño de la central.

6.2.3 ANÁLISIS RECONCENTRADORES CON SEMIÁNGULO DE ACEPTANCIA 32°

Se ha estudiado las consecuencias de la implantación de concentradores secundarios de semiángulo de aceptación de 32° en una central de torre.

Se ha comparado la potencia que llega al receptor en el caso de que el receptor fuese cilíndrico externo frente a cuando hay estos reconcentradores. Se han analizado 3 radios distintos con y sin reconcentradores. Estos radios son:

- Radio de 4 metros.
- Radio de 4.521 metros. Es el suficiente para que no se produzcan pérdidas por spillage en la radiación que refleja el heliostato más lejano en una central sin reconcentradores. Se calcula con la tangente del ángulo de error multiplicada por la distancia al receptor del heliostato que está a mayor distancia, es decir, empleando la ecuación (6.1.11).
- Radio de 8.756 metros. Es el radio necesario para que de la radiación reflejada por el heliostato más lejano no se produzcan pérdidas ópticas en los concentradores debido a un ángulo de incidencia mayor que el semiángulo de aceptación. Se calcula mediante el programa del anexo 8. Este nos da el radio que se necesita o si se prefiere el factor 't' (1.937) por el que hay que multiplicar al radio de 4.521 metros. En cualquier caso vemos que este radio no significa que vaya a llegar toda la radiación al receptor porque como hemos visto en las simulaciones en R en las primeras filas la radiación puede ser rechazada.

Con concentradores secundarios estos 3 valores del radio son en los que se encuentra la apertura del reconcentrador por lo que en realidad el radio del receptor es de 0.61 metros menos.

El ángulo de error de la radiación reflejada por los heliostatos es consecuencia de la radiación no paralela del sol y los errores de superficie de los heliostatos. Al tener una distribución normal este error, el ángulo de error con el que calcula el radio obedece a la suma de errores de distribución normal. Para ello se aplica una fórmula [17]:

$$\alpha \text{ (miliradianes)} = \sqrt{(\text{error sol})^2 + (2 \times \text{error heliostato})^2} = \sqrt{4.65^2 + (2 \times 1.55)^2} \\ = 5.589 \text{ miliradianes} \quad (6.2.9)$$

Los parámetros que resultan de definir el reconcentrador son: altura de 0.61 metros, concentración máxima de 1.887, apotema del hexágono de salida de 0.26 metros y lados de los hexágonos de entrada y salida son de 0.52 y de 0.30 metros.

6.2.3.1. POTENCIA

Los valores de la potencia en vatios para los diferentes radios con y sin reconcentradores han sido calculados.

Radio (m)	Sin reconcentradores (W)	Con reconcentradores (W)	Eficiencia
4	257512689	159323049	0.619
4.521	261093541	170847058	0.654
8.756	271025991	209491851	0.773
4.521 sin reconcentradores frente a 8.756 con reconcentradores			0.802

Tabla 9: Potencia sin y con reconcentradores (Aceptancia 32°)

Vemos que las pérdidas ópticas son lo suficientemente elevadas para producir un descenso importante en la eficiencia. La eficiencia que más nos importa es la última, la que compara radio 4.521 sin reconcentradores con radio 8.756 con ellos. En este caso la eficiencia óptica es del 80%, muy lejos de valores óptimos. Estas pérdidas se producen en las filas más cercanas a la torre como se ha visto en las simulaciones en R debido al gran ángulo formado entre los heliostatos y el receptor. Se verá como disminuirlas.

En los casos sin reconcentradores, el radio de 4.521 se había calculado para que no hubiese pérdidas por spillage en el último heliostato. Vemos que el incremento de potencia respecto a 4 que se consigue no es alto. Habría que compararlo con las pérdidas térmicas que se introducen por el aumento del área. Si se llega hasta el gran radio de 8.756 se produce otro pequeño incremento de potencia debido a la distribución normal del error de los heliostatos no considerada en los ejercicios en R pero también el área aumenta mucho y ya no es conveniente.

Se ha comparado la concentración en ambos casos. Sin reconcentradores se ha tomado el área cilíndrica del receptor. Con reconcentradores se ha calculado el área teórica conociendo los parámetros de los hexágonos de entrada y salida ya que al haber huecos en la parte superior e inferior del receptor y entre extremos de las filas de reconcentradores la nueva área no reflejaría realmente la concentración.

	Sin reconcentradores Radio 4.521 m	Con reconcentradores con radio de apertura a 8.756 m (teórica)	Concentración
Área al que llega radiación	284.063 m ²	183.321 m ²	1.550

Tabla 10: Concentración conseguida con reconcentradores de 32°

La concentración introducida consigue compensar las pérdidas ópticas ($0.8 \times 1.55 = 1.24$) pero probablemente no sea suficiente para hacer frente a otros aspectos relativos a la implantación de la central de torre: mayores cargas en el receptor, mayor coste construcción o necesidades de mantenimiento.

Asimismo se va a calcular la distribución del flujo térmico para saber si esta es beneficiosa. Por otro lado, la concentración total introducida debería ser igual a $1/\sin(\text{semiángulo de aceptación})$, como hemos visto en 6.1.6, y que aquí sería 1.887. Sin embargo debido al truncamiento del reconcentrador y a un valor superior del parámetro 't' debido a pérdidas ópticas la concentración no alcanza tal valor (1.550).

6.2.3.2. INFLUENCIA EN EL LAY-OUT

Para saber cuál es la influencia del lay-out en la potencia que se produce en la planta se ha calculado la potencia que produce el campo de heliostatos cuando no hay reconcentradores y el radio del receptor es de 4.521 metros, se ha calculado también la potencia de cada heliostato si hay concentradores secundarios y el radio es de 8.756 metros y, por último, se ha calculado la eficiencia de cada heliostato cuando hay reconcentradores respecto a cuándo no los hay. De esta manera se puede observar cuáles serán los heliostatos más efectivos al introducir concentradores secundarios y así ayudar a mejorar la distribución en planta de la central de torre si estos se implantan. Este era uno de los principales objetivos del trabajo.

Para hacer esto se ha calculado las dos potencias y eficiencia (cociente entre potencias) de cada heliostato. Debido a la lentitud del proceso se ha hecho para cada 3, 4 o 5 heliostatos y se ha interpolado mediante el programa Mathematica para obtener los parámetros para el resto de heliostatos. Además al estar en azimut 180 se ha podido aplicar simetría en el campo.

El proceso seguido ha sido el de dar reflectividad 0 a todos los heliostatos menos al estudiado en cada momento y reducir el área de radiación solar para que llegase en mayor magnitud a dicho heliostato. Asimismo, nuevamente gracias a Mathematica, se han elaborado las figuras que recogen gráficamente el valor de las potencias y eficiencia de cada heliostato a partir de los valores calculados mediante simulación en Tonatiuh y lectura de resultados en R. Este proceso ha sido también el llevado a cabo con aceptación 40° .

En todas las gráficas mostradas los heliostatos situados en la parte superior de la ilustración son los situados al norte de la torre. Por el contrario los emplazados en la parte inferior están al sur.

Potencia sin reconcentradores. Escala 0-120000.

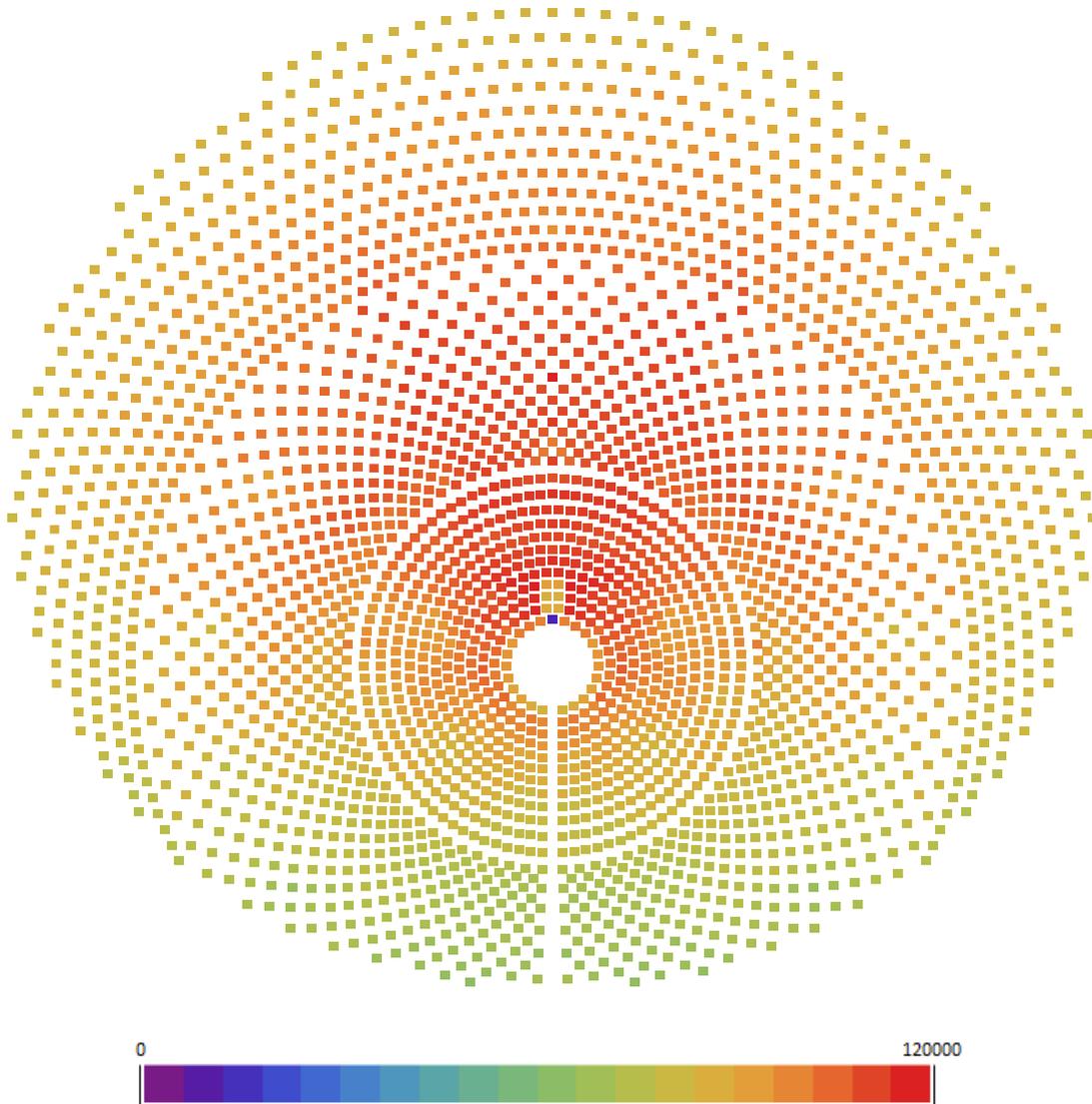


Ilustración 77: Potencia que da cada heliostato si no hay reconcentradores. Escala 0-120000.

La ilustración 77 muestra mediante a una escala de colores la potencia que refleja cada heliostato y llega al receptor. Los heliostatos dan potencias que dan desde los 60000 hasta los 120000 W, exceptuando un heliostato que debido a la sombra de la torre da poca potencia.

Los heliostatos al norte de la torre dan más potencia que los situados al sur debido al efecto coseno. Igualmente como consecuencia del mismo efecto aquellos heliostatos más próximos al eje norte-sur consiguen dar más potencia. Además los heliostatos situados a media-corta distancia de la torre reflejan en el receptor más potencia, también debido al efecto coseno. Por otro lado, a distancias largas a la torre, la atenuación atmosférica será mayor.

Potencia sin reconcentradores. Escala 60000-120000.

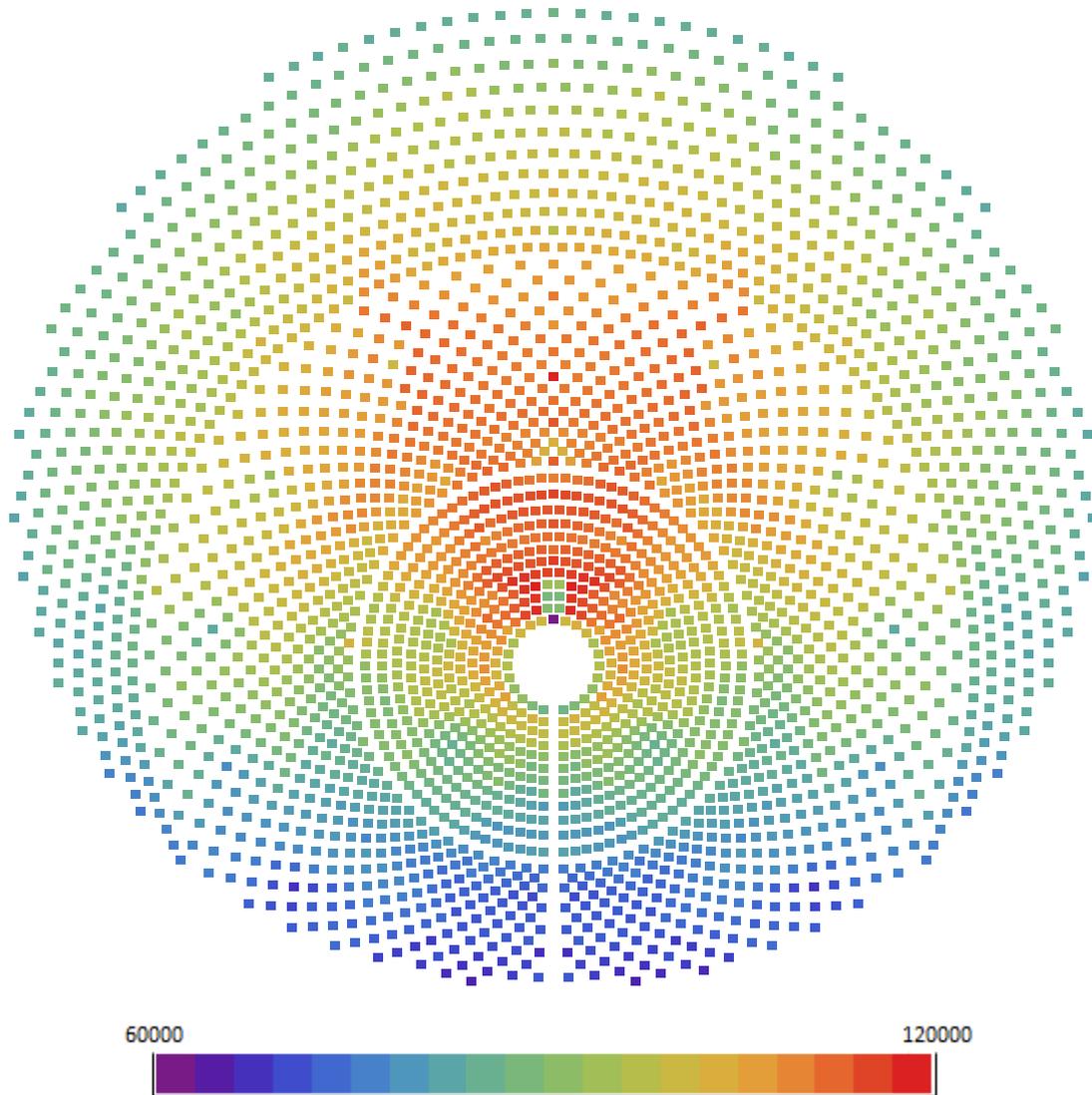


Ilustración 78: Potencia que da cada heliostato sin reconcentradores. Escala 60000-120000.

Se ha empleado en la anterior ilustración una escala que va desde 60000 hasta 120000 W para hacer más visual la comparación entre la potencia que da cada heliostato. Se aprecia fácilmente el efecto coseno y el efecto de las distancias a la torre. Además se ve claramente la pérdida de potencia ocasionada por la sombra de la torre.

Potencia con reconcentradores. Escala 0-120000.

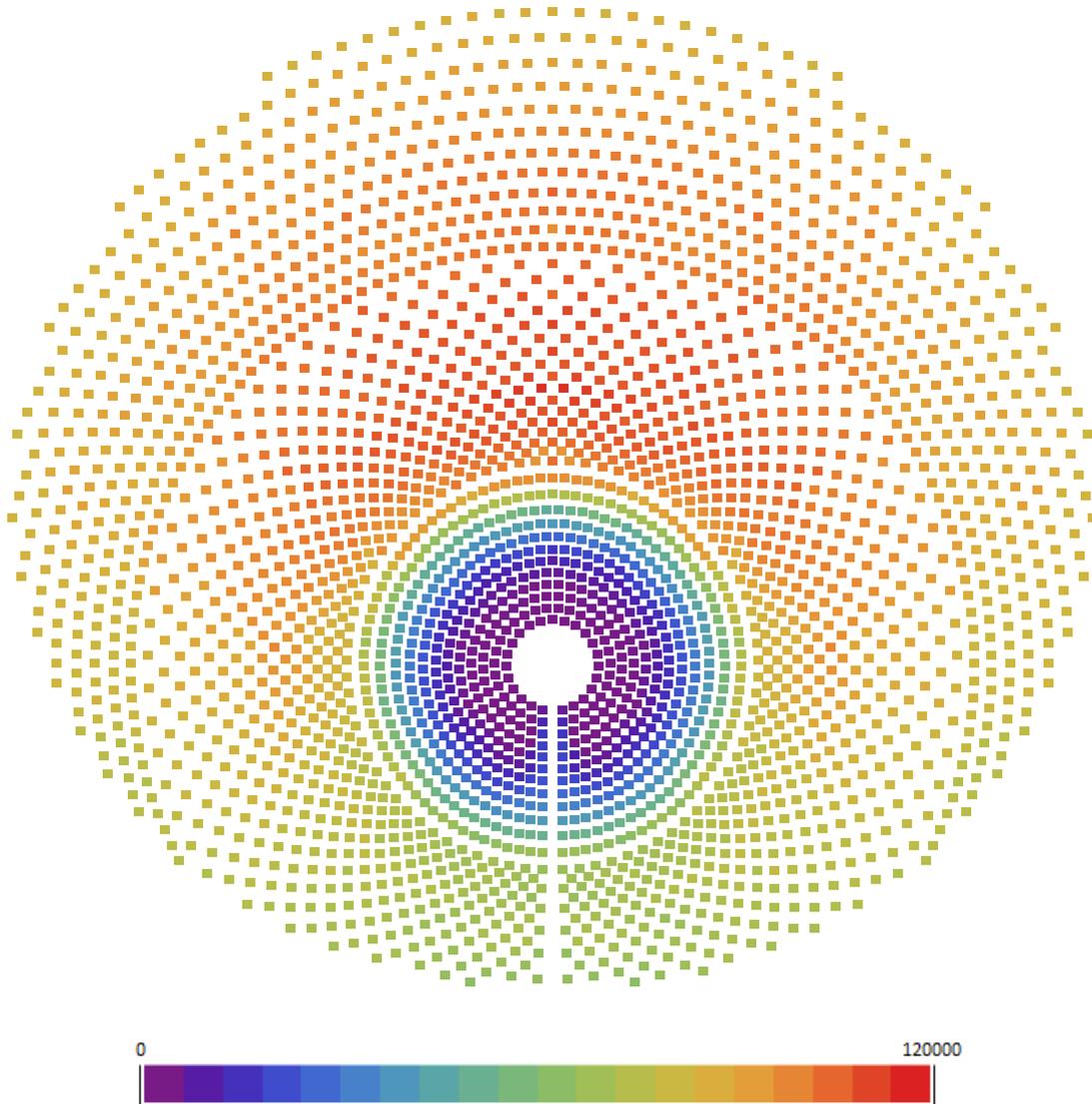


Ilustración 79: Potencia que da cada heliostato cuando hay reconcentrador de semiángulo de aceptación de 32. Escala 0-120000.

Se puede observar como la potencia que dan los heliostatos no difiere del caso en el que no los había excepto para las filas más cercanas a la torre. Aquí, debido al alto valor del ángulo de incidencia con el que llegan los rayos, estos son rechazados.

Respecto a cuándo no hay reconcentradores hay un punto negativo importante: Los heliostatos que antes daban más radiación ahora han visto mermada su actividad en gran medida, con la consiguiente pérdida de eficiencia de la planta.

Potencia con reconcentradores. Escala 60000-120000.

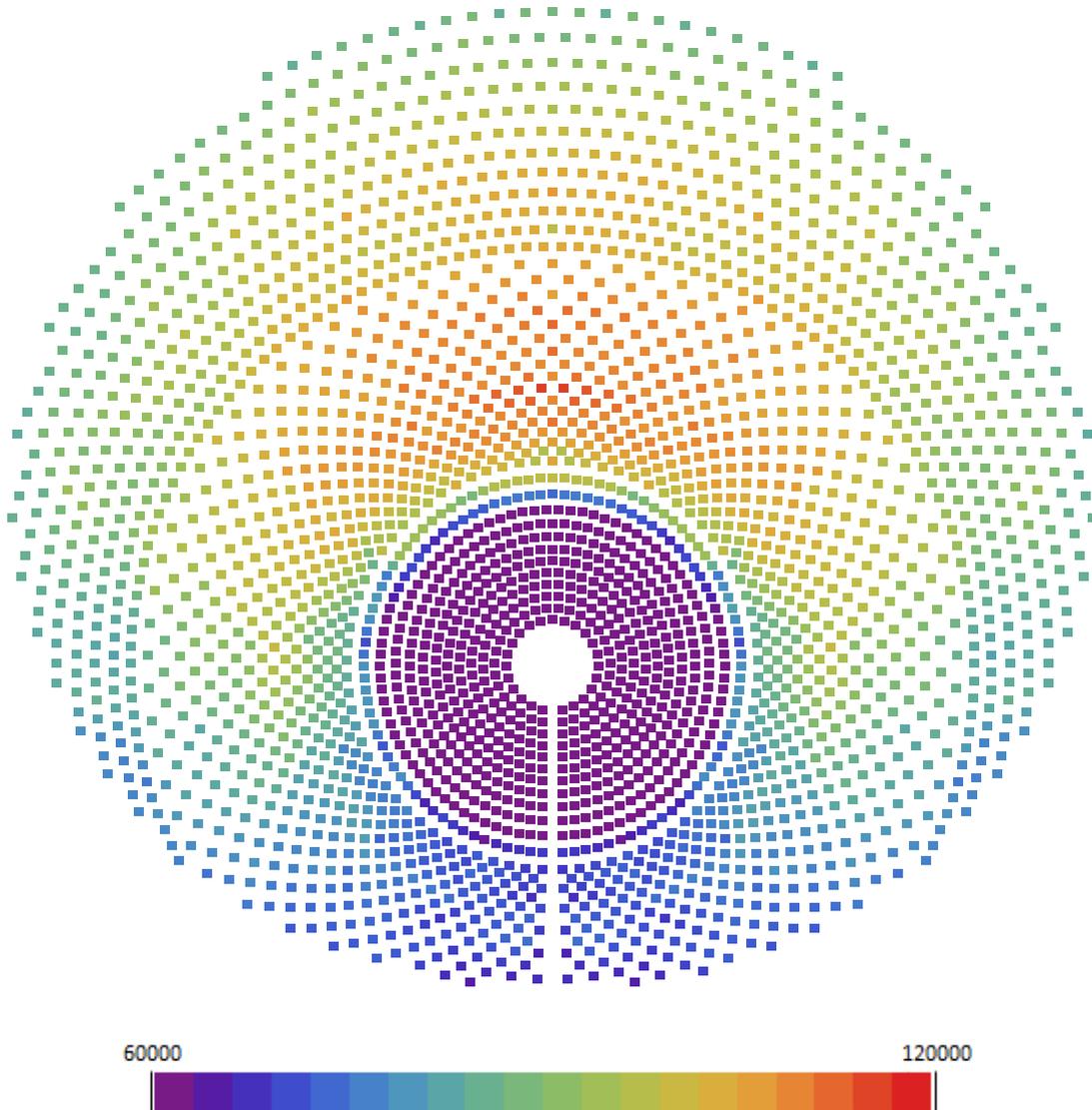


Ilustración 80: Potencia que da cada heliostato cuando hay reconcentrador de semiángulo de aceptación de 32. Escala 60000-120000.

Esta gráfica puede dar lugar a engaño ya que todos aquellos heliostatos que dan menos de 60000 W se muestran sin distinción en el mismo color pero no quiere decir que den lo mismo. Sin embargo se aprecia mejor el efecto coseno y las distancias a la torre.

Eficiencia óptica sobre la radiación que da cada heliostato

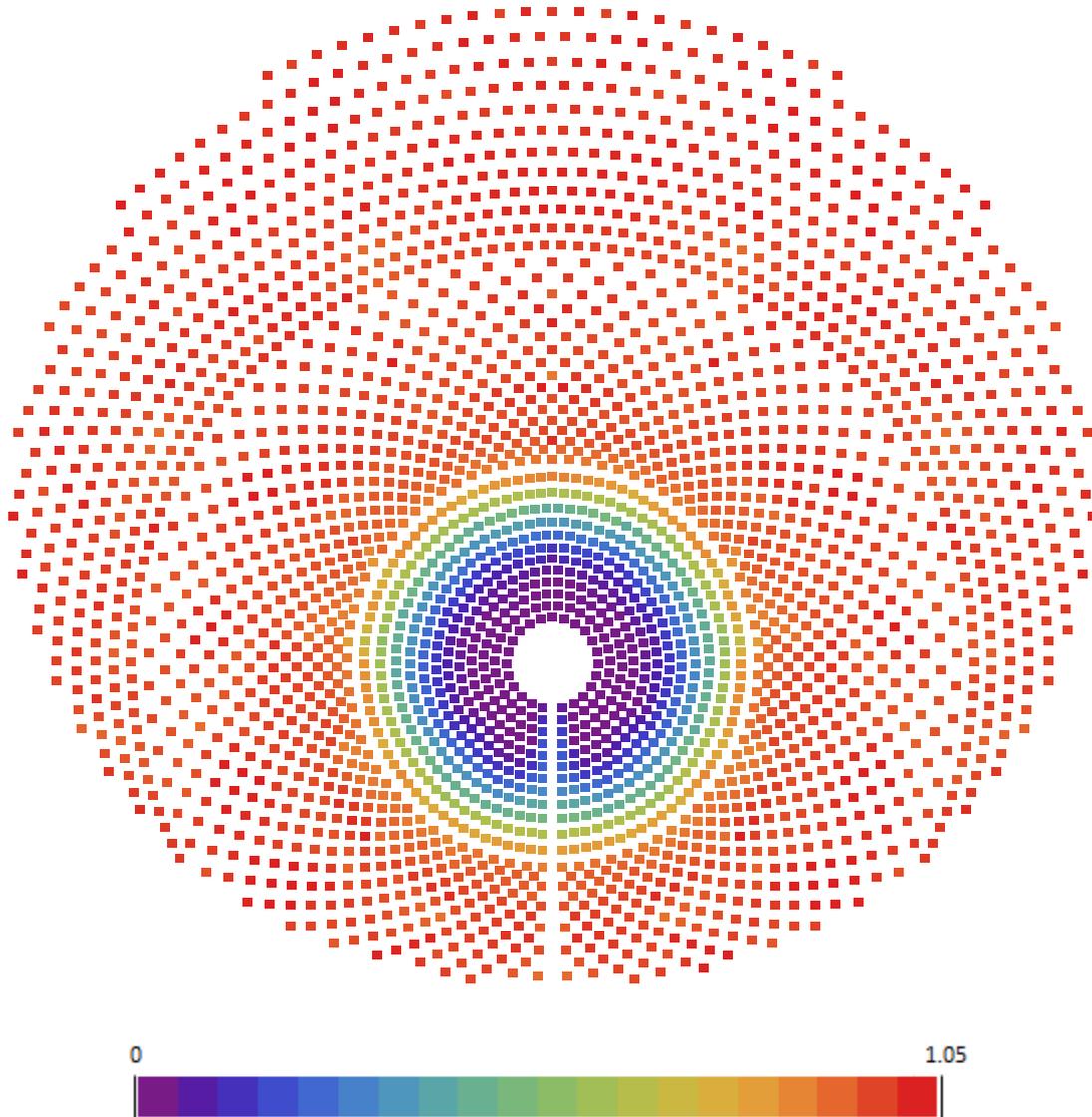


Ilustración 81: Eficiencia sobre la potencia que da cada heliostato cuando hay reconcentradores respecto a cuándo no los hay. 32°.

La ilustración 81 muestra la eficiencia entendida como la comparación de la potencia que llega al receptor cuando hay reconcentradores respecto a cuándo no los hay. Se puede observar una serie de consecuencias interesantes de cómo estos afectan al lay-out.

Vemos que para la mayor parte del campo la eficiencia es 1 o se le acerca. A partir de la fila 20 la potencia entregada es la misma, e incluso en las últimas filas es ligeramente más eficiente introducir reconcentradores debido a que al ser una distribución normal siempre habrá algo de spillage que aquí gracias a un radio más grande es menor. Por su parte desde la fila 13 hasta la 20 la eficiencia siempre supera el 90%.

El problema viene ocasionado en las 12 primeras filas, es decir, la primera de las 3 secciones del campo. Aquí, cuanto más cerca estemos de la torre el ángulo que forma el heliostato y el receptor es cada vez mayor y por ello el ángulo de incidencia también aumenta. Cuando el ángulo de incidencia sea más grande que el semiángulo de aceptación de 32° los rayos serán rechazados. Debido al ángulo de error de los rayos no se pasa de eficiencia 1 a 0 de golpe sino que van progresivamente aumentando a cada fila los rayos que son devueltos. Llega un punto en el que ya ninguno termina en el receptor (fila 5). Tan solo dan un poco de potencia los heliostatos que apuntan al hueco que hay entre los extremos donde no hay reconcentradores.

Una consecuencia interesante es que todos los heliostatos de una fila tienen prácticamente la misma eficiencia, no la misma potencia pero sí la misma eficiencia. Esto se debe a que los ángulos de incidencia de la radiación reflejada serán los mismos en todos los heliostatos de la fila ya que la distancia al receptor y ángulo que forman con este son los mismos en todos los heliostatos de dicha fila.

La conclusión más clara es que no debe haber heliostatos cerca del receptor si hay concentradores secundarios porque estos heliostatos no sirven de nada. Se podrían añadir nuevas filas aunque estas darían menos potencia e incrementarían el radio del receptor disminuyendo por ello la concentración y temperatura del receptor. Además se precisaría de mayor cantidad de terreno.

Otra solución para que la potencia no disminuya es inclinar los reconcentradores hacia el suelo. De este modo disminuyen todos los ángulos de incidencia, tanto de heliostatos lejanos como cercanos, haciendo que la potencia no baje y que el radio del receptor no tenga que aumentar en demasía y, por ello, la eficiencia no disminuya. No obstante, esto impide por motivos geométricos un receptor cilíndrico, tiene que ser plano. Si queremos que siga llegando radiación desde todos los puntos que rodean la torre tendremos que tener varias superficies planas formando el receptor, todas ellas inclinadas hacia abajo. Esto implica un cambio del layout del campo ya que cada superficie plana deberá contar con su propio campo de heliostatos, es decir, habrá que realizar una partición del campo. Esto se estudiará en el punto 6.2.7.

6.2.3.3. DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO TÉRMICO

Mediante R es posible ver el flujo térmico en una superficie, en nuestro caso la del receptor. Se muestran los 6 casos analizados de los que se puede ver la concentración conseguida. Se estudiará las diferencias térmicas que se introducen debido a los reconcentradores. Se han dividido todos los receptores en un número de celdas tal que el tamaño de cada celda sea siempre el mismo.

Las ilustraciones muestran el receptor cilíndrico desplegado. Cuando hay reconcentradores se ven sus áreas de salida hexagonales, que están pegados al receptor.

Al lado del caso se indica el número de divisiones.

Radio 4 metros sin reconcentradores (251x100)

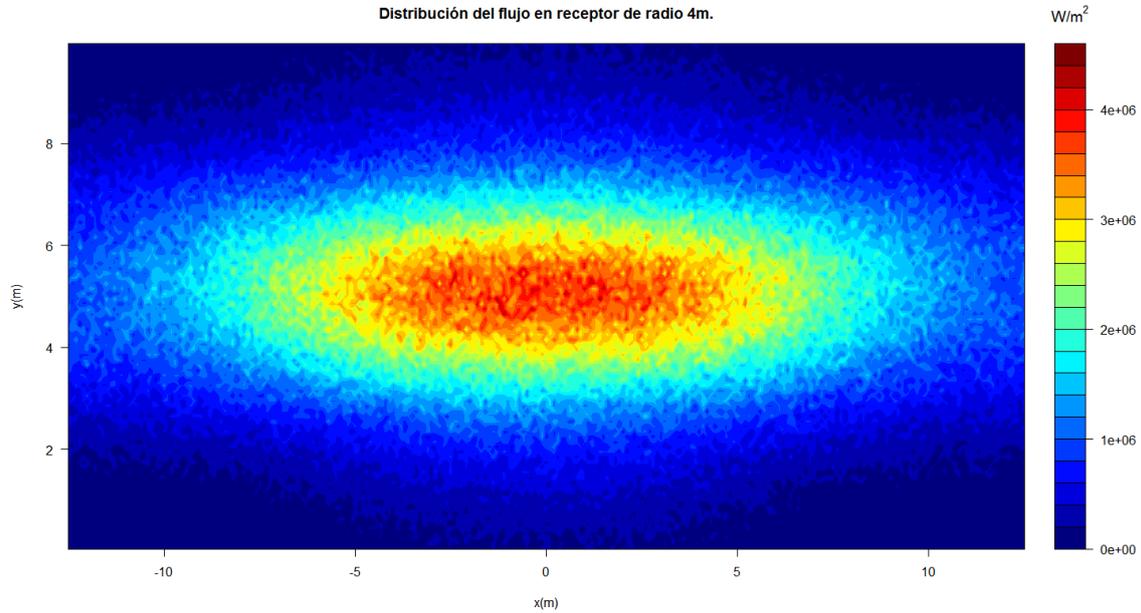


Ilustración 82: Distribución del flujo en receptor de radio de 4 metros sin reconcentradores

Radio total apertura 4 metros con reconcentradores (213x100)

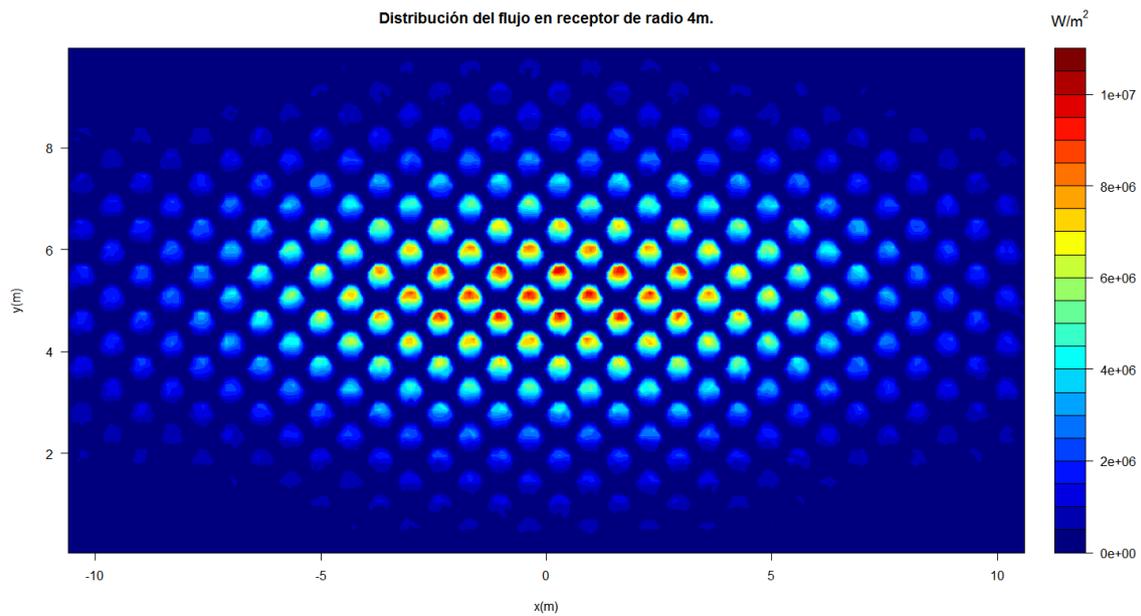


Ilustración 83: Distribución del flujo en receptor de radio de apertura de 4 metros con reconcentradores de 32°

Radio 4.521 metros sin reconcentradores (284x100)

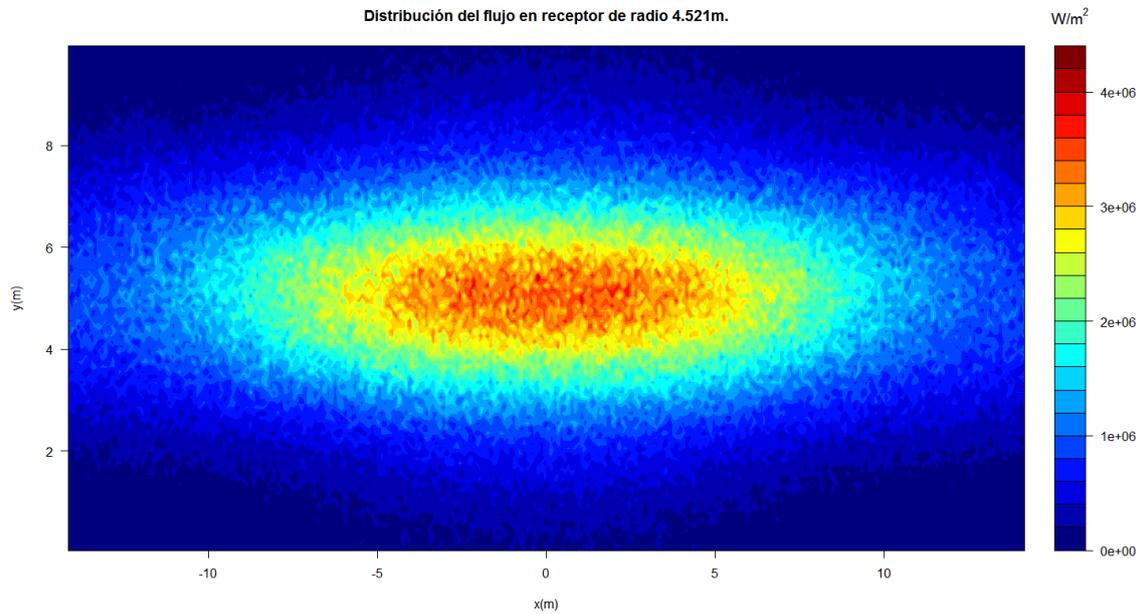


Ilustración 84: Distribución del flujo en receptor de radio de 4.521 metros sin reconcentradores

Radio total apertura 4.521 metros con reconcentradores (246x100)

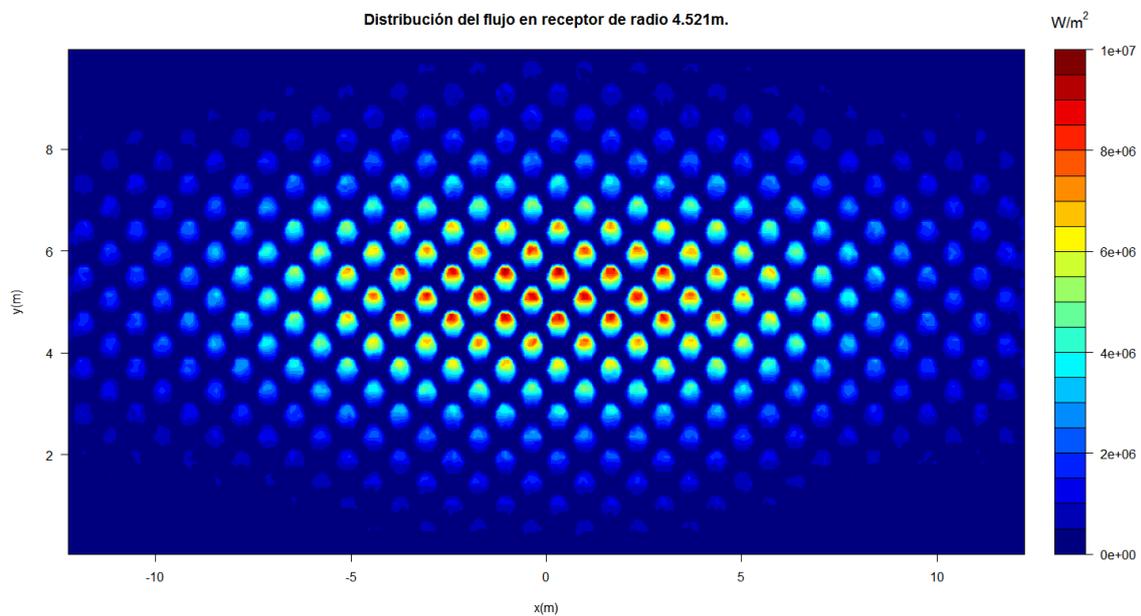


Ilustración 85: Distribución del flujo en receptor de radio de apertura de 4.521 metros con reconcentradores de 32°

Radio 8.756 metros sin reconcentradores (550x100)

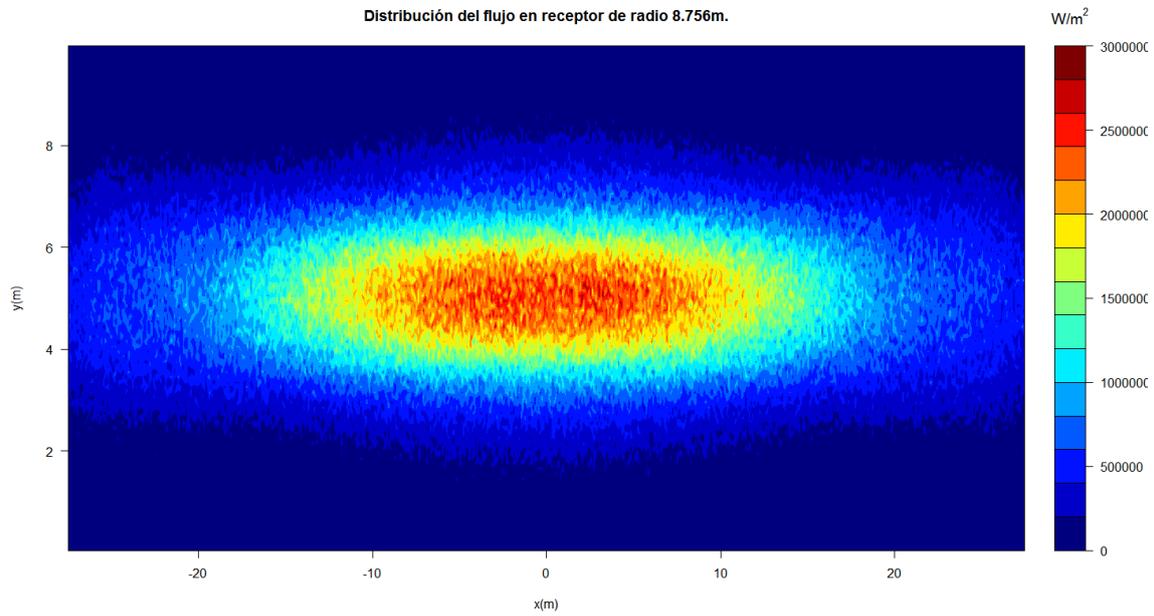


Ilustración 86: Distribución del flujo en receptor de radio de 8.756 metros sin reconcentradores

Radio total apertura 8.756 metros con reconcentradores (512x100)

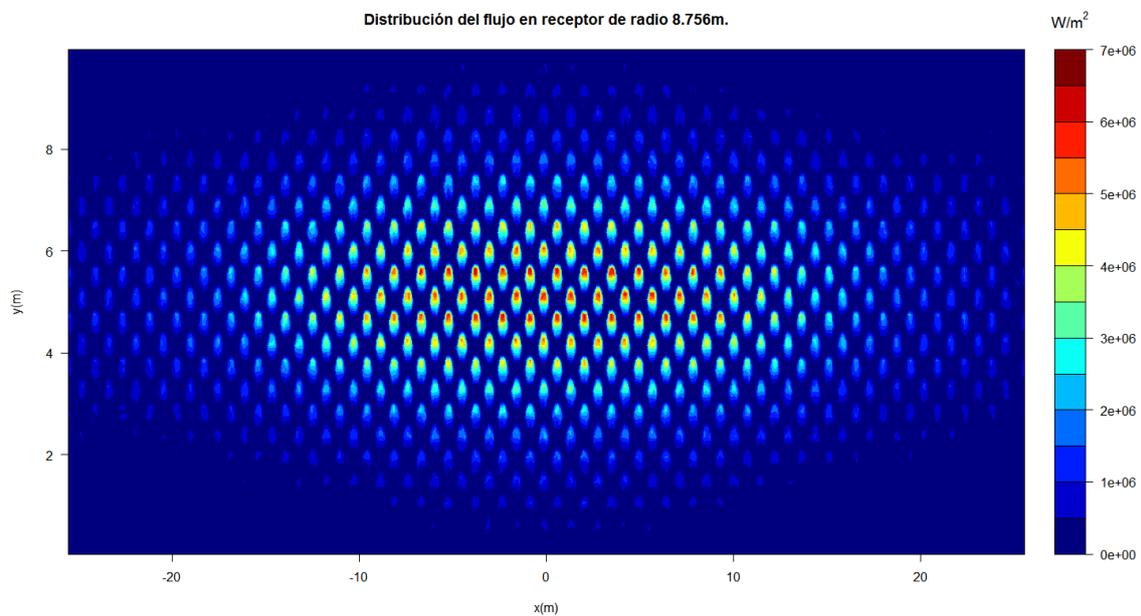


Ilustración 87: Distribución del flujo en receptor de radio de apertura de 8.756 metros con reconcentradores de 32°

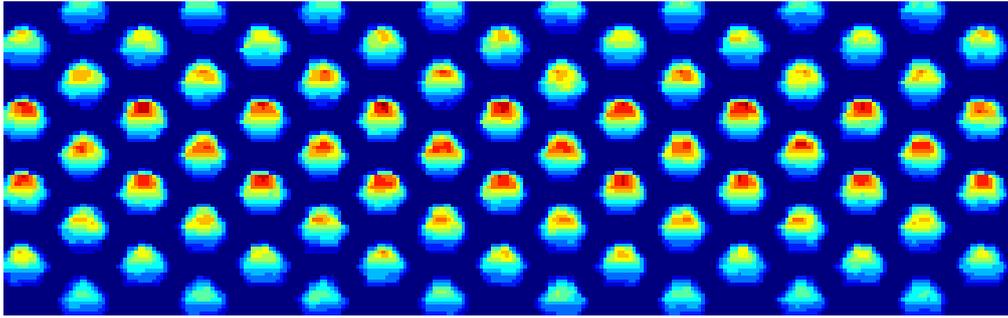


Ilustración 88: Sección del receptor de radio apertura 8.756 metros con reconcentradores de 32° (512x100)

Las gráficas obtenidas nos permiten obtener varias conclusiones de interés. En primer lugar se debe tener en cuenta que al existir en todas las ilustraciones el mismo tamaño de celda el valor de la densidad de flujo térmico es comparable en todos los casos. Lo que no podemos comparar entre gráficas son los colores mostrados ya que las escalas no son iguales, es decir, las zonas rojas de la ilustración 86 no dan la misma potencia que las rojas de la 87. Por lo tanto nos debemos fijar en la escala para comparar magnitudes del flujo.

Se puede observar en las ilustraciones obtenidas la gran diferencia que hay en el perfil del flujo solar si introducimos reconcentradores. En el receptor cilíndrico externo la radiación rodea a la torre siendo mayor donde el receptor apunta al norte, las diferencias aumentan progresivamente conforme nos acercamos al norte y a la altura media del receptor. Sin embargo, en un receptor con reconcentradores, la radiación llegará tan solo a los hexágonos que forman la salida de los concentradores secundarios. Además dentro de cada hexágono se aprecian diferencias importantes de concentración. Por lo tanto, con reconcentradores se podría hablar de dos gradientes térmicos distintos: el primero es el que se produce en toda la superficie cilíndrica debido a que la radiación se concentra en hexágonos y hay huecos entre ellos a los que no llega radiación mientras el segundo es el que se da dentro del propio hexágono.

Los gradientes térmicos entre hexágonos son muy altos. Esto hace que no tenga sentido usar un receptor tubular en el que los tubos rodearían el receptor ya que las tensiones que provocarían estos gradientes serían muy elevadas y podrían provocar graves daños en los materiales de los receptores y acortar la vida útil de la planta de manera importante. Se hace necesario el uso de módulos formados por receptores volumétricos integrados cada uno de ellos con un concentrador secundario, tal y como el que muestra la ilustración 51, dando lugar a un panel de estas uniones. El hecho de emplear estos módulos de receptor volumétrico permite tener un receptor presurizado y aire como fluido de trabajo. De este modo será posible utilizar en la instalación una turbina de gas que sería posible integrarla en un ciclo combinado, es decir, el abanico de diseños para la central se ampliaría.

En lo referente al gradiente térmico dentro de los hexágonos, habría que comentar que aun siendo alto no es peor que el que se da sin reconcentradores. Se puede ver como la concentración cambia mucho dentro del reconcentrador, la variación es mayor que si no hay concentradores secundarios. Se concentra una mayor radiación en la parte superior del reconcentrador debido a que los rayos inciden desde abajo (Ilustración 88). Esta mayor concentración condiciona el camino que sigue el fluido dentro del receptor: será conveniente que el fluido entre por la parte superior y salga por la inferior porque así el choque térmico es mayor y se alcanzan más rápido altas temperaturas. Además, entrando el fluido por la parte superior se reducen las pérdidas térmicas ya que actuaría como un fluido a contracorriente del receptor.

Esta diferencia de concentraciones hace que se alcancen valores de densidad de flujo máxima mayores. Se recogen en la siguiente tabla:

Radio (m)	Densidad de flujo máxima (W/m ²)	
	Sin reconcentradores	Con reconcentradores
4	4600000	11000000
4.521	4400000	10000000
8.756	3000000	7000000
4.521 sin reconcentradores frente a 8.756 con reconcentradores		1.591

Tabla 11: Comparación concentración máxima (500x500)

El facto de comparación de densidades de flujo máximas (1.591) es mayor que el previsto (1.24). Esto se debe a este segundo gradiente térmico que hace que la densidad máxima sea mayor aunque, en realidad, la comparación de densidad media sí sea de 1.24.

En cualquier caso con reconcentradores de semiángulo de aceptación 32° habría que realizar modificaciones en el lay-out u orientación del tipo de receptor para que realmente fuesen efectivos ya que las pérdidas de potencia y el elevado valor del radio del receptor no compensan el incremento en la densidad de flujo. A esto habría que añadir la necesidad de un sistema de refrigeración de los reconcentradores (en el que el agua entre por la parte superior debido a la mayor temperatura de la misma), de un adecuado mantenimiento, de unas mayores dificultades de construcción y de un mayores costes. Por ello se ha analizado un semiángulo de aceptación de 40° para ver cómo cambia el funcionamiento del sistema.

6.2.4 ANÁLISIS RECONCENTRADORES CON SEMIÁNGULO DE ACEPTANCIA 40°

Las pérdidas ópticas y el aumento necesario del radio del receptor con concentradores secundarios de 32° de semiángulo de aceptación son altos. Se ha probado cambiando este ángulo por 40°.

Nuevamente se han analizado 3 radios de apertura distintos con reconcentradores ya que sin reconcentradores siguen siendo los mismos que en el apartado 6.2.3 a excepción del radio 7.116, que con 32° no se ha analizado.

- Radio 4 metros.
- Radio 4.521 metros: El necesario para que no haya spillage en el heliostato más lejano.
- Radio 7.116: El suficiente para que no haya pérdidas ópticas por mayores ángulos de incidencia que de aceptación. El valor del parámetro 't' es 1.574.

Los parámetros que definen los reconcentradores son: apotema del hexágono de salida 0.26 m, concentración máxima posible 1.556, altura 0.61 m y lados de los hexágonos de entrada y salida de 0.46 y 0.3 m. Por lo tanto, el hexágono de salida es igual que antes para que los receptores volumétricos sean los mismos, lo que cambia es el hexágono de entrada que será más pequeño al ser ahora la concentración menor.

6.2.4.1. POTENCIA

Radio (m)	Sin reconcentradores (W)	Con reconcentradores (W)	Eficiencia
4	257512689	191705136	0.744
4.521	261093541	202927467	0.777
7.116	266026032	226966054	0.853
4.521 sin reconcentradores frente a 7.116 con reconcentradores			0.869

Tabla 12: Potencias sin y con reconcentradores de semiángulo de aceptación de 40°

La eficiencia que en realidad nos importa es la de 7.116 con reconcentradores frente a la de 4.521 sin ellos ya que son los casos en los que están en igualdad de condiciones. Esta eficiencia es del 87%.

Se logra un incremento de potencia mayor del 8% respecto a una aceptación de 32°.

La eficiencia es mejor que antes pero aun así se pierde bastante potencia por lo que siguen existiendo unas limitaciones que habrá que estudiar en el diseño de la planta. Se deberán analizar también los cambios térmicos introducidos.

	Sin reconcentradores Radio 4.521 m	Con reconcentradores con radio de apertura a 8.756 m (teórica)	Concentración
Área al que llega radiación	284.063 m ²	189.886 m ²	1.496

Tabla 13: Concentración conseguida con reconcentradores de 40°

A pesar de haber bajado el semiángulo de aceptación se puede observar como la concentración no se ha visto especialmente reducida. Esto se debe a que el parámetro 't' por el que se debe multiplicar el radio para que no haya pérdidas ópticas en la última fila es bastante menor que antes, por lo que a pesar de la menor razón geométrica de concentración que se tiene con un ángulo de 40° respecto a uno de 32°, al ser inferior el radio del receptor la concentración será similar. Asimismo el truncamiento gravará menos la concentración cuanto mayor sea el semiángulo de aceptación. En un principio, según lo calculado en el apartado 7.1.6 la concentración debía haber sido de $1/\sin(40)$ (igual a 1.556) pero debido al truncamiento y al parámetro 't' será algo menor.

El producto de las pérdidas ópticas por la concentración en este modelo queda $0.869 \times 1.496 = 1.3$. Recordamos que esto es una aproximación pero podemos asegurar que probablemente ahora la temperatura alcanzada será mayor que con un ángulo de 32°.

Las pérdidas de potencia siguen siendo lo suficientemente altas como para provocar la pérdida de eficiencia de la planta. Esta eficiencia deberá ser mejorada mediante un nuevo diseño del lay-out del campo de heliostatos o un nuevo diseño del receptor. Además hay que tener en cuenta que a estas pérdidas ópticas hay que añadir las debidas a la reflectividad y otros factores ya vistos que empeoran el rendimiento de la central.

De todas formas podemos imaginar, que en esta central el semiángulo de aceptación óptimo con receptor cilíndrico se encuentra entre 32° y 40° ya que en el primero 't' es muy alto y en el segundo la razón de concentración no es elevada. Aun así la eficiencia dependerá del diseño interno del receptor y de la instalación. En estos se deberá tener en cuenta lo que en este trabajo se describe. De cualquier modo estas pérdidas de potencia con receptor cilíndrico hacen necesario el estudio de un nuevo tipo de receptor en el que estas se vean reducidas, esto se ha hecho en el apartado 6.2.7.

6.2.4.2. INFLUENCIA EN EL LAY-OUT

Potencia con reconcentradores. Escala 0-120000.

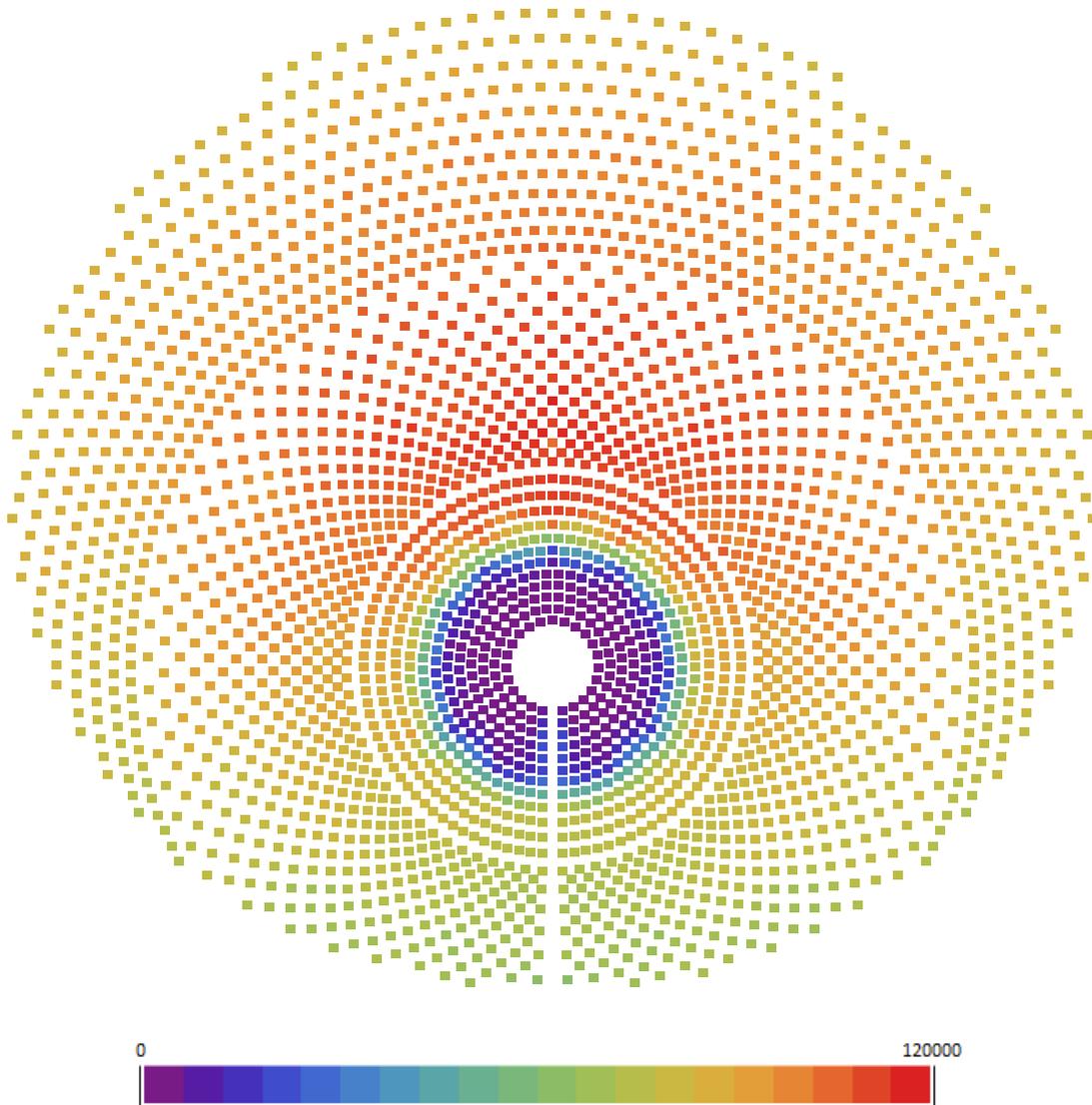


Ilustración 89: Potencia que llega al receptor reflejada por cada heliostato cuando hay reconcentradores de 40°. Escala 0-120000.

Podemos observar los mismos efectos que con reconcentradores de 32° de semiángulo de aceptación. La diferencia consiste en que ahora al aceptar mayores ángulos de incidencia los reconcentradores, los heliostatos de las primeras filas van a dar una mayor potencia. Ya no son tantos los heliostatos que no cumplen su cometido.

Potencia con reconcentradores. Escala 60000-120000.

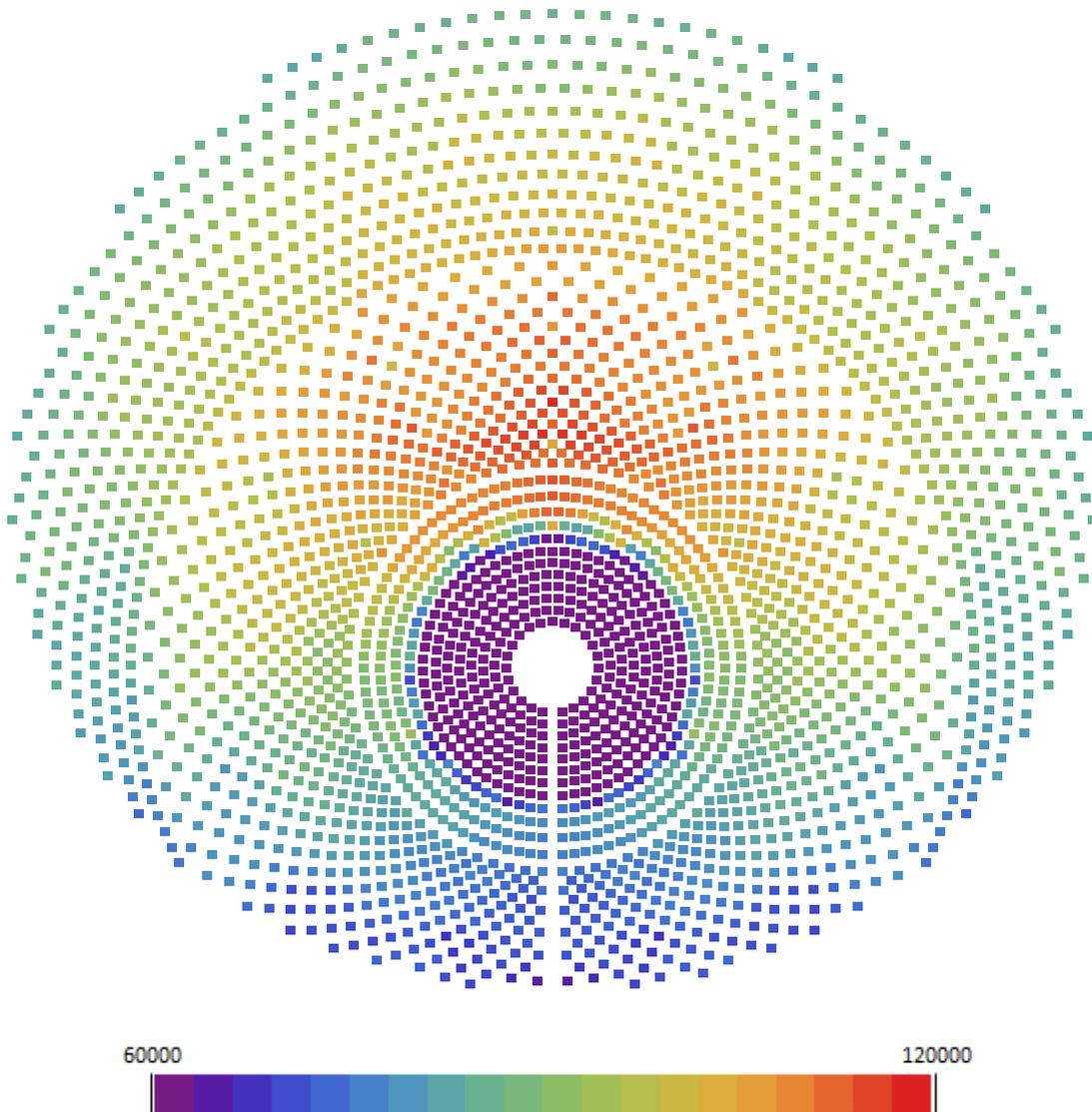


Ilustración 90: Potencia que llega al receptor reflejada por cada heliostato cuando hay reconcentradores de 40°. Escala 60000-120000.

Volvemos a apreciar el efecto coseno ya que los heliostatos al sur dan menos potencia así como los más laterales. Se ve también que las 7 primeras filas no llegan a los 60000 W de potencia.

Eficiencia óptica sobre la radiación que da cada heliostato

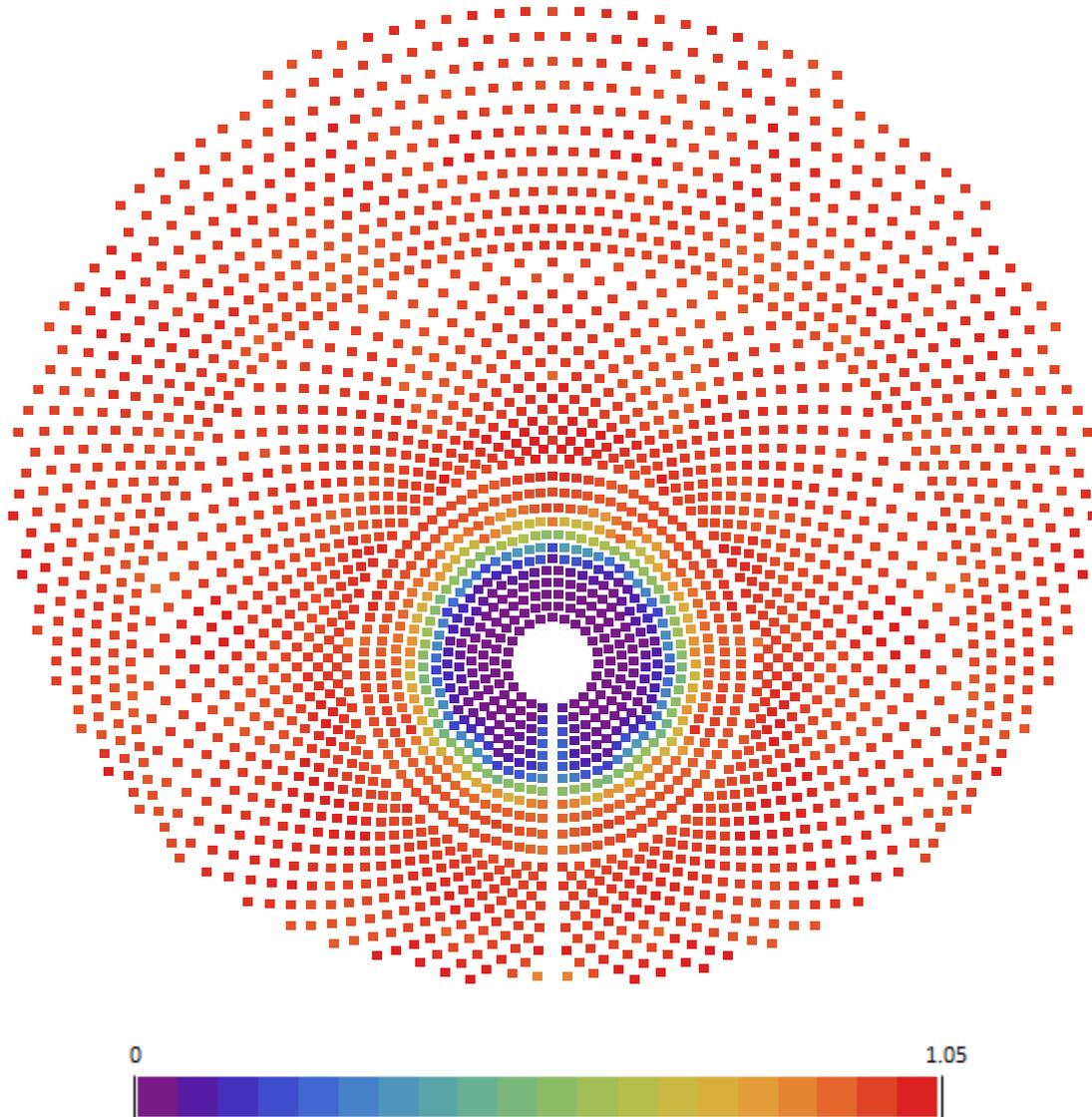


Ilustración 91: Eficiencia sobre la potencia que da cada heliostato cuando hay reconcentradores respecto a cuándo no los hay. 40°.

La influencia en el lay-out es la misma que antes aunque ahora la eficiencia global es mejor debido a unas primeras filas que transmiten más potencia. A partir de las 12 primeras la eficiencia es 1, las dos últimas incluso la superan gracias a una mejor actuación frente al spillage. Es en la octava fila donde se produce un fuerte descenso que hace que pase de superar la eficiencia el 90% a bajar al 55%. En las 5 primeras la potencia que llega es prácticamente inexistente excepto en los heliostatos que apuntan al hueco que hay entre los reconcentradores más extremos, aun así estos también dan muy poco. Por lo tanto se deberán eliminar las filas más cercanas a la torre y sustituirlas por otras tras la última fila a pesar de que como antes se ha dicho no se consigue buena eficiencia. Otra opción es cambiar el diseño del receptor.

6.2.4.3. DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO TÉRMICO

La distribución sin reconcentradores es como en el punto 6.2.2.3, excepto con 7.116 m.

Radio total apertura 4 metros con reconcentradores (213x100)

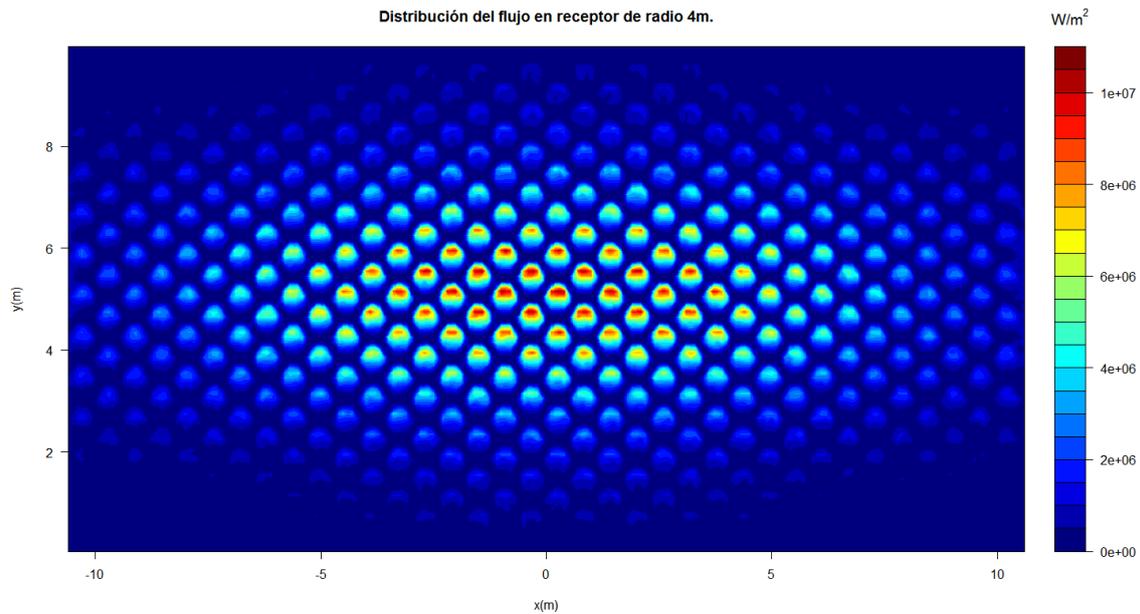


Ilustración 92: Distribución del flujo en receptor de radio de apertura de 4 metros con reconcentradores de 40°

Radio total apertura 4.521 metros con reconcentradores (246x100)

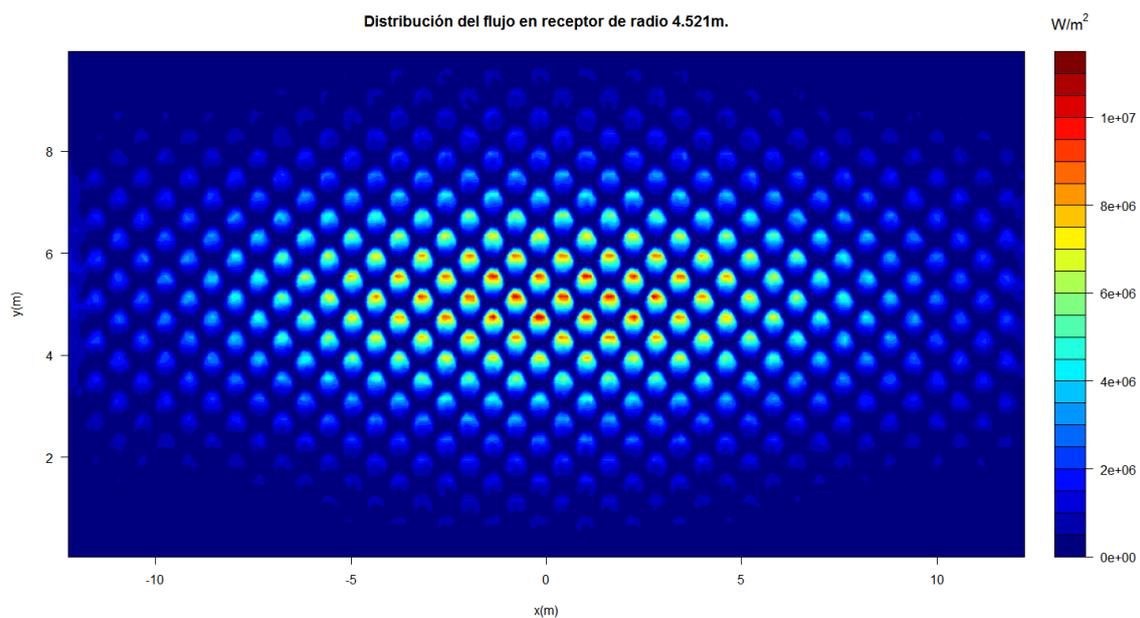


Ilustración 93: Distribución del flujo en receptor de radio de apertura de 4.521 metros con reconcentradores de 40°

Radio 7.116 metros sin reconcentradores (447x100)

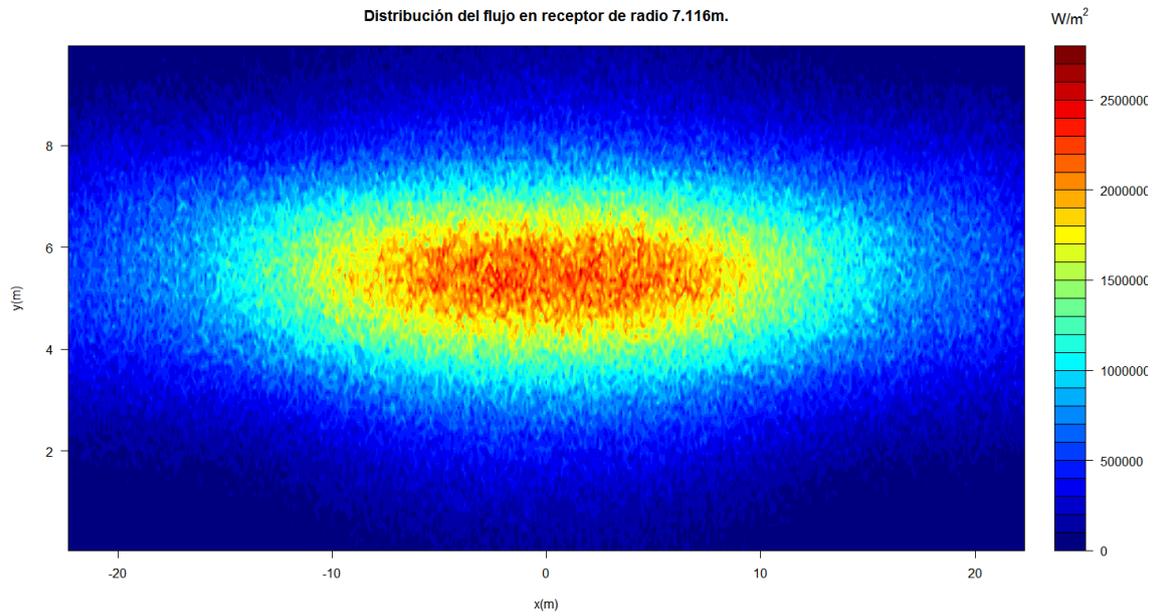


Ilustración 94: Distribución del flujo en receptor de radio de 7.116 metros sin reconcentradores

Radio total apertura 7.116 metros con reconcentradores (409x100)

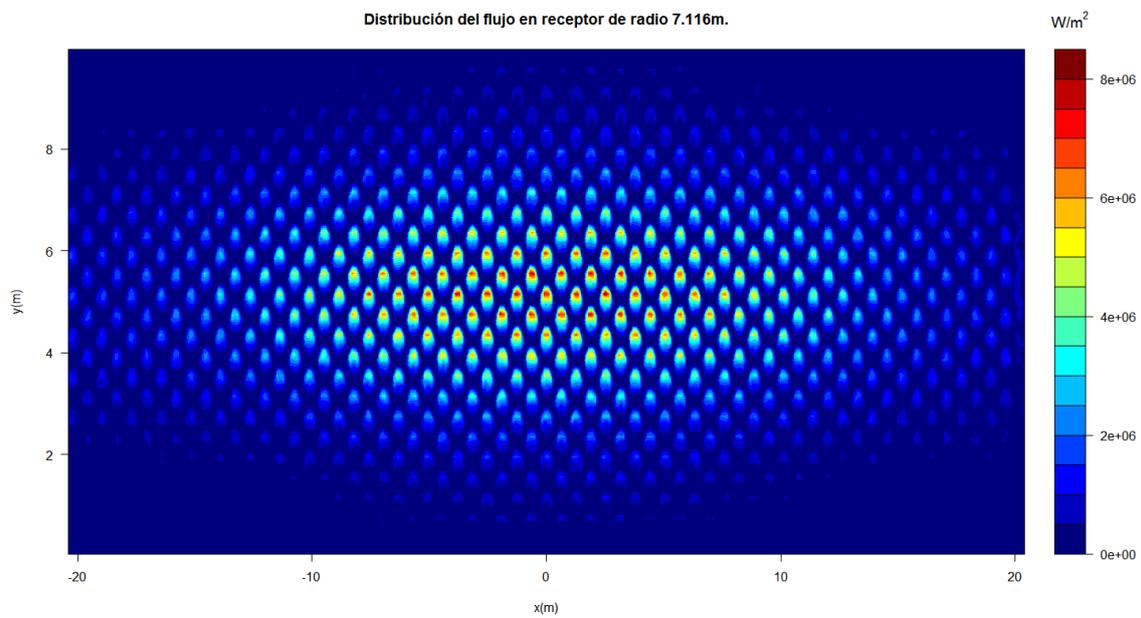


Ilustración 95: Distribución del flujo en receptor de radio de apertura de 7.116 metros con reconcentradores de 40°

En las ilustraciones 92, 93, 94 y 95 se muestra lo que ocurre con reconcentradores y cuando el radio es 7.116 y no tiene concentradores secundarios. Nuevamente el tamaño de celda es el mismo en todas las imágenes.

Lo primero que podemos observar es el mayor número de concentradores para un mismo radio del receptor cuando el semiángulo de aceptación es de 40°. Esto es lógico ya que para una misma dimensión del hexágono de salida, el de entrada ha de ser más pequeño ya que se está concentrando menos. Por lo tanto cabrán más reconcentradores y se requerirán más receptores volumétricos que en el caso anterior, esto significa un coste superior.

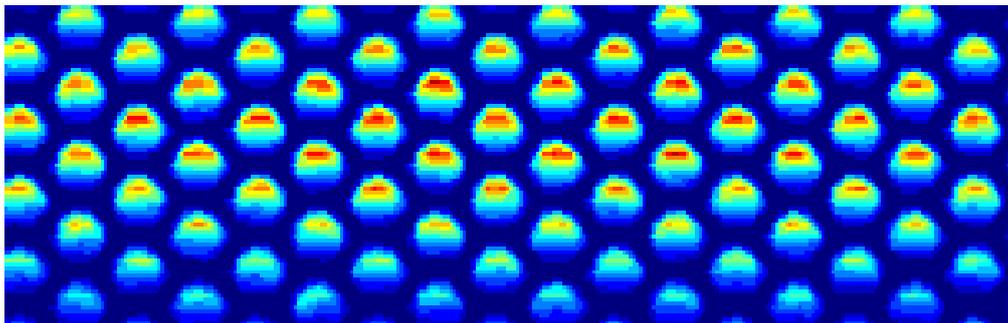


Ilustración 96: Sección del receptor de radio apertura 7.116 metros con reconcentradores de 40° (40x100)

Se vuelven a apreciar esos dos gradientes térmicos. Uno en toda la superficie cilíndrica que implica que haya que usar de nuevo receptores volumétricos para que los concentradores secundarios tengan utilidad, y otro dentro del propio hexágono. En el área de salida de los reconcentradores vemos ahora como este gradiente térmico es mayor que con 32° por lo que la densidad de flujo máxima es considerablemente mayor a la aproximada mediante el producto de la eficiencia óptica por la concentración (tabla 14). El fluido incrementará su temperatura más rápido pero esto no tiene por qué ser positivo. Dependerá del diseño del receptor. Al igual que con 32° será conveniente que el fluido entre por la parte superior del receptor para aprovechar el choque térmico y reducir las pérdidas térmicas. En cualquier caso estas pérdidas ya habían sido reducidas gracias a la disminución de área radiante del receptor.

Radio (m)	Densidad de flujo máxima (W/m ²)	
	Sin reconcentradores	Con reconcentradores
4	4600000	11000000
4.521	4400000	11500000
7.116	2800000	8500000
	4.521 sin reconcentradores frente a 7.116 con reconcentradores	1.932

Tabla 14: Densidades de flujo máxima para un semiángulo de aceptación de 40°

Si comparamos con el sistema en el que el semiángulo de aceptación era de 32° vemos que la densidad de flujo térmico ahora es mayor, es decir, la temperatura es mayor. Esto es lo que nos interesa. Al conseguir una mayor potencia debido a unas menores pérdidas ópticas es compensada esa ligera disminución en la concentración. Otros aspectos que cambian y que ya han sido mencionados son un mayor número de receptores volumétricos y un mayor gradiente térmico dentro de los mismos. Esto va a reportar unos costes algo mayores y probablemente una peor eficiencia térmica por lo que a pesar de las ventajas en temperatura con 40° existen estas desventajas. En cualquier caso los beneficios térmicos que se puedan conseguir vendrán condicionados por el diseño que se haga de los receptores, cuáles sean los recorridos que hace el fluido por el interior del conjunto de receptores y otros factores de diseño. Por lo tanto la introducción de concentradores secundarios implica un exhaustivo diseño del receptor para realmente aprovechar los beneficios de los reconcentradores.

Aunque el semiángulo de aceptación óptimo vaya a estar seguramente entre 32° y 40° , según el diseño del receptor, ha quedado claro en las simulaciones de ambos ángulos que un receptor cilíndrico no es el más adecuado si queremos introducir concentradores secundarios. Las pérdidas ópticas producidas en las primeras filas del campo hacen que la eficiencia de la planta descienda, asimismo habría que tener en cuenta las pérdidas por una reflectividad no igual a 1. Aunque sí se consigue aumentar la temperatura, no se obtiene el máximo rendimiento posible de la central. Para ello habrá que cambiar bien el lay-out como se ha visto en los apartados de influencia del lay-out o bien modificar el receptor. La segunda opción es más eficaz. No se trata de mejorar solo sus propiedades térmicas sino también las ópticas de modo que cambiando su orientación o geometría sea posible aumentar la eficiencia.

6.2.5 ANÁLISIS REFLECTIVIDAD RECONCENTRADORES

Los concentradores secundarios no tienen reflectividad 1 por lo que cuando los rayos solares inciden sobre ellos parte de la radiación se perderá por transmisión o absorción en la superficie de los reconcentradores. Estas serán otras pérdidas ópticas consecuencia de la introducción de concentradores secundarios.

Para ver su influencia se ha considerado el caso de un receptor de radio 8.756 metros con reconcentradores de semiángulo de aceptación de 32° y cuya superficie tiene reflectividad 0.95. En este caso la potencia que llegará al receptor será de 201894186 W, es decir, se produce una pérdida adicional del 3.627% respecto a cuándo tomamos reflectividad 1. Este porcentaje perdido menor del 5% nos da a entender que una parte importante de los rayos llegan hasta el receptor sin tocar la superficie de los concentradores secundarios.

Al ser un parámetro cuya influencia es modificable por el diseñador, no como las pérdidas ópticas por la aceptación, que para cierta geometría son inevitables, la reflectividad se evalúa por separado.

6.2.6 ANÁLISIS RECONCENTRADORES SEGÚN HORA DEL DÍA

Se ha analizado como afecta el momento del día en el que nos encontremos a la potencia, eficiencia de los reconcentradores así como a la distribución del flujo térmico en el receptor. Se ha simulado el día 21 de marzo a 5 horas distintas y para un radio de 4.521 metros sin reconcentradores (número de celdas 284x100) y para un radio de 8.756 con reconcentradores de semiángulo de aceptación de 32° (número de celdas 512x100).

Hora	Reconcentradores 32° (W)	Sin reconcentradores (W)	Eficiencia
8:30	128590579	150014948	0,857
11:00	198050354	244954158	0,809
13:30	209491851	261093541	0,802
16:00	197604589	245165962	0,806
18:30	123342845	151081090	0,816

Tabla 15: Potencia y eficiencia según hora del día

Se puede ver como la eficiencia de los reconcentradores es independiente de la hora del día ya que el sol variará su posición pero el camino que recorren los rayos desde que son reflejados por los heliostatos hasta que llegan al receptor es el mismo, los ángulos de incidencia no cambian. Según el momento del día en que nos encontremos variarán la potencia que llega al receptor y la eficiencia de la planta, siendo mayores al mediodía, pero la eficiencia óptica de los concentradores secundarios será la misma porque los rayos reflejados por los heliostatos seguirán teniendo los mismos ángulos de incidencia al ser los heliostatos y el receptor fijos, no móviles.

Un aspecto que hasta ahora no hemos analizado es que sabiendo que la central de Gemasolar (similar a la estudiada en este trabajo) tiene una potencia nominal de 19.9 MW [5], y que hemos ido viendo unos muy superiores valores de potencia que llega hasta el receptor a lo largo de este trabajo, se puede afirmar que las pérdidas de la central debidas a la eficiencia eléctrica y térmica son altas (Ilustración 13).

En la ilustración 95 hay que tener en cuenta que la escala de colores de la densidad de flujo no es la misma con y sin reconcentradores aunque los valores que se obtienen mirando en ella según el color sí son comparables. El color rojo de las ilustraciones de la izquierda significa menos densidad de flujo que a la izquierda.

En la distribución del flujo se aprecia el efecto coseno. A primeras horas del día son los heliostatos al oeste los que dan más potencia, esto va cambiando a lo largo del día para terminar el día siendo los heliostatos al este los que sufren en menor medida el efecto coseno.

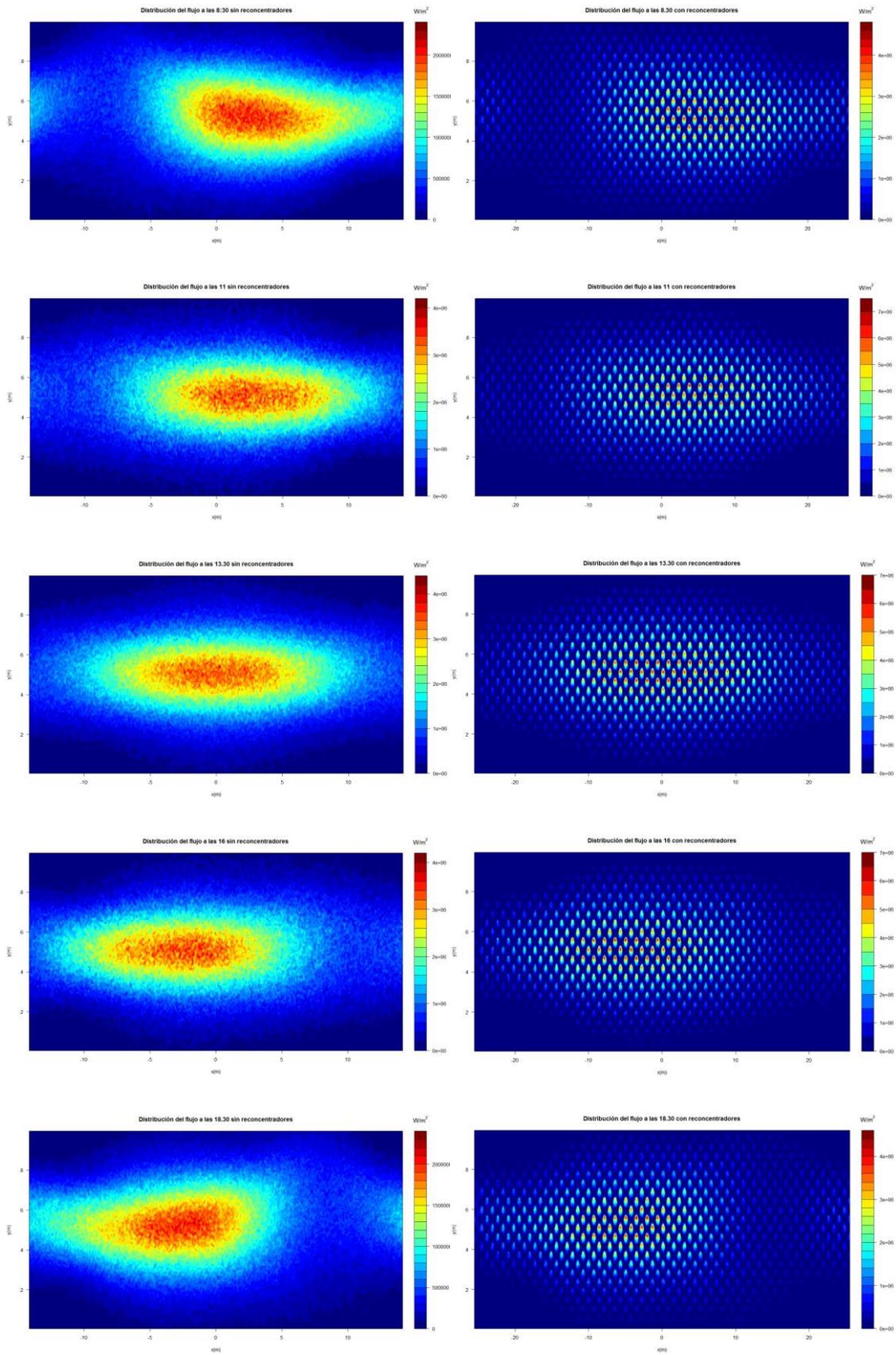


Ilustración 97: Distribución del flujo con y sin reconcentradores a las 8:30, 11, 13:30, 15 y 18:30

6.2.7. ANÁLISIS CONCENTRADORES SECUNDARIOS INCLINADOS HACIA EL CAMPO DE HELIOSTATOS

6.2.7.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Las principales pérdidas de radiación en los reconcentradores se ha visto que se deben a las elevadas pérdidas ópticas en las primeras filas del campo de heliostatos debido a los grandes ángulos de incidencia de los rayos reflejados por estos heliostatos. Una manera de solucionar este problema consiste en inclinar los concentradores secundarios hacia el campo de heliostatos ya que esto permite que estos ángulos sean menores y que desciendan las posibilidades de que sean rechazados por los reconcentradores.

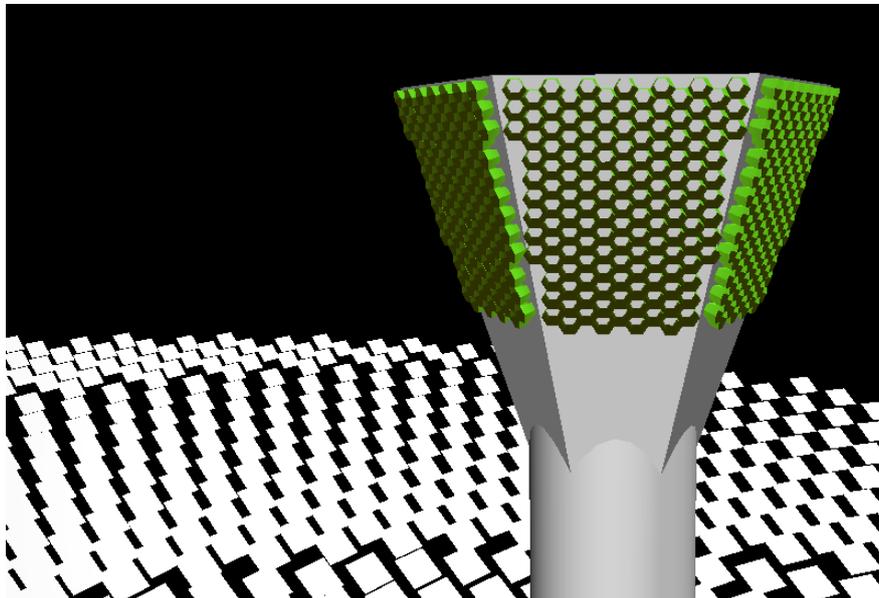


Ilustración 98: Sistema empleado en Tonatiuh con reconcentradores inclinados

Inclinar los concentradores secundarios hacia abajo implica restricciones de tipo geométrico. Si queremos que los reconcentradores sigan formando un panel, el receptor ya no puede ser cilíndrico ya que no encajarían entre ellos. El receptor deberá ser plano. Al ser el campo circular se precisarán varias superficies planas rodeando la torre y dando lugar al receptor.

Se ha decidido utilizar 6 superficies para el receptor abarcando cada una de ellas 60° del campo. Por lo tanto, el campo de heliostatos, el mismo que se ha utilizado hasta ahora, quedará dividido en 6 partes cada una de las cuales apuntará a una superficie del receptor distinta. Cada sección del campo tendrá su correspondiente aiming point a una altura de 125.63 metros en el centro de la respectiva superficie del receptor al que dirigen sus rayos. Hay por tanto 6 aiming points distintos.

El ángulo de inclinación de los reconcentradores, y por tanto del receptor, es el que forma el aiming point con la distancia media del campo de heliostatos, es decir, a 427.5 metros de la torre.

El semiángulo de aceptación escogido para los reconcentradores es de 40° ya que al ser cada división del campo de 60°, los heliostatos situados en los laterales de las secciones tendrán como mínimo 30° de ángulo de incidencia. Si a este número le sumamos los incrementos angulares debidos a errores de los heliostatos y radiación solar así como los ocasionados por una mayor distancia a lugar al que apuntan los reconcentradores, este ángulo subirá pero no lo suficiente para superar los 40° de aceptación.

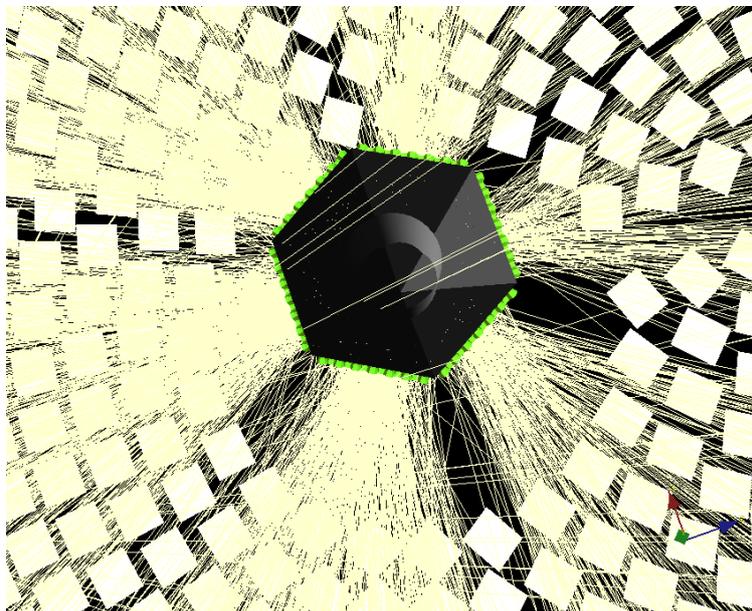


Ilustración 99: Vista de los seis aiming points

El tamaño del receptor se ha hecho tal que no haya pérdidas por spillage ni por rechazo de rayos debido a grandes ángulos de incidencia. De este modo queda un lado del hexágono donde están las aperturas de los reconcentradores de 9 metros a la altura del aiming point.

$$\text{Ángulo inclinación del receptor} = \tan^{-1}\left(\frac{125.63}{427.5 - \frac{\sqrt{3}}{2} \times 9}\right) = 0.291 \text{ radianes} \quad (6.2.10)$$

Se tiene por lo tanto un receptor inclinado 16.66° y con ello unos reconcentradores inclinados con dicho ángulo hacia abajo. Mediante geometría se han calculado los diferentes parámetros que definen la pirámide hexagonal en la que consiste el receptor. Esta pirámide tendrá una altura de 29.036 metros y una apotema en la parte superior de 8.679 metros.

6.2.7.2 POTENCIA

Se ha calculado la potencia que llega al receptor considerando cuando hay reconcentradores de 40° y cuando no los hay, en este caso también con receptor piramidal.

Potencia (W)		Eficiencia
Con reconcentradores 40°	Sin reconcentradores	
252861281	267899096	0.944

Tabla 16: Potencia sin y con reconcentradores inclinados

Asimismo se ha calculado la potencia que llega a cada una de las superficies del receptor siendo esta dependiente del número de heliostatos de cada subcampo y del efecto coseno.

Orientación superficie receptor	Potencia (W)
Norte	65449680
Noroeste	54865591
Sudoeste	29480112
Sur	18486319
Sudeste	29493206
Noreste	54887989
Potencia total	252662897

Tabla 17: Potencia que da cada superficie del receptor

La potencia sin reconcentradores es mayor que para un receptor cilíndrico de radio 4.521 porque este receptor es bastante más grande y se reducen las pérdidas por spillage. Para un mismo tamaño funcionaría peor. Sin embargo el uso de este receptor piramidal no se contempla sin reconcentradores, se calcula tan solo para ver la eficiencia de los mismos.

Comprobamos como la potencia que consigue dar el campo utilizando esta configuración en los reconcentradores es mayor que en el caso de que el receptor sea cilíndrico y vemos además como la eficiencia es más alta, del 94.4%. Sigue habiendo pérdidas por rechazo de rayos que tengan un elevado ángulo de incidencia, aunque ahora serán menores. Si nos limitamos a considerar la potencia, ahora sí que la introducción de concentradores secundarios provoca pérdidas que resultan muy fáciles de compensar por los beneficios de los reconcentradores. Aun así sigue habiendo una serie de limitaciones e influencias a tener en cuenta a la hora de abordar el diseño del campo de heliostatos.

Para saber la manera en que se han de implantar los reconcentradores habrá que estudiar las mejoras en concentración y compararlas con las pérdidas ópticas de potencia. Asimismo se ha de estudiar el perfil del flujo térmico y conocer las limitaciones introducidas.

6.2.7.3 INFLUENCIA EN EL LAY-OUT

La buena eficiencia óptica calculada se consigue gracias a un valor relativamente alto del semiángulo de aceptación. Si quisiéramos usar concentradores de menor ángulo de aceptación habría que realizar más particiones en el receptor, por ejemplo, con 32° de aceptación habría que pasar a 8 superficies del receptor y por ello a 8 subcampos de heliostatos.

En cualquier caso si se quiere obtener un rendimiento óptimo del sistema habrá que hacer modificaciones en el lay-out del campo de heliostatos.

Con este tipo de receptor los heliostatos que más sufrirían la pérdida de potencia serían los que se encuentran en la frontera entre divisiones del campo y también los que más lejos o más cerca están de la torre (al estar inclinados los concentradores secundarios hacia la distancia central del campo), al ser todos ellos los que reflejan rayos con un mayor ángulo de incidencia. El problema se acentuará en las esquinas de cada división del campo de heliostatos.

El primer problema (pérdidas en fronteras entre subcampos) se puede solucionar partiendo el receptor más veces, con los problemas que ello puede suponer ya que aumenta el área del receptor y con ello disminuye la eficiencia térmica y se incrementan los costes. Sin embargo, la segunda desventaja (pérdidas en los heliostatos más alejados del punto al que están inclinados los reconcentradores) no se puede arreglar del mismo modo. Hasta ahora al estar el eje de los reconcentradores en horizontal conforme más nos alejábamos de la torre el cono de radiación se hacía mayor y aumentaba el ángulo de incidencia pero este efecto era en parte compensado ya que el rayo se aproximaba cada vez a un rayo horizontal y por ello al eje del reconcentrador. Ahora no, si nos alejamos de la torre el ángulo de incidencia aumenta también en ese sentido. A pesar de ello, cuanto más nos acercamos a la torre mejor va a funcionar este caso respecto cuando los reconcentradores estaban en horizontal. Por lo tanto un diseño óptimo de lay-out es muy importante. En cualquier caso podemos decir, que si los reconcentradores están inclinados, en centrales de poca potencia, con campos de heliostatos pequeños, los concentradores secundarios serán más efectivos que en centrales grandes debido a esa dependencia respecto a la distancia a la torre. Esto hace que cuando tengamos concentradores secundarios inclinados el tamaño de la central esté mucho más limitado que cuando no los hay y con ello la potencia idónea de trabajo sea menor.

Recordamos que existen dos posibles configuraciones del lay-out: Circular y unidireccional (en nuestro caso en dirección norte). El campo unidireccional tiene unas pérdidas mucho mayores por spillage y atenuación atmosférica, además se requiere una torre más alta.

Por el contrario en una central circular los heliostatos más al sur sufrirán en mayor medida el efecto coseno pero su eficiencia total es muy probable que resulte mayor, lo cual es más evidente cuanto más cerca del Ecuador estemos. En un campo que rodea a la torre variará mucho la eficiencia cuanto más al norte esté situado, no así en uno unidireccional. Tendrá una mayor potencia de trabajo un campo que rodea a la torre ya que los valores tan elevados de la atenuación atmosférica a distancias lejanas de la torre hacen difícil su uso para campos de heliostatos grandes y por lo tanto centrales de gran potencia. Este hecho se refuerza en mayor medida si tenemos reconcentradores porque, como se ha visto en el anterior párrafo, las pérdidas ópticas debidas al rechazo de rayos se incrementarán si las distancias a la torre son grandes.

Por lo tanto se puede concluir que la mejor distribución del campo de heliostatos si tenemos concentradores secundarios es aquella que rodea la torre. Esto será todavía más evidente cuanto mayor sea la potencia de trabajo que se quiera conseguir y cuanto más cerca del Ecuador nos encontremos. En cualquier caso sí debe haber más heliostatos al norte de la torre para reducir el efecto coseno.

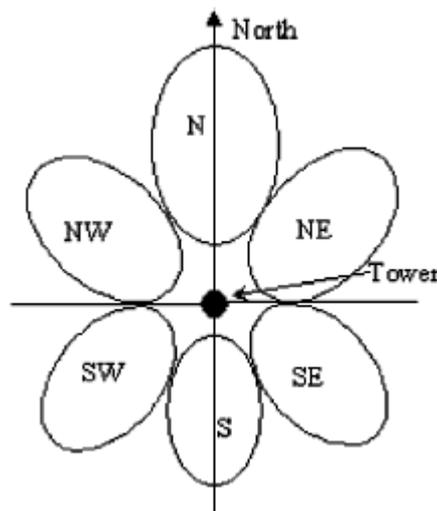


Ilustración 100: Campo de heliostatos de 6 divisiones con reconcentradores inclinados [16]

La ilustración 100 muestra un posible lay-out del campo de heliostatos rodeando a la torre. El campo está partido en 6 secciones. Cada división forma una elipse para evitar los heliostatos con ángulos de incidencia más altos. Aquí se ha optado por alargar cada división pero otra opción consiste en tener esos heliostatos en los huecos entre secciones y que estas secciones sean más cortas (parecido a la simulación hecha pero evitando las pérdidas ópticas). De esta manera se aprovechan heliostatos que dan más potencia pero debido a su mayor ángulo de incidencia habrá que o bien hacer más divisiones en el campo o bien usar reconcentradores con mayor ángulo de aceptación, por lo tanto se gana en potencia pero también el área del receptor es mayor.

En cualquier caso ya hemos visto que la potencia y eficiencia óptica son mejores sin concentradores secundarios. Sin embargo el rendimiento de una central viene determinado por la temperatura del fluido que lo recorre. Esta temperatura como veremos ahora puede ser aumentada en gran medida con reconcentradores por lo que el uso de los mismos viene determinado por este hecho. Igualmente los concentradores secundarios permiten reducir las pérdidas térmicas y ofrecen la posibilidad de utilizar turbinas de gas y con ello aprovechar el buen rendimiento de un ciclo combinado. Esto se analizará en el siguiente apartado.

6.2.7.4 DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO TÉRMICO

Calcular la ganancia en concentración no es sencillo al no llegar la radiación en todo el receptor de manera uniforme. Por ello, a modo de aproximación, se ha sumado las áreas de salida de los reconcentradores a las que llega radiación y se ha comparado con el área al que llegaba radiación en un receptor cilíndrico externo de radio 4.521 metros.

En el receptor de 4.521 metros de radio se ha estimado que de los 284.06 m² reciben radiación 244 m², mientras que en este caso de receptor inclinado se ha estimado que se completan 74 áreas de receptor que reciben radiación en cada una de las 6 superficies dan lugar a un área total de 103.97 m². Si dividimos una entre la otra obtenemos la ganancia en concentración, esta es de 2.35. La razón geométrica de concentración cuando el semiángulo de aceptación es de 40° es igual a $1/\sin(40)^2$, esto equivale a una concentración de 2.42 por lo que este receptor se acerca mucho a este valor, además habría que tener en cuenta que se ha calculado mediante una aproximación y existe truncamiento.

El incremento de la concentración es ahora muy evidente. Si realizamos, como hemos venido haciendo en este trabajo, el producto de la eficiencia óptica por la concentración introducida obtenemos que: $0.944 \times 2.35 = 2.212$. No se puede asegurar con esta fórmula que la temperatura se vaya a duplicar ya que depende de otros factores, como la reflectividad o el diseño interno del receptor, y además la expresión es una aproximación, pero sí se puede afirmar que la temperatura va a experimentar un notable incremento que conllevará beneficios al funcionamiento y eficiencia de la planta.

Esta afirmación se debe refrendar con el estudio del perfil del flujo térmico. Por ello se ha hallado en Tonatiuh la distribución del flujo térmico en cada una de las 6 superficies que componen el receptor.

Al igual que en las ocasiones anteriores los tamaños de celda son en todas las imágenes los mismos pero hay que fijarse en la escala de la derecha para conocer cuál es la densidad del flujo térmico en cada lugar del receptor.

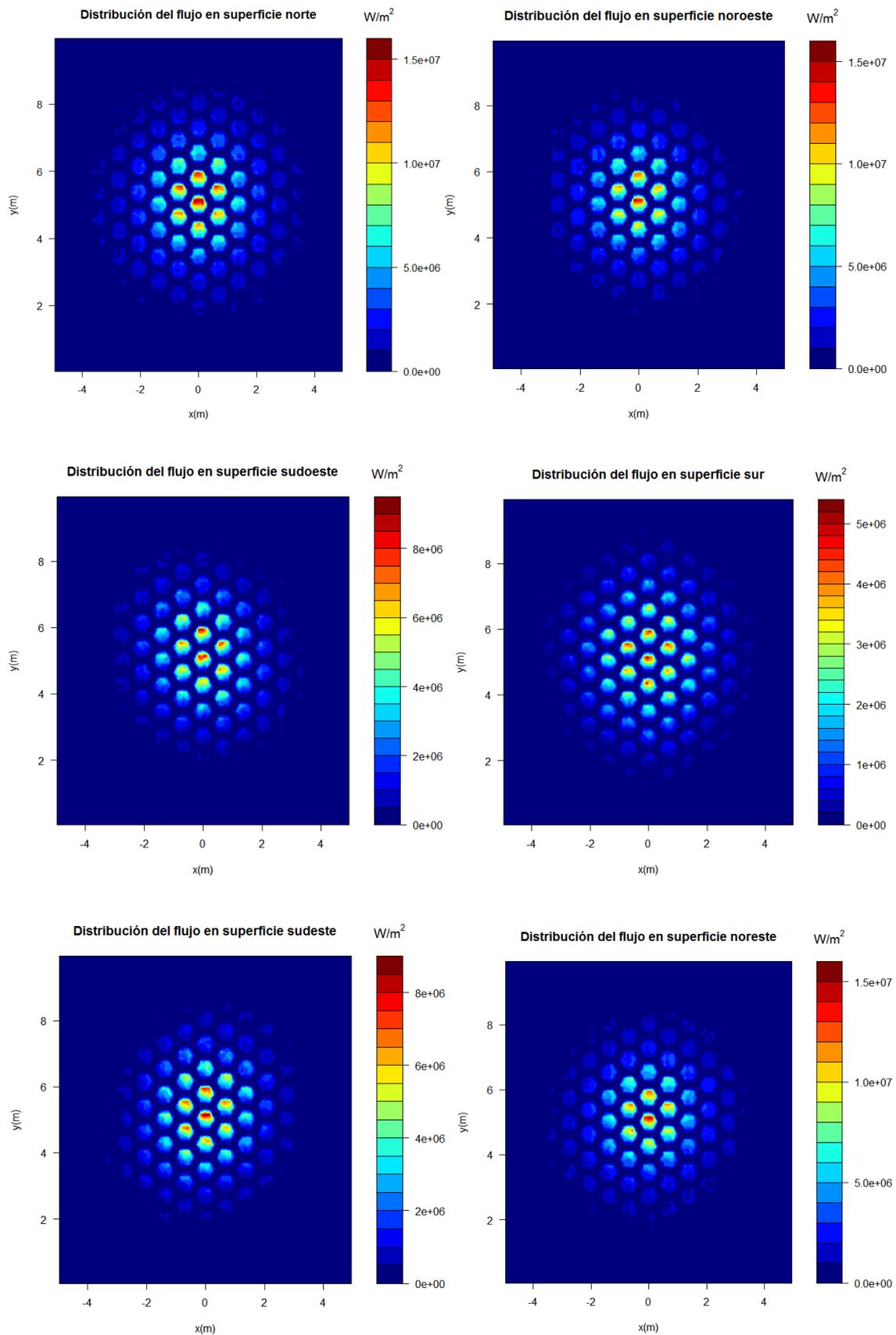


Ilustración 101: Distribución del flujo térmico en las superficies del receptor inclinado hacia el campo de heliostatos

Se puede ver cómo cuanto más al norte está una superficie más alta es la densidad de flujo térmico que hay en ella. Esto se debe a la mayor cantidad de heliostatos al norte y al efecto coseno.

Asimismo, tal y como ha ocurrido en el receptor cilíndrico, aquí también se aprecian los dos gradientes térmicos de los que se viene hablando por lo que será necesario que los receptores sean volumétricos y vayan unidos a un concentrador secundario. Además esto hace que los receptores sean presurizados y sea posible que la instalación ponga en marcha una turbina de gas.

Por otro lado la mayor densidad de flujo en la parte superior de los receptores vuelve a hacer que sea mejor introducir el fluido por la parte superior para conseguir un aumento más rápido de la temperatura y reducir las pérdidas térmicas. Asimismo estas pérdidas térmicas, a pesar del aumento de temperatura, no van a aumentar su magnitud gracias a la reducción de área de receptor que se posibilita. Igualmente descenderán las pérdidas por convección ya que como se puede recordar el receptor volumétrico incluye una vasija que contribuye a reducir estas pérdidas mediante la disminución del área y coeficiente de convección. Estas pérdidas por convección también disminuían cuando el receptor era cilíndrico.

Otro aspecto que se modifica es que al alcanzarse temperaturas tan elevadas en el receptor, de igual manera subirán su temperatura las paredes de los concentradores secundarios en mayor medida que en los casos anteriormente estudiados. Se deberá proceder a una correcta refrigeración de los mismos y a un adecuado diseño de los materiales de los que estarán fabricados los reconcentradores.

La mayor desventaja en esta central reside en lo limitado de su tamaño. Si inclinamos los reconcentradores hacia el campo cuanto más nos alejemos mayores serán los ángulos de incidencia y llegará un momento en el que ya no pueda dar potencia. En cualquier caso la central analizada es de gran tamaño y aun así es posible obtener una elevada potencia.

Por lo tanto, realizando las pertinentes modificaciones descritas en la forma del receptor y en el lay-out del campo es posible conseguir un uso muy positivo de los concentradores secundarios haciendo recomendable su empleo. Estas modificaciones han sido descritas y se deberán tener en cuenta a la hora de diseñar una central. Además entrarían en juego otras consideraciones como factores de tipo constructivo, económico, de operación de la planta o de diseño térmico. Hay que ser consciente de que para aprovechar los beneficios de los reconcentradores se deber realizar un diseño adecuado del receptor, sus materiales y de la distribución interior del receptor.

6.2.8. OTRAS VALORACIONES

Además de los aspectos ópticos térmicos ya comentados, la implantación de concentradores secundarios tiene otros efectos, algunos de ellos consecuencia de las características vistas en el apartado 4.

Por un lado tenemos las cargas en lo alto de la torre debidas al peso de los concentradores secundarios. Esto obliga a modificar el diseño de la torre para hacerla más resistente y que pueda aguantar los concentradores secundarios con el consiguiente aumento de los costes de fabricación. Estos costes también se incrementan por el mero hecho de introducir concentradores secundarios. Se han de fabricar estos, los materiales han de tener buenas propiedades y pueden llegar a requerirse fabricarlos en gran cantidad. Igualmente estos reconcentradores tienen unas necesidades de mantenimiento por lo que se han de supervisar cada cierto tiempo para asegurar su buen funcionamiento ya que, en caso de que este no fuese el correcto, la eficiencia de la central se vería resentida.

Recordamos, asimismo, que para evitar que los materiales de los reconcentradores no alcancen elevadas temperaturas y sufra daños deben tener un sistema de refrigeración. Este también incrementa los costes. Sin embargo, también gracias a los receptores volumétricos que se introducen junto a los concentradores secundarios, es posibilitada la presurización del receptor. Esto permite tener aire como fluido de trabajo y poder trabajar en la instalación con una turbina de gas.

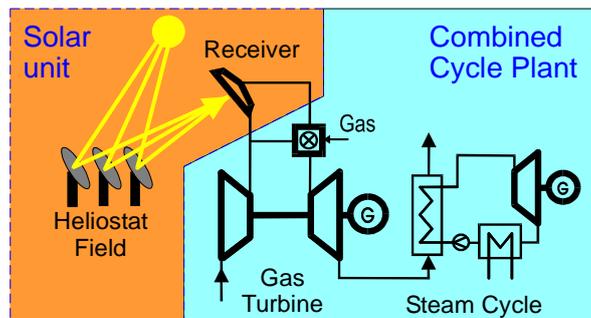


Ilustración 102: Ciclo combinado con turbina de gas en una central solar de torre [6]

Las turbinas de gas destacan por su fiabilidad y baja necesidad de mantenimiento aunque tienen una eficiencia peor que las de vapor. Sin embargo, gracias a las turbinas de gas es posible implementar en la central solar de torre un ciclo combinado y llegar a mayores magnitudes en el valor del rendimiento.

7. CONCLUSIONES

A lo largo del trabajo se ha visto la poderosa influencia que los concentradores secundarios ejercen tanto en la eficiencia de la planta como en la distribución del campo de heliostatos, además, se han podido ver las limitaciones que su empleo introduce.

A pesar de que estas limitaciones no han sido hasta hoy muchas veces analizadas, se ha comprobado que tienen la suficiente importancia para ser tenidas en cuenta en el diseño de una central de torre con reconcentradores. El análisis de estas limitaciones es fundamental para saber bajo que supuestos y en qué condiciones la utilización de concentradores secundarios es útil contribuyendo a mejorar el funcionamiento de la planta.

Los concentradores secundarios, que se basan en uniones de seis concentradores CPC, permiten conseguir una mayor concentración en la radiación solar reflejada por los heliostatos y de este modo alcanzar unas mayores temperaturas en el receptor a la par que reducen el área al que llega la radiación. Estas mayores temperaturas permiten incrementar el rendimiento del ciclo termodinámico. Asimismo, esta reducción de área posibilita reducir las pérdidas térmicas, sobre todo las pérdidas por radiación, que son las de mayor magnitud. Por otra parte, los reconcentradores cambian la distribución del flujo térmico, por ello se ha estudiado como afecta este cambio y cómo hacer que sea positivo para la central. Sin embargo, la posible mejora de la eficiencia térmica lleva asociada un empeoramiento de la eficiencia óptica. A las habituales pérdidas ópticas por spillage, errores en los heliostatos, sombras, bloqueos, se debe añadir ahora las pérdidas debidas a una reflectividad menor que 1 y las ocasionadas por el rechazo de aquellos rayos cuyos ángulos de incidencia superen el semiángulo de aceptación (parámetro fundamental de un CPC) de los reconcentradores. En este trabajo se han cuantificado las ventajas y desventajas y se ha analizado como reducir esas limitaciones.

Mediante programación en R se ha visto que la introducción de concentradores secundarios puede provocar elevadas pérdidas ópticas debido a ángulos de incidencia de los rayos mayores que el semiángulo de aceptación. Parámetros como un mayor ángulo de error de los heliostatos, una mayor distancia a la torre, una mayor altura de la misma o un menor ángulo de aceptación hacen que estas pérdidas aumenten, además pueden provocar spillage.

Para reducir estas pérdidas ópticas, hay que aumentar el radio del receptor, es decir, se aumenta el área del receptor. Este incremento del tamaño del receptor va en contra de la mayor concentración pretendida. Para ello, ha sido necesario comparar si es mayor la cantidad de área que hay que aumentar para evitar estas pérdidas o si por el contrario es mayor la propia concentración que de por sí los reconcentradores introducen. Se ha comprobado con R que es superior la concentración que de por sí los reconcentradores consiguen, es decir, sin valorar aún otros aspectos, los reconcentradores resultan positivos. Además, se ha visto que el cociente de esta razón de concentración geométrica entre el aumento de área necesario para evitar las pérdidas ópticas es igual a la inversa del semiángulo de aceptación.

No obstante, esto no siempre es así. Cuando estamos a distancias cercanas a la torre el ángulo que forman heliostato y receptor es muy grande y, por tanto, los ángulos de incidencia de los rayos también lo serán haciendo más probable que superen el valor del semiángulo de aceptación y no lleguen al receptor. Cuanto más cerca estemos de la torre más grande será el aumento de radio que haya que imponer al receptor. Llegará un momento en que este incremento supere al valor de la razón de concentración haciendo inútiles los concentradores secundarios.

Se ha simulado en Tonatiuh una central de torre similar a la de Gemasolar. Se han considerado los casos en los que el receptor es cilíndrico-externo y en los que el receptor es cilíndrico y tiene concentradores secundarios y han sido comparados. Para comparar se ha utilizado dos casos: el receptor de radio mínimo sin reconcentradores para el que no hay spillage (4.521 metros), y el receptor de radio mínimo con reconcentradores para el que no se producen pérdidas ópticas en el heliostato más lejano (8.756 metros de apertura si el semiángulo de aceptación es de 32° y 7.116 metros si es de 40°). Estos dos casos permiten evaluar la influencia de los reconcentradores.

Cuando los concentradores secundarios tienen un semiángulo de aceptación de 32° se producen pérdidas ópticas del 20% (hablamos de los casos mencionados en el anterior párrafo). A esto habría que añadir las pérdidas por reflectividad, del 3.6%. Las pérdidas son debidas a los elevados ángulos de incidencia en las primeras filas del campo de heliostatos, que además son filas que sin reconcentradores dan una elevada potencia. Habrá que realizar cambios en el layout o en la configuración de los receptores para disminuir estas pérdidas. Si la orientación de los reconcentradores no cambia y quisiéramos la misma potencia, se podría o bien modificar el layout suprimiendo las primeras filas del campo y añadiendo nuevas filas a mayores distancias, o bien aumentar la altura de la torre aunque esto puede provocar nuevas pérdidas ópticas. Sin embargo se ha visto que los heliostatos más lejanos dan menos potencia por lo que haría falta una mayor cantidad de ellos, con el mayor coste que ello implica.

Por otra parte, a pesar de que existan estas pérdidas ópticas la concentración conseguida va a ser superior por lo que sí va a existir un aumento de la temperatura del fluido del receptor, objetivo principal de los concentradores secundarios. Sin embargo, como consecuencia de las elevadas pérdidas ópticas no va a ser el suficiente para compensar otros factores como una mayor dificultad en la construcción, los superiores costes de la planta, las necesidades de mantenimiento o el mayor tamaño del receptor, con las cargas en lo alto de la torre que ello supone.

Igualmente ha sido estudiada la distribución del flujo térmico. Este cambia completamente si se introducen concentradores secundarios. Como se ha indicado, con 32° , sube la densidad de flujo, aunque no en gran cantidad. En cuanto al perfil del flujo ha sido posible distinguir dos gradientes térmicos. Uno producido en toda la superficie del receptor y otro dentro de cada hexágono de salida de los reconcentradores.

El primer gradiente térmico conlleva la elección del tipo de receptor ya que los hexágonos de salida están a gran temperatura pero los espacios entre ellos no por lo que los gradientes térmicos entre hexágonos son altísimos. Esto hace que no tenga sentido utilizar un receptor tubular debido a las altas tensiones que se producirían. Se hará necesario el uso de módulos formados por un receptor volumétrico con su respectivo concentrador secundario dando lugar a un panel de reconcentradores.

El segundo gradiente térmico mencionado se refiere a la distribución del flujo térmico dentro de cada unidad de receptor volumétrico. No llega la misma radiación a toda la superficie de cada receptor, la concentración varía dentro de él siendo mayor en la parte superior. Esto incrementa las tensiones dentro del receptor volumétrico aunque no son mayores que sin reconcentradores. Se ha visto que será conveniente que el fluido entre por la parte superior para que sufra un mayor choque térmico que incremente más rápido su temperatura y para que se reduzcan las pérdidas térmicas del receptor ya que así actúa como un fluido a contracorriente. Por otra parte puede ser necesario refrigerar las paredes de los concentradores secundarios.

Para reducir las pérdidas ópticas se ha analizado la misma central con reconcentradores de semiángulo de aceptación de 40° . Se ha visto como las pérdidas ópticas por rechazo de rayos bajaban al 13% y como no se producía prácticamente descenso en la concentración introducida ya que el aumento de radio requerido en el receptor es menor en este caso. Por lo tanto, el objetivo de una mayor temperatura y densidad de flujo térmico es conseguido aunque es posible que la influencia de otros factores no recompense aquí tampoco la utilización de los concentradores secundarios. Esto dependerá del diseño que se lleve a cabo del receptor y de los componentes de la instalación. En cuanto a la influencia del lay-out se ha vuelto a ver la pérdida de potencia en las primeras filas aunque ahora se pierde menos. Respecto a la distribución del flujo térmico se ha visto que son necesarios un mayor número de receptores que deberán ser volumétricos y en cuya superficie se dan grandes variaciones en la radiación.

Por lo tanto, en base a los resultados obtenidos para la central analizada, se ha concluido que, aunque la eficiencia de la planta vaya a ser mayor con un semiángulo de aceptación intermedio entre los dos ángulos considerados, si queremos tener un receptor cilíndrico en lo alto de la torre habrá que realizar importantes cambios en el lay-out del campo. Aun así, la intervención de otros factores aconseja que las modificaciones sean llevadas a cabo en el receptor porque, en caso contrario, el incremento de temperatura no es suficiente para considerar el uso de reconcentradores. De todas formas, si en el diseño de la central se tienen en cuenta las limitaciones analizadas, un buen estudio y diseño térmico y eléctrico puede aumentar la eficiencia en mayor medida.

Se ha procedido al diseño de una nueva geometría de receptor para solucionar el problema de las pérdidas ópticas. Esto se ha conseguido inclinando los reconcentradores hacia el campo de heliostatos y apuntando hacia la mitad de la longitud hasta el heliostato más lejano. Para que los reconcentradores puedan estar inclinados y formando un panel las superficies del receptor deberán ser planas. Para ello se formará un receptor compuesto de varias superficies planas, en nuestro caso 6.

Cada superficie del receptor llevará asociada uno de los subcampos en los que se ha dividido el campo de heliostatos. Se parte por lo tanto dicho campo de heliostatos. Cada una de las particiones tendrá su aiming point en la superficie del receptor que le corresponde.

En esta nueva central se ha visto como las pérdidas ópticas se reducen de manera evidente haciendo que justo superen el 5%, a este valor habría que añadir las pérdidas por reflectividad. Al haber dividido el campo de heliostatos en 6 se ha escogido reconcentradores de semiángulo de aceptación de 40° para que no hubiese pérdidas ópticas. La concentración ahora sí aumenta en gran cantidad y gracias a las bajas pérdidas ópticas las temperaturas tendrán un valor muy alto, la eficiencia de la planta será elevada y además el menor área del receptor hará que las pérdidas térmicas sean menores.

Por otra parte, la distribución del flujo requerirá receptores volumétricos en los que la densidad de flujo térmico va a ser elevada. En cuanto al lay-out existen dos opciones: subcampos cuyas fronteras coinciden, se debería aumentar el ángulo de aceptación; o campos elípticos de mayor longitud pero más estrechos. Estas son las alternativas a barajar al diseñar una central de este tipo. En cualquier caso la gran desventaja reside en la limitación del tamaño del campo de heliostatos ya que en campos muy grandes los ángulos de incidencia serían muy altos y se perdería mucha potencia. Al no poder diseñar campos muy grandes, la potencia que se puede obtener de una central de este tipo está limitada. Combinaciones de receptores o ángulos de inclinación podría contribuir a solventar este problema. A pesar de ello, la mejora del rendimiento es suficiente para recomendar el uso de concentradores secundarios en centrales de torre siempre que en el diseño se sea consciente de cómo paliar las limitaciones estudiadas.

De cualquier modo una línea futura del trabajo podría consistir en el diseño térmico de la instalación para sacarle el máximo partido a las ventajas de los reconcentradores. Se debería investigar el diseño del receptor que mejor se ajuste a las características de los concentradores secundarios y la distribución del fluido que saque mayor rendimiento a la instalación. Asimismo se han ido mencionando a lo largo del trabajo otros aspectos que influyen en la decisión de si implantar concentradores secundarios: coste de la instalación, construcción, operación, cargas en lo alto de la torre, daños en los materiales, refrigeración, posibilidad de usar turbinas de gas integradas en un ciclo combinado, etc.

Por todo lo enunciado, se puede concluir finalmente que el uso de concentradores secundarios puede resultar muy beneficioso gracias al aumento de la eficiencia del ciclo termodinámico que pueden conseguir. Sin embargo, se tienen que dar una serie de requisitos para que sean ventajosos y las pérdidas ópticas no sean elevadas. Estos requisitos han sido descritos y afectan al lay-out del campo de heliostatos, al tamaño, forma y orientación del receptor y de los concentradores secundarios, y al modelo térmico que el diseñador lleve a cabo. El sistema más eficiente es aquel en el que los reconcentradores forman paneles sobre las superficies planas de un receptor partido inclinadas hacia su correspondiente división del campo de heliostatos.

8. GLOSARIO Y NOMENCLATURA

- Absortividad, reflectividad y transmitancia: Parámetros que definen la cantidad de radiación que una vez llega a un cuerpo, será absorbida, reflejada y transmitida por el mismo. En el receptor se deberá tener una alta absortividad mientras que en los heliostatos y concentradores secundarios el valor de la reflectividad deberá ser muy elevado.
- Aiming point: Punto del receptor al que dirigen los rayos los heliostatos. Podrá ser un punto, línea, circunferencia o superficie.
- Ángulo de incidencia: Ángulo que forman los rayos reflejados por los heliostatos. Si no hay reconcentradores será el que forme el rayo con la normal al receptor en el punto de este al que llega. Si hay reconcentradores es el ángulo que componen el eje del reconcentrador y el rayo en cuestión.
- Azimut: Ángulo que con el meridiano forma el círculo vertical que pasa por un punto de la esfera celeste o del globo terráqueo.
- Central solar de torre: Tecnología solar de concentración en la que unos espejos llamados heliostatos reflejan la radiación en un receptor situado en lo alto de una torre. En este receptor será calentado un fluido hasta altas temperaturas adquiriendo gran energía térmica que podrá ser almacenada. La energía térmica del fluido es aprovechada para producir electricidad gracias a su expansión en una turbina.
- Concentración de la radiación: Paso de la radiación de un área más grande a otra más pequeña para reducir el tamaño del receptor y conseguir unas mayores temperaturas y unas menores pérdidas térmicas.
- Concentrador secundario: Dispositivo empleado en las centrales solares de torre junto al receptor para conseguir una mayor concentración de la radiación solar que incide sobre él. Su uso permitirá unas mayores temperaturas, unas menores pérdidas térmicas y el cambio en la distribución del flujo térmico. Sin embargo tendrá también unas limitaciones que afectan a la potencia de la central y a la distribución del campo de heliostatos.
- CCP: Colector cilindro-parabólico.

- **CPC:** Concentrador compuesto parabólico. Concentrador ideal de forma parabólica que es empleado en las centrales solares de torre como concentrador secundario. La razón geométrica de concentración dependerá de su ángulo de aceptación.
- **CSP:** Planta solar de concentración. Tecnologías que se basan en la concentración de la radiación solar para obtener altas temperaturas que permitan conseguir una elevada energía térmica que podrá ser posteriormente aprovechada para producir electricidad. Existen 4 tipos: reflectores Fresnel, colectores cilindro-parabólicos, centrales solares de torre y discos parabólicos.
- **Cuerpo negro:** Nombre que recibe el cuerpo ideal que actúa como absorbedor y emisor perfecto de la radiación. Un cuerpo negro será capaz de absorber toda la radiación que llega a él así como de emitir energía en todas las direcciones de manera uniforme. Para cierta temperatura y longitud de onda no hay superficie capaz de emitir más energía que un cuerpo negro.
- **Distribución normal:** Distribución de probabilidad de variable continua en la que la función de densidad tiene forma acampanada y es simétrica respecto a cierto parámetro estadístico. Se conoce también como distribución gaussiana.
- **Elevación solar:** Es el ángulo formado por la dirección del sol y el horizonte.
- **Energía solar térmica:** Energía renovable mediante la cual es posible la producción de electricidad, calor, agua caliente sanitaria, etc. utilizando para ello energía térmica obtenida a partir de la radiación solar. Se distingue entre alta y media temperatura (tecnologías solares de concentración) y baja temperatura (captadores térmicos).
- **Flujo térmico:** Vector que indica la transferencia de calor a través de una superficie. Se mide en W. La densidad de flujo térmico es la transferencia de calor por unidad de área y se mide en W/m^2 .
- **Foco:** En energía solar es el punto en el que convergen los rayos solares originados desde un punto en el objeto observado y suele situarse en el receptor para conseguir una mayor potencia.
- **Fotón:** En energía solar térmica, partícula de luz.
- **Gradiente térmico:** Variación de temperatura en un cuerpo por unidad de distancia.

- Heliostato: Conjunto de espejos llamados facetas que en una central solar de torre reflejan la radiación solar hacia un receptor en el que se calienta un fluido. Podrá ser de diferentes materiales, tamaños y formas aunque su reflectividad ha de ser siempre lo más próxima posible a 1 y sus errores superficiales y de fabricación han de ser mínimos. Rota según dos ejes que componen un mecanismo que sigue la posición del sol a lo largo del día.
- HCPC: Unión de 6 superficies de tipo CPC dando lugar a un concentrador de forma hexagonal. Es el empleado como concentrador secundario en el trabajo.
- Irradiancia solar: Potencia por unidad de superficie debida a la radiación solar. Su valor dependerá del lugar de la Tierra en el que estemos, del momento del día y la época de año y de las condiciones atmosféricas. En buenas condiciones este valor supera los 1000 W/m².
- Latitud: Distancia que hay desde un punto de la superficie terrestre al Ecuador, contada en grados de meridiano.
- Lay-out del campo de heliostatos: Distribución en planta que adopta el campo de heliostatos de una central de torre. Se trata de la configuración geométrica de los heliostatos. Tendrá como objetivo conseguir que llegue la máxima potencia al receptor y reducir las pérdidas ópticas.
- Leyes de reflexión: La reflexión es el cambio de dirección que experimenta un rayo de luz (aquí solar) al chocar con la superficie de un objeto. Las leyes de reflexión dicen que el ángulo que forma el rayo incidente con la normal a la superficie es igual al ángulo que forma el rayo reflejado con dicha normal; además nos permiten saber que el rayo incidente, el reflejado y la normal a la superficie se encuentran todas en el mismo plano.
- Longitud: Distancia expresada en grados, entre el meridiano de un punto y otro tomado como referencia en el Ecuador.
- Pérdida térmica: Transferencia de calor de los cuerpos hacia el exterior que se puede llevar a cabo mediante tres mecanismos distintos: conducción, convección y radiación. En un receptor deberá ser lo menor posible para poder alcanzar un valor alto de la eficiencia térmica.

- **Radiación:** Es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones). Es la forma en la que llega a la Tierra la energía emitida por el sol. Por su parte, la radiación térmica es la emitida por los cuerpos debidos a su temperatura. La radiación no necesita la presencia de un medio interpuesto.
- **Receptor:** Cuerpo al que es dirigida la radiación solar de una central. En su interior hay un fluido que será calentado a altas temperaturas alcanzando una alta energía térmica. En centrales solares de torre podrá ser de tipo tubular (externo o de cavidad), volumétrico o de partículas.
- **Reconcentrador:** Concentrador secundario.
- **Semiángulo de aceptación:** En un concentrador CPC es el ángulo formado por el eje del concentrador y el eje de una de las parábolas. Cuanto menor sea su valor mayor será la concentración conseguida pero también aumentarán las posibilidades de unas mayores pérdidas ópticas debidas al rechazo de aquellos rayos cuyo ángulo de incidencia supere su valor.
- **Spillage:** Radiación reflejada por los heliostatos que, como consecuencia de diversos tipos de errores, no intersectará con el receptor.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2013). *La energía en España 2013*. Publicación oficial, Madrid.
- [2] REE, Red Eléctrica de España (2014). *Avance del informe del sistema eléctrico español*.
- [3] IEA, International Energy Agency (2014). *Technology Roadmap: Solar Thermal Electricity*.
- [4] Bernardos, A., Gastón, M. y Pagola, I., (2013). *CSP Technologies Report 2013*. CENER, Departamento Energía Solar Térmica.
- [5] Torresol Energy. Recuperado de: <http://www.torresolenergy.com/TORRESOL/home/en>
- [6] CENER (2013). Receptores solares, sistemas solares de alta concentración.
- [7] Geyer, M., y Stine, W. (2001). Power from the sun [en línea]. Revisión y adaptación continua de Solar Energy Systems Design. Harrigan, R. y Stine, W. (1986).
- [8] National Renewable Energy Laboratory. Recuperado de: <http://www.nrel.gov>
- [9] Pascual, J., (2014). Desarrollo de un software de optimización de campos de heliostatos para centrales solares de torre. CENER. Universidad Pública de Navarra.
- [10] Benítez, P., Miñano, J. y Winston, R. (2005). *Nonimaging optics*. Elsevier Academic Press.
- [11] Blanco, M.J. (1996). Análisis energético de sistemas concentradores. Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos.
- [12] Álvarez, A. (2011). *Sistemas ópticos para concentración, captación y guiado de radiación solar*. Universidad Complutense de Madrid, Escuela Universitaria de Óptica.
- [13] Rabl, A. (1976). Comparison of solar concentrators. *Solar Energy*, 18, 93-111.
- [14] Cantos, E., Fernández, A., Hutter, C., Martínez, L., Röger, M., y Wieckert, C. (2014). Durability of solar reflector materials for secondary concentrators used in CSP systems. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 130(2014), 51–63.
- [15] Segal, A. (2012). Optimum layout of heliostat field when the tower-top receiver is provided with secondary concentrators. Publicación para SFERA, WP.13, Task2. Weizmann Institute of Science.

- [16] Schmitz, M., Schwarzbözl, P., Buck, R., y Pitz-Paal, R. (2005). Assessment of the potential improvement due to multiple apertures in central receiver systems with secondary concentrators. *Solar Energy*, 80(2006), 111–120.
- [17] CENER. *Análisis de Errores en los Sistemas de Concentración*.
- [18] Kribus, A., Ries, H., Spirkl, W., y Timinger, A. (2000). Optimized secondary concentrators for a partitioned central receiver system. *Solar Energy*, 69(2), 153–162.
- [19] Y.L. He, Z.D. Cheng, F.Q. Cui, Z.Y. Li y D. Li. (2012). Numerical investigations on a pressurized volumetric receiver: Solar concentrating and collecting modelling. *Renewable Energy*, 44(2012) 368-379.
- [20] O’Gallagher, J., Winston, R., Suresh, D., y Brown, C. (1987). Design and test of an optimized secondary concentrator with potential cost benefits for solar energy conversion. *Energy*, 12(314), 217-226.
- [21] Cooper, T., Dähler, F., Ambrosetti, G., Pedretti, A. y Steinfield, A. (2013). Performance of compound parabolic concentrators with polygonal apertures. *Solar Energy*, 95(2013), 308–318.
- [22] Ben-Mair, R., Huleihil, M., Kribus, A. y Timinger, A. (2000). Performance of a rectangular secondary concentrator with an asymmetric heliostat field. *Solar Energy*, 69(2), 139–151.

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Evolución de la demanda energética mundial [Universidad de Stanford].....	7
Ilustración 2: Producción eléctrica mundial renovable [IEA]	8
Ilustración 3: Consumo energía primaria en España en 2014 [IDAE]	8
Ilustración 4: Evolución del consumo de energías renovables en España [1]	9
Ilustración 5: Tipos de centrales CSP [3]	12
Ilustración 6: Planta reflectores Fresnel	13
Ilustración 7: a) Funcionamiento reflector Fresnel b) Funcionamiento planta reflectores	13
Ilustración 8: Colector cilindro-parabólico [Solar Millenium]	14
Ilustración 9: Funcionamiento planta CCP [4]	15
Ilustración 10: Planta de colectores cilindro-parabólicos	15
Ilustración 11: Central solar de torre [5]	16
Ilustración 12: Discos parabólicos	17
Ilustración 13: Comparación de la eficiencia de cada subsistema de las distintas tecnologías. Óptica (amarillo), térmica (rojo) y eléctrica (azul). [4]	18
Ilustración 14: Predicción evolución coste CSP [3]	19
Ilustración 15: Evolución mundial capacidad CSP [3]	19
Ilustración 16: Predicción regional de la producción de STE [3]	20
Ilustración 17: Evolución de la capacidad termosolar en España [1]	20
Ilustración 18: Central solar de torre de Gemasolar [5]	21
Ilustración 19: Heliostato [4]	22
Ilustración 20: Receptor cilíndrico externo [6] [4]	23
Ilustración 21: Receptor de cavidad [6]	23
Ilustración 22: Receptor volumétrico [6] [4]	24
Ilustración 23: Receptor de partículas [4]	24
Ilustración 24: Etapas de una central solar de torre de sales fundidas [4]	25
Ilustración 25: Central solar de torre con agua como fluido de trabajo [4]	26
Ilustración 26: Efecto coseno [7]	27
Ilustración 27: Distribución campo heliostatos a) Norte b) Circular [7]	27
Ilustración 28: Pérdidas por sombras [8]	28
Ilustración 29: Pérdidas por bloqueos [8]	28
Ilustración 30: Valor pérdidas por sombras y bloqueos en campo heliostatos [8]	28
Ilustración 31: Errores heliostatos [9]	29
Ilustración 32: Atenuación atmosférica y sus valores para una atmósfera despejada y para una atmósfera brumosa [9] [7]	29
Ilustración 33: Spillage [9]	30
Ilustración 34: Centrales PS10 y PS20 [Abengoa]	31
Ilustración 35: Potencia instalada en centrales solares de torre [4]	31
Ilustración 36: Razón de concentración [10]	34
Ilustración 37: Sistema formador de imagen y sistema anidólico [12]	35
Ilustración 38: Concentrador elíptico compuesto	36

Ilustración 39: a) Funcionamiento y b) representación de un concentrador de tipo trompeta.	37
Ilustración 40: Generación CPC [7].....	38
Ilustración 41: CPC [7]	38
Ilustración 42: CPC con diferentes ángulos de aceptación manteniendo constante el área de salida [10]	39
Ilustración 43: Comportamiento CPC cuando a) ángulo de incidencia menor que semiángulo de aceptación b) ángulo de incidencia mayor que semiángulo de aceptación [7]	40
Ilustración 44: Rayos paralelos a eje parábola [10]	41
Ilustración 45: Variación de la transmisión de la radiación solar en función del semiángulo de aceptación [10].....	41
Ilustración 46: Porcentaje de la radiación de ángulo de incidencia menor que el semiángulo de aceptación que llega a la salida para ciertos semiángulos de aceptación [10]	42
Ilustración 47: Apertura de un CPC de semiángulo de aceptación 10° para ángulos de incidencia de a) 8 b) 9 c) 9.5 d) 10 e) 10.5 f) 11 [10]	43
Ilustración 48: Convenio signos ecuación [10].....	44
Ilustración 49: Truncamiento CPC [10]	45
Ilustración 50: Variación de la concentración (a/a') para ciertos semiángulos de aceptación si se produce truncamiento. Los números de la gráfica indican l truncamiento / l [10]	45
Ilustración 51: Módulo concentrador secundario hexagonal - receptor volumétrico (HCPC) [6]	47
Ilustración 52: HCPC [6].....	48
Ilustración 53: Disposición de concentradores secundarios hexagonales en una torre [6]	49
Ilustración 54: Influencia ángulo de aceptación en la eficiencia óptica en una central de torre [16]	55
Ilustración 55: Tinn-R	57
Ilustración 56: Tonatiuh	58
Ilustración 57: Calculador posición solar.....	59
Ilustración 58: Transmisión según ángulo de incidencia [10]	61
Ilustración 59: Esquema modelo 2D	63
Ilustración 60: Eficiencia según α en caso 2D	66
Ilustración 61: Eficiencia según Dref cuando el semiángulo de aceptación es 30° en un caso 2D	67
Ilustración 62: Eficiencia según el semiángulo de aceptación cuando Dref es 3000 en un caso bidimensional.....	68
Ilustración 63: Intersección del cono de radiación con un receptor cilíndrico	69
Ilustración 64: Esquema del receptor cilíndrico para la simulación en R	69
Ilustración 65: Cálculo ángulo incidencia receptor cilíndrico.....	72
Ilustración 66: Esquema para R de receptor esférico	75
Ilustración 67: Radiación uniforme tomada en R.....	76
Ilustración 68: Fotografía central Gemasolar [5]	82
Ilustración 69: Campo heliostatos similar al de Gemasolar	83
Ilustración 70: Distribución normal.....	84

Ilustración 71: Concentradores secundarios diseñados en Tonatiuh de semiángulo de aceptación 32°	86
Ilustración 72: Diseño realizado en Tonatiuh de los concentradores secundarios para radio de apertura de 8.756 y semiángulo de aceptación de 32°	87
Ilustración 73: a) Latitud y longitud b) Azimut y elevación	88
Ilustración 74: Día, fecha y lugar simulados en Tonatiuh	89
Ilustración 75: Diseño en Tonatiuh de la central de torre empleada	90
Ilustración 76: Comportamiento central (con pocos rayos para mejor visualización)	90
Ilustración 77: Potencia que da cada heliostato si no hay reconcentradores. Escala 0-120000.	96
Ilustración 78: Potencia que da cada heliostato sin reconcentradores. Escala 60000-120000.	97
Ilustración 79: Potencia que da cada heliostato cuando hay reconcentrador de semiángulo de aceptación de 32. Escala 0-120000.	98
Ilustración 80: Potencia que da cada heliostato cuando hay reconcentrador de semiángulo de aceptación de 32. Escala 60000-120000.	99
Ilustración 81: Eficiencia sobre la potencia que da cada heliostato cuando hay reconcentradores respecto a cuándo no los hay. 32°	100
Ilustración 82: Distribución del flujo en receptor de radio de 4 metros sin reconcentradores	102
Ilustración 83: Distribución del flujo en receptor de radio de apertura de 4 metros con reconcentradores de 32°	102
Ilustración 84: Distribución del flujo en receptor de radio de 4.521 metros sin reconcentradores	103
Ilustración 85: Distribución del flujo en receptor de radio de apertura de 4.521 metros con reconcentradores de 32°	103
Ilustración 86: Distribución del flujo en receptor de radio de 8.756 metros sin reconcentradores	104
Ilustración 87: Distribución del flujo en receptor de radio de apertura de 8.756 metros con reconcentradores de 32°	104
Ilustración 88: Sección del receptor de radio apertura 8.756 metros con reconcentradores de 32° (512x100)	105
Ilustración 89: Potencia que llega al receptor reflejada por cada heliostato cuando hay reconcentradores de 40°. Escala 0-120000.....	109
Ilustración 90: Potencia que llega al receptor reflejada por cada heliostato cuando hay reconcentradores de 40°. Escala 60000-120000.	110
Ilustración 91: Eficiencia sobre la potencia que da cada heliostato cuando hay reconcentradores respecto a cuándo no los hay. 40°	111
Ilustración 92: Distribución del flujo en receptor de radio de apertura de 4 metros con reconcentradores de 40°	112
Ilustración 93: Distribución del flujo en receptor de radio de apertura de 4.521 metros con reconcentradores de 40°	112
Ilustración 94: Distribución del flujo en receptor de radio de 7.116 metros sin reconcentradores	113
Ilustración 95: Distribución del flujo en receptor de radio de apertura de 7.116 metros con reconcentradores de 40°	113

Ilustración 96: Sección del receptor de radio apertura 7.116 metros con reconcentradores de 40° (409x100)	114
Ilustración 97: Distribución del flujo con y sin reconcentradores a las 8:30, 11, 13:30, 15 y 18:30	117
Ilustración 98: Sistema empleado en Tonatiuh con reconcentradores inclinados	118
Ilustración 99: Vista de los seis aiming points	119
Ilustración 100: Campo de heliostatos de 6 divisiones con reconcentradores inclinados [16]	122
Ilustración 101: Distribución del flujo térmico en las superficies del receptor inclinado hacia el campo de heliostatos	124
Ilustración 102: Ciclo combinado con turbina de gas en una central solar de torre [6]	126

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Balance energético España 2014 [2]	9
Tabla 2: Potencia instalada en España a 31 diciembre de 2014 [2]	10
Tabla 3: Criterios clasificación centrales CSP [3]	12
Tabla 4: Intervalo angular en el que se pasa del 10% al 90% de radiación que llega a la salida [10]	42
Tabla 5: Incremento radio necesario para eficiencia 1 cuando Dref es 3000 y α es 0.005	78
Tabla 6: Incremento radio necesario para eficiencia 1 cuando Dref es 400 y α es 0.005	79
Tabla 7: Incremento radio necesario para eficiencia 1 cuando Dref es 150 y α es 0.005	80
Tabla 8: Número de heliostatos y distancia a la torre de cada fila del campo	83
Tabla 9: Potencia sin y con reconcentradores (Aceptancia 32°)	94
Tabla 10: Concentración conseguida con reconcentradores de 32°	94
Tabla 11: Comparación concentración máxima (500x500)	106
Tabla 12: Potencias sin y con reconcentradores de semiángulo de aceptación de 40°	107
Tabla 13: Concentración conseguida con reconcentradores de 40°	108
Tabla 14: Densidades de flujo máxima para un semiángulo de aceptación de 40°	114
Tabla 15: Potencia y eficiencia según hora del día	116
Tabla 16: Potencia sin y con reconcentradores inclinados	120
Tabla 17: Potencia que da cada superficie del receptor	120

ANEXOS

ANEXO 1: Programa en R para simular una central de torre con reconcentradores, caso bidimensional

```
# Modelo simple en 2D
# Suposiciones:
# La radiación reflejada sale del centro del heliostato, presenta un
ángulo de error y es uniforme. Se suponen infinitos concentradores
secundarios orientados hacia el punto del receptor al que llega cada
rayo.
acep<-(32*2*pi/360) # Semiángulo de aceptación del concentrador
secundario.
alfa<-0.00465 # Ángulo máximo reflejado por el heliostato debido a la
acumulación de errores.
Dref<-100 # Distancia entre el centro del receptor y del heliostato.
i<-0
r<-Dref*tan(alfa) #Radio del receptor.
# Se crea un array que almacena la eficiencia de cada rayo.
w<-array(dim=c(1,1))
# Debido a la simetría en la radiación reflejada, a ser el receptor
circular y a encontrarnos en un caso plano solo es necesario analizar
la mitad de la radiación reflejada.
# Se hace un barrido desde el heliostato para conseguir así que la
radiación sobre la que se realizan los cálculos sea uniforme. Se hace
el barrido hasta el ángulo alfa, este es el máximo con el que se refleja
la radiación.
for (beta in seq(0,alfa,0.000001)) {
i<-i+1
# Se calcula para cada rayo reflejado por el heliostato el
correspondiente ángulo gamma que forma el eje del concentrado secundario
correspondiente con el segmento que une los centros del heliostato y el
receptor.
gamma<-asin(((Dref*cos(beta)-sqrt((Dref)^2*(cos(beta))^2-
(Dref)^2+r^2))*sin(beta))/r)
# El ángulo de incidencia es el formado por el eje de cada concentrador
y el rayo que llega a él.
I<-(beta+gamma)
# Si el ángulo de incidencia de cada rayo reflejado por el heliostato
es inferior al semiángulo de aceptación llegará hasta el receptor por
lo que la eficiencia será la misma respecto al caso de no tener
concentradores secundarios. Por ello se considerará en tal caso
eficiencia 1. En caso contrario la radiación será rechazada y la
eficiencia será de valor 0.
if (I<acep) {w[i]<-1}
else {w[i]<-0}
}
print(w)
# El porcentaje de rayos que llega al receptor y, por lo tanto, la
eficiencia de los concentradores secundarios, se calcula mediante la
media de las eficiencias de cada uno de los rayos sobre los que se ha
realizado el barrido.
mean(w)
```

ANEXO 2: Programa en R para diferentes ángulos α , caso bidimensional

```
# Modelo 2D para diferentes ángulos alfa
acep<-(32*2*pi/360)
Dref<-100
i<-0
j<-0
w<-array(dim=c(1,1))
ef<-array(dim=c(8,1))
# Realizamos el barrido para distintos ángulos de error alfa
for (alfa in seq(0.001,0.008,0.001)){
  j<-j+1
  r<-0.8
  for (beta in seq(0,alfa,0.000001)) {
    i<-i+1
    gamma<-asin(((Dref*cos(beta)-sqrt((Dref)^2*(cos(beta))^2-
      (Dref)^2+r^2))*sin(beta))/r)
    I<-(beta+gamma)
    if (I<acep) {
      w[i]<-1
    }
    else {
      w[i]<-0
    }
  }
  ef[j]<-mean(w)
  # Se calcula la eficiencia para cada ángulo alfa
  print("Alfa es")
  print(alfa)
  print("La eficiencia es:")
  print(mean(w))
}
g<-seq(0.001,0.008,0.001)
plot(g,ef,ylim=c(0,1),xlab="Alfa",ylab="Eficiencia")
```

ANEXO 3: Programa en R en el que varían el semiángulo de aceptación y la distancia a la torre, caso bidimensional

```
# Modelo 2D en el que el ángulo de aceptación y la Dref varían
alfa<-0.00465
# Se define una matriz en la que se recoge la eficiencia para cada ángulo
de aceptación y cada Dref. Para rellenar esta matriz se utilizan dos
variables (i y j) que permiten trasladarse por la matriz.
eficiencia<-array(dim=c(291,6))
i<-0
j<-0
k<-0
# Se considera un radio fijo y suficiente para que no existan pérdidas
por spillage en ninguno de los casos analizados
r<-14
w<-array(dim=c(1,1))
# Se realiza el barrido para cada ángulo de aceptación y cada Dref
for (Dref in seq(100,3000,10)){
  j<-j+1
  for (acep in c(30*2*pi/360, 32*2*pi/360, 34*2*pi/360, 36*2*pi/360,
40*2*pi/360, 45*2*pi/360)){
    i<-i+1
    # Para cada ángulo beta con el que el heliostato refleja cada rayo
    existirá un gamma formado por los segmentos que unen cada punto del
    receptor y el centro del heliostato y el formado por los centros de
    receptor y heliostato.
    for (beta in seq(0,alfa,0.00001)) {
      k<-k+1
      gamma<-asin(((Dref*cos(beta)-sqrt((Dref)^2*(cos(beta))^2-
(Dref)^2+r^2))*sin(beta))/r)
      I<-(beta+gamma)
      if (I<acep) {
        w[k]<-1
      }
      else {
        w[k]<-0
      }
    }
    # Se pone la k a 0 para empezar con otra nueva eficiencia que no incluya
    los datos de la anterior
    k<-0
    # Cada lugar de la matriz lo ocupa una eficiencia. Cada columna
    representa un ángulo de aceptación y cada fila una Dref
    eficiencia[j,i]<-mean(w)
  }
  i<-0
}
nenc<-c("Ángulo de aceptación de 30°","Ángulo de 32°","Ángulo de
34°","Ángulo de 36°","Ángulo de 40°","Ángulo de 45°")
nenf<-seq(100,3000,10)
nomb<- "metros"
dimnames(eficiencia)<-list(paste(nenf,nomb),nenc)
round(eficiencia,3)
```

ANEXO 4: Programa en R para la simulación de una central de torre con receptor cilíndrico

```

#Modelo 3D receptor cilíndrico
alfa<-0.00465 #Ángulo de error del heliostato
Dref<-100 #Distancia horizontal entre el receptor y el heliostato
delta<-30*2*pi/360 #Ángulo de inclinación de la normal al heliostato
respecto al suelo
acep<-32*2*pi/360 #Semiángulo de aceptación de los reconcentradores
H<-Dref*tan(delta) #Altura de la intersección entre el eje del receptor
y el eje del cono de radiación
r<-sqrt(H^2+Dref^2)*tan(alfa) #Radio del receptor
i<-0
w<-array(dim=c(1,1)) #Vector que almacena las eficiencias de cada rayo.
#Se ha calculado el ángulo de incidencia a partir de dos ángulos: el
ángulo de incidencia en el caso de que apuntarán todos los concentradores
en la misma dirección (kappa) y el ángulo que forma el eje del
concentrador con la línea horizontal que une el heliostato con el
receptor (epsilon).
#Se realiza el barrido de la mitad de la radiación devuelta por el
heliostato debido a la simetría del cono formado.
#Se realiza el barrido considerando que la radiación reflejada por el
heliostato forma un cono de flujo uniforme. Se toman dos ángulos (sigma
y lambda) que permiten simular el cono.
for (sigma in seq(-alfa,alfa,0.00005)){
#Ángulo formado por cada rayo con el plano horizontal.
beta<-delta+sigma
for (lambda in seq(0,sqrt(alfa^2-sigma^2),0.00005)){
#Ángulo formado por cada rayo con el plano vertical.
phi<-atan(tan(lambda)/cos(delta))
#Coordenadas x, y, z de cada rayo en el receptor.
x<-(tan(phi)^2*Dref+sqrt(r^2*(1+tan(phi)^2)-
tan(phi)^2*Dref^2))/(1+tan(phi)^2)
y<-sqrt(r^2-x^2)
z<-(Dref-x)*tan(beta)
#Ángulo que forma el eje del reconcentrador con la línea horizontal que
un heliostato y receptor.
epsilon<-atan(y/x)
#Ángulo de incidencia si todos los heliostatos tuviesen la misma
dirección (apuntando hacia el heliostato en la dirección del que se
encuentra más cerca).
kappa<-atan((sqrt(y^2+z^2))/(Dref-x))
if(epsilon!=0){
#Distancia l necesaria para conocer ángulo de incidencia.
l<-sqrt(z^2+(y+tan(epsilon)*(Dref-x))^2)
#Ángulo de incidencia
I<-acos((((Dref-x)/cos(epsilon))^2+((Dref-x)/cos(kappa))^2-
l^2)/(2*(Dref-x)^2/(cos(kappa)*cos(epsilon))))}
#Si epsilon es 0 la anterior ecuación no funciona. El ángulo de
incidencia será igual a beta.
else {I<-beta}
i<-i+1
if (I<acep){w[i]<-1}
else {w[i]<-0}}
#Eficiencia
mean(w)

```

ANEXO 5: Programa en R en el que varían el semiángulo de aceptación y la distancia al receptor siendo el receptor cilíndrico

```
#Modelo receptor cilíndrico en el que para un ángulo alfa y altura se
obtienen los valores de la eficiencia para ciertos semiángulos de
aceptancia y Dref.
alfa<-0.003 #Ángulo alfa para cada caso.
H<-120 #Altura para cada caso.
r<-4
i<-0;j<-0;k<-0
w<-array(dim=c(1,1))
eficiencia<-array(dim=c(8,11))
#Distancias Dref consideradas.
for (Dref in seq(25*r,200*r,25*r)) {
j<-j+1
delta<-atan(H/Dref)
#Semiángulos de aceptación considerados.
for (acep in
c(30*2*pi/360,32*2*pi/360,34*2*pi/360,36*2*pi/360,38*2*pi/360,40*2*pi/
360,42*2*pi/360,44*2*pi/360,46*2*pi/360,48*2*pi/360,50*2*pi/360)) {
i<-i+1
for (sigma in seq(-alfa,alfa,0.00005)) {
beta<-delta+sigma
for (lambda in seq(0,sqrt(alfa^2-sigma^2),0.00005)) {
phi<-atan(tan(lambda)/cos(delta))
x<-(tan(phi)^2*Dref+sqrt(r^2*(1+tan(phi)^2)-
tan(phi)^2*Dref^2))/(1+tan(phi)^2)
y<-sqrt(r^2-x^2)
z<-(Dref-x)*tan(beta)
epsilon<-atan(y/x)
kappa<-atan((sqrt(y^2+z^2))/(Dref-x))
if(epsilon!=0) {
l<-sqrt(z^2+(y+tan(epsilon)*(Dref-x))^2)
I<-acos(((Dref-x)/cos(epsilon))^2+((Dref-x)/cos(kappa))^2-
l^2)/(2*(Dref-x)^2/(cos(kappa)*cos(epsilon)))) }
else {I<-beta}
k<-k+1
if (I<acep){w[k]<-1}
else {w[k]<-0}
}}
eficiencia[j,i]<-mean(w)
k<-0}
i<-0}
nenc<-c("Ángulo de aceptación de 30°","Ángulo de 32°","Ángulo de
34°","Ángulo de 36°","Ángulo de 38°","Ángulo de 40°","Ángulo de
42°","Ángulo de 44°","Ángulo de 46°","Ángulo de 48°","Ángulo de 50°")
nenf<-seq(25*r,200*r,25*r)
nomb<- "metros"
dimnames(eficiencia)<-list(paste(nenf,nomb),nenc)
round(eficiencia,3)
```

```

#Se hace un programa adicional ya que cuando Dref es 200r y alfa 0.005
existen pérdidas por spillage que se deben considerar.
#Se calcula el máximo lambda para el que no hay spillage. Para ángulos
mayores se toma eficiencia 0.
#Esta sería la modificación a hacer en el programa anterior. Esto también
es útil para analizar casos independientes con spillage.
lambdamax<-atan(r/sqrt((200*r)^2+H^2))
if (lambda<lambdamax) {
x<-(tan(phi)^2*Dref+sqrt(r^2*(1+tan(phi)^2)-
tan(phi)^2*Dref^2))/(1+tan(phi)^2)
y<-sqrt(r^2-x^2)
z<-(Dref-x)*tan(beta)
epsilon<-atan(y/x)
kappa<-atan((sqrt(y^2+z^2))/(Dref-x))
if(epsilon!=0){
l<-sqrt(z^2+(y+tan(epsilon)*(Dref-x))^2)
I<-acos((((Dref-x)/cos(epsilon))^2+((Dref-x)/cos(kappa))^2-
l^2)/(2*(Dref-x)^2/(cos(kappa)*cos(epsilon)))) }
else {I<-delta+sigma}
k<-k+1
if (I<acep){w[k]<-1}
else {w[k]<-0}
}
#En caso de que se supere el máximo lambda la eficiencia es 0.
else {w[k]<-0}

```

```

#Programa cuando Dref es igual a r al existir problemas cuando x es
igual a r.
#Modificación introducida al programa en el cálculo de kappa.
if(x!=r){
kappa<-atan((sqrt(y^2+z^2))/(Dref-x))}
else {kappa<-beta}

```

ANEXO 6: Eficiencia de los concentradores secundarios según H, α , el semiángulo de aceptación y la distancia a la torre, siendo el radio del receptor cilíndrico de 4 metros

H = 60 metros		Eficiencia (%)										
α (mrad)	Dref (m)	$\theta_i=30^\circ$	$\theta_i=32^\circ$	$\theta_i=34^\circ$	$\theta_i=36^\circ$	$\theta_i=38^\circ$	$\theta_i=40^\circ$	$\theta_i=42^\circ$	$\theta_i=44^\circ$	$\theta_i=46^\circ$	$\theta_i=48^\circ$	$\theta_i=50^\circ$
1	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	25 r	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	50 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	125 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	150 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	175 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	200 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	25 r	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	50 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	125 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	150 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	175 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	200 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	25 r	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	50 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	125 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	150 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	175 r	0.984	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	200 r	0.916	0.949	0.977	0.996	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	25 r	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	50 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	125 r	0.994	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	150 r	0.911	0.945	0.973	0.994	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	175 r	0.819	0.852	0.893	0.920	0.945	0.967	0.985	0.997	1.000	1.000	1.000
4	200 r	0.736	0.773	0.808	0.842	0.873	0.893	0.920	0.945	0.960	0.973	0.990
5	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	25 r	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	50 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	100 r	0.989	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	125 r	0.877	0.915	0.948	0.976	0.993	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	150 r	0.771	0.809	0.844	0.877	0.905	0.929	0.954	0.971	0.986	0.998	1.000
5	175 r	0.681	0.712	0.752	0.781	0.809	0.835	0.861	0.885	0.908	0.929	0.946
5	200 r	0.606	0.639	0.671	0.702	0.732	0.752	0.781	0.809	0.827	0.844	0.869

H = 80 metros		Eficiencia (%)										
α (mrad)	Dref (m)	$\theta_i=30^\circ$	$\theta_i=32^\circ$	$\theta_i=34^\circ$	$\theta_i=36^\circ$	$\theta_i=38^\circ$	$\theta_i=40^\circ$	$\theta_i=42^\circ$	$\theta_i=44^\circ$	$\theta_i=46^\circ$	$\theta_i=48^\circ$	$\theta_i=50^\circ$
1	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	50 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	125 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	150 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	175 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	200 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	50 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	125 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	150 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	175 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	200 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	50 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	125 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	150 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	175 r	0.977	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	200 r	0.910	0.949	0.977	0.991	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	50 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	125 r	0.985	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	150 r	0.902	0.937	0.967	0.990	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	175 r	0.808	0.852	0.883	0.911	0.945	0.967	0.985	0.997	1.000	1.000	1.000
4	200 r	0.730	0.773	0.806	0.831	0.863	0.893	0.920	0.937	0.960	0.973	0.985
5	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	50 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	100 r	0.973	0.998	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	125 r	0.862	0.902	0.936	0.966	0.989	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	150 r	0.762	0.799	0.835	0.869	0.900	0.922	0.948	0.966	0.985	0.996	1.000
5	175 r	0.671	0.712	0.742	0.771	0.809	0.835	0.861	0.885	0.908	0.922	0.942
5	200 r	0.600	0.638	0.668	0.691	0.722	0.752	0.781	0.799	0.827	0.844	0.861

H = 100 metros		Eficiencia (%)										
α (mrad)	Dref (m)	$\theta_i=30^\circ$	$\theta_i=32^\circ$	$\theta_i=34^\circ$	$\theta_i=36^\circ$	$\theta_i=38^\circ$	$\theta_i=40^\circ$	$\theta_i=42^\circ$	$\theta_i=44^\circ$	$\theta_i=46^\circ$	$\theta_i=48^\circ$	$\theta_i=50^\circ$
1	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000
1	50 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	125 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	150 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	175 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	200 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000
2	50 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	125 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	150 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	175 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	200 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000
3	50 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	125 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	150 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	175 r	0.968	0.996	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	200 r	0.904	0.939	0.968	0.991	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000
4	50 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	125 r	0.973	0.997	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	150 r	0.885	0.929	0.960	0.985	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	175 r	0.796	0.842	0.873	0.911	0.937	0.960	0.979	0.994	1.000	1.000	1.000
4	200 r	0.724	0.761	0.796	0.831	0.863	0.893	0.911	0.937	0.953	0.973	0.985
5	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000
5	50 r	0.960	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	100 r	0.948	0.985	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	125 r	0.844	0.885	0.922	0.954	0.981	0.996	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	150 r	0.746	0.790	0.826	0.861	0.893	0.915	0.942	0.962	0.981	0.993	1.000
5	175 r	0.660	0.702	0.732	0.771	0.799	0.826	0.852	0.877	0.900	0.922	0.942
5	200 r	0.595	0.628	0.660	0.691	0.722	0.752	0.771	0.799	0.818	0.844	0.861

H = 120 metros		Eficiencia (%)										
α (mrad)	Dref (m)	$\theta_i=30^\circ$	$\theta_i=32^\circ$	$\theta_i=34^\circ$	$\theta_i=36^\circ$	$\theta_i=38^\circ$	$\theta_i=40^\circ$	$\theta_i=42^\circ$	$\theta_i=44^\circ$	$\theta_i=46^\circ$	$\theta_i=48^\circ$	$\theta_i=50^\circ$
1	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	50 r	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	125 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	150 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	175 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	200 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	50 r	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	125 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	150 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	175 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	200 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	50 r	0.000	0.929	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	125 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	150 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	175 r	0.959	0.991	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	200 r	0.891	0.928	0.959	0.984	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	50 r	0.000	0.750	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	125 r	0.953	0.990	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	150 r	0.873	0.911	0.945	0.973	0.994	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	175 r	0.785	0.831	0.863	0.902	0.929	0.953	0.976	0.993	1.000	1.000	1.000
4	200 r	0.711	0.749	0.785	0.819	0.852	0.883	0.911	0.929	0.953	0.967	0.985
5	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	50 r	0.000	0.617	0.949	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	75 r	0.959	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	100 r	0.910	0.958	0.990	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	125 r	0.818	0.868	0.908	0.942	0.971	0.989	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	150 r	0.732	0.771	0.809	0.844	0.877	0.908	0.936	0.954	0.976	0.989	0.998
5	175 r	0.649	0.691	0.723	0.762	0.790	0.818	0.848	0.874	0.893	0.915	0.936
5	200 r	0.585	0.618	0.650	0.682	0.713	0.743	0.773	0.792	0.819	0.837	0.863

H = 140 metros		Eficiencia (%)										
α (mrad)	Dref (m)	$\theta_i=30^\circ$	$\theta_i=32^\circ$	$\theta_i=34^\circ$	$\theta_i=36^\circ$	$\theta_i=38^\circ$	$\theta_i=40^\circ$	$\theta_i=42^\circ$	$\theta_i=44^\circ$	$\theta_i=46^\circ$	$\theta_i=48^\circ$	$\theta_i=50^\circ$
1	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	50 r	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	125 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	150 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	175 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	200 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	50 r	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	125 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	150 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	175 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	200 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	50 r	0.000	0.000	0.000	0.938	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	125 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	150 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	175 r	0.949	0.984	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	200 r	0.878	0.928	0.959	0.984	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	50 r	0.000	0.000	0.000	0.760	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	75 r	0.957	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	100 r	0.983	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	125 r	0.929	0.970	0.997	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	150 r	0.852	0.893	0.937	0.967	0.990	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	175 r	0.773	0.819	0.852	0.893	0.920	0.945	0.973	0.990	1.000	1.000	1.000
4	200 r	0.700	0.749	0.785	0.819	0.852	0.873	0.902	0.929	0.945	0.967	0.979
5	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	50 r	0.000	0.000	0.000	0.626	0.960	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	75 r	0.823	0.933	0.996	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	100 r	0.857	0.917	0.966	0.996	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	125 r	0.790	0.839	0.885	0.922	0.954	0.981	0.996	1.000	1.000	1.000	1.000
5	150 r	0.712	0.752	0.798	0.835	0.869	0.900	0.922	0.948	0.968	0.985	0.996
5	175 r	0.639	0.681	0.712	0.752	0.781	0.811	0.844	0.869	0.893	0.908	0.929
5	200 r	0.576	0.618	0.650	0.682	0.713	0.734	0.763	0.792	0.810	0.837	0.854

H = 160 metros		Eficiencia (%)										
α (mrad)	Dref (m)	$\theta_i=30^\circ$	$\theta_i=32^\circ$	$\theta_i=34^\circ$	$\theta_i=36^\circ$	$\theta_i=38^\circ$	$\theta_i=40^\circ$	$\theta_i=42^\circ$	$\theta_i=44^\circ$	$\theta_i=46^\circ$	$\theta_i=48^\circ$	$\theta_i=50^\circ$
1	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	50 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	125 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	150 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	175 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	200 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	50 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	75 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	125 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	150 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	175 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	200 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	50 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	75 r	0.858	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	125 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	150 r	0.991	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	175 r	0.939	0.968	0.996	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	200 r	0.870	0.916	0.949	0.977	0.996	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	50 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.862	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	75 r	0.679	0.906	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	100 r	0.924	0.985	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	125 r	0.893	0.945	0.983	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	150 r	0.829	0.873	0.920	0.953	0.979	0.997	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	175 r	0.761	0.800	0.842	0.883	0.911	0.937	0.967	0.985	0.997	1.000	1.000
4	200 r	0.692	0.736	0.773	0.808	0.842	0.873	0.894	0.920	0.945	0.960	0.979
5	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	50 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.721	0.990	1.000	1.000	1.000	1.000
5	75 r	0.556	0.766	0.901	0.982	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	100 r	0.785	0.862	0.922	0.970	0.998	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	125 r	0.752	0.809	0.857	0.900	0.936	0.966	0.989	1.000	1.000	1.000	1.000
5	150 r	0.689	0.732	0.780	0.818	0.852	0.885	0.915	0.940	0.960	0.976	0.993
5	175 r	0.627	0.664	0.702	0.742	0.771	0.799	0.835	0.861	0.885	0.906	0.922
5	200 r	0.568	0.607	0.640	0.672	0.703	0.734	0.756	0.782	0.810	0.828	0.854

H = 180 metros		Eficiencia (%)										
α (mrad)	Dref (m)	$\theta_i=30^\circ$	$\theta_i=32^\circ$	$\theta_i=34^\circ$	$\theta_i=36^\circ$	$\theta_i=38^\circ$	$\theta_i=40^\circ$	$\theta_i=42^\circ$	$\theta_i=44^\circ$	$\theta_i=46^\circ$	$\theta_i=48^\circ$	$\theta_i=50^\circ$
1	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	50 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.337	1.000	1.000	1.000	1.000
1	75 r	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	125 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	150 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	175 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	200 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	50 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.217	1.000	1.000	1.000	1.000
2	75 r	0.000	0.931	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	125 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	150 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	175 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	200 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	50 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.170	1.000	1.000	1.000	1.000
3	75 r	0.000	0.680	0.996	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	100 r	0.989	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	125 r	0.996	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	150 r	0.968	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	175 r	0.916	0.959	0.991	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	200 r	0.851	0.904	0.939	0.968	0.991	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	50 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.144	0.981	1.000	1.000	1.000
4	75 r	0.000	0.524	0.841	0.986	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	100 r	0.826	0.925	0.987	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	125 r	0.844	0.911	0.960	0.990	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	150 r	0.796	0.852	0.896	0.937	0.967	0.990	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	175 r	0.736	0.785	0.831	0.863	0.902	0.929	0.955	0.979	0.994	1.000	1.000
4	200 r	0.675	0.724	0.761	0.796	0.831	0.863	0.893	0.911	0.937	0.956	0.973
5	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	50 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.127	0.855	1.000	1.000	1.000
5	75 r	0.000	0.424	0.700	0.863	0.964	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	100 r	0.687	0.786	0.865	0.927	0.971	0.998	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	125 r	0.705	0.769	0.825	0.871	0.915	0.948	0.976	0.995	1.000	1.000	1.000
5	150 r	0.660	0.712	0.756	0.799	0.835	0.869	0.900	0.929	0.948	0.971	0.985
5	175 r	0.606	0.649	0.691	0.722	0.762	0.790	0.821	0.852	0.877	0.898	0.915
5	200 r	0.556	0.597	0.630	0.663	0.694	0.725	0.755	0.774	0.803	0.826	0.848

H = 200 metros		Eficiencia (%)										
α (mrad)	Dref (m)	$\theta_i=30^\circ$	$\theta_i=32^\circ$	$\theta_i=34^\circ$	$\theta_i=36^\circ$	$\theta_i=38^\circ$	$\theta_i=40^\circ$	$\theta_i=42^\circ$	$\theta_i=44^\circ$	$\theta_i=46^\circ$	$\theta_i=48^\circ$	$\theta_i=50^\circ$
1	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	50 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000
1	75 r	0.000	0.000	0.986	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	125 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	150 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	175 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	200 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	50 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000
2	75 r	0.000	0.000	0.579	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	100 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	125 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	150 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	175 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	200 r	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	50 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.951	1.000	1.000
3	75 r	0.000	0.000	0.394	0.942	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	100 r	0.855	0.985	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	125 r	0.959	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	150 r	0.939	0.984	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	175 r	0.891	0.939	0.977	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	200 r	0.836	0.891	0.928	0.959	0.984	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	50 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.774	1.000	1.000
4	75 r	0.000	0.000	0.295	0.765	0.958	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	100 r	0.675	0.824	0.926	0.990	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	125 r	0.785	0.863	0.923	0.968	0.997	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	150 r	0.761	0.819	0.873	0.918	0.953	0.979	0.997	1.000	1.000	1.000	1.000
4	175 r	0.711	0.761	0.808	0.852	0.886	0.920	0.945	0.967	0.986	0.997	1.000
4	200 r	0.659	0.711	0.749	0.785	0.819	0.852	0.883	0.911	0.929	0.953	0.967
5	r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	25 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	50 r	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.639	0.970	1.000
5	75 r	0.000	0.000	0.232	0.631	0.824	0.943	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	100 r	0.552	0.684	0.786	0.867	0.929	0.976	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	125 r	0.650	0.722	0.784	0.838	0.885	0.925	0.958	0.981	0.998	1.000	1.000
5	150 r	0.628	0.681	0.732	0.777	0.818	0.852	0.885	0.915	0.942	0.960	0.980
5	175 r	0.584	0.628	0.671	0.712	0.746	0.781	0.809	0.836	0.864	0.885	0.908
5	200 r	0.541	0.584	0.620	0.652	0.684	0.715	0.745	0.774	0.794	0.821	0.839

ANEXO 7: Programa en R para la simulación de una central de torre con receptor esférico

```

# Modelo 3D simple con receptor esférico
# Se toma un receptor esférico debido a la mayor sencillez en los cálculos
# que permite. Es posible evaluar así solo una cuarta parte de la radiación
# reflejada debido a la simetría de la misma y a la igualdad en la
# distancias que recorre cada rayo desde que es reflejada en cada uno de
# las cuatro partes en lo que es posible dividir la esfera.
# Se supone que el eje de cada concentrador secundario es tal que une
# el centro del receptor con el punto del receptor al que llega radiación
# que estamos estudiando a cada instante
acep<-32*2*pi/360
alfa<-0.00465
delta<-40*2*pi/360 # Ángulo de inclinación de la normal al heliostato
# respecto al suelo
Dref<-100
H<-Dref*tan(delta) # Altura que ha de tener el receptor para la
# distancia y ángulo indicados
i<-0
r<-tan(alfa)*sqrt((Dref)^2+(H)^2) # Radio necesario para que no haya
# pérdidas por spillage
w<-array(dim=c(1,1))
# La radiación reflejada por el heliostato no es plana sino que tiene
# un volumen que forma un cono. Por ello el barrido hay que hacerlo ahora
# sobre dos ángulos que permitan formar dicho cono. Mediante esos dos
# ángulos (lambda y sigma) se calcula el ángulo beta que forma cada rayo
# con el eje que une el centro del receptor y el del heliostato.
# Dos vectores (mlambda y msigma) almacenan cada valor de los ángulos
# sigma y lambda de manera que sea posible al ejecutar el programa ver
# como la radiación es realmente cónica.
mlambda<-array(dim=c(1,1));msigma<-array(dim=c(1,1))
for (lambda in seq(0,alfa,0.00005)){
# El otro ángulo no barrerá hasta alfa ya que eso daría lugar a una
# pirámide base cuadrada en lugar de a un cono
for (sigma in seq(0,sqrt(alfa^2-lambda^2),0.00005)){
beta<-asin(sqrt(sin(sigma)^2+sin(lambda)^2*cos(sigma)^2))
# Para cada beta existe un ángulo gamma que forma el segmento que une
# el eje del concentrador con el segmento que une el centro del receptor
# y del heliostato
gamma<-asin(((Dref*cos(beta)-sqrt((Dref)^2*(cos(beta))^2-(Dref
)^2+r^2))*sin(beta))/r)
# Al tratarse de un receptor esférico en el que el eje de cada
# concentrador pasa por el punto del receptor al que llega el rayo
# estudiado, el ángulo de incidencia se calcula de la misma manera que en
# el caso plano
I<-(beta+gamma)
i<-i+1
print(i)
mlambda[i]<-lambda; msigma[i]<-sigma
if (I<acep){ w[i]<-1 }
else { w[i]<-0}
}
}
mean(w)
plot(mlambda,msigma)

```

ANEXO 8: Programa en R para el cálculo del radio de un receptor cilíndrico con reconcentradores para que la eficiencia de los mismos tenga valor 1

```
# Valor que debe tener el radio para tener eficiencia 1. Se puede usar
solo a partir de delta-sigma ya que sino sale infinito
alfa<-0.005          #Ángulo error heliostato.
Dref<-400           #Distancia a la torre
acep<-32*2*pi/360   #Ángulo de aceptación.
H<-120              #Altura intersección ejes cono radiación y receptor.
delta<-atan(H/Dref)
i<-0
p<-0
m<-0.001           #Incremento de t que se va realizando hasta que se llega a
eficiencia 1.
t<-1-m
w<-array(dim=c(1,1)) #Array que almacena las eficiencias.
#Mientras la eficiencia sea menor que 1 sigue t aumentando su valor.
while(p<1){
#t sigue aumentando hasta que se alcanza eficiencia 1.
t<-t+m
#El nuevo radio es multiplicado por t
r<-sqrt(H^2+Dref^2)*tan(alfa)*t
#Cálculo de la eficiencia con operaciones anexo 4.
for (sigma in seq(-alfa,alfa,0.00005)){
beta<-delta+sigma
for (lambda in seq(0,sqrt(alfa^2-sigma^2),0.00005)){
phi<-atan(tan(lambda)/cos(delta))
x<-(tan(phi)^2*Dref+sqrt(r^2*(1+tan(phi)^2)-
tan(phi)^2*Dref^2))/(1+tan(phi)^2)
y<-sqrt(r^2-x^2)
z<-(Dref-x)*tan(beta)
epsilon<-atan(y/x)
kappa<-atan((sqrt(y^2+z^2))/(Dref-x))
if(epsilon!=0){
l<-sqrt(z^2+(y+tan(epsilon)*(Dref-x))^2)
I<-acos((((Dref-x)/cos(epsilon))^2+((Dref-x)/cos(kappa))^2-
l^2)/(2*(Dref-x)^2/(cos(kappa)*cos(epsilon)))) }
else {I<-beta}
i<-i+1
if (I<acep){w[i]<-1}
else {w[i]<-0}
}}
p<-mean(w)
i<-0
end}
#Si la eficiencia ya es 1 se muestra el valor de t con el que se ha
conseguido.
print(t)
```

ANEXO 9: Coordenadas en Tonatiuh de un campo de heliostatos similar al de Gemasolar

x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
12,04	54,65	7,24	-84,29	108,13	33,68	-55,65	-114,8	-141,66	8,43	-144,97	60,65	-172,68	15,55	-146,26	-122,37	70,3	-197,07	217,43	72,16
25,97	49,56	-7,24	-84,29	111,57	19,47	-68,23	-107,8	-140,07	22,79	-138,82	73,64	-170,79	29,82	-155,13	-110,91	56,64	-201,42	221,54	58,32
38,08	41	-21,51	-81,82	113,14	4,94	-79,93	-99,43	-137,03	36,92	-131,51	86,02	-167,73	43,88	-163,11	-98,81	42,72	-204,83	224,77	44,25
47,52	29,55	-35,15	-76,96	112,84	-9,68	-90,62	-89,79	-132,56	50,67	-123,11	97,67	-163,52	57,64	-170,14	-86,14	28,59	-207,27	227,12	30
53,61	16,02	-47,76	-69,84	110,65	-24,13	-100,16	-79,02	-126,72	63,89	-113,67	108,51	-158,17	71	-176,19	-72,97	14,33	-208,74	228,55	15,63
55,94	1,37	-58,96	-60,67	106,62	-38,18	-108,42	-67,24	-119,56	76,45	-103,28	118,44	-151,74	83,87	-181,22	-59,38	0	-209,23	229,08	1,2
54,34	-13,37	-68,45	-49,73	100,82	-51,59	-115,3	-54,6	-111,17	88,21	-92,02	127,38	-144,26	96,17	-185,21	-45,44	-14,33	-208,74	228,71	-13,24
48,91	-27,18	-75,92	-37,33	93,33	-64,15	-120,72	-41,27	-101,62	99,06	-80	135,26	-135,79	107,8	-188,12	-31,25	-28,59	-207,27	227,42	-27,62
40,05	-39,08	-81,18	-23,83	84,29	-75,63	-124,6	-27,41	-91,02	108,88	-67,31	142	-126,38	118,69	-189,95	-16,87	-42,72	-204,83	225,23	-41,89
28,37	-48,23	-84,05	-9,64	73,85	-85,86	-126,89	-13,2	-79,47	117,58	-54,05	147,56	-116,1	128,76	-190,69	-2,4	-56,64	-201,42	222,14	-56
14,7	-53,99	-84,47	4,83	62,18	-94,66	-127,57	1,17	-67,1	125,05	-40,35	151,88	-105,02	137,95	-190,32	12,09	-70,3	-197,07	218,17	-69,88
0	-55,96	-82,41	19,17	49,47	-101,88	-126,63	15,53	-54,03	131,22	-26,3	154,93	-93,22	146,18	-188,85	26,51	-83,63	-191,79	213,33	-83,48
-14,7	-53,99	-77,93	32,94	35,94	-107,4	-124,07	29,69	-40,4	136,04	-12,04	156,69	-80,77	153,41	-186,29	40,77	-96,57	-185,61	207,65	-96,76
-28,37	-48,23	-71,17	45,74	21,8	-111,13	-119,94	43,48	-26,36	139,44	12,04	172,96	-67,77	159,58	-182,66	54,8	-109,06	-178,57	201,14	-109,65
-40,05	-39,08	-62,33	57,21	7,31	-113,02	-114,28	56,71	-12,04	141,4	26,34	171,36	-54,3	164,65	-177,97	68,51	-121,03	-170,68	193,84	-122,1
-48,91	-27,18	-51,66	67	-7,31	-113,02	-107,17	69,21	12,04	156,69	40,46	168,59	-40,46	168,59	-172,25	81,83	-132,43	-161,99	185,76	-134,07
-54,34	-13,37	-39,48	74,83	-21,8	-111,13	-98,69	80,84	26,3	154,93	54,3	164,65	-26,34	171,36	-165,54	94,67	-143,21	-162,54	176,94	-145,51
-55,94	1,37	-26,14	80,46	-35,94	-107,4	-88,96	91,44	40,35	151,88	67,77	159,58	-12,04	172,96	-157,88	106,97	-153,32	-142,37	167,42	-156,37
-53,61	16,02	-12,04	83,74	-49,47	-101,88	-78,09	100,88	54,05	147,56	80,77	153,41	12,04	190,32	-149,3	118,65	-162,71	-131,54	157,24	-166,6
-47,52	29,55	12,04	98,19	-62,18	-94,66	-66,24	109,03	67,31	142	93,22	146,18	26,45	188,86	-139,86	129,64	-171,34	-120,09	146,43	-176,18
-38,08	41	26,32	95,36	-73,85	-85,86	-53,54	115,8	80	135,26	105,02	137,95	40,72	186,3	-129,61	139,89	-179,16	-108,07	135,04	-185,05
-25,97	49,56	40,03	90,47	-84,29	-75,63	-40,16	121,09	92,02	127,38	116,1	128,76	54,75	182,67	-118,61	149,33	-186,14	-95,55	123,12	-193,19
-12,04	54,65	52,87	83,61	-93,33	-64,15	-26,26	124,84	103,28	118,44	126,38	118,69	68,46	177,99	-106,93	157,9	-192,25	-82,58	110,7	-200,57
12,04	69,24	64,57	74,95	-100,82	-51,59	-12,04	127,01	113,67	108,51	135,79	107,8	81,78	172,28	-94,63	165,57	-197,45	-69,22	97,85	-207,14
25,87	65,35	74,87	64,66	-106,62	-38,18	12,04	141,4	123,11	97,67	144,26	96,17	94,63	165,57	-81,78	172,28	-201,73	-55,54	84,6	-212,89
38,62	58,72	83,55	52,97	-110,65	-24,13	26,36	139,44	131,51	86,02	151,74	83,87	106,93	157,9	-68,46	177,99	-205,06	-41,59	71,02	-217,8
49,75	49,64	90,42	40,13	-112,84	-9,68	40,4	136,04	138,82	73,64	158,17	71	118,61	149,33	-54,75	182,67	-207,42	-27,45	57,16	-221,84
58,81	38,49	95,33	26,43	-113,14	4,94	54,03	131,22	144,97	60,65	163,52	57,64	129,61	139,89	-40,72	186,3	-208,82	-13,18	43,07	-225
65,4	25,72	98,18	12,15	-111,57	19,47	67,1	125,05	149,91	47,15	167,73	43,88	139,86	129,64	-26,45	188,86	-209,23	1,15	28,81	-227,27
69,27	11,89	98,9	-2,39	-108,13	33,68	79,47	117,58	153,59	33,26	170,79	29,82	149,3	118,65	-12,04	190,32	-208,66	15,47	14,43	-228,63
70,24	-2,45	97,48	-16,88	-102,89	47,32	91,02	108,88	155,98	19,09	172,68	15,55	157,88	106,97	12,04	208,89	-207,11	29,73	0	-229,09
68,27	-16,68	93,94	-31	-95,94	60,18	101,62	99,06	157,08	4,76	173,37	1,17	165,54	94,67	26,31	207,57	-204,59	43,84	-14,43	-228,63
63,45	-30,22	88,38	-44,46	-87,39	72,04	111,17	88,21	156,85	-9,61	172,87	-13,21	172,25	81,83	40,47	205,28	-201,11	57,75	-28,81	-227,27
55,98	-42,49	80,9	-56,94	-77,38	82,69	119,56	76,45	155,32	-23,9	171,18	-27,5	177,97	68,51	54,43	202,03	-196,68	71,38	-43,07	-225
46,17	-52,99	71,66	-68,2	-66,09	91,97	126,72	63,89	152,49	-37,99	168,31	-41,6	182,66	54,8	68,14	197,83	-191,33	84,68	-57,16	-221,84
34,43	-61,27	60,88	-77,98	-53,69	99,71	132,56	50,67	148,38	-51,77	164,28	-55,42	186,29	40,77	81,52	192,7	-185,08	97,59	-71,02	-217,8
21,25	-66,99	48,77	-86,07	-40,4	105,8	137,03	36,92	143,03	-65,11	159,12	-68,85	188,85	26,51	94,53	186,66	-177,96	110,03	-84,6	-212,89
7,18	-69,91	35,61	-92,3	-26,44	110,12	140,07	22,79	136,48	-77,9	152,86	-81,81	190,32	12,09	107,09	179,75	-170,01	121,96	-97,85	-207,14
-7,18	-69,91	21,68	-96,52	-12,04	112,61	141,66	8,43	128,79	-90,04	145,55	-94,21	190,69	-2,4	119,15	172	-161,26	133,32	-110,7	-200,57
-21,25	-66,99	7,28	-98,66	12,04	127,01	141,78	-6,02	120,03	-101,43	137,24	-105,95	189,95	-16,87	130,65	163,43	-151,75	144,05	-123,12	-193,19
-34,43	-61,27	-7,28	-98,66	26,26	124,84	140,44	-20,41	110,26	-111,98	127,98	-116,97	188,12	-31,25	141,53	154,1	-141,53	154,1	-135,04	-185,05
-46,17	-52,99	-21,68	-96,52	40,16	121,09	137,63	-34,59	99,57	-121,58	117,83	-127,18	185,21	-45,44	151,75	144,05	-130,65	163,43	-146,43	-176,18
-55,98	-42,49	-35,61	-92,3	53,54	115,8	133,4	-48,41	88,04	-130,17	106,88	-136,51	181,22	-59,38	161,26	133,32	-119,15	172	-157,24	-166,6
-63,45	-30,22	-48,77	-86,07	66,24	109,03	127,78	-61,73	75,78	-137,67	95,19	-144,91	176,19	-72,97	170,01	121,96	-107,09	179,75	-167,42	-156,37
-68,27	-16,68	-60,88	-77,98	78,09	100,88	120,84	-74,41	62,89	-144,02	82,84	-152,3	170,14	-86,14	177,96	110,03	-94,53	186,66	-176,94	-145,51
-70,24	-2,45	-71,66	-68,2	88,96	91,44	112,65	-86,31	49,47	-149,16	69,93	-158,65	163,11	-98,81	185,08	97,59	-81,52	192,7	-185,76	-134,07
-69,27	11,89	-80,9	-56,94	98,69	80,84	103,28	-97,32	35,63	-153,05	56,53	-163,9	155,13	-110,91	191,33	84,68	-68,14	197,83	-193,84	-122,1
-65,4	25,72	-88,38	-44,46	107,17	69,21	92,85	-107,32	21,5	-155,67	42,74	-168,03	146,26	-122,37	196,68	71,38	-54,43	202,03	-201,14	-109,65
-58,81	38,49	-93,94	-31	114,28	56,71	81,45	-116,21	7,19	-156,98	28,66	-170,99	136,55	-133,12	201,11	57,75	-40,47	205,28	-207,65	-96,76
-49,75	49,64	-97,48	-16,88	119,94	43,48	69,21	-123,89	-7,19	-156,98	14,38	-172,78	126,05	-143,11	204,59	43,84	-26,31	207,57	-213,33	-83,48
-38,62	58,72	-98,9	-2,39	124,07	29,69	56,25	-130,29	-21,5	-155,67	0	-173,38	114,82	-152,26	207,11	29,73	-12,04	208,89	-218,17	-69,88
-25,87	65,35	-98,18	12,15	126,63	15,53	42,71	-135,33	-35,63	-153,05	-14,38	-172,78	102,92	-160,54	208,66	15,47	12,04	228,77	-222,14	-56
-12,04	69,24	-95,33	26,43	127,57	1,17	28,72	-138,98	-49,47	-149,16	-28,66	-170,99	90,43	-167,9	209,23	1,15	26,43	227,56	-225,23	-41,89
12,04	83,74	-90,42	40,13	126,89	-13,2	14,43	-141,18	-62,89	-144,02	-42,74	-168,03	77,42	-174,28	208,82	-13,18	40,71	225,44	-227,42	-27,62
26,14	80,46	-83,55	52,97	124,6	-27,41	0	-141,91	-75,78	-137,67	-56,53	-163,9	63,96	-179,65	207,42	-27,45	54,83	222,43	-228,71	-13,24
39,48	74,83	-74,87	64,66	120,72	-41,27	-14,43	-141,18	-88,04	-130,17	-69,93	-158,65	50,14	-183,99	205,06	-41,59	68,74	218,53	-229,08	1,2
51,66	67	-64,57	74,95	115,3	-54,6	-28,72	-138,98	-99,57	-121,58	-82,84	-152,3	36,02	-187,27	201,73	-55,54				

ANEXO 10: Script en Tonatiuh para los campos de heliostatos analizados

Script para la ejecución del campo de heliostatos de la central estudiada. Este programa se puede utilizar cuando el radio del receptor es de 4 metros o cuando tenemos concentradores secundarios que dan lugar a un radio de apertura de 4 metros. Para diferentes radios del receptor habrá que cambiar los valores en los arrays del aiming point y del radio.

```
//Crear un nodo para el campo de heliostatos
var rootnode="//SunNode/RootNode";
tonatiuh.SelectNode(rootnode);
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode(rootnode.concat("/TSeparatorKit1"));
tonatiuh.SetNodeName("HeliostatField");
var fieldPath = rootnode.concat("/HeliostatField");

//Crear un nodo para cada heliostato organizados por filas
var filas = new Array
(23,30,36,42,48,55,61,68,75,82,91,99,77,76,77,76,77,76,77,76,77,76,77,72,66,62,59,56,53,102
,95,90,85,80,75,70,65,58,49,38,23);
for( j=1;j<= 41; ++j){
tonatiuh.SelectNode(fieldPath); tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode(fieldPath.concat("/TSeparatorKit1"));
tonatiuh.SetNodeName("Row".concat(j));
}
tonatiuh.SelectNode(fieldPath);
for( i=1;i<= 23; ++i){
tonatiuh.SelectNode(fieldPath.concat("/Row1")); tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode(fieldPath.concat("/Row1/TSeparatorKit1"));
tonatiuh.SetNodeName("Heliostat".concat(i));
}
//....
//Se hace para cada fila
//....
tonatiuh.SelectNode(fieldPath);
for( i=1;i<= 23; ++i){
tonatiuh.SelectNode(fieldPath.concat("/Row41")); tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode(fieldPath.concat("/Row41/TSeparatorKit1"));
tonatiuh.SetNodeName("Heliostat".concat(i));
}

//Introducir coordenadas para los heliostatos
tonatiuh.SetValue( fieldPath.concat("/Row1/Heliostat1") ,"translation","12.04 0 54.65");
//....
//Hacer lo mismo para todos los heliostatos
//....
tonatiuh.SetValue( fieldPath.concat("/Row41/Heliostat23") ,"translation","-345.94 0 -720.3");
```

```
//Incluir en un array los valores de los radios y coordenadas del aiming point de todos los heliostatos
var radio = new Array (271.9,.....,1609.868);
var apx = new Array (0.861,....., -1.732);
var apz = new Array (3.906,....., -3.606);
var k = 0;

//Se pasa mediante dos 'for' por los diferentes heliostatos asignando valores
for(var j=1;j<= 41; ++j){
var h= filas [j-1];
for (var i=1; i<=h; i++){
k = k+1;
var aimpx = apx [k-1];
var aimpz = apz [k-1];
tonatiuh.SelectNode(fieldPath.concat("/Row",j.toString(),"/Heliostat".concat(i)));
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode(fieldPath.concat("/Row",j.toString(),"/Heliostat",i.toString(),"/TSeparator
Kit1"));
tonatiuh.SetNodeName("HeliostatTrackerNode" );

//Sistema de seguimiento de cada heliostato
tonatiuh.CreateTracker("Heliostat_tracker");
tonatiuh.SetValue(fieldPath.concat("/Row",j.toString(),"/Heliostat",i.toString(),"/HeliostatTrack
erNode/Heliostat_tracker" ), "aimingPoint", " ".concat(aimpx," 125.63 ".concat(aimpz)));
//Crear superficie del heliostato a la que se le asignan las magnitudes de los parámetros
tonatiuh.SelectNode(fieldPath.concat("/Row",j.toString(),"/Heliostat",i.toString(),"/HeliostatTr
ackerNode"));
tonatiuh.CreateSurfaceNode();
tonatiuh.SelectNode(
fieldPath.concat("/Row",j.toString(),"/Heliostat",i.toString(),"/HeliostatTrackerNode".concat(
"/TShapeKit1"));
tonatiuh.SetNodeName( "HeliostatSurface");
var heliostatSurfacePath =
fieldPath.concat("/Row",j.toString(),"/Heliostat",i.toString(),"/HeliostatTrackerNode/HeliostatS
urface");
var rad = radio [j-1]
tonatiuh.CreateShape("Spherical_rectangle");
tonatiuh.SetValue( heliostatSurfacePath.concat("/Spherical_rectangle"), "radius", rad );
tonatiuh.SetValue( heliostatSurfacePath.concat("/Spherical_rectangle"), "widthX", "11.415");
tonatiuh.SetValue( heliostatSurfacePath.concat("/Spherical_rectangle"), "widthZ", "10.42");
tonatiuh.SetValue( heliostatSurfacePath.concat("/Spherical_rectangle"),
"activeSide","INSIDE");
tonatiuh.CreateMaterial("Specular_Standard_Material");
tonatiuh.SetValue( heliostatSurfacePath.concat( "/Specular_Standard_Material" ),
"m_reflectivity", "1" );
tonatiuh.SetValue( heliostatSurfacePath.concat( "/Specular_Standard_Material" ),
"m_distribution", "NORMAL" );
tonatiuh.SetValue( heliostatSurfacePath.concat( '/Specular_Standard_Material'
),'m_sigmaSlope', "1.55" );
}}
```

ANEXO 11: Script en Tonatiuh para la torre

Script para la simulación de la torre. En el script se crea un nodo anterior que agrupa tanto a la torre como al receptor y a los reconcentradores. El programa que se muestra es el elegido para una torre en la que se va a tener un receptor con reconcentradores en la que el radio de apertura total es de 4 metros. Se puede emplear para otros casos sustituyendo el valor del radio.

```
//Seleccionar el RootNode creado en el script del campo de heliostatos
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode");
//Crear nudo torre y dentro de él uno para la torre propiamente dicha (base)
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/TSeparatorKit1");
tonatiuh.SetNodeName("Tower");
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower","rotation",-1 0 0 1.570796");
tonatiuh.SelectNode( "//SunNode/RootNode/Tower" );
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode( "//SunNode/RootNode/Tower/TSeparatorKit1" );
tonatiuh.SetNodeName( "Base" );
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower/Base","translation","0 0 0");

//Crear la superficie y asignar valores a los parámetros que definen la torre
tonatiuh.CreateSurfaceNode();
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/Tower/Base/TShapeKit1");
tonatiuh.SetNodeName("TowerBaseSurface");
tonatiuh.CreateShape( "Cylinder" );
var baseSurfaceNode = "//SunNode/RootNode/Tower/Base/TowerBaseSurface/Cylinder";
tonatiuh.SetValue( baseSurfaceNode, "radius", "3.29" );
tonatiuh.SetValue( baseSurfaceNode, "length", "130.63");
```

ANEXO 12: Script en Tonatiuh para el receptor

Script para generación receptor. Está hecho para radio 4 de apertura con reconcentradores, cambiando el valor del radio se puede utilizar para todos los casos.

```
//Seleccionar el nudo torre creado y crear dentro suya uno para el receptor. Asignarle los valores
de su traslación y rotación.
tonatiuh.SelectNode( "//SunNode/RootNode/Tower" );
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode( "//SunNode/RootNode/Tower/TSeparatorKit1" );
tonatiuh.SetNodeName( "Receiver");
//Cambiar los parámetros de traslación.
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower/Receiver", "translation", "0 0 120.63");

//Crear superficie y asignarle parámetros.
tonatiuh.SelectNode( "//SunNode/RootNode/Tower/Receiver" );
tonatiuh.CreateSurfaceNode();
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/Tower/Receiver/TShapeKit1");
tonatiuh.SetNodeName("ReceiverSurface");
//Añadir una forma y material al receptor
tonatiuh.CreateShape( "Cylinder");
tonatiuh.CreateMaterial( "Specular_Standard_Material" );
//Cambiar los parámetros del receptor
var ReceiverShapeNode = "//SunNode/RootNode/Tower/Receiver/ReceiverSurface/Cylinder";
tonatiuh.SetValue( ReceiverShapeNode, "radius", "3.39" );
tonatiuh.SetValue( ReceiverShapeNode, "length", "10");
```

ANEXO 13: Script en Tonatiuh para los concentradores secundarios

Script para la ejecución en Tonatiuh de concentradores secundarios. Según el semiángulo de aceptación de los reconcentradores se cambiará aquí el valor de 'acep'.

```
//Seleccionar nudo torre creado en anexo 11
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/Tower");
//Crear nudo para los concentradores secundarios
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/Tower/TSeparatorKit1");
tonatiuh.SetNodeName("SecondaryConcentrator");
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator","rotation","0 0 1
3.2716241");

//Asignar los valores deseados del radio en el que se encuentra la entrada a los concentradores
secundarios, el semiángulo de aceptación, apotema 'a' del hexágono de salida y la profundidad
de los reconcentradores
var radioapertura = 4;
var acep=40*3.141593/180;
var a = 0.26;
var altura = 0.61;

//Calcular el esto de parámetros con las ecuaciones de los concentradores secundarios
var cmax = 1/Math.sin(acep);
//Lado del hexágono de salida
var lxmin = a / Math.cos(30*3.141593/180);
var thetamin = Math.acos((Math.pow(altura,2)-
4*Math.pow((Math.pow(a,3)*Math.pow(Math.cos(acep/2)+Math.sin(acep/2),7)*((a+altura)*
Math.cos(acep/2)+(a-altura)*Math.sin(acep/2))*Math.pow(Math.sin(acep,2)),0.5)+
a*altura*(2*Math.cos(acep)+Math.sin(2*acep)))/(6*Math.pow(a,2)+Math.pow(altura,2)-
2*Math.pow(a,2)*(Math.cos(2*acep)-
4*Math.sin(acep))+4*a*altura*Math.cos(acep)*(1+Math.sin(acep))));
var xt = (2*a*(1+Math.sin(acep))*Math.sin(thetamin - acep))/(1-Math.cos(thetamin)) - a;
//Lado del hexágono de entrada
var lxmax = xt / Math.cos(30*3.141593/180);
var radio = radioapertura - altura;
//Número de reconcentradores por fila
var n = Math.floor((2*3.141593*(radio+altura)/(3*lxmax)));

//Parámetros de posición de los reconcentradores
var giro = 3*lxmax/(radio+altura);
var girof = 1.5*lxmax/(radio+altura);
var incf = 0.5*lxmax*Math.sqrt(3);

//Número de filas de concentradores secundarios necesarias para cubrir la totalidad del
receptor
var nf = 23;
```

```
//Altura a la que se encuentra la primera fila de reconcentradores
var pos = 125.63 - Math.sqrt(3)*lxmax*(nf-1)/4
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator","translation","0 0 "
.concat(pos));
//Moverse fila a fila ajustando la altura y giro de los reconcentradores
for ( j=1; j<=nf; ++j){
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator");
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/TSeparatorKit1");
tonatiuh.SetNodeName("Row".concat(j));
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j));
var mov = ( j-1 ) * incf;
```

```
//Las filas pares se encuentran giradas respecto a las impares para que los concentradores
secundarios encajen
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j),"tra
nslation", "0 0 " .concat(" ",mov));
if (j==2){
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j),"rot
ation", "0 0 1" .concat(" ",girof));
if (j==4){
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j),"rot
ation", "0 0 1" .concat(" ",girof));
if (j==6){
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j),"rot
ation", "0 0 1" .concat(" ",girof));
if (j==8){
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j),"rot
ation", "0 0 1" .concat(" ",girof));
if (j==10){
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j),"rot
ation", "0 0 1" .concat(" ",girof));
if (j==12){
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j),"rot
ation", "0 0 1" .concat(" ",girof));
if (j==14){
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j),"rot
ation", "0 0 1" .concat(" ",girof));
if (j==16){
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j),"rot
ation", "0 0 1" .concat(" ",girof));
if (j==18){
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j),"rot
ation", "0 0 1" .concat(" ",girof));
if (j==20){
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j),"rot
ation", "0 0 1" .concat(" ",girof));
if (j==22){
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j),"rot
ation", "0 0 1" .concat(" ",girof));
```

```
//Crear en cada fila el número de reconcentradores necesarios para que ocupen la
circunferencia en la mayor medida posible
for ( i=1; i<=n; ++i){
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j));
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j.to
String(),"TSeparatorKit1"));
tonatiuh.SetNodeName("Concentrator".concat(i));
//Girar los reconcentradores respecto al eje del receptor
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j.to
String(),"Concentrator",i.toString()));
var rsc = ( i - 1 ) * giro
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j.toStri
ng(),"Concentrator",i.toString(),"rotation","0 0 1" .concat(" ",rsc));

//Una vez tenemos las posiciones en las que va a estar el reconcentrador se crea el
reconcentrador en sí
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j.to
String(),"Concentrator",i.toString()));
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j.to
String(),"Concentrator",i.toString(),"TSeparatorKit1"));
tonatiuh.SetNodeName("Concentrator");

//El reconcentrador debe comenzar al final del radio del receptor
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j.toStri
ng(),"Concentrator",i.toString(),"Concentrator"),"translation","0 " .concat(radius, " 0"));

//Se crean 6 parábolas CPC que se unen dando lugar a un concentrador secundario
for( h=1;h<= 6; ++h){
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j.to
String(),"Concentrator",i.toString(),"Concentrator"));
tonatiuh.CreateGroupNode();
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j.to
String(),"Concentrator",i.toString(),"Concentrator/TSeparatorKit1"));
tonatiuh.SetNodeName("Parab".concat(h));
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j.to
String(),"Concentrator",i.toString(),"Concentrator/Parab",h.toString()));

//Cada parábola debe estar girada respecto al eje del concentrador secundario para que la
unión entre superficies sea la correcta
var rot = ( h-1 ) * 1.0471981 + 1.570796
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j.toStri
ng(),"Concentrator",i.toString(),"Concentrator/Parab",h.toString(),"rotation","0 1 0"
.concat(" ",rot));

//Crear nudo de superficie
tonatiuh.CreateSurfaceNode();
tonatiuh.SelectNode("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j.to
String(),"Concentrator",i.toString(),"Concentrator/Parab",h.toString(),"TShapeKit1"));
```

```
//Crear CPC
tonatiuh.CreateShape("Trough_CPC");
var
tower_shapeKitSecondaryConcentrator="//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j.toString(),"/Concentrator",i.toString(),"/Concentrator/Parab",h.toString(),"/TShapeKit1/Trough_CPC");

//Modificar las propiedades del CPC y asignar los valores calculados con las ecuaciones
tonatiuh.SetValue(tower_shapeKitSecondaryConcentrator,"a",a);
tonatiuh.SetValue(tower_shapeKitSecondaryConcentrator,"cMax",cmax);
tonatiuh.SetValue(tower_shapeKitSecondaryConcentrator,"lengthXMin",lxmin);
tonatiuh.SetValue(tower_shapeKitSecondaryConcentrator,"lengthXMax",lxmax);
tonatiuh.SetValue(tower_shapeKitSecondaryConcentrator,"height",altura);

//Asignar material y caracterizarlo
tonatiuh.CreateMaterial( "Specular_Standard_Material" );
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j.toString(),"/Concentrator",i.toString(),"/Concentrator/Parab",h.toString(),"/TShapeKit1/Specular_Standard_Material"), "m_reflectivity", "1" );
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j.toString(),"/Concentrator",i.toString(),"/Concentrator/Parab",h.toString(),"/TShapeKit1/Specular_Standard_Material"), "m_ambientColor", "0.9 0.95 0" );
tonatiuh.SetValue("//SunNode/RootNode/Tower/SecondaryConcentrator/Row".concat(j.toString(),"/Concentrator",i.toString(),"/Concentrator/Parab",h.toString(),"/TShapeKit1/Specular_Standard_Material"), "m_diffuseColor", "0.2 0.6 0.1" );
}
}
}
```

ANEXO 14: Programa en R para la lectura de los archivos binarios resultantes de la simulación en Tonatiuh de una central de torre con receptor cilíndrico

Programa de R que permite leer los archivos binarios producidos en las simulaciones en Tonatiuh. Este programa es el necesario cuando la central simulada tiene un receptor con concentradores secundarios con un radio total de apertura de 4 metros. Si se quiere considerar otros casos se modificará del programa el directorio de trabajo, archivos a leer y los parámetros de receptor.

```
setwd("C:/Directorio de trabajo")

library(ash)

#Leer la hoja de parámetros que se obtiene de la simulación de Tonatiuh
ReadParameters <- function(filename) {
  lines<-readLines(filename, n=-1)
  nLines<-length(lines)
  startParameters <-0
  endParameters <-0
  endSurfaces <-0
  nLine<-0
  for( line in lines){
    nLine<-nLine+1
    if( line == "START PARAMETERS"){
      startParameters <-nLine
    }else if( line == "END PARAMETERS"){
      endParameters <-nLine
    }else if( line == "END SURFACES"){
      endSurfaces <-nLine
    }
  }
  nParameters<-(endParameters-startParameters-1)
  powerPerPhoton<-lines[endSurfaces+1]
  return(c( nParameters, powerPerPhoton))
}

#Leer los archivos binarios procedentes de la simulación en Tonatiuh
ReadTonatiuhData <- function(tonatiuhDataFile, nParameters) {
  fileName <- file(tonatiuhDataFile, "rb")
  fileSize <- file.info(tonatiuhDataFile)$size
  photonData <-
  readBin(fileName, what="numeric", n=(fileSize)/8, endian="big")
  close(fileName)

  nPhotons <- length(photonData)/nParameters

  photonMap<-photonData
  dim(photonMap)<-c(nParameters, nPhotons)
  photonMap<-t(photonMap)
```

```

return(photonMap)
}
CylinderCoord2D<-function( coord3D,absorberRadius)
{

return( c( coord3D[3], -atan2( coord3D[1],coord3D[2])*absorberRadius
))
}

#Se pone al receptor los parámetros con los que se ha simulado (radio y
longitude). Se despliega su área formando un plano para que se pueda ver
una vez ejecutado el programa la distribución del flujo.

#El radio del receptor es 3.39, lo que es 4 es el radio al que llega la
radiación debido a la altura de los reconcentradores, el radio de
aperture total.
absorberRadius<-3.39 #m
absorberLength<-10 #m
absorberPerimeter <- 2* pi * absorberRadius
absorberArea <- absorberPerimeter * absorberLength #square meters

lengthDivisions <- 100
widthDivisions <- 100

#Se leen los parámetros de la simulación
tonatiuhFilesDir<-"."
#Leer archivo de cuando el radio de aperture es 4 y hay reconcentradores.
tonatiuhFilesRoot<-"Central-torre-radio4cs"
tonatiuhParametersFile<-paste(paste(tonatiuhFilesDir,
tonatiuhFilesRoot , sep="/"), "_parameters.txt" , sep="")
simulationParameters<-ReadParameters(tonatiuhParametersFile)
nParameters<-as.numeric(simulationParameters[1])
powerPerPhoton<-as.numeric(simulationParameters[2])
print(powerPerPhoton)

#Se leen los datos de la simulación
tonatiuhDataFilesPattern<-paste(tonatiuhFilesRoot, "_*.dat" , sep="")
tonatiuhDataFiles<-list.files(path=tonatiuhFilesDir,pattern="*.dat" )

#Puede haber más de un archivo binario
f<-1
for(file in tonatiuhDataFiles){
photonMapI<- ReadTonatiuhData(paste(tonatiuhFilesDir, file ,
sep="/"),nParameters)
if( f==1) {
photonMap<- photonMapI
}
else{
photonMap<-rbind( photonMap ,photonMapI)
}
f<-f+1
}
nPhotons <- nrow(photonMap)
print(nPhotons)

#Se calcula la potencia total que llega hasta el receptor
totalPower <- nPhotons*powerPerPhoton

```

```

#Se analiza el aspecto térmico del receptor mediante la distribución del
flujo.
#Definir el tamaño de celda
widthElementLength <- absorberLength/widthDivisions
lengthElementLength <- absorberPerimeter/lengthDivisions
elementArea <- widthElementLength*lengthElementLength

nbin <- c(lengthDivisions, widthDivisions)

#Se pasa de coordenadas tridimensionales a bidimensionales
coordinates3D <- photonMap[,2:4]
coordinates2D<-t(apply(coordinates3D, 1, CylinderCoord2D,
absorberRadius=absorberRadius))

#Se cuenta el número de fotones que llega a cada una de las divisiones
realizadas
xCoord<-coordinates2D[,2]
zCoord<-coordinates2D[,1]
#El plano en el que se recoge la distribución del flujo se define su
comienzo desde abajo en sentido vertical y desde el centro en horizontal.
photonCounts <- bin2( as.matrix(cbind(xCoord,zCoord)), matrix( c( -
0.5*absorberPerimeter, 0, 0.5*absorberPerimeter, absorberLength ),2,2)
, nbin )$nc

#Se calcula el flujo térmico de cada división
fluxConversionFactor <- powerPerPhoton/elementArea # Unidades:
W/(m^2*photon)
incidentFluxMatrix <- photonCounts * fluxConversionFactor # Unidades:
W/m^2

#Mostrar distribución del flujo térmico.

jet.colors <- colorRampPalette(c("#00007F", "blue", "#007FFF", "cyan",
"#7FFF7F", "yellow", "#FF7F00", "red", "#7F0000"))
z <- seq(widthElementLength/2,absorberLength-
widthElementLength/2,by=widthElementLength)
x <- seq(-
absorberPerimeter/2+lengthElementLength/2,absorberPerimeter/2-
lengthElementLength/2,by=lengthElementLength)
filled.contour(x,z,incidentFluxMatrix,color=jet.colors,main="Distribuc
ión del flujo en receptor de radio 4m.",xlab="x(m)",ylab="y(m)",
key.title=title(main=expression(paste('W/m'^2,sep=''))))

#Escribir matriz de flujo en un archive.
matrixFileName <- 'fluxMatrix.txt'
write.table(incidentFluxMatrix, matrixFileName, sep=';',dec=",")

#Mostrar potencia y número de fotones.
nPhotons
totalPower

```

ANEXO 15: Programa en R para la lectura de los archivos binarios resultantes de la simulación en Tonatiuh de una central de torre con un receptor de 6 superficies planas inclinadas hacia el campo de heliostatos

Programa en R que permite leer los archivos binarios resultantes de la simulación de una central de torre con reconcentradores inclinados hacia el campo. En este trabajo el receptor consta de 6 superficies de las que se calcula potencia y flujo térmico aplicando para cada una de ellas este programa.

```
setwd("C:/Directorio de trabajo de la superficie a analizar")

library(ash)

#El receptor ahora no es cilíndrico sino un conjunto de superficies
planas. Se analiza la potencia y distribución de flujo para cada una de
las superficies. Si quisiéramos saber la potencia total que llega al
receptor, al simular en R habría que exportar las 6 superficies que lo
componen.

ReadParameters <- function(filename) {
  lines<-readLines(filename, n=-1)
  nLines<-length(lines)
  startParameters <-0
  endParameters <-0
  endSurfaces <-0
  nLine<-0
  for( line in lines){
    nLine<-nLine+1
    if( line == "START PARAMETERS"){
      startParameters <-nLine
    }else if( line == "END PARAMETERS"){
      endParameters <-nLine
    }else if( line == "END SURFACES"){
      endSurfaces <-nLine}}
  nParameters<-(endParameters-startParameters-1)
  powerPerPhoton<-lines[endSurfaces+1]
  return(c( nParameters,powerPerPhoton))}

ReadTonatiuhData <- function(tonatiuhDataFile,nParameters) {
  fileName <- file(tonatiuhDataFile, "rb")
  fileSize <- file.info(tonatiuhDataFile)$size
  photonData <-
  readBin(fileName,what="numeric",n=(fileSize)/8, endian="big")
  close(fileName)
  nPhotons <- length(photonData)/nParameters
  photonMap<-photonData
  dim(photonMap)<-c(nParameters,nPhotons)
  photonMap<-t(photonMap)
  return(photonMap)}

CylinderCoord2D<-function( coord3D,absorberRadius)
```

```

{return( c( coord3D[3], coord3D[1] ))}

#Se toma los parámetros de un receptor cuadrado al ser esta la forma que
devuelve R.
absorberWidth<-10 #m
absorberLength<-10 #m

#El área es la de un cuadrado.
absorberArea <- absorberWidth * absorberLength
lengthDivisions <- 100
widthDivisions <- 100

#Se lee el plano N°X en cuestión
tonatiuhFilesDir<-"."
tonatiuhFilesRoot<- "plano (X) "
tonatiuhParametersFile<-paste(paste(tonatiuhFilesDir,
tonatiuhFilesRoot , sep="/"), "_parameters.txt" , sep="")

simulationParameters<-ReadParameters(tonatiuhParametersFile)
nParameters<-as.numeric(simulationParameters[1])
powerPerPhoton<-as.numeric(simulationParameters[2])
print(powerPerPhoton)
tonatiuhDataFilesPattern<-paste(tonatiuhFilesRoot, "_*.dat" , sep="")
tonatiuhDataFiles<-list.files(path=tonatiuhFilesDir,pattern="*.dat" )

f<-1
for(file in tonatiuhDataFiles){
  photonMapI<- ReadTonatiuhData(paste(tonatiuhFilesDir, file ,
  sep="/"),nParameters)
  if( f==1) {photonMap<- photonMapI}
  else{photonMap<-rbind( photonMap ,photonMapI)}
  f<-f+1}
nPhotons <- nrow(photonMap)
print(nPhotons)

totalPower <- nPhotons*powerPerPhoton
widthElementLength <- absorberLength/widthDivisions
lengthElementLength <- absorberWidth/lengthDivisions
elementArea <- widthElementLength*lengthElementLength
nbin <- c( lengthDivisions, widthDivisions)

coordinates3D <- photonMap[,2:4]
coordinates2D<-t(apply(coordinates3D, 1, CylinderCoord2D,
absorberRadius=absorberRadius))
xCoord<-coordinates2D[,2]
zCoord<-coordinates2D[,1]
photonCounts <- bin2( as.matrix(cbind(xCoord,zCoord)), matrix( c( -
0.5*absorberRadius, -absorberLength, 0.5*absorberRadius, 0 ),2,2) ,
nbin )$nc
fluxConversionFactor<-powerPerPhoton/elementArea #Unidades:
W(m^2*photon)
incidentFluxMatrix<-photonCounts*fluxConversionFactor #Unidades: W/m^2

jet.colors <- colorRampPalette(c("#00007F", "blue", "#007FFF", "cyan",
"#7FFF7F", "yellow", "#FF7F00", "red", "#7F0000"))
z <- seq(widthElementLength/2,absorberLength-
widthElementLength/2,by=widthElementLength)
x <- seq(-absorberRadius/2+lengthElementLength/2,absorberRadius/2-
lengthElementLength/2,by=lengthElementLength)

```

```
filled.contour(x, z, incidentFluxMatrix, color=jet.colors, main="Distribuc  
ión del flujo en superficie (orientación)", xlab="x (m)", ylab="y (m)",  
key.title=title(main=expression(paste('W/m'^2, sep='')))) )  
  
matrixFileName <- 'fluxMatrix.txt'  
write.table(incidentFluxMatrix, matrixFileName, sep=';', dec=",")  
  
nPhotons; totalPower
```