



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO CONCEPTUAL DE UN HORNO SOLAR DE ALTA TEMPERATURA, MEDIANTE SEGMENTO DE PARABOLOIDE MÓVIL, CON RECEPTOR FIJO, DE PEQUEÑA ESCALA.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

IGNACIO ADOLFO BAUERLE CONCHA

PROFESOR GUÍA:

ROBERTO ROMÁN LATORRE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

JOSÉ MIGUEL CARDEMIL IGLESIAS

GUILLERMO JIMÉNEZ ESTEVEZ

SANTIAGO DE CHILE

2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TITULO DE:** Ingeniero Civil Mecánico
POR: Ignacio Bauerle Concha
FECHA: 18/4/2018
PROFESOR GUIA: Roberto Román Latorre

Diseño conceptual de un horno solar de alta temperatura, mediante segmento de paraboloide móvil, con receptor fijo, de pequeña escala.

Dentro de todo el rango de las diferentes energías renovables no convencionales, la energía solar es la que se ha visto mayormente impulsada en los últimos años. De los diferentes tipos de tecnologías solares, la concentración solar (CS) es la que permite lograr mayores temperaturas de trabajo. Los CS basan su principio de funcionamiento en redirigir toda la radiación incidente de una superficie en una zona más pequeña, denominada zona focal. En consecuencia, toda tecnología CS posee, al menos, un elemento concentrador y un elemento receptor. En las tecnologías CS de alta temperatura, la zona focal puede alcanzar elevados valores de densidades energéticas, y, por consecuencia, altísimas temperaturas. Los hornos solares son ejemplos de CS de alta temperatura. Por otro lado, el norte de Chile posee un potencial solar privilegiado, ideal para el desarrollo de tecnologías CS. Es por ello que resulta motivador la idea de diseñar un horno solar para dicha zona geográfica.

Para llevar a cabo el diseño del horno lo primero que se realiza es una recopilación bibliográfica del estado del arte de las tecnologías CS. Posteriormente, se define el tipo de horno solar a utilizar, así como también la ubicación geográfica de diseño. Con dichos parámetros definidos, se hace un diseño conceptual del horno, se identifican sus parámetros y la relación que existe entre ellos. Con las relaciones entre los parámetros ya definida, se seleccionan los valores para dichos parámetros, y se realiza un análisis tanto óptico como térmico del horno. Dicho análisis entrega tanto la potencia como la temperatura del horno, dentro de otros parámetros de interés.

En cuanto al lugar de diseño, se elige la localidad de San Pedro de Atacama. A su vez, se selecciona un concentrador tipo Scheffler. Con el diseño definido, se realiza el análisis óptico-térmico para siete configuraciones distintas. Dichas configuraciones varían en el valor de uno o más parámetros. Para el análisis óptico-térmico se utilizan los softwares SolTrace y Maple. Los resultados obtenidos para las siete configuraciones indican que las temperaturas máximas alcanzadas varían entre 1.211-1.727 [°C]. Por otro lado, la variación de la potencia térmica varía entre 1.544-12.000 [W]. Por su parte, las superficies brutas de reflectoras varían entre 3,62-28,43 [m²], siendo la más pequeña la que obtiene los menores valores en cuanto a temperatura y potencia, mientras que los máximos son alcanzados por la configuración de mayor superficie. La configuración más pequeña es también la que más tarda en llegar al estado estacionario, demorándose 7,31 [min], mientras que la configuración más grande tarda tan solo 2,63 [min].

Finalmente se concluye que el diseño conceptual del horno cumple con los requisitos de diseño. Entonces, queda como trabajo propuesto el desarrollar la ingeniería básica y posteriormente la ingeniería de detalle del prototipo.

Dedicado a Ágata, que con su valentía me ha inspirado día a día.

Agradecimientos

A mi familia, por el apoyo y compañía que me han dado desde que nací: gracias. A mis padres por educarme desde que era un niño. A mi viejo, por enseñarme la importancia de la sencillez y mostrarme el valor de lo simple, reflejándolo siempre con el ejemplo. A mi vieja, por enseñarme a vivir con y por los ideales, demostrándome que uno debe ser consecuente con ellos día a día. Y a mis hermanos, Ágata, Samu y Javi, por acompañarme y darme tantos momentos de alegría juntos.

A scout, por ayudarme a forjar mi personalidad desde que era un pequeño. Scout, junto con mi familia, son los principales responsables de la persona que soy hoy en día. Gracias por hacerme crecer creyendo en los ideales y en que siempre está en uno hacer el cambio. Agradezco profundamente a todos mis amigos que conocí en Manqueman, también a todos los que fueron mis dirigentes, pero en especial a cada uno de mis beneficiarios, me llenaron el corazón de alegrías y, sobre todo, de aprendizaje.

A mis amigos de mecánica, gracias por todos los buenos momentos que me hicieron pasar los últimos años en la u. Al Pancho Born, por compartir conmigo prácticamente todo mi camino universitario, y por darme el privilegio de abrirse a mí y poder conocerlo tal cual es.

A mis amigos del colegio, en especial a los de Liga Deportiva Jañabañense, por tantos buenos momentos vividos. A mis amigos de Chicha al Cuerno, por integrarme en su grupo y hacerme sentir uno más. En especial al Pancho y al Keko, por compartir dos tremendos años de mi vida, de mucho crecimiento y aprendizaje.

Al profesor Roberto Román, por acompañarme durante todo este proceso, dándose el tiempo para responderme las dudas cada vez que lo necesité. Pero por sobre todo por traspasarme el gusto por hacer bien las cosas.

A los profes y funcionarios de mecánica y la u. Especialmente a los tíos de Molina, me mostraron e hicieron que me encantara con la parte más práctica y concreta de la mecánica.

A la Yoli, por sacarme una sonrisa cada vez que compartimos.

Al Sherlock por acompañarme tantas noches de estudio.

A la Pancha por llevarme sano y salvo tantas veces a la u y a donde quise ir.

A Roger Federer, por ser un ejemplo durante todos estos años. No solo por demostrarme que siempre se pueden lograr grandes cosas, si no que por mostrarme que se puede estar en la cima sin perder la humildad y sin sacar el foco de las cosas importantes.

Por último, al deporte y la naturaleza, por ser mi mecanismo de escape, de reencontrarme conmigo mismo y de disfrutar la vida.

Tabla de contenido

1	Introducción	1
1.1	Motivación	3
1.2	Objetivo general.....	3
1.3	Objetivos específicos	3
1.4	Alcances.....	4
2	Antecedentes generales	5
2.1	Energía en Chile.....	5
2.2	Energía solar	8
2.2.1	Geometría entre el Sol y la Tierra.....	8
2.3	Concentradores solares	12
2.3.1	Principio de los concentradores parabólicos.....	15
2.3.2	Concentradores solares de receptor fijo.....	16
2.3.3	Concentrador Scheffler	17
2.4	Hornos solares de alta temperatura.....	21
2.5	Trazado de rayos	23
2.6	Transferencia de calor.....	26
2.6.1	Conducción	27
2.6.2	Convección	28
2.6.3	Radiación	30
2.6.4	Régimen transiente	32
3	Metodología	33
4	Resultados y Discusión	36

4.1	Selección del tipo de concentrador	36
4.2	Selección del lugar geográfico	36
4.3	Modelo del receptor	38
4.3.1	Diseño del receptor	39
4.3.2	Nomenclatura del receptor.....	42
4.3.3	Modelo térmico del receptor.....	43
4.4	Parámetros independientes del receptor.....	51
4.5	Parámetros del concentrador.....	61
4.6	Parámetros dependientes del receptor.....	63
4.7	Temperaturas alcanzadas	78
4.8	Análisis térmico transiente.....	87
4.9	Análisis con temperatura objetivo de 1200°C	90
5	Conclusiones	96
5.1	Conclusiones generales.....	96
5.2	Conclusiones específicas	97
5.3	Comentarios finales y sugerencias para trabajos futuros.....	102
6	Bibliografía.....	104
	Anexo A.....	106
	Anexo B	111
	Anexo C.....	113
	Anexo D.....	116
	Anexo E	125

Índice de figuras

Figura 2.1: Participación estimada de las energías renovables en la producción energética mundial (finales de 2015). Fuente: [12].	5
Figura 2.2: Repartición de la oferta de energía primaria en Chile en el año 2015 [TCal]. Fuente: Elaboración propia a partir de información obtenida de Energía Abierta, Comisión Nacional de Energía.....	6
Figura 2.3: Mapa mundial de recursos solares. Fuente: Solargis.	6
Figura 2.4: Inversión mundial en energías renovables (2015). Fuente: [12]......	7
Figura 2.5: Distribución de la energía en Chile, según sector. Fuente: Elaboración a partir de información obtenida de Energía Abierta, Comisión Nacional de Energía.....	7
Figura 2.6: Variación en la declinación solar δ durante el año.	9
Figura 2.7: Esquema de las relaciones geométricas entre el Sol y la Tierra.	11
Figura 2.8: Representación de los efectos de considerar al Sol como un disco emisor. ...	12
Figura 2.9: Diferentes tipos de concentradores solares. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Cilindro parabólico, Fresnel, Torre solar y Disco parabólico. Fuente: [13]......	13
Figura 2.10: Capacidad instalada en concentradores solares a nivel mundial [MW]. Fuente: [14].	14
Figura 2.11: Concentrador solar de placa plana.	14
Figura 2.12: Principio de los concentradores parabólicos.	16
Figura 2.13: Concentrador solar de paraboloides de revolución, con heliostato auxiliar. ...	17
Figura 2.14: Representación de la porción del paraboloides de revolución que caracteriza a un concentrador tipo Scheffler.	18
Figura 2.15: Representación gráfica de un concentrador solar Scheffler, con su foco y eje de rotación.	18
Figura 2.16: Mecanismo de seguimiento solar de un concentrador Scheffler.....	19
Figura 2.17: Variación del paraboloides durante el transcurso del año.	20
Figura 2.18: (1) Horno Solar de Odeillo. (2) Horno solar de Mont Louis. (3) Horno solar SF-5, Almería. (4) Horno solar con una reflexión y receptor móvil.	23

Figura 2.19: Representación de las etapas y elementos en un sistema de concentración solar, modelado en SolTrace.	24
Figura 2.20: Reflexión especular.	25
Figura 2.21: Reflexión especular y difusa.	26
Figura 2.22: Errores de pendiente y de especularidad en la reflexión de un rayo.	26
Figura 2.23: Vista en corte de dos casquetes esféricos concéntricos.	28
Figura 2.24: Comportamiento de la radiación al interactuar con un cuerpo. Fuente: [18].	30
Figura 2.25: Total de la energía liberada por radiación de una superficie. Fuente: [18]...	31
Figura 2.26: Concepto de factor de forma. Fuente: [18].	31
Figura 4.1: Ubicación geográfica de San Pedro de Atacama. Fuente: Explorador Solar, Ministerio de Energía.	37
Figura 4.2: Ciclo diario-anual de la radiación solar directa en la localidad de San Pedro. Promedio para cada hora y mes del año. Fuente: Explorador Solar, Ministerio de Energía.	38
Figura 4.3: Esquema general del horno diseñado.	39
Figura 4.4: Diseño propuesto para el receptor.	40
Figura 4.5: Vista en corte del receptor y sus parámetros.	42
Figura 4.6: Esquema para el modelo térmico desarrollado para el receptor.	44
Figura 4.7: Modelo térmico del receptor expresado como sistema de resistencias térmicas.	45
Figura 4.8: Porción curva de un casquete esférico.	49
Figura 4.9: Resultados obtenidos para el análisis de sensibilidad del parámetro $r2int$	52
Figura 4.10: Resultados obtenidos para el análisis de sensibilidad del parámetro $e2$	54
Figura 4.11: Resultados obtenidos para el análisis de sensibilidad del parámetro $e3$	55
Figura 4.12: Resultados obtenidos para el análisis de sensibilidad del parámetro $r1$	57
Figura 4.13: Resultados obtenidos para el análisis de sensibilidad del parámetro $rapint$	58
Figura 4.14: Resultados obtenidos para el análisis de sensibilidad del parámetro $rapext$	60

Figura 4.15: Parámetros de un concentrador Scheffler para un día de equinoccio.	61
Figura 4.16: Relación entre los parámetros del concentrador.	62
Figura 4.17: Parámetro $dr1$ del receptor.	64
Figura 4.18: Variación de $rapint$ y $rapext$ al variar el parámetro $dr1$	64
Figura 4.19: Trazado de rayos obtenidos con el modelo utilizado en la primera iteración en el software SolTrace.	66
Figura 4.20: Flujo energético recibido en la zona focal, para la primera iteración.	67
Figura 4.21: Forma gaussiana del flujo energético en la zona focal.	68
Figura 4.22: Gráficas para el filtro de $r1$ en la zona focal, obtenidas mediante el código desarrollado en MatLab. Arriba $r1 = 4\text{ cm}$. Abajo $r1 = 2\text{ cm}$	69
Figura 4.23: Relación geométrica entre $r1$, $rapint$, $rapext$, $rapc$ y dc	70
Figura 4.24: Relaciones geométricas de la parte inferior de la geometría $r1$ -concentrador.	71
Figura 4.25: Análisis de sensibilidad del parámetro $dr1$, considerando una utilización del 85%.	73
Figura 4.26: Comportamiento de $rapint$ y $rapext$ al variar el parámetro dc	75
Figura 4.27: Comportamiento de $rapint$ y $rapext$ al variar el parámetro $rapc$	77
Figura 4.28: Relaciones geométricas entre el concentrador y el receptor para cualquier día del año.	79
Figura 4.29: Relación entre los parámetros del concentrador para cualquier día del año.	80
Figura 4.30: Ciclo diario-anual de $Thorno$ para la opción de solo reajustar la dirección de la parábola.	82
Figura 4.31: Comparación entre la forma de los diferentes concentradores según la época del año. En azul el concentrador correspondiente al solsticio de invierno, en gris el correspondiente a los equinoccios y en rojo el correspondiente al solsticio de verano.	83
Figura 4.32: Ciclo diario-anual de $Thorno$ para la opción de reajuste de la parábola, caso $rapc = 1,4\text{ m}$	85
Figura 4.33: Ciclo diario-anual de $Thorno$ para la opción de reajuste de la parábola, caso $rapc = 1,75\text{ m}$	85

Figura 4.34: Ciclo diario-anual de <i>Thorno</i> para la opción de reajuste de la parábola, caso $rapc = 2 m$.	86
Figura 4.35: Ciclo diario-anual de <i>Thorno</i> para la opción de reajuste de la parábola, caso $rapc = 2,5 m$.	86
Figura 4.36: Deformación máxima que debería sufrir un concentrador con $dc = 5 m$ y $rapc = 2,5 m$. En azul el paraboloides de invierno y en rojo el de verano.	87
Figura 4.37: Ciclo diario-anual de <i>Thorno</i> para la opción de reajuste de la parábola, caso $rapc = 0,9 m$. $1200^{\circ}C$.	93
Figura 4.38: Ciclo diario-anual de <i>Thorno</i> para la opción de reajuste de la parábola, caso $rapc = 1,1 m$. $1200^{\circ}C$.	93
Figura 4.39: Ciclo diario-anual de <i>Thorno</i> para la opción de reajuste de la parábola, caso $rapc = 1,3 m$. $1200^{\circ}C$.	94
Figura 5.1: Esquema general del horno diseñado.	96
Figura 5.2: Diseño propuesto para el receptor.	98
Figura 5.3: Simulación del comportamiento óptico del horno.	99
Figura 5.4: Parámetros que definen el concentrador.	100
Figura 5.5: Ciclo diario-anual de la temperatura del horno para el modelo con temperatura objetivo de $1.500[^{\circ}C]$, configuración $rapc = 2 m$.	102

1 Introducción

La utilización de la energía térmica ha sido un tema que ha acompañado al ser humano desde sus inicios. En las épocas más antiguas se utilizaba principalmente el calor proveniente del fuego para calefaccionarse y sobrevivir a las bajas temperaturas climáticas. A medida que el humano se fue civilizando, nuevas maneras de aprovechar la energía calórica surgieron, se descubrieron los ciclos termodinámicos, pudiendo ya no solo manejar el calor, sino que también generando trabajo mecánico.

Una de las áreas referidas a la termodinámica que se ha visto desarrollada fuertemente en el último tiempo corresponde al aprovechamiento de la energía proveniente del sol. Algunos especulan que Arquímedes, ya por el año 212 a.C., habría logrado quemar las naves enemigas que invadían Siracusa, mediante el uso de varios espejos [1]. Esto lo hubiese logrado concentrado todas las reflexiones producidas por dichos espejos en una misma nave enemiga, logrando la temperatura de ignición de la madera. Si bien no existen pruebas reales de que efectivamente lo haya logrado, hoy se ha comprobado que es posible lograr dicha proeza.

Lo que hubiese logrado Arquímedes es el principio de lo que hoy se conoce como CS (Concentración Solar). El principio de las tecnologías de CS consiste en redirigir toda la radiación incidente de una determinada área en una zona más pequeña, de manera de lograr flujos térmicos con mayor densidad energética. Debido a este aumento en el flujo térmico, en dicha zona receptora se pueden alcanzar temperaturas de trabajo considerablemente mayores a las que se alcanzarían sin concentración solar.

Se pueden distinguir tres tipos de concentración solar, la concentración superficial, la concentración lineal, y la concentración puntual. Como sus nombres lo sugieren, concentran en un área, una línea y un punto respectivamente. Cabe mencionar que, en la práctica, todas las concentraciones son superficiales, pero teóricamente se pueden diferenciar en las categorías mencionadas. Como es de esperarse, es en la concentración puntual donde se logran mayores factores de concentración, debido a concentrar toda la radiación en un área muy pequeña (puntual). Este elevado factor de concentración se puede logra gracias a los sistemas de concentración parabólicos.

Lo que tienen en común todos y cada uno de los sistemas de concentración solar es un mecanismo de seguimiento solar. El sol cambia su posición respecto de la tierra en todo momento; en un mismo día recorre todo el cielo. Como el mecanismo de concentración requiere redirigir los rayos a un punto determinado, el sistema debe tener un movimiento que permita encausar de buena forma los rayos incidentes hacia el foco de concentración en cada momento. A este mecanismo se le denominado seguimiento solar.

Ya desde el siglo XIX se han llevado a cabo constantes investigaciones y proyectos relacionados con la tecnología CS. En 1866, el inventor francés Augustin Mouchot logró generar vapor de agua mediante la concentración en reflectores cónicos [2]. Por el año 1899 el padre portugués Himalaya asegura haber logrado temperaturas cercanas a los 3.800°C en la zona de concentración [3]. En Sant Ilario, Italia, en el año 1968 entró en operación la primera central solar

térmica, generando vapor de 100 [bar] a 500°C [4]. Actualmente, en Emiratos Arabes, se encuentra la central solar Shams 1, la más grande del mundo, con una potencia nominal de 100 [MWe] [5].

Hoy en día los últimos estudios relacionados con CS han sido orientados en tres ejes principales: la generación de combustibles solares, la generación de potencia y la desalinización del agua de mar. Todas ellas llevan en común la necesidad de elevar a altas temperaturas la zona focal. Un aumento en la temperatura de la zona focal trae consigo el beneficio de aumentar la eficiencia de cualquier ciclo termodinámico, ya que la eficiencia aumenta en la medida que se alcanza una temperatura superior.

Actualmente no revierte mayor desafío lograr temperaturas del orden de los 800°C mediante concentración solar [6], pero para lograr altas temperaturas ha sido necesario realizar estudios más acabados. Para conseguir ello se han desarrollado algunos proyectos de hornos solares de alta temperatura. Un ejemplo es el horno solar de Odeillo, Francia, el cual está en funcionamiento desde 1970. En él se han alcanzado temperaturas cercanas a los 4.000°C [7]. Actualmente dicho horno se utiliza principalmente en el área del estudio de materiales, analizando las propiedades de estos a temperaturas extremas. Otro ejemplo es el horno solar de Mont Louis, Francia, el cual puede llegar fácilmente a los 3.000°C [8].

Si bien se han logrado hornos solares capaces de levantar elevadas temperaturas de trabajo, aún existen un par de dificultades relacionadas a ellos. Dichas dificultades se pueden clasificar en dos grupos: o se requiere de un foco móvil, o bien se consiguen proyectos necesariamente de mediana o gran escala (como los dos ya mencionados).

El norte de Chile posee un potencial solar privilegiado. Simultáneamente, en el mismo norte chileno existe un notable trabajo alfarero artesanal. Muchas familias dedican su vida al trabajo de las piezas hechas de cerámicas. En la fabricación de dichas piezas, la cerámica debe pasar por un proceso de cocción, el cual requiere de temperaturas entre 1100°C-1250°C [9]. Pensando en ello es que la presente memoria busca realizar un diseño conceptual de un horno solar de pequeña escala, con foco fijo, capaz de alcanzar temperaturas entre 1200°C-1500°C, proyectado para ser utilizado en alguna localidad del norte de Chile.

En la mayoría de las tecnologías CS se suele utilizar programas computacionales de trazado de rayos para determinar con precisión las formas de reflexión y las zonas de alta concentración. En el caso particular de los sistemas concentradores de altas temperaturas, el uso de dicha herramienta se hace absolutamente indispensable. Para sistemas de altas temperaturas se suelen usar sistemas de trazados de rayos 3D. Esto debido a lo complejo de las reflexiones propias del sistema, y a la necesidad de ubicar con alta precisión las zonas focales en el espacio. Actualmente existen dos softwares de trazados de rayos 3D de uso libre: SolTrace y Tonatiuh. El primero de ellos será utilizado en el desarrollo de la presente memoria. A su vez estos sistemas deberán complementarse con herramientas de análisis de transferencia de calor, para determinar con exactitud los flujos térmicos presentes en el sistema.

Finalmente, se indica que uno de los objetivos de este trabajo es realizar un avance en los conocimientos de la teoría y la práctica de los CS de alta temperatura, en particular buscando aplicaciones de pequeña escala.

1.1 Motivación

Teniendo en cuenta la situación actual de las tecnologías CS, se hace interesante el estudio de mecanismos para llegar a elevadas temperaturas de trabajo en las zonas focales. Si bien ya existen grandes hornos capaces de alcanzar altas temperaturas de trabajo, ellos derivan en proyectos de mediana o gran escala. Es por ello que se hace interesante el poder disminuir la envergadura de dichos proyectos sin llevar consigo una pérdida tan significativa en cuanto a la temperatura máxima de trabajo.

Particularmente Chile presenta un inmenso potencial solar, el cual, los ingenieros, debemos utilizar. A su vez, en el norte de nuestro país existe una producción alfarera artesanal, la cual requiere de elevadas temperaturas para la cocción de las piezas.

Considerando todos los factores ya mencionados, es que se hace motivador el desarrollo de un horno que cumpla con las características mencionadas: aprovechar la energía solar de Chile, con receptor fijo y de pequeña escala, pensado para ser utilizado en la cocción de objetos cerámicos artesanales. Para ello, la presente memoria busca realizar un estudio y diseño conceptual de dicho horno.

Entonces, el presente trabajo buscará generar un desarrollo en cuanto a las tecnologías de concentración solar de pequeña escala. Al ser de pequeño tamaño se tiene la gran ventaja de ser relativamente sencillo pasar de la etapa de diseño a una etapa de construcción de prototipo.

1.2 Objetivo general

Diseño conceptual de un horno solar de alta temperatura, de segmento de paraboloide móvil, con receptor fijo, de pequeña escala, pensado para ser utilizado en alguna región de Chile.

1.3 Objetivos específicos

- Realizar un estudio bibliográfico del estado del arte de los hornos y concentradores solares, en particular los de tipo segmento de paraboloide.
- Diseñar la ingeniería conceptual del prototipo, definiendo sus dimensiones principales y su mecanismo de seguimiento solar.
- Simular el comportamiento óptico del sistema mediante el uso de programas computacionales de trazado de rayos.
- Simular el comportamiento térmico del sistema mediante el desarrollo de un modelo térmico en el receptor.
- Selección de materiales del receptor.
- Se pretende alcanzar temperaturas en la zona focal entre 1.200°C-1.500°C desde dos horas antes a dos horas después del mediodía solar.

1.4 Alcances

El presente trabajo tiene como alcance el diseño, en cuanto a ingeniería conceptual, de un horno solar del tipo segmento de parabolóide, el cual será pensado para ser operado en alguna localidad por definir, en alguna región de Chile. En particular los alcances de la memoria comprenden:

- Definir condiciones geométricas tanto del concentrador como del receptor.
- Definir seguimiento solar del prototipo.
- Simular la parte óptica del sistema utilizando el programa computacional SolTrace.
- Modelar la parte térmica del sistema, determinar los flujos térmicos y temperaturas de diseño del horno en el receptor.
- Definir los materiales del elemento receptor.

2 Antecedentes generales

2.1 Energía en Chile

Como se representa en la Figura 2.1, la mayor parte de la generación energética a nivel mundial es producida mediante el uso de combustibles fósiles. Dichos combustibles, al ser energías no renovables (al igual que la energía nuclear), se encuentran de manera finita en la tierra y, por tanto, se estima que estarán agotados dentro de los próximos 60 años [10].

De manera adicional al evidente problema de escasez que dichas energías presentan, los combustibles fósiles liberan anualmente grandes cantidades de gases de efecto invernadero. Dichos gases han contribuido al llamado calentamiento global, fenómeno que amenaza al ecosistema como lo conocemos actualmente [11].

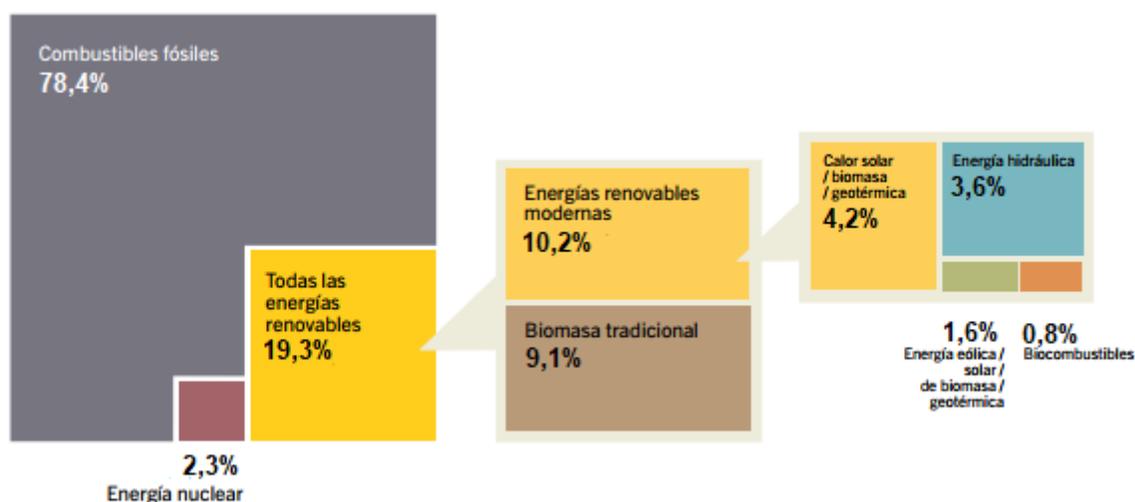


Figura 2.1: Participación estimada de las energías renovables en la producción energética mundial (finales de 2015). Fuente: [12].

El caso de Chile no es muy diferente al resto del mundo: la matriz de energía primaria, en el año 2015, estuvo compuesta por un 69,6% de energías no renovables y tan solo el 30,4% restante en energías renovables (Figura 2.2). Cabe mencionar que del porcentaje de energías renovables tan solo un 0,6% corresponden a fuentes no convencionales, como lo son la energía solar, eólica, biogás, geotérmica, mini-hidro, etc, mientras que el otro 29,8% está constituido por grandes hidroeléctricas y biomásas.

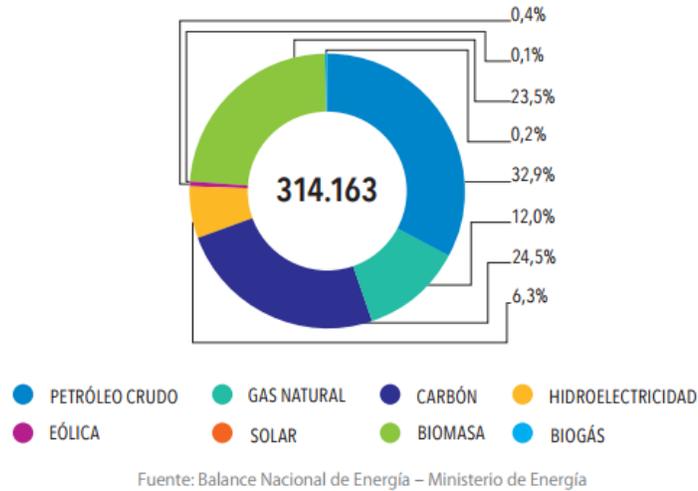


Figura 2.2: Repartición de la oferta de energía primaria en Chile en el año 2015 [TCal]. Fuente: Elaboración propia a partir de información obtenida de Energía Abierta, Comisión Nacional de Energía.

Por contraparte, Chile presenta una de las zonas geográficas con mayor potencial solar, como se esquematiza en la Figura 2.3. La radiación en el norte de Chile es una de las más, sino la más, favorecidas del mundo, alcanzado valores cercanos a los 10 [kWh/m²·día].

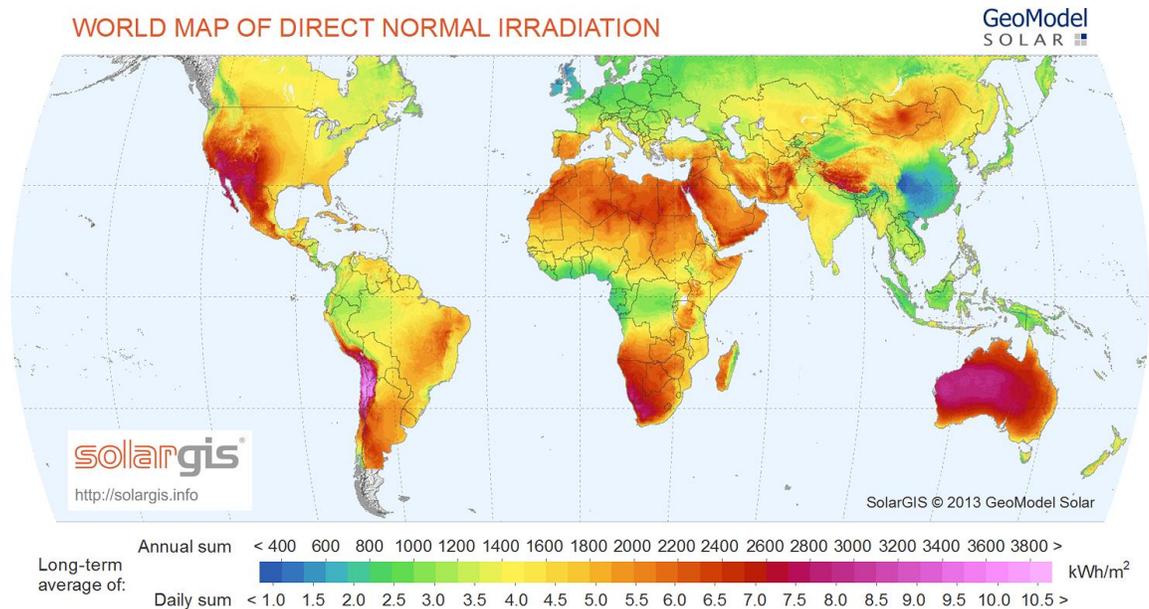


Figura 2.3: Mapa mundial de recursos solares. Fuente: Solargis.

Producto de la escasez mencionada de las energías no renovables, es que a nivel mundial se ha comenzado a invertir de manera acentuada en otras vías para la generación eléctrica. Como lo muestra la Figura 2.4, la energía solar es, sin duda, la que mayor interés ha generado y, por lo tanto, la que más capital ha recibido, seguido por la energía eólica, quedando muy retrasadas las restantes ERNC. A su vez, la Figura 2.4 no solo muestra el capital invertido, sino que también

muestra la variación, en cuanto a inversión, respecto al año anterior. En dicha categoría la energía solar también posee el mejor índice.

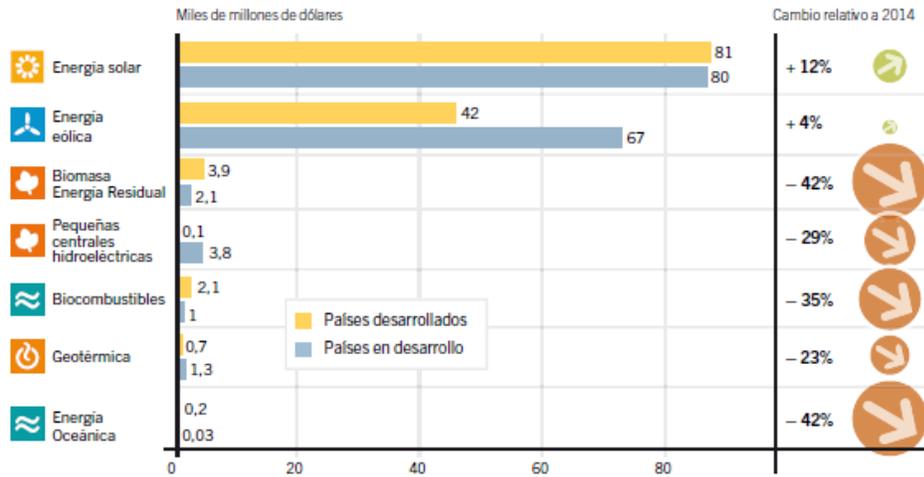


Figura 2.4: Inversión mundial en energías renovables (2015). Fuente: [12].

Si bien en nuestro país se han tomado medidas que incentivan la generación eléctrica por medios renovables, ese sector (energía eléctrica), en el año 2016 representó tan solo el 22% de la matriz energética total (Figura 2.5). La utilización de energía por medio de calor, por contraparte, representó el 42%, mientras que la energía utilizada en transporte el 36% restante. Es por esto que se hace inminente el desarrollo de tecnologías para esos sectores, las cuales sean sustentables y con proyección en el tiempo.

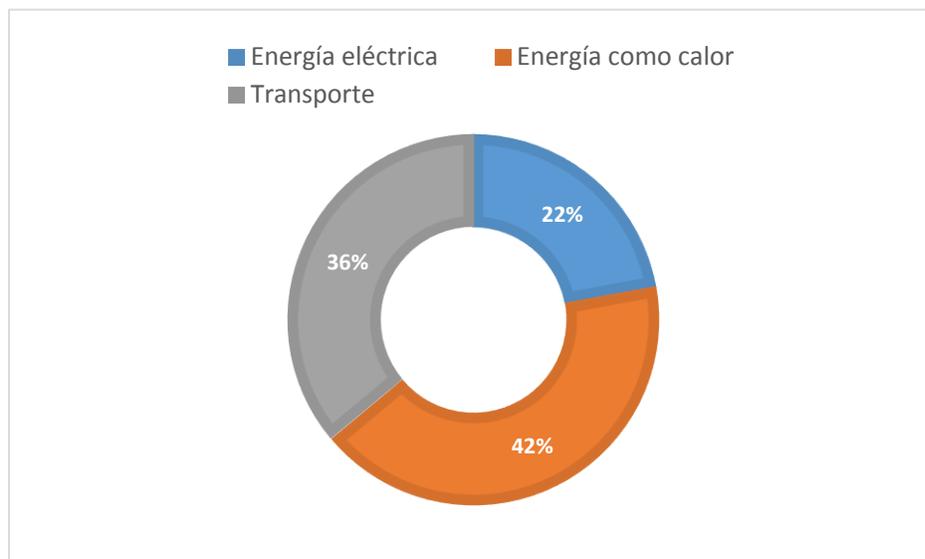


Figura 2.5: Distribución de la energía en Chile, según sector. Fuente: Elaboración a partir de información obtenida de Energía Abierta, Comisión Nacional de Energía.

2.2 Energía solar

La energía solar representa un tremendo potencial y oportunidad para la generación energética mundial, y muy fuertemente para el caso particular de Chile.

La radiación proveniente del Sol entrega calor y luz a la tierra, haciendo posible la vida tal y como la conocemos. Con el paso de los años, la especie humana ha aprendido a aprovecharla y sacar beneficios adicionales de ésta.

La energía solar llega sobre la atmosfera con una densidad de $1.366 \text{ [W/m}^2\text{]}$. La atmosfera, por su parte, absorbe un porcentaje de dicha energía, pero la radiación restante es la que puede ser utilizada. Al pasar por la atmosfera y por el cielo, una parte de la radiación solar se dispersa. A esta fracción dispersada se le conoce como radiación difusa. La restante radiación que no es dispersada se le conoce como radiación directa. Los rayos pertenecientes a la radiación directa, en una primera aproximación, se pueden considerar paralelos entre sí, y con dirección Sol-Tierra.

Básicamente existen tres formas para aprovechar la energía solar: los paneles fotovoltaicos, los colectores solares y los concentradores solares.

Concentración solar

Si bien los paneles solares fotovoltaicos y los colectores solares son bastante útiles para determinadas funciones, muchas veces se desea trabajar con temperaturas mucho mayores a las que dichos dispositivos pueden llegar. Para lograr alcanzar dichas temperaturas, se deben reunir toda la radiación de una determinada área en una zona más pequeña, logrando densidades de energía mucho más elevadas en dicha zona. El principio de los concentradores solares es precisamente ese.

A diferencia de los paneles fotovoltaicos y los colectores, los concentradores solares solo utilizan la radiación directa, mientras que la radiación difusa se desaprovecha en este tipo de tecnología.

En una siguiente sección se profundizar este concepto.

2.2.1 Geometría entre el Sol y la Tierra

Una característica que tienen en común las tecnologías solares es que todas funcionan mejor (y en algunos casos solo funcionan) si poseen seguimiento solar. Como se mencionó en la introducción, el Sol cambia su posición relativa respecto de la Tierra en todo momento, y esto conlleva que la radiación incidente, en particular la radiación directa, también cambie. Es por esto que, con un seguimiento solar, las tres tecnologías pueden aprovechar de mejor manera la radiación directa.

Para comprender las tecnologías de seguimiento solar, primero es necesario entender la geometría que existe entre el sol y la tierra.

El planeta se divide en paralelos, que definen latitudes (φ). El hemisferio norte tiene latitud positiva definida entre 0° y 90° , y el hemisferio sur latitudes negativas entre 0° a -90° . El paralelo 0° se llama ecuador terrestre.

El segundo parámetro para definir un punto sobre la superficie es la longitud, dada por meridianos de polo norte a sur. Se define como meridiano 0° el que pasa por Greenwich, Inglaterra. Los meridianos aumentan de -180° a $+180^\circ$ de este a oeste.

En cuanto a la posición relativa del sol respecto de la tierra se necesitan varias definiciones para poder determinar dicha relación:

Zenit: corresponde a la línea perpendicular al plano horizontal en el punto de observación (Figura 2.7).

Declinación (δ): es la distancia angular entre el objeto en la bóveda celeste y el ecuador celeste. Se mide de 0 a $\pm 90^\circ$. Valores positivos hacia el norte celeste, negativos hacia el sur. Hace relación a que, en una determinada localidad, si bien la rotación del sol es siempre en una misma dirección, su trayecto se desplaza durante el año (Figura 2.6). La declinación se calcula mediante la ecuación (2.1):

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{sen}\left(\frac{360 \cdot (284 + d)}{365}\right) \quad (2.1)$$

Donde d corresponde al día del año, siendo el 1 de enero = 1 y el 31 de diciembre = 365.

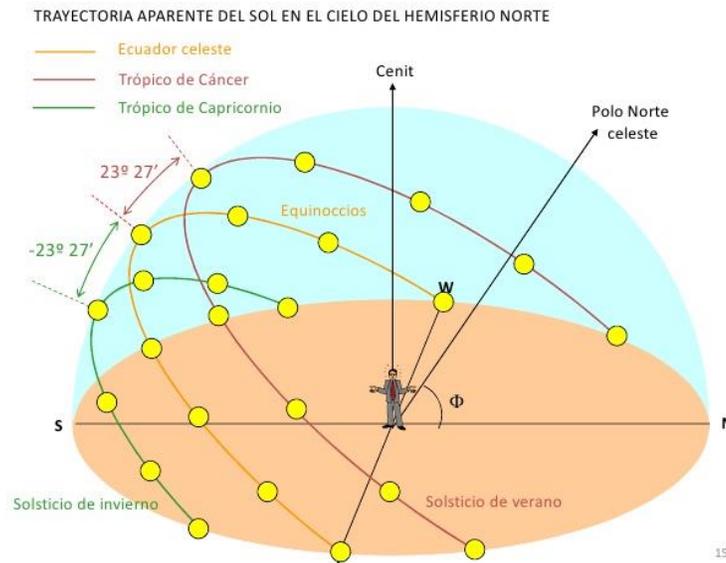


Figura 2.6: Variación en la declinación solar (δ) durante el año.

Hora solar (h_s): corresponde a la hora referente a un día solar, es decir, con las 12:00 del mediodía justo cuando el sol se encuentra en su punto de máxima elevación. Se relaciona con la hora local (h_l) mediante la Ecuación (2.2):

$$h_s = h_l + E - 40 \text{ [min]} \quad (2.2)$$

Con h_l correspondiente a la hora local y E la ecuación del tiempo, en minutos.

A su vez, E se calcula según la ecuación (2.3):

$$E = 9,87 \cdot \sin(2 \cdot B) - 7,53 \cdot \cos(B) - 1,5 \cdot \sin(B) \quad (2.3)$$

Con:

$$B = \frac{360 \cdot (d - 81)}{364} \quad (2.4)$$

El factor de corrección E hace relación a la diferencia entre la longitud del observador y el meridiano en el que se basa la hora local, mientras que los 40 [min] es un factor de corrección relación al hecho de que la velocidad angular del Sol no es constante durante el año.

Ángulo Horario (AH): es la distancia angular entre la intersección del meridiano del lugar con el ecuador celeste y la proyección del objeto sobre el mismo ecuador celeste. El ángulo horario se mide entre 0 a $\pm 180^\circ$ Valores negativos en la mañana y positivos en la tarde. Para el sol, el ángulo horario varía a razón de 15° por hora. El ángulo horario se calcula mediante la ecuación (2.5):

$$AH = -180^\circ + 15^\circ \cdot h_s \quad (2.5)$$

Altura (h): es la distancia angular entre el horizonte y el objeto en la bóveda celeste. Se mide de 0° a 90° . Si el objeto está debajo del horizonte, la altura es negativa (Figura 2.7). Se obtiene mediante la ecuación (2.6):

$$\cos(h) = \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(AH) \quad (2.6)$$

Ángulo Zenit (θ): es el complemento de la altura (Figura 2.7).

Azimut (γ): es la distancia angular entre la intersección del meridiano del lugar con la horizontal y la proyección del objeto sobre el horizonte. Esta intersección se mide sobre aquella que apunta hacia el Ecuador. El azimut se mide entre 0° a $\pm 180^\circ$. Valores negativos en la mañana y positivos en la tarde. Se obtiene mediante la ecuación (2.7):

$$\cos(\gamma) = \frac{\cos(\delta) \cdot \cos(AH) - \text{sen}(h) \cdot \cos(\varphi)}{\cos(h) \cdot \text{sen}(\varphi)} \quad (2.7)$$

Para un plano con inclinación (α_p) y azimut (γ_p), se cumple la siguiente relación entre la normal del plano y el rayo vector del sol (ecuación (2.8)):

$$\begin{aligned} \cos(\xi) = & \text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(\delta) \cdot \cos(\alpha_p) - \cos(\varphi) \cdot \text{sen}(\delta) \cdot \text{sen}(\alpha_p) \cdot \cos(\gamma_p) \\ & + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\alpha_p) \cdot \cos(AH) + \text{sen}(\varphi) \cdot \cos(\delta) \\ & \cdot \text{sen}(\alpha_p) \cdot \cos(\gamma_p) \cdot \cos(AH) + \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\alpha_p) \cdot \text{sen}(\gamma_p) \\ & \cdot \text{sen}(AH) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Con ξ correspondiente al ángulo entre la normal del plano y un rayo proveniente del sol.

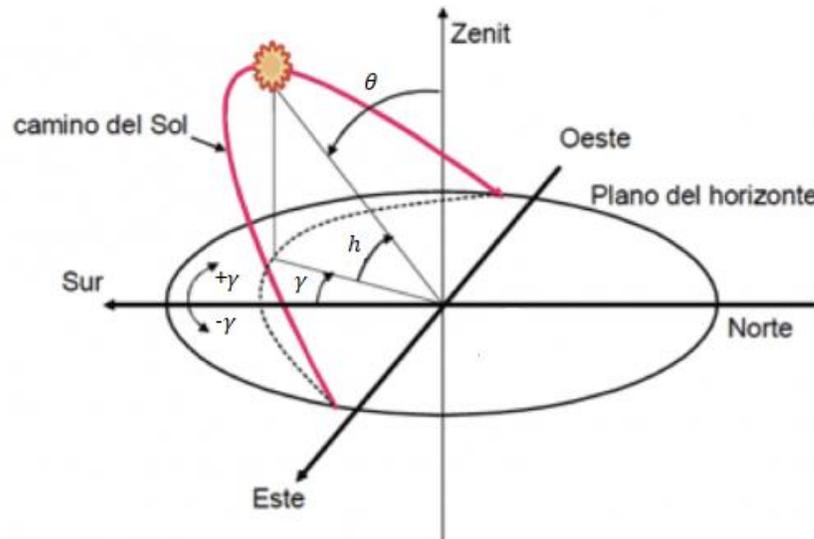


Figura 2.7: Esquema de las relaciones geométricas entre el Sol y la Tierra.

En las definiciones anteriores se ha asumido que los rayos provenientes del Sol inciden en la Tierra de manera paralela entre ellos. Debido a la gran distancia que separa al Sol de la Tierra dicho supuesto puede ser considerado como una buena primera aproximación. Pero, para problemas que requieran de alta precisión, como lo son los concentradores solares de alta temperatura, es necesario considerar el Sol como un disco emisor y no como un emisor puntual.

La Figura 2.8 representa la relación geométrica que se desprende de considerar el Sol como un disco emisor. De ella se desprende que los rayos provenientes del Sol vienen distribuidos en direcciones comprendidas dentro del triángulo formado por el disco solar y el punto de interés

terrestre. En consecuencia, los rayos llegan con dirección Sol-Tierra (centro del Sol hasta punto de interés terrestre) y una variación comprendida entre $\pm\varepsilon$. El valor de ε es igual 4,65 [mrad].

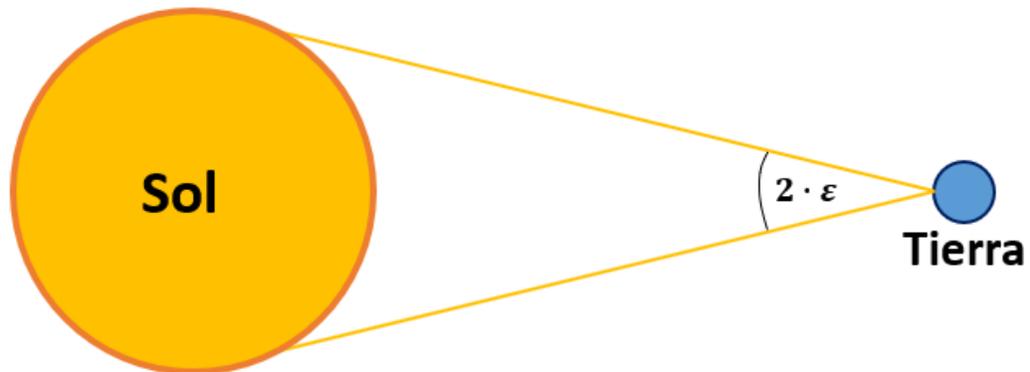


Figura 2.8: Representación de los efectos de considerar al Sol como un disco emisor.

2.3 Concentradores solares

Todos los concentradores cuentan con al menos dos elementos, un concentrador y un receptor. El concentrador, evidentemente, tiene como objetivo reunir la energía de una determinada área en una zona pequeña, la cual denominaremos zona focal o foco. A su vez, el foco tiene como objetivo captar ese gran flujo y aprovecharlo, ya sea para generar vapor, calentar un líquido u otro fin.

En la Figura 2.9 se muestran cuatro tipos de concentradores solares: cilindro parabólico, Fresnel, torre central y disco parabólico. Más adelante se explicará el funcionamiento básico de cada uno de ellos.

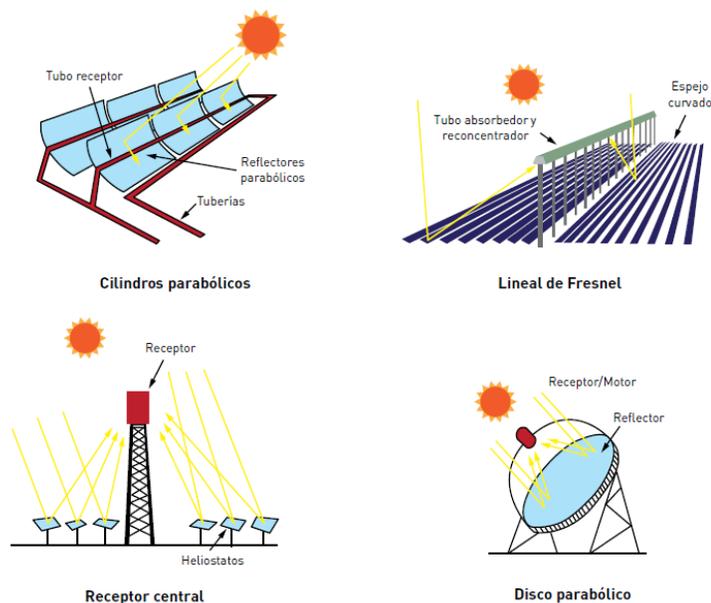


Figura 2.9: Diferentes tipos de concentradores solares. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Cilindro parabólico, Fresnel, Torre solar y Disco parabólico. Fuente: [13].

El principio de los concentradores es redirigir los rayos incidentes a una determinada zona focal. Para lograr este objetivo es necesario saber con exactitud la dirección de los rayos incidentes. Para la radiación difusa no es posible determinar con precisión la dirección de los rayos, mientras que para la radiación directa sí es posible lograrlo. En consecuencia, los concentradores solo son capaces de utilizar la radiación directa.

La tecnología de concentradores solares ha visto un aumento explosivo en los últimos años [14], reconociendo España como el mayor propulsor de esta área (Figura 2.10). Es importante destacar el considerable aumento en tecnología de concentración: si bien en la Figura 2.4 se muestra que la energía solar es la energía renovable no convencional que, por lejos, posee el mayor aumento en inversión anual con un 12%, dentro de este rubro destacan los concentradores, con un aumento del 44% anual entre los años 2007-2012.

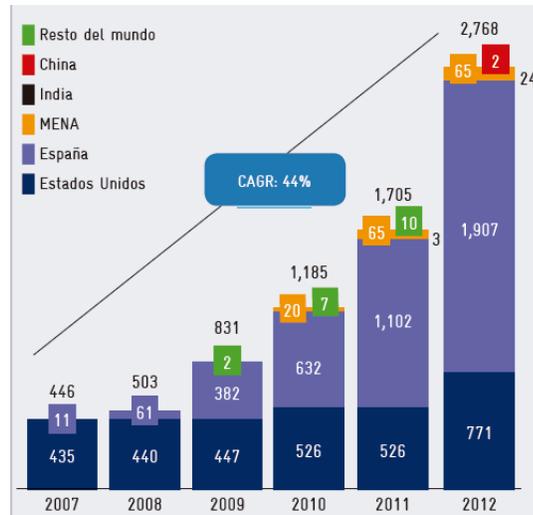


Figura 2.10: Capacidad instalada en concentradores solares a nivel mundial [MW]. Fuente: [14].

Concentradores de placa plana.

Este tipo de concentrador representa, sin duda, el más básico de todos los diseños. Principalmente consiste, por medio de uno o más espejos planos, de superponer imágenes solares en una determinada zona. La Figura 2.11 esquematiza un concentrador solar de una placa plana, en donde la zona de concentración (caja con la olla) se superponen dos imágenes solares. La radiación que llega de forma directa y la reflejada en el espejo plano se superponen, obteniéndose así un flujo con el doble de densidad energética que el que se obtendría al poner la olla directo al sol.

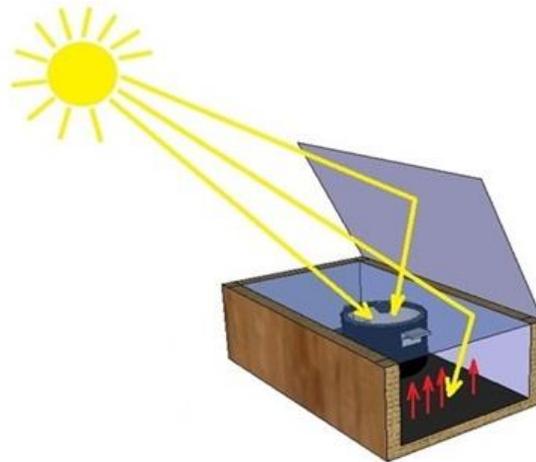


Figura 2.11: Concentrador solar de placa plana.

Concentrador de torre central

Los concentradores de Torre Central son de los más utilizados en cuanto a generación de potencia mediante energía solar. La Figura 2.9 esquematiza este tipo de concentradores.

Consiste básicamente en un campo de espejos (heliostatos) que redirigen la imagen solar a un receptor central. Dicho receptor se encuentra generalmente en el centro de un campo de miles de heliostatos, en una torre alta, que permite que la reflexión de dichos heliostatos llegue de buena forma, sin producirse sombras unos con otros. Por su parte, los heliostatos poseen dos cualidades importantes: en primer lugar, estos tienen dos movimientos de seguimiento solar, en altura y en azimut, de manera de poder dirigir siempre la imagen solar al mismo punto. Por otro lado, el heliostato tiene una geometría de casquete esférico, lo cual le permite concentrar la radiación incidente en una zona mucho menor en la torre. Entonces, al concentrar la energía incidente en una zona mucho menor, y sumada a la superposición de imágenes de miles de heliostatos, se generan flujos energéticos muy grandes, permitiendo altísimas temperaturas de trabajo.

Ejemplos de concentradores de torre central son la Central solar de Ivanpah (392 [MW], Estados Unidos), Gemasolar (17 [MW], España) y el proyecto Cielos de Tarapacá (600 [MW], Chile) donde se espera que se dé inicio a la etapa de construcción este año (2018).

Concentrador Fresnel

Los concentradores Fresnel (Figura 2.9) comparten ciertos principios con los Torre Central. Los Fresnel, también poseen heliostatos, pero en este caso son alargados y con forma de casquete cilíndrico. Dichos heliostatos solo poseen seguimiento solar en cuanto a la altura. Estos se posicionan por debajo del concentrador, como se aprecia en la figura mencionada. Al distribuir la energía en un receptor largo, y al tener menos heliostatos por receptor, suelen tener factores de concentración menores a los de torre central, y, por ende, trabajan a temperaturas menores.

Un ejemplo de esta tecnología es la central Puerto Errado 2 (30 [MW], España).

2.3.1 Principio de los concentradores parabólicos

En cuanto a los concentradores parabólicos, estos funcionan en base a un principio fundamental, el cual enuncia: “para cualquier rayo que incida en la parte interior de una parábola en forma paralela a su eje (de la parábola), su reflexión especular pasará siempre por el foco de dicha parábola, sin importar en que parte incida”. Dicho principio se esquematiza en la Figura 2.12.

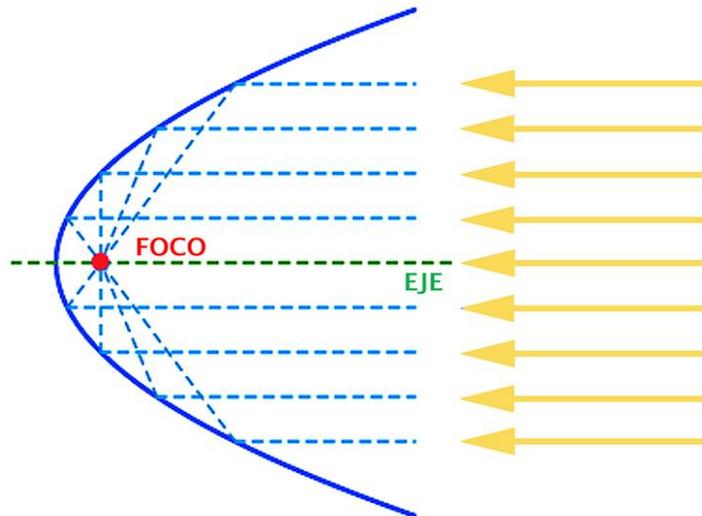


Figura 2.12: Principio de los concentradores parabólicos.

Dicho esto, es importante destacar que la concentración en el plano de la Figura 2.12 se realiza, teóricamente, en un punto y no en una zona. En la realidad nunca se concentra todo en un punto, pero sí en una zona muy pequeña. En el caso de los concentradores parabólicos de revolución, los flujos alcanzados en dicha zona suelen ser muy elevados, llegando a ser del orden de 10.000 veces la densidad energética incidente de una superficie expuesta al sol, mientras que los de concentración lineal (cilindro-parabólicos) puede llegar a un factor de concentración de 100.

Dos casos de concentradores parabólicos bastante utilizados son los cilindros parabólicos y los paraboloides de revolución (o disco parabólico), también mostrados en la Figura 2.9. Como se puede apreciar, y como su nombre lo sugiere, los cilindros parabólicos concentran los rayos incidentes en una línea, mientras que los de tipo paraboloide de revolución lo concentra en un punto. Esto implica que los segundos alcanzan temperaturas de trabajo mayores que los primeros.

Otro concentrador solar de tipo segmento de parábola es el Scheffler, el cual se describe en mayor detalle en una sección más adelante.

2.3.2 Concentradores solares de receptor fijo

De los concentradores mencionados anteriormente, se distinguen cuatro casos en los que se tiene receptor fijo. A continuación, se mencionan cada uno de ellos, con algunas de sus ventajas e inconvenientes.

Concentrador de placa plana: de simple diseño e implementación, pero con muy bajos factores de concentración, lo que implica bajas temperaturas de trabajo.

Concentradores de torre central: efectivos para proyectos de gran escala. Requiere necesariamente gran cantidad de heliostatos para lograr trabajar con altas temperaturas en la zona focal. Producto de ello se requiere gran inversión para desarrollar un proyecto de esta índole.

Concentradores de paraboloide de revolución fijo, con heliostato auxiliar: este tipo de concentrador se esquematiza en la Figura 2.13. Consiste en un heliostato que dirige los rayos solares a un paraboloide de revolución fijo, de manera que estos rayos siempre incidan de manera paralela al eje focal. Producto de esto se obtiene un foco fijo. Si bien este tipo de concentrador es de fácil operación, trae consigo la desventaja de tener doble reflexión, y por consecuencia las pérdidas asociadas a dichas reflexiones. Adicionalmente se ve fuertemente afectado por las pérdidas por efecto coseno tanto al amanecer como en la puesta de sol.

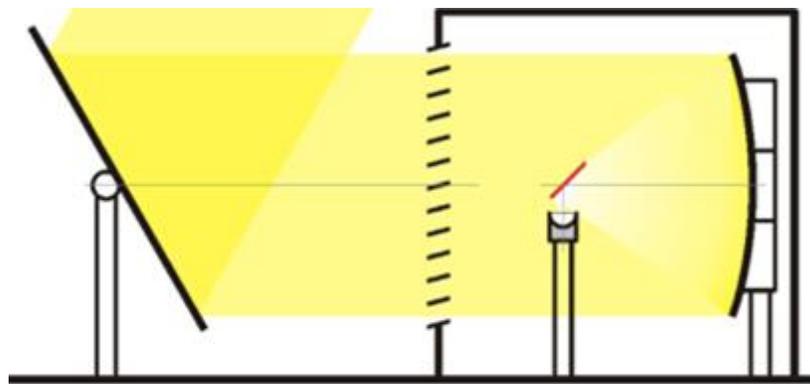


Figura 2.13: Concentrador solar de paraboloide de revolución, con heliostato auxiliar.

Concentrador Scheffler: si bien presenta un sencillo mecanismo de seguimiento solar en cuanto a su operación, el principio puede ser algo complicado, por lo que se desarrolla un análisis más profundo en la siguiente sección.

2.3.3 Concentrador Scheffler

Un concentrador Scheffler corresponde es una sección lateral pequeña de un paraboloide de revolución bastante más grande (Figura 2.14 y Figura 2.15). Como características, este tipo de concentrador posee receptor fijo y tan solo un movimiento de seguimiento solar. A continuación, se describe con mayor detalle dichas cualidades.

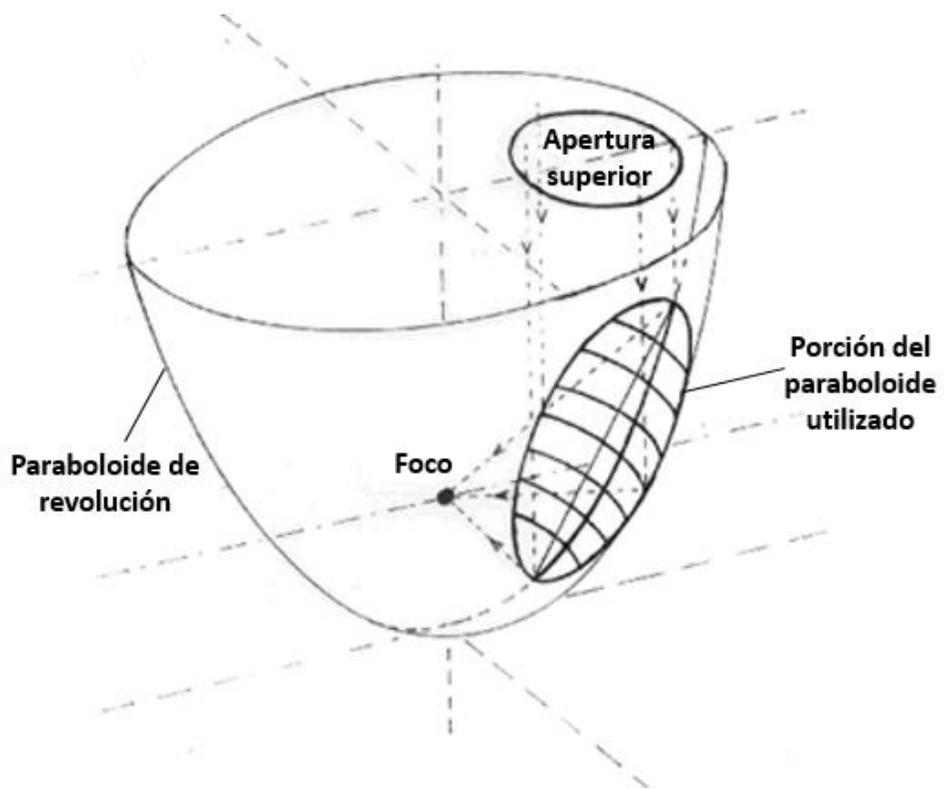


Figura 2.14: Representación de la porción del paraboloido de revolución que caracteriza a un concentrador tipo Scheffler.

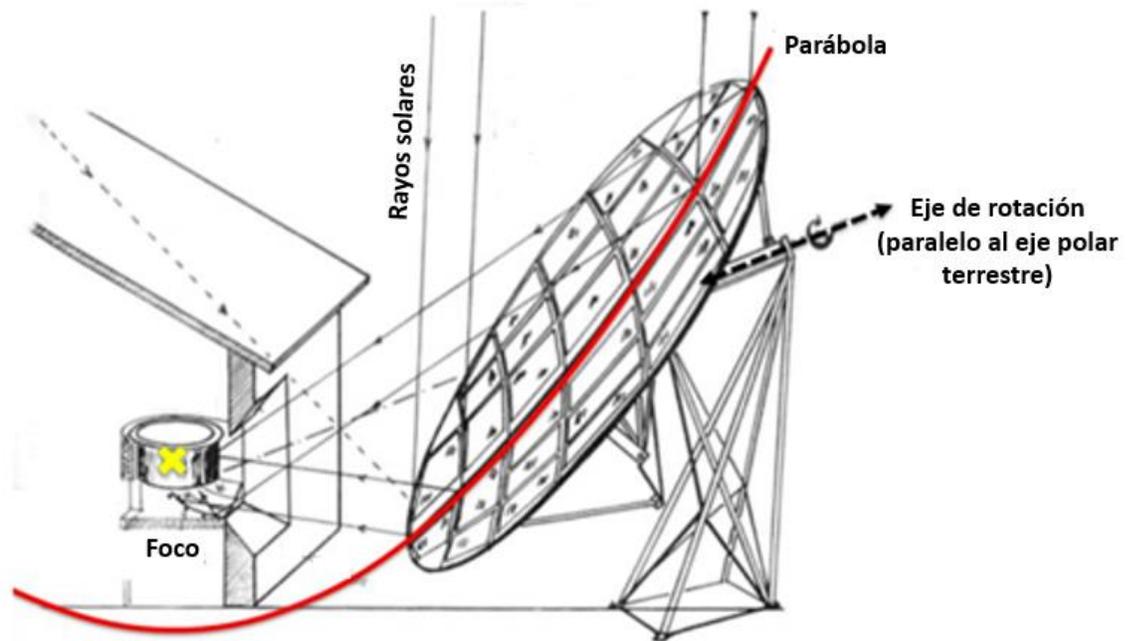


Figura 2.15: Representación gráfica de un concentrador solar Scheffler, con su foco y eje de rotación.

Como lo esquematiza la Figura 2.14, un concentrador Scheffler es una porción de un paraboloides de revolución. Dicha porción del paraboloides utilizado es caracterizada por un corte superior definido por una circunferencia (apertura superior). Para que en el concentrador Scheffler incidan los rayos paralelos a su eje, y así poder cumplir el principio de los concentradores parabólicos, se requiere que el eje del paraboloides esté siempre en dirección al Sol.

Durante un día el Sol posee solo un movimiento de rotación respecto de la Tierra, por lo tanto, el concentrador Scheffler debe incluir ese mismo movimiento para su mecanismo de seguimiento solar. Es decir, el concentrador Scheffler debe poseer un movimiento de rotación idéntico al del Sol, es decir, una rotación con el mismo eje que la rotación solar (paralelo al eje de rotación terrestre, Figura 2.15). De este modo, el concentrador estará con su eje apuntando hacia el Sol para cada instante del día. La Figura 2.16 esquematiza el movimiento descrito, en donde la esfera amarilla representa el sol, la parte negra del paraboloides representa el concentrador Scheffler, el punto rojo el foco y la flecha naranja el eje de rotación del concentrador. Como se aprecia, con dicho seguimiento solar el eje del paraboloides está siempre apuntando en la dirección del Sol.

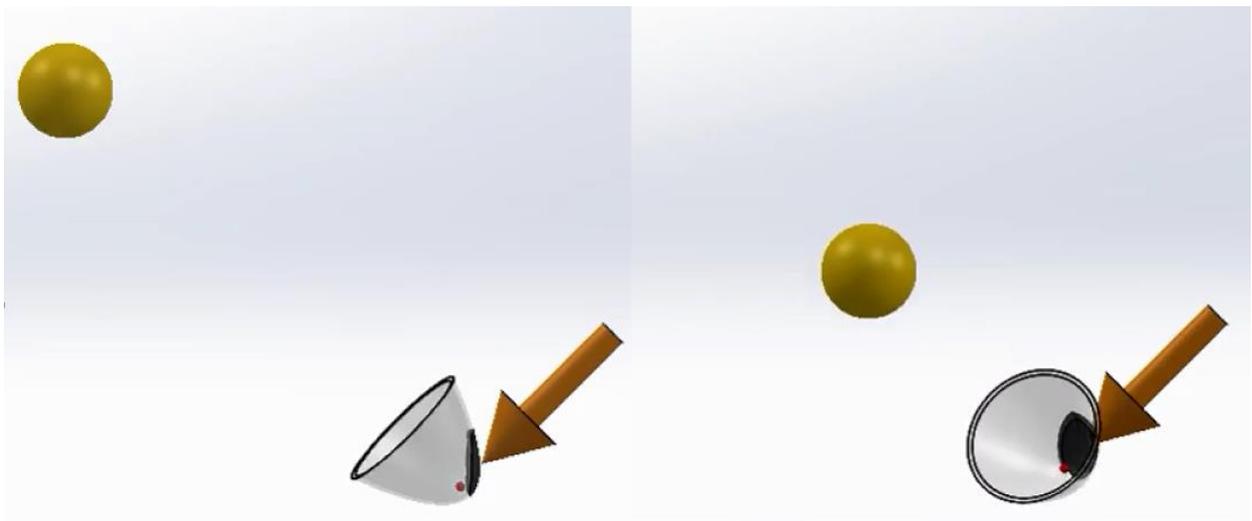


Figura 2.16: Mecanismo de seguimiento solar de un concentrador Scheffler.

El eje para el seguimiento horario, necesario para que los rayos incidan de forma paralela al eje de revolución, se encuentra en dirección norte-sur, paralelo al eje terrestre, pasando por el centro de gravedad del reflector. Esta última característica es deseada para que el sistema siempre está en equilibrio y el mecanismo de relojería sólo debe ser accionado con poca fuerza para girarlo de forma sincronizada con el Sol.

Para que el foco no se desplace, éste debe ubicarse en el eje de rotación del paraboloides (Figura 2.15 y Figura 2.16). La distancia entre el foco y el punto medio del reflector depende de la parábola inicial seleccionada. De este modo, la luz concentrada sólo girará alrededor del foco a lo largo del día, pero no se moverá lateralmente en ninguna dirección. Por lo tanto, el foco se mantiene fijo, lo que naturalmente resulta práctico tanto para construirlo como para operarlo.

Debido al seguimiento solar que posee, es decir, con el eje de la parábola siempre en dirección al Sol, se tiene que el círculo superior que define la apertura del concentrador está siempre normal a los rayos incidentes. En consecuencia, los concentradores Scheffler obtienen el mismo factor amplificador durante todo el día, siendo la magnitud de la radiación incidente (radiación directa) la que determina el flujo calórico final alcanzado en el foco. Así, este tipo de concentradores no se ve afectado por las pérdidas de efecto coseno.

En el transcurso de las estaciones anuales, el ángulo de incidencia de la radiación solar varía en $\pm 23,45^\circ$ en relación con la vertical (Ver Figura 2.17). Esto ocurre debido a la variación de la declinación solar (δ) durante el año. Por ende, el paraboloide también deberá inclinarse en idéntico ángulo, ya que siempre debe mantenerse orientado hacia el sol. A su vez, la parábola que pasa por dicho foco y que mantiene su eje paralelo a los rayos provenientes del sol, es diferente para cada época del año, por lo tanto, la forma del reflector debe variar conjunto transcurre el año. No obstante, el punto medio del reflector y la posición del foco no deben moverse bajo ningún concepto.

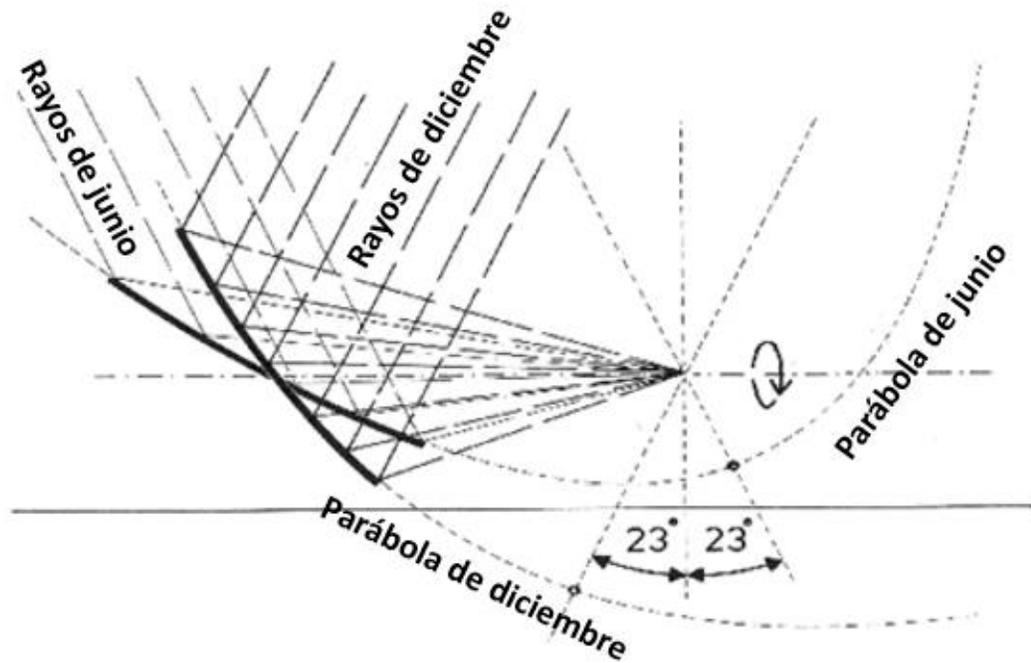


Figura 2.17: Variación del paraboloide durante el transcurso del año.

Para poder determinar los valores teóricos con los que trabajara el concentrador, se requiere realizar ciertos cálculos. Para modelar el flujo calórico que llega a la zona focal se utiliza la ecuación (2.9) [15]:

$$Q_{foco} = I_d \cdot A_{ap} \cdot \rho \cdot \varphi \quad (2.9)$$

En donde Q_{foco} representa el flujo calórico en la zona focal, I_d la radiación solar directa, A_{ap} el área de apertura del concentrador Scheffler, ρ la reflectancia del material reflector y φ el factor de intercepción.

A su vez, para obtener el factor de intercepción (φ), se utiliza la ecuación (2.10) de Stien W.B. y Harrigan R.W. [16] presentada a continuación:

$$\varphi = \frac{\int_{-n}^{+n} I(a) da}{\int_{-\alpha}^{+\alpha} I(a) da} \quad (2.10)$$

En donde $\int_{-\alpha}^{+\alpha} I(a) da$ representa la energía interceptada ante de llegar al receptor y $\int_{-n}^{+n} I(a) da$ la energía total que incide en el concentrador, es decir, $A_{ap} \cdot I_d$.

En lo que sigue de la memoria se utilizara el concepto de factor amplificador, el cual se obtiene según la ecuación (2.11):

$$\Phi = \rho \cdot \varphi \cdot A_{ap} \quad (2.11)$$

En donde Φ representa el factor amplificador del concentrador Scheffler. Φ tiene unidades de distancia² y solo depende de la geometría del concentrador. Así, el factor amplificador representa el valor por el que hay que multiplicar la radiación directa incidente para obtener el flujo calórico sobre el foco

2.4 Hornos solares de alta temperatura

Actualmente existen variados y diversos tipos de hornos solares. En particular, los de alta temperatura poseen en común el utilizar el tipo de concentración puntual. Dentro de los hornos solares de alta temperatura, al igual que la mayoría de las tecnologías de concentración solar, se pueden identificar dos elementos, el mecanismo de reflexión (o concentración) y el receptor.

En cuanto al receptor, todos poseen en común una importante estructura aislante. Es sabido que las pérdidas térmicas aumentan drásticamente con el incremento de la temperatura, por lo cual es muy importante el poder aislar de buena manera la zona receptora de manera de minimizar al máximo las pérdidas calóricas. Este es un punto clave en el diseño de los hornos si se pretende alcanzar temperaturas interesantes sin la necesidad de consumir demasiada energía.

Por otro lado, el mecanismo de reflexión es el encargado de redirigir la radiación solar incidente a la zona focal o receptor. Es importante destacar que toda reflexión trae consigo pérdidas de energía, por lo que el tener la menor cantidad de reflexiones es algo deseable. En la mayoría de los hornos solares el receptor es fijo, y requieren de al menos dos reflexiones. Por otro lado, la gran mayoría de los hornos solares con una sola reflexión poseen receptor móvil.

El horno solar de Odeillo, Francia, es el horno solar más grande en la actualidad (Figura 2.18). Fue puesto en operación en el año 1970 y alcanza temperaturas del orden de los 4.000°C [7]. Para lograr ello cuenta con 63 heliostatos móviles que reflejan los rayos a un concentrador parabólico de 48 [m] de alto por 54 [m] de ancho, alcanzando una potencia térmica de 1 [MW]. En este caso el receptor es fijo.

El horno solar de Mont Louis, Francia, fue inaugurado en el año 1949 (Figura 2.18). Cuenta con un heliostato de al menos 160 [m²], el cual dirige los rayos hacia un concentrador parabólico de aproximadamente 10 [m] de apertura focal. Es capaz de alcanzar 3000°C , y genera 50 [kW] térmicos [8]. En este caso también el receptor es fijo.

La plataforma solar de Almería, España, cuenta con tres hornos solares de alta temperatura: el SF-5 (Figura 2.18), el SF-40 y el SF-60. Como sus nombres lo sugieren, tiene una potencia de 5, 40 y 69 [kW] térmicos respectivamente. Por otro lado, logran concentraciones máximas de 6000, 7000 y 3000 soles respectivamente. Todos ellos poseen un heliostato móvil y un concentrador parabólico de revolución, obteniendo superficies de reflexión (en cuanto a los concentradores parabólicos) de 8,77 [m²], 56,5 [m²] y 99,8 [m²] respectivamente [17]. Al igual que en los dos hornos anteriormente mencionados, los tres hornos de la plataforma solar de Almería presentan receptor fijo.



Figura 2.18: (1) Horno Solar de Odeillo. (2) Horno solar de Mont Louis. (3) Horno solar SF-5, Almería. (4) Horno solar con una reflexión y receptor móvil.

Por último, es importante destacar que los últimos avances e investigaciones relacionadas con hornos solares de alta temperatura están apuntando en tres ejes principales, la generación de combustibles solares, la obtención de agua potable a partir de agua de mar y el estudio del comportamiento de diversos materiales a altas temperaturas, alcanzando su punto de fusión e incluso el de ebullición.

2.5 Trazado de rayos

Para las tecnologías de concentración solar, es vital comprender como evolucionan los rayos dentro del sistema. Es importante saber cómo los rayos llegan al sistema, y así también entender cómo se reflejan y cómo van progresando dentro de él. Para lograr ellos se han desarrollado herramientas de trazado de rayos, que obedecen tanto a principios geométricos como físicos.

Actualmente existe software computacional en dicha área, representado una herramienta potente para el estudio de trazados de rayos. Existe software para el análisis en 2D y 3D. Los segundos son más demandantes en cuanto a recursos computacionales, pero representan de mejor manera la mayoría de los sistemas de concentración reales, los cuales son en tres dimensiones. En particular en los sistemas de concentración de alto flujo o alta temperatura, se hace completamente

necesario el uso de software 3D. Actualmente existen dos softwares abiertos para el estudio de trazado de rayos 3D: SolTrace y Tonatiuh.

A continuación, se explicará a grandes rasgos los principios utilizados por el programa SolTrace, pero cabe mencionar que son bastante similares a los utilizados en Tonatiuh. SolTrace es una herramienta de software desarrollada por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos.

En SolTrace, el sistema óptico está dividido en etapas. Cada etapa, a su vez, posee una cantidad determinada de elementos, los cuales son los que interactúan con los rayos. Las etapas están numeradas. Entonces, lo que hace el software es generar rayos desde el sol y los hace interactuar con la primera etapa, luego con la segunda, y así sucesivamente. Un rayo que ya salió de la primera etapa no puede volver a interactuar con los elementos de dicha etapa posteriormente. Este funcionamiento por etapas ayuda a reducir en cierta medida la necesidad de recursos computacionales. La Figura 2.19 representa las etapas y elementos utilizados en el software.

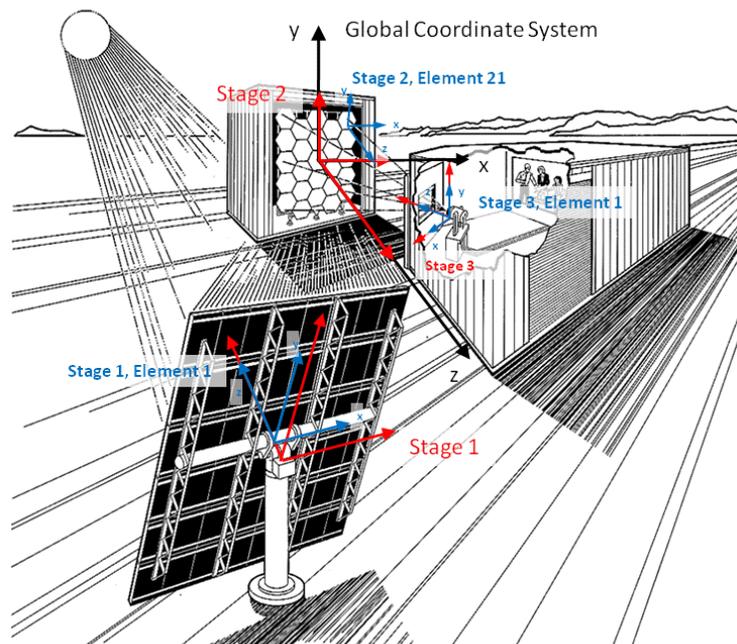


Figura 2.19: Representación de las etapas y elementos en un sistema de concentración solar, modelado en SolTrace.

Como se mencionó anteriormente, SolTrace genera rayos desde el Sol. Para ello, se debe definir tanto la posición como la forma del Sol. En cuanto a la posición, esta queda completamente definida con los ángulos de altura (h) y azimut (γ) descritos en la sección Geometría entre el Sol y la Tierra. Con ellos, y utilizando geometría básica, se calcula la dirección en la cual se encuentra el Sol, respecto de las coordenadas globales del sistema.

Para definir completamente al Sol, se debe definir la forma del disco solar. Para ello, el software requiere una distribución probabilística para poder generar los rayos de forma aleatoria.

Esta función describe la probabilidad de que el sol emita un rayo con una determinada variación en la dirección Sol-Tierra (fenómeno representado en la Figura 2.8). SolTrace presenta las opciones de distribución pillbox, gaussiana o definida por el usuario.

Una vez que los rayos son generados, estos son capaces de interactuar con los elementos del sistema. Los rayos pueden ser absorbidos, transmitidos, o reflejados. En cuanto a la reflexión, en una primera aproximación se pueden considerar como reflexión especular (Figura 2.20). Un rayo es reflejado de manera especular con igual probabilidad al coeficiente de reflexión (ρ) del material. En caso de no ser reflejado, este rayo es transmitido o bien absorbido por el elemento.

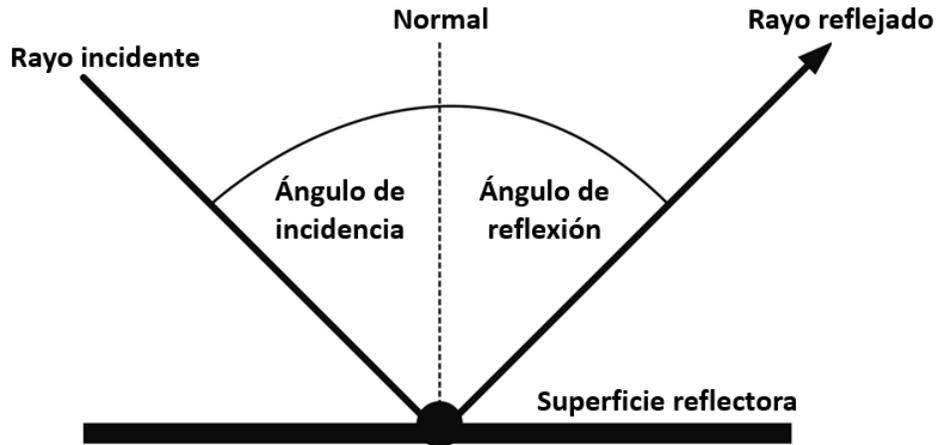


Figura 2.20: Reflexión especular.

En la realidad, la reflexión nunca es absolutamente especular. La reflexión siempre contiene una componente difusa (Figura 2.21). Los factores que determinan cuán especular o difusa, y en caso de ser difusa cuánta dispersión tiene, son los denominados errores de pendiente (σ_{slope}) y de especularidad (σ_{spec}). Ellos están relacionados con los macro y micro errores superficiales del elemento reflectante y se esquematizan en la Figura 2.22.

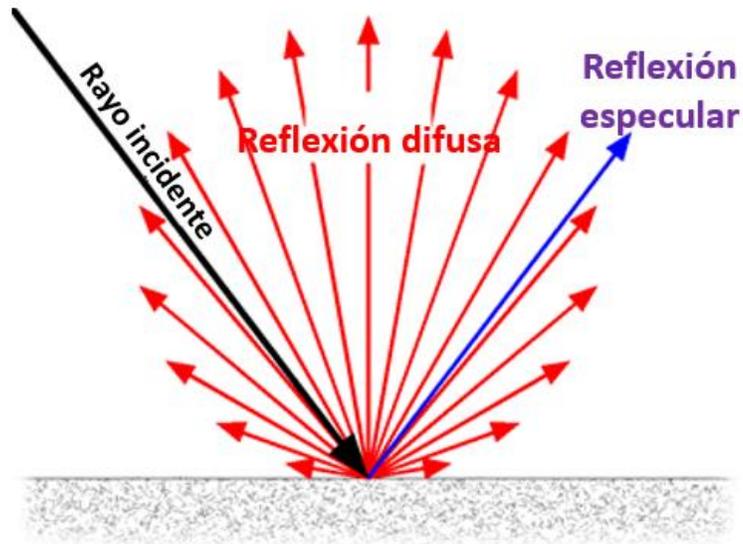


Figura 2.21: Reflexión especular y difusa.

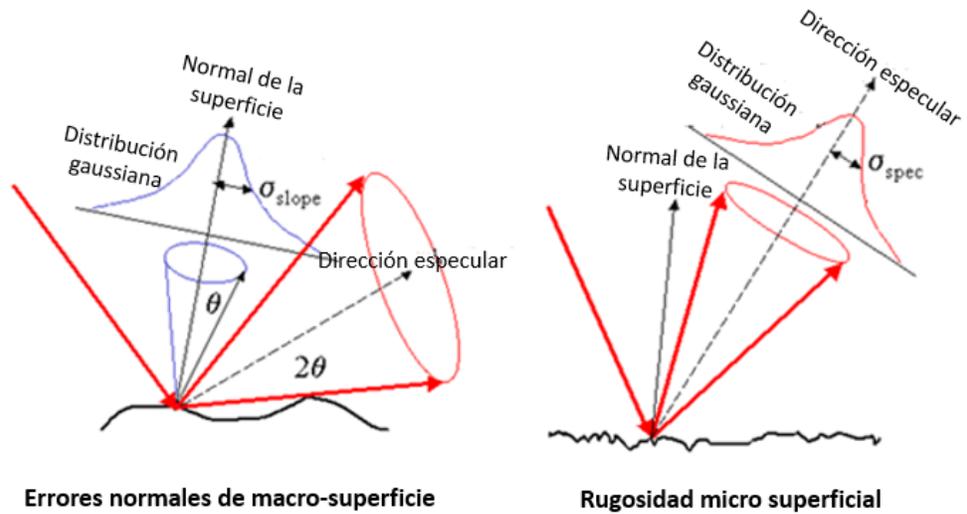


Figura 2.22: Errores de pendiente y de especularidad en la reflexión de un rayo.

2.6 Transferencia de calor

En el diseño de los hornos, y en cualquier sistema térmico, el análisis de las transferencias de calor es de suma importancia. En los hornos, por ejemplo, uno desea alcanzar una determinada temperatura utilizando la menor energía posible. Para lograr ellos es vital lograr una buena aislación que disminuya lo más posible las pérdidas de calor.

Existen tres formas de transferir calor: conducción, convección y radiación, las cuales serán brevemente explicadas en los siguientes subcapítulos.

2.6.1 Conducción

La conducción es el mecanismo en el cual se transmite el calor en los cuerpos sólidos y es por ellos que necesita de un medio material para manifestarse. La conducción obedece a la ley de Fourier de la conducción de calor, expresada en la ecuación (2.12):

$$\dot{Q}_n = -k \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.12)$$

En donde \dot{Q}_n representa la transferencia de calor en la dirección normal \hat{n} , k la conductividad térmica del material, A el área isotérmica de transferencia de calor, T la temperatura y \hat{n} la normal a la superficie isotérmica.

La ecuación (2.12), en estado estacionario, se puede escribir en su forma de resistencias térmicas, obteniéndose (2.13):

$$\dot{Q}_{Cond} = \frac{T_1 - T_2}{R_t} \quad (2.13)$$

En donde \dot{Q}_{Cond} representa la conducción de calor entre las superficies isotérmicas de interés, T_1 y T_2 las temperaturas de las superficies de interés y R_t la resistencia térmica entre las superficies de interés.

Para un casquete esférico sólidos R_{esf} se obtiene a partir de la ecuación (2.14):

$$R_{esf} = \frac{r_2 - r_1}{4 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot k} \quad (2.14)$$

En donde r_1 representa el radio interior del casquete esférico y r_2 el radio exterior del casquete esférico.

Por otro lado, para dos casquetes esféricos concéntricos solidos como los mostrados en la Figura 2.23, R_{esf} se obtiene a partir de la ecuación (2.15):

$$R_{esf} = \frac{r_m - r_1}{4 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot r_m \cdot k_1} + \frac{r_2 - r_m}{4 \cdot \pi \cdot r_m \cdot r_2 \cdot k_2} \quad (2.15)$$

En donde r_1 representa el radio interior del casquete esférico 1, r_2 radio exterior del casquete esférico 2, r_m radio medio, es decir, el exterior a 1 e interior a 2, y k_1 y k_2 las conductividades térmicas de los materiales de 1 y 2 respectivamente.

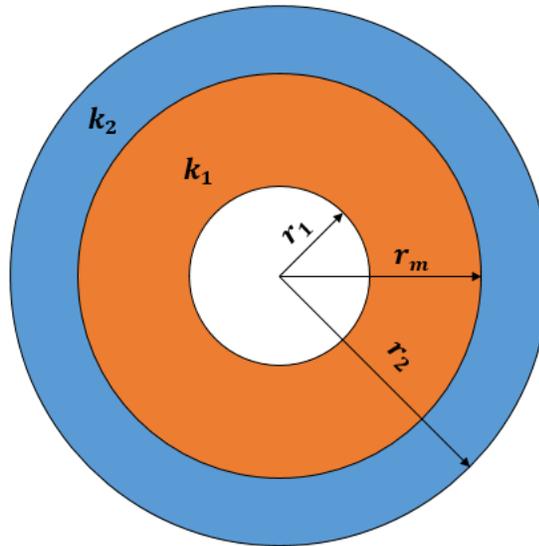


Figura 2.23: Vista en corte de dos casquetes esféricos concéntricos.

2.6.2 Convección

La convección es el mecanismo en el cual se transmite el calor entre fluidos y sólidos, y al igual que la conducción, requiere de un medio material para manifestarse. La convección hace relación a la conducción en el fluido sumado al movimiento de partículas propio de los estados líquidos y gaseosos. La convección se rige por la ley de enfriamiento de Newton, expresada en la ecuación (2.16):

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad (2.16)$$

En donde \dot{Q}_{conv} representa el calor transferido por convección, h el coeficiente de transferencia de calor por convección, A el área superficial de la transferencia de calor, T_s la temperatura de la superficie sólida y T_{∞} la temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie sólida,

Para el caso particular de la transferencia de calor por convección natural en esferas, en estado estacionario, el coeficiente de transferencia de calor por convección se obtiene la ecuación (2.17):

$$h = \frac{k \cdot Nu}{Lc} \quad (2.17)$$

En donde k representa la conductividad térmica del fluido, Lc el largo característico, que en el caso de la esfera corresponde al diámetro, y Nu el número de Nusselt

A su vez, el número de Nusselt se obtiene a partir de la ecuación (2.18):

$$Nu = 2 + \frac{0,589 \cdot Ra_D^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0,469}{Pr}\right)^{9/16}\right)^{4/9}} \quad (2.18)$$

Con:

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad (2.19)$$

$$Ra_D = Gr_D \cdot Pr \quad (2.20)$$

$$Gr_D = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot D^3}{\nu^2} \quad (2.21)$$

En donde μ representa la viscosidad dinámica del fluido, c_p el calor específico del fluido, k la conductividad térmica del fluido, g la aceleración de gravedad, β el coeficiente de expansión volumétrica del fluido, D el diámetro de la esfera y ν la viscosidad cinemática del fluido.

Todas las propiedades del fluido deben ser evaluadas a la temperatura media (T_m) dada por la ecuación (2.22):

$$T_m = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (2.22)$$

Finalmente se destaca que la ecuación (2.18) es válida para $Ra_D \leq 10^{11}$ y $Pr \geq 0,7$.

2.6.3 Radiación

La radiación es el tercer y último mecanismo de transferencia de calor. Lo experimentan todos los cuerpos en todo momento, y a diferencia de la conducción y convección, no requiere de un medio material para transmitirse. Un ejemplo de la radiación es la energía térmica que proviene del Sol y llega a la Tierra.

Como se mencionó, todo cuerpo está constantemente emitiendo radiación, y está se cuantifica a través de la ley de Stefan-Boltzmann, enunciada en la ecuación (2.23):

$$\dot{Q}_{E,rad} = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.23)$$

En donde $\dot{Q}_{E,rad}$ representa el calor por radiación emitido por un cuerpo, ε la emisividad del cuerpo emisor, A el área superficial del cuerpo emisor, σ la constante de Stefan-Boltzmann, igual a $5,67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$ y T la temperatura superficial del cuerpo emisor.

La radiación es siempre emitida por un cuerpo, pero posterior a ello esta es capaz de interactuar con otros cuerpos. Un material, al recibir radiación, puede reflejarla, absorberla o transmitirla (Figura 2.24). Cada una de ellas se manifiesta en proporción a al coeficiente de reflectividad (ρ), absorptividad (α) y transmisividad (τ) del material. Por conservación de energía, la suma de los tres coeficientes debe ser igual a 1.

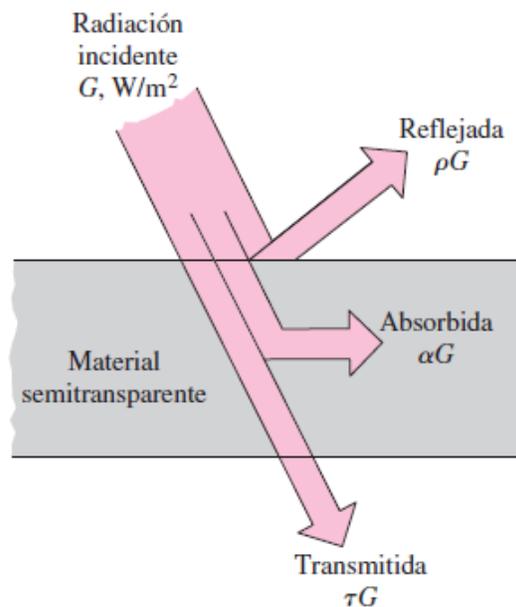


Figura 2.24: Comportamiento de la radiación al interactuar con un cuerpo. Fuente: [18].

Cabe destacar que, para las superficies opacas, $\tau = 0$ por lo tanto $\alpha + \rho = 1$.

Entonces, el total de energía por radiación que sale de un cuerpo es la suma de lo que emite y lo que refleja de la radiación incidente (Figura 2.25). La ecuación (2.24) expresa dicha relación.

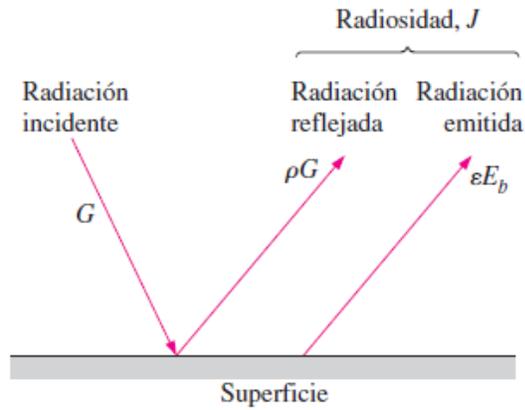


Figura 2.25: Total de la energía liberada por radiación de una superficie. Fuente: [18].

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot T^4 + \rho \cdot G \quad (2.24)$$

En donde \dot{Q}_{rad} representa el total de energía liberada por radiación por parte de una superficie y G la radiación incidente de dicha superficie.

La ecuación (2.24) hace referencia a toda la energía liberada por una superficie. Para poder determinar cuánto de esa energía está impactando a otra determinada superficie, se requiere el concepto de factor de forma o factor de visión.

El factor de forma, representado en la Figura 2.26, hace noción a la porción del total de energía liberada por medio de radiación de una superficie 1 que finalmente impacta sobre otra superficie 2.

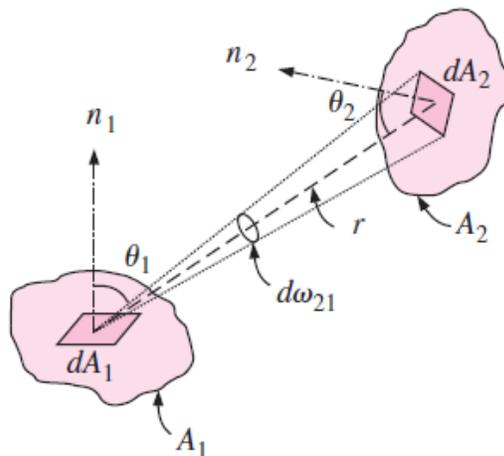


Figura 2.26: Concepto de factor de forma. Fuente: [18].

El factor de visión de 1 hacia 2 ($F_{1 \rightarrow 2}$) se obtiene de la ecuación (2.25):

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_2} \int_{A_1} \frac{\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2}{\pi \cdot r^2} dA_1 dA_2 \quad (2.25)$$

Los ángulos y áreas de la ecuación (2.25) se encuentran expresados en la Figura 2.26.

Cabe mencionar que el factor $F_{1 \rightarrow 1} > 0$ cuando la superficie es cóncava. De ser convexa, $F_{1 \rightarrow 1} = 0$

Los factores de visión se pueden relacionar según la ecuación (2.26):

$$A_1 \cdot F_{1 \rightarrow 2} = A_2 \cdot F_{2 \rightarrow 1} \quad (2.26)$$

Considerando las ecuaciones anteriores, el calor entregado por una superficie 1 a una superficie 2 por medio de radiación ($\dot{Q}_{rad,1 \rightarrow 2}$) queda expresado en la ecuación (2.27):

$$\dot{Q}_{rad,1 \rightarrow 2} = F_{1 \rightarrow 2} \cdot (\varepsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot T^4 + \rho \cdot G) \quad (2.27)$$

2.6.4 Régimen transiente

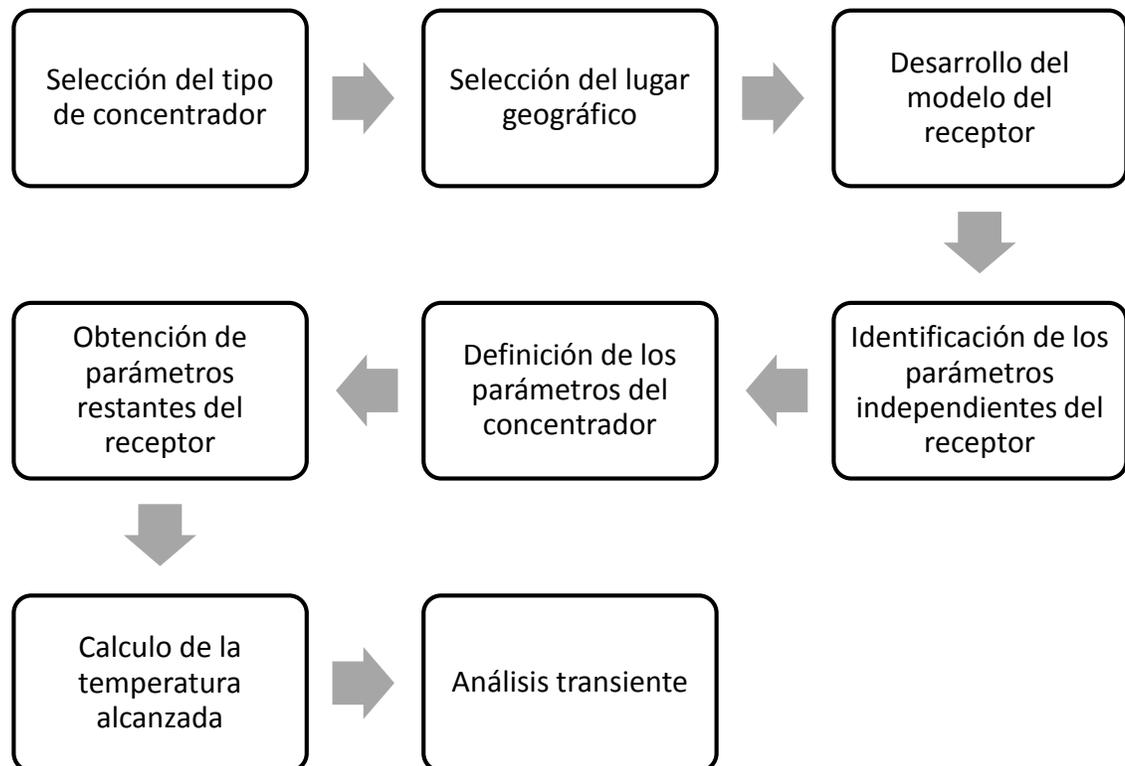
Cuando un material empieza a recibir calor, éste naturalmente aumentara su temperatura. A medida que aumenta su temperatura, también aumentas las pérdidas de calor que el objeto experimenta con el entorno. Eventualmente, si se mantienen las condiciones, el objeto llegará a una temperatura tal en la que las pérdidas sean de igual magnitud al calor que está incidiendo sobre él. Entonces el cuerpo mantendría esta nueva temperatura de manera estacionaria. El proceso para llegar a dicha temperatura de estado estacionario se le conoce como régimen transiente.

La ecuación que rige la temperatura del cuerpo durante el régimen transiente se expresa a continuación (ecuación (2.28)):

$$\left(\begin{array}{l} \text{Transferencia de calor} \\ \text{hacia el cuerpo durante } dt \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{Incremento en la energía} \\ \text{del cuerpo durante } dt \end{array} \right) \quad (2.28)$$

3 Metodología

El siguiente esquema sintetiza a grandes rasgos la metodología utilizada para la realización de la presente memoria:



A continuación, se explica con mayor detalle cada uno de los pasos estipulados en la metodología:

Selección del tipo de concentrador

De los diferentes tipos de concentradores investigados, se selecciona uno de ellos para ser implementado. Se debe elegir uno concorde a los objetivos trazados, es decir, que pueda ser de pequeña escala, con foco fijo y de segmento de paraboloides.

Selección del lugar geográfico

Se define el lugar geográfico dentro de Chile para el cual será diseñado el horno solar de alta temperatura. Intuitivamente, debe ser un lugar que tenga condiciones propicias y adecuadas para poder cumplir los objetivos planteados.

Desarrollo del modelo del receptor

Se desarrolla el modelo del receptor. Se diseña la geometría y se reconocen los parámetros que la definen. Se definen los materiales del receptor y se identifican las propiedades térmicas de dichos materiales. A su vez, se identifican las ecuaciones que rigen la transferencia de calor del receptor, de manera de poder resolverlas y determinar la energía necesaria para llegar a la temperatura deseada. Para desarrollar las ecuaciones y obtener soluciones numéricas se utiliza en programa Maple 2016. Con ello, se obtiene el orden de magnitud del calor que requiere el sistema para alcanzar la temperatura de diseño, en una primera aproximación.

Identificación de los parámetros independientes del receptor

Con los parámetros del receptor ya identificados, se reconocen los parámetros “independientes” del receptor. Los parámetros independientes hacen relación a aquellos que no se ven afectados por la geometría del concentrador. Se realiza un análisis de sensibilidad para cada uno de los parámetros independientes, examinando como afectan las temperaturas y la transferencia de calor dentro del sistema. Posteriormente se seleccionan los valores óptimos de dichos parámetros, de manera que el sistema requiera la menor energía posible y que las temperaturas obtenidas no superen las temperaturas de trabajo de los materiales antes seleccionados. Adicionalmente se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros dependientes del concentrador, para entender su comportamiento. En este caso, la selección de los valores de dichos parámetros se realizará con posterioridad, una vez que se hayan definido los parámetros del concentrador.

Definición de los parámetros del concentrador

Con los parámetros independientes del horno ya definidos, y seleccionado parámetros iniciales para los restantes, se obtiene una primera aproximación del calor que requiere el sistema para alcanzar la temperatura de diseño. Con ello se seleccionan valores iniciales para los parámetros del concentrador, de manera que el calor incidente sobre el concentrador sea similar al requerido por el sistema.

Obtención de parámetros restantes del receptor

Con los parámetros del concentrador bien definidos, se puede obtener de manera precisa los parámetros faltantes del receptor. Esto se obtiene mediante la utilización del software SolTrace 2012.7.9. En dicho programa se simula la concentración que se obtiene en la zona focal, para una determinada radiación incidente (se selecciona el valor de DNI = 800 [W/m²]). Para dicha simulación es necesario tener en cuenta el lugar de diseño seleccionado, como también un una fecha y hora del día. En una primera instancia se utiliza un día de equinoccio, al mediodía solar. Posteriormente, mediante un código desarrollado en MatLab y considerando las relaciones

geométricas presentes en el sistema, se obtienen los restantes parámetros del receptor (parámetros dependientes). Una vez conseguidos los valores de todos los parámetros del sistema, se reemplazan los valores inicialmente utilizados y se encuentra la temperatura alcanzada por el horno bajo la DNI utilizada en SolTrace. Se realiza este análisis para diferentes valores de los parámetros del concentrador, de manera de alcanzar una alternativa más eficiente que la primera obtenida.

Calculo de la temperatura alcanzada

Para lograr obtener la temperatura real alcanzada por el horno se debe realizar un análisis para cada hora y fecha a lo largo del año, considerando la radiación incidente en lugar de diseño, y ya no los 800 [W/m²] utilizados inicialmente. Habiendo seleccionados los valores de los parámetros que optimizan la energía para el caso base realizado en la sección “obtención de parámetros restantes del receptor”, se amplía los resultados de manera de obtener el ciclo diario-anual de la temperatura alcanzada por el horno.

Análisis transiente

Finalmente se realiza un análisis para determinar cuánto demora el horno en llegar a un 95% de la temperatura estacionaria. Para ellos se realiza un análisis transiente de la zona focal. Dicho análisis se realiza de manera discreta, determinando el aumento de temperatura de la zona focal en función de la diferencia entre el calor que está recibiendo versus el que está emitiendo, durante un determinado lapsus de tiempo Δt . El valor utilizado para Δt es de 1 segundo. Cabe mencionar que para obtener el aumento en la temperatura de la zona focal es necesario conocer la inercia térmica de dicha zona, la cual depende tanto de su tamaño como del material seleccionado.

4 Resultados y Discusión

En el presente capítulo se muestra el trabajo principal desarrollado en la memoria, donde se incluye los resultados obtenidos y el análisis y discusión de ellos.

4.1 Selección del tipo de concentrador

Los requisitos impuestos en los objetivos obligan a escoger un concentrador que sea capaz de alcanzar altas temperaturas, de foco fijo y de pequeña escala. Teniendo estos factores en cuenta, es que se procede a seleccionar el tipo de concentrador a utilizar.

De la recopilación bibliográfica, se identificaron 4 concentradores de foco fijo: placa plana, torre central, paraboloide de revolución con heliostato auxiliar y Scheffler. De ellos se descarta de manera inmediata los de placa plana y de torre central. El de placa plana debido al bajo flujo térmico que genera en la zona focal. Por otra parte, el de torre central se desecha debido a implicar proyectos de gran escala para alcanzar temperaturas interesantes. Ellos dos tienen en común el no tener concentración puntual.

En cuanto a la selección entre concentrador Scheffler y de paraboloide de revolución con heliostato auxiliar se termina optando por el primero. Esto por dos motivos principales: en primer lugar, el concentrador tipo Scheffler requiere de una sola reflexión, por lo que las pérdidas que la reflexión conlleva se ven disminuidas en comparación con el paraboloide. Por otro lado, el concentrador Scheffler posee un mecanismo de seguimiento solar más simple que el de paraboloide de revolución, sumado a que no presenta pérdidas por el efecto coseno, como sí presenta la segunda opción.

Con el tipo de concentrador definido, es importante recalcar algunas de sus características.

1. El concentrador debe tener un eje de rotación en la misma dirección que el eje norte sur de la Tierra.
2. El foco debe estar ubicado en el eje de revolución.
3. Como desventaja, el concentrador Scheffler requiere de un mecanismo de adaptación del reflector durante el transcurso del año. Esto para poder compensar el cambio en el paraboloide que conlleva el cambio en la declinación solar (δ), explicado en el capítulo Concentrador Scheffler.

4.2 Selección del lugar geográfico

Teniendo en cuenta que el horno solar utiliza tecnología CS, es deseable seleccionar un lugar con alta radiación incidente, y en particular con alta radiación directa. Adicionalmente se mencionó que el horno está pensado para ser utilizado para la cocción de cerámicas artesanales. Teniendo en cuenta estos dos factores es que se selecciona la localidad de San Pedro de Atacama, ubicada en la región de Antofagasta, provincia de El Loa (Figura 4.1). Esto debido a que dicho

lugar presenta abundante radiación incidente, en particular directa, y a su vez es un pueblo muy turístico, con una gran feria artesanal.

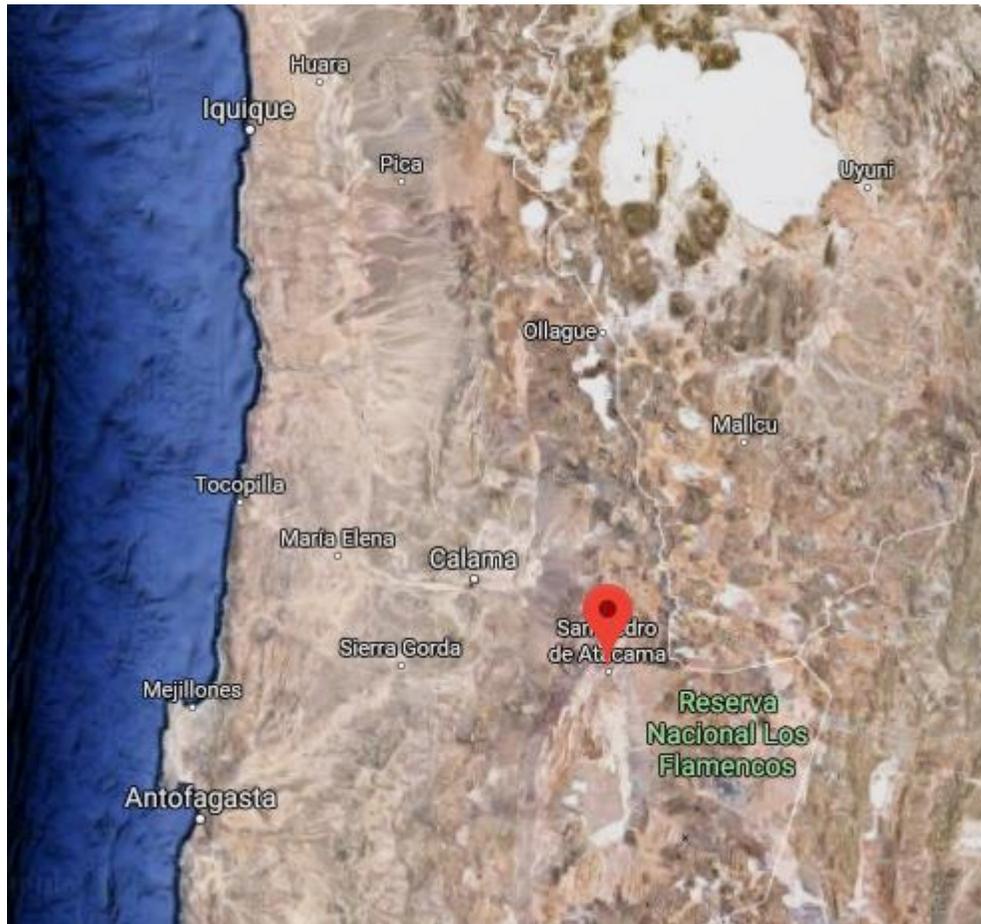


Figura 4.1: Ubicación geográfica de San Pedro de Atacama. Fuente: Explorador Solar, Ministerio de Energía.

Los datos geográficos de San Pedro se resumen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Características geográficas de San Pedro de Atacama.

Propiedad	Valor
Latitud	-22,9109°
Longitud	-68,2006°
Altura	2.444 [msnm]

En cuanto a la radiación incidente en San Pedro, en el período comprendido entre los años 2004-2016 estuvo compuesta de aproximadamente un 90% de radiación directa y un 10% de radiación difusa. La Figura 4.2 muestra el ciclo diario anual de la radiación directa presente en la localidad.

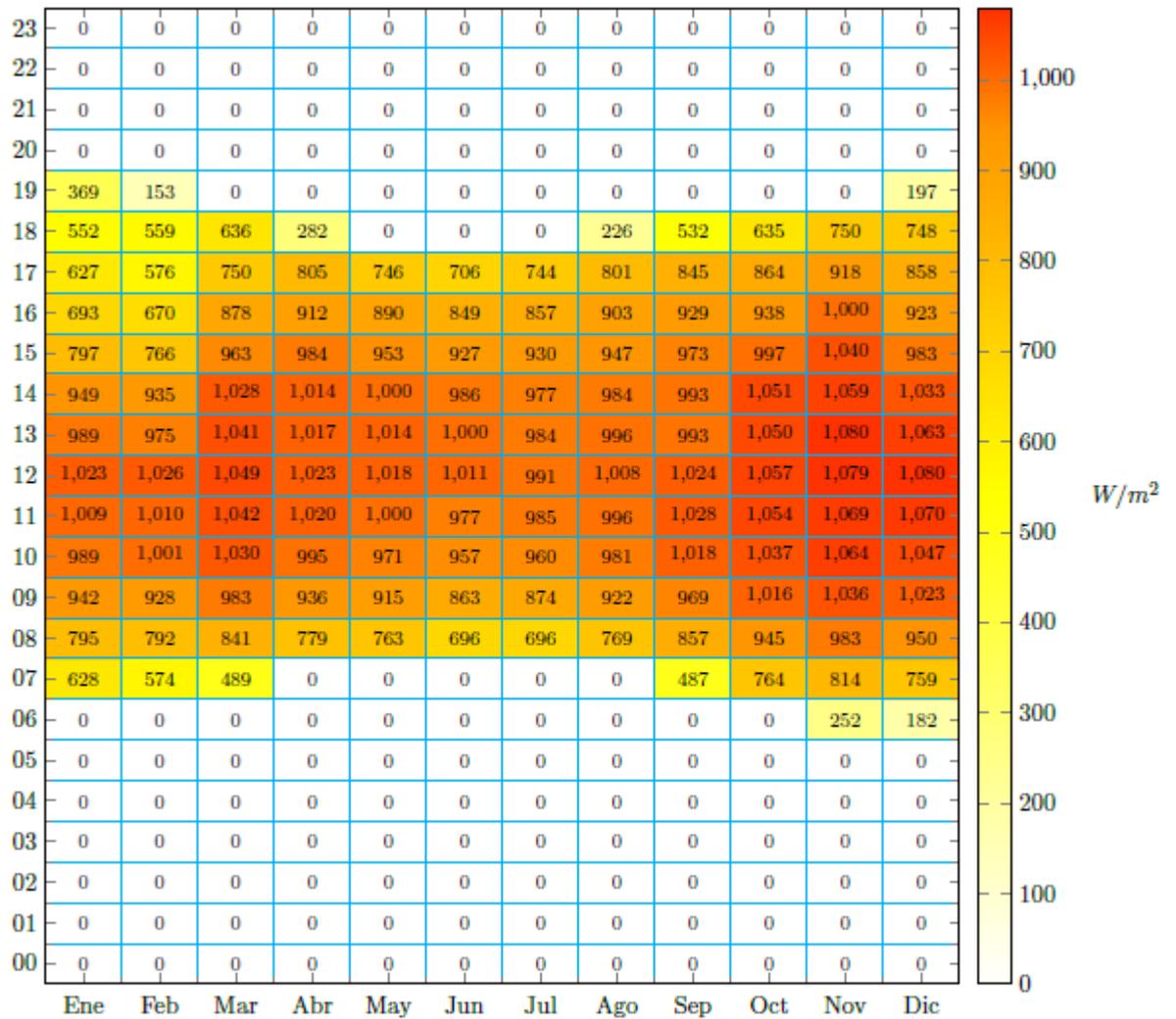


Figura 4.2: Ciclo diario-anual de la radiación solar directa en la localidad de San Pedro. Promedio para cada hora y mes del año. Fuente: Explorador Solar, Ministerio de Energía.

4.3 Modelo del receptor

Habiendo seleccionado el tipo de concentrador y el lugar geográfico de diseño, se continúa con el desarrollo del diseño para el horno. Como todo sistema de concentración solar, se pueden identificar dos grandes problemáticas, una óptica y una térmica. La parte óptica del problema hace relación a la forma en la que se redirigirán los rayos incidentes hacia la zona focal, mientras que la parte térmica del problema hace noción a el cómo se aprovecha la radiación en la zona focal.

La Figura 4.3 esquematiza el diseño general propuesto. En ella se pueden distinguir dos elementos fundamentales, el receptor y el concentrador. De manera intuitiva se aprecia que los parámetros del concentrador tienen relación con la solución a la parte óptica del problema, mientras

que los parámetros del receptor hacen relación con la parte térmica. En los capítulos siguientes se apreciará que, si bien esto se cumple de manera general, los parámetros están relacionados entre sí. Por ello, es que se necesita realizar un análisis global para poder solucionar las dos partes y así poder definir completamente el horno solar.

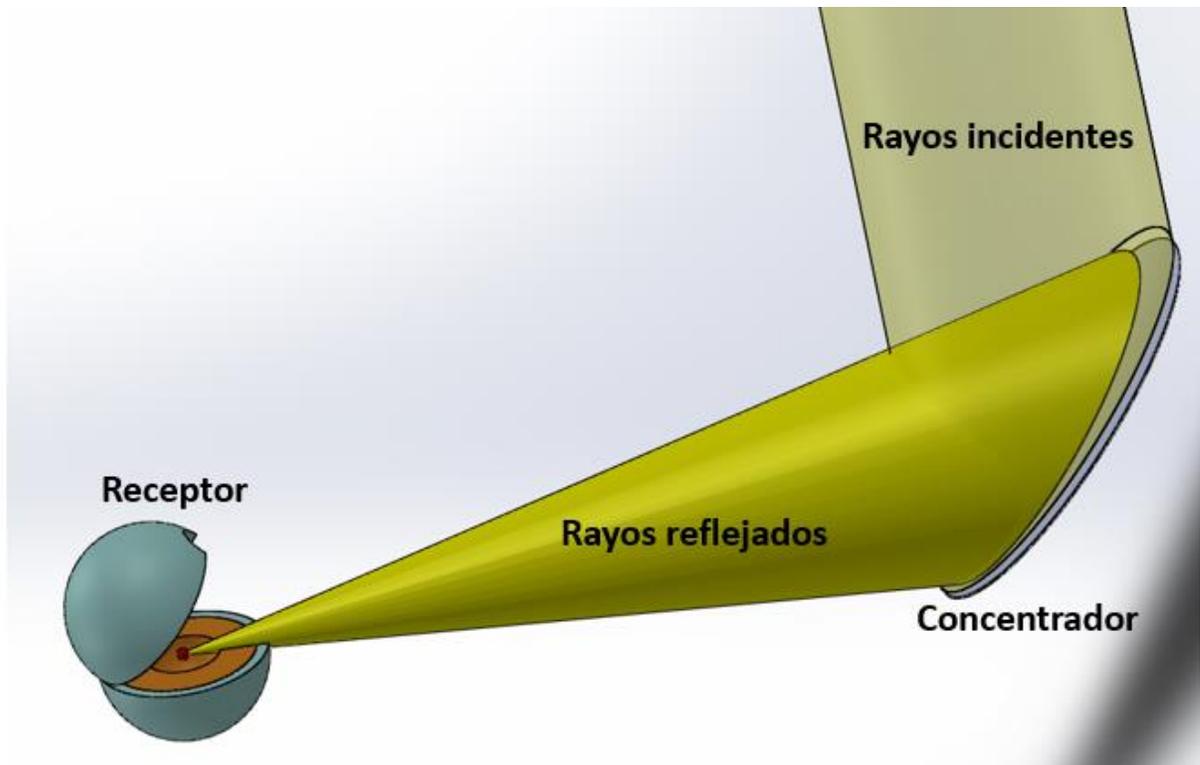


Figura 4.3: Esquema general del horno diseñado.

En la siguiente sección se describe el diseño y modelo térmico del receptor del horno solar.

4.3.1 Diseño del receptor

El diseño para el receptor que se selecciona se representa en la Figura 4.4. Este es elegido por dos motivos: en primer lugar, el diseño seleccionado se asemeja bastante a receptores de hornos solares de alta temperatura ya existentes, como el caso particular del horno de Mont Louis. Como segundo, la geometría esférica del diseño facilita en gran medida el modelo térmico del receptor, haciendo que sea factible desarrollar las ecuaciones termodinámicas del sistema.

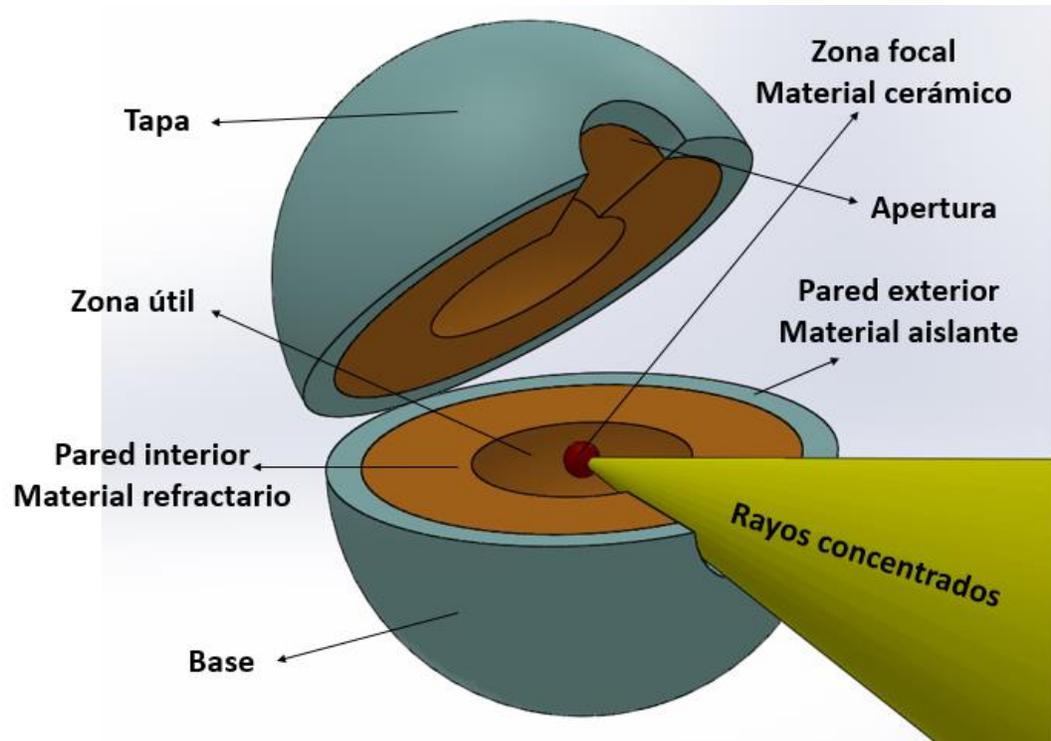


Figura 4.4: Diseño propuesto para el receptor.

Como se esquematiza en la Figura 4.4, el receptor cuenta de una base y una tapa. La existencia de la tapa permite maniobrar dentro del receptor en la zona útil del horno solar. Por otro lado, la base se encuentra fija al suelo. Los rayos redirigidos por el concentrador son concentrados en la zona focal gracias a la apertura que el receptor posee.

Se pueden identificar tres elementos importantes en el receptor. En primer lugar, se encuentra el elemento de la zona focal, el cual es el encargado de recibir toda la radiación proveniente del concentrador solar. Este elemento se encuentra en el centro del receptor. En cuanto a las paredes del receptor, estas se dividen en dos, una capa interior y una capa exterior. De aquí en más se denominan con los subíndices 1, 2 y 3 a la zona focal, capa interior y capa exterior respectivamente.

La zona focal, como se mencionó anteriormente, es la encargada de recibir la radiación proveniente del concentrador. Por lo tanto, el material de dicho elemento debe resistir altas temperaturas. Por otro lado, se desea que la zona focal absorba la mayor cantidad de la radiación que incide sobre ella y refleje lo menos posible. También es recomendable que la emisividad de dicha superficie sea alta, de manera de poder transmitir de buena manera el calor hacia el resto del sistema. Tenido en cuenta dichas consideraciones es que se selecciona un material cerámico para la zona focal. El cerámico seleccionado es el Carburo de Silicio CS_i (100%) y sus propiedades se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Propiedades del CS_i (100%), obtenidas de [19].

Carburo de Silicio CS_i (100%)		Evaluado a
$T_{fusión}$	2250 [°C]	–
e_1	0,78	1800°C
ρ_1	0,2	–
c_{p1}	1255,2 $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$	1000°C
Densidad	3200 $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	–

Las propiedades de la Tabla 4.2 no son evaluadas a igual temperatura debido a la dificultad para encontrar dicha información.

En cuanto a las paredes del receptor estas fueron divididas en una capa interior y una capa exterior. Se desea que las paredes sean lo más aislantes posibles, pero que, a su vez, sean resistentes a altas temperaturas. Como no fue posible encontrar un material que cumpla con ambos requisitos, es que se decide separarlas en una pared interior y una exterior. Para la pared interior se escoge un material refractario, resistente a altas temperaturas y con relativamente buenas propiedades de aislación, mientras que para la pared exterior se selecciona un material aislante que posea muy baja conductividad térmica. La primera capa reduce considerablemente la temperatura en la zona de contacto con la segunda capa, lo que hace posible que un buen aislante pueda funcionar de buena manera desde la interface hacia afuera.

El material refractario seleccionado para la capa interior es JM 30 160 1.0L y el aislante para la capa exterior es una lana mineral con densidad de 100 [kg/m³] del proveedor ARYSA. Las propiedades térmicas de cada uno de ellos se encuentran en la Tabla 4.3 y Tabla 4.4 respectivamente.

Tabla 4.3: Propiedades del refractario JM30 160 1.0L, obtenidas de [19]

Refractario JM30 160 1.0L		Evaluado a
e_2	0,38	1000°C
ρ_2	0,3	–
k_2	0,38 $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	1200°C [20]

Tabla 4.4: Propiedades de la lana mineral, obtenidas de [21].

Lana mineral 100 [kg/m ³]		Evaluado a
e_3	0,1	100°C
k_3	0,058 $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	260°C

4.3.2 Nomenclatura del receptor

Habiendo definido el diseño del receptor se pueden identificar los parámetros que lo definen. La Figura 4.5 muestra una vista en corte del receptor de la Figura 4.4, donde se pueden apreciar todos los parámetros que definen al receptor.

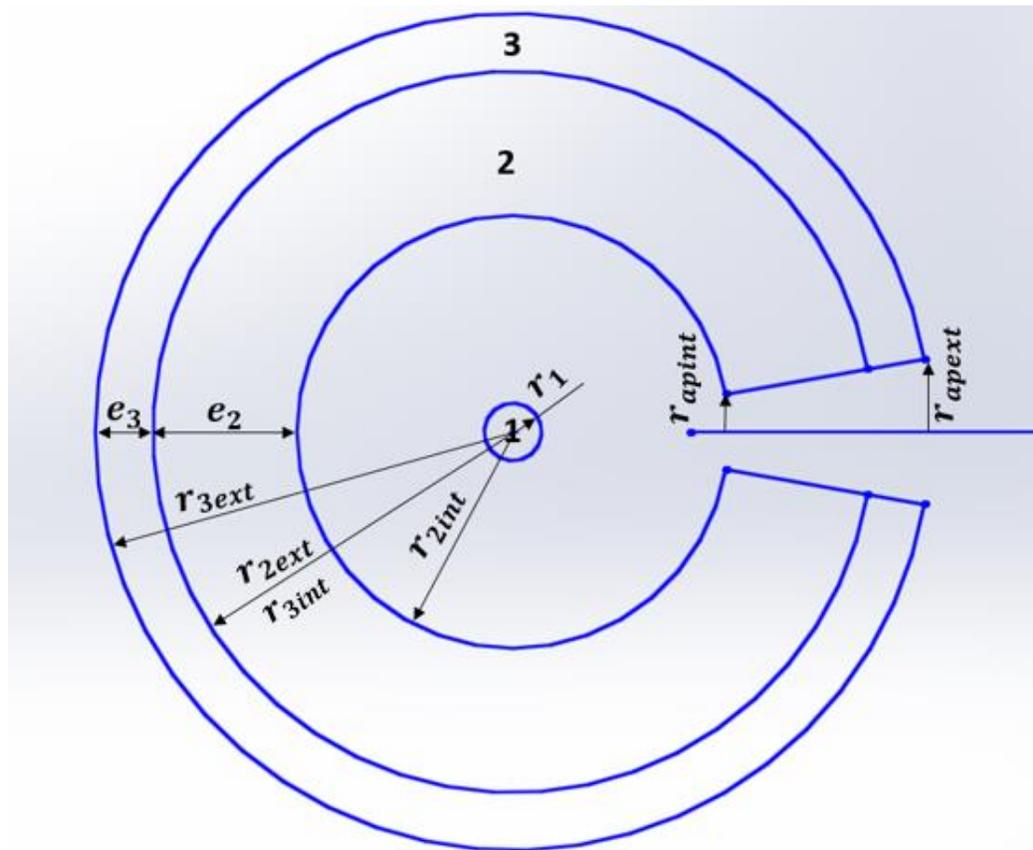


Figura 4.5: Vista en corte del receptor y sus parámetros.

A continuación, se procede a explicar cada uno de los parámetros de la Figura 4.5:

r_1 : radio del material cerámico de la zona focal.

r_{2int} : radio interior de la capa refractaria.

e_2 : espesor de la capa refractaria.

r_{2ext} : radio exterior de la capa refractaria.

r_{3int} : radio interior de la capa aislante.

e_3 : espesor de la capa aislante.

r_{3ext} : radio exterior de la capa aislante.

r_{apint} : radio del círculo interior de la apertura necesaria para que los rayos del concentrador impacten en la zona focal cerámica.

r_{apext} : radio del círculo exterior de la apertura necesaria para que los rayos del concentrador impacten en la zona focal cerámica.

Como la capa aislante está puesta justo encima de la capa refractaria se cumple que $r_{2ext} = r_{3int}$. Además, por geometría básica se tiene que: $r_{2ext} = r_{2int} + e_2$ y $r_{3ext} = r_{3int} + e_3$.

4.3.3 Modelo térmico del receptor

Como se mencionó anteriormente, el diseño del receptor cuenta principalmente de 3 componentes. La zona focal es de material cerámico (1), la capa interior de material refractario (2) y la capa exterior de material aislante (3). Para llevar a cabo el modelo térmico del receptor se hace un análisis estacionario para cada uno de estos elementos.

La Figura 4.6 esquematiza cómo interactúan, en cuanto a transferencia de calor, los elementos presentes en el receptor.

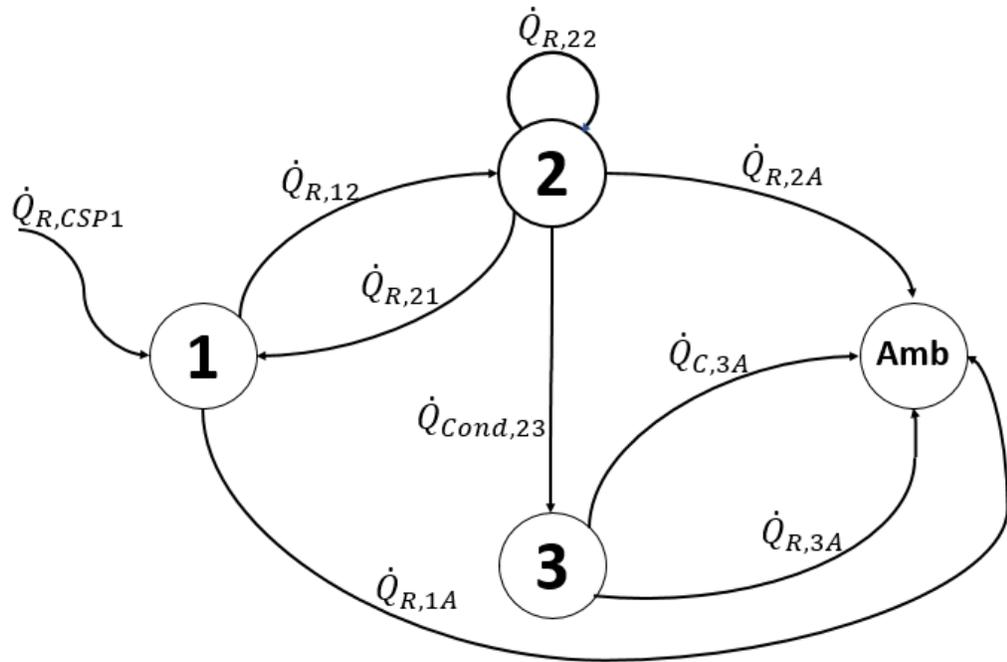


Figura 4.6: Esquema para el modelo térmico desarrollado para el receptor.

La nomenclatura utilizada en la Figura 4.6, y en toda la presente memoria, se debe interpretar de la siguiente forma: $\dot{Q}_{X,12}$ representa el calor que 2 recibe de 1, mediante la forma X . Entonces X puede tomar las tres formas de transferencia de calor, en donde R representa la radiación, C la convección y $Cond$ la conducción.

Cabe destacar que el modelo desarrollado no considera la convección en el interior del receptor y como esta se desarrolla hacia el exterior por medio del orificio (determinado por r_{apint}). Esto no se considera debido al ligero impacto que debería traer dicha pérdida y a la escasa información existente para la convección en espacios cerrados con pequeñas aberturas.

En la Figura 4.7 se esquematiza el mismo modelo, pero esta vez visto como un sistema de resistencias térmicas.

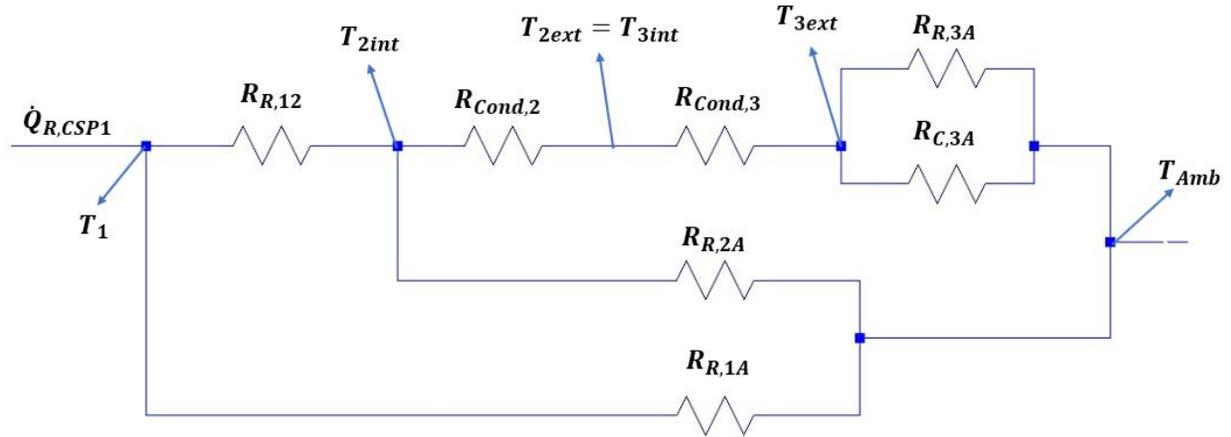


Figura 4.7: Modelo térmico del receptor expresado como sistema de resistencias térmicas.

Obedeciendo el principio de conservación de la energía, considerando un régimen estacionario y entendiendo que el calor es la única forma de energía presente en nuestro sistema, entonces el calor recibido debe ser igual al calor liberado por cada cuerpo. Dicho esto, se realiza un balance energético en dos volúmenes de control, el primero que comprende la esfera del material cerámico (ecuación (4.1)) y el segundo un casquete esférico que envuelve ambas capas (ecuación (4.2)), es decir, tanto el refractario como el aislante de manera conjunta.

$$\dot{Q}_{R,CSP1} + \dot{Q}_{R,21} = \dot{Q}_{R,12} + \dot{Q}_{R,1A} \quad (4.1)$$

$$\dot{Q}_{R,12} + \dot{Q}_{R,22} = \dot{Q}_{R,21} + \dot{Q}_{R,2A} + \dot{Q}_{R,3A} + \dot{Q}_{C,3A} + \dot{Q}_{R,22} \quad (4.2)$$

Considerando un régimen estacionario, y bajo el supuesto que el cerámico de la zona focal posee una temperatura uniforme en toda la superficie entonces se pueden identificar 5 temperaturas de interés: la temperatura superficial del cerámico (T_1), la temperatura de las paredes interiores del material refractario (T_{2int}), la temperatura de la superficie exterior del material refractarios (T_{2ext}), la temperatura de la superficie interior del material aislante (T_{3int}) y la temperatura de la superficie exterior del material aislante (T_{3ext}). Todas esas temperaturas se pueden considerar uniformes debido a la geometría esférica del sistema y el supuesto antes mencionado referido a T_1 .

Por continuidad de la temperatura se tiene que $T_{2ext} = T_{3int}$.

El supuesto de considerar una temperatura uniforme en la superficie del cerámico no es estrictamente cierto en la realidad, pero debido a su pequeño tamaño es una aproximación aceptable.

Teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas, se procede a determinar las transferencias de calor de las ecuaciones (4.1) y (4.2), utilizando las ecuaciones (2.27) y (2.16). Con ellos se obtiene:

$$\dot{Q}_{R,12} = F_{1 \rightarrow 2} \cdot (\varepsilon_1 \cdot A_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4 + \rho_1 \cdot (\dot{Q}_{R,21} + \dot{Q}_{R,CSP})) \quad (4.3)$$

$$\dot{Q}_{R,1A} = F_{1 \rightarrow A} \cdot (\varepsilon_1 \cdot A_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4 + \rho_1 \cdot (\dot{Q}_{R,21} + \dot{Q}_{R,CSP})) \quad (4.4)$$

$$\dot{Q}_{R,21} = F_{2 \rightarrow 1} \cdot (\varepsilon_2 \cdot A_{2int} \cdot \sigma \cdot T_{2int}^4 + \rho_2 \cdot (\dot{Q}_{R,22} + \dot{Q}_{R,12})) \quad (4.5)$$

$$\dot{Q}_{R,2A} = F_{2 \rightarrow A} \cdot (\varepsilon_2 \cdot A_{2int} \cdot \sigma \cdot T_{2int}^4 + \rho_2 \cdot (\dot{Q}_{R,22} + \dot{Q}_{R,12})) \quad (4.6)$$

$$\dot{Q}_{R,22} = F_{2 \rightarrow 2} \cdot (\varepsilon_2 \cdot A_{2int} \cdot \sigma \cdot T_{2int}^4 + \rho_2 \cdot (\dot{Q}_{R,22} + \dot{Q}_{R,12})) \quad (4.7)$$

$$\dot{Q}_{R,3A} = F_{3A} \cdot (\varepsilon_3 \cdot A_{3ext} \cdot \sigma \cdot T_{3ext}^4) \quad (4.8)$$

$$\dot{Q}_{C,3A} = \frac{k_{aire}}{LC} \cdot \left(2 + \frac{0,589 \cdot Ra_D^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0,469}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{4/9}} \right) \cdot A_{3ext} \cdot (T_{3ext} - T_{amb}) \quad (4.9)$$

En donde Pr y Ra_D se obtienen utilizando las ecuaciones (2.18), (2.19), (2.20) y (2.21), resultando:

$$Pr = \frac{\mu_{aire} \cdot c_{p\ aire}}{k_{aire}} \quad (4.10)$$

$$Ra_D = \left(\frac{g \cdot \beta_{aire} \cdot (T_{3ext} - T_{amb}) \cdot (2 \cdot r_{3ext})^3}{\nu_{aire}^2} \right) \cdot Pr \quad (4.11)$$

Las propiedades utilizadas en las ecuaciones antes mencionadas se resumen en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Propiedades utilizadas en el sistema térmico del receptor, obtenidas de [18].

Propiedad	Magnitud	Unidad
T_{amb}	15	[°C]
k_{aire}	0,02735	$\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
g	9,8	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
β_{aire}	$3,67 \cdot 10^{-3}$	$\left[\frac{1}{K}\right]$
μ_{aire}	$1,963 \cdot 10^{-5}$	$\left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$
$c_{p\ aire}$	1007	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$
ρ_{aire}	1,092	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
ν_{aire}	$\frac{\mu_{aire}}{\rho_{aire}} = 1,798 \cdot 10^{-5}$	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$

Las propiedades del aire de la Tabla 4.5 fueron obtenidas de [18] y evaluadas a una temperatura de 50°C.

Para el cálculo de los factores de forma se prosigue de la siguiente manera: dada la geometría del material cerámico (esférico) se asume que 1 emite en igual medida en todas direcciones. En consecuencia, la fracción de radiación que 2 recibe de 1 tiene relación con su superficie interior versus la superficie de apertura interior del receptor. Esto queda representado en la ecuación (4.12):

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r_2^2 - A_{apint}}{4 \cdot \pi \cdot r_2^2} \quad (4.12)$$

Como 1 solo emite hacia 2 y hacia el ambiente, $F_{1 \rightarrow A}$ queda determinado por la ecuación (4.13):

$$F_{1 \rightarrow A} = 1 - F_{1 \rightarrow 2} \quad (4.13)$$

Utilizando la ecuación (2.26) se puede obtener $F_{2 \rightarrow 1}$ utilizando (4.12), como lo expresa la ecuación (4.14):

$$F_{2 \rightarrow 1} = \frac{F_{1 \rightarrow 2} \cdot A_1}{A_{2int}} \quad (4.14)$$

Por otro lado, 2 emite hacia 1, hacia el ambiente y hacia sí mismo. El restante de lo que emite 2, descontando lo que emite hacia 1, y debido a su geometría, se distribuye entre 2 y el ambiente en la razón de sus áreas. Esto se refleja en las ecuaciones (4.15) y (4.16):

$$F_{2 \rightarrow A} = (1 - F_{2 \rightarrow 1}) \frac{A_{apint}}{A_{apint} + A_{2int}} \quad (4.15)$$

$$F_{2 \rightarrow 2} = 1 - (F_{2 \rightarrow 1} + F_{2 \rightarrow A}) \quad (4.16)$$

Por último, la superficie exterior de 3 emite hacia el ambiente, por lo tanto:

$$F_{3 \rightarrow A} = 1 \quad (4.17)$$

Para A_{apint} y para A_{apext} se debe utilizar la ecuación (4.18) que representa el área de una porción curva de un casquete esférico, como se representa en la Figura 4.8.

$$A_c = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad (4.18)$$

En donde A_c representa el área de la porción del casquete curvo, r el radio del casquete y h la altura de la porción del casquete curvo.

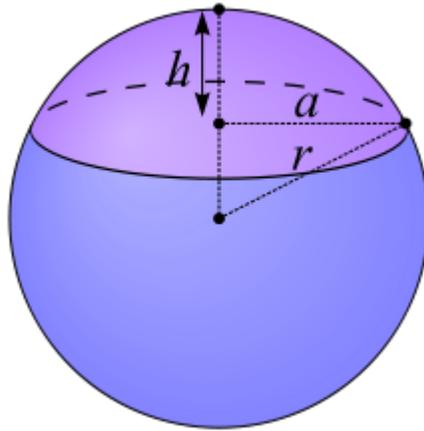


Figura 4.8: Porción curva de un casquete esférico.

Con ello:

$$A_{apint} = 2 \cdot \pi \cdot r_{2int} \cdot h_{apint} \quad (4.19)$$

$$A_{apext} = 2 \cdot \pi \cdot r_{3ext} \cdot h_{apext} \quad (4.20)$$

En donde:

$$h_{apint} = r_{2int} - \sqrt{r_{2int}^2 - r_{apint}^2} \quad (4.21)$$

$$h_{apext} = r_{3ext} - \sqrt{r_{3ext}^2 - r_{apext}^2} \quad (4.22)$$

Para el resto de las áreas se tiene:

$$A_1 = 4 \cdot \pi \cdot r_1^2 \quad (4.23)$$

$$A_2 = 4 \cdot \pi \cdot r_2^2 - A_{apint} \quad (4.24)$$

$$A_3 = 4 \cdot \pi \cdot r_3^2 - A_{apext} \quad (4.25)$$

Definiendo los parámetros del receptor r_1 , r_{2int} , e_2 , e_3 , r_{apint} y r_{apext} , definiendo $T_1 = 1500^\circ\text{C}$ (temperatura objetivo del horno) y considerando las ecuaciones (4.1) y (4.2) se tiene un sistema de 2 ecuaciones y 3 incógnitas (T_{2int} , T_{3ext} y $\dot{Q}_{R,CSP1}$). Es necesario entonces incluir una tercera ecuación a nuestro sistema. Esta hace relación a que todo el calor que llega a una superficie debe salir por esa misma superficie. Considerando la superficie exterior de aislante (3) se obtiene la ecuación (4.26):

$$\dot{Q}_{Cond,2int3ext} = \dot{Q}_{R,3A} + \dot{Q}_{C,3A} \quad (4.26)$$

Utilizando (2.13):

$$\dot{Q}_{Cond,2int3ext} = \frac{(T_{2int} - T_{3ext})}{R_{eq2int3ext}} \quad (4.27)$$

En donde se utiliza (2.15) para obtener (4.28):

$$R_{eq2int3ext} = \frac{r_{2ext} - r_{2int}}{4 \cdot \pi \cdot r_{2ext} \cdot r_{2int} \cdot k_2} + \frac{r_{3ext} - r_{2ext}}{4 \cdot \pi \cdot r_{2ext} \cdot r_{3ext} \cdot k_3} \quad (4.28)$$

Así, el sistema térmico se transforma en un sistema de tres ecuaciones y tres incógnitas. Como el lector puede apreciar, el sistema no es lineal, tiene recursividad entre sus variables y, por lo tanto, es de difícil resolución. Es por ello que para resolverlo se utiliza el programa Maple 2016. El código utilizado se encuentra en el Anexo A.

Finalmente resulta de interés obtener T_{2ext} . Para obtener dicha temperatura se hace un análisis calórico sobre la superficie exterior de 2 (la misma que la interior de 3). Como la transferencia de calor por conducción dentro de las paredes debe ser constante se obtiene la ecuación (4.29):

$$\dot{Q}_{Cond,2int3ext} = \dot{Q}_{Cond,2ext3ext} \quad (4.29)$$

Finalmente utilizando (2.13) obtiene la ecuación (4.30):

$$\dot{Q}_{Cond,2ext3ext} = \frac{(T_{2ext} - T_{3ext})}{R_{eq2ext3ext}} \quad (4.30)$$

Y para obtener $R_{eq2ext3ext}$ se utiliza (2.14), consiguiéndose (4.31):

$$R_{eq2ext3ext} = \frac{r_{3ext} - r_{2ext}}{4 \cdot \pi \cdot r_{2ext} \cdot r_{3ext} \cdot k_3} \quad (4.31)$$

Finalmente, de la ecuación (4.31) se puede despejar T_{2ext} y así obtener todas las temperaturas y transferencias de calor dentro del receptor.

4.4 Parámetros independientes del receptor

Al hacer un análisis de cada uno de los parámetros del receptor se identifican cuáles son dependientes e independientes. Los parámetros dependientes hacen noción a los que dependen de la geometría del concentrador, mientras que los independientes no.

Parámetros independientes: los parámetros independientes del receptor respecto del concentrador son r_{2int} , e_2 y e_3 , ya que ni uno de ellos se ve afectado con un cambio en la geometría del concentrador.

Parámetros dependientes: los parámetros del receptor que sí dependen de la geometría del concentrador son r_1 , r_{apint} y r_{apext} . En el caso de r_1 , este no puede ser más pequeño que la zona de concentración propia del concentrador, por lo que, con una determinada configuración del concentrador, se obtiene una cota inferior para r_1 . Dicha zona depende de la geometría del concentrador.

Habiendo obtenido r_1 , se pueden determinar r_{apint} y r_{apext} . El cálculo de ellos depende de r_1 (que de por sí depende del concentrador) y de la geometría del mismo concentrador. La distancia focal y la apertura superior del concentrador son los parámetros geométricos del concentrador que afectan los valores de r_{apint} y r_{apext} .

Habiendo identificado los parámetros del receptor que no dependen del concentrador, se les realiza un análisis de sensibilidad para obtener los valores óptimos que minimicen el calor necesario para alcanzar la temperatura objetivo. Para llevar a cabo dicho análisis de sensibilidad se selecciona uno de los parámetros, y se corre el modelo con diferentes valores de dicha variable, dejando el resto de los parámetros constantes.

Como se menciona en la sección anterior, el modelo se corre de manera de imponer que $T_1 = 1500^\circ\text{C}$, que es la temperatura superior fijada en los objetivos. Es importante destacar que, si bien se impone que la temperatura en la zona focal cerámica sea igual a la temperatura objetivo, es importante considerar el resto de las temperaturas. Si la temperatura en la pared interior del refractario es muy baja, entonces el ambiente de la zona útil del receptor no llegará a las temperaturas que se busca, y el cumplimiento del objetivo de la memoria se cumpliría de manera parcial.

El primer parámetro al cual se le realiza un análisis de sensibilidad es r_{2int} . Los valores fijados para el resto de los parámetros son: $r_1 = 5 [cm]$, $e_2 = 30 [cm]$, $e_3 = 8 [cm]$, $r_{apint} = 8 [cm]$ y $r_{apext} = 12 [cm]$. Por su parte, r_{2int} se hace variar entre 10 – 50 [cm]. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.9. En el gráfico superior de la Figura 4.9 se muestra el comportamiento de las temperaturas de interés, mientras que en el grafico inferior se aprecia el comportamiento de las diferentes formas de transferencia de calor presentes en el sistema.

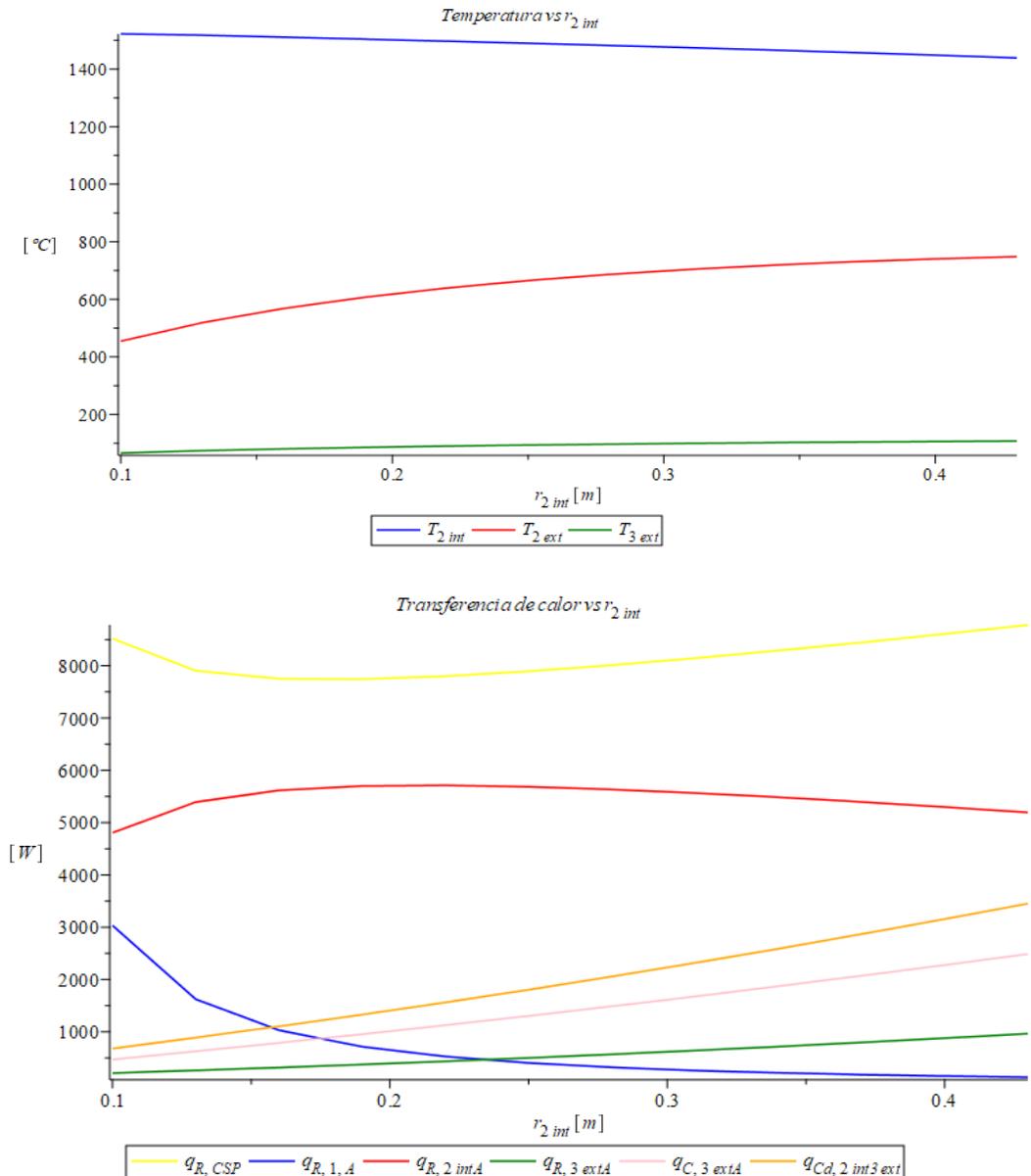


Figura 4.9: Resultados obtenidos para el análisis de sensibilidad del parámetro r_{2int} .

En la Figura 4.9 se puede apreciar que T_{2int} varía de forma creciente con un aumento en r_{2int} , mientras que T_{2int} y T_{3ext} no muestran una variación significativa. En cuanto al calor

demandado por el sistema ($\dot{Q}_{R,CSP1}$), este en un principio decrece, llegando a un mínimo, para luego crecer de forma mantenida.

En cuanto a la variación de $\dot{Q}_{R,CSP1}$, esta se explica debido a que cuando r_{2int} es muy pequeño el valor de $F_{1 \rightarrow A}$ es grande. A medida que r_{2int} crece, y manteniendo r_{apint} constante, el valor de $F_{1 \rightarrow A}$ disminuye, por lo que existen menos pérdidas hacia el ambiente, lo que se traduce en que el sistema requiere menos energía para alcanzar la temperatura deseada en la zona focal cerámica. Por otro lado, al aumentar r_{2int} el sistema se hace más grande, las áreas A_{2int} y A_{3ext} aumentan y por lo tanto las pérdidas de calor hacia el ambiente aumentan de manera proporcional. La combinación de ambos fenómenos mencionados trae como consecuencia el comportamiento de $\dot{Q}_{R,CSP1}$, el cual alcanza un mínimo.

El mínimo encontrado para r_{2int} es en $r_{2int} = 20 [cm]$, el cual es un valor que genera una zona útil razonable. Es por ello que se selecciona dicho valor para el parámetro r_{2int} .

Para el parámetro e_2 se utilizan los valores de: $r_1 = 5 [cm]$, $r_{2int} = 20 [cm]$, $e_3 = 8 [cm]$, $r_{apint} = 8 [cm]$ y $r_{apext} = 12 [cm]$. Por su parte, e_2 se hace variar entre $5 - 50 [cm]$. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.10.

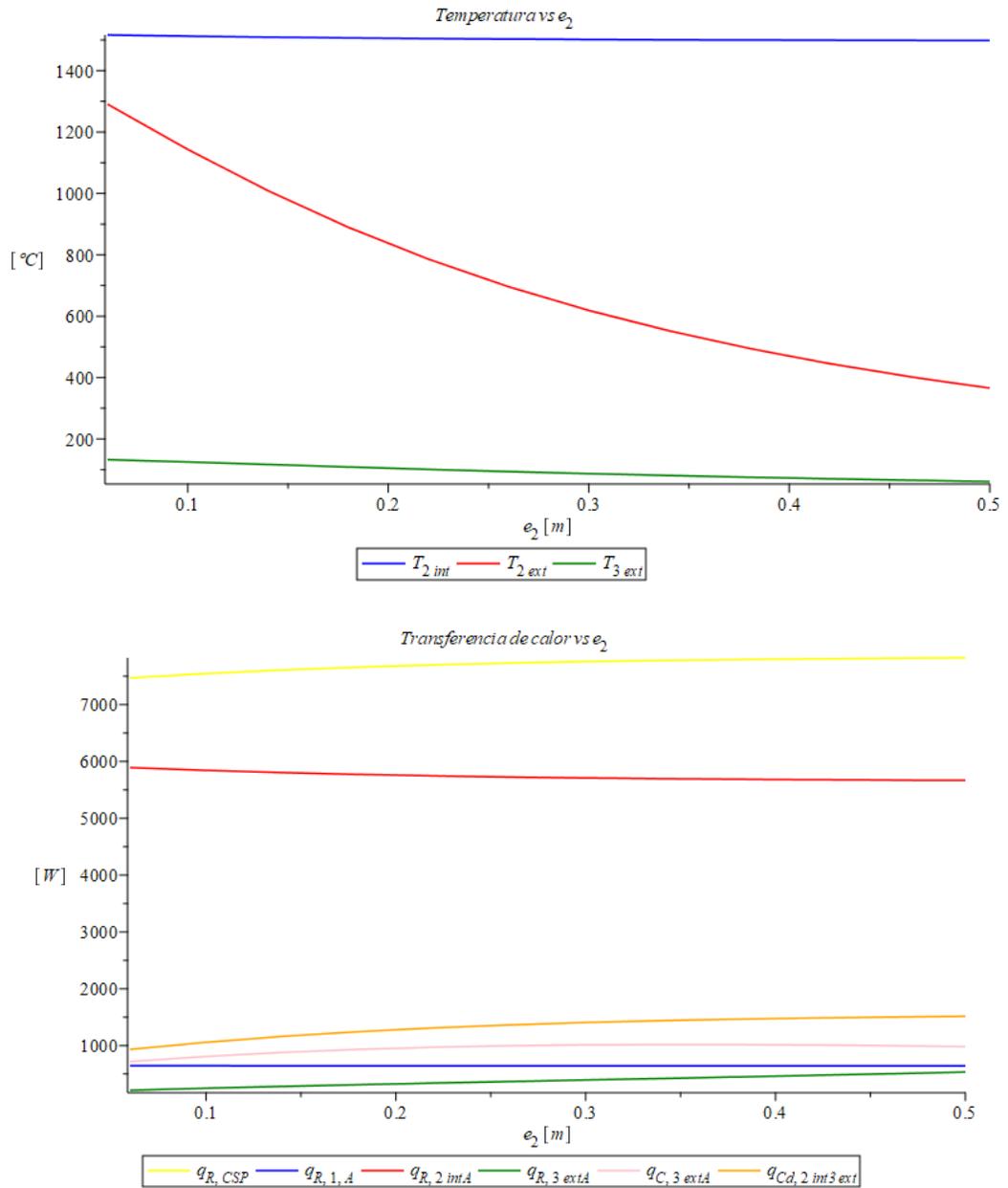


Figura 4.10: Resultados obtenidos para el análisis de sensibilidad del parámetro e_2 .

En la Figura 4.10 se aprecia una drástica disminución de T_{2ext} con el aumento en e_2 , mientras que T_{2int} y T_{3ext} no muestran una variación significativa. En cuanto al calor demandado por el sistema ($\dot{Q}_{R,CSP1}$), este se comporta de manera creciente.

En cuanto a la variación de $\dot{Q}_{R,CSP1}$, esta hace relación a que a medida que aumenta e_2 aumenta consigo el área exterior de A_{3ext} , por lo que aumentan las pérdidas de dicha superficie ($\dot{Q}_{R,3A}$ y $\dot{Q}_{C,3A}$). Por otro lado, al aumentar e_2 aumenta la resistencia térmica entre la pared interior y la pared exterior de la capa refractaria, por lo que la temperatura exterior de dicha capa (T_{2ext}) disminuye considerablemente.

Evidentemente se desea requerir el menor calor posible ($\dot{Q}_{R,CSP1}$) para mantener el sistema con la zona focal cerámica a la temperatura objetivo, pero por otro lado no se debe sobrepasar la temperatura máxima de trabajo del aislante en la pared exterior de la capa refractaria (T_{2ext}). Según el proveedor, la lana mineral escogida posee una temperatura de trabajo máxima cercana a los 800°C [21]. Por lo tanto, y como medida de seguridad, se escoge $e_2 = 30$ [cm], valor con el cual se obtiene T_{2ext} cercano a los 600°C .

Finalmente, para el parámetro e_3 se utilizan los valores de: $r_1 = 5$ [cm], $r_{2int} = 20$ [cm], $e_2 = 30$ [cm], $r_{apint} = 8$ [cm] y $r_{apext} = 12$ [cm]. Por su parte, e_2 se hace variar entre 2 – 19 [cm]. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.11.

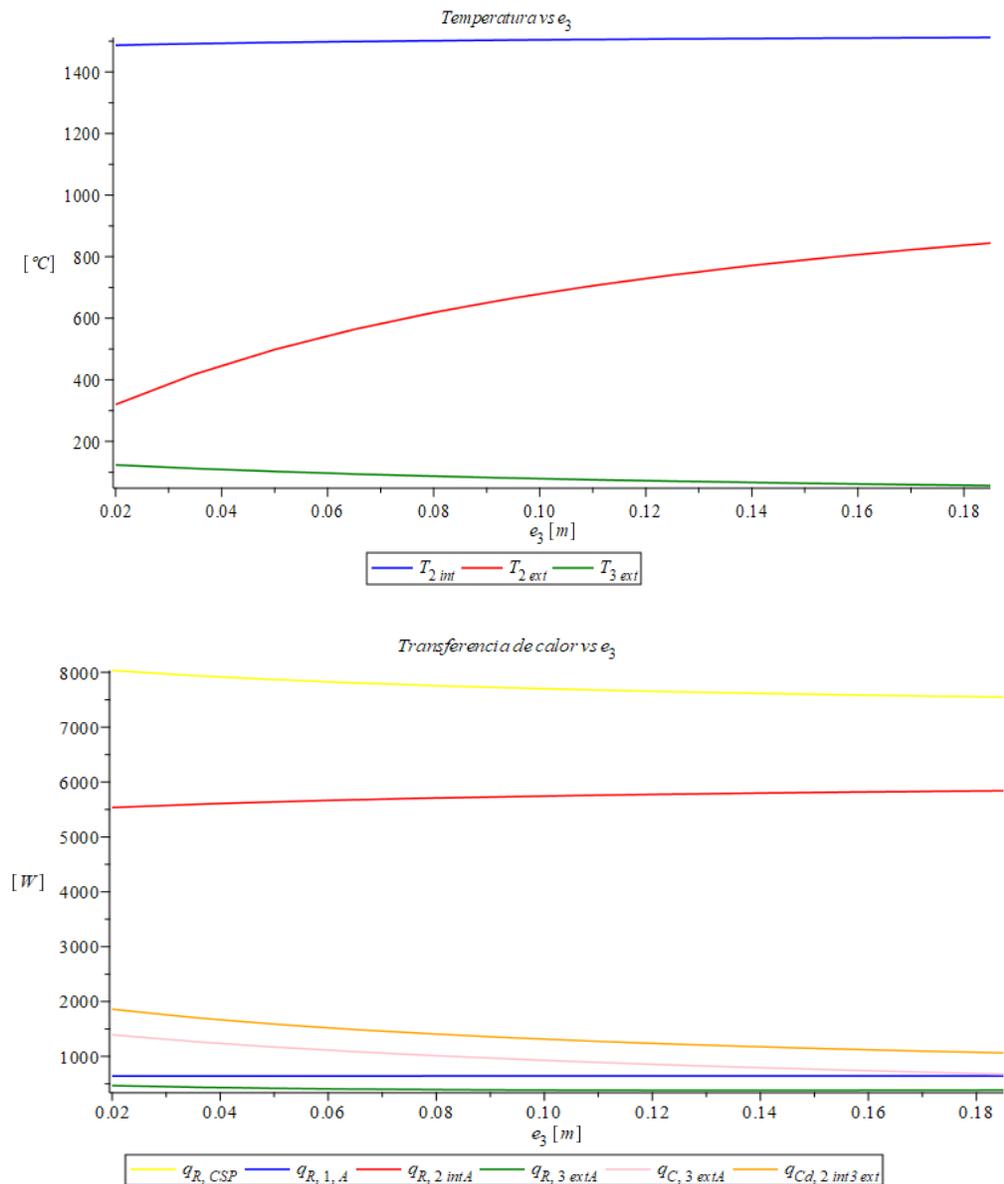


Figura 4.11: Resultados obtenidos para el análisis de sensibilidad del parámetro e_3 .

En la Figura 4.11 se aprecia un drástico aumento de T_{2int} con el aumento en e_2 , mientras que T_{2int} no muestra una variación significativa. Por su parte T_{3ext} , se comporta de manera decreciente. En cuanto al calor demandado por el sistema ($\dot{Q}_{R,CSP1}$), este se comporta de manera decreciente.

En cuanto a la variación de $\dot{Q}_{R,CSP1}$, esta hace relación a que a medida que aumenta e_3 aumenta consigo la aislación del sistema, por lo que disminuyen la mayoría de las pérdidas. Con el aumento de e_2 aumenta también $R_{eq2int3ext}$, lo que trae consigo el aumento de T_{2ext} y el decrecimiento de T_{3ext} .

Al igual que el análisis realizado con e_3 , se selecciona $e_3 = 8 [cm]$, de manera de obtener las menores pérdidas posibles y no superar los $600^\circ C$ en T_{2ext} .

Finalmente se hace un análisis de sensibilidad de las variables dependientes. Es importante volver a destacar que estas variables no se pueden definir a priori, si no que los parámetros de concentrador son los que definen sus valores. Aun así, resulta interesante ver cómo se comporta el sistema ante variaciones en dichos parámetros.

Para el análisis de sensibilidad de r_1 se utilizan los valores de: $e_3 = 8 [cm]$, $r_{2int} = 20 [cm]$, $e_2 = 30 [cm]$, $r_{apint} = 8 [cm]$ y $r_{apext} = 12 [cm]$. Por su parte, e_1 se hace variar entre $2 - 13 [cm]$. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.12.

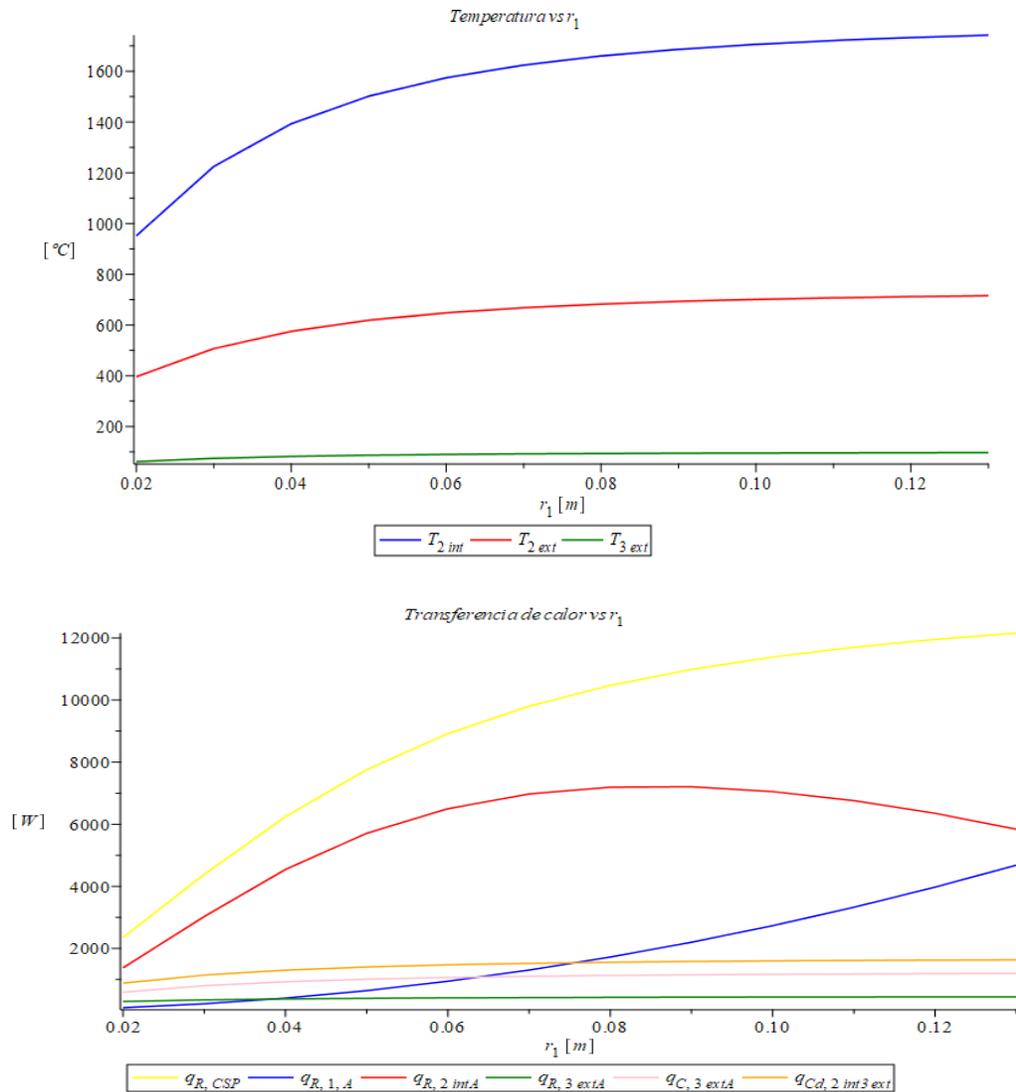


Figura 4.12: Resultados obtenidos para el análisis de sensibilidad del parámetro r_1 .

De la Figura 4.12 es evidente notar la fuerte sensibilidad del sistema respecto al parámetro r_1 . Al aumentar dicho parámetro aumentan todas las temperaturas del sistema, así como también aumentan todas las transferencias de calor.

El comportamiento del sistema ante la variación del parámetro r_1 se explica de la siguiente forma: al r_1 ser muy pequeño, la fuente que entrega calor al receptor, es decir, el material cerámico, es muy débil. Por lo tanto, el sistema no es capaz de alcanzar temperaturas interesantes. A medida que r_1 aumenta, también crece el calor que este es capaz de entregar al entorno, ya sea al resto del receptor como al ambiente. Debido a la fuerte sensibilidad del sistema respecto del parámetro r_1 , es que es vital definirlo de buena manera, es decir, que no sea ni muy pequeño ni mu grande.

Para el análisis de sensibilidad de r_{apint} se utilizan los valores de: $e_3 = 8$ [cm], $r_{2int} = 20$ [cm], $e_2 = 30$ [cm], $r_1 = 5$ [cm] y $r_{apext} = 12$ [cm]. Por su parte, r_{apint} se hace variar entre 3 – 14 [cm]. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.13.

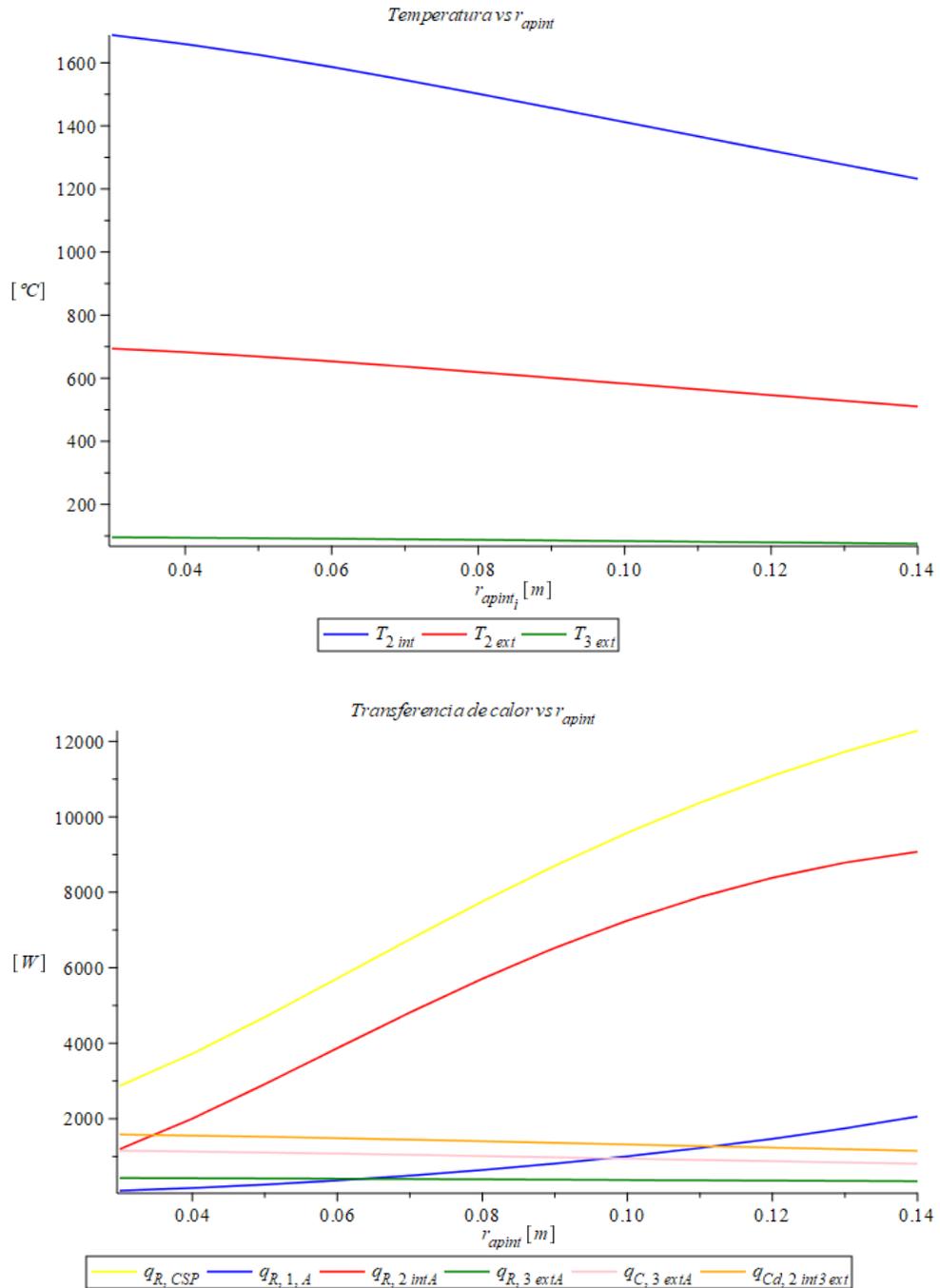


Figura 4.13: Resultados obtenidos para el análisis de sensibilidad del parámetro r_{apint} .

De la Figura 4.13 se puede apreciar, al igual que para el análisis de r_1 , que el sistema es muy sensible al parámetro r_{apint} . Todas las temperaturas decrecen con un aumento en r_{apint} ,

mientras que las pérdidas térmicas por radiación desde el interior del receptor hacia el ambiente aumentan. Como consecuencia, $\dot{Q}_{R,CSP1}$ aumenta bruscamente con el crecimiento de r_{apint} .

El comportamiento del parámetro r_{apint} se entiende de la siguiente forma: a medida que r_{apint} aumenta, también crece $F_{1 \rightarrow A}$ y $F_{2int \rightarrow A}$. En consecuencia, las pérdidas $\dot{Q}_{R,1A}$ y $\dot{Q}_{R,2A}$ aumentan, y con ello se requiere de un mayor $\dot{Q}_{R,CSP1}$ para mantener la temperatura objetivo en el material cerámico. A su vez, como las pérdidas aumentan, ello trae consigo un decrecimiento en todas las restantes temperaturas del sistema.

Teniendo en cuenta el análisis de sensibilidad de r_{apint} , uno quisiera que este parámetro agarrara el menor valor posible, pero se debe tener en cuenta que si el valor es muy pequeño, podría no estar llegando toda la radiación proveniente del concentrador a la zona focal cerámica. Esto implicaría una disminución en $\dot{Q}_{R,CSP1}$, y como consecuencia una disminución en todas las temperaturas del sistema. Entonces, se debe escoger el menor r_{apint} posible de manera de no interferir mayormente con el calor incidente en el material cerámico.

Para el análisis de sensibilidad de r_{apext} se utilizan los valores de: $e_3 = 8 [cm]$, $r_{2int} = 20 [cm]$, $e_2 = 30 [cm]$, $r_1 = 5 [cm]$ y $r_{apint} = 8 [cm]$. Por su parte, r_{apext} se hace variar entre $6 - 17 [cm]$. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.14.

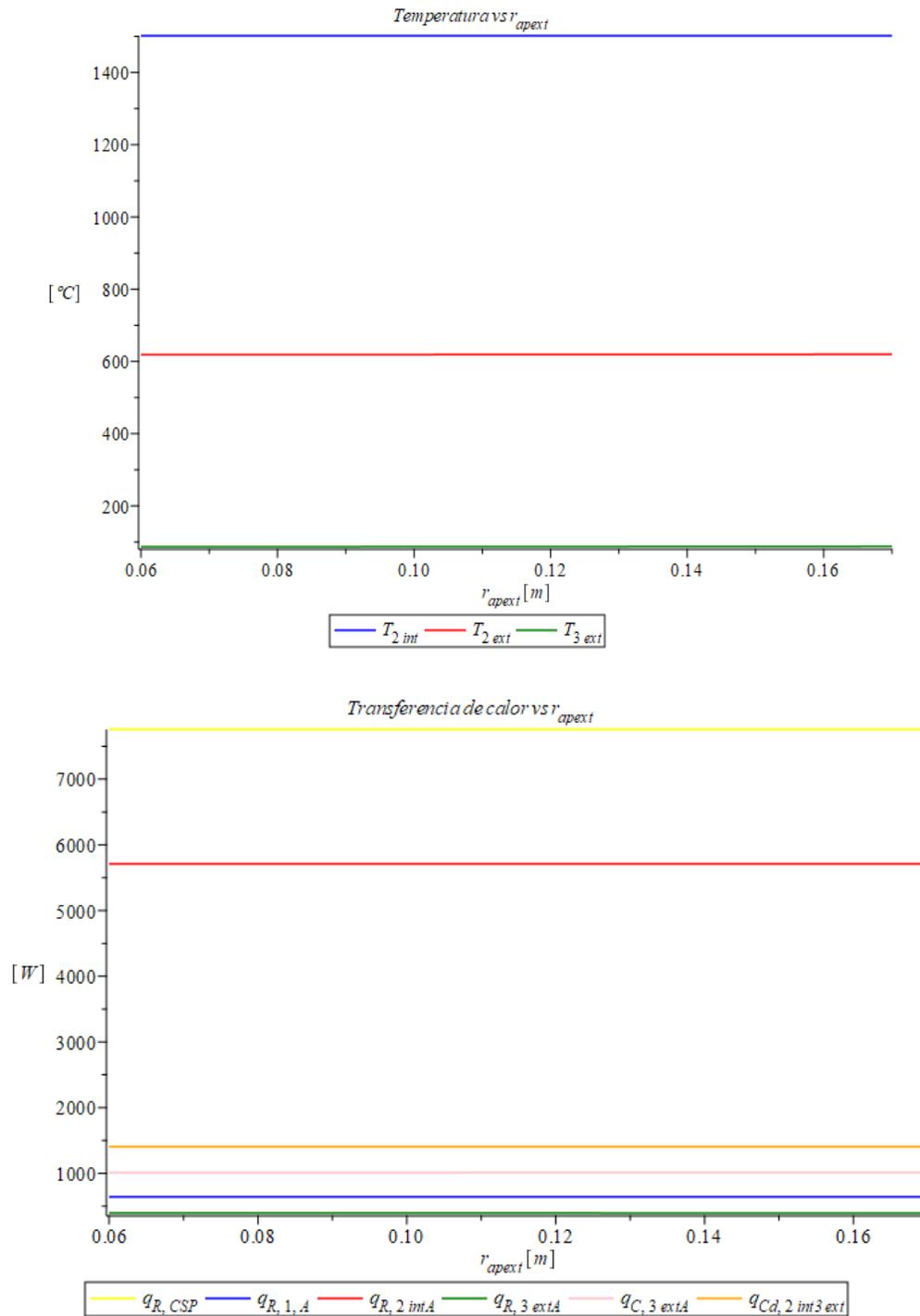


Figura 4.14: Resultados obtenidos para el análisis de sensibilidad del parámetro r_{apext} .

De la Figura 4.14 se puede apreciar que el sistema es casi indiferente a la variación de r_{apext} . Esto se explica debido a que las únicas transferencias de calor que dependen de dicho parámetro son $\dot{Q}_{R,3extA}$ y $\dot{Q}_{C,3extA}$, y ambas varían muy poco en el rango de valores utilizados en el análisis realizado.

Sin embargo, al igual que en el caso de r_{apint} , el valor de r_{apext} determina la radiación incidente sobre la zona focal cerámica, por lo que su valor debe ser elegido con cuidado, siguiendo las mismas consideraciones que se tiene para elegir r_{apint} .

4.5 Parámetros del concentrador

Para entender los parámetros que definen y caracterizan a un concentrador Scheffler, se presenta la Figura 4.15. Ella representa un concentrador Scheffler ubicado en una localidad con latitud $\varphi = \theta$, para un equinoccio, al mediodía solar.

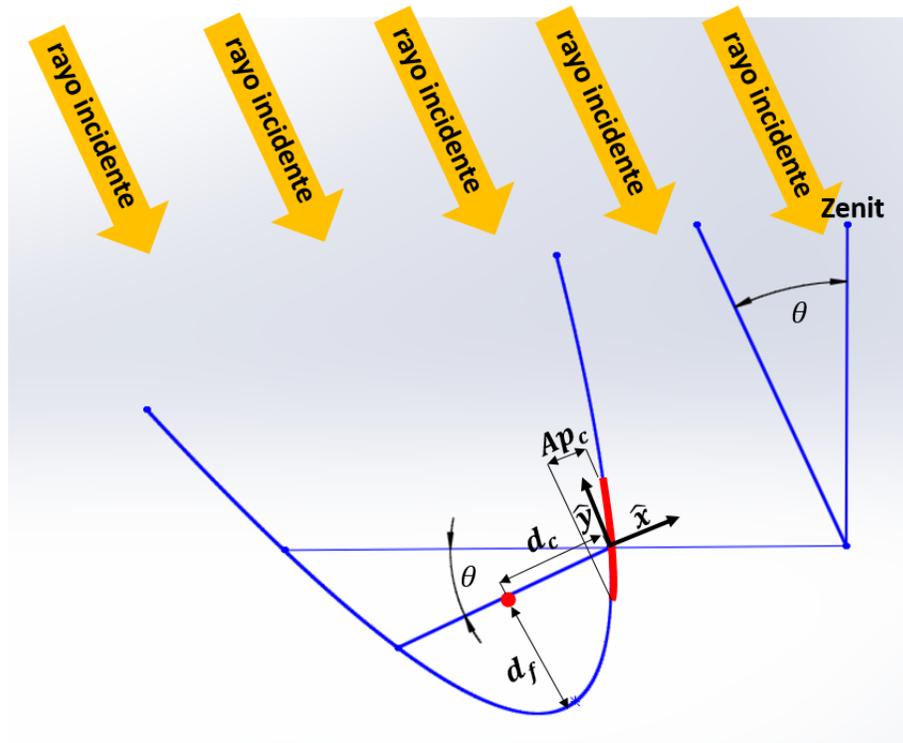


Figura 4.15: Parámetros de un concentrador Scheffler para un día de equinoccio.

En primera instancia se analizará el caso puntual descrito en la Figura 4.15 (día de equinoccio al mediodía solar), y luego se ampliará para los diferentes meses del año y horas del día.

De la Figura 4.15, se puede apreciar que los parámetros que definen al concentrador son la distancia focal del paraboloide de revolución (d_f), la distancia entre el concentrador (porción utilizada del paraboloide de revolución) y la zona focal (d_c), y la apertura superior del concentrador (Ap_c). Los vectores \hat{x} e \hat{y} definen el sistema de coordenadas del paraboloide de revolución, el cual posee una inclinación θ respecto del sistema de coordenadas globales.

En realidad d_f y d_c están relacionados y el determinar un valor para uno fija automáticamente el valor del otro. La Figura 4.16 ayuda a determinar dicha relación.

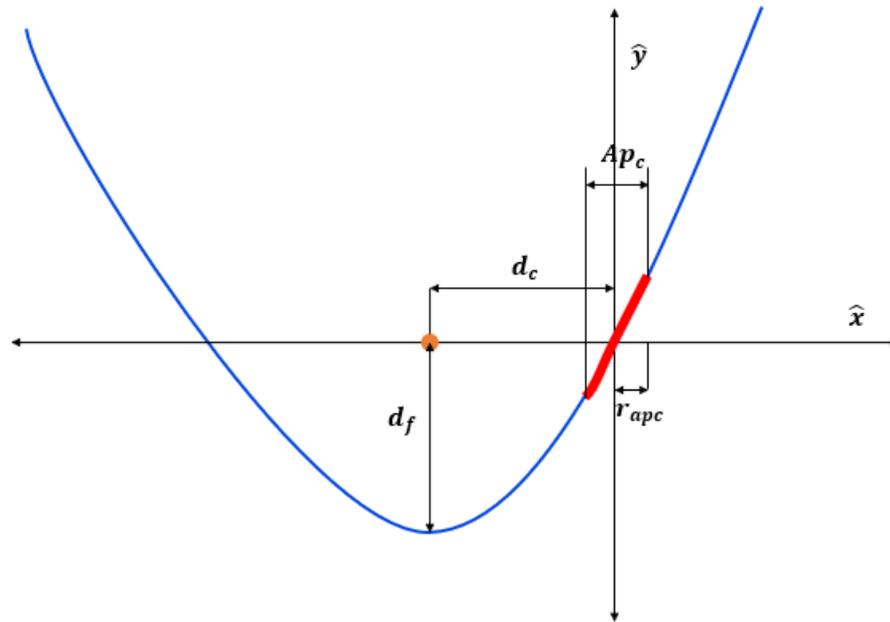


Figura 4.16: Relación entre los parámetros del concentrador.

De la Figura 4.16 se puede caracterizar la parábola de cada concentrador Scheffler. Basta notar que:

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (4.32)$$

$$f(x = 0) = 0 \quad (4.33)$$

$$f(x = -d_c) = -d_f \quad (4.34)$$

$$f(x = -2 \cdot d_c) = 0 \quad (4.35)$$

Por otro lado, el valor de la constante a se relaciona con d_f según la ecuación (4.36), la cual se cumple en todas las parábolas con eje vertical.

$$a = \frac{1}{4 \cdot d_f} \quad (4.36)$$

El valor de c se obtiene inmediatamente al resolver (4.33), con lo que se obtiene la ecuación (4.37):

$$c = 0 \quad (4.37)$$

Por último, para determinar el valor de a , b y d_f , se fija un valor para d_c y se resuelve el sistema de ecuaciones entre (4.34), (4.35) y (4.36) con ayuda de Maple 2016. El código utilizado se encuentra en el Anexo B, y se debe utilizar con un valor de $\delta = 0$.

Finalmente, y como se menciona en la sección Concentrador Scheffler, se establece que la apertura superior del concentrador Ap_c está definida por un círculo, el cual queda caracterizado mediante el parámetro r_{apc} .

Entonces, definiendo r_{apc} y d_c el concentrador Scheffler queda completamente definido.

Utilizando los valores optimizados para los parámetros independientes del receptor (encontrados en la sección anterior), y definiendo $r_1 = 5 [cm]$, $r_{apint} = 8 [cm]$ y $r_{apext} = 12 [cm]$ se obtiene que la potencia que el concentrador debe entregar al receptor ($\dot{Q}_{R,CSP1}$) para mantenerlo en equilibrio con $T_1 = 1500^\circ C$, es igual a $7756,8 [W]$.

Teniendo en cuenta la potencia necesaria del concentrador, se selecciona, para una primera iteración, $r_{apc} = 1,75 [m]$ y $d_c = 4 [m]$. Esto debido a que dicho r_{apc} genera una $Ap_c = 9,62 [m^2]$, la cual, considerando una radiación incidente igual a $800 \left[\frac{W}{m^2} \right]$, genera una potencia máxima de concentración de $7697 [W]$, bastante cercana a la requerida.

4.6 Parámetros dependientes del receptor

Con los parámetros bien definidos del concentrador, se puede estudiar la forma de concentración que este produce, y de esa manera fijar los valores dependientes del receptor. Pero antes de realizar dicho análisis se introduce un nuevo parámetro para en la geometría del receptor, el cual puede generar mejora en los resultados referidos a calor necesario para mantener el sistema con $T_1 = 1500^\circ C$.

El nuevo parámetro del receptor se denomina d_{r1} , y hace relación al desfase que tiene la zona focal cerámica (1) respecto del centro del sistema receptor. La Figura 4.17 esquematiza dicho parámetro.

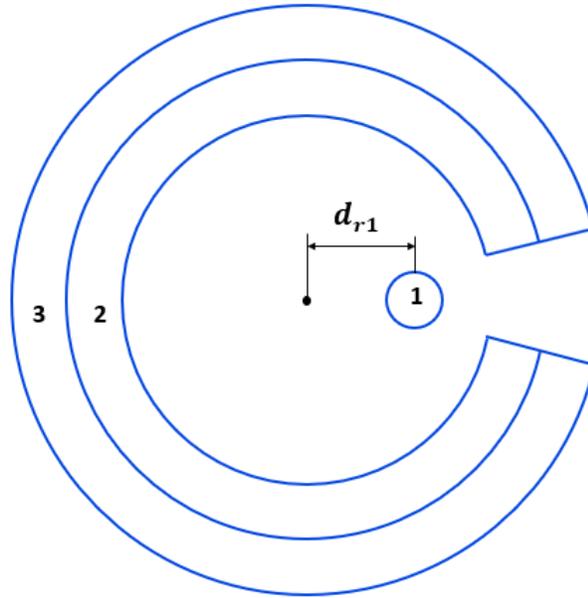


Figura 4.17: Parámetro d_{r1} del receptor.

El aumentar el valor del parámetro d_{r1} trae consigo el beneficio de disminuir los valores de r_{apint} y r_{apext} , como se esquematiza en la Figura 4.18. Al aumentar d_{r1} la zona focal se acerca al borde. En consecuencia, el triangulo que describe la zona focal y el concentrador se aleja del centro del receptor, produciendo que la apertura necesaria para que la radiación incidente llegue en su totalidad sea menor.

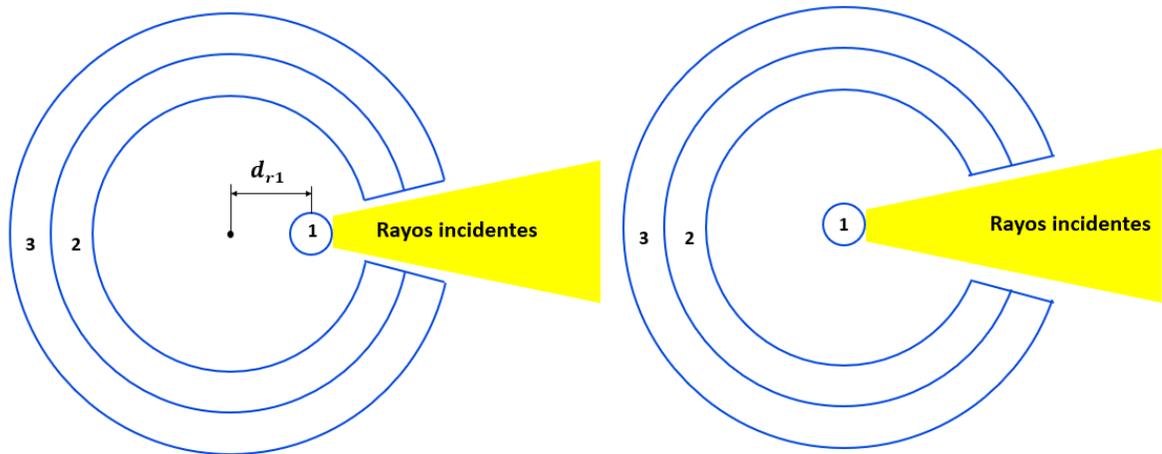


Figura 4.18: Variación de r_{apint} y r_{apext} al variar el parámetro d_{r1} .

Es importante destacar que si bien el aumento en el parámetro d_{r1} trae consigo la disminución en los valores de los parámetros r_{apint} y r_{apext} , también posee dos desventajas. En primer lugar, al crecer d_{r1} aumenta también el factor de forma entre la zona focal (1) y el ambiente

($F_{1 \rightarrow A}$). Esto, en consecuencia, genera que las pérdidas $\dot{Q}_{R,1A}$ sean mayores. Por lo tanto, se debe hacer un análisis de sensibilidad de dicho parámetro, ya que aumentarlo lo más posible no asegura que el calor requerido ($\dot{Q}_{R,CSP1}$) sea menor. Por otro lado, cuando d_{r1} es distinto de cero, se pierde la geometría concéntrica del receptor, y el supuesto de temperatura constante en las paredes deja de ser válido. Es por ello que el análisis de sensibilidad de d_{r1} solo se realiza para valores menores a 11 [cm].

Considerando el parámetro d_{r1} , el factor de forma $F_{1 \rightarrow A}$ queda descrito por la ecuación (4.38):

$$F_{1 \rightarrow A \text{ mod}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r_{2intmod}^2 - A_{apintmod}}{4 \cdot \pi \cdot r_{2intmod}^2} \quad (4.38)$$

En donde $F_{1 \rightarrow A \text{ mod}}$ representa el factor de forma entre la zona focal y el ambiente, considerando el parámetro d_{r1} , $A_{apintmod}$ el área de la porción del casquete esférico generado por r_{apint} y $r_{2intmod}$ el radio modificado para el calculo de $F_{1 \rightarrow A \text{ mod}}$ y $A_{apintmod}$.

Por su parte, $r_{2intmod}$ y $A_{apintmod}$ se calculan según las ecuaciones (4.39) y (4.40):

$$r_{2intmod} = r_{2int} - d_{r1} \quad (4.39)$$

$$A_{apintmod} = 2 \cdot \pi \cdot r_{2intmod} \cdot h_{apintmod} \quad (4.40)$$

Y $h_{apintmod}$ se obtiene de la ecuación (4.41):

$$h_{apintmod} = r_{2intmod} - \sqrt{r_{2intmod}^2 - r_{apint}^2} \quad (4.41)$$

Cabe mencionar que el nuevo parámetro incorporado (d_{r1}) es independiente del concentrador, pero que determina los valores r_{apint} y r_{apext} . Entonces esos últimos dos parámetros, serán dependientes de la geometría del concentrador y del nuevo parámetro d_{r1} .

Para poder determinar correctamente el parámetro r_1 , se utiliza el software SolTrace 2012.7.9, el cual simula la reflexión que tendrían los rayos (explicado en la sección Trazado de rayos) según la geometría del concentrador. Adicionalmente, dicho software nos entrega el factor amplificador (ϕ) en la zona focal. Finalmente, con dicho factor amplificador, a imponiendo un valor para la radiación directa incidente, se obtiene el flujo térmico en la zona focal.

Lo único que queda determinar es la posición del Sol, la cual es necesaria para poder correr las simulaciones en SolTrace. Teniendo en cuenta que la localidad de diseño es San Pedro de Atacama, y considerando un día de equinoccio al mediodía solar, utilizando las ecuaciones (2.6) y (2.7) se obtienen las ecuaciones (4.42) y (4.43):

$$h = 67,0891^\circ \quad (4.42)$$

$$\gamma = 0^\circ \quad (4.43)$$

La Figura 4.19 muestra una simulación realizada en SolTrace, en donde se utilizaron los parámetros antes señalados para el concentrador en una primera iteración, es decir, $r_{apc} = 1,75 [m]$ y $d_c = 4 [m]$.

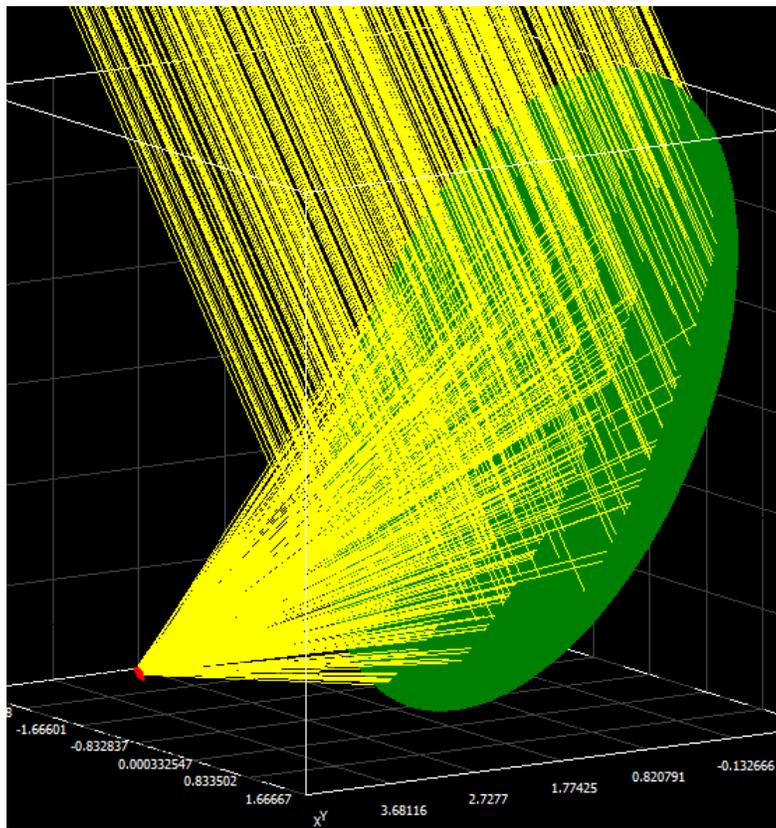


Figura 4.19: Trazado de rayos obtenidos con el modelo utilizado en la primera iteración en el software SolTrace.

La Figura 4.19 debe ser interpretada de la siguiente forma: las líneas amarillas representan los rayos provenientes del Sol. El cuerpo verde representa el concentrador, mientras que la superficie roja representa la zona focal del receptor. Como se simula para la localidad de San Pedro, el receptor se encuentra desplazado $22,9109^\circ$ por debajo de la horizontal, a la distancia d_c

indicada, y apuntando hacia el centro de dicho concentrador. Cabe mencionar que tanto en esta como en todas las simulaciones realizadas con SolTrace, el concentrador es representado por un paraboloide perfectamente continuo, descrito por su ecuación analítica.

Para llevar a cabo la simulación se utiliza la forma pillbox para el sol, y la simulación se realiza generando tres millones de rayos aleatorios. Para el concentrador se utiliza un material con coeficiente de reflexión $\rho = 0,9$.

Además de la interfaz que muestra la interacción de los rayos con los elementos del sistema, SolTrace entrega una gráfica de la radiación incidente en la zona focal. La Figura 4.20 muestra el gráfico generado por el software para la iteración inicial.

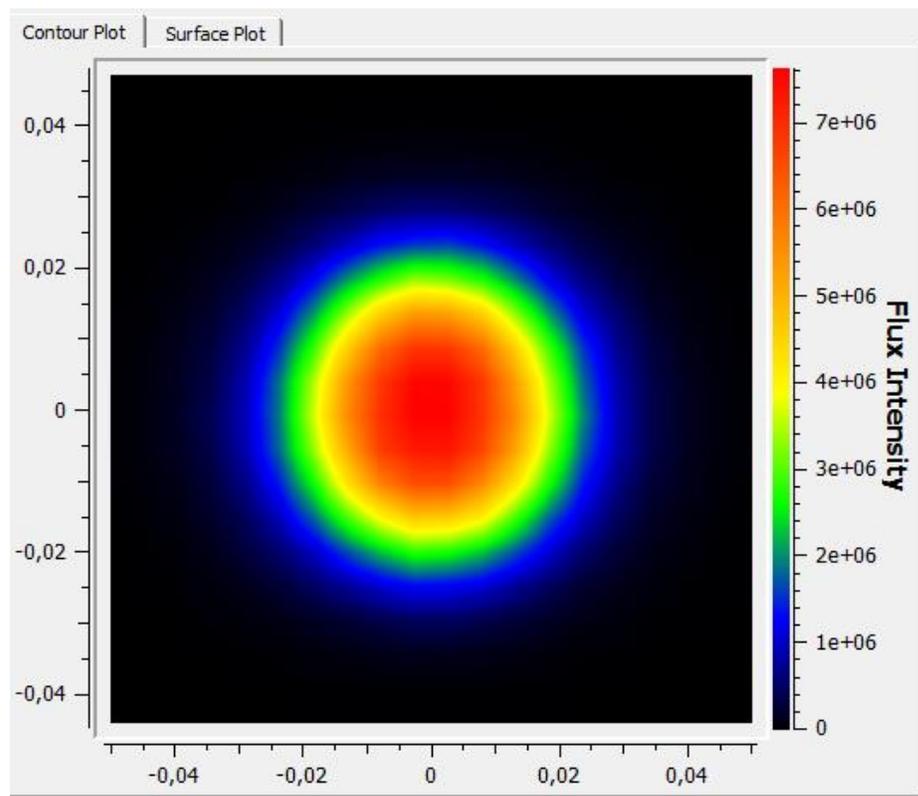


Figura 4.20: Flujo energético recibido en la zona focal, para la primera iteración.

Para determinar el valor mínimo que puede tomar r_1 , se debe determinar cuál es la zona de incidencia de la radiación en la zona focal. Como es intuitivo, la concentración es mayor en el centro de la zona focal y decrece hacia medida que uno se aleja de dicho centro. Este decrecimiento obedece a una distribución gaussiana, como lo representa la Figura 4.21, la cual también es obtenida del software.

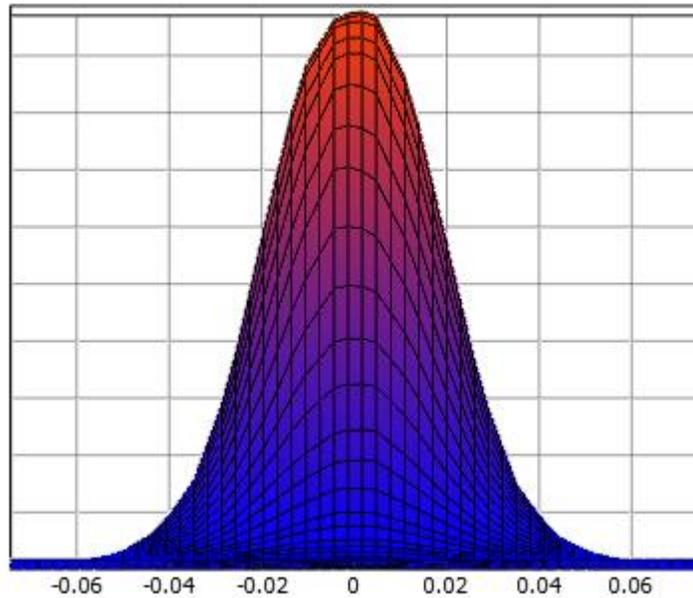


Figura 4.21: Forma gaussiana del flujo energético en la zona focal.

Si se quisiera tomar absolutamente toda la energía que refleja el concentrador, el valor de r_1 sería muy grande, y así también lo sería la pérdida $\dot{Q}_{R,1A}$, y por consiguiente, se necesitaría mucho calor para alimentar el sistema. Por otro lado, si se selecciona un valor de r_1 muy pequeño, aunque esto genere menores pérdidas $\dot{Q}_{R,1A}$, se estaría tomando solo una parte de la energía que el concentrador estaría reflejando. Es por esto que el determinar qué porcentaje de la energía reflejada por el concentrador es utilizada es un factor importante y de selección no intuitiva. Dicho de otro modo, determinar el valor de r_1 , y por ende el porcentaje utilizado de la energía proveniente del concentrador, debe ser realizado previo a un análisis de sensibilidad del parámetro r_1 .

Como SolTrace no posee una herramienta para determinar la concentración dado un determinado valor de r_1 , se crea un código en MatLab capaz de hacerlo. Entonces lo que se realiza es exportar los datos del software SolTrace a un archivo .txt y, posteriormente, éste es procesado en el código de MatLab. El código utilizado se presenta en el Anexo C y además de permitir encontrar el radio de incidencia r_1 , entrega el factor amplificador de sistema (ϕ). Este es igual a la potencia entregada por el programa cuando se utiliza una radiación normal incidente igual a $I_d = 1 \left[\frac{W}{m^2} \right]$.

La Figura 4.22 muestra algunas gráficas obtenidas mediante el código de MatLab. En las imágenes superiores se realizó un filtro con $r_1 = 4 [cm]$ y en las imágenes inferiores un filtro con $r_1 = 2 [cm]$.

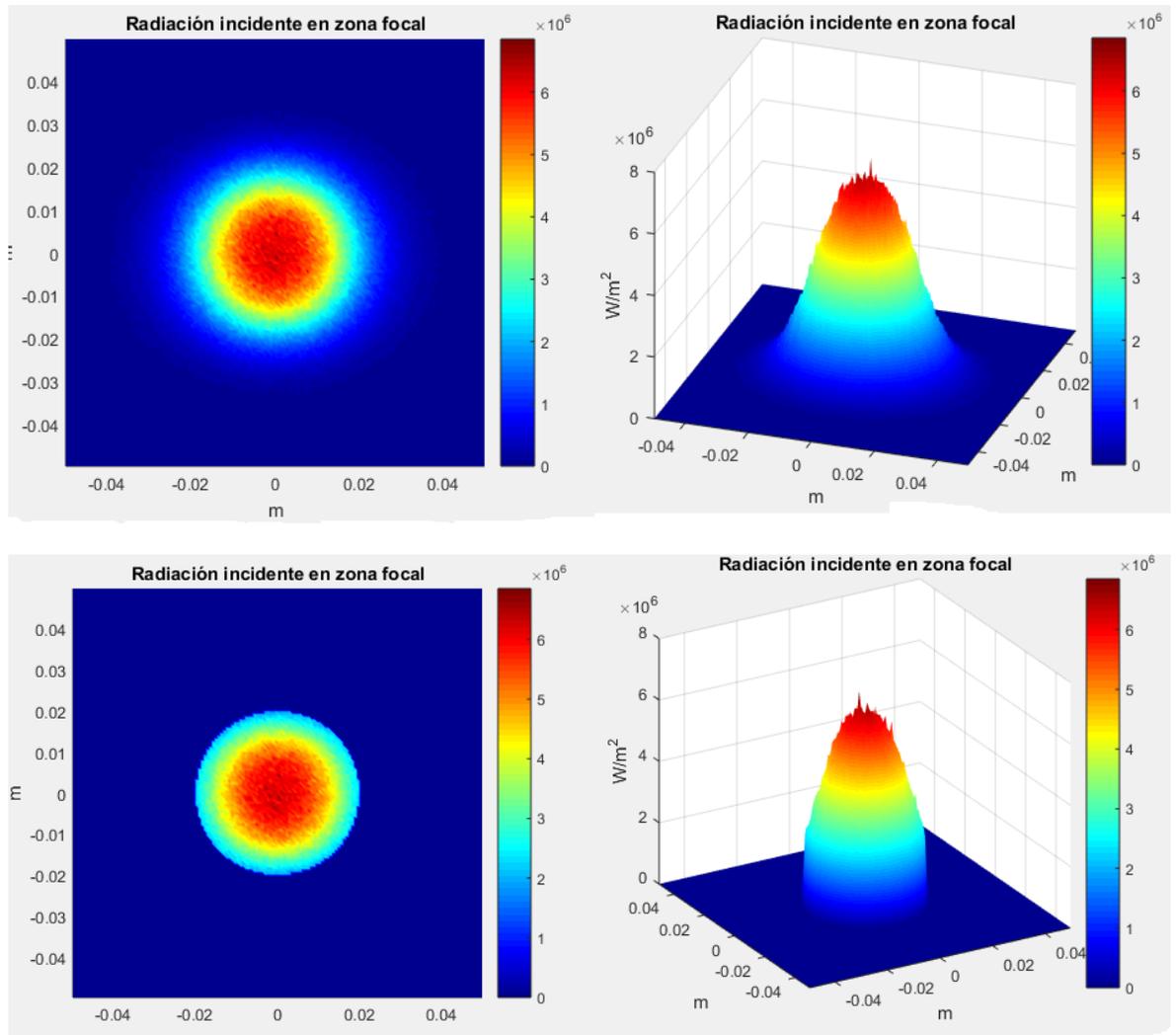


Figura 4.22: Gráficas para el filtro de r_1 en la zona focal, obtenidas mediante el código desarrollado en MatLab. Arriba $r_1 = 4$ [cm]. Abajo $r_1 = 2$ [cm].

Una vez que se haya determinado el valor de r_1 y dado los parámetros del concentrador, se pueden determinar tanto r_{apint} como r_{apext} . Estos se relacionan como se muestra en la Figura 4.23.

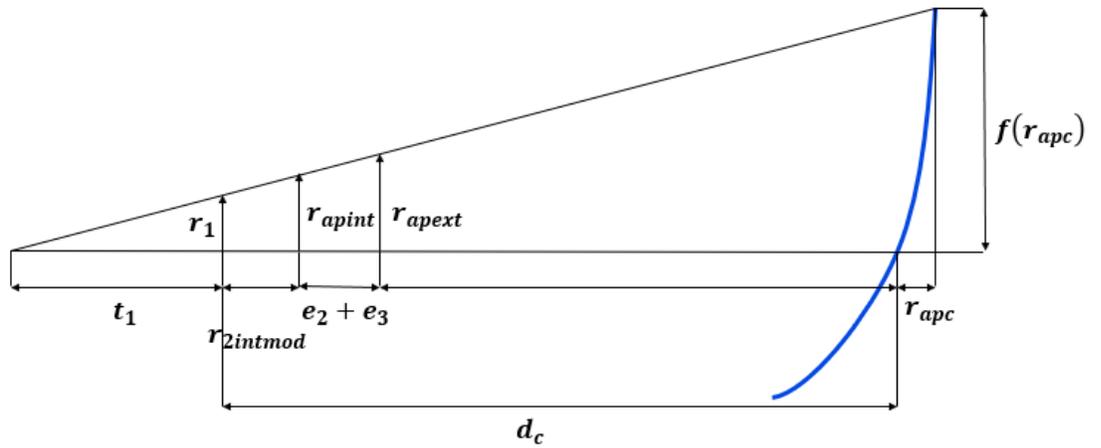


Figura 4.23: Relación geométrica entre r_1 , r_{apint} , r_{apext} , r_{apc} y d_c .

Para encontrar las relaciones de la Figura 4.23, se procede de la siguiente forma: lo primero que se debe hacer es determinar el valor del segmento que completa los triángulos (t_1). Una vez determinado dicho segmento, y por medio de proporcionalidad en triángulos congruentes, se obtiene los valores para r_{apint} y r_{apext} .

El valor de t se obtiene de la ecuación (4.44):

$$t_1 = \frac{(d_c + r_{apc}) \cdot r_1}{f(r_{apc}) - r_1} \quad (4.44)$$

Finalmente, los valores de r_{apint} y r_{apext} se obtienen de las ecuaciones (4.45) y (4.46) respectivamente:

$$r_{apint} = \frac{(t_1 + r_{2intmod}) \cdot f(r_{apc})}{(t_1 + d_c + r_{apc})} \quad (4.45)$$

$$r_{apext} = \frac{(t_1 + r_{2intmod} + e_2 + e_3) \cdot f(r_{apc})}{(t_1 + d_c + r_{apc})} \quad (4.46)$$

El subíndice 1 en t hace relación a que se está analizando los triángulos superiores formado entre r_1 y el concentrador. Podría darse el caso que en los triángulos inferiores arrojase valores mayores para r_{apint} y r_{apext} , y por lo tanto se debe analizar. La Figura 4.24 esquematiza los triángulos inferiores que se generan en la geometría r_1 -concentrador.

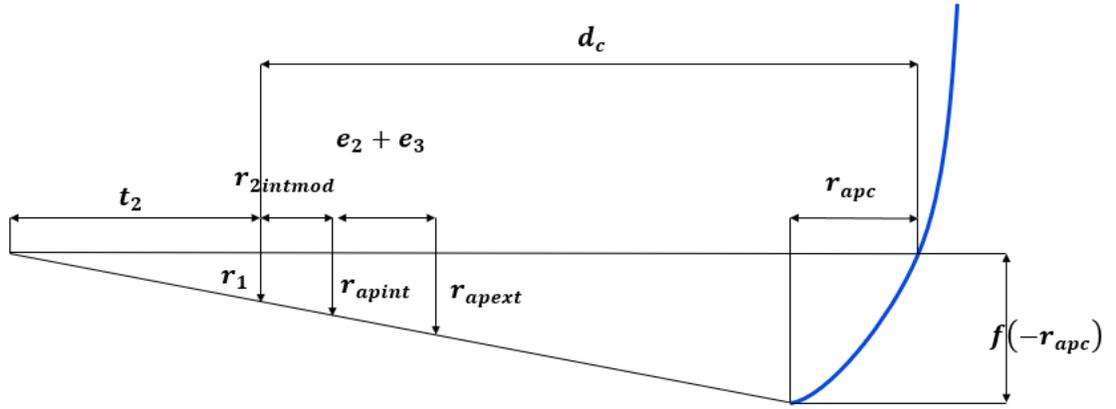


Figura 4.24: Relaciones geométricas de la parte inferior de la geometría r_1 -concentrador.

De la Figura 4.24, y siguiendo los mismos pasos realizados con la geometría superior, se llega a las ecuaciones (4.47), (4.48) y (4.49):

$$t_2 = \frac{(d_c - r_{apc}) \cdot r_1}{(-f(-r_{apc})) - r_1} \quad (4.47)$$

$$r_{apint} = \frac{(t_2 + r_{2intmod}) \cdot (-f(-r_{apc}))}{(t_2 + d_c - r_{apc})} \quad (4.48)$$

$$r_{apext} = \frac{(t_2 + r_{2intmod} + e_2 + e_3) \cdot (-f(-r_{apc}))}{(t_1 + d_c - r_{apc})} \quad (4.49)$$

De las ecuaciones anteriores, en una primera impresión, pareciera que siempre los valores encontrados en la geometría inferior fuesen más altos, pero se debe considerar que $f(r_{apc}) > -f(-r_{apc})$ siempre, debido a la geometría parabólica del concentrador Scheffler. Debido a dicha relación es que no se pudo determinar a priori cuál de las geometrías entregará los valores más altos. Dicho esto, es que siempre se deben verificar ambos resultados y elegir el mayor r_{apint} entre (4.45) y (4.48) y el mayor r_{apext} (4.46) y (4.49).

Entonces, definiendo todos los parámetros independientes del receptor, definiendo los parámetros del concentrador y determinando el porcentaje de energía incidente en la zona focal que se desea ocupar (determinada por el filtro que se escoja en r_1), el sistema térmico del receptor queda definido en su totalidad.

La resolución del sistema térmico entrega el valor $\dot{Q}_{R,CSP1}$ que el receptor demanda para mantener $T_1 = 1500^\circ\text{C}$. A su vez, entrega los valores del resto de las temperaturas de interés. Entonces, se puede comparar el valor del calor requerido versus el calor que el concentrador efectivamente está entregando a la zona focal. Para determinar este último, se obtiene el factor amplificador desde el programa desarrollado en MatLab (Anexo C) y se multiplica por una determinada radiación directa incidente. En este caso se utilizó un valor de DNI=800 [W/m²].

Es importante destacar que los sistemas de concentración son muy sensibles a las desalineaciones y pequeños errores en la construcción que generen diferencias entre la geometría construida y la teóricamente diseñada. Es por ello que como medida de mitigación, se realiza el siguiente procedimiento: los parámetros r_1 , r_{apint} y r_{apext} son obtenidos como se menciona anteriormente, pero a la hora de ingresarlos al modelo térmico, se les suma 1 [cm] a cada uno de ellos. Así, en caso de existir un pequeño desalineamiento entre el receptor y el concentrador, el sistema podría seguir captando la mayor parte de la radiación proveniente del concentrador.

En una primera instancia, se hace un análisis de sensibilidad en cuanto al parámetro d_{r1} y al porcentaje de utilización de la radiación que emana del concentrador. En cuanto a d_{r1} , este se hace variar entre $d_{r1} = 0 - 11$ [cm]. Para el porcentaje de utilización de la radiación se utilizan los valores de 95%, 85% y 75%.

El gráfico obtenido del análisis de sensibilidad de d_{r1} con un 85% de utilización, se presenta en la Figura 4.25.

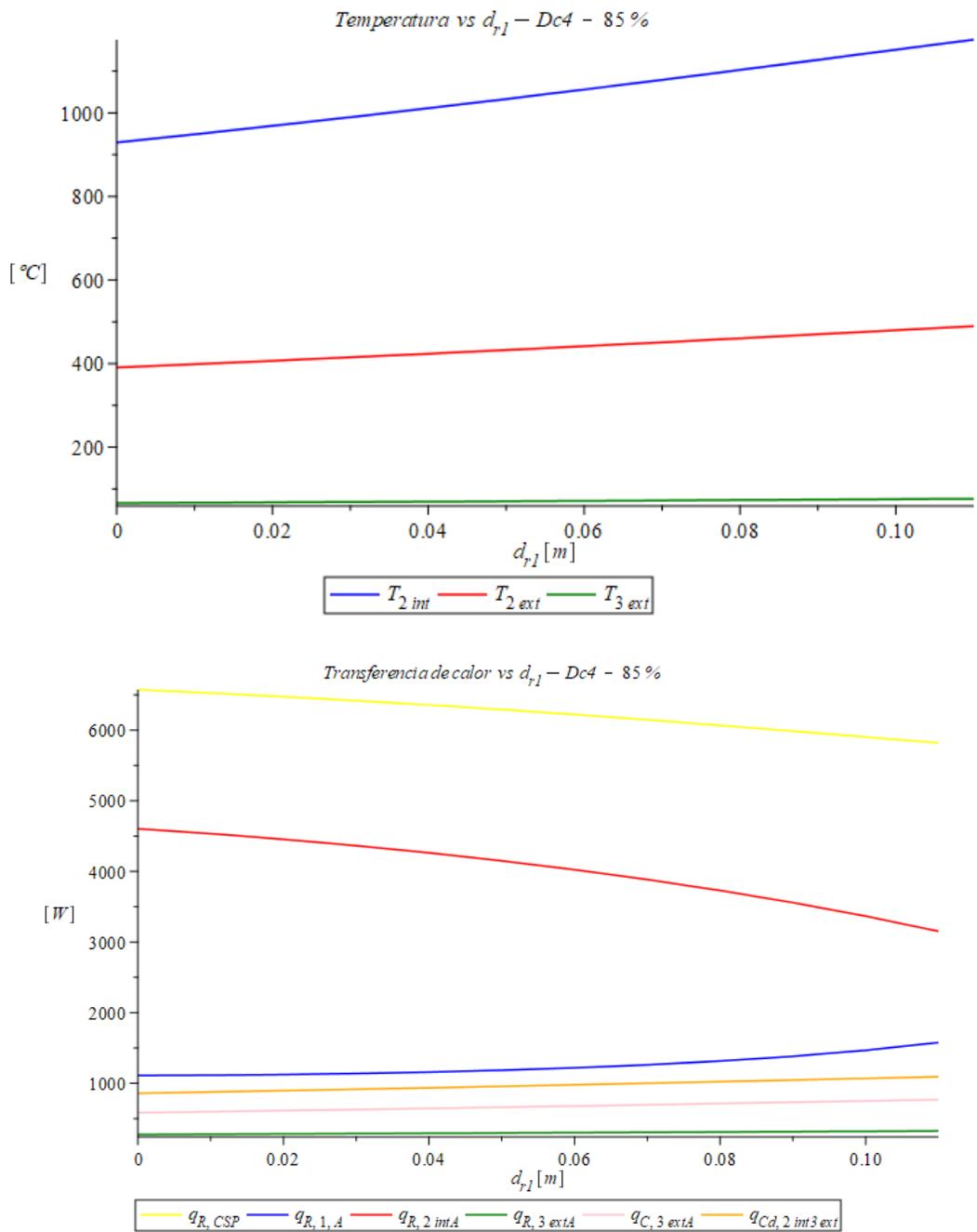


Figura 4.25: Análisis de sensibilidad del parámetro d_{r1} , considerando una utilización del 85%.

En la Figura 4.25 se puede apreciar que todas las temperaturas aumentan a medida que crece el parámetro d_{r1} . En cuanto al comportamiento de las transferencias de calor, se pueden notar una variación importante tanto en $\dot{Q}_{R,1A}$ como en $\dot{Q}_{R,2A}$.

En cuanto a la variación creciente de $\dot{Q}_{R,1A}$, esta obedece al aumento en el factor de visión $F_{1 \rightarrow A}$, explicado anteriormente. En cuanto al decrecimiento de $\dot{Q}_{R,2A}$, tiene dicho comportamiento debido que a medida que la zona focal cerámica se acerca a la apertura del receptor, esta interfiere

en el factor de visión $F_{2 \rightarrow A}$, haciéndolo más pequeño. La combinación de estos dos factores hace que en un principio el calor demandado decrezca bruscamente, y a medida que aumenta d_{r1} dicha variación disminuye. En el caso particular de la Figura 4.25, en el tramo estudiado no se logra encontrar el mínimo, pero es importante mencionar que en otros casos el mínimo si se encontró en el rango $d_{r1} = 0 - 11$ [cm]. La existencia se explica debido que el aumento en $F_{1 \rightarrow A}$ es más pronunciado que el decrecimiento en $F_{2 \rightarrow A}$.

Los gráficos referidos a los análisis de sensibilidad para las utilizaciones de 95% y 75% se encuentran en el Anexo D.

Los valores de los diferentes parámetros del receptor que optimizan el calor requerido por el sistema, para cada porcentaje de utilización, se presentan en la Tabla 4.6. Para calcular el $\dot{Q}_{R,CSP1}$ obtenido, se utilizó una radiación incidente igual a $800 \left[\frac{W}{m^2} \right]$.

Tabla 4.6: Valores óptimos obtenidos para una utilización del 75%, 85% y 95%.

Utilización [%]	d_{r1} [cm]	r_1 [cm]	r_{apint} [cm]	r_{apext} [cm]	$\dot{Q}_{R,CSP1}$ requerido [W]	$\dot{Q}_{R,CSP1}$ obtenido [W]	T_{2int} [°C]
75	11	2,05	7,45	30,18	4.933	5.225	1.138
85	11	2,35	7,72	30,41	5.821	5.837	1.175
95	11	3,0	8,35	30,93	7998	6.588	1.237

De la Tabla 4.6, se aprecia que solo con un 75% de utilización se logra obtener un $\dot{Q}_{R,CSP1}$ obtenido mayor al $\dot{Q}_{R,CSP1}$ requerido. No obstante, con esa misma utilización, la temperatura T_{2int} (temperatura a la que llega la pared interior del material refractario considerando $\dot{Q}_{R,CSP1}$ requerido) disminuye considerablemente respecto de $T_1 = 1500^\circ\text{C}$. Por otro lado, con una utilización del 95%, T_{2int} es más cercana a la temperatura T_1 , pero el $\dot{Q}_{R,CSP1}$ requerido es un 18% menor que el $\dot{Q}_{R,CSP1}$ obtenido. Finalmente, con la utilización de un 85%, se alcanzan temperaturas intermedias a las obtenidas con un 75% y un 95% de utilización, y el calor $\dot{Q}_{R,CSP1}$ obtenido es menos de un 0,5% que el $\dot{Q}_{R,CSP1}$ requerido. Teniendo en cuenta todas las consideraciones mencionadas, es que se elige un 85% de utilización como la mejor alternativa, y es la que se utilizará de aquí en adelante.

Hasta ahora se ha hecho un análisis de sensibilidad de todos los parámetros independientes del receptor, como también del porcentaje de utilización. Resta entonces realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros del concentrador, es decir, tanto d_c como r_{apc} .

Antes de realizar un análisis de sensibilidad respecto al parámetro d_c , es necesario comprender como dicho parámetro afecta los parámetros dependientes del receptor. La Figura 4.26 esquematiza como la variación en dicho parámetro afecta los parámetros dependientes.

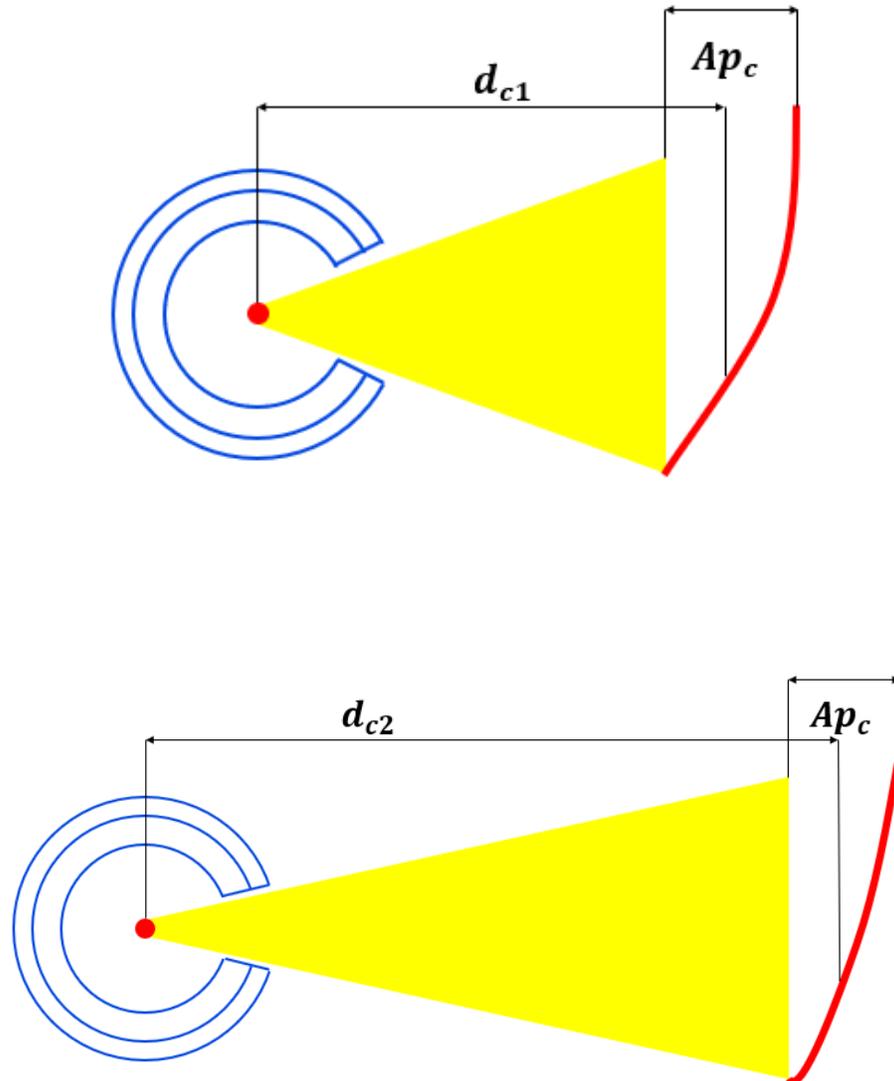


Figura 4.26: Comportamiento de r_{apint} y r_{apext} al variar el parámetro d_c .

En la Figura 4.26, en una primera impresión se puede pensar que a las variables r_{apint} y r_{apext} decrecen en la medida que d_c aumenta (manteniendo r_{apc} constante). Si bien para r_1 constante esto es cierto, se debe tener en cuenta que al aumentar d_c , aumentan también los errores ópticos en cuanto a la reflexión en el concentrador. En consecuencia, y manteniendo un mismo porcentaje de utilización respecto a los rayos reflejados, se requiere que r_1 aumente. Dicho aumento en r_1 trae consigo un aumento en r_{apint} y r_{apext} . Por lo tanto, no se puede definir a priori si el sistema se optimiza al aumentar o disminuir d_c .

Para obtener un valor mejorado del parámetro d_c , se realiza un análisis de sensibilidad de dicho parámetro. Se calculan los parámetros dependientes considerando valores de $d_c = 3 [m]$, $d_c = 4 [m]$, $d_c = 5 [m]$ y $d_c = 6 [m]$, y manteniendo el resto de los parámetros con iguales valores a los utilizados en las primeras iteraciones.

En la Tabla 4.7 se exponen los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad del parámetro d_c . Los gráficos obtenidos se encuentran en el Anexo D.

Tabla 4.7: Resultados obtenidos del análisis de sensibilidad del parámetro d_c .

$d_c [m]$	$d_{r1} [cm]$	$r_1 [cm]$	$r_{apint} [cm]$	$r_{apext} [cm]$	$\dot{Q}_{R,CSP1}$ requerido [W]	$\dot{Q}_{R,CSP1}$ obtenido [W]	$T_{2int} [^{\circ}C]$
3	11	1,9	10,68	47,79	4.875	5.858	834
4	11	2,35	7,72	30,41	5.821	5.837	1.175
5	11	2,85	6,77	23,32	6.668	5.857	1.334
6	11	3,35	6,45	19,51	7.552	5.834	1.423

De la Tabla 4.7, y realizando el mismo análisis respecto a $\dot{Q}_{R,CSP1}$ obtenido, $\dot{Q}_{R,CSP1}$ requerido, y T_{2int} que se hizo con el porcentaje de utilización, se selecciona $d_c = 5 [m]$ como la mejor opción.

Por último, se realiza un análisis de sensibilidad del parámetro r_{apc} . La Figura 4.27 representa como un cambio en dicho parámetro afecta los parámetros dependientes del receptor.

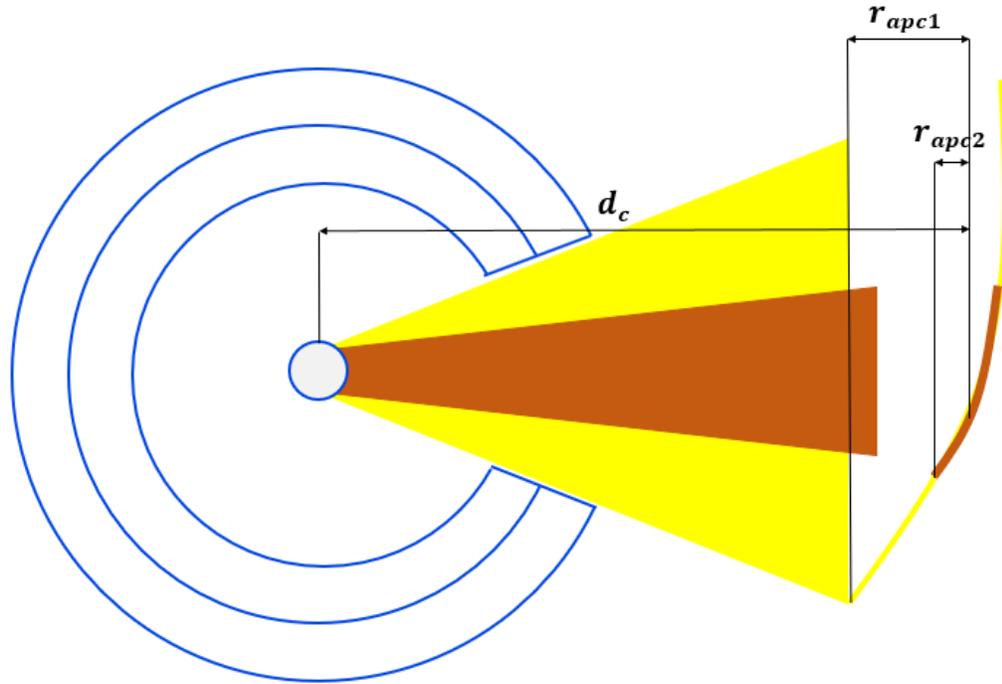


Figura 4.27: Comportamiento de r_{apint} y r_{apext} al variar el parámetro r_{apc} .

Como se aprecia en la Figura 4.27, un aumento en el parámetro r_{apc} produce un decrecimiento de los parámetros r_{apint} y r_{apext} . Por otro lado, el parámetro r_1 se ve levemente aumentado con el aumento de r_{apc} . Esto se debe a que existe mayor superficie de reflexión, y, por tanto, aumentan los errores ópticos. Cabe mencionar que r_1 varía considerablemente menos en comparación con la sensibilidad que el mismo parámetro tiene respecto de d_c . Por otro lado, al aumentar r_{apc} , aumenta también la apertura del concentrador (Ap_c), y, en consecuencia, el sistema recibe mayor radiación. Esto comportamiento se traduce en un mayor $\dot{Q}_{R,CSP1}$ obtenido. Entonces, al igual que con el parámetro d_c , no es intuitivo el comportamiento del sistema al variar r_{apc} .

Se realiza entonces un análisis de sensibilidad del parámetro r_{apc} , testeando los valores de $r_{apc} = 1,4 [m]$, $r_{apc} = 1,75 [m]$, $r_{apc} = 2 [m]$ y $r_{apc} = 2,5 [m]$.

La Tabla 4.8 expone los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad del parámetro r_{apc} . Los gráficos obtenidos se encuentran en el Anexo D.

Tabla 4.8: Resultados obtenidos del análisis de sensibilidad del parámetro r_{apc} .

r_{apc} [m]	d_{r1} [cm]	r_1 [cm]	r_{apint} [cm]	r_{apext} [cm]	$\dot{Q}_{R,CSP1}$ requerido [W]	$\dot{Q}_{R,CSP1}$ obtenido [W]	T_{2int} [°C]	Área de reflexión [m ²]
1,4	11	2,8	5,74	18,15	5.860	3.750	1.401	8,87
1,75	11	2,85	6,77	23,32	6.668	5.857	1.334	13,77
2	11	2,9	7,61	27,51	7.305	7.019	1.278	18,05
2,5	11	3,05	9,69	37,73	8.760	12.000	1.134	28,43

De la Tabla 4.8, se puede apreciar que a medida que r_{apc} aumenta, lo hace también $\dot{Q}_{R,CSP1}$ requerido y $\dot{Q}_{R,CSP1}$ obtenido, registrándose un aumento más pronunciado en el último. Producto de ello es que a bajos valores de r_{apc} se tiene $\dot{Q}_{R,CSP1}$ obtenido $<$ $\dot{Q}_{R,CSP1}$ requerido, lo cual se revierte en $r_{apc} = 2,5$ [m]. A su vez, con el aumento de r_{apc} se registra una caída en cuanto a T_{2int} . En la Tabla 4.8 se añade la columna “Área de reflexión”, que representa la superficie de la sección de paraboloides utilizada por el concentrador, dicho de otro modo, la superficie reflectora.

4.7 Temperaturas alcanzadas

Habiendo definido todos los parámetros del receptor y del concentrador, se está en condiciones de calcular las temperaturas reales a las que trabajará el horno. Con la geometría bien definida, ya no se debe fijar $T_1 = 1500^\circ\text{C}$ en el sistema de ecuaciones producido por (4.1), (4.2) y (4.26), sino que se debe determinar. Lo que se hace es utilizar el mismo sistema de ecuaciones, pero en este caso $\dot{Q}_{R,CSP1}$ no es una incógnita, si no que el valor del factor amplificador obtenido multiplicado por la radiación normal incidente. Las incógnitas, por su parte, deben ser las tres temperaturas que definen dicho sistema, es decir T_1 , T_{2int} y T_{3ext} .

Para resolver dicho sistema se utiliza un código bastante similar al utilizado para determinar $\dot{Q}_{R,CSP1}$ en función de T_1 (Anexo A). El código utilizado para determinar las temperaturas se encuentra en el Anexo E.

Cabe mencionar que, con la nueva manera de resolver el sistema, se puede introducir una nueva temperatura denominada T_{horno} , la cual es simplemente un promedio entre T_1 y T_{2int} . Esta temperatura se incorpora debido a que ambas temperaturas, T_1 y T_{2int} , determinan la temperatura dentro del horno, pero en un principio no tenía sentido definirla, ya que T_1 estaba autoimpuesta.

Para obtener la temperatura del horno (T_{horno}) en cualquier momento del año, se debe hacer un análisis diario y anual, concorde con las condiciones del lugar seleccionado.

En cuanto al análisis diario, y como se menciona en la sección Concentrador Scheffler, la única variable que cambia con la hora es la radiación incidente. Tanto el factor amplificador (ϕ) como la apertura focal (Ap_c) se mantienen constantes durante el transcurso del día, por lo que el calor que recibe el receptor ($\dot{Q}_{R,CSP1}$) solo depende de la radiación directa (I_d).

En cuanto al cambio anual, éste es de gran relevancia en los sistemas de concentración Scheffler. Para entender como la variación anual afecta al horno, se presenta la Figura 4.28.

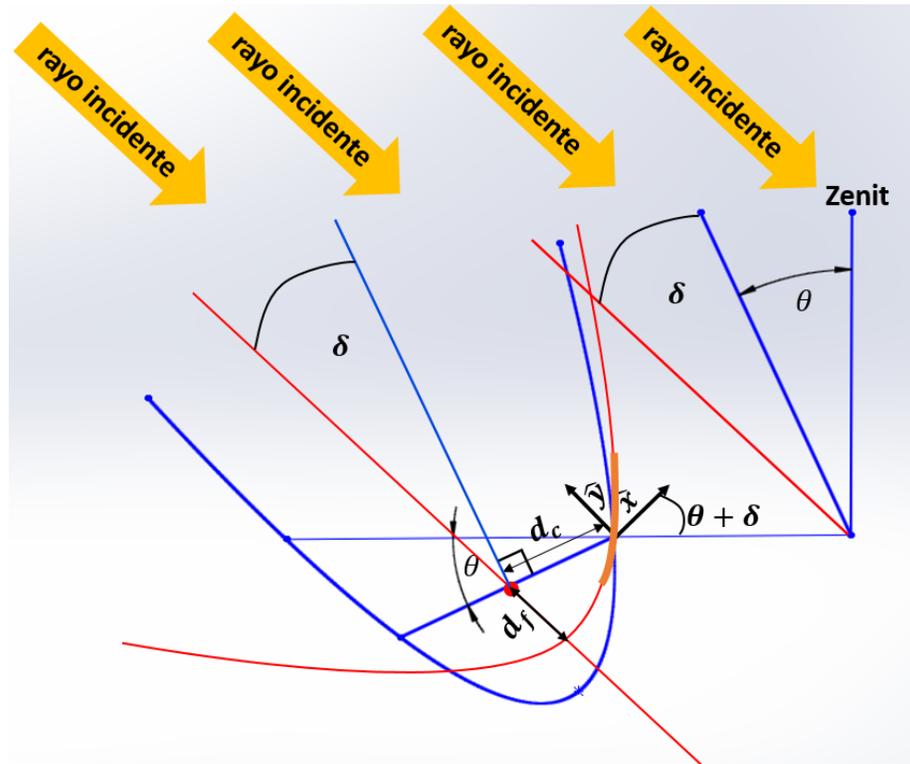


Figura 4.28: Relaciones geométricas entre el concentrador y el receptor para cualquier día del año.

La Figura 4.28 representa un día cualquier, para una localidad con $\varphi = \theta$, al mediodía solar. Como ya se mencionó, la hora del día no afecta en la concentración generada, pero por simplicidad se elige el mediodía solar. Como se puede apreciar, y a diferencia de la Figura 4.15, el Sol se encuentra a una altura $h = 90^\circ - (\theta + \delta)$. Entonces, la parábola se debe inclinar en igual medida, de manera de quedar con su eje en dirección al Sol. Por otro lado, el receptor debe seguir en el eje norte sur del lugar. Esto se debe cumplir para que el principio de los concentradores Scheffler pueda seguir imperando.

Considerando todo aquello es que se tiene un nuevo sistema de ecuaciones para describir la parábola, el cual se esquematiza en la Figura 4.29.

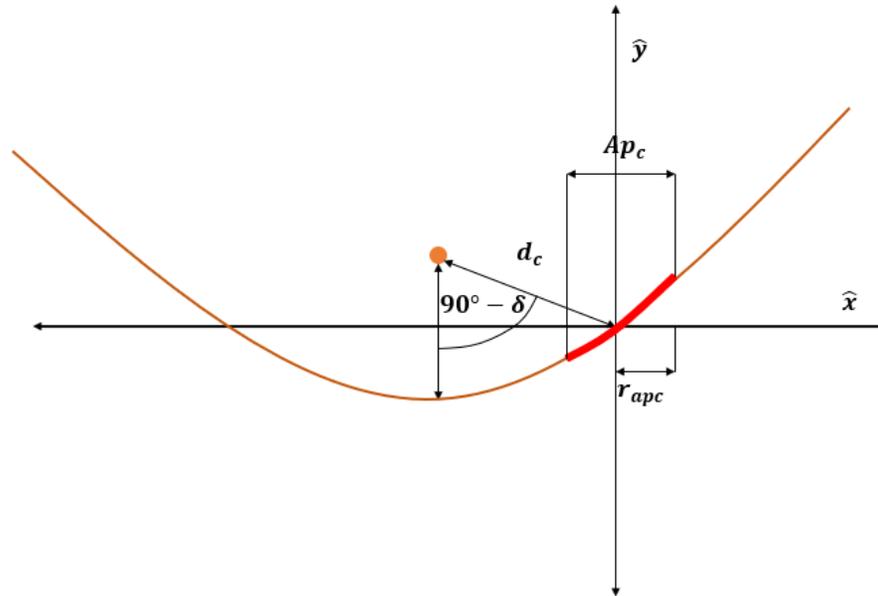


Figura 4.29: Relación entre los parámetros del concentrador para cualquier día del año.

Ahora bien, el nuevo sistema de ecuaciones queda descrito por las ecuaciones (4.32), (4.33), (4.36), (4.50) y (4.51), con:

$$f(x = -d_c \cdot \cos(\delta)) = -(d_f - d_c \cdot \text{sen}(\delta)) \quad (4.50)$$

$$f(x = - \cdot 2 \cdot d_c \cdot \cos(\delta)) = 0 \quad (4.51)$$

Para este sistema se obtiene el mismo valor para c que el encontrado en la ecuación (4.37). Los valores de a y b pueden diferir de los obtenidos en el primer caso, pero se calcula con el mismo código de Maple utilizado anteriormente, esta vez, incluyendo el valor δ . Dicho código se encuentra en el Anexo B. Por su parte, para determinar el valor de δ se utiliza la ecuación (2.1).

Ante la variación anual recién descrita, existen dos opciones, o bien no modificar la forma del concentrador y solamente redirigir su eje, o realizar un ajuste acorde a los nuevos parámetros de la parábola en función del día del año. La primera opción tiene la ventaja de no requerir de un sistema mecánico de reajuste de parábola, pero intuitivamente existirá una disminución en el factor amplificador. Por otro lado, la segunda opción no debería sufrir cambios considerables en la concentración alcanzada, pero además del problema del mecanismo de reajuste, se debe conseguir un buen material reflectante capaz de resistir las deformaciones propias de dicho reajuste.

En las dos opciones se tiene que tener en cuenta que los parámetros del receptor no se pueden ajustar durante el año. Dicho esto, es que el receptor se define con los parámetros obtenidos para un día de equinoccio, y después quedan inmóviles para los efectos de los cálculos de los meses

restantes. Con ello, el modelo, tanto en SolTrace como el modelo térmico, son utilizados con los parámetros de r_1 , r_{apint} y r_{apext} definidos en los equinoccios.

Los resultados obtenidos para la opción de solo reajustar la dirección del concentrador Scheffler se resumen en la Tabla 4.9. Para dicha opción se utilizaron los parámetros $r_1 = 3,05 [cm]$, $r_{2int} = 20 [cm]$, $e_2 = 30 [cm]$, $e_3 = 8 [cm]$, $r_{apint} = 9,69 [cm]$, $r_{apext} = 37,73 [cm]$, $d_c = 5 [m]$ y $r_{apc} = 2,5 [m]$, los cuales representan la mejor opción entre las iteradas anteriormente.

Tabla 4.9: Resultados obtenidos para la opción de solo reajustar la dirección de la parábola.

Época del año	Factor amplificador (ϕ) [m^2]
Equinoccio	15
Solsticio de invierno	0,85
Solsticio de verano	0,22

Con dichos resultados, se obtiene un cuadro del ciclo diario-anual para la temperatura del horno (T_{horno}). El ciclo es representado en la Figura 4.30.

De la Tabla 4.9 se puede apreciar que el factor amplificador (ϕ) decrece bruscamente en las fechas lejanas a los equinoccios. En particular, en las fechas de verano, la caída de dicho coeficiente se acrecienta. Esto se explica debido a que, en invierno, para la localidad de San Pedro, el sol llega de manera más horizontal (menor altura (h)). En contraste, en verano, el Sol se encuentra prácticamente en el zenit. Como el receptor se encuentra cercano a la horizontal en la localidad seleccionada, se tiene que los factores amplificadores en invierno son mayores a los del verano. No obstante, ambos factores amplificadores se encuentran muy por debajo del valor obtenido en los equinoccios.

Para obtener el ciclo diario-anual de T_{horno} se utilizó el ciclo diario-anual de la radiación directa en la localidad de San Pedro (Figura 4.2). Con ellos, y junto con los factores amplificadores para cada mes (resumidos en la Tabla 4.9) se obtienen los valores de $\dot{Q}_{R,CSP1}$ mediante la ecuación (2.10). Dichos valores son ingresados al código mostrado en el Anexo E para finalmente obtener la T_{horno} . Se realiza este procedimiento para cada hora-mes del año.

	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
Enero	0	328	372,2	406,8	417,2	421,6	424,6	417,3	408,4	372,7	345,9	327,8	305,7	0
Febrero	0	493,7	576,2	619,7	641,3	643,7	648,3	633,7	622	567,4	532,2	494,3	487,3	0
Marzo	0	1303	1551	1628	1651	1657	1661	1656	1650	1617	1572	1496	1419	0
Abril	0	0	718,3	775,7	795,2	803,3	804,3	802,4	801,4	791,5	767,4	728,3	447	0
Mayo	0	0	561,4	610,8	627,4	635,9	641	639,8	635,7	622,1	602,9	555,5	0	0
Junio	0	0	470,3	522,9	549,5	554,9	563,8	561	557,4	541	518,7	473,7	0	0
Julio	0	0	537,5	598	624,2	631,6	633,2	631,2	629,1	615,4	592,7	554,6	0	0
Agosto	0	0	714,4	771	790,7	795,5	799,5	795,6	791,5	779,5	764,4	726,8	398,6	0
Septiembre	0	1301	1560	1620	1645	1650	1648	1633	1633	1623	1599	1553	1340	0
Octubre	0	566,6	624,9	645,5	651,4	656,1	656,9	655,1	655,2	640,2	622,9	599,8	518,5	0
Noviembre	0	376,9	415,8	427,3	433,3	434,3	436,3	436,5	432,1	428,1	419,5	401,5	360,9	0
Diciembre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.30: Ciclo diario-anual de T_{horn0} para la opción de solo reajustar la dirección de la parábola.

De la Figura 4.30 se puede concluir que, aun considerando el mejor caso, la opción de responder a las variaciones anuales solamente con un cambio en la dirección del concentrador no genera buenos resultados. Solo para los equinoccios se alcanzan temperaturas superiores a las fijadas en los objetivos. Esto se explica ya que, como se mencionó anteriormente, el horno se diseña en un principio con los parámetros que dicha fecha genera.

Al lector pudiese llamarle la atención que, en diciembre, a pesar de existir un factor de amplificación mayor que cero, las temperaturas obtenidas son nulas. Esto se explica debida a que el código del Anexo E solamente entrega resultados para valores de $\dot{Q}_{R,CSP1}$ mayores que cierto valor. Por lo tanto, no es posible determinar T_{horn0} con el modelo utilizado. De todas formas, las temperaturas alcanzadas son pequeñas, bastante alejadas de la temperatura objetivo. El $\dot{Q}_{R,CSP1}$ mínimo necesario para que el código entregue resultados depende de cada configuración, y por tanto se debe analizar para cada caso. Esto comportamiento se explica debido a que a valores muy bajos de $\dot{Q}_{R,CSP1}$, algunas de las ecuaciones para la transferencia de calor dejan de ser válidas.

Se analiza entonces la segunda opción, es decir, la que involucra un cambio en la forma del concentrador durante el transcurso del año. Adicional al cambio en la forma del concentrador, el eje del paraboloide debe alinearse en todo momento con el Sol, de manera de cumplir el principio de los concentradores Scheffler.

Como se mencionó anteriormente, se procede de la siguiente manera: se seleccionan todos los parámetros del receptor considerando un día de equinoccio. Respecto de los parámetros del concentrador, se tiene que d_c debe ser constante todo el año, de manera de obtener un receptor fijo.

En cuanto al valor del parámetro r_{apc} se procede de la siguiente manera: como lo muestra la Figura 4.29 y Figura 4.31, al variar δ varía el valor b que define la parábola. Como el área de reflexión del concentrador no se puede agrandar o achicar una vez construido, lo que se debe igualar entre las distintas parábolas es dicha área bruta de reflexión. Entonces, con el área bruta de reflexión

obtenida para el equinoccio, se debe encontrar el valor de r_{apc} que iguale dicha superficie. Esto se realiza para cada uno de los meses del año.

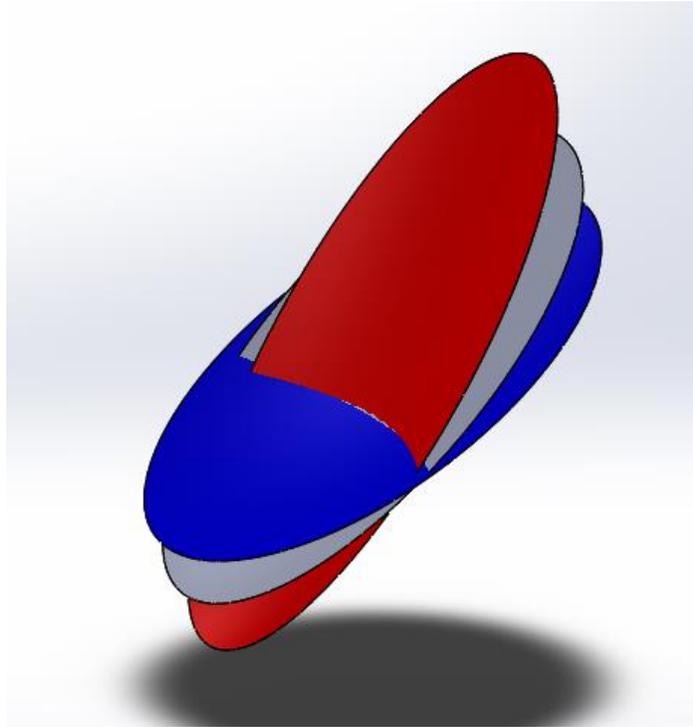


Figura 4.31: Comparación entre la forma de los diferentes concentradores según la época del año. En azul el concentrador correspondiente al solsticio de invierno, en gris el correspondiente a los equinoccios y en rojo el correspondiente al solsticio de verano.

Debido a la complejidad de encontrar dicha área de manera analítica, se precede utilizando un software de diseño 3D, en este caso SolidWorks 2014. En él se puede generar la porción de paraboloides que define el concentrador. Se requiere solamente saber los valores a , b , y c que definen la parábola, y el valor de r_{apc} . Una vez definido, el software es capaz de entregar la superficie del concentrador. Se itera variando r_{apc} hasta encontrar el valor que iguale el área de reflexión con la calculada inicialmente.

Respecto a la segunda opción, ésta se evalúan para los cuatro valores de r_{apc} antes considerados, es decir $r_{apc} = 1,4 [m]$, $r_{apc} = 1,75 [m]$, $r_{apc} = 2 [m]$ y $r_{apc} = 2,5 [m]$. Para los restantes parámetros se utiliza $r_{2int} = 20 [cm]$, $e_2 = 30 [cm]$, $e_3 = 8 [cm]$ y $d_c = 5 [m]$. Los valores para r_1 , r_{apint} y r_{apext} ya fueron determinados en las secciones anteriores y dependen de r_{apc} .

En cuanto a la segunda opción, los resultados referidos a los factores amplificadores y a los r_{apc} para cada época del año se resumen en la Tabla 4.10, Tabla 4.11, Tabla 4.12 y Tabla 4.13.

Tabla 4.10: Resultados obtenidos para la opción de reajuste de la parábola, caso $r_{apc} = 1,4$ [m].

Época del año	Factor amplificador (ϕ) [m^2]	r_{apc} [m]
Equinoccio	4,69	1,4
Solsticio de invierno	5,46	1,52
Solsticio de verano	3,67	1,23

Tabla 4.11: Resultados obtenidos para la opción de reajuste de la parábola, caso $r_{apc} = 1,75$ [m].

Época del año	Factor amplificador (ϕ) [m^2]	r_{apc} [m]
Equinoccio	7,32	1,75
Solsticio de invierno	5,7	1,9
Solsticio de verano	8,54	1,54

Tabla 4.12: Resultados obtenidos para la opción de reajuste de la parábola, caso $r_{apc} = 2$ [m].

Época del año	Factor amplificador (ϕ) [m^2]	r_{apc} [m]
Equinoccio	9,52	2
Solsticio de invierno	11,18	2,18
Solsticio de verano	7,39	1,76

Tabla 4.13: Resultados obtenidos para la opción de reajuste de la parábola, caso $r_{apc} = 2,5$ [m].

Época del año	Factor amplificador (ϕ) [m^2]	r_{apc} [m]
Equinoccio	15	2,5
Solsticio de invierno	17,69	2,72
Solsticio de verano	11,5	2,2

De la Tabla 4.10, Tabla 4.11, Tabla 4.12 y Tabla 4.13, se puede apreciar que los mayores factores amplificadores se alcanzan en invierno, y los menores en verano. Esto ocurre para todas

las aperturas focales. Como se puede deducir de Figura 4.29 y como lo representa la Figura 4.31, para las fechas de invierno se obtiene una parábola más abierta que en el equinoccio (valores de δ cercanos a $23,45^\circ$ y valores pequeños para a). Esto trae como consecuencia que, para una misma área bruta de concentración, la apertura del concentrador (Ap_c) sea mayor en invierno. Como el factor amplificador (ϕ) es proporcional a la apertura del concentrador (Ap_c), al aumentar r_{apc} aumenta también el factor amplificador (ϕ). Por lo tanto, ϕ aumenta hacia el solsticio de invierno y disminuye hacia el solsticio de verano.

Por contraparte, en verano se obtiene una parábola más cerrada respecto al equinoccio (valores de δ cercanos a $-23,45^\circ$ y valores grandes para a), lo que conlleva menores valores en Ap_c y ϕ .

La Figura 4.32, Figura 4.33, Figura 4.34 y Figura 4.35 esquematizan el ciclo diario-anual de cada uno de los casos estudiados referidos a la segunda opción. Para el cálculo de ellos se realizó el mismo procedimiento que el realizado en la primera opción.

	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
Enero	0	0	1138	1249	1332	1356	1366	1373	1356	1336	1250	1184	1137	1079	905,1	0
Febrero	0	0	1134	1287	1365	1403	1407	1416	1390	1369	1271	1206	1135	1122	602,9	0
Marzo	0	0	1095	1353	1432	1456	1462	1466	1462	1455	1422	1375	1297	1217	0	0
Abril	0	0	0	1342	1435	1466	1479	1481	1478	1476	1460	1421	1358	880,9	0	0
Mayo	0	0	0	1357	1449	1480	1495	1505	1503	1495	1470	1434	1346	0	0	0
Junio	0	0	0	1335	1444	1498	1508	1526	1521	1514	1481	1435	1342	0	0	0
Julio	0	0	0	1311	1425	1474	1487	1491	1487	1483	1458	1416	1344	0	0	0
Agosto	0	0	0	1335	1427	1459	1467	1473	1467	1460	1441	1416	1356	791,7	0	0
Septiembre	0	0	1093	1363	1425	1451	1456	1454	1437	1438	1427	1403	1356	1134	0	0
Octubre	0	0	1269	1374	1411	1421	1429	1431	1428	1428	1401	1370	1329	1181	0	0
Noviembre	0	753,2	1260	1353	1379	1393	1395	1400	1400	1390	1381	1361	1319	1221	0	0
Diciembre	0	605,7	1185	1292	1329	1340	1351	1356	1348	1333	1309	1278	1243	1178	632,3	0

Figura 4.32: Ciclo diario-anual de T_{horno} para la opción de reajuste de la parábola, caso $r_{apc} = 1,4$ [m].

	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
Enero	0	0	1179	1282	1358	1381	1390	1397	1381	1362	1283	1221	1179	1125	965,5	0
Febrero	0	0	1176	1317	1390	1426	1429	1437	1413	1393	1302	1243	1177	1165	683,8	0
Marzo	0	0	1141	1380	1453	1476	1481	1485	1481	1475	1443	1400	1327	1253	0	0
Abril	0	0	0	1369	1456	1485	1498	1499	1496	1495	1480	1443	1384	944,6	0	0
Mayo	0	0	0	1383	1470	1498	1513	1522	1520	1513	1489	1456	1373	0	0	0
Junio	0	0	0	1364	1465	1515	1526	1542	1537	1530	1500	1457	1370	0	0	0
Julio	0	0	0	1341	1447	1493	1506	1508	1505	1501	1478	1438	1372	0	0	0
Agosto	0	0	0	1363	1449	1479	1486	1492	1486	1480	1462	1439	1382	862,4	0	0
Septiembre	0	0	1139	1388	1446	1470	1475	1473	1458	1458	1449	1426	1382	1177	0	0
Octubre	0	0	1301	1398	1432	1442	1450	1451	1448	1448	1424	1395	1357	1219	0	0
Noviembre	0	825,5	1292	1378	1402	1415	1417	1422	1422	1413	1404	1386	1347	1256	0	0
Diciembre	0	685,5	1222	1321	1355	1366	1376	1380	1372	1359	1337	1308	1275	1216	711,1	0

Figura 4.33: Ciclo diario-anual de T_{horno} para la opción de reajuste de la parábola, caso $r_{apc} = 1,75$ [m].

	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
Enero	0	0	1230	1332	1409	1432	1441	1448	1432	1413	1334	1272	1229	1176	1017	0
Febrero	0	0	1228	1369	1441	1477	1481	1489	1465	1445	1354	1294	1229	1217	736,1	0
Marzo	0	0	1193	1432	1506	1528	1534	1537	1533	1527	1496	1452	1379	1305	0	0
Abril	0	0	0	1422	1509	1539	1551	1553	1550	1548	1533	1497	1437	997,5	0	0
Mayo	0	0	0	1437	1524	1553	1568	1577	1575	1567	1544	1510	1427	0	0	0
Junio	0	0	0	1418	1520	1571	1581	1598	1593	1586	1555	1512	1425	0	0	0
Julio	0	0	0	1395	1502	1547	1560	1563	1560	1556	1532	1493	1425	0	0	0
Agosto	0	0	0	1416	1502	1532	1539	1546	1540	1533	1515	1492	1435	915,6	0	0
Septiembre	0	0	1191	1440	1499	1523	1528	1526	1511	1511	1501	1479	1434	1228	0	0
Octubre	0	0	1352	1450	1484	1494	1502	1503	1500	1500	1475	1447	1408	1271	0	0
Noviembre	0	877,3	1343	1429	1454	1467	1469	1473	1473	1464	1456	1437	1398	1307	0	0
Diciembre	0	737	1272	1371	1405	1416	1426	1430	1423	1410	1387	1358	1326	1266	762,6	0

Figura 4.34: Ciclo diario-anual de T_{horno} para la opción de reajuste de la parábola, caso $r_{apc} = 2$ [m].

	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
Enero	0	0	1338	1444	1524	1547	1557	1564	1547	1527	1445	1382	1338	1282	1119	0
Febrero	0	0	1338	1483	1559	1596	1601	1608	1583	1563	1468	1406	1339	1326	832,3	0
Marzo	0	0	1303	1551	1628	1651	1657	1661	1656	1650	1617	1572	1496	1419	0	0
Abril	0	0	0	1542	1632	1663	1676	1678	1675	1673	1657	1619	1557	1103	0	0
Mayo	0	0	0	1558	1649	1679	1694	1704	1701	1694	1669	1634	1547	0	0	0
Junio	0	0	0	1539	1645	1698	1709	1727	1721	1714	1682	1637	1546	0	0	0
Julio	0	0	0	1514	1625	1673	1686	1689	1686	1682	1657	1616	1546	0	0	0
Agosto	0	0	0	1535	1625	1656	1664	1670	1664	1657	1638	1614	1555	1018	0	0
Septiembre	0	0	1301	1560	1620	1645	1650	1648	1633	1633	1623	1599	1553	1340	0	0
Octubre	0	0	1467	1568	1604	1614	1622	1623	1620	1620	1594	1565	1525	1382	0	0
Noviembre	0	975,7	1455	1544	1570	1583	1585	1590	1590	1580	1572	1552	1512	1418	0	0
Diciembre	0	830,2	1379	1482	1517	1528	1539	1543	1535	1522	1498	1469	1435	1373	856,5	0

Figura 4.35: Ciclo diario-anual de T_{horno} para la opción de reajuste de la parábola, caso $r_{apc} = 2,5$ [m].

De la Figura 4.32, Figura 4.33, Figura 4.34 y Figura 4.35 se puede destacar que en cada una de ellas, al menos en un horario al año, se alcanza la temperatura objetivo $T_{\text{horno}} = 1500^{\circ}\text{C}$. A su vez, se aprecia que en cada una de ellas se alcanzan las más altas temperaturas en las fechas de invierno. Este fenómeno puede ser contra intuitivo, debido a que, en la ubicación seleccionada, los valores más altos de radiación incidente son en las fechas veraniegas. A pesar de ello, y como se demuestra en la Tabla 4.10, Tabla 4.11, Tabla 4.12 y Tabla 4.13, es en invierno en donde se alcanzan los mayores factores amplificadores (ϕ). Este aumento de ϕ en las temporadas de invierno es mayor que lo que aumenta la radiación en las fechas de verano, lo que genera que el ciclo – diario anual alcance sus máximos valores en invierno.

Se enfatiza el hecho que en las cuatro configuraciones se alcanzan temperaturas de horno entre $1200^{\circ}\text{C} - 1500^{\circ}\text{C}$ a dos horas antes y después del mediodía solar, para todos los meses del año. Por tanto, el objetivo referido a la temperatura alcanzada por el horno se cumple a cabalidad.

Por último, se destaca que el diseño que alcanza las mayores temperaturas es con $r_{apc} = 2,5$ [m]. Por contraparte, el diseño que alcanza las menores temperaturas es con $r_{apc} = 1,4$ [m].

Pero, por otra parte, con $r_{apc} = 2,5 [m]$ se requiere un área bruta de reflexión de $28,43 [m^2]$, mientras que con $r_{apc} = 1,4 [m]$ se requieren tan solo de $8,87 [m^2]$. En consecuencia, queda a criterio de quien vaya a construir el horno si le da mayor importancia a la temperatura objetivo o al hecho de preferir un horno de pequeña escala.

Como último comentario respecto al concentrador, y como tarea para futuros trabajos, se reitera la necesidad de encontrar un material con buenas propiedades de reflexión (valores altos para ρ), que a la vez sea capaz de resistir las deformaciones que el cambio de geometría requiere. A la vez, se recuerda que en los modelos utilizados en SolTrace se utilizó $\rho = 0,9$. A modo de tener una pequeña noción de las deformaciones que el material sufriría, se presenta la Figura 4.36.

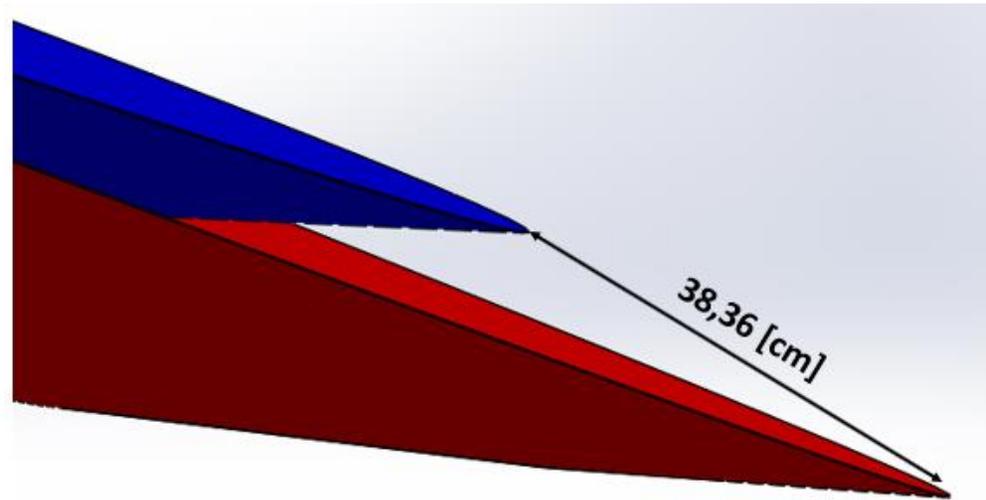


Figura 4.36: Deformación máxima que debería sufrir un concentrador con $d_c = 5 [m]$ y $r_{apc} = 2,5 [m]$. En azul el paraboloide de invierno y en rojo el de verano.

4.8 Análisis térmico transiente

Como último paso de la metodología, se debe realizar un análisis transiente del receptor. Esto quiere decir, determinar cuánto demora en llegar a la temperatura deseada para el estado estacionario. Como la convergencia hacia el estado estacionario es asintótica, es decir, dicha temperatura se alcanza en el infinito, es que se debe determinar una temperatura levemente inferior a la temperatura del estado estacionario. Esta nueva temperatura, a la cual denominaremos T_{obj} , alcanza su valor en un tiempo finito. En este caso se elige una temperatura objetivo igual al 95% del valor de la temperatura estacionaria.

Para el caso del horno solar, que todas las superficies alcancen la temperatura estacionaria podría demorar mucho tiempo. Pero, en la realidad, eso no es lo que se busca en un horno solar. Lo que se desea es que en la zona útil se llegue a la temperatura objetivo de manera rápida. Para el caso de este horno, la temperatura de la zona útil está determinada por T_1 y T_{2int} . Bajo el supuesto de que la capa cerámica en las partes muy cercanas al interior del horno desarrolla su perfil térmico

de manera rápida, entonces solo se requiere analizar T_1 para determinar el tiempo transiente del sistema.

Para el caso de nuestro de nuestro sistema, considerando el supuesto mencionado y desarrollando la ecuación (2.28), se obtiene la ecuación (4.52) en su versión discreta, que relaciona el calor que ingresa al sistema y la temperatura T_1 :

$$\frac{\Delta t \cdot (\dot{Q}_{recibido} - \dot{Q}_{dicipado})}{I_{t1}} = T_{1f} - T_{1i} \quad (4.52)$$

En donde T_{1i} representa la temperatura de 1 al inicio de Δt , T_{1f} la temperatura de 1 al transcurrir Δt , $\dot{Q}_{recibido}$ el calor recibido por 1 durante Δt , $\dot{Q}_{dicipado}$ el calor disipado por 1 durante Δt (el cual depende de T_{1i}), I_t la inercia térmica de 1 y Δt el intervalo de tiempo seleccionado.

Para calcular la inercia térmica de la zona focal (I_{t1}) se utiliza la ecuación (4.53):

$$I_{t1} = Vol_1 \cdot \rho_1 \cdot c_{p1} \quad (4.53)$$

Con Vol_1 el volumen del material cerámico de la zona focal, ρ_1 la densidad del material cerámico de la zona focal y c_{p1} el calor específico del material cerámico de la zona focal.

En la ecuación (4.52), mientras más pequeño sea el Δt utilizado, más se aproximará a su forma continua. Es la forma continua de la ecuación (2.28) la que describe realmente la manera en que un sistema se calienta, por lo tanto, un valor pequeño para Δt es deseado.

Para determinar el tiempo que demora el horno en llegar a su temperatura objetivo, se procede de la siguiente manera: para cada modelo, se selecciona la hora y el mes del ciclo diario-anual en la que se alcanza la mayor temperatura. Esto debido a que, como es de esperarse, a mayor temperatura final es mayor el tiempo que se demora en llegar a la temperatura objetivo. De esta forma, se está calculando el tiempo para el peor caso.

Con dicha hora-mes seleccionada, se obtiene el calor que está incidiendo en la zona focal ($\dot{Q}_{recibido}$), como se ha hecho anteriormente. A su vez, con el mismo calor se puede determinar la temperatura estacionaria para T_1 , utilizado el código del Anexo E. Con dicha temperatura calculada, se puede obtener el valor de T_{obj} .

Teniendo definido los parámetros antes mencionados, se puede empezar a iterar. Las iteraciones se realizan de la siguiente manera: dada una temperatura inicial (T_{1i}), y mediante el código en Maple del Anexo A se puede determinar el calor que está perdiendo la zona focal ($\dot{Q}_{dicipado}$) a dicha temperatura. Entonces, de la ecuación (4.52), se puede despejar T_{1f} . Si $T_{1i} < T_{obj}$, se vuelve a iterar, solo que ahora el nuevo valor de T_{1i} es el valor de T_{1f} de la iteración anterior.

Cuando se cumple que $T_{1i} \geq T_{obj}$, se deja de iterar, y se obtiene el tiempo transiente multiplicando la cantidad de iteraciones por el valor de Δt utilizado.

Cabe mencionar que tanto el código del Anexo A como el del Anexo E solo encuentran soluciones dado valores de T_1 y $\dot{Q}_{R,CSP1}$ superiores a cierto valor. Esto se explica porque a valores muy bajos, algunas de las ecuaciones para la transferencia de calor dejan de ser válidas. Por lo tanto, no es posible iterar de la forma recién mencionada para valores de T_{1i} menores que dicha cota. La temperatura mínima necesaria para que el código entregue resultados depende de cada configuración, y por tanto se debe analizar para cada caso.

Entonces, para determinar el tiempo que demora la zona focal en llegar a la temperatura mínima con la cual se puede iterar utilizando la ecuación (4.52), se considera un peor caso. Este peor caso considera que todo lo que emite la zona focal se pierde, y que solamente recibe el calor proveniente de concentrador ($\dot{Q}_{R,CSP1}$). Este fenómeno se describe entonces con la ecuación (4.54):

$$\frac{\Delta t \cdot \left(\dot{Q}_{R,CSP1} - (A_1 \cdot e_1 \cdot \sigma \cdot T_{1i}^4) \right)}{I_{t1}} = T_{1f} - T_{1i} \quad (4.54)$$

Para resolver (4.54), se procede de la misma manera que como se hace con (4.52), salvo que para la primera iteración se utiliza $T_{1i} = T_{amb}$.

Entonces, el tiempo que demora el horno en llegar al 95% de su régimen estacionario es la suma de los tiempos obtenidos al resolver las ecuaciones (4.52) y (4.54).

Si bien se desea hacer Δt lo más pequeño posible, se debe considerar que el disminuir el valor de dicho parámetro trae consigo la necesidad de realizar más iteraciones. Considerando que el código utilizado para resolver (4.52) demora entre 3 – 5 [s] en para resolver una iteración, se selecciona un valor de $\Delta t = 1$ [s].

Se calculó el tiempo que demora el horno en desarrollar su estado transiente para las cuatro configuraciones utilizadas en la opción de reajuste de parábola. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14: Resultados del análisis transiente.

r_{apc} [m]	$t_{transiente}$ [min]
1,4	6,1
1,75	4,13
2	3,42
2,5	2,63

De la Tabla 4.14 se puede apreciar que, en el peor de los casos, el horno se demora 6,1 [min] en llegar al estado estacionario. Además, dicho tiempo considera que el horno parte desde la temperatura ambiente, lo cual no se cumple en el caso de que se haya estado usando antes. En dicho caso, el tiempo que demora en llegar al estado estacionario es aún menor. Cabe mencionar que, en caso de estar calentando algún objeto dentro del horno, el tiempo debería ser mayor, ya que se consume energía en elevar la temperatura de dicho cuerpo. En esos casos, las configuraciones con valores elevados de r_{apc} se verán menos afectadas por este efecto, ya que poseen una mayor potencia y por ende una mayor capacidad para entregar energía.

4.9 Análisis con temperatura objetivo de 1200°C

Al plantearse los objetivos, se fijó que la temperatura que debiese alcanzar el horno debiese estar entre los 1200 – 1500°C. En el trabajo inicial se definió que la temperatura objetivo sería igual a 1500°C debido a ser la cota superior del objetivo propuesto.

Ahora bien, resulta de interés realizar el mismo análisis hecho en un principio, pero esta vez con una temperatura objetivo igual a 1200°C. Así se podrán contrastar resultados para diferentes temperaturas objetivos. El procedimiento para obtener los resultados será el mismo que el realizado con la temperatura objetivo fijada en 1500°C.

En la presente sección se entregarán los principales resultados obtenidos para el modelo considerando una temperatura objetivo de 1200°C. Se omitirá el paso a paso realizado, debido a que son prácticamente los mismos que los realizados anteriormente.

El único análisis de sensibilidad que no se realizará será el del factor de utilización. Este parámetro adquirirá el valor que optimizaba el caso anterior, es decir, un factor de utilización igual al 85%. Por otro lado, solo se estudiará la opción de con reajuste geométrico del concentrador para calcular los ciclos diarios-anales.

Parámetros independientes del receptor

La Tabla 4.15 exhibe los resultados del análisis de sensibilidad de los parámetros independientes del receptor.

Tabla 4.15: Resultados del análisis de sensibilidad de los parámetros independientes del receptor. (1200°C).

Parámetro	Valor
r_{2int}	18 [cm]
e_2	24 [cm]
e_3	10 [cm]

Es importante destacar que de la Tabla 4.15, el único valor que no fue seleccionado con el mismo criterio que el utilizado con los 1500°C es el parámetro r_{2int} . En este caso no se escoge la configuración que optimiza el sistema, ya que eso ocurre con $r_{2int} = 11$ [cm]. Dicho valor genera una zona útil muy pequeña, prácticamente inservible. Es por eso que, en este caso, se define $r_{2int} = 18$ [cm] ya que se considera la distancia más pequeña que genera un espacio útil razonable.

Parámetros del concentrador

El resultado del análisis realizado para los parámetros del contador de muestra en la Tabla 4.16. Dichos valores son los utilizados en la primera iteración del proceso.

Tabla 4.16: Resultados del análisis de los parámetros del concentrador para primera iteración. (1200°C).

Parámetro	Valor
r_{apc}	1,1 [m]
d_c	4 [cm]

Parámetros dependientes del receptor

En la Tabla 4.17 se muestran los resultados obtenidos referidos al análisis de sensibilidad del parámetro d_c , considerando $r_{apc} = 1,1$ [m].

Tabla 4.17: Resultados obtenidos del análisis de sensibilidad del parámetro d_c . (1200°C).

d_c [m]	d_{r1} [cm]	r_1 [cm]	r_{apint} [cm]	r_{apext} [cm]	$\dot{Q}_{R,CSP1}$ requerido [W]	$\dot{Q}_{R,CSP1}$ obtenido [W]	T_{2int} [°C]
3	11	1,75	5,0	20,76	1.831	2.337	948
4	11	2,25	4,49	15,35	2.186	2.325	1078
5	11	2,8	4,75	13,04	2.622	2.340	1147

En la Tabla 4.18 se muestran los resultados obtenidos referidos al análisis de sensibilidad del parámetro r_{apc} , considerando $d_c = 4$ [m].

Tabla 4.18: Resultados obtenidos del análisis de sensibilidad del parámetro r_{apc} . (1200°C).

r_{apc} [m]	d_{r1} [cm]	r_1 [cm]	r_{apint} [cm]	r_{apext} [cm]	$\dot{Q}_{R,CSP1}$ requerido [W]	$\dot{Q}_{R,CSP1}$ obtenido [W]	T_{2int} [°C]	Área bruta de reflexión [m ²]
0,9	11	2,2	3,95	12,47	2.002	1.544	1.106	3,62
1,1	11	2,25	4,49	15,35	2.186	2.325	1078	5,42
1,3	11	2,3	5,06	18,48	2.381	3.264	1.045	7,59

Temperaturas alcanzadas

Los resultados obtenidos en cuanto a los factores de amplificación (ϕ) y r_{apc} para el análisis de las temperaturas de horno alcanzadas en un ciclo diario-anual se exhiben en la Tabla 4.19, Tabla 4.20 y Tabla 4.21.

Tabla 4.19: Resultados obtenidos para la opción de reajuste de la parábola, caso $r_{apc} = 0,9$ [m]. (1200°C).

Época del año	Factor amplificador (ϕ) [m ²]	r_{apc} [m]
Equinoccio	1,93	0,9
Solsticio de invierno	2,24	0,98
Solsticio de verano	1,52	0,79

Tabla 4.20: Resultados obtenidos para la opción de reajuste de la parábola, caso $r_{apc} = 1,1$ [m]. (1200°C).

Época del año	Factor amplificador (ϕ) [m ²]	r_{apc} [m]
Equinoccio	2,91	1,1
Solsticio de invierno	3,38	1,2
Solsticio de verano	2,27	0,97

Tabla 4.21: Resultados obtenidos para la opción de reajuste de la parábola, caso $r_{apc} = 1,3$ [m]. (1200°C).

Época del año	Factor amplificador (ϕ) [m ²]	r_{apc} [m]
Equinoccio	4,08	1,3
Solsticio de invierno	4,77	1,41
Solsticio de verano	3,18	1,14

Los resultados obtenidos en cuanto a la temperaturas de horno (T_{horno}) alcanzada en los ciclos diarios-anales se exhiben en la Figura 4.37, Figura 4.38 y Figura 4.39.

	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
Enero	0	0	866,5	965,2	1039	1061	1070	1076	1061	1043	966,3	907,2	866	814,7	664,6	0
Febrero	0	0	862,6	998,1	1068	1102	1106	1113	1090	1072	983,8	926,4	863,6	851,9	424,8	0
Marzo	0	0	827,8	1057	1128	1149	1155	1158	1154	1148	1118	1077	1006	935,6	0	0
Abril	0	0	0	1046	1130	1158	1169	1171	1168	1167	1152	1118	1061	643	0	0
Mayo	0	0	0	1059	1142	1170	1184	1192	1190	1183	1161	1129	1050	0	0	0
Junio	0	0	0	1040	1137	1185	1195	1211	1206	1199	1170	1129	1046	0	0	0
Julio	0	0	0	1019	1121	1164	1176	1179	1176	1172	1150	1112	1048	0	0	0
Agosto	0	0	0	1041	1123	1151	1158	1164	1158	1152	1135	1113	1059	569,7	0	0
Septiembre	0	0	825,6	1065	1121	1144	1149	1147	1132	1132	1123	1102	1059	861,8	0	0
Octubre	0	0	982,6	1076	1109	1118	1126	1127	1124	1124	1101	1073	1036	903,8	0	0
Noviembre	0	540,2	975,3	1058	1082	1094	1096	1100	1100	1091	1083	1066	1028	940,5	0	0
Diciembre	0	427,7	909	1005	1037	1048	1057	1062	1054	1042	1020	992,4	960,7	903	447,5	0

Figura 4.37: Ciclo diario-anual de T_{horno} para la opción de reajuste de la parábola, caso $r_{apc} = 0,9$ [m]. (1200°C).

	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
Enero	0	0	993,8	1094	1169	1191	1201	1207	1192	1173	1095	1035	993,3	940,8	784,5	0
Febrero	0	0	990,5	1128	1199	1234	1238	1245	1222	1203	1114	1056	991,6	979,6	519,4	0
Marzo	0	0	955,4	1189	1261	1283	1288	1291	1287	1281	1251	1209	1137	1066	0	0
Abril	0	0	0	1178	1263	1291	1303	1305	1302	1301	1286	1251	1193	762,9	0	0
Mayo	0	0	0	1192	1276	1304	1318	1327	1325	1318	1295	1263	1182	0	0	0
Junio	0	0	0	1172	1271	1320	1330	1346	1341	1335	1305	1263	1179	0	0	0
Julio	0	0	0	1151	1254	1298	1311	1314	1310	1307	1284	1245	1180	0	0	0
Agosto	0	0	0	1173	1256	1285	1292	1298	1292	1286	1268	1246	1191	683,8	0	0
Septiembre	0	0	953,1	1197	1254	1277	1282	1280	1265	1265	1256	1234	1191	990,3	0	0
Octubre	0	0	1113	1208	1241	1251	1258	1259	1256	1257	1232	1204	1167	1033	0	0
Noviembre	0	650	1105	1188	1212	1225	1227	1231	1232	1222	1214	1196	1158	1069	0	0
Diciembre	0	521,9	1036	1134	1167	1177	1187	1191	1184	1171	1149	1121	1089	1030	544,8	0

Figura 4.38: Ciclo diario-anual de T_{horno} para la opción de reajuste de la parábola, caso $r_{apc} = 1,1$ [m]. (1200°C).

	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
Enero	0	0	1086	1187	1262	1285	1294	1300	1285	1266	1188	1128	1085	1033	874,8	0
Febrero	0	0	1083	1222	1294	1329	1333	1340	1316	1297	1207	1149	1084	1072	599,9	0
Marzo	0	0	1049	1284	1356	1378	1384	1387	1383	1377	1346	1304	1232	1159	0	0
Abril	0	0	0	1273	1359	1388	1400	1401	1398	1397	1382	1347	1288	854,5	0	0
Mayo	0	0	0	1288	1373	1401	1415	1424	1422	1415	1392	1359	1278	0	0	0
Junio	0	0	0	1268	1368	1418	1428	1444	1439	1432	1402	1360	1275	0	0	0
Julio	0	0	0	1246	1351	1395	1408	1411	1407	1404	1380	1342	1276	0	0	0
Agosto	0	0	0	1268	1352	1381	1388	1394	1388	1382	1364	1342	1286	773,5	0	0
Septiembre	0	0	1046	1292	1349	1373	1377	1376	1361	1361	1351	1330	1286	1084	0	0
Octubre	0	0	1206	1302	1336	1345	1353	1354	1351	1351	1327	1299	1261	1126	0	0
Noviembre	0	737	1197	1282	1306	1319	1321	1325	1325	1316	1308	1290	1251	1162	0	0
Diciembre	0	601,3	1128	1226	1259	1270	1279	1284	1276	1263	1241	1213	1181	1122	625,8	0

Figura 4.39: Ciclo diario-anual de T_{horno} para la opción de reajuste de la parábola, caso $r_{\text{apc}} = 1,3$ [m]. (1200°C).

Análisis transiente

En la Tabla 4.22 se presentan los resultados obtenidos en cuanto al análisis transiente realizado.

Tabla 4.22: Resultados del análisis transiente. (1200°C).

r_{apc} [m]	$t_{\text{transiente}}$ [min]
0,9	7,35
1,1	5,55
1,3	4,38

En cuanto al análisis de los parámetros al considerando una temperatura objetivo de 1200°C, se aprecia que el comportamiento mostrado es bastante similar al caso de 1500°C. Si bien es cierto que los valores que optimizan el sistema no son los mismos, al variar los parámetros en ambos modelos se nota un comportamiento similar.

Se destaca también que, en los tres ciclos diario-anual obtenidos del análisis considerando una temperatura objetivo de 1200°C se alcanza dicha temperatura en al menos una hora en un mes del año, al igual que en el análisis realizado con los 1500°C. Además, en dos de ellos se supera ampliamente el objetivo de alcanzar dicha temperatura a dos horas del mediodía solar, para casi todos los meses del año.

Es importante notar que a pesar de disminuir considerablemente la magnitud de las áreas brutas de reflexión en el análisis a 1200°C respecto del de 1500°C, las temperaturas de horno (T_{horno}) alcanzadas son levemente menor. Esto se explica debido a que las mayores pérdidas del receptor

ocurren por medio de radiación hacia la atmósfera. Como lo sugiere la ecuación (2.23), las pérdidas por radiación son proporcionales a la cuarta potencia de la temperatura. Dicho esto, es que, para aumentar en un porcentaje la temperatura del sistema, se requiere que el calor suministrado aumente en una mayor proporción.

Para poder determinar si los resultados obtenidos cumplen el objetivo de ser considerados de pequeña escala, estos se contrastan con los de algunos hornos existentes. Para la geometría más grande utilizada, la cual corresponde a $d_c = 5 [m]$ y $r_{apc} = 2,5 [m]$, se obtiene un área bruta de reflexión igual a $28,35 [m^2]$. Este valor se encuentra muy por debajo de otros hornos: el horno solar de Odeillo tiene un área bruta de reflexión cercana a los $2500 [m^2]$, el horno solar de Mont Louis de $160 [m^2]$ y los hornos solares SF-40 y SF-60 de Almería $56,2 [m^2]$ y $99,8 [m^2]$ respectivamente. Cabe mencionar que ya los hornos de Almería son considerados de mediana escala.

En cuanto a la potencia térmica del horno, y también considerando la geometría más grande diseñada, se encuentra que es de un valor de $12 [kW]$. Por su parte, el resto de los hornos a los que se ha comparado poseen: Odeillo tiene potencia térmica de $1000 [kW]$, el horno solar de Mont Louis de $50 [kW]$ y los hornos solares SF-40 y SF-60 de Almería $40 [kW]$ y $69 [kW]$ respectivamente.

Por tanto, se puede aseverar que, de los diseños evaluados, aún el más grande, se considera de pequeña escala.

Finalmente, es importante recalcar que las temperaturas de horno obtenidas son temperaturas de diseño, y difícilmente se alcancen dichos valores en caso de implementar el horno. Por un lado, las ecuaciones utilizadas no caracterizan todos los fenómenos que interactúan en la realidad y, por otro lado, en el proceso de construcción y operación siempre pueden existir errores adicionales, como lo son desalineamientos, fugas, etcétera. Por tanto, las temperaturas obtenidas no deben ser interpretadas como un valor preciso de la temperatura real del horno. No obstante, los resultados debiesen entregar una buena aproximación, y se pueden utilizar como temperaturas de referencia.

5 Conclusiones

Para avanzar en el estudio de sistemas de concentración solar, en particular los de alta temperatura, es deseable desarrollar prototipos de pequeña escala. Al ser de pequeña escala se facilita la fabricación de dichos prototipos, y, por tanto, es factible comparar el desempeño real con el desempeño teóricamente calculado, sin requerir de una gran inversión de capital. Es en esta línea de investigación en la cual se enmarca el trabajo realizado: el diseño de un horno solar de pequeña escala, capaz de alcanzar temperaturas de trabajo en un rango entre 1.200-1.500 [°C], con reflector único y receptor fijo.

5.1 Conclusiones generales

El objetivo principal de la presente memoria consistió en el “*diseño conceptual de un horno solar de alta temperatura, de segmento de paraboloides móvil, con receptor fijo, de pequeña escala, pensado para ser utilizado en alguna región de Chile*”. Respecto a él, se puede concluir que:

El diseño conceptual del horno queda bien definido. En la Figura 5.1 se muestra un esquema general del diseño propuesto. En ella se pueden distinguir dos elementos principales, el concentrador y el receptor. En cuanto al concentrador, este corresponde a un reflector tipo Scheffler. A su vez, se indica que el receptor está inmóvil respecto de la tierra (receptor fijo), y, por tanto, es el concentrador el que realiza el seguimiento solar necesario en todas las tecnologías de concentración.

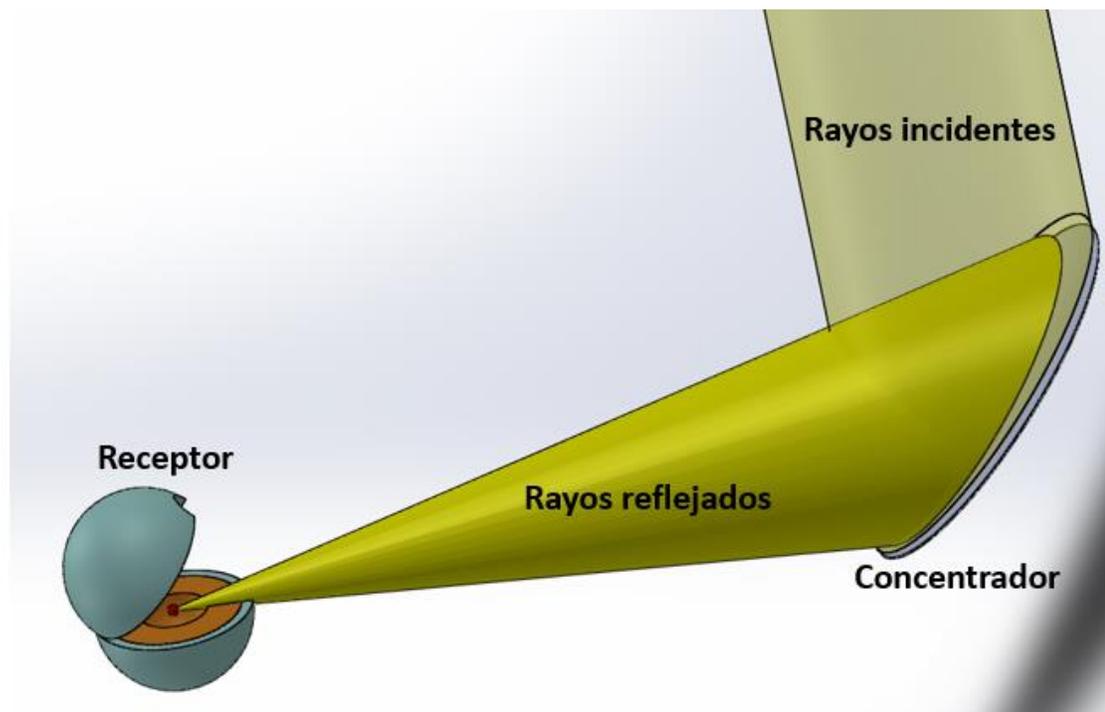


Figura 5.1: Esquema general del horno diseñado.

Como en todas las tecnologías de CS, el diseño del horno presenta dos grandes desafíos: el resolver un problema de índole óptico (cómo redirijo la radiación a la zona focal) y otro de índole térmico (cómo aprovecho la energía incidente en la zona focal). Si bien está interrelacionada la resolución de ambos problemas, de la Figura 5.1 se puede apreciar que los parámetros del concentrador determinan principalmente el problema en su aspecto óptico, mientras que los parámetros del receptor determinan mayoritariamente el aspecto térmico del horno.

En cuanto al lugar de diseño, se elige la localidad de San Pedro de Atacama, ubicado en la zona norte de Chile, cuya latitud es de $-22,91^\circ$. La selección de dicha localidad está sustentada en el hecho que las temperaturas alcanzadas en San Pedro permiten el trabajo de cocción de cerámicas. De esta forma, y considerando el potencial turístico de la zona, el horno diseñado podría ser de utilidad para potenciar la microindustria alfarera.

Respecto del tamaño, se proponen siete alternativas diferentes, los cuales varían entre 3,62-28,43 [m²] en cuanto a su superficie bruta de reflexión (área del espejo del concentrador). Por otro lado, la potencia térmica varía entre 1,5-12 [kW], siendo la menor de ellas la correspondiente al concentrador más pequeño y la mayor al concentrador más grande. Teniendo en cuenta el tamaño y la potencia utilizada en las opciones propuestas, éstas se pueden considerar de pequeña escala. Por último, se destaca que las temperaturas de diseño máximas alcanzadas por los prototipos varían entre 1.211-1.727[°C], cumpliendo con el objetivo de ser hornos de alta temperatura.

5.2 Conclusiones específicas

A continuación se enlistan los objetivos específicos de la memoria realizada:

- Realizar un estudio bibliográfico del estado del arte de los hornos y concentradores solares, en particular los de tipo segmento de paraboloide.
- Diseñar la ingeniería conceptual del prototipo, definiendo sus dimensiones principales y su mecanismo de seguimiento solar.
- Simular el comportamiento óptico del sistema mediante el uso de programas computacionales de trazado de rayos.
- Simular el comportamiento térmico del sistema mediante el desarrollo de un modelo térmico en el receptor.
- Selección de materiales del receptor.
- Se pretende alcanzar temperaturas en la zona focal entre 1.200°C-1.500°C desde dos horas antes a dos horas después del mediodía solar.

Respecto a ellos se puede concluir que:

Diseñar la ingeniería conceptual del prototipo, definiendo sus dimensiones principales y su mecanismo de seguimiento solar:

La ingeniería conceptual del horno queda bien definida y se ilustran en la Figura 5.1. La Figura 5.2 muestra de manera más detallada el diseño del receptor. La movilidad del sistema es la propia de cualquier concentrador Scheffler, la cual considera una rotación para el seguimiento solar y un cambio en la geometría del paraboloide para cada época del año.

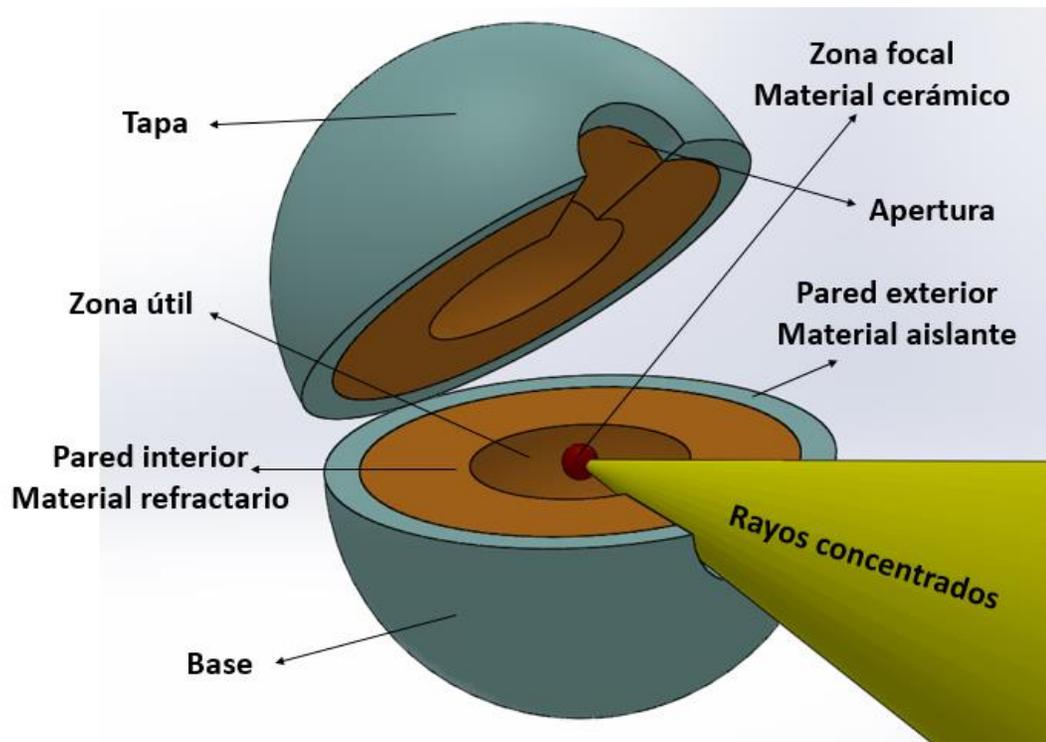


Figura 5.2: Diseño propuesto para el receptor.

Simular el comportamiento óptico del sistema mediante el uso de programas computacionales de trazado de rayos.

El diseño fue simulado en su aspecto óptico por medio del software SolTrace. En dicha simulación se modeló el concentrador como un concentrador Scheffler perfectamente continuo. La Figura 5.3 esquematiza una de las simulaciones realizadas en el software.

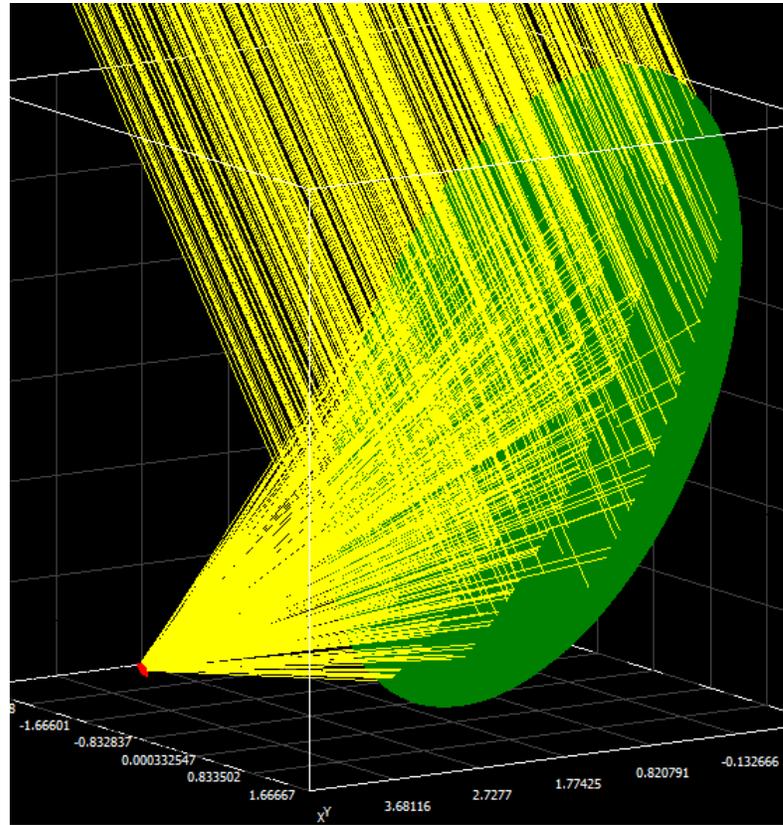


Figura 5.3: Simulación del comportamiento óptico del horno.

Del análisis óptico se desprenden que son dos los factores que determinan la concentración en el receptor: la distancia entre el concentrador y el receptor (d_c , que a fin de cuentas determina la concavidad del concentrador), y la apertura del concentrador (r_{apc}). La Figura 5.4 ilustra dichos parámetros. En cuanto a la concentración en la zona focal, esta aumenta fuertemente con el crecimiento de r_{apc} , mientras que dicha concentración es prácticamente insensible a d_c . Por el contrario, el radio de concentración de la zona focal aumenta fuertemente con el crecimiento del parámetro d_c y en menor medida con el aumento del parámetro r_{apc} .

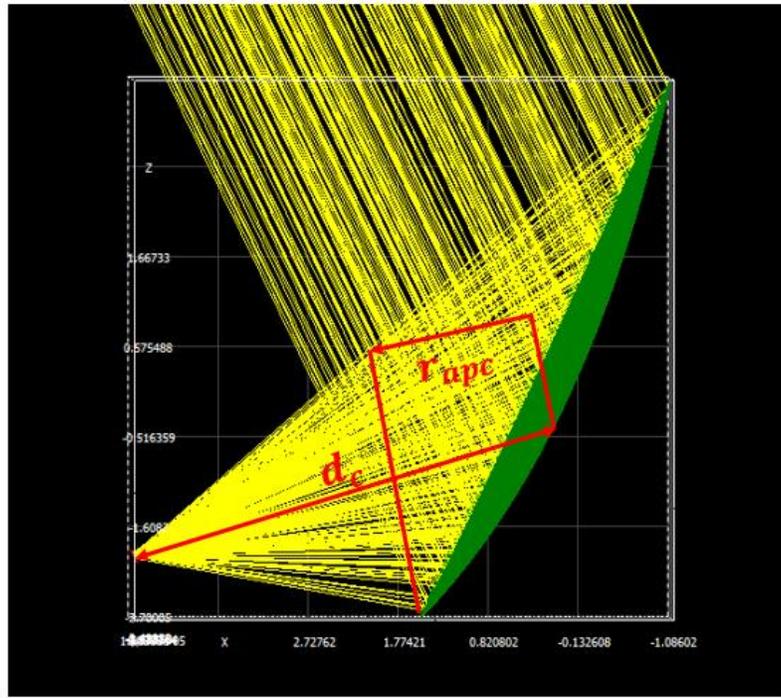


Figura 5.4: Parámetros que definen el concentrador.

Simular el comportamiento térmico del sistema mediante el desarrollo de un modelo térmico en el receptor.

El diseño fue simulado en su parte térmica por medio de un modelo térmico desarrollado por el autor. Dicho modelo relaciona las transferencias de calor en el receptor con el calor suministrado por el concentrador. Para poder resolver el modelo, se utilizó el software Maple. En cuanto a los resultados obtenidos del modelo térmico, se aprecia que las pérdidas más importantes del sistema son las pérdidas por radiación desde el interior del horno hacia el ambiente. A su vez, se encuentra que dichas pérdidas están estrechamente relacionadas con el tamaño de la apertura del receptor (Figura 5.2).

Considerando las relaciones obtenidas tanto del análisis óptico como térmico del sistema, se llega a que la determinación de los parámetros tanto del receptor como del concentrador están sujetas a una problemática: aumentar la apertura del concentrador genera mayor concentración en la zona focal, pero a la vez produce un mayor tamaño de la zona focal y, por ende, en la apertura del receptor. Esto último se traduce en mayores pérdidas de calor por parte del receptor. Dicho esto, la selección de los parámetros que optimizan el problema no es para nada trivial. La Tabla 5.1 expresa algunos de los valores obtenidos para la problemática mencionada. Para la interpretación de dicha tabla se debe considerar que el factor amplificador está directamente relacionado con la concentración en la zona focal, mientras que la potencia requerida está directamente relacionada con las pérdidas del horno.

Tabla 5.1: Relación entre el factor amplificador y la potencia requerida para alcanzar los 1.500[°C].

Radio de apertura del concentrador r_{apc} [m]	Factor amplificador (ϕ) [m^2]	Radio de apertura del receptor (r_{apint}) [cm]	Potencia requerida [W]
1,4	4,69	5,74	3.750
1,75	7,32	6,77	5.857
2	9,52	7,61	7.019
2,5	15	9,69	12.000

Selección de materiales del receptor:

Como se aprecia en la Figura 5.2, el receptor cuenta de tres componentes principales: en la parte central se encuentra la zona focal, la cual está resguardada por dos paredes de aislantes. Para la zona focal se elige un material cerámico (Carburo de Silicio CSi), debido a su resistencia a temperaturas muy elevadas. Para la pared aislante interior se selecciona el refractario JM30 160 1.0L, debido a sus buenas propiedades como aislante a altas temperaturas. Finalmente, para la pared aislante exterior se escoge la Lana Mineral 100 [kg/m³], debido a ser considerado un excelente aislante.

Se pretende alcanzar temperaturas en la zona focal entre 1.200°C-1.500°C desde dos horas antes a dos horas después del mediodía solar:

Para el cumplimiento de este objetivo se desarrollaron dos modelos por separado, el primero considerando una temperatura objetivo de 1.500°C y el segundo considerando una temperatura objetivo de 1.200°C. Para el primer modelo se proponen 4 configuraciones diferentes, mientras que para el segundo 3. Los resultados obtenidos para ambos modelos indican que se logra alcanzar temperaturas entre 1.200°C-1.500°C a dos horas antes y después del mediodía solar. Cabe mencionar que, en el diseño con temperatura objetivo de 1.500°C, se alcanzan dichas temperaturas para todos los meses del año, en las 4 configuraciones propuestas. Por contraparte, el segundo modelo alcanza dicho rango de temperaturas para toda época del año en solo una configuración, mientras que las restantes lo cumplen en un 92% y 17% del calendario anual. A modo de ejemplo, la Figura 5.5 esquematiza el ciclo diario-anual para una de las configuraciones con temperatura objetivo de 1.500 [°C].

	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
Enero	0	0	1230	1332	1409	1432	1441	1448	1432	1413	1334	1272	1229	1176	1017	0
Febrero	0	0	1228	1369	1441	1477	1481	1489	1465	1445	1354	1294	1229	1217	736,1	0
Marzo	0	0	1193	1432	1506	1528	1534	1537	1533	1527	1496	1452	1379	1305	0	0
Abril	0	0	0	1422	1509	1539	1551	1553	1550	1548	1533	1497	1437	997,5	0	0
Mayo	0	0	0	1437	1524	1553	1568	1577	1575	1567	1544	1510	1427	0	0	0
Junio	0	0	0	1418	1520	1571	1581	1598	1593	1586	1555	1512	1425	0	0	0
Julio	0	0	0	1395	1502	1547	1560	1563	1560	1556	1532	1493	1425	0	0	0
Agosto	0	0	0	1416	1502	1532	1539	1546	1540	1533	1515	1492	1435	915,6	0	0
Septiembre	0	0	1191	1440	1499	1523	1528	1526	1511	1511	1501	1479	1434	1228	0	0
Octubre	0	0	1352	1450	1484	1494	1502	1503	1500	1500	1475	1447	1408	1271	0	0
Noviembre	0	877,3	1343	1429	1454	1467	1469	1473	1473	1464	1456	1437	1398	1307	0	0
Diciembre	0	737	1272	1371	1405	1416	1426	1430	1423	1410	1387	1358	1326	1266	762,6	0

Figura 5.5: Ciclo diario-anual de la temperatura del horno para el modelo con temperatura objetivo de 1.500[°C], configuración $r_{apc} = 2$ [m].

Se destaca que la temperatura máxima alcanzada por la configuración de mayor tamaño es tan solo un 42% mayor que a la configuración más pequeña. Por otro lado, la potencia térmica requerida por el de mayor tamaño es prácticamente un 800% la del tamaño menor (prácticamente la misma relación con las áreas brutas de reflexión). Esto evidencia que las pérdidas dominantes en el horno son las pérdidas por radiación, las cuales están relacionadas con la cuarta potencia de la temperatura (ley de Stefan-Boltzmann). Es por esto que, para aumentar en un pequeño porcentaje la temperatura del horno se requiere de un enorme aumento porcentual en el tamaño del concentrador, o, dicho de otro modo, un aumento gigante en la potencia térmica que se le debe suministrar al receptor.

Ambos diseños alcanzan las más altas temperaturas en los meses de invierno, disminuyendo su desempeño en los meses de verano. Esto debido a que el cambio diario en la geometría del concentrador Scheffler genera sus mayores factores amplificadores en las fechas invernales, y los peores coeficientes amplificadores en verano. Dicho cambio es tan pronunciado que es capaz de revertir el aumento de la radiación incidente en los meses de verano, dando como resultado el fenómeno mencionado.

Se recalca que las temperaturas obtenidas no deben ser consideradas como un resultado de precisión. Estas deben ser consideradas como temperaturas de diseño, y, por lo tanto, son un valor referencial. Esto obedece a que el modelo utilizado es simplemente una aproximación de los fenómenos que realmente ocurren en el horno, y por lo tanto se debe tener en cuenta sus limitaciones.

5.3 Comentarios finales y sugerencias para trabajos futuros.

Se puede concluir que, para temperaturas entre los 1.000-1.200 [°C], los concentradores Scheffler representa una opción viable y atractiva, requiriéndose para esto un área bruta de reflexión del orden de los 5 [m²] y una potencia del orden de 2 [kW].

Por contraparte, para llegar a temperaturas iguales o superiores a los 1.500 [°C], la alternativa de utilizar un concentrador tipo Scheffler pierde sentido. Esto se concluye debido que para llegar a los 1.500 [°C], lo cual se logra solo en algunas de las configuraciones propuestas, se requieren alrededor 20 [m²] de reflector y 10 [kW] de potencia. Considerando que a dicha área de reflexión se le incorpora el mecanismo de seguimiento solar, es que se hace inviable la construcción y operación de un concentrador Scheffler más grande, lo cual permitiría mayores temperaturas en la zona focal. Adicionalmente se suma que en los modelos ópticos realizados se ha considerado un concentrador Scheffler perfectamente continuo, lo cual sería muy complejo siquiera acercarse a dicho supuesto en la realidad, teniendo en cuenta el reajuste diario que requiere un concentrador de este tipo.

Finalmente se comenta el trabajo que queda propuesto: en primer lugar, se debe encontrar un material con buenas propiedades reflectantes, y que además sea capaz de resistir las deformaciones propias del cambio de geometría del concentrador Scheffler. A su vez se debe diseñar el sistema mecánico capaz de entregar la rotación que el concentrador necesita. Por último, y en caso de haber superado las dificultades anteriores con éxito, se debe desarrollar la ingeniería de detalle y eventual construcción de un prototipo.

6 Bibliografía

- [1] T. Africa, Archimedes through the Looking Glass, 1975.
- [2] Storytelling Teaching Model, The Soul of Solar Energy: Augustin Mouchot.
- [3] M. C. Pereira, The Pyrheliophoro, a highly innovative, high temperature, high concentration optical system at the turn of the nineteenth century, Lisboa.
- [4] K. Butti y J. Perlin, A Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology, Primera ed., Palo Alto: Cheshire Books, 1980.
- [5] J. Krane, An expensive diversion: Abu Dhabi's, 2014.
- [6] M. Günther y R. Shahbazfar, Advanced CSP Teaching Materials - Chapter 7 - Solar Dish Technology.
- [7] J. Tonada, El oro solar y otras fuentes de energía, 1998.
- [8] P. Duwez, The solar furnace, 1956.
- [9] E. Galán y P. Aparicio, Materias primas para la industria cerámica, Sevilla, 2006.
- [10] BP Global, Statistical Review of World Energy June 2016, British Petroleum Global, 2016.
- [11] C. I. Menghi, Calentamiento Global: el riesgo oculto para la salud, Buenos Aires, 2007.
- [12] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Renewables 2017 Global Status Report, REN21, 2017.

- [13] Ministerio de Energía, Sistemas de torre solar. Estado y perspectiva., D. G. f. I. Zusammenarbeit, Ed., Santiago, 2014.
- [14] SBC Energy Institute, Factbook Concentrating Solar Power, La Haya, 2013.
- [15] J. Ruelas Ruiz, Diseño de un Concentrador Solar Acoplado a un Motor Stirling Fijo, California, 2011.
- [16] W. B. Stine y R. W. Harrigan, Solar Energy Fundamentals and Design with Computer Applications, New York, 1985.
- [17] Plataforma Solar de Almería, «www.psa.es,» [En línea]. Available: www.psa.es/es/instalaciones/hornos/sf60.php. [Último acceso: 1 Marzo 2018].
- [18] Y. Cengel, Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico, Tercera ed., McGraw-Hill, 2007.
- [19] P. F. Diez, «<http://files.pfernandezdiez.es/IngenieriaTermica/Tablas/PDFs/Tablas.pdf>,» [En línea]. Available: <http://files.pfernandezdiez.es/IngenieriaTermica/Tablas/PDFs/Tablas.pdf>. [Último acceso: 3 Marzo 2018].
- [20] «[http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/REFRACTARIOS.Tema2.Propiedades FISICAS.2009.2010.pdf](http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/REFRACTARIOS.Tema2.PropiedadesFISICAS.2009.2010.pdf),» [En línea]. [Último acceso: 3 Marzo 2018].
- [21] AYRSA, «<http://www.ayrsa.cl/wp-content/uploads/2016/08/Ficha-Lana-Mineral-Frazadas.pdf>,» [En línea]. [Último acceso: 3 Marzo 2018].

Anexo A

Código utilizado en Maple 2016 para resolver el sistema habiendo definido T_1 :

Variables

```
 $T_1 := 430 + 273.15 :$   
 $T_{amb} := 15 + 273.15 :$   
 $r_1 := 4.05 \cdot 0.01 :$   
 $r_{2\ int} := 20 \cdot 0.01 :$   
 $d_{r1} := 10 \cdot 0.01 :$   
 $e_2 := 30 \cdot 0.01 :$   
 $e_3 := 8 \cdot 0.01 :$   
 $r_{apint} := 9.6902 \cdot 0.01 :$   
 $r_{apext} := 38.7266 \cdot 0.01 :$   
 $r_{2\ ext} := r_{2\ int} + e_2 :$   
 $r_{3\ ext} := r_{2\ ext} + e_3 :$   
 $\sigma := 5.6 \cdot 10^{-8} :$   
 $\tilde{k}_2 := 0.38 :$   
 $\tilde{k}_3 := 0.058 :$   
 $\rho_1 := 0.2 :$   
 $\rho_2 := 0.3 :$   
 $\epsilon_1 := 0.78 :$   
 $\epsilon_2 := 0.38 :$   
 $\epsilon_3 := 0.1 :$   
 $\tilde{k}_{aire} := 0.02735 :$   
 $g := 9.8 :$   
 $\beta_{aire} := 3.67 \cdot 10^{-3} :$ 
```

$$\mu_{\text{aire}} := 1.963 \cdot 10^{-5} ;$$

$$c_{p \text{ aire}} := 1007 ;$$

$$\rho_{\text{aire}} := 1.092 ;$$

$$v_{\text{aire}} := \frac{\mu_{\text{aire}}}{\rho_{\text{aire}}} ;$$

$$r_{2 \text{ intmod}} := r_{2 \text{ int}} - d_{r1} ;$$

$$h_{\text{apint}} := r_{2 \text{ int}} - \sqrt{r_{2 \text{ int}}^2 - r_{\text{apint}}^2} ;$$

$$A_1 := 4 \cdot \text{Pi} \cdot r_1^2 ;$$

$$A_{\text{apint}} := 2 \cdot \text{Pi} \cdot r_{2 \text{ int}} \cdot h_{\text{apint}} ;$$

$$r_{3 \text{ extmod}} := r_{3 \text{ ext}} - d_{r1} ;$$

$$h_{\text{apext}} := r_{3 \text{ ext}} - \sqrt{r_{3 \text{ ext}}^2 - r_{\text{apext}}^2} ;$$

$$A_{\text{apext}} := 2 \cdot \text{Pi} \cdot r_{3 \text{ ext}} \cdot h_{\text{apext}} ;$$

$$A_{2 \text{ int}} := 4 \cdot \text{Pi} \cdot r_{2 \text{ int}}^2 - A_{\text{apint}} ;$$

$$A_{2 \text{ ext}} := 4 \cdot \text{Pi} \cdot r_{2 \text{ ext}}^2 - \left(A_{\text{apext}} \cdot \left(\frac{e_2}{e_3 + e_2} \right) + A_{\text{apint}} \cdot \left(\frac{e_3}{e_3 + e_2} \right) \right) ;$$

$$A_{3 \text{ ext}} := 4 \cdot \text{Pi} \cdot r_{3 \text{ ext}}^2 - A_{\text{apext}} ;$$

$$F_{12} := \frac{4 \cdot \text{Pi} \cdot r_{2 \text{ intmod}}^2 - A_{\text{apint}}}{4 \cdot \text{Pi} \cdot r_{2 \text{ intmod}}^2} ;$$

$$F_{1,A} := 1 - F_{12} ;$$

$$F_{21} := \frac{F_{12} \cdot A_1}{A_{2 \text{ int}}} ;$$

$$F_{2 \text{ int}A} := (1 - F_{21}) \cdot \left(\frac{A_{\text{apint}}}{A_{\text{apint}} + A_{2 \text{ int}}} \right) ;$$

$$F_{22} := 1 - (F_{21} + F_{2\text{int}A}) :$$

$$F_{3\text{ext}A} := 1 :$$

$$R_{23\text{eq}} := \frac{r_{2\text{ext}} - r_{2\text{int}}}{4 \cdot \text{Pi} \cdot r_{2\text{ext}} \cdot r_{2\text{int}} \cdot k_2} + \frac{r_{3\text{ext}} - r_{2\text{ext}}}{4 \cdot \text{Pi} \cdot r_{2\text{ext}} \cdot r_{3\text{ext}} \cdot k_3} :$$

Relaciones

$q_{R,22}$ en función de $q_{R,12}$:

$$q_{R,22} := \text{solve}\left(q_{R,22} = F_{22} \cdot \left(\epsilon_2 \cdot A_{2\text{int}} \cdot \sigma \cdot T_{2\text{int}}^4 + \rho_2 \cdot (q_{R,22} + q_{R,12})\right), q_{R,22}\right) :$$

$q_{R,21}$ en función de $q_{R,12}$:

$$q_{R,21} := \text{solve}\left(q_{R,12} = F_{12} \cdot \left(\epsilon_1 \cdot A_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4 + \rho_1 \cdot q_{R,21} + \rho_1 \cdot q_{R,\text{CSP}}\right), q_{R,21}\right) :$$

$q_{R,12}$ en función de $T_{2\text{int}}$:

$$q_{R,12} := \text{solve}\left(q_{R,21} = F_{21} \cdot \left(\epsilon_2 \cdot A_{2\text{int}} \cdot \sigma \cdot T_{2\text{int}}^4 + \rho_2 \cdot (q_{R,22} + q_{R,12})\right), q_{R,12}\right) :$$

$q_{R,21}$ en función de $T_{2\text{int}}$:

$$q_{R,21} := q_{R,21} :$$

$q_{R,1,A}$ en función de $T_{2\text{int}}$:

$$q_{R,1,A} := F_{1,A} \left(\epsilon_1 \cdot A_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4 + \rho_1 \cdot q_{R,21} \right) :$$

$q_{R,2 \text{ int}A}$ en función de $T_2 \text{ int}$:

$$q_{R,2 \text{ int}A} := F_{2 \text{ int}A} \left(\epsilon_2 \cdot A_2 \cdot \sigma \cdot T_2^4 \text{ int} + \rho_2 \cdot (q_{R,22} + q_{R,12}) \right) :$$

$q_{R,3 \text{ ext}A}$ en función de $T_3 \text{ ext}$:

$$q_{R,3 \text{ ext}A} := F_{3 \text{ ext}A} \left(\epsilon_3 \cdot A_3 \cdot \sigma \cdot T_3^4 \text{ ext} \right) :$$

$q_{C,3 \text{ ext}A}$ en función de $T_3 \text{ ext}$:

$$q_{C,3 \text{ ext}A} := \left(\frac{\dot{k}_{\text{aire}}}{2 \cdot r_3 \text{ ext}} \cdot \left(2 + \frac{0.589 \cdot \left(\frac{g \cdot \beta_{\text{aire}} \cdot (T_3 \text{ ext} - T_{\text{amb}}) \cdot (2 \cdot r_3 \text{ ext})^3 \cdot \mu_{\text{aire}} \cdot c_{p \text{ aire}}}{v_{\text{aire}}^2 \cdot \dot{k}_{\text{aire}}} \right)^{\left(\frac{1}{4}\right)}}{\left(1 + \left(\frac{0.469 \cdot \dot{k}_{\text{aire}}}{\mu_{\text{aire}} \cdot c_{p \text{ aire}}} \right)^{\left(\frac{9}{16}\right)} \right)^{\left(\frac{4}{9}\right)}} \right) \right) \cdot A_3 \text{ ext} \cdot (T_3 \text{ ext} - T_{\text{amb}}) :$$

$q_{Cd,2 \text{ int}3 \text{ ext}}$ en función de $T_2 \text{ int}$ y $T_2 \text{ ext}$:

$$q_{Cd,2 \text{ int}3 \text{ ext}} := \frac{(T_2 \text{ int} - T_3 \text{ ext})}{R_{23 \text{ eq}}} :$$

Resolver sistema:

$$T_2 \text{ int} := \text{solve}(q_{Cd,2 \text{ int}3 \text{ ext}} = q_{R,3 \text{ ext}A} + q_{C,3 \text{ ext}A}, T_2 \text{ int}) :$$

$$q_{R,CSP} := \text{solve}(q_{R,CSP} + q_{R,21} = q_{R,12} + q_{R,1,A} \cdot q_{R,CSP}) :$$

$$ST_{3 \text{ ext}} := \text{Roots}(q_{R,12} + q_{R,22} = q_{R,21} + q_{R,2 \text{ int}A} + q_{R,3 \text{ ext}A} + q_{C,3 \text{ ext}A} + q_{R,22} \cdot 0 \dots 1500)$$

$$T_3 \text{ ext} := ST_{3 \text{ ext}}[1] :$$

$$q_{R,CSP} := q_{R,CSP} :$$

$$T_2 \text{ ext} := \text{solve}\left(q_{Cd,2 \text{ int}3 \text{ ext}} = \frac{4 \cdot \text{Pi} \cdot r_3 \text{ ext} \cdot r_2 \text{ ext} \cdot k_3}{r_3 \text{ ext} - r_2 \text{ ext}} \cdot (T_2 \text{ ext} - T_3 \text{ ext}) \cdot T_2 \text{ ext} \right) :$$

Anexo B

Código utilizado en Maple 2016 para los parámetros b y d_f habiendo definido d_c :

$$r_{apc} := 2.5 :$$

$$\varphi := 22.9109 :$$

$$\delta := -23 :$$

$$\varphi_{rad} := \frac{\varphi \cdot \text{Pi}}{180.0} :$$

$$\delta_{rad} := \frac{\delta \cdot \text{Pi}}{180.0} :$$

$$\delta_2 := \frac{\text{Pi}}{2} - \delta_{rad} :$$

$$b := \text{solve}\left(0 = \left(\left(\frac{1}{4 \cdot d_f} \cdot (-2 \cdot \sin(\delta_2) \cdot d_c)^2\right) + (-2 \cdot \sin(\delta_2) \cdot d_c) \cdot b\right), b\right) :$$

$$d_{fsol} := \text{solve}\left(-\left(d_f - \left(d_c \cdot \cos(\delta_2)\right)\right) = \left(\frac{1}{4 \cdot d_f} \cdot (-\sin(\delta_2) \cdot d_c)^2\right) + (-\sin(\delta_2) \cdot d_c) \cdot b\right)$$

$$d_f := d_{fsol}[2]$$

$$a := \frac{1}{4 \cdot d_f}$$

$$b := b$$

$$yh_c := a \cdot r_{apc}^2 + b \cdot r_{apc}$$

$$yh_{c_2} := a \cdot r_{apc}^2 - b \cdot r_{apc}$$

Anexo C

Código utilizado para realizar un filtro en la zona focal en función del parámetro r_1 .

```
1      %%%%% GRAFICOS MODIFICADOS %%%%%
2
3 -    mh=150;
4 -    mw=150;
5 -    ph=0.1;
6 -    pw=0.1;
7 -    filtro=2|*0.01;
8 -    DNI=800;
9
10 -   potencia=0;
11 -   fmax=0;
12 -   fmin=1000000000;
13 -   contador=0;
14 -   DDatos=zeros (mw, mh) ;
15
16 -   mix=-(ph/2-(ph/(2*mh)));
17 -   mfx=-mix;
18 -   pasox=ph/mh;
19 -   Vx= mix:pasox:mfx;
20
21 -   miy=-(pw/2-(pw/(2*mw)));
22 -   mfy=-miy;
23 -   pasoy=pw/mw;
24 -   Vy= miy:pasoy:mfy;
```

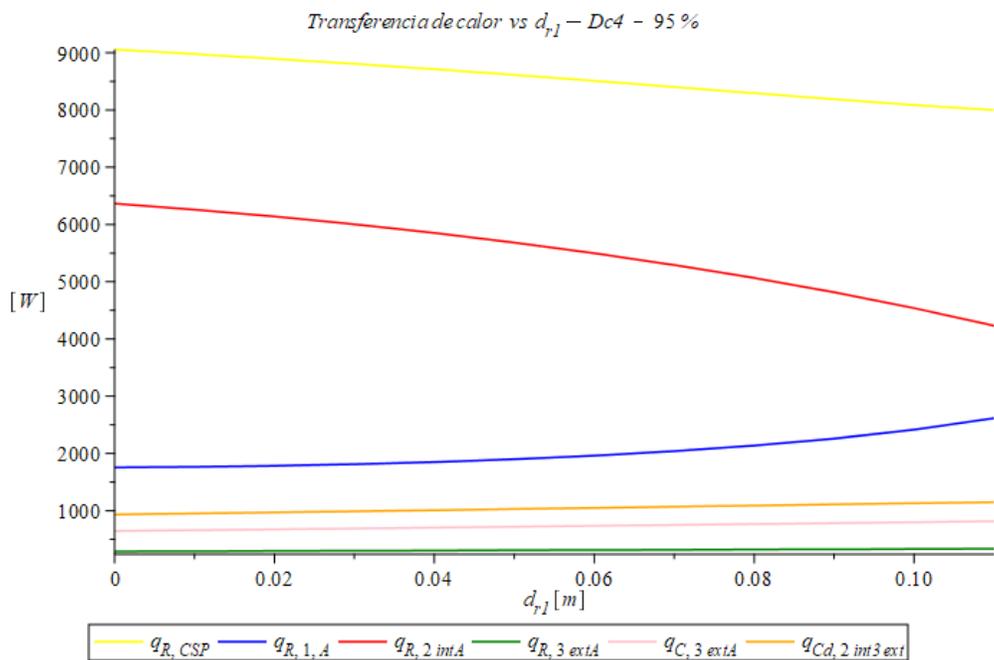
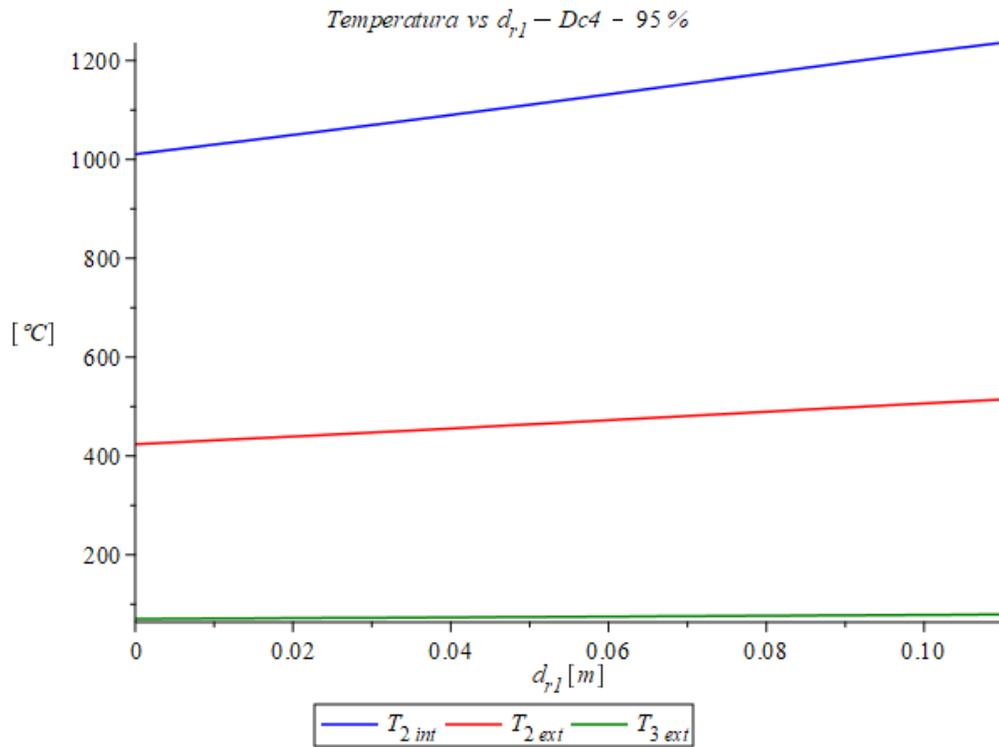
```

25
26 -   DDatosaux=importdata('Dc3-SanPedro.txt',' ',6);           % Importar los datos
27 -   for i= 1:mw
28 -       for j= 1:mh
29
30 -           P=DDatosaux.data(((j-1)*mw+i),:);
31 -           di=P(1);
32 -           dj=P(2);
33
34 -           if ((di^2+dj^2)^(0.5))<=filtro
35
36 -               DDatos(i,j)=(P(4)*DNI);
37
38 -               if (P(4)*DNI)>fmax
39 -                   fmax=(P(4)*DNI);
40 -               end
41
42 -               if (P(4)*DNI)<fmin
43 -                   fmin=(P(4)*DNI);
44 -               end
45
46 -               contador=contador+1;
47
48 -               potencia=potencia+(P(4)*DNI*pasox*pasoy);
49 -           end
50 -       end
51 -   end
52
53 -   fprom=potencia/(pasox*pasoy*contador)
54 -   fmax
55 -   fmin
56 -   potencia
57
58 -   surf(Vx,Vy,DDatos);
59 -   shading interp;
60 -   view(2);
61 -   colormap(jet);
62 -   title('Radiación incidente en zona focal');
63 -   xlabel('m'), ylabel('m'), zlabel('W/m^2');
64 -   colorbar;
65 -   axis([mix,mfx,miy,mfy]);

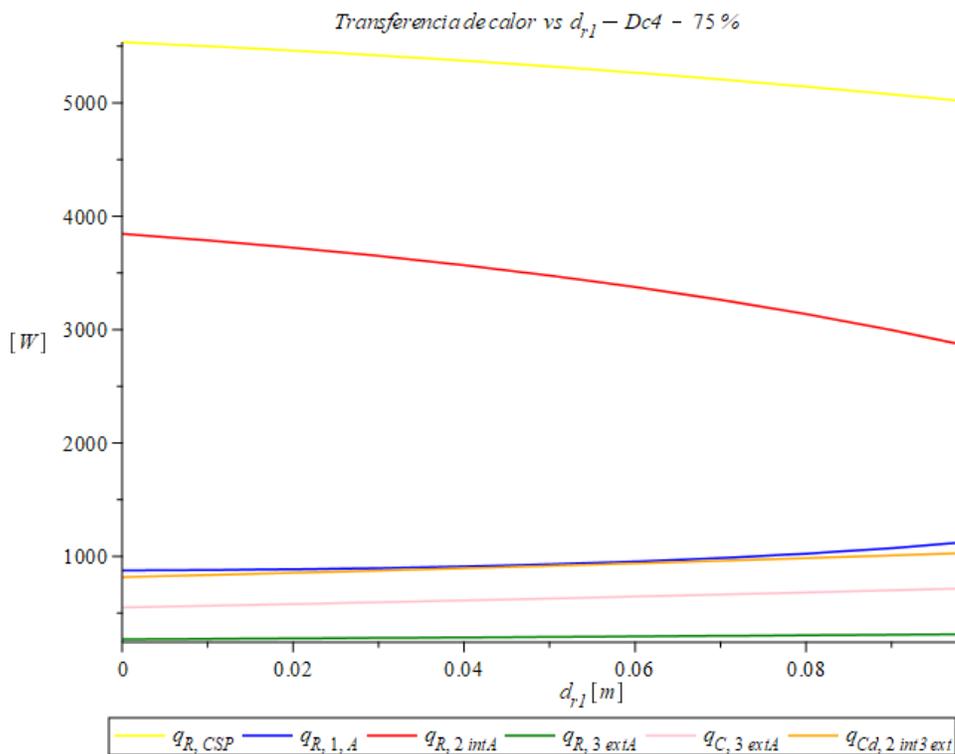
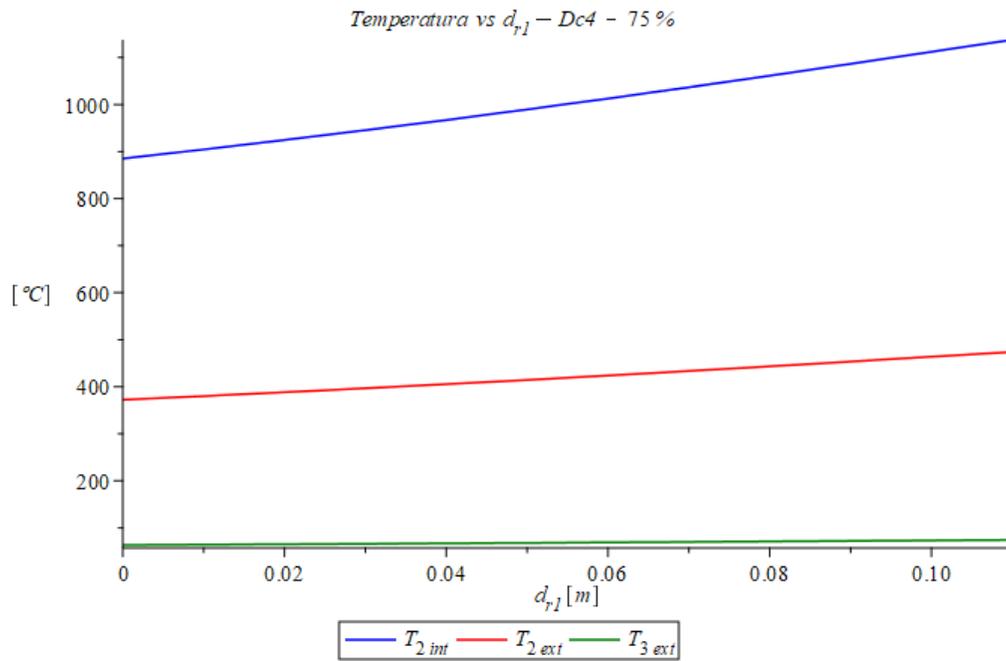
```

Anexo D

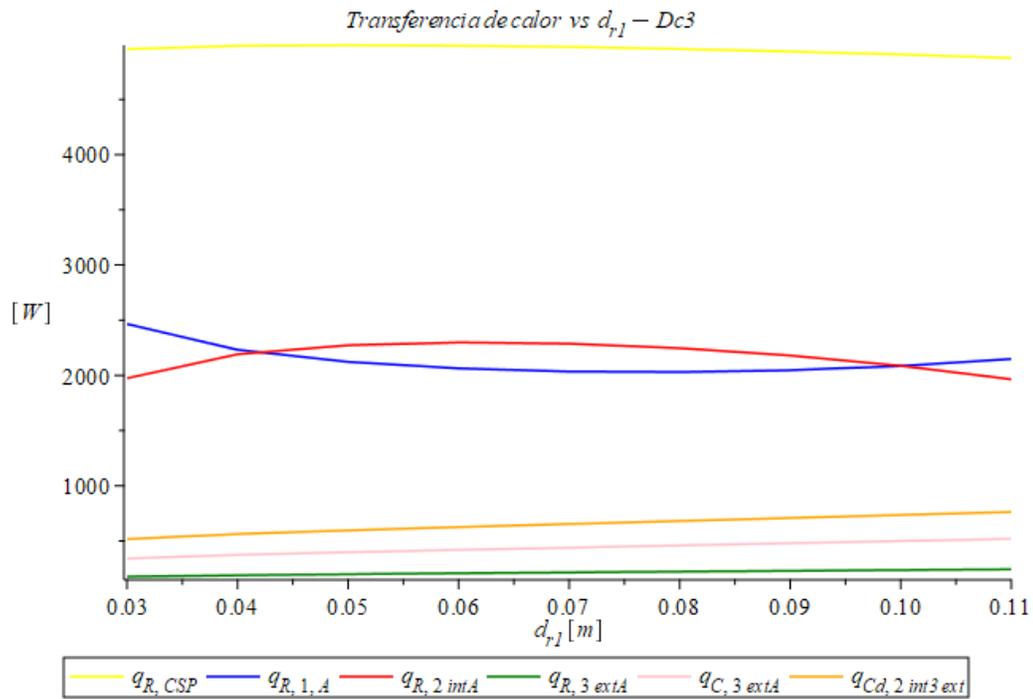
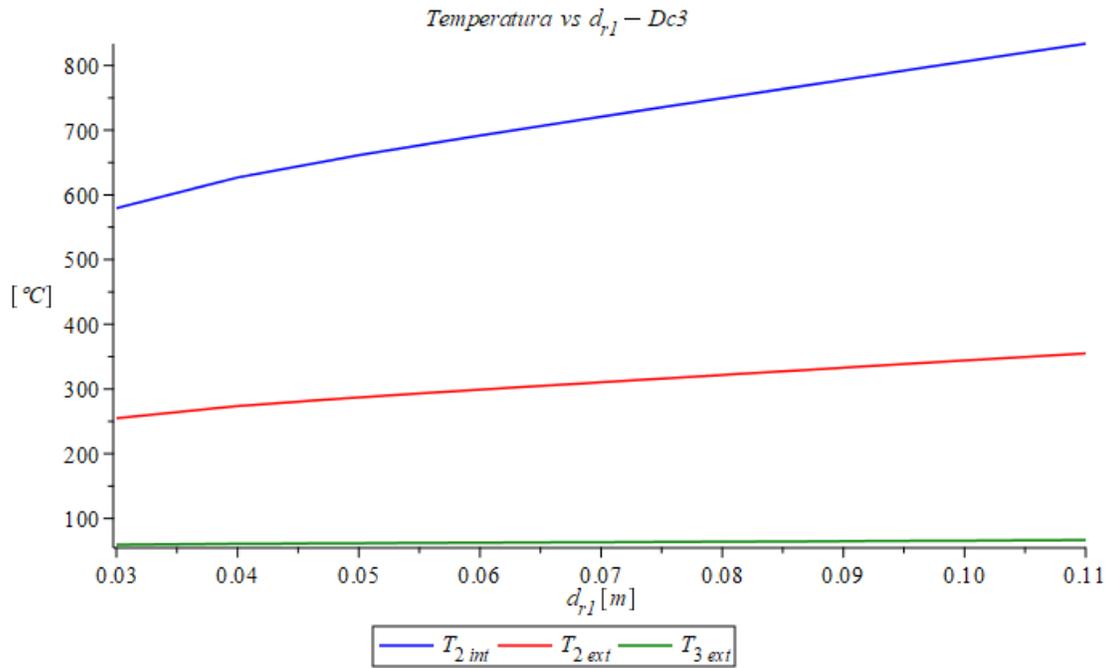
Análisis de sensibilidad del parámetro d_{r1} considerando una utilización del 95%.



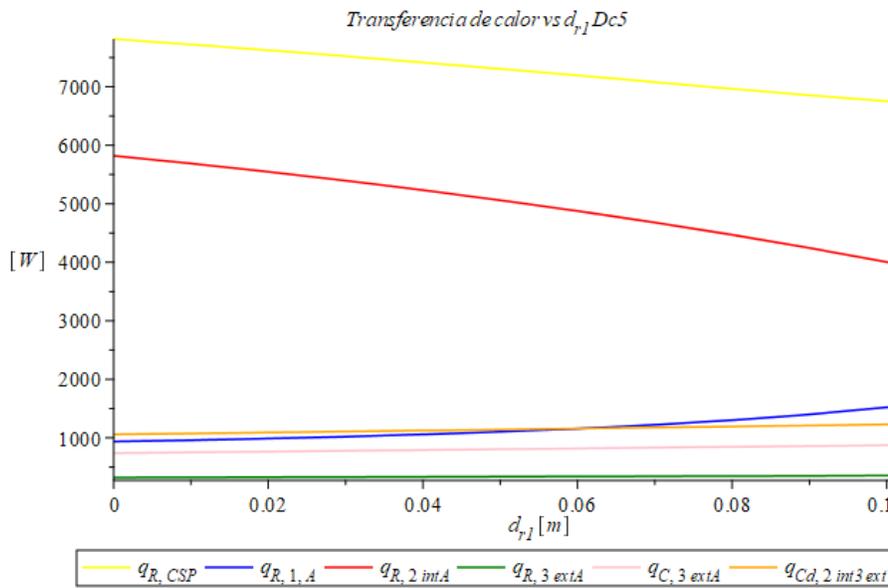
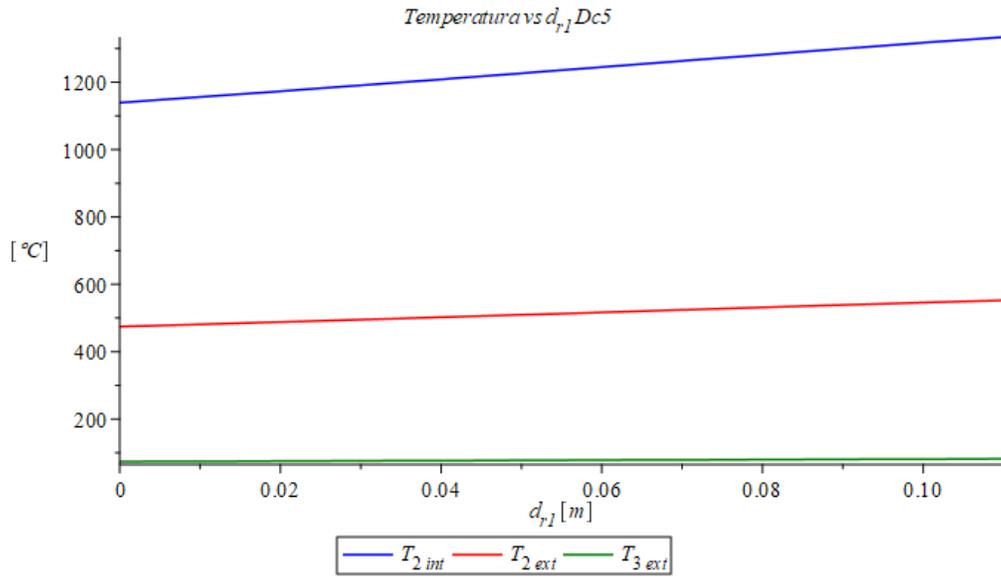
Análisis de sensibilidad del parámetro d_{r1} considerando una utilización del 75%.



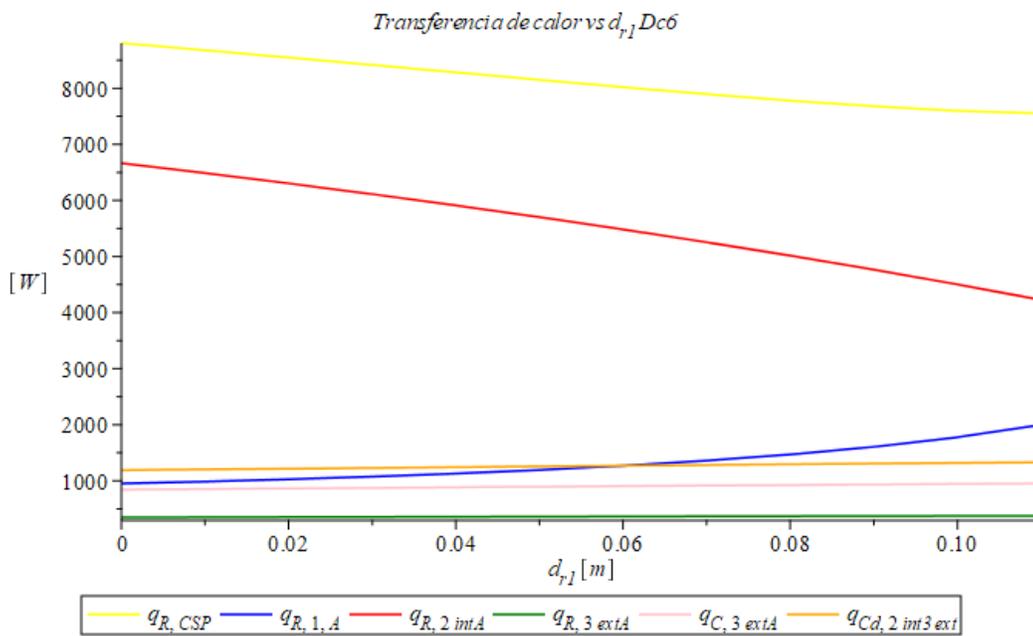
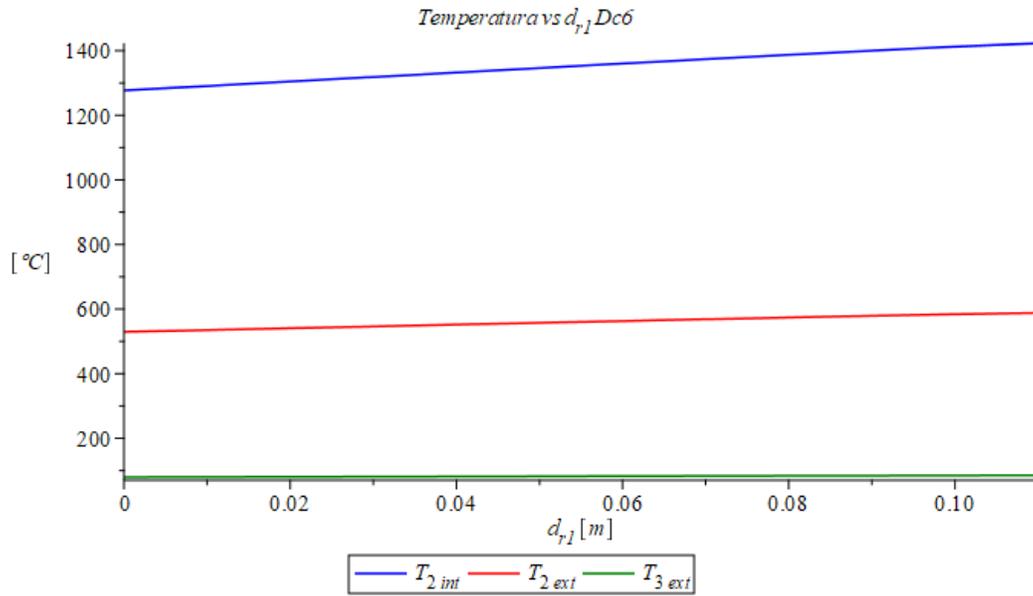
Análisis de sensibilidad del parámetro d_{r1} considerando $d_c = 3 [m]$.



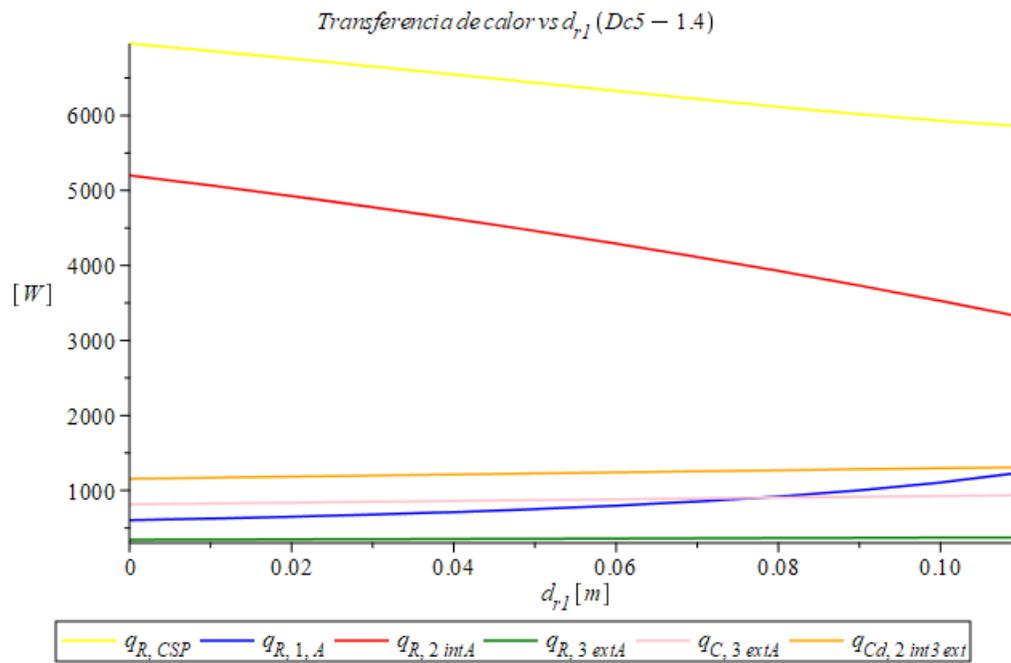
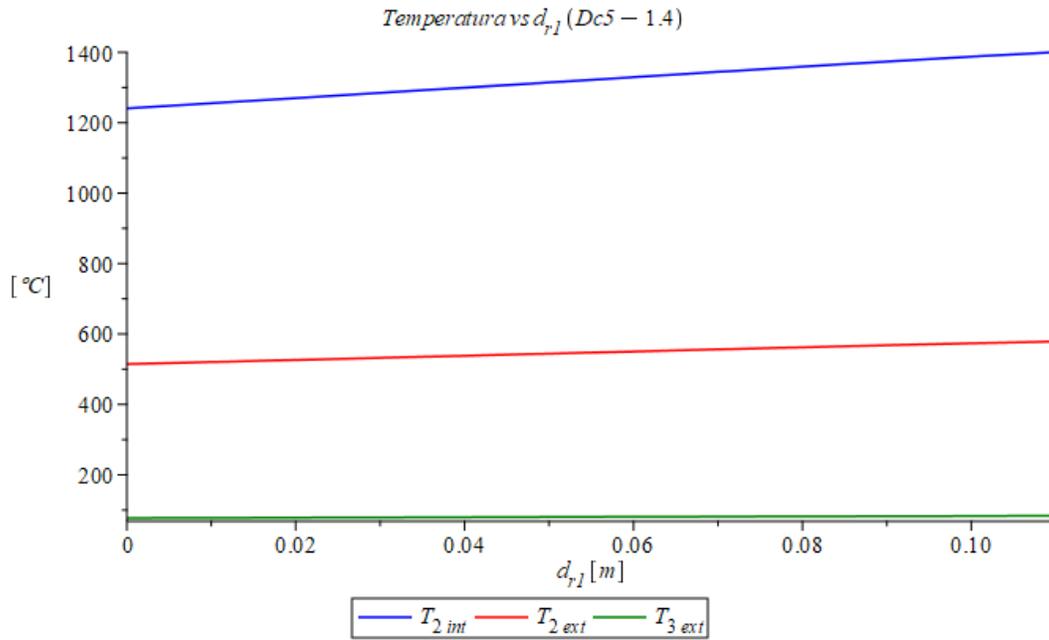
Análisis de sensibilidad del parámetro d_{r1} considerando $d_c = 5$ [m].



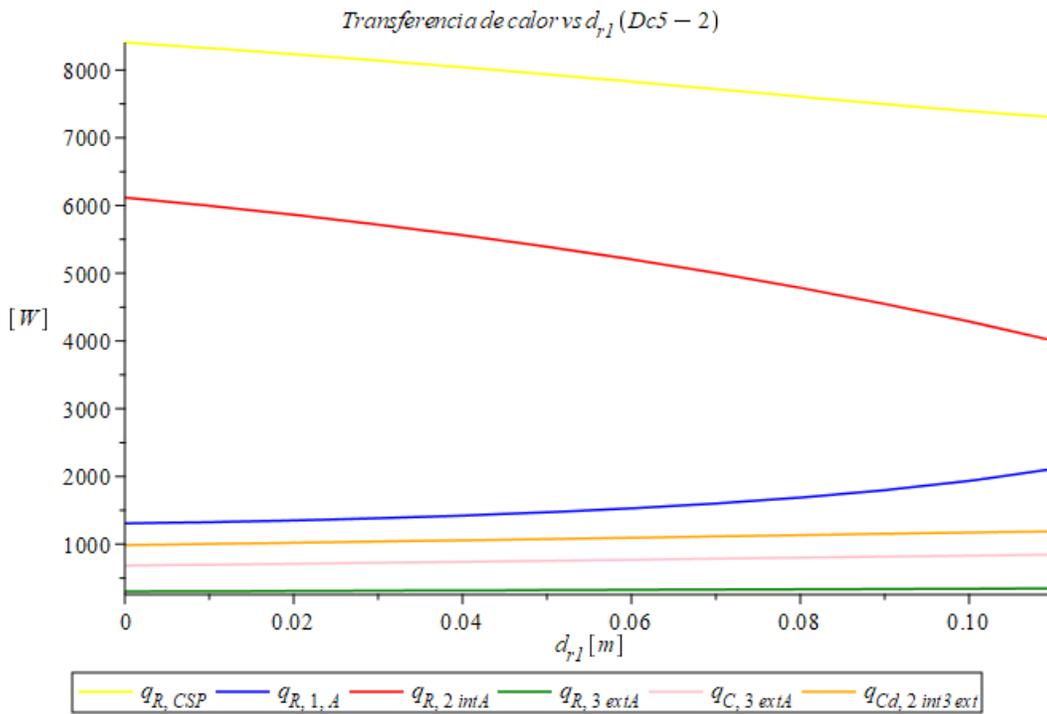
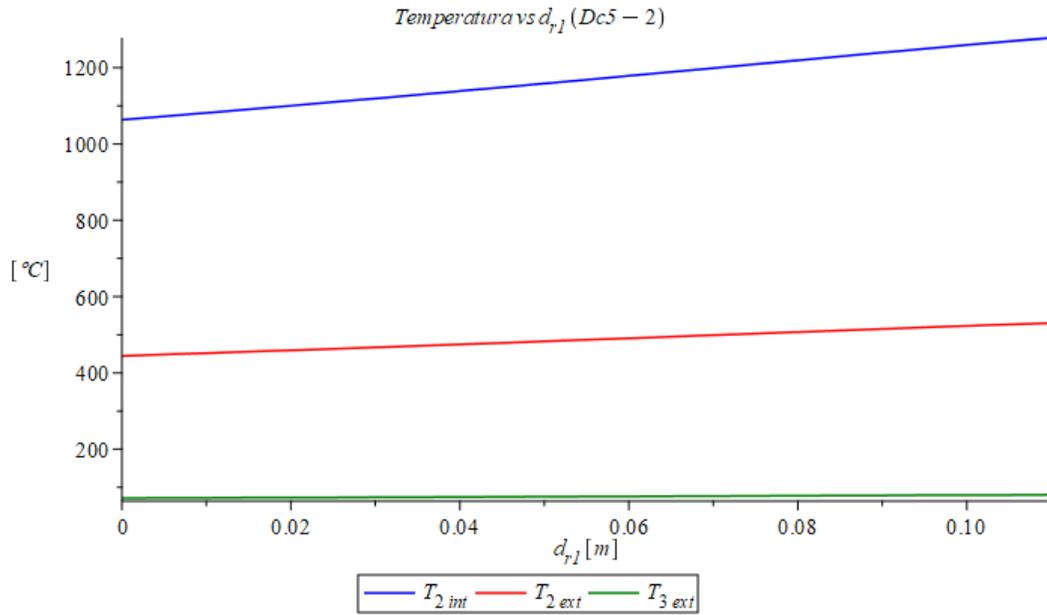
Análisis de sensibilidad del parámetro d_{r1} considerando $d_c = 6$ [m].



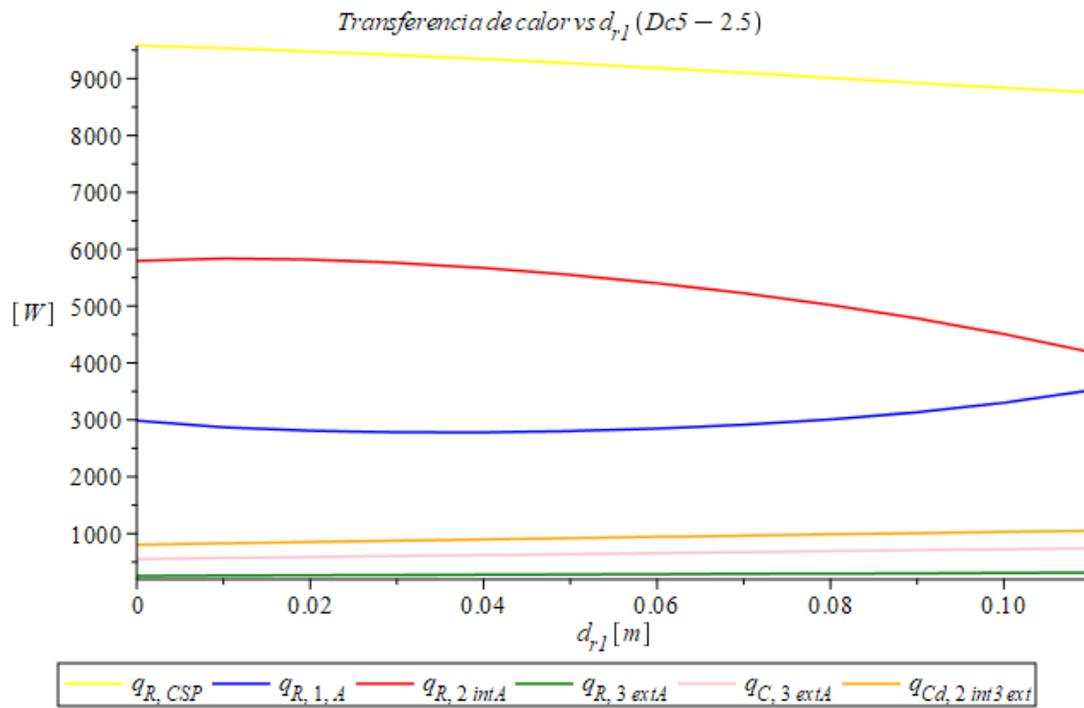
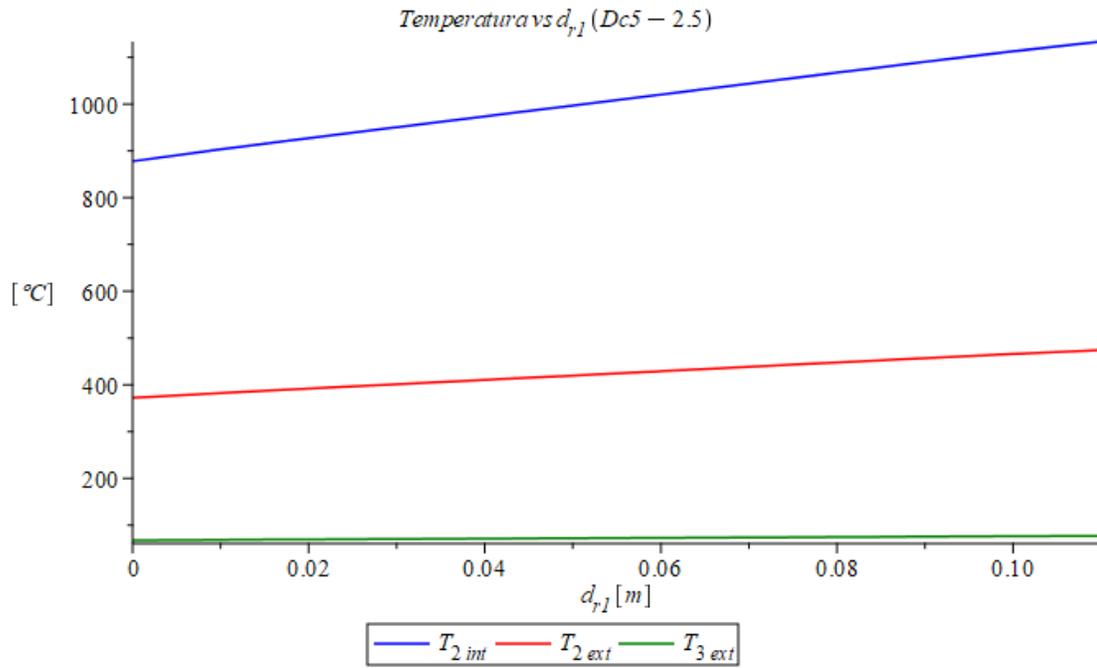
Análisis de sensibilidad del parámetro d_{r1} considerando $r_{apc} = 1,4 [m]$.



Análisis de sensibilidad del parámetro d_{r1} considerando $r_{apc} = 2 [m]$.



Análisis de sensibilidad del parámetro d_{r1} considerando $r_{apc} = 2,5 [m]$.



Anexo E

Código utilizado en Maple 2016 para resolver el sistema habiendo definido $\dot{Q}_{R,CSP1}$ y dejando T_1 como incógnita:

Variables

$$q_{R, CSP} := 250 :$$

$$T_{amb} := 15 + 273.15 :$$

$$r_1 := 4.05 \cdot 0.01 :$$

$$r_{2 \text{ int}} := 20 \cdot 0.01 :$$

$$d_{r1} := 11 \cdot 0.01 :$$

$$e_2 := 30 \cdot 0.01 :$$

$$e_3 := 8 \cdot 0.01 :$$

$$r_{apint} := 9.6902 \cdot 0.01 :$$

$$r_{apext} := 38.7266 \cdot 0.01 :$$

$$r_{2 \text{ ext}} := r_{2 \text{ int}} + e_2 :$$

$$r_{3 \text{ ext}} := r_{2 \text{ ext}} + e_3 :$$

$$\sigma := 5.6 \cdot 10^{-8} :$$

$$k_2 := 0.38 :$$

$$k_3 := 0.058 :$$

$$\rho_1 := 0.2 :$$

$$\rho_2 := 0.3 :$$

$$\epsilon_1 := 0.78 :$$

$$\epsilon_2 := 0.38 :$$

$$\epsilon_3 := 0.1 :$$

$$k_{aire} := 0.02735 :$$

$$g := 9.8 :$$

$$\beta_{aire} := 3.67 \cdot 10^{-3} :$$

$$\mu_{\text{aire}} := 1.963 \cdot 10^{-5} :$$

$$c_{p \text{ aire}} := 1007 :$$

$$\rho_{\text{aire}} := 1.092 :$$

$$v_{\text{aire}} := \frac{\mu_{\text{aire}}}{\rho_{\text{aire}}} :$$

$$r_{2 \text{ intmod}} := r_{2 \text{ int}} - d_{r1} :$$

$$h_{\text{apint}} := r_{2 \text{ int}} - \sqrt{r_{2 \text{ int}}^2 - r_{\text{apint}}^2} :$$

$$A_1 := 4 \cdot \text{Pi} \cdot r_1^2 :$$

$$A_{\text{apint}} := 2 \cdot \text{Pi} \cdot r_{2 \text{ int}} \cdot h_{\text{apint}} :$$

$$r_{3 \text{ extmod}} := r_{3 \text{ ext}} - d_{r1} :$$

$$h_{\text{apext}} := r_{3 \text{ ext}} - \sqrt{r_{3 \text{ ext}}^2 - r_{\text{apext}}^2} :$$

$$A_{\text{apext}} := 2 \cdot \text{Pi} \cdot r_{3 \text{ ext}} \cdot h_{\text{apext}} :$$

$$A_{2 \text{ int}} := 4 \cdot \text{Pi} \cdot r_{2 \text{ int}}^2 - A_{\text{apint}} :$$

$$A_{2 \text{ ext}} := 4 \cdot \text{Pi} \cdot r_{2 \text{ ext}}^2 - \left(A_{\text{apext}} \cdot \left(\frac{e_2}{e_3 + e_2} \right) + A_{\text{apint}} \cdot \left(\frac{e_3}{e_3 + e_2} \right) \right) :$$

$$A_{3 \text{ ext}} := 4 \cdot \text{Pi} \cdot r_{3 \text{ ext}}^2 - A_{\text{apext}} :$$

$$F_{12} := \frac{4 \cdot \text{Pi} \cdot r_{2 \text{ intmod}}^2 - A_{\text{apint}}}{4 \cdot \text{Pi} \cdot r_{2 \text{ intmod}}^2} :$$

$$F_{1,A} := 1 - F_{12} :$$

$$F_{21} := \frac{F_{12} \cdot A_1}{A_{2 \text{ int}}} :$$

$$F_{2 \text{ int}A} := (1 - F_{21}) \cdot \left(\frac{A_{apint}}{A_{apint} + A_{2 \text{ int}}} \right) :$$

$$F_{22} := 1 - (F_{21} + F_{2 \text{ int}A}) :$$

$$F_{3 \text{ ext}A} := 1 :$$

$$R_{23 \text{ eq}} := \frac{r_{2 \text{ ext}} - r_{2 \text{ int}}}{4 \cdot \text{Pi} \cdot r_{2 \text{ ext}} \cdot r_{2 \text{ int}} \cdot k_2} + \frac{r_{3 \text{ ext}} - r_{2 \text{ ext}}}{4 \cdot \text{Pi} \cdot r_{2 \text{ ext}} \cdot r_{3 \text{ ext}} \cdot k_3} :$$

Relaciones

$q_{R,22}$ en función de $q_{R,12}$:

$$q_{R,22} := \text{solve}\left(q_{R,22} = F_{22} \cdot \left(\epsilon_2 \cdot A_{2 \text{ int}} \cdot \sigma \cdot T_{2 \text{ int}}^4 + \rho_2 \cdot (q_{R,22} + q_{R,12}) \right), q_{R,22}\right) :$$

$q_{R,21}$ en función de $q_{R,12}$:

$$q_{R,21} := \text{solve}\left(q_{R,12} = F_{12} \cdot \left(\epsilon_1 \cdot A_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4 + \rho_1 \cdot q_{R,21} + \rho_1 \cdot q_{R,CSP} \right), q_{R,21}\right) :$$

$q_{R,12}$ en función de $T_{2 \text{ int}}$:

$$q_{R,12} := \text{solve}\left(q_{R,21} = F_{21} \cdot \left(\epsilon_2 \cdot A_{2 \text{ int}} \cdot \sigma \cdot T_{2 \text{ int}}^4 + \rho_2 \cdot (q_{R,22} + q_{R,12}) \right), q_{R,12}\right) :$$

$q_{R,21}$ en función de $T_{2 \text{ int}}$:

$$q_{R,21} := q_{R,21} :$$

$q_{R,1,A}$ en función de $T_{2\text{ int}}$:

$$q_{R,1,A} := F_{1,A} \left(\epsilon_1 \cdot A_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4 + \rho_1 \cdot q_{R,21} \right) :$$

$q_{R,2\text{ int}A}$ en función de $T_{2\text{ int}}$:

$$q_{R,2\text{ int}A} := F_{2\text{ int}A} \left(\epsilon_2 \cdot A_{2\text{ int}} \cdot \sigma \cdot T_{2\text{ int}}^4 + \rho_2 \cdot (q_{R,22} + q_{R,12}) \right) :$$

$q_{R,3\text{ ext}A}$ en función de $T_{3\text{ ext}}$:

$$q_{R,3\text{ ext}A} := F_{3\text{ ext}A} \left(\epsilon_3 \cdot A_{3\text{ ext}} \cdot \sigma \cdot T_{3\text{ ext}}^4 \right) :$$

$q_{C,3\text{ ext}A}$ en función de $T_{3\text{ ext}}$:

$$q_{C,3\text{ ext}A} := \left(\frac{\dot{k}_{\text{aire}}}{2 \cdot r_{3\text{ ext}}} \cdot \left(2 + \frac{0.589 \cdot \left(\frac{g \cdot \beta_{\text{aire}} \cdot (T_{3\text{ ext}} - T_{\text{amb}}) \cdot (2 \cdot r_{3\text{ ext}})^3 \cdot \mu_{\text{aire}} \cdot c_{p\text{ aire}}}{\nu_{\text{aire}}^2 \cdot \dot{k}_{\text{aire}}} \right)^{\left(\frac{1}{4}\right)}}{\left(1 + \left(\frac{0.469 \cdot \dot{k}_{\text{aire}}}{\mu_{\text{aire}} \cdot c_{p\text{ aire}}} \right)^{\left(\frac{9}{16}\right)} \right)^{\left(\frac{4}{9}\right)}} \right) \right) \cdot A_{3\text{ ext}} \cdot (T_{3\text{ ext}} - T_{\text{amb}}) :$$

$q_{Cd,2\text{ int}3\text{ ext}}$ en función de $T_{2\text{ int}}$ y $T_{2\text{ ext}}$:

$$q_{Cd,2\text{ int}3\text{ ext}} := \frac{(T_{2\text{ int}} - T_{3\text{ ext}})}{R_{23\text{ eq}}} :$$

Resolver sistema:

$$q_{R,CSP} + q_{R,21} = q_{R,12} + q_{R,1,A} :$$

$$ST_1 := \text{solve}(q_{R,CSP} + q_{R,21} = q_{R,12} + q_{R,1,A}, T_1) :$$

$$T_1 := ST_1[1] :$$

$$T_{2\text{ int}} := \text{solve}(q_{Cd,2\text{ int}3\text{ ext}} = q_{R,3\text{ ext}A} + q_{C,3\text{ ext}A}, T_{2\text{ int}}) :$$

$$ST_{3\text{ ext}} := \text{Roots}(q_{R,12} + q_{R,22} = q_{R,21} + q_{R,2\text{ int}A} + q_{R,3\text{ ext}A} + q_{C,3\text{ ext}A} + q_{R,22} \cdot 0..1500) :$$

$$T_{3\text{ ext}} := ST_{3\text{ ext}}[1] :$$

$$T_{2\text{ ext}} := \text{solve}\left(q_{Cd,2\text{ int}3\text{ ext}} = \frac{4 \cdot \text{Pi} \cdot r_{3\text{ ext}} \cdot r_{2\text{ ext}} \cdot k_3}{r_{3\text{ ext}} - r_{2\text{ ext}}} \cdot (T_{2\text{ ext}} - T_{3\text{ ext}}), T_{2\text{ ext}} \right) :$$