

TRABAJO ESPECIAL DE LICENCIATURA EN FÍSICA

Estudio de la Potencia y Radio de Concentración en un Concentrador Solar Parabólico

Emilio Nahuel Sosa

FACULTAD DE MATEMÁTICA, ASTRONOMÍA,
FÍSICA Y COMPUTACIÓN
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Diciembre de 2022

Director: Dr. Agustín Sigal



Estudio de la Potencia y Radio de Concentración en un Concentrador Solar Parabólico © 2023 by Nahuel Sosa is licensed under [Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Resumen

En el presente trabajo se estudia la distribución de la densidad de energía en el plano focal de un concentrador solar parabólico, es decir, la irradiancia. Además, se analiza la potencia total generada por el concentrador en su plano focal. También se estudia el radio de concentración del mismo. Se analizan los casos de un concentrador ideal y un concentrador no ideal. Para este último se tienen en cuenta correcciones que permiten una aproximación de un caso real. Por otro lado, se modifican parámetros morfológicos para estudiar cómo afectan estas variaciones al flujo y al radio de concentración. Luego se comparan ambos casos.

Abstract

In the present work the irradiance of a parabolic solar concentrator, i.e the energy density distribution in the focal plane, was studied.

The total power generated by the concentrator in its focal plane, and the concentration radius were analyzed. Besides, the concentration ratio were studied too.

Ideal and non-ideal concentrator cases were studied. Corrections that allowed for real-case approximations were performed for the latter.

Morphological parameters were modified to study their impact on flow variations and concentration radius. Finally, both cases were compared.

Palabras clave: Concentrador solar, parabólico, energía solar, energías sustentables, solar térmica.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN: URGENCIAS SOCIO-AMBIENTALES Y ENERGÉTICA	1
1.1	Cambio climático y emergencias ambientales	1
1.1.1	Aumento de la temperatura media del planeta	2
1.1.2	Simulaciones de aumento de temperaturas y precipitaciones	3
1.1.3	Proyecciones para diversos escenarios 1950-2100.....	4
1.1.4	Concentraciones de GEI.....	5
1.1.5	Toneladas emitidas de CO ₂	5
1.1.6	Emisiones de GEI por sectores económicos.....	6
1.2	Distribución energética global	6
1.3	Energías renovables.....	8
1.4	Energía Solar	9
1.4.1	Tecnología Solar Fotovoltaica (SFV).....	11
1.4.2	Concentradores Solares (CSP)	12
1.4.2.1	Torres Solares (SPT)	14
1.4.2.2	Colector Cilíndrico Parabólico (PTC).....	14
1.4.2.3	Colector Lineal de Fresnel (LFC)	15
1.4.2.4	Concentrador de Disco Parabólico (SPD).....	16
2	MARCO TEÓRICO.....	21
2.1	Sistema de Estudio	21
2.2	Conceptos básicos para el cálculo del flujo.....	23
3	HERRAMIENTAS Y METODOLOGIA	26
3.1	Implementación en Comsol.....	26
3.1.1	Trayectoria de Rayos.....	26
3.1.2	Dirección inicial de los rayos incidentes	27
3.1.3	Dirección de los rayos reflejados	28
3.1.3.1	Concentrador ideal	28
3.1.3.2	Concentrador con correcciones	29
3.1.4	Intensidad de los rayos	30
3.1.4.1	Concentrador Ideal: Intensidad incidente constante.....	30
3.1.4.2	Concentrador con correcciones: Intensidad variable.....	31
3.1.5	Definición de variables para el cálculo	32
3.1.6	Variables auxiliares	33
3.1.6.1	Cálculo de trayectorias: Radios de curvatura	34
3.1.6.2	Intensidad: Parámetros de Stokes.....	36
3.1.7	<i>Cálculo de la irradiancia en el Plano Focal</i>	36

3.1.8	Radio de concentración.....	36
3.1.9	Esquema conceptual.....	37
4	PRESENTACIÓN DE DATOS	39
4.1	Irradiancia y radio de concentración: concentrador ideal y concentrador con correcciones con $\theta_{borde} = 45^\circ$	39
4.1.1	Concentrador ideal:	39
	$\theta_{borde} = 45^\circ$; Distancia focal, $f = 3\text{ m}$	39
	40	
4.1.2	Concentrador no ideal:	40
	$\theta_{borde} = 45^\circ$; Distancia focal, $f = 3\text{ m}$; Coeficiente de absorción: $\alpha=0,1$; Parámetro de rugosidad: $\sigma=1,75$	40
4.1.3	Comparación entre ambos concentradores.....	42
4.2	Concentrador Ideal: Variación del ángulo de borde.....	43
4.2.1	$\theta_{borde} = 30^\circ$; Distancia focal, $f = 3\text{ m}$	45
4.2.2	$\theta_{borde} = 60^\circ$; Distancia focal, $f = 3\text{ m}$	46
4.3	Concentrador con correcciones: variación de parámetros de absorción y rugosidad..	47
4.3.1	Variación del parámetro de absorción α	47
4.3.1.1	Distancia focal: $f = 3\text{ m}$; Ángulo de borde: $\theta_{borde} = 45^\circ$; Parámetro de absorción: $\alpha = 0,02$; Coeficiente de rugosidad: $\sigma=1,75$	47
4.3.1.2	Distancia focal: $f = 3\text{ m}$; Ángulo de borde: $\theta_{borde} = 45^\circ$; Parámetro de absorción: $\alpha = 0,5$; Coeficiente de rugosidad: $\sigma=1,75$	48
4.3.2	Variación del parámetro de rugosidad $[\sigma]$	48
4.3.2.1	Distancia focal: $f = 3\text{ m}$; Ángulo de borde: $\theta_{borde} = 45^\circ$; Parámetro de absorción: $\alpha = 0,1$; Coeficiente de rugosidad: $\sigma=1$	49
4.3.2.2	Distancia focal: $f = 3\text{ m}$; Ángulo de borde: $\theta_{borde} = 45^\circ$; Parámetro de absorción: $\alpha = 0,1$; Coeficiente de rugosidad: $\sigma=2$	49
	Resumen de resultados: Irradiancia.....	50
4.3.3	Concentrador Ideal, Variación de ángulo de borde.....	50
4.3.4	Concentrador con Correcciones	51
4.4	Análisis de la potencia [W] del concentrador.	52
4.4.1	Comparación entre Concentrador Ideal y Concentrador con Correcciones	52
4.4.2	Concentrador Ideal: Variación de ángulo de borde.....	53
4.4.3	Concentrador no ideal	54
4.4.4	Resumen de resultados	55
4.4.4.1	Concentrador Ideal	55
4.4.4.2	Concentrador con Correcciones	55
4.5	Radio de Concentración	57
4.5.1	Radio de Concentración: Concentrador Ideal.....	57

4.5.2	Radio de Concentración: Concentrador no ideal.....	58
5	ANÁLISIS Y CONCLUSIONES	60
5.1	Concentrador Ideal vs Concentrador con correcciones	60
5.2	Concentrador Ideal: variación del ángulo de borde.....	61
5.3	Concentrador no ideal.	61

1 INTRODUCCIÓN: URGENCIAS SOCIO-AMBIENTALES Y ENERGÉTICA

1.1 Cambio climático y emergencias ambientales

El sistema de estudio de este trabajo final está enmarcado en el paradigma de las energías renovables. En este marco, es importante conocer los motivos por los cuales estas energías son necesarias y están en auge, además de conocer su estado de arte respecto a otras fuentes de energía primarias.

Desde hace milenios el ser humano utiliza diversas fuentes para satisfacer sus necesidades energéticas (cocción de alimentos, transporte, industria, etc.). La primera fuente energética utilizada fue la leña. Hay registros de sociedades y pueblos muy antiguos que utilizaban la energía solar para calentar agua, secar frutar o cocer vegetales. La primera cocina solar utilizada, que considera tecnología moderna, data de 1767 (construida por Horace de Saussure). El primer concentrador solar que se conoce fue utilizado en Argelia alrededor de 1860 (Mouchot), utilizando un reflector curvado y concentrando los rayos sobre una pequeña olla.[1]

Como es sabido, en el comienzo de la era industrial y con el descubrimiento del petróleo, a mitad del siglo XIX la humanidad comenzó a quemar combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón) para satisfacer sus necesidades energéticas cada vez mayores. La gran ventaja de las energías a base de hidrocarburos es su gran capacidad energética, con la enorme ventaja de ocupar poco volumen.

La gran desventaja de este tipo de energías es que su quema implica la liberación de gases a la atmósfera, principalmente CO₂, vapor de agua y metano; los denominados gases de efecto invernadero (GEI). Estos gases tienen la propiedad que absorben la radiación infrarroja, provocando el mencionado efecto invernadero, cuya consecuencia principal y directa es el aumento de la temperatura de la atmósfera, los océanos y la superficie terrestre, es decir, el aumento de la temperatura media global.

Además del aumento de la temperatura media global, la liberación de GEI tiene otros efectos secundarios que son también de gran importancia, entre ellos: cambio de pH en los océanos, aumento de la acidez del mar (esto impacta en la flora y fauna marina); derretimiento de las masas de hielo a lo largo de todo el planeta; aumento del nivel del mar; mayor frecuencia de sequías e inundaciones; cambios en la biósfera con las respectivas consecuencias a la flora y fauna.

Además del aumento de la temperatura con sus respectivas consecuencias, como humanidad nos enfrentamos a otros desafíos ambientales, ya que estamos empujando a los ecosistemas a condiciones extremas sin capacidad de recuperación, cuyas consecuencias nadie puede prever: tala intensiva de los bosques y selvas que luego son utilizadas para ganadería intensiva o emprendimientos inmobiliarios; contaminación masiva de aguas dulces y océano; pesca intensiva sin dar el tiempo necesario para que los

sistemas marinos se recuperen; extinción masiva de especie; disminución alarmante de ecosistemas; contaminación de la atmósfera (lo cual provoca lluvias acidas, enfermedades respiratorias), etc.

A continuación, se expone de forma breve las conclusiones más importantes del informe publicado por el IPCC en octubre del año 2021. Este informe es un adelanto del informe completo que saldrá en el año 2022 [2], por lo tanto, está sujeto a revisión.

1.1.1 Aumento de la temperatura media del planeta

En el informe del IPCC mencionado anteriormente, la conclusión del organismo es que es inequívoca la influencia humana en el aumento de la temperatura media global (superficie terrestre, océano y atmósfera). El aumento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera y el aumento de la temperatura desde 1750 es sin dudas provocado por el ser humano en gran medida [2].

En la [Figura 1.1.1.1](#) se observan los cambios en la temperatura media global de la superficie, observados y simulados: (a) en la figura se muestra una reconstrucción de las temperaturas entre los años 1 y 1850 de la era moderna. Los datos previos a 1850 son reconstruidos por diversos métodos científicos (no se dispone de mediciones documentadas previos a esa fecha), se observa un aumento sin precedentes de 1850 en adelante; (b) la figura muestra el registro de la temperatura para el período 1850-2020.

La línea negra representa los datos registrados en dicho período, claramente se aprecia un rápido aumento a partir de la década de 1950/60. La línea de color verde representa una simulación de la evolución de la temperatura sin tener en cuenta las emisiones antropógenas (utilizando diversos modelos y estimaciones para estas emisiones).

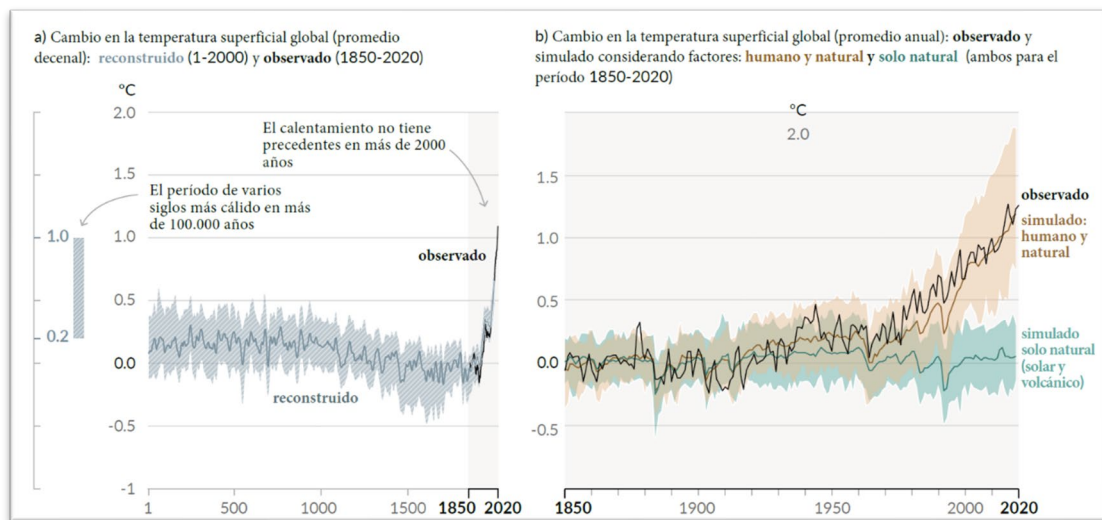


Figura 1.1.1.1: Aumento de la temperatura promedio en superficies terrestres. Fuente: IPCC.

Como se puede ver en la [Figura 1.1.1.1](#), para el año 2020 se llegó a un aumento global en la temperatura de 1,1°C. Este valor supera el valor previsto para ese año por informes anteriores.

Si comparamos con el clima en el pasado, nos tenemos que remontar al Holoceno-medio (6000 años) y al último periodo interglaciar (129-116 Ka) para encontrar temperaturas por encima de unos 0,7°C respecto al periodo preindustrial [3].

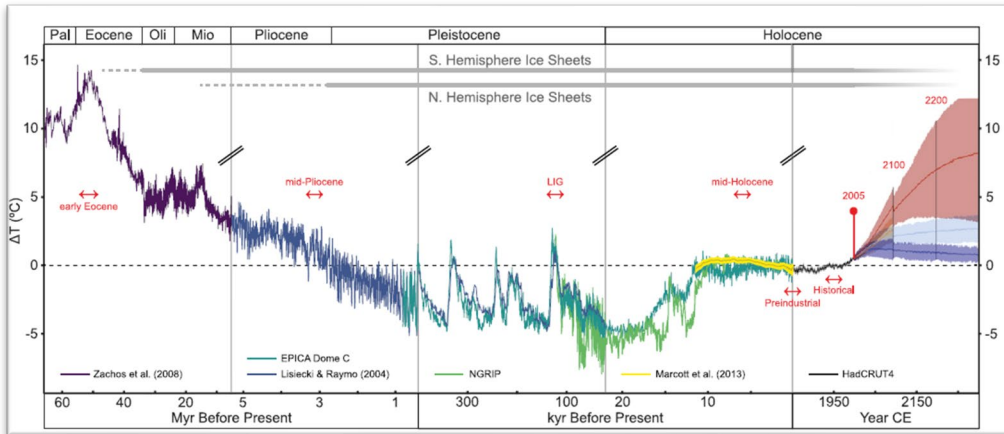


Figura 1.1.1.2: Tendencias de las temperaturas medias anuales en los últimos 65 Ma.

En la [Figura 1.1.1.2](#), la línea roja indica el peor escenario, es decir el caso en que la tasa de emisión de gases sigue el ritmo actual o superior. Como se observa las temperaturas alcanzadas en ese período las encontramos en el Eoceno y Plioceno-medio. Es decir, en 200-400 años se recrearían condiciones que en la Tierra ocurrieron en períodos de millones de años.

1.1.2 Simulaciones de aumento de temperaturas y precipitaciones

En las siguientes figuras se muestran posibles escenarios respecto a las temperaturas medias y respecto a las precipitaciones, para tres valores estimados de aumento en la temperatura.

La [Figura 1.1.2.1](#), ilustra lo dicho respecto a las temperaturas.

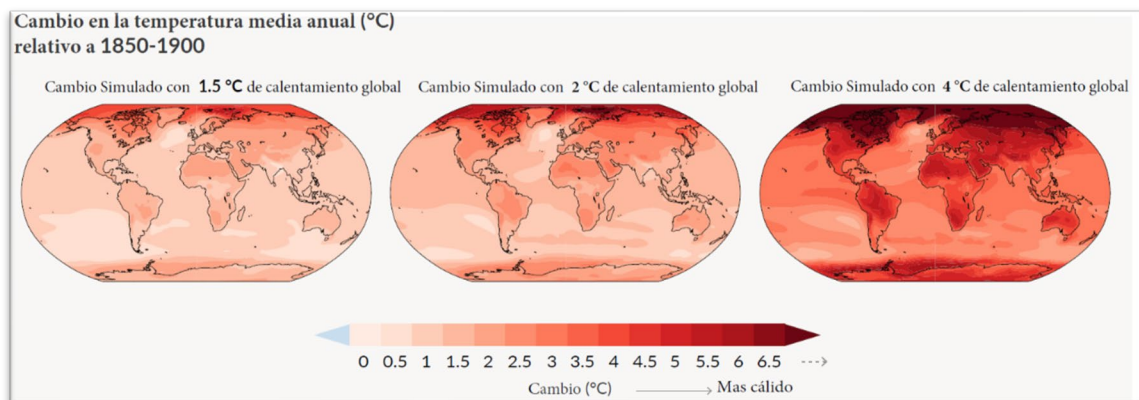


Figura 1.1.2.1: Estimaciones respecto a las temperaturas globales para 3 escenarios distintos.

En la Figura 1.1.2.2 se observan las predicciones respecto a las precipitaciones en estos tres escenarios diferentes.

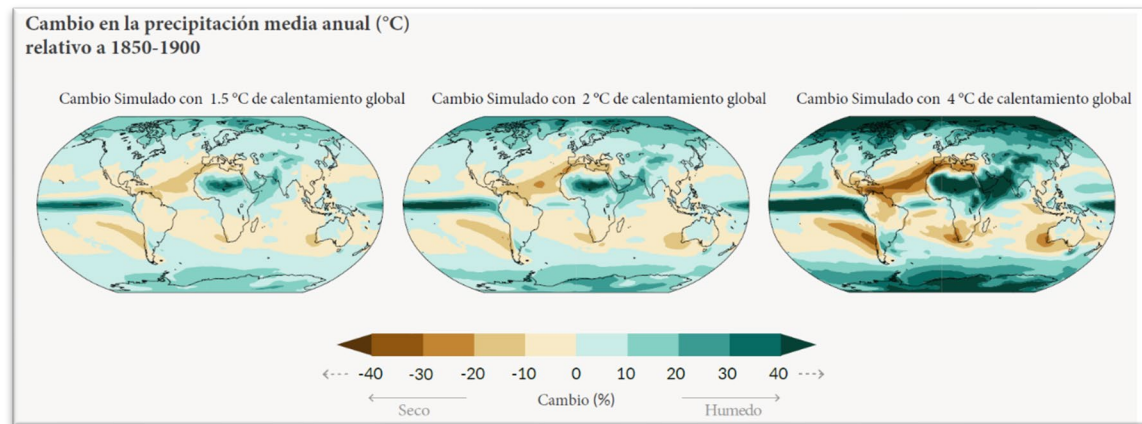


Figura 1.1.2.2. Proyecciones respecto a las precipitaciones globales para tres diferentes cambios de temperatura

1.1.3 Proyecciones para diversos escenarios 1950-2100.

En la Figura 1.1.3.1 se exponen las proyecciones más importantes del informe del IPCC para los próximos 80 años respecto a la temperatura media global, el área ocupada por el hielo Ártico, el pH en la superficie del océano y el nivel medio del mar. Estos son 4 parámetros importantes que son utilizados como indicadores del cambio climático. Las proyecciones mostradas corresponden a diversos escenarios planteados por el IPCC. El escenario SSP5-8.5 es el más extremo en las predicciones y el menos deseable (en este escenario se supone una tasa de emisión de GEI igual o mayor a la actual).

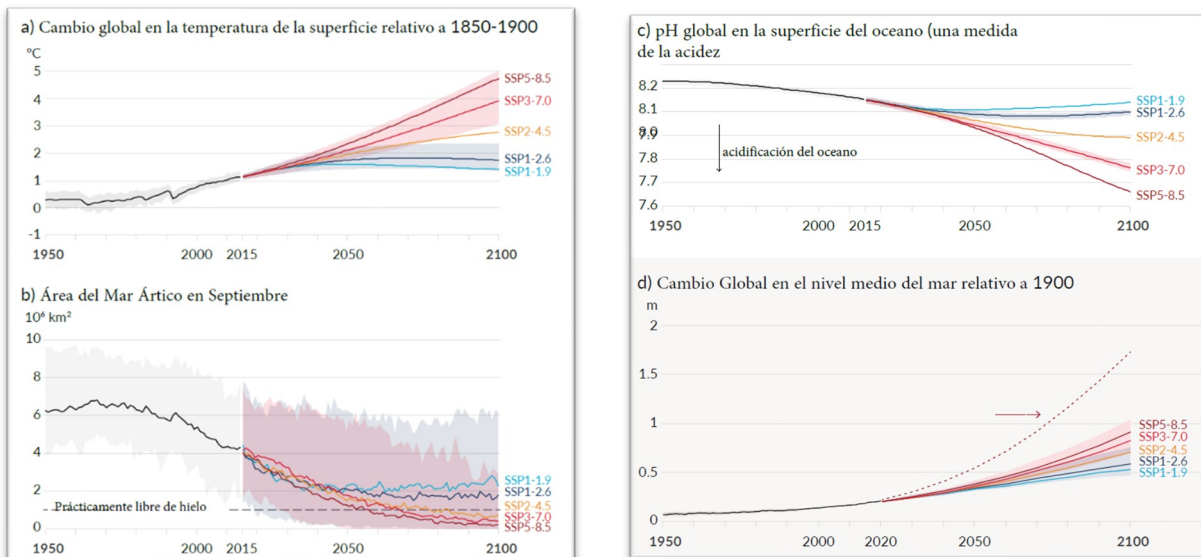


Figura 1.1.3.1: Proyecciones para diversos escenarios respecto a: (a) Temperatura media global, respecto a 1900. (b) Área mar Ártico en septiembre (c) promedio global PH en la superficie del océano (d) Nivel medio global del nivel del mar, respecto a 1900.

1.1.4 Concentraciones de GEI

En la [Figura 1.1.4.1](#) se muestra el aumento de las concentraciones de CO₂, metano y N₂O desde 1750 hasta el presente.

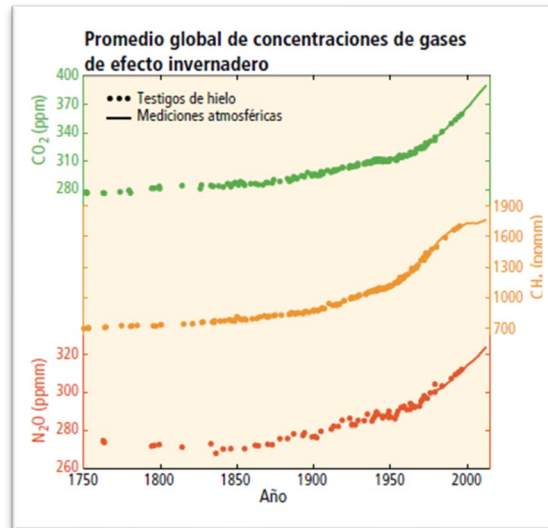


Figura 1.1.4.1: Concentraciones de gases de efecto invernadero (1750-2010).

Como se observa en la figura, los gases más emitidos son: dióxido de carbono CO₂, metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O). Su concentración en partes por millón (ppm) aumentó de forma abrupta a partir de la década de 1950.

1.1.5 Toneladas emitidas de CO₂

En la [Figura 1.1.5.1](#) se muestra el valor estimado de giga toneladas de CO₂ liberadas a la atmósfera en el período de 1850 a 2010.

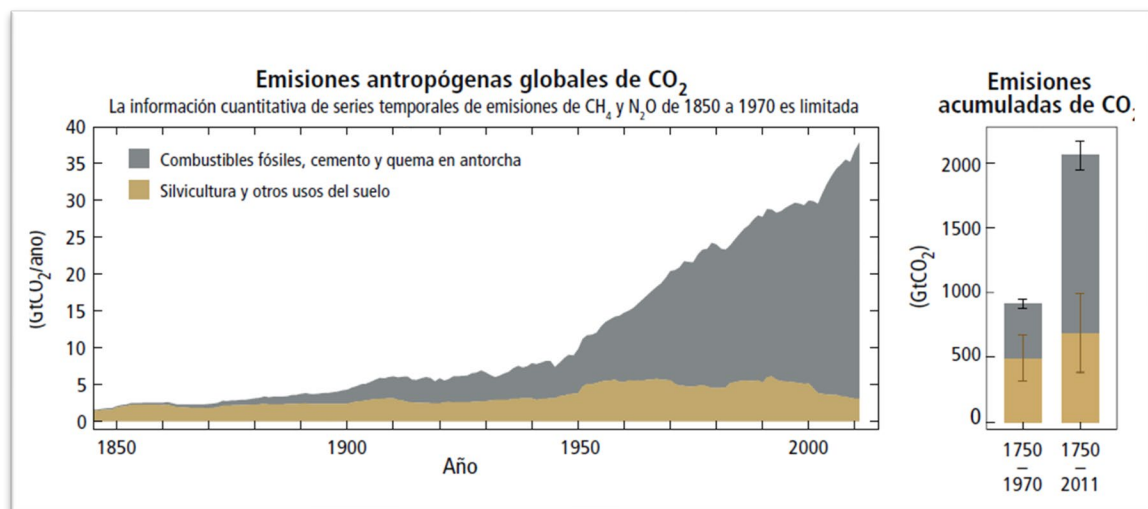


Figura 1.1.5.1: Emisiones antropógenas globales de CO₂. Izquierda: en GtCO/año. Derecha: Emisiones acumuladas totales (en GtCO).

1.1.6 Emisiones de GEI por sectores económicos

En la figura 1.1.6.1. se observa la contribución por sector económico a las emisiones de GEI en el año 2010. La industria, el transporte, la ganadería y uso de suelos (AFOLU: Agricultura, Ganadería, Forestación y otros Usos del Suelo) son los sectores que más aportan a las emisiones de GEI [4].

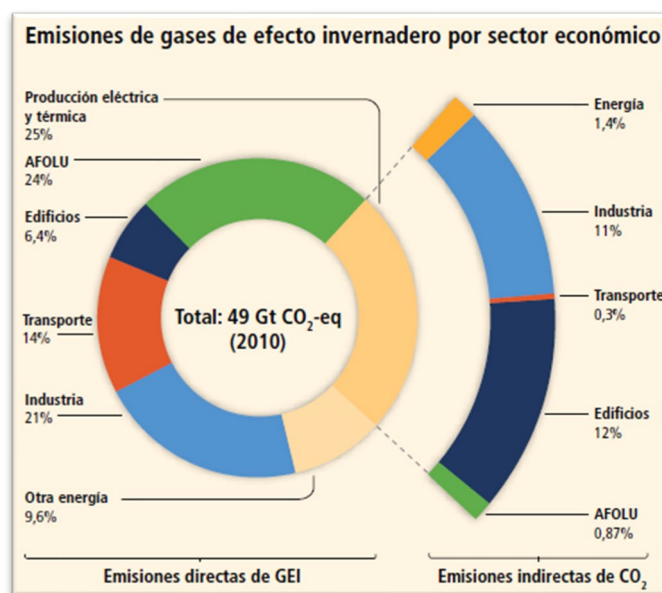


Figura 1.1.6.1: Porcentajes de gases de efecto invernadero por sector económico (2010). (IPCC)

1.2 Distribución energética global

Debido a que este trabajo está enmarcado en el contexto de energías renovables, es importante conocer el estado actual de las mismas en relación a la matriz energética global. Según el BP Statistical Review of World Energy 2021 [5], en el año 2020 se consumieron un total de 556 EJ (1 EJ= 1 exa-joule= 1×10^{18} J), en comparación, en el año 2019 se consumieron 584 EJ. Del total de la energía consumida, el 33,1% fue suministrada con petróleo, el 27% con carbón, el 24,2% con gas natural, el 6% con energía hidroeléctrica, el 5,58 % con fuentes renovables y un 4,2% con energía nuclear.

Para tener dimensión de unidades el consumo argentino fue de aprox 3EJ en 2022.

En la Figura 1.2.1 se muestra el consumo total global (en EJ) y el porcentaje de cada fuente de energía en el periodo 1994-2020, respectivamente.

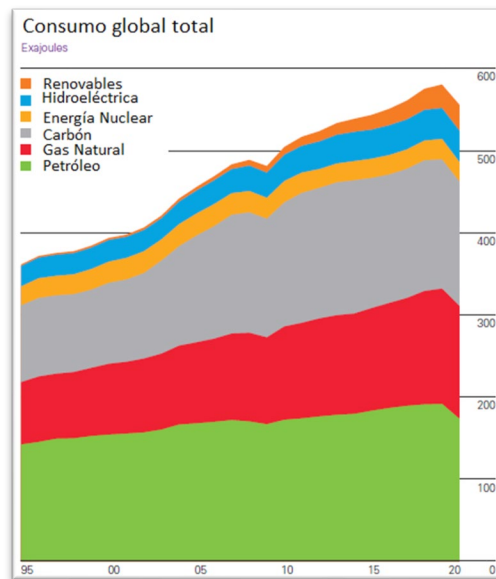


Figura 1.2.1: Consumo global total de energía, período 1994-2020.

Como se puede observar en la [Figura 1.2.1](#), el consumo total de energía decreció en un 4,5% el último año (2020 respecto a 2019). Observar que este descenso ocurrió en el año que la humanidad sufrió la pandemia de COVID-19. El último año que ocurrió un descenso en el consumo global fue en el año 2009, año en el que ocurrió una crisis inmobiliaria y bancaria sin precedentes.

Como se aprecia en la [Figura 1.2.2](#), el petróleo sigue siendo la fuente primaria de energía, seguida por el carbón.

Respecto a las energías renovables estas vienen creciendo de manera sostenida especialmente en la última década. Como se observa en la [Figura 1.2.2](#), en el año 2018 estas superaron por primera vez en la historia a la energía nuclear. También es notable el crecimiento del gas natural.

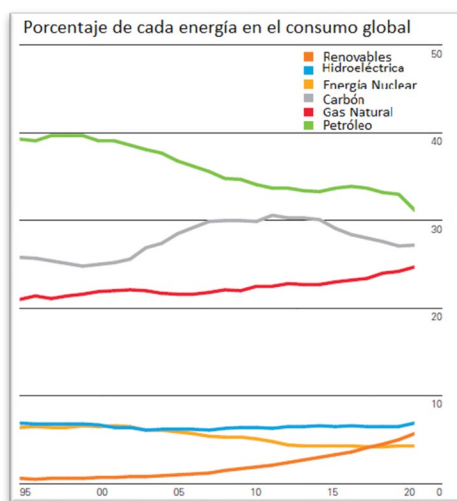


Figura 1.2.2: Crecimiento porcentual de cada tipo de energía, período 1994-2019

Respecto al consumo de los países, China es el mayor consumidor de energía, representando un 24,3% (145,7 EJ) de la demanda total de energía global. Además, fue el país que más creció en su demanda energética contabilizando más de las tres cuartas partes del crecimiento neto global. Estados Unidos es el segundo país con más demanda energética con un 16,2% (87,7 EJ) de la demanda total.

En la región de América del Sur, Brasil es el mayor consumidor de energía con un total de 12,4 EJ, lo cual equivale a un 2,1 % en la demanda total.

Respecto a Argentina, el consumo total en el año 2020 fue de 3,15 EJ, lo cual representa un 0,6% del total. Las dos principales fuentes fueron el gas y el petróleo con el 49% y el 34% del consumo total, respectivamente. Las energías renovables (contando la hidroeléctrica) representaron un consumo del 13%, y la energía nuclear un 2% [5].

1.3 Energías renovables.

Según el informe del año 2020 del Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), del total de la energía consumida globalmente en el año 2020, las energías renovables modernas alcanzaron un 11% del consumo total (excluyendo el uso tradicional de biomasa) [6]. Si excluimos la energía hidroeléctrica, la cual abasteció un 3,6% de la demanda total, las energías renovables alcanzaron un 7,4% del consumo total global. De este porcentaje, aproximadamente un 58% fue usado para calentamiento de agua y calefacción por medio de biomasa, energía solar y geotérmica; un 28% para la generación de energía eléctrica a través de biomasa, energía eólica, solar y geotérmica; y el restante 13% para el transporte por medio de biocombustibles. En la Figura 1.3.1 se muestran estos datos.

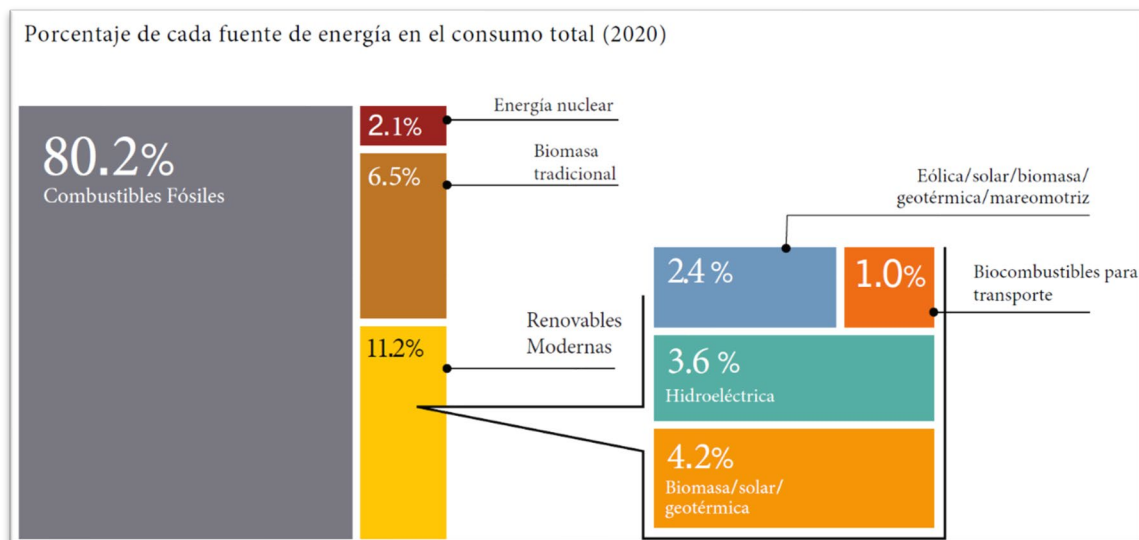


Figura 1.3.1: Porcentajes en la distribución de las energías renovables a nivel global en el año 2020.

En el año 2020 la capacidad global total de energías renovables alcanzó los 2838 GW si se tiene en cuenta la generación de energía hidroeléctrica. Si no tenemos en cuenta la generación hidroeléctrica, el resto de las fuentes de energías renovables alcanzaron una capacidad de unos 1437 GW. De estas últimas fuentes, los dos tipos de energías más utilizados son la eólica y solar, con una capacidad de 743 GW y 760 GW, respectivamente [6]. En cuanto a las plantas de energía solar concentrada o térmica, las cuales son objeto

de interés de este trabajo final, estas alcanzaron los 6,2 GW, lo cual representa un 0,4% de la capacidad total de las energías renovables (sin contar la hidráulica). En la [Figura 1.3.2](#) se muestra la capacidad total de los distintos tipos de energías renovables.


		2018	2019
INVERSIONES			
Nuevas inversiones (anual) en energías renovables	billones USD	296.0	301.7
POTENCIA INSTALADA			
Capacidad total Renovables (incluido hidroeléctrica)	GW	2,387	2,588
Capacidad total Renovables (no incluido hidroeléctrica)	GW	1,252	1,437
 Capacidad Hidroeléctrica	GW	1,135	1,150
 Capacidad Hidroeléctrica	GW	591	651
 Capacidad Solar FV	GW	512	627
 Capacidad Bio	GW	131	139
 Capacidad Geotérmica	GW	13.2	13.9
 Capacidad Solar Térmica (Concentradores Solares)	GW	5.6	6.2
 Capacidad Mareomotriz	GW	0.5	0.5

Figura 1.3.2: Capacidad total global por cada tipo de energía (en GW).

1.4 Energía Solar

La energía solar es la tercera fuente de energía renovable más utilizada luego de la hidroeléctrica y la energía eólica. Sin embargo, es la energía con mayor potencial de aprovechamiento ya que la energía provista por el Sol es miles de veces superior a la energía disponible en el resto de las fuentes existentes en la Tierra. Se estima que la energía provista por el Sol es unas 10.000 mayor que la que proporcionan todas las formas de energía que los seres humanos emplean en la Tierra [7].

El Sol disipa una energía de $3,7 \times 10^{14}$ TW, de los cuales son interceptados por la Tierra unos 173.000 TW. Con esta potencia, en unos 6 minutos la energía proveniente del Sol cubriría la demanda de la humanidad durante el año 2020 (554 EJ).

La potencia media por cada metro cuadrado (Irradiancia) que llega a la parte superior de la atmósfera es la denominada *constante solar* I_0 y su valor aproximado es $I_0 = 1353 \text{ W/m}^2$. Esta radiación se distribuye entre las longitudes de onda correspondiente a rayos de alta energía UV con una longitud de onda de $\lambda = 100\text{-}400 \text{ nm}$; el espectro visible con $\lambda = 400\text{-}700 \text{ nm}$ y radiación infrarroja (IR) con $\lambda = 700\text{nm}$ a $\lambda = 1\text{mm}$. La energía que transporta la radiación visible es el 47% de la energía solar total, la radiación IR el 46% y la ultravioleta el 7% restante. La [Figura 1.4.1](#) muestra el espectro solar [8],[9].

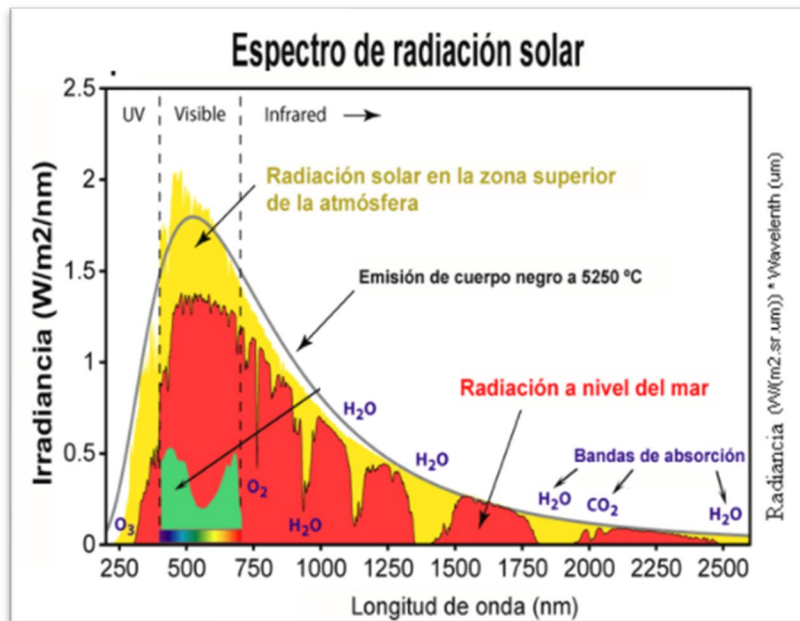


Figura 1.4.1: Radiación Solar en la parte alta de la atmósfera (amarillo) y a nivel del mar (rojo).

Cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera, sólo una parte llega a la superficie terrestre directamente, mientras que el resto es esparcido o absorbido por moléculas del aire, aerosoles, gotas de agua o cristales de hielo en las nubes. En su casi totalidad, la absorción es realizada por las moléculas gaseosas y los aerosoles. El esparcimiento de la radiación solar por las gotas de agua y los cristales de hielo toman lugar por todo el rango espectral, donde las moléculas esparcen predominantemente las longitudes de onda corta y los aerosoles las longitudes de onda más largas. Debido a esto, la radiación que llega a la superficie terrestre varía entre los 700 y los 1300 W/m^2 , dependiendo de la longitud, la latitud y la época del año [10]. En promedio llegan unos 1000 W/m^2 a la superficie [11].

La radiación solar (kWh/m^2) que atraviesa la atmósfera y llega directamente a la superficie terrestre se denomina Irradiancia Normal Directa (DNI, Direct Normal Irradiance). La radiación que es esparcida por fuera del rayo directo es la Irradiancia Horizontal Difusa (DHI, Diffuse Horizontal Irradiance). La suma de estos dos componentes de la luz solar que confluyen en un mismo punto de una superficie horizontal se denomina Irradiancia Global Horizontal (GHI, Global Horizontal Irradiance). La Figura 1.4.2 muestra la DNI a lo largo del globo [12].

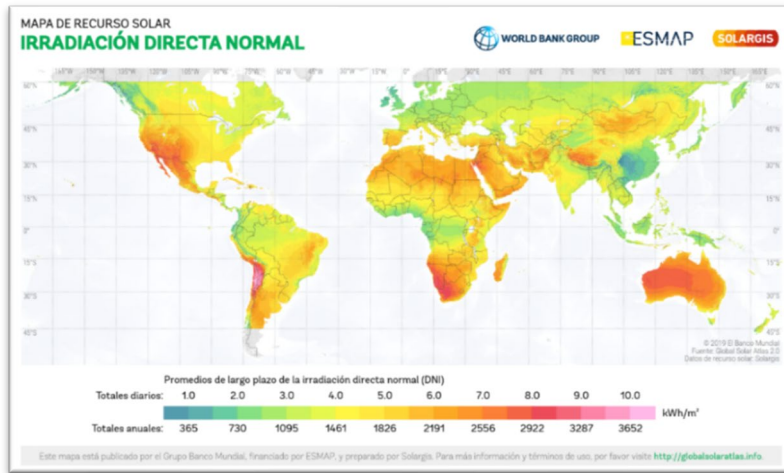


Figura 1.4.2: Irradiación Directa Normal (DNI) [kWh/m²].

La DNI es la irradiancia que más interesa ya que es la mejor aprovechada por la tecnología solar desarrollada hoy en día, tanto en paneles fotovoltaicos como concentradores solares. La radiación difusa es desaprovecha en la mayoría de los casos. Si bien hay paneles que aprovechan este tipo de radiación, no están desarrollados de manera masiva.

Dentro de las tecnologías solares tenemos dos grandes ramas:

- i. Tecnología Solar Fotovoltaica
- ii. Tecnología Solar Térmica

1.4.1 Tecnología Solar Fotovoltaica (SFV)

La tecnología solar fotovoltaica es la tecnología solar más desarrollada, comercializada y utilizada en el mundo. La SFV es una de las tecnologías pilares de la transición energética de combustibles fósiles a energías sustentables.

La capacidad mundial total instalada de las SFV en el año 2020 fue de 760 GW, lo cual representa un 99% de la capacidad total de las tecnologías solares, siendo el restante 1% perteneciente a la energía solar térmica [13].

En la Figura 1.4.1.1 se muestra la capacidad instalada y agregada de la energía fotovoltaica a lo largo de la última década [6].

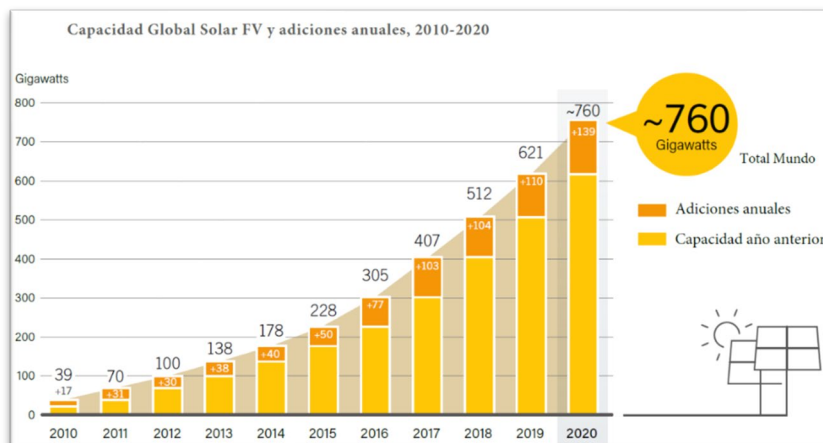


Figura 1.4.1.1: Capacidad total mundial en el periodo 2010-2020.

Gracias al desarrollo de esta tecnología en las última décadas, se ha logrado reducir los costos considerablemente, permitiendo un crecimiento sin precedentes de las tecnologías SFV en los últimos años, superando incluso al resto de las tecnologías sustentables.

1.4.2 Concentradores Solares (CSP)

La energía solar concentrada (CSP, Concentrated Solar Power) o energía solar térmica es aquella tecnología que convierte la energía solar en energía térmica, pudiendo esta última utilizarse para generar electricidad o utilizar el mismo calor como fuente de energía.

Un concentrador solar es un dispositivo capaz de concentrar la energía solar en una región relativamente pequeña donde se coloca un receptor, el cual generalmente contiene un fluido de trabajo que se calienta lo suficiente como para generar vapor y poner en funcionamiento turbinas o generadores eléctricos. Otro uso bastante extendido es utilizar el concentrador para el calentamiento de agua o cocción de alimentos (cocina solar).

Para que esta tecnología pueda ser aprovechada y la inversión en un concentrador sea económicamente factible (es de las más caras dentro de las tecnologías solares), se recomienda contar con un mínimo de DNI de 2000 kWh/m²/año (5,5 kWh/m²/día) [14]. Argentina presenta condiciones ideales para la instalación de este tipo de tecnologías, alcanzando valores de DNI aún más elevados. La Figura 1.4.2.1 muestra un mapa de la DNI en Argentina [15].



Figura 1.4.2.1: Irradiancia Directa Normal en Argentina [kWh/m²].

En el año 2020 la capacidad instalada mundial proveniente de las plantas de concentración solar fue de 6,4 GW [13].

Los líderes en el sector son España y Estados Unidos, con aproximadamente un tercio de la capacidad mundial instalada cada uno. La Figura 1.4.2.2 muestra la capacidad mundial instalada de las CSP en el período 2010-2020. En el año 2020 China fue el único país que agregó nuevas plantas de concentración.

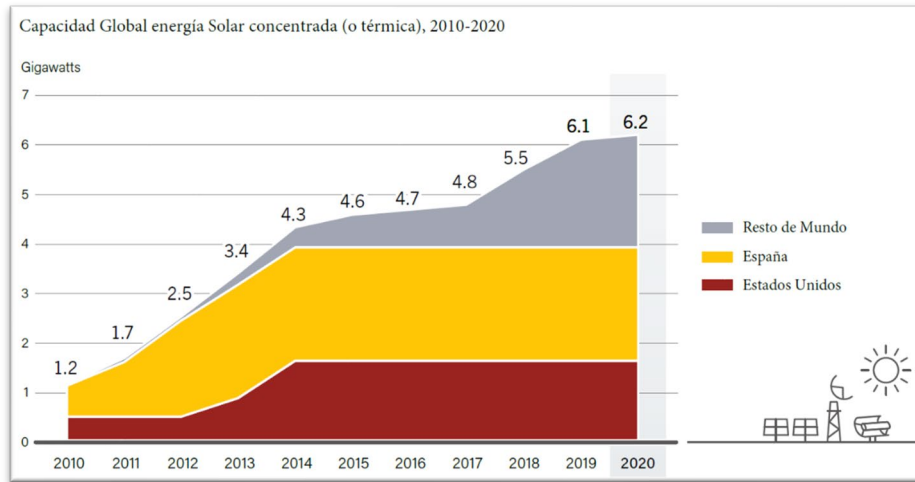


Figura 1.4.2.2: Capacidad instalada global de CSP período 2010-2020. España y EEUU lideran el sector.

En la actualidad existen cuatro tipos de tecnologías desarrolladas en el área de los CSP. Las mismas son: concentradores disco-parabólicos (SPD, Solar Parabolic-Dish); torres solares (SPT, solar-power tower); concentradores cilíndricos parabólicos (PTC, Parabolic Through Collector) y los concentradores lineales de Fresnel (LFC).

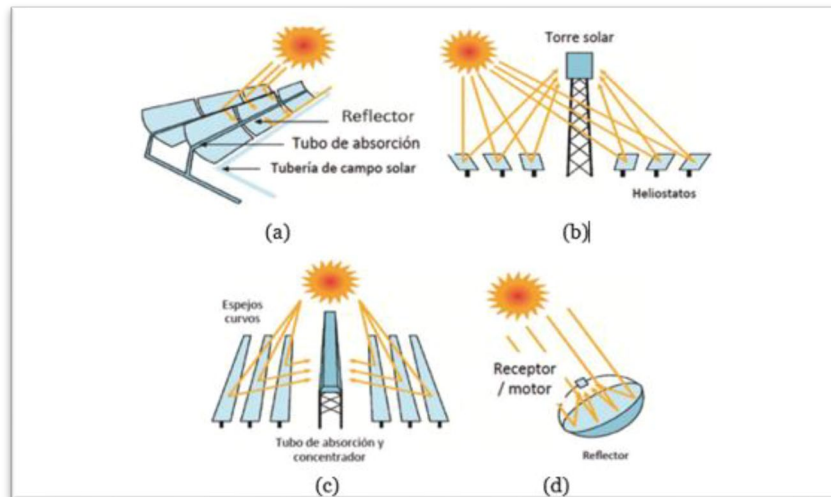


Figura 1.4.2.3: Tipos de tecnología CSP: (a) Colectores Cilíndricos Parabólico; (b) Torres Solares; (c) Colector Linear de Fresnel; (d) Disco de Stirling

1.4.2.1 Torres Solares (SPT)

Las torres solares consisten en un sistema de un gran número de espejos planos colocados de manera que concentran la luz solar en un receptor colocado en la parte superior de una torre. Estos espejos se denominan heliostatos y se configuran de modo que sigan automáticamente la trayectoria del sol a lo largo del día. De este modo se maximiza la radiación diaria absorbida. En la localización del receptor se coloca un fluido de trabajo como vector de transporte de calor, el cual, en general, pone en funcionamiento una turbina para la generación de electricidad. Los fluidos más utilizados son agua/vapor, sales fundidas o aceites sintéticos. Dependiendo del diseño, tamaño y cantidad de espejos, el flujo solar en el receptor varía entre los 200 kW/m^2 y 1000 kW/m^2 , este flujo permite llegar a temperaturas de trabajo entre los 250°C y 1000°C [16], siendo 600°C la temperatura de trabajo normal en las plantas actuales [14].

La potencia de estas plantas es bastante amplia, abarcando valores de entre 10-150 MW de capacidad. La eficiencia para la conversión de electricidad de estas plantas es de aproximadamente un 15%, con un 20% de eficiencia máxima teórica demostrada. Se espera a que llegue a un 35% de eficiencia en los próximos años.



Figura 1.4.2.1.1: Torre solar en Sevilla, España de 10 MW de potencia.

1.4.2.2 Colector Cilíndrico Parabólico (PTC)

Estos colectores consisten en grandes espejos con perfil en forma de U o de parábola. Estos espejos concentran la luz incidente en un receptor central en forma de tubo colocado en la línea focal del colector. Una fila de espejos puede alcanzar 100 metros o más, con una apertura de 5 a 6 metros. Se utiliza un seguidor para orientar tanto a los colectores solares como a los receptores de calor hacia el sol. El receptor está compuesto por un tubo absorbente dentro de un tubo de vidrio al vacío. Dentro del tubo se coloca el fluido de trabajo, siendo los más utilizados aceites sintéticos y sales fundidas [14].

La temperatura de trabajo puede variar entre 350°C y 550°C y la potencia que pueden generar varía entre 10-200 MW [16].

La tecnología PTC es la tecnología más utilizada y desarrollada a nivel mundial dentro de los CSP, con una eficiencia teórica máxima de un 20%. Para la conversión de

energía solar en electricidad, su eficiencia ronda en un 15%. La [Figura 1.4.1.2.2.1](#) muestra un sistema PTC.



Figura 1.4.2.2.1: Planta Solar PTC; Noor Ouarzazate I. Uarzazate, Marruecos

1.4.2.3 Colector Lineal de Fresnel (LFC)

Estos colectores son similares a los PTC, pero utilizan espejos planos para concentrar la luz solar en un receptor fijo localizado unos metros por encima del campo de espejos. El receptor consiste en un largo tubo con una película selectiva absorbente.

Debido a su forma, los espejos presentan el fenómeno de astigmatismo, por lo cual hay que agregarle un espejo extra por encima del tubo para reenfocar los rayos perdidos por el tubo [14]. La ventaja que tienen respecto a la tecnología PTC son: menor coste en la fabricación de los espejos, menos cantidad de material para montar el sistema, mayor resistencia a las cargas mecánicas y mayor superficie reflectora.

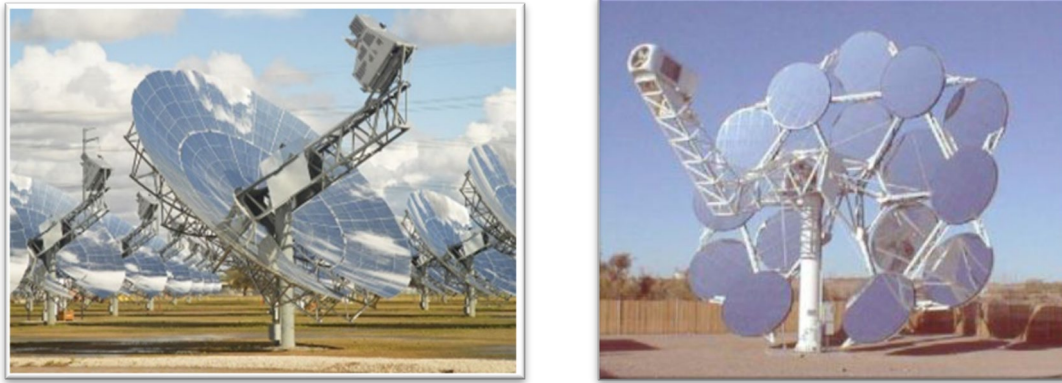
La capacidad de estas plantas varía de 10 a 200 MW [16] y la eficiencia en conversión de electricidad ronda entre el 8 y el 10%.



Figura 1.4.2.3.1: Planta Solar con espejos de Fresnel. Puerto Errado, España.

1.4.2.4 Concentrador de Disco Parabólico (SPD).

Estos concentradores consisten en un disco parabólico que refleja la DNI en un receptor localizado en el punto focal del mismo. Este tipo de concentradores son el objeto de estudio de este trabajo final. En la [Figura 1.4.2.4.1](#) se muestran dos tipos diferentes de concentradores parabólicos con tecnología Stirling.



[Figura 1.4.2.4.1](#): Concentradores solares disco-parabólico con sistema Stirling.

Dependiendo el tipo de receptor utilizado y de los tamaños y tecnologías utilizadas en los concentradores, podemos dividir en dos las aplicaciones principales para estos concentradores solares parabólicos.

i. Energía solar térmica

En este caso el calor generado es utilizado para el calentamiento de fluidos, como puede ser calentamiento de agua. Esta puede ser utilizada para calefacción, cocción o cualquier otro uso que se desee. Para el caso de cocción se coloca directamente el recipiente en la región nombrada previamente.



[Figura 1.4.2.4.2](#): Concentrador parabólico utilizado como método de cocción.

ii. Generación de energía termoeléctrica

En este caso el calor generado es utilizado para la generación eléctrica, es decir como central termoeléctrica, que puede ser utilizada para diversos usos: abastecimiento a hogares o industria; generación de hidrógeno a través de electrólisis, etc.

Para la generación de electricidad se suele utilizar como receptor un motor Stirling, el cual utiliza como fluido de trabajo aire, helio, hidrógeno o nitrógeno. Los fluidos más utilizados son el hidrógeno y el helio. Como se mencionó anteriormente, los SPD trabajan con ciclos de alta temperatura [17].

La tecnología más desarrollada y utilizada para este tipo de concentradores es la denominada Dish-Stirling. Esta consiste en un SDP donde se coloca, en el punto focal, un motor de tipo Stirling, con el fin de convertir la energía térmica en eléctrica (Figura 1.4.2.4.3).



Figura 1.4.2.4.3: Sistema CSP con motor Stirling

Cada concentrador individual es capaz de generar entre 0,01 MW a 0,5 MW de potencia [16], es decir, son sistemas de baja potencia. Son sistemas de alta temperatura (más de 500°C), pudiendo llegar fácilmente a los 700~1000°C y 200 bar de presión. Este tipo de concentradores son utilizados en plantas de pequeña escala. Por ejemplo, la planta ubicada en Tooele, Utah, Estados Unidos, consiste en un sistema de 429 discos que en total generan 1,5 MW de potencia. Estos sistemas se suelen combinar con otros sistemas, como por ejemplo sistemas fotovoltaicos o turbinas de gas [17].

Entre las ventajas de estos concentradores se encuentran su alta eficiencia, la cual ronda aproximadamente entre el 25% al 30%, siendo la más alta de toda las tecnologías de concentradores solares [16]; resistencia contra la deflexión y las cargas del viento, modularidad, versatilidad, durabilidad contra la humedad y los cambios de temperatura, bajo costo de construcción. Además, son ideales para sistemas remotos debido a que la refrigeración es por medio del aire.

Entre sus desventajas se destaca su elevado Costo Nivelado de Electricidad (LCOE); al ser un sistema que posee varias partes móviles, esto supone un costo adicional en el mantenimiento y en el costo; por otro lado, el sistema de seguimiento solar encarece el sistema ya que implica un costo adicional considerable a todo el sistema. Otra gran desventaja es que no cuentan con capacidad de almacenamiento de energía, por lo tanto, no pueden proveer energía en momentos de baja radiación solar o en la noche.

El uso más ampliamente extendido de estos concentradores es la conversión de energía térmica en eléctrica. Otros usos extendidos de esta tecnología con SDP son: calentamiento de agua, cocción de alimentos y sistema de irrigación. Aprovechando el hecho de que concentran la energía térmica en la región focal del disco y su versatilidad

en lugares remotos, es una tecnología ideal para ser implementada como cocinas solares o generadores en regiones rurales y aisladas. Existen cocinas solares parabólicas que abastecen casas domiciliarias y hornos portátiles posibles de llevar en una excursión.

En la [Figura 1.4.2.4.4](#) se muestra un concentrador diseñado por “EURODISH” de 10 kW de potencia.

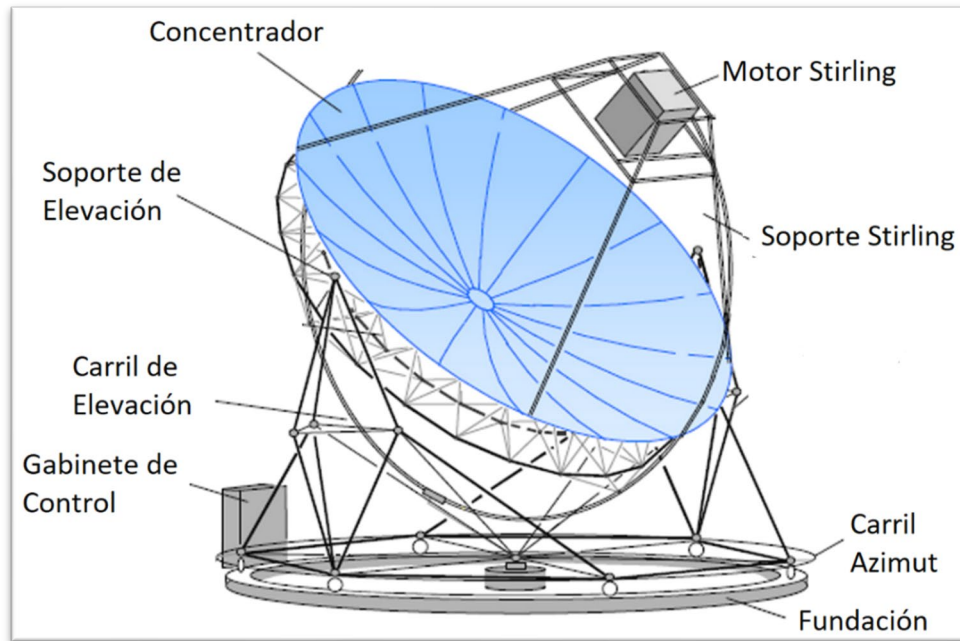


Figura 1.4.2.4.4: Concentrador solar parabólico “EURODISH” de 10 kW, el cual consiste de: Fundación. Gabinete de control. Guía del Azimut. Guía de elevación. Anillo de soporte. Placa giratoria. Cojinete de Elevación. Espejos del concentrador, Soporte del motor Stirling. Motor Stirling

Un concentrador parabólico está compuesto de tres partes principales:

i. [Concentrador solar parabólico y estructura.](#)

Como se mencionó anteriormente y como se puede observar en la [Figura 1.4.2.4.2](#), un SDP consiste en un sistema de espejos (o reflectores) de forma parabólica. Para lograr esta forma se suelen usar pequeños espejos cuadrados o espejos tipo “lonja”, dependiendo del fabricante.

Para la estructura se suele usar chapa estampada y los soportes o demás accesorios suelen fabricarse de acero. Los diámetros de los concentradores suelen variar entre 1,8 m; 2,5 m; 3 m; 5,5 m y 7,5 m.

Para la fabricación de los espejos o reflectores se suelen utilizar los siguientes materiales: acero inoxidable, aluminio o plata formando finas capas sobre vidrio o algún polímero (laminado de vidrio sobre metal), también se suele colocar un cierto porcentaje de hierro en el vidrio [16]. Un buen reflector solar debe cumplir con las siguientes propiedades: peso razonable, resistencia contra la deformación y cargas del viento,

durabilidad contra la humedad y cambios de temperatura, flexible, bajo costo, buen material reflectante y larga vida.

En la Tabla 1 se muestran distintos materiales utilizados para la construcción de los reflectores; además se muestran la reflectividad y emisividad.

Tabla 1: Características de materiales utilizados como reflectantes.

Características de materiales de reflectores solares		
Material	Reflectividad (%)	Absorción (%)
Film de polímero	98	2
Aluminio, acrílico	98	2
Plata, aluminio con acrílico	97	3
Plata, acrílico	95	5
Aluminio	86	14
Aluminio, polietileno	97	3
Plexiglas con espejos	90	10
Plástico térmico, cobre,	80	20
Acero inoxidable pulido	50	50
Cerámico metálico en capa	95	5
Vidrio/plata 4 mm	93,8	6,2
Vidrio/plata 2 mm	94	6
Vidrio/plata 1 mm	94,6	5,4

ii. Receptor (motor Stirling, sistema de calentamiento, etc.)

En el espacio donde se produce la concentración de rayos se colocan distintos tipos de receptores, variando estos, acorde al uso deseado.

Dependiendo el tipo de receptor utilizado y de los tamaños y tecnologías utilizadas en los concentradores, podemos dividir en dos las aplicaciones principales para estos concentradores solares parabólicos: generación de electricidad y energía térmica.

iii. Sistema de seguimiento.

El sistema de seguimiento es diseñado para que el colector apunte siempre hacia el Sol, garantizando la mayor recolección de luz solar a lo largo del día. Los sistemas de seguimiento son utilizados en sistemas de generación eléctrica.

La eficiencia y rendimiento de los concentradores SDP son afectados por diversos parámetros como los materiales de los reflectores o espejos, el diámetro del concentrador, el área de apertura del concentrador, la altura focal del disco, el área y geometrías del receptor [18], el ángulo del borde del disco (Rim angle).

En la [Figura 1.4.2.4.5](#) se muestra un esquema de un SPD con sus parámetros característicos.

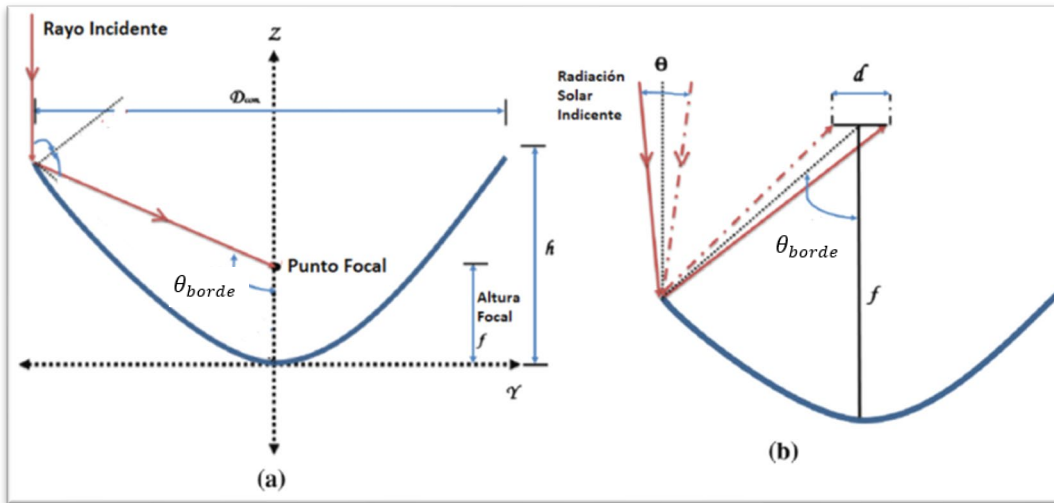


Figura 1.4.2.4.5: Geometrías del concentrador parabólico con el punto focal (f) y el ángulo del borde del disco θ_{borde} (a) Con el diámetro del concentrador D_{con} . (b) Con el diámetro del receptor, d .

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Sistema de Estudio

El sistema bajo estudio se compone de un concentrador solar parabólico, el cual es capaz de concentrar los rayos solares incidentes en una pequeña región alrededor del plano focal. Debido a esta concentración de energía electromagnética, tenemos en esa región un flujo de energía [W/m^2]. Este flujo genera una gran concentración de calor, pudiendo llegarse a temperaturas de unos 1000°C . Aprovechando este efecto es posible colocar en dicha región algún dispositivo capaz de aprovechar la energía concentrada.

En este trabajo se estudia la potencia total [W] generada por el concentrador en el plano focal y se estudia cómo es la distribución de potencia por unidad de área de dicho concentrador en el plano focal, es decir, la Irradiancia [W/m^2].

En la [Figura 2.1.1](#) se muestra un esquema de un concentrador parabólico. Para una parábola ideal, los rayos paralelos confluyen al punto focal. El ángulo de apertura de la parábola (respecto al eje) es el denominado ángulo de borde θ_{borde} .

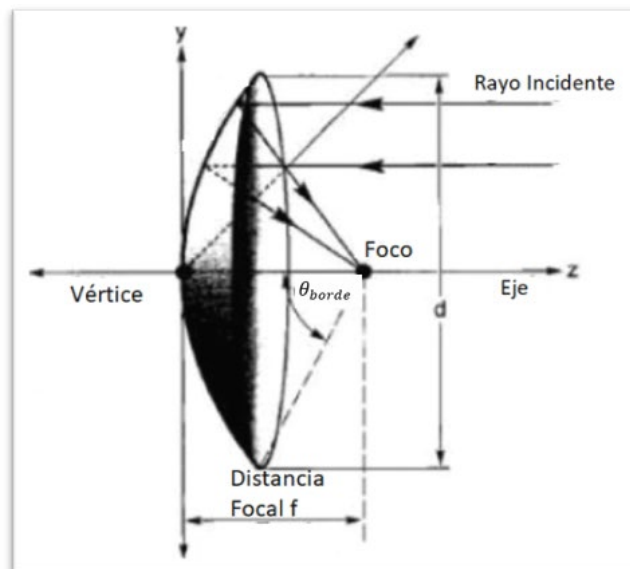


Figura 2.1.1: Concentrador parabólico con algunos parámetros característicos.

Un concentrador ideal es capaz de concentrar los rayos incidentes en un punto del plano focal, pero diversos factores desvían al concentrador de su carácter ideal causando que los rayos se dispersen al golpear con la superficie del concentrador, generando que los rayos que llegan al plano focal se dispersen en una región alrededor del plano focal, provocando una disminución de potencia en dicho plano.

Entre estos factores podemos nombrar el tamaño finito del Sol, la rugosidad y absorción en los materiales, la no parabolicidad de los espejos y el concentrador, aberración esférica, etc. La mayor parte del flujo se concentra en un área en el plano focal, mientras que una pequeña parte se dispersa fuera de dicho plano.

Se estudiaron dos modelos diferentes teniendo en cuenta diversas correcciones en cada uno de ellos, luego se analizó como es la distribución del flujo en la región del plano focal.

Modelo 1: Concentrador ideal

En el primer modelo, el cual llamaremos concentrador ideal, se considera la superficie del disco sin rugosidad y perfectamente reflectante. Es decir, tenemos reflexión especular y 100% de reflexión. La intensidad se toma constante para toda la superficie del Sol.

Las correcciones que se aplican a este modelo son: el tamaño finito del Sol (esto implica que los rayos incidentes no son paralelos como en una fuente infinita) y el fenómeno de aberración esférica (aproximación no lineal en las ecuaciones de Snell).

Modelo 2: Concentrador no ideal

En el segundo modelo se tiene en cuenta la rugosidad de la superficie del concentrador (reflexión difusa) y se considera absorción en los materiales.

Además, se tiene en cuenta la variación de la intensidad solar incidente. El perfil de intensidad solar, I , tiene una dependencia con la longitud de onda y además, la intensidad es menos intensa para los rayos provenientes del borde del disco Solar: el denominado oscurecimiento del borde solar (solar limb darkening).

También se considera en este modelo, al igual que el anterior, aberración esférica y tamaño finito del sol.

En la **Figura 2.1.4** se muestra la reflexión especular (Snell) y la reflexión difusa (rugosidad).

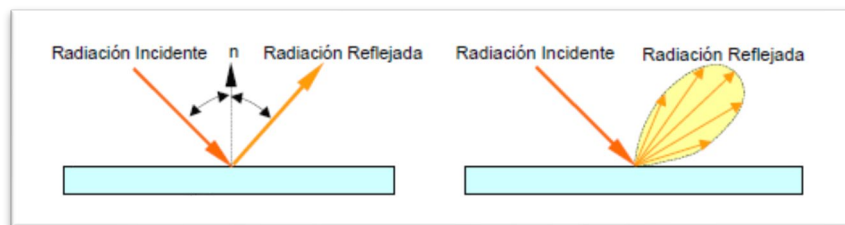


Figura 2.1.4: (a) Reflexión especular. (b) Reflexión Difusa

A la hora de evaluar la eficiencia del sistema concentrador-receptor se utiliza el parámetro denominado radio de concentración (CR, por sus siglas en inglés), definido como la razón entre el flujo incidente en el plano focal q (es decir el flujo concentrado), y el flujo total que llega al concentrador I_0 ,

$$CR = \frac{q}{I_0}$$

donde q es el flujo concentrado alrededor del punto focal y I_0 es la radiación incidente en el concentrador.

Este parámetro nos da una idea de cuan eficiente es un concentrador ya que nos indica la relación entre el flujo concentrado en el plano focal y la radiación incidente al concentrador. Un radio de concentración alto indica una alta eficiencia.

En la literatura existe una amplia variedad de modelos analíticos para el análisis óptico de los concentradores. Los métodos de más amplio uso son la denominada óptica cónica [19] y el trazado de rayos. Ambos métodos presentan un alto grado de precisión y están ampliamente aceptados en la comunidad de energía solar. Sin embargo, ambos presentan un alto grado de sofisticación en los programas requeridos para su implementación, requiriendo grandes recursos humanos y computacionales.

En este trabajo se utiliza un método alternativo propuesto por Sheldon Jeter [20], el cual es conceptualmente más simple de implementar, ahorrando en recursos computacionales. Este es un método geométrico, excepto en cuanto a lo referido a la intensidad solar incidente, por lo cual se hace un método fácil de implementar.

El método permite incluir fácilmente efectos de bordes, ventanas, sombras y superficies absorbentes, así como una amplia variedad de colectores y receptores. También se puede incluir fácilmente variaciones en la intensidad.

2.2 Conceptos básicos para el cálculo del flujo

A la hora de evaluar el radio de concentración es necesario conocer el flujo incidente en el plano focal. A continuación, se expone la idea propuesta por Sheldon Jeter para el cálculo del flujo.

En la [Figura 2.2.1](#) se muestran los elementos diferenciales de área dA_c y dA_f correspondientes al concentrador y al plano focal, respectivamente.

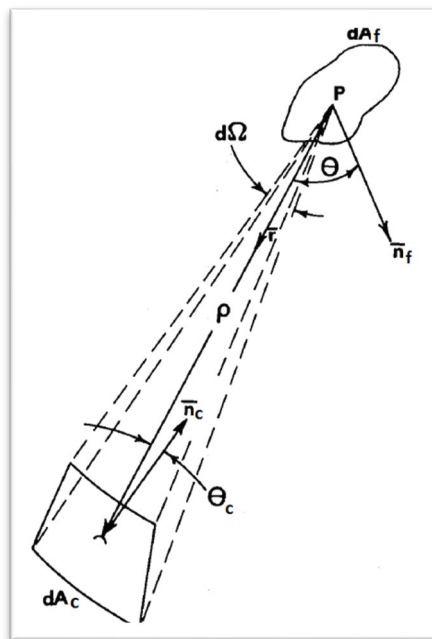


Figura 2.2.1.: Elementos diferenciales de área del concentrador (dA_c) y el plano focal (dA_f). Vectores y ángulos que interesan para el cálculo del flujo.

El elemento de área del concentrador dA_c es considerado como una fuente de radiación. Al elemento de área dA_f del plano focal (PF) le llega, desde el concentrador, un flujo infinitesimal de energía $d\dot{Q}$ [W] dado por,

$$d\dot{Q} = I d\Omega \cos\theta dA_f \quad (2.1)$$

donde,

I : radiancia incidente [$\text{W}/\text{sr} \cdot \text{m}^2$]¹.

$d\Omega$: ángulo sólido subtendido por el elemento dA_c visto desde dA_f .

$\cos\theta$: coseno entre el rayo incidente y el versor normal al área dA_f .

\hat{n}_f : versor normal al plano focal.

\hat{n}_c : versor normal al colector.

\vec{r} : vector desde dA_f hacia dA_c .

$\vec{\rho}$: vector desde dA_c hacia P.

dA_c : elemento diferencial de área del concentrador.

dA_f : elemento diferencial de área del plano focal.

1. Un estereorradián (sr) es el ángulo que cubre una superficie r a una distancia r del vértice. Unidad adimensional que sirve para medir ángulos sólidos.

La radiancia [W/m^2] sobre un elemento de área del plano focal es entonces,

$$\frac{d\dot{Q}}{dA_f} = I d\Omega \cos\theta \quad (2.2)$$

Integrando esta ecuación obtenemos la potencia (W) total sobre el colector q ,

$$q = \iint I \cos\theta d\Omega \quad (2.3)$$

Los factores dentro de la integral pueden ser evaluados fácilmente una vez que se conoce la distribución de la radiancia incidente y las geometrías del colector y el receptor.

El ángulo sólido subtendido por el concentrador viene dado por el resultado ya conocido:

$$d\Omega = \frac{dA_c \cos\theta_c}{\rho^2} = \frac{dA_c \cos\theta_c}{|\vec{r} - \vec{r}_c|^2} \quad (2.4)$$

donde

θ_c : ángulo entre versor normal a dA_c y el rayo reflejado hacia P.

\vec{r}_c : posición del elemento de área dA_c .

Como se mencionó anteriormente, la intensidad de la radiación proveniente del sol no es constante para todo el disco solar: la radiación proveniente de los bordes es menos intensa que la proveniente del centro. Para modelar este efecto escribimos la intensidad en función de la denominada constante solar I_0 , la cual representa un promedio

global de la irradiancia que llega a la superficie terrestre y tiene un valor aproximado de 1000 W/m^2 . Es decir,

$$I = f I_0 \quad (2.5)$$

Donde,

- f es una función que tiene en cuenta la variación de la intensidad incidente. En nuestro estudio tomaremos $f = 1$ para el concentrador ideal (es decir irradiancia constante) y una función exponencial para el caso que consideremos oscurecimiento de borde solar.
- $I_0 = 1000 \text{ W/m}^2$, es la denomina constante solar. Para obtener un modelo más preciso se deben realizar mediciones de la irradiancia local en un período de al menos entre 2 a 5 años.

Evaluando las ecuaciones (2.4) y (2.5) en la ecuación (2.3) se obtiene,

$$q = \iint f I_0 \cos \theta \frac{dA_c \cos \theta_c}{|\vec{r} - \vec{r}_c|^2} \quad (2.6)$$

Entonces el radio de concentración $C(\vec{r})$ es,

$$C(\vec{r}) = C(r, \theta) = \frac{q}{I_0} = \iint f \frac{\cos \theta \cos \theta_c}{|\vec{r} - \vec{r}_c|^2} dA_c \quad (2.7)$$

La integral se realiza sobre todo el área del concentrador.

El radio de concentración es función de la coordenada azimutal y la coordenada radial.

Una vez conocidas las geometrías del sistema se pueden evaluar $\cos \theta$ y $\cos \theta_c$,

$$\cos \theta = -\hat{r} \cdot \hat{n}_r \quad (2.8)$$

$$\cos \theta_c = -\hat{n}_c \cdot \hat{\rho} \quad (2.9)$$

3 HERRAMIENTAS Y METODOLOGIA

Para calcular el flujo sobre el receptor es necesario conocer las trayectorias e intensidades de los rayos incidentes y las geometrías del sistema para evaluar las ecuaciones (2.7) a (2.10). Para ello, se utilizan ecuaciones de óptica geométrica y electromagnetismo, junto con algunas relaciones trigonométricas elementales.

Como se mencionó anteriormente, la propuesta de Sheldon Jeter (1986) para calcular el flujo es un método puramente integral. Para realizar los cálculos expuestos previamente se utilizó el software Comsol Multiphysics, en el cual es posible modelar la propagación de ondas electromagnéticas (OE) pudiendo calcular trayectorias, intensidades, energía y otras propiedades relacionadas a las OE.

El método utilizado por Comsol se basa en las ideas de S. Jeter [20] y propone diversos modelos para el cálculo de las intensidades y las trayectorias de las ondas electromagnéticas.

3.1 Implementación en Comsol.

A continuación, se exponen los métodos y modelos utilizados con el fin de calcular la intensidad y la trayectoria de las ondas electromagnéticas y para luego realizar la integral (2.7) para el radio de concentración.

3.1.1 Trayectoria de Rayos

El campo eléctrico de una onda electromagnética se puede representar como,

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i\Psi} \quad (3.1)$$

siendo E_0 la amplitud de la onda y Ψ la fase, la cual es función del vector posición \mathbf{q} y del tiempo. Si la onda está lo suficientemente alejada de la fuente (como en nuestro caso), el frente de onda se puede aproximar por un frente de onda plano, entonces es posible escribir la fase como

$$\Psi = \mathbf{k} \cdot \mathbf{q} - \omega t + \alpha \quad (3.2)$$

donde \mathbf{k} es el vector de onda, ω la frecuencia angular y α una fase arbitraria.

Para un medio isotrópico el vector de onda y la frecuencia están relacionados mediante la expresión,

$$\omega = \frac{c|\mathbf{k}|}{n(\mathbf{q})} \quad (3.3)$$

donde $n(\mathbf{q})$ es el índice de refracción del medio.

Para resolver la trayectoria de un rayo es necesario resolver las siguientes ecuaciones provenientes del electromagnetismo que relacionan el vector de onda, la frecuencia angular y las coordenadas generalizadas \mathbf{q} .

$$\frac{d\mathbf{k}}{dt} = -\frac{\partial\omega}{\partial\mathbf{q}} \quad \frac{d\mathbf{q}}{dt} = \frac{\partial\omega}{\partial\mathbf{k}} \quad (3.4)$$

Este es un sistema de 6 ecuaciones diferenciales acopladas para las componentes de \mathbf{k} y \mathbf{q} .

Si el medio es no dispersivo (índice de refracción constante) y derivando la ecuación (3.3) estas ecuaciones se reducen a:

$$\frac{d\mathbf{k}}{dt} = 0 \quad \frac{d\mathbf{q}}{dt} = \frac{c\mathbf{k}}{n|\mathbf{k}|} \quad (3.5)$$

Además, para el cálculo de la trayectoria de los rayos se utilizan como variables auxiliares la curvatura y el radio de curvatura del frente de ondas reflejado.

Para un frente de ondas tridimensional propagándose en la dirección \mathbf{n} se utilizan dos radios principales de curvatura r_1 y r_2 con direcciones \mathbf{e}_1 y \mathbf{e}_2 , respectivamente, perpendiculares a la dirección de propagación del frente; para ambos radios se cumple que

$$\frac{dr_1}{ds} = -1 \quad \frac{dr_2}{ds} = -1 \quad (3.6)$$

El signo menos indica que el frente de onda se expande a medida que el rayo se aleja de la fuente.

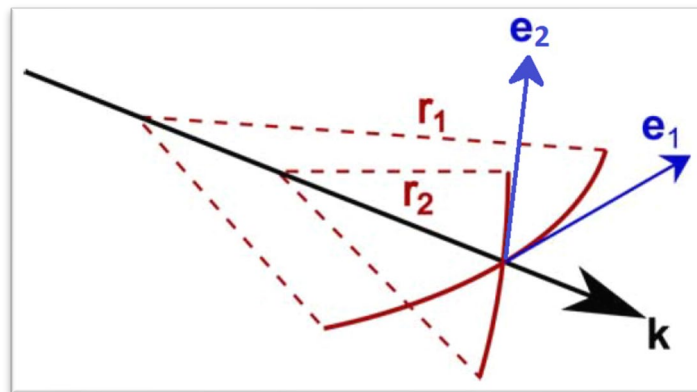


Figura 3.1.1.1: Propagación de una onda electromagnética. Radios de curvatura r_1 y r_2 ; vector de onda \mathbf{k} y versor \mathbf{e}_1 y \mathbf{e}_2 .

Las curvaturas principales del frente vienen dadas por,

$$\kappa_1 = 1/r_1 \text{ y } \kappa_2 = 1/r_2 \quad (3.7)$$

3.1.2 Dirección inicial de los rayos incidentes

Al momento de establecer la dirección inicial de los rayos que llegan al concentrador provenientes del Sol, es necesario considerar el tamaño finito del mismo, lo cual implica que los rayos incidentes no llegan todos paralelos al concentrador (Figura 3.1.2.1). Esta corrección se aplica para ambos modelos

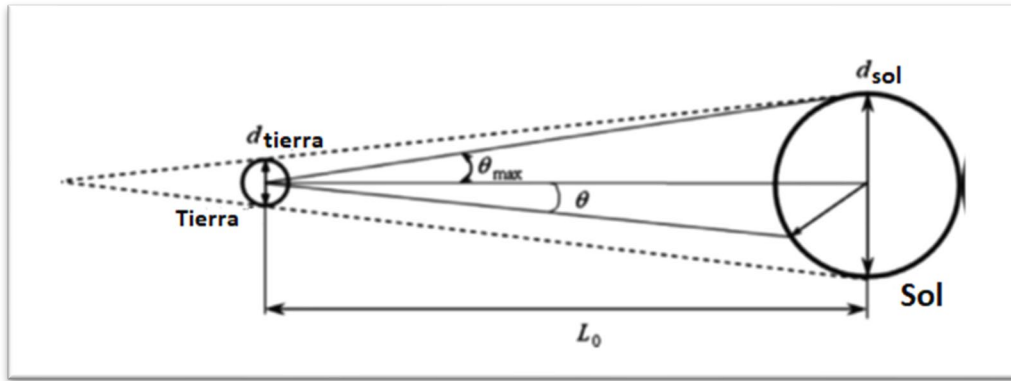


Figura 3.1.2.1.: Los rayos provenientes del Sol arriban a la Tierra con un ángulo ϑ . El ángulo máximo es $\vartheta_{\text{máx}}=4,65\text{mrad}$.

Para tener en cuenta esta corrección, la dirección inicial de los rayos es perturbada por un ángulo aleatorio. La densidad de probabilidad de estas perturbaciones es uniforme dentro de un cono con ángulo máximo $\theta_{\text{max}} = 4,65 \text{ mrad}$, el cuál es el ángulo del borde del disco solar visto desde la Tierra (Fig. 3.1.2.1) (es el máximo valor posible para los rayos incidentes).

Para calcular el valor de θ_{max} se utiliza la siguiente expresión,

$$\theta_{\text{max}} = \arcsen\left(\frac{d_{\text{sol}}}{2L_0}\right) = 4,65 \text{ mrad}$$

Donde

- d_{sol} : diametro solar = $1,392 \times 10^9 \text{ m}$
- L_0 : distancia Tierra – Sol = $1,496 \times 10^{11} \text{ m}$

3.1.3 Dirección de los rayos reflejados

A continuación, se desarrolla la metodología para determinar la dirección de los rayos que son emitidos desde el concentrador. Las correcciones son aplicadas sobre el segundo modelo.

3.1.3.1 Concentrador ideal

Para el primer caso de estudio donde no se considera absorción ni rugosidad y suponiendo reflexión especular, la dirección inicial del rayo reflejado está dada por la ecuación

$$\mathbf{n}_r = \mathbf{n}_i - 2(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_s)\mathbf{n}_s = \mathbf{n}_i - 2n_c \cos \theta_i \quad (3.8)$$

donde, θ_i es el ángulo incidente y es calculado mediante las ecuaciones de Snell

$$\theta_i = \text{acos} \left(\frac{\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_c}{|\mathbf{n}_i| |\mathbf{n}_c|} \right)$$

siendo \mathbf{n}_i la dirección del rayo incidente, \mathbf{n}_c la dirección del versor normal a la superficie del concentrador y \mathbf{n}_r la dirección del rayo reflejado.

3.1.3.2 Concentrador con correcciones

Para el segundo estudio, donde se tiene en cuenta la rugosidad (la denominada reflexión difusa), la dirección del rayo reflejado dada por la ecuación (3.8) es perturbada por una distribución de Rayleigh, la cual está dada por

$$P(\phi) = \frac{\phi}{\sigma_\phi^2} \exp \left(-\frac{\phi^2}{2\sigma_\phi^2} \right) \quad (3.9)$$

ϕ es el ángulo de reflexión y σ_ϕ es el denominado error de pendiente de superficie (en inglés, Surface slope error) y es un parámetro que caracteriza la rugosidad de un sistema óptico [21],[22]. La figura que sigue a continuación ilustra la relación que existe entre este parámetro y la superficie de un material.

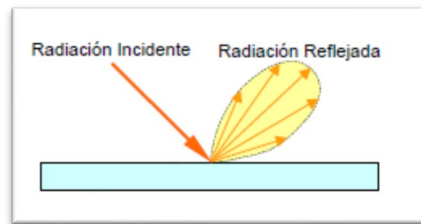


Figura 3.1.3.2.1: Reflexión difusa. Se modela por una perturbación de Rayleigh

Además, con el motivo de ahorrar en recursos computacionales, los rayos reflejados son emitidos directamente desde la superficie del concentrador, sin tener en cuenta los rayos incidentes. Es decir, al momento del cálculo no se computan los rayos provenientes del Sol. La Figura 3.1.3.2.2. ilustra esta idea,

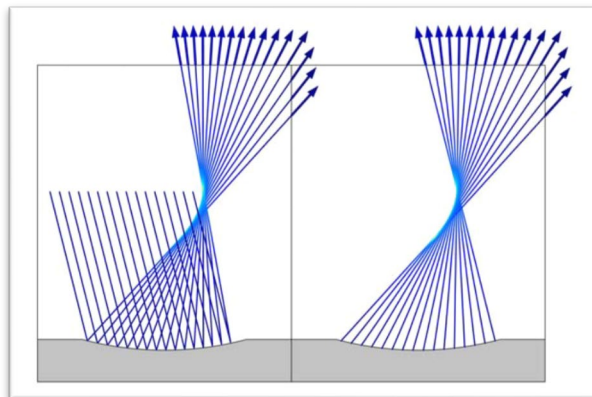


Figura 3.1.3.2.2: (a) Rayos solares incidentes y reflejados en el concentrador; (b) Rayos reflejados en el concentrador

3.1.4 Intensidad de los rayos

Para una onda electromagnética, las amplitudes relativas de las componentes perpendicular (p) y paralela (s) de los campos eléctricos reflejados están dadas por las siguientes ecuaciones [23]:

Para la componente perpendicular tenemos que,

$$\frac{E_p}{E_i} = \frac{n_1 \cos \theta_i - \frac{\mu_1}{\mu_2} \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}}{n_1 \cos \theta_i + \frac{\mu_1}{\mu_2} \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}}$$

Mientras que para la componente paralela del campo reflejado se tiene que,

$$\frac{E_p}{E_i} = \frac{\frac{\mu_1}{\mu_2} n_2^2 \cos \theta_i - n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}}{\frac{\mu_1}{\mu_2} n_2^2 \cos \theta_i + n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}}$$

Para calcular la intensidad de la onda reflejada en el concentrador se utilizan los coeficientes de Fresnel (parámetros que permiten medir la relación entre los campos eléctricos transmitido y reflejado),

$$r_p = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \quad (3.10)$$

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \quad (3.11)$$

donde, r_p y r_s son los coeficientes de reflexión. El subíndice p denota la componente perpendicular de polarización y el subíndice s denota la componente paralela. Los ángulos θ_i y θ_t son los ángulos de incidencia y transmisión, respectivamente.

Una vez calculados los coeficientes de Fresnel, las intensidades de las componentes p y s de la onda reflejada están dadas por:

$$I_p = I_i |r_p|^2 \quad (3.12)$$

y

$$I_s = I_i |r_s|^2 \quad (3.13)$$

En estas ecuaciones I_i es la intensidad incidente.

3.1.4.1 Concentrador Ideal: Intensidad incidente constante.

En el primer modelo se considera constante la intensidad solar, pero teniendo en cuenta que el Sol es una fuente difusa.

Para una fuente difusa se puede utilizar el siguiente resultado conocido:

$$I = \frac{e}{\pi} \quad (3.14)$$

donde e es la emisividad efectiva de la fuente.

Se puede relacionar la emisividad efectiva del sol con la irradiancia normal terrestre I_0 mediante el siguiente balance de energía,

$$(4\pi R_1^2)e = (4\pi R_2^2)I_0$$

La Figura 3.1.4.1.1 ilustra esta idea,

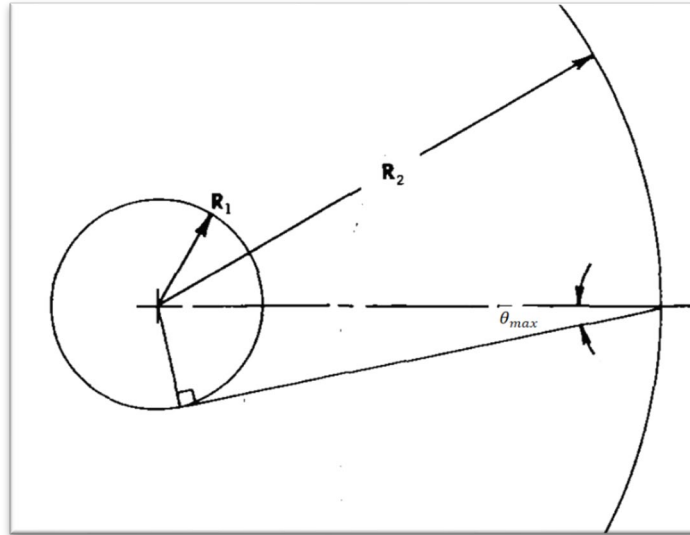


Figura 3.1.4.1.1: Relaciones trigonométricas entre el radio solar (R_1) y la órbita de la Tierra (R_2) que determinan el ángulo ϑ_m subtendido por el borde del Sol (visto desde la Tierra)

Despejando e ,

$$e = \frac{(4\pi R_2^2)}{(4\pi R_1^2)} I_0 = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 I_0 \quad (3.15)$$

De la imagen se deduce que,

$$\text{sen } \theta_{max} = \frac{R_1}{R_2} \quad (3.16)$$

Reemplazando (3.15) y (3.16) en (3.14) tenemos para la intensidad,

$$I = \frac{e}{\pi} = \frac{R_2^2}{\pi R_1^2} I_0 = \frac{I_0}{\pi \text{sen}^2 \theta_{max}}$$

La intensidad incidente es, por lo tanto,

$$I_i = I_0 f(\delta) = \frac{I_0}{\pi \text{sen}^2(\theta_{max})} \quad (3.14)$$

- I_0 es la denominada constante solar y representa la potencia global promedio que llega a la superficie terrestre, tomaremos el valor de $I_0 = 1000 \text{ W/m}^2$.
- $\theta_m = 4,65 \text{ mrad}$ (ángulo del borde del disco solar visto desde la Tierra).

3.1.4.2 Concentrador con correcciones: Intensidad variable

En el segundo modelo se tiene en cuenta la variación de la intensidad solar con la posición angular: la intensidad proveniente de la parte central del Sol es mayor que la

proveniente de los bordes. Además, la distribución en la intensidad es dependiente de la longitud de onda λ . Esta dependencia es suave salvo para ciertos valores de λ . Para modelar esta variación se utiliza un ajuste exponencial empírico dado por [24],

$$I_i(\psi_s) = I_0 \mu^{\alpha(\lambda_0)} \quad (3.15)$$

donde,

$$\mu = \cos \theta_s$$

- θ_s : ángulo subtendido entre la línea que une los centros del Sol y el concentrador, y el centro solar y un punto cualquiera del concentrador. Ver figura 3.1.2.1
- I_0 : es la intensidad de la radiación solar proveniente del centro y tomamos el valor de la constante solar como esta radiación.

Este modelo para la intensidad se está respaldado por medidas experimentales. Las utilizadas en este modelo son las recolectadas por Neckel y Labs (1994), y las tomadas por Pierce y Slaughter (1977) [24].

Para lograr un ajuste en concordancia con los datos experimentales disponibles [24], el exponente α tiene una dependencia con la longitud de onda del espacio vacío $\lambda_0 = 600 \text{ nm}$, dada por:

$$\alpha(\lambda_0) = \begin{cases} -0,023 + 0,292\lambda_0^{-1} & \lambda_0^{-1} \leq 2,4\mu\text{m}^{-1} \\ 0,3778 + 0,135\lambda_0^{-1} & 2,4\mu\text{m}^{-1} \leq \lambda_0^{-1} \leq 2,8\mu\text{m}^{-1} \\ -0,507 + 0,441\lambda_0^{-1} & 2,8\mu\text{m}^{-1} \geq \lambda_0^{-1} \end{cases}$$

De este modo, la distribución de la intensidad depende de un solo parámetro.

3.1.5 Definición de variables para el cálculo

En las figuras que siguen a continuación muestran distintas vistas de las geometrías del concentrador y el plano focal. Además, se muestran los vectores y ángulos utilizados en Comsol para realizar los cálculos.

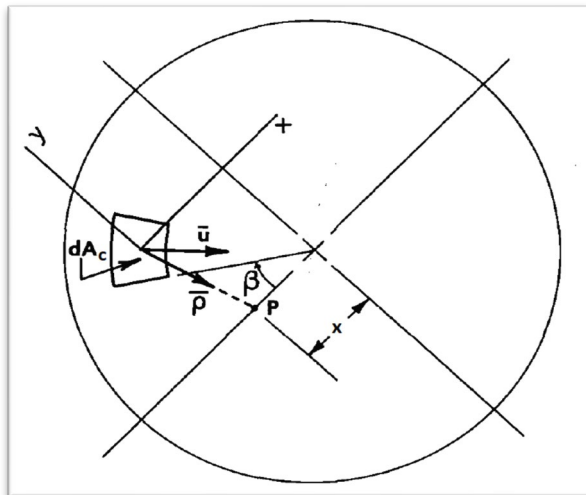


Figura 3.1.5.1: Vista superior del concentrador. El punto P está desplazado del centro (punto focal)

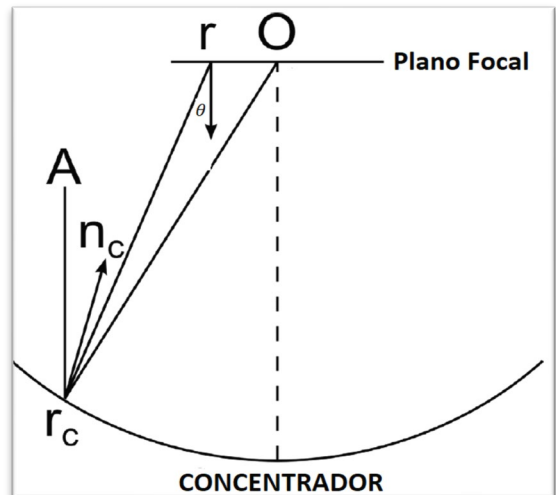


Figura 3.1.5.2: Vista lateral del concentrador y el plano focal

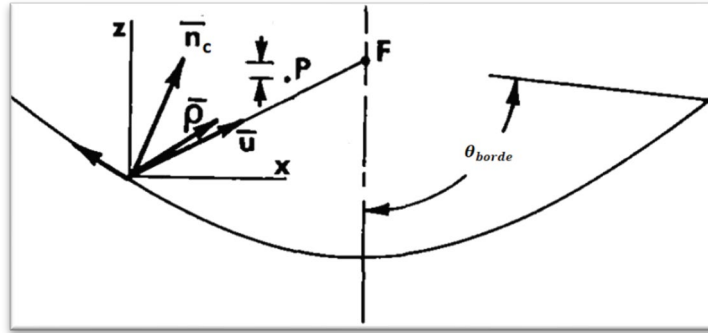


Figura 3.1.5.3: Vista lateral. Se muestran vectores utilizados en Comsol

Se definen las siguientes variables utilizadas en el cálculo, las cuales complementan las expuestas en la Figura 2.2.1:

- $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ Coordenada radial. Plano X-Y
- $\beta = \arctg\left(\frac{y}{x}\right)$ Ángulo azimutal. Plano X-Y
- $dx = x - x'$ Desplazamiento entre P y dA_c, coordenada x.
- $dy = y - y'$ Desplazamiento entre P y dA_c, coordenada y.
- $dz = z - z'$ Desplazamiento entre P y dA_c, coordenada z.
- $\rho = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$ Distancia entre P y dA_c.
- $u = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ Distancia entre dA_c y el centro del plano focal.
- $\theta_i = \frac{\text{acos}(dx*x+dy*y+dz*z)}{dxn*dxcn}$ Ángulo de los rayos incidentes.
- $\theta_c = \frac{\text{acos}(dx*nx+dy*ny+dz*nz)}{dxn}$ Ángulo entre el rayo reflejado y versor normal al concentrador.
- $\theta = \frac{\text{acos}(dx*nx'+dy*ny'+dz*nz')}{dxn}$ Ángulo entre el rayo reflejado y versor normal al plano focal.

El diámetro del concentrador viene dado por,

$$d = 4 * f * (\text{cosec}(\theta_{borde}) - \cot(\theta_{borde}))$$

donde θ_{borde} es el ángulo máximo de apertura del concentrador (Figura 3.2.1) y f el foco del mismo.

La proyección del área del concentrador es entonces,

$$A = \pi \frac{d^2}{4}$$

3.1.6 Variables auxiliares

Para el cálculo de las trayectorias e intensidades de los rayos, Comsol utiliza un conjunto de variables auxiliares con el fin de facilitar el cálculo de los mismos.

3.1.6.1 Cálculo de trayectorias: Radios de curvatura

Para calcular la dirección del frente de ondas, se utilizan como variables auxiliares los radios principales de curvatura r_1 y r_2 . La dirección inicial para los rayos reflejados depende de la dirección de rayo incidente y de la curvatura de la superficie del concentrador en el punto donde es emitido el rayo. Es necesario conocer entonces las curvaturas del frente de ondas (k_1 y k_2) y las curvaturas de la superficie del concentrador k_c .

En la Figura 3.1.6.1.1 se muestran los radios de curvatura r_1 y r_2 para una onda electromagnética propagándose, y la dirección del vector principal de curvatura e_1 .

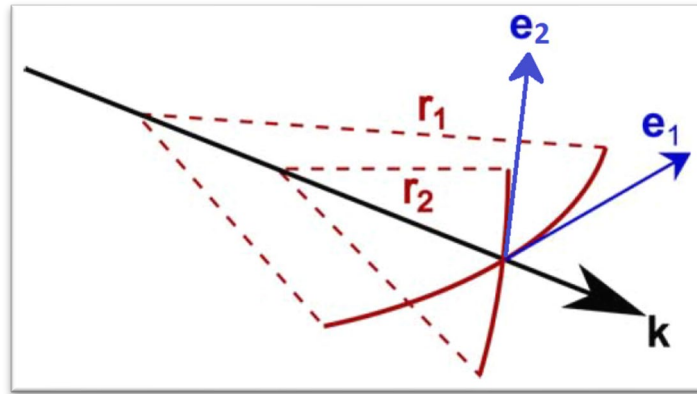


Figura 3.1.6.1.1: Radios principales de curvatura y dirección del vector principal de curvatura

Por cada elemento diferencial de área del concentrador se emiten N rayos (entre 100.000 y 150.000), por lo tanto, se tienen N valores para los radios de curvatura (por cada dA_c). Además, la dirección de cada rayo se actualiza cada vez que un rayo golpea la superficie del concentrador, cambiando de dirección cada vez que es actualizado.

Para obtener el radio de curvatura inicial de cada rayo, se procede de la siguiente manera. Se realiza un cambio de coordenadas siguiendo un método propuesto por Orestes N. Stavroudis [25].

Primero se definen los siguientes vectores,

$$\mathbf{u}_0 = \frac{\mathbf{n}_i \times \mathbf{n}_c}{|\mathbf{n}_i \times \mathbf{n}_c|}$$

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{n}_i \times \mathbf{u}_0$$

$$\mathbf{u}_r = \mathbf{n}_r \times \mathbf{u}_0$$

$$\mathbf{u}_c = \mathbf{n}_c \times \mathbf{u}_0$$

$$\mathbf{n}_r = \mathbf{n}_i - 2\mathbf{n}_c \cos \theta_i$$

Se realiza un cambio de coordenadas desde el sistema e_1, e_2 y n_i al sistema e_1', e_2' dado en la dirección de los vectores u_0, u_i y n_i ; el ángulo de esta rotación es $\theta^{(i)}$. Este sistema es ortogonal a e_1, e_2 (ambos ortogonales a n).

Los radios de curvatura del rayo emitido en este sistema de coordenadas vienen dados por,

$$\kappa_{1'} = \kappa_1 \cos^2 \theta^{(i)} + \kappa_2 \sin^2 \theta^{(i)}$$

$$\kappa_{2'} = \kappa_1 \sin^2 \theta^{(i)} + \kappa_2 \cos^2 \theta^{(i)}$$

$$\kappa_{12'} = (\kappa_1 - \kappa_2) \cos \theta^{(i)} \sin \theta^{(i)}$$

donde κ_1 y κ_2 son las curvaturas en el sistema dado por los vectores \mathbf{e}_1 y \mathbf{e}_2 .

Luego, se realiza una transformación similar para los radios de curvatura de la superficie del concentrador (que en la dirección de los vectores \mathbf{e}_{1c} y \mathbf{e}_{2c} son $\kappa_{1,c}$ y $\kappa_{2,c}$), al sistema dado por los vectores \mathbf{u}_0 , \mathbf{u}_c y \mathbf{n}_c ,

$$\kappa_{1,c'} = \kappa_{1c} \cos^2 \theta^{(c)} + \kappa_{2c} \sin^2 \theta^{(c)}$$

$$\kappa_{2,c'} = \kappa_{1c} \sin^2 \theta^{(c)} + \kappa_{2c} \cos^2 \theta^{(c)}$$

$$\kappa_{12,c'} = (\kappa_{1c} - \kappa_{2c}) \cos \theta^{(c)} \sin \theta^{(c)}$$

Las curvaturas de los rayos reflejados, en el sistema dado por los vectores \mathbf{u}_0 , \mathbf{u}_r y \mathbf{n}_r , se calculan usando las ecuaciones,

$$\kappa_{1,r'} = \kappa_{1'} - 2\kappa_{12'} \cos \theta_i$$

$$\kappa_{2,r'} = \kappa_{2'} - \frac{2}{\cos \theta_i} \kappa_{12'}$$

$$\kappa_{12,r'} = -\kappa_{12'} - 2\kappa_{12,c'}$$

Las curvaturas en el sistema original \mathbf{e}_1 y \mathbf{e}_2 se calculan rotando el sistema coordenado en un ángulo $\theta^{(r)}$ que se calcula mediante,

$$\theta^{(r)} = \frac{1}{2} \operatorname{atan} \left(\frac{2\kappa_{12,r'}}{\kappa_{2,r'} - \kappa_{1,r'}} \right)$$

Entonces, cada vez que un rayo es emitido desde la superficie, sus curvaturas se inicializan mediante las expresiones,

$$\kappa_{1,r} = \kappa_{1,r'} \cos^2 \theta^{(r)} + 2\kappa_{12,r'} \cos \theta^{(r)} \sin \theta^{(r)} + \kappa_{2,r'} \sin^2 \theta^{(r)}$$

$$\kappa_{2,r} = \kappa_{1,r'} \sin^2 \theta^{(r)} - 2\kappa_{12,r'} \cos \theta^{(r)} \sin \theta^{(r)} + \kappa_{2,r'} \cos^2 \theta^{(r)}$$

Invirtiéndolos se obtienen los radios principales de curvatura para los rayos emitidos,

$$r_1 = \frac{1}{\kappa_{1,r}} \text{ y } r_2 = \frac{1}{\kappa_{2,r}}$$

Por último, rotando \mathbf{u}_0 alrededor de \mathbf{n}_r en un ángulo $\theta^{(r)}$ se obtienen las direcciones iniciales de las curvaturas principales $\mathbf{e}_{1,r}$ y $\mathbf{e}_{2,r}$.

Este proceso es llevado a cabo cada vez que se emite un rayo desde la superficie del concentrador.

3.1.6.2 Intensidad: Parámetros de Stokes

Como parámetros auxiliares para la intensidad se utilizan parámetros de Stokes, s_0, s_1, s_2 y s_3 , los cuales contienen información del grado de polarización e intensidad de los rayos.

Similarmente a los radios de curvatura, cuando un rayo es emitido desde la superficie los parámetros s_0, s_1, s_2 y s_3 , son almacenados como variables iniciales auxiliares s_{00}, s_{01}, s_{02} y s_{03} . Estos valores, juntos con $r_{1,i}$ y $r_{2,i}$, son actualizados cada vez que un rayo es emitido desde la superficie del concentrador. Cuando se reinician los valores de $r_{j,i}$ y s_{0j} cada parámetro de Stokes se actualiza de la siguiente manera,

$$s_j = s_{0j} \frac{r_{1,i} r_{2,i}}{r_1 r_2} \quad j = (0,1,2,3)$$

3.1.7 Cálculo de la irradiancia en el Plano Focal

Para calcular la irradiancia en el plano focal se utiliza la ecuación (2.1),

$$d\dot{Q} = I d\Omega \cos\theta dA_f$$

De este modo podemos calcular el flujo infinitesimal $d\dot{Q}$ en cada elemento de área del plano focal. Una vez calculadas las trayectorias e intensidades de cada rayo por medio de los métodos descritos anteriormente se calculan cada $d\dot{Q}_i$ y el flujo total sobre el plano focal es entonces:

$$Q = \sum d\dot{Q}_i$$

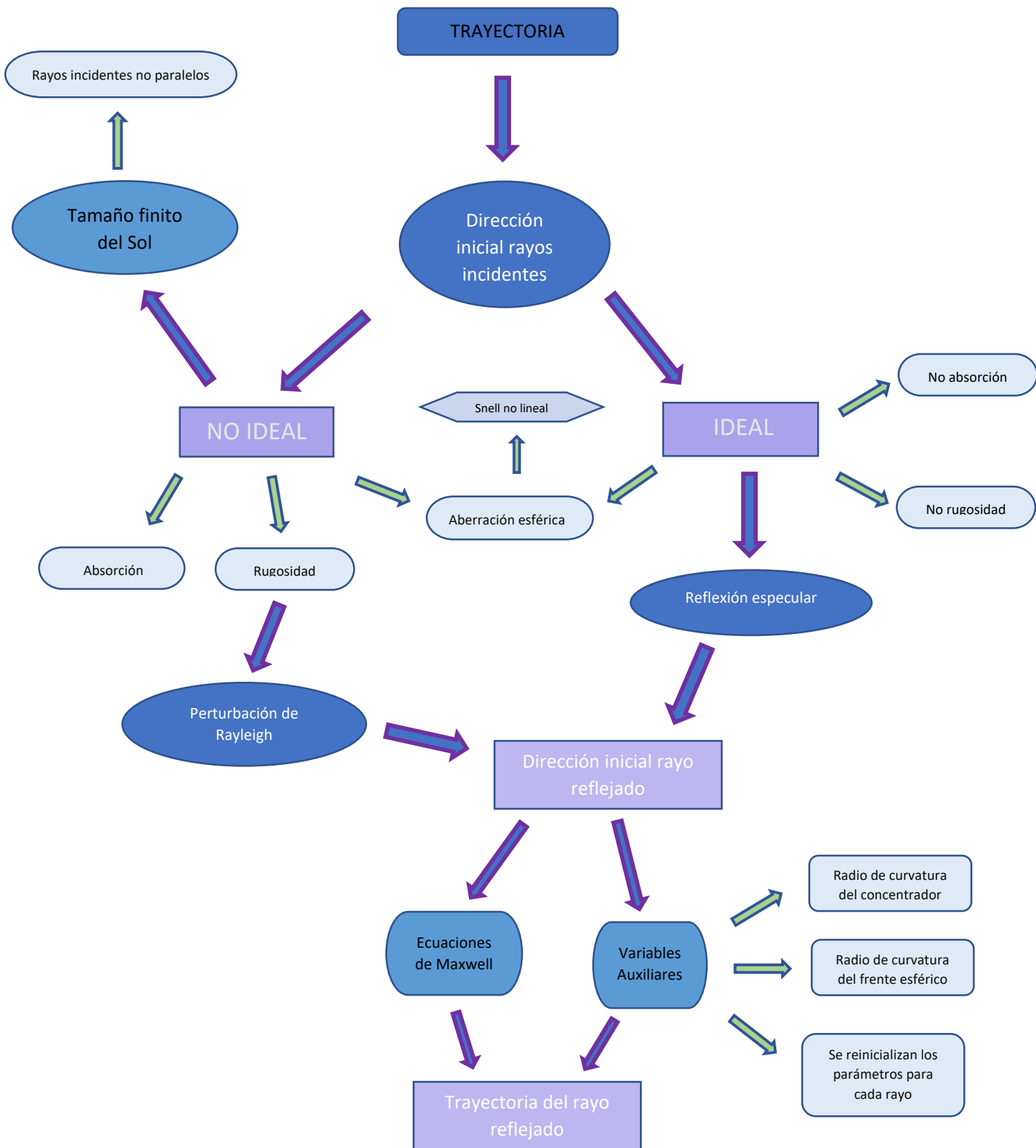
3.1.8 Radio de concentración

El modelo propuesto tiene una considerable acumulación de ruido estadístico debido a la gran cantidad de rayos involucrados en el modelo. Para disminuir este ruido se toma un valor medio para el radio de concentración, realizando un barrido sobre toda la coordenada azimutal por cada valor de la coordenada radial, es decir,

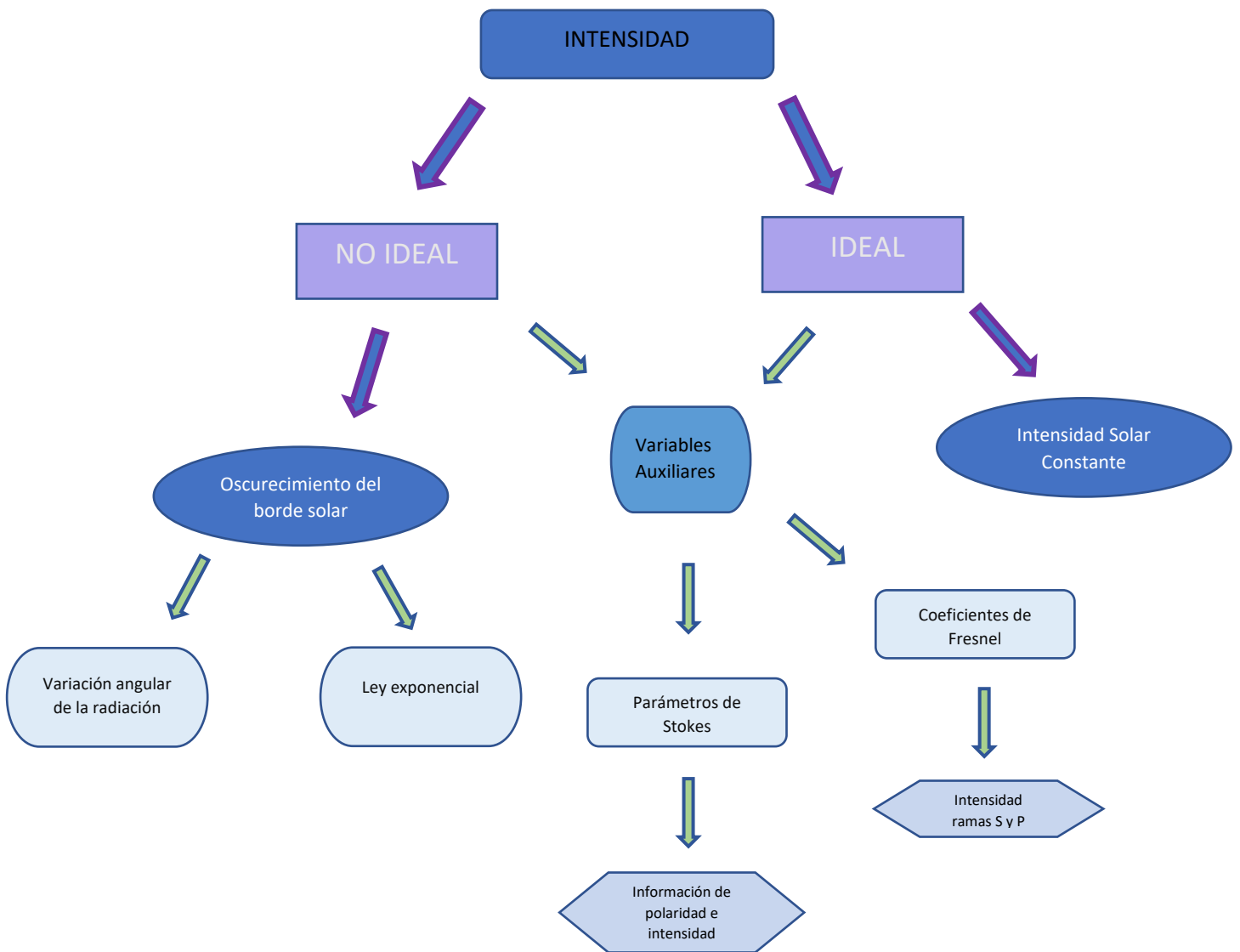
$$\bar{C}(\rho) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} C(\rho, \theta) d\theta$$

3.1.9 Esquema conceptual

A continuación, se muestra un esquema conceptual de los pasos realizados para calcular la trayectoria de los rayos que llegan al plano focal.



A continuación, se muestra un cuadro similar al anterior referido a la intensidad:



4 PRESENTACIÓN DE DATOS

Para ambos modelos de estudio se modificaron diversos parámetros y se analizó la distribución de la irradiancia [W/m^2] y la potencia total [W] del concentrador sobre el plano focal.

El plano focal se define como un plano paralelo al plano del concentrador, en este caso, el plano X-Y, que contiene al punto focal del paraboloide ideal.

4.1 Irradiancia y radio de concentración: concentrador ideal y concentrador con correcciones con $\theta_{\text{borde}} = 45^\circ$.

En esta sección vamos a comparar los resultados obtenidos para un concentrador ideal y un concentrador con correcciones, ambos con el mismo ángulo de borde y la misma distancia focal.

4.1.1 Concentrador ideal:

$$\theta_{\text{borde}} = 45^\circ; \text{ Distancia focal, } f = 3 \text{ m}$$

Trayectoria de rayos

En los gráficos que vemos a continuación se observan las trayectorias que siguen los rayos, desde que salen del colector hasta el punto focal. Se puede observar en la parte inferior, la forma paraboloide del colector y como los rayos se concentran en el plano focal. El color representa la potencia (W) de cada rayo individual.

Se observa como la potencia presenta una distribución en forma de anillos, disminuyendo la potencia de los rayos a medida que se acercan al borde.

Además, la zona central presenta la zona de mayor potencia individual y coincide con la región donde los rayos inciden paralelos.

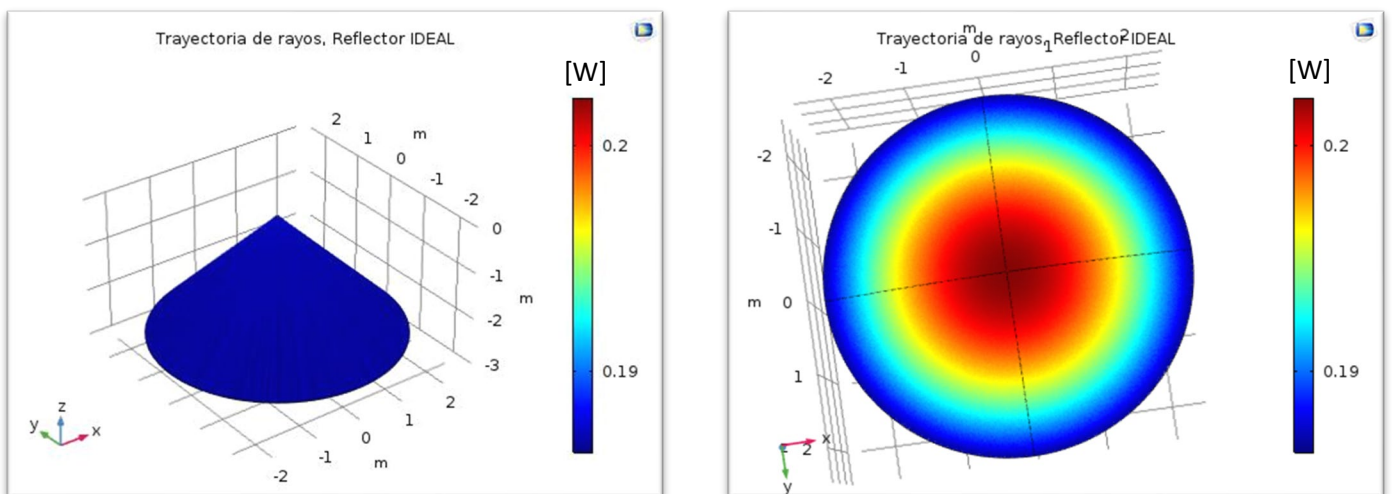


Figura 4.1.1.1: Trayectoria de los rayos reflejados. El color representa la potencia individual de cada rayo [W]

Irradiancia en el plano focal y Radio de Concentración (RC)

Las gráficas que siguen a continuación muestran la irradiancia en el plano focal y el radio de concentración.

En los gráficos respecto a la irradiancia (W/mm^2), se puede observar como varía la misma a medida que nos alejamos radialmente desde el punto focal. Se puede observar como la irradiancia es prácticamente constante en un radio de unos 18 cm y luego decae exponencialmente, anulándose rápidamente.

En las gráficas donde se muestra el radio de concentración, podemos observar cómo es su dependencia respecto al radio. De igual forma que la irradiancia, el RC se mantiene constante hasta un radio de unos 18 cm para luego decaer exponencialmente.

El fenómeno de aberración esférica provoca que los rayos reflejados se distribuyan en una región del plano focal y no en un punto. Además, la incidencia no paralela de los rayos también contribuye a esta dispersión en la distribución.

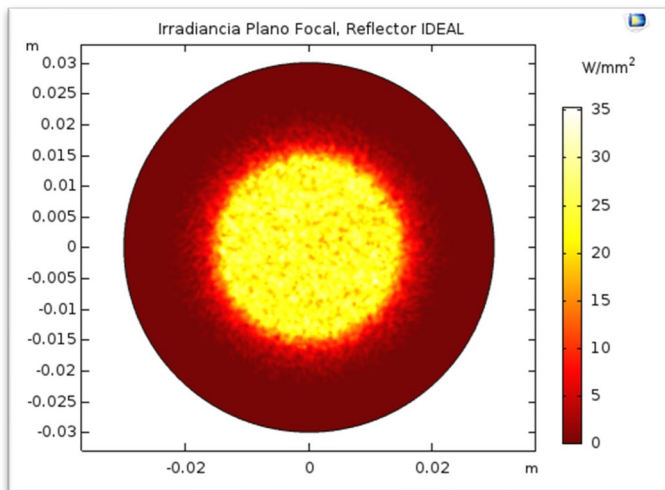


Figura 4.1.1.2: Irradiancia en el plano focal [W/mm^2].

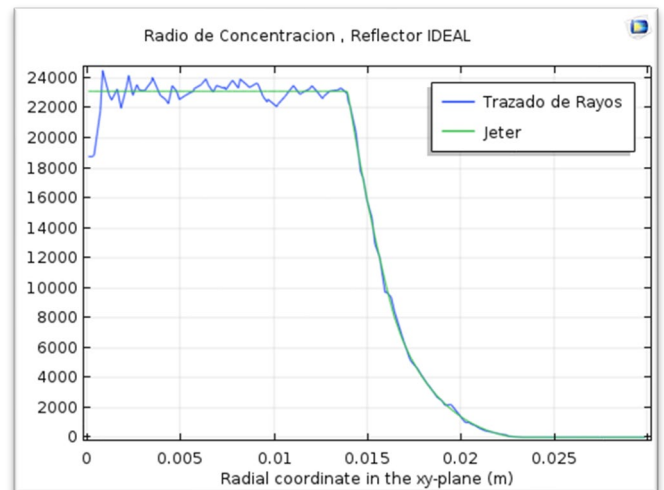


Figura 4.1.1.3: Radio de Concentración.

4.1.2 Concentrador no ideal:

$\theta_{borde} = 45^\circ$; Distancia focal, $f = 3 \text{ m}$; Coeficiente de absorción: $\alpha=0,1$;
Parámetro de rugosidad: $\sigma=1,75$.

Este valor del coeficiente de absorción, $\alpha = 0,1$ (10% absorción, 90% reflectividad) podría corresponder a un material de Plexiglás (acrílico) con espejos, ciertos aluminios disponibles en el mercado también cuentan con estos valores de reflectividad.

Trayectoria de rayos

En este caso, contrariamente al caso ideal, la potencia de cada rayo presenta una distribución homogénea en toda el área del concentrador, sin mostrar “zonas” bien diferenciadas como el caso ideal. La potencia de los rayos es menor en este caso.

Además, se puede ver que los rayos reflejados en el concentrador no arriban todos al plano focal, sino que también se dispersan en una región por encima del mismo. Esto provoca una obvia disminución de potencia en el plano focal.

En las gráficas donde se muestra la irradiancia en el plano focal del concentrador no ideal, corresponden a la zona ubicada debajo de este lóbulo.

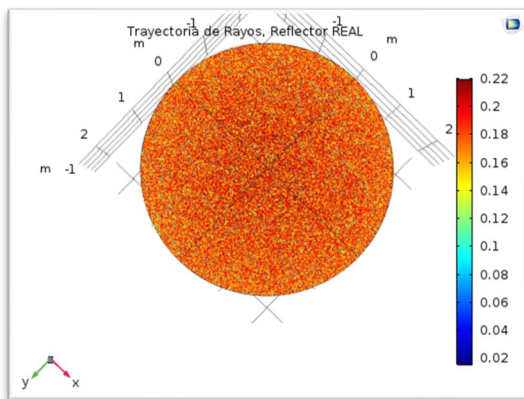


Figura 4.1.2.1: Trayectoria de los rayos reflejados. El color representa la potencia individual de cada rayo [W]

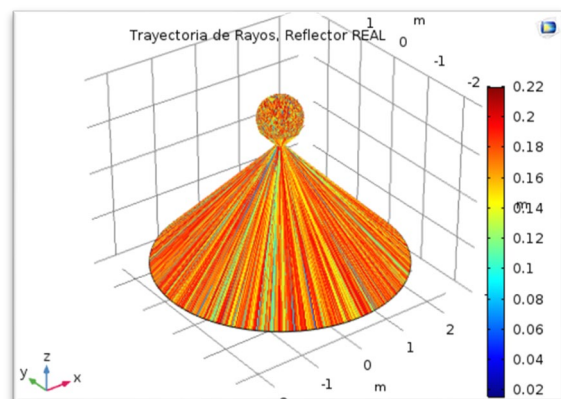


Figura 4.1.2.2: Trayectoria de los rayos reflejados (vista desde abajo). El color representa la potencia individual de cada rayo [W]

Irradiancia en el plano focal y Radio de Concentración (RC)

En las Figuras 4.1.2.3 y 4.1.2.4, se observan las gráficas respecto a la irradiancia en el plano focal y el radio de concentración de un concentrador no ideal.

Respeto a la irradiancia en el plano focal, observamos como la misma disminuye uniformemente de manera radial, donde el centro corresponde al punto focal.

El mismo comportamiento presenta el radio de concentración, el cual también disminuye de manera uniforme desde el centro del concentrador hacia el exterior.

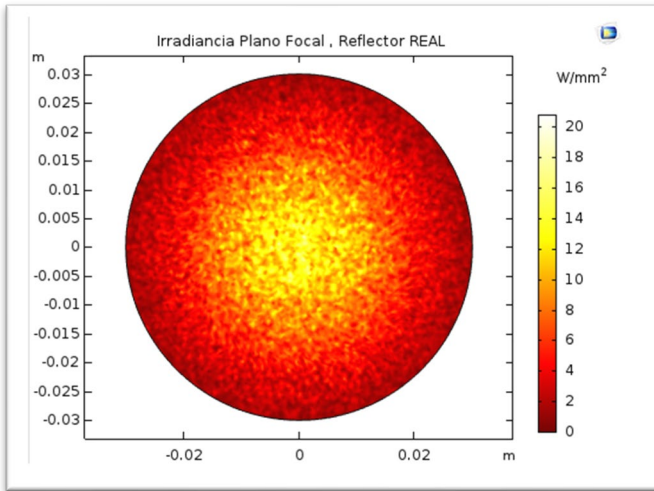


Figura 4.1.2.3: Irradiancia en el plano focal [W/mm^2]. La distribución es más dispersa que el caso ideal.

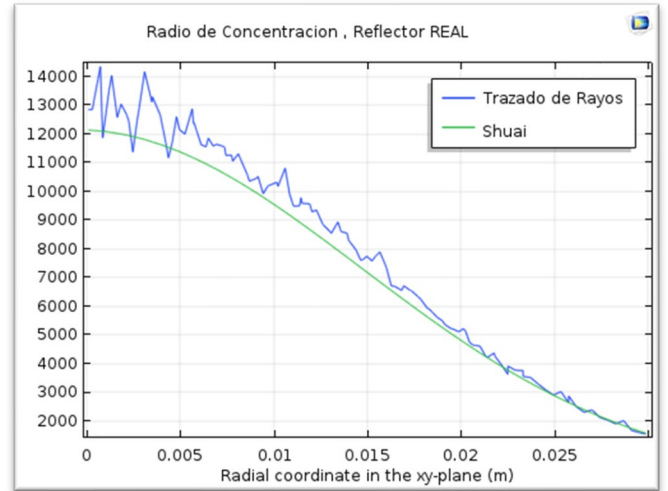


Figura 4.1.2.4: Radio de concentración, concentrador con correcciones.

4.1.3 Comparación entre ambos concentradores

En esta sección se comparan los resultados obtenidos para ambos concentradores respecto a la trayectoria de rayos, la irradiancia y el radio de concentración.

Trayectoria de rayos

En la Figura 4.1.3.1 se contrastan la trayectoria de los rayos para ambos concentradores. Se observa claramente como en el caso no ideal se dispersan los rayos y como su potencia está distribuida uniformemente, además los valores de potencia también son menores. [W]

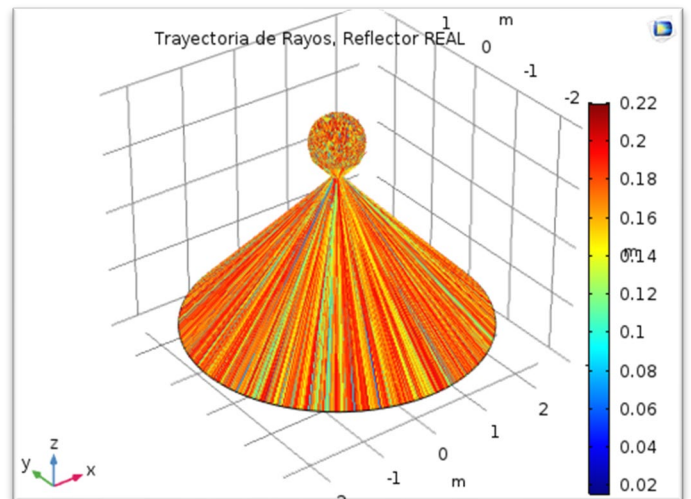
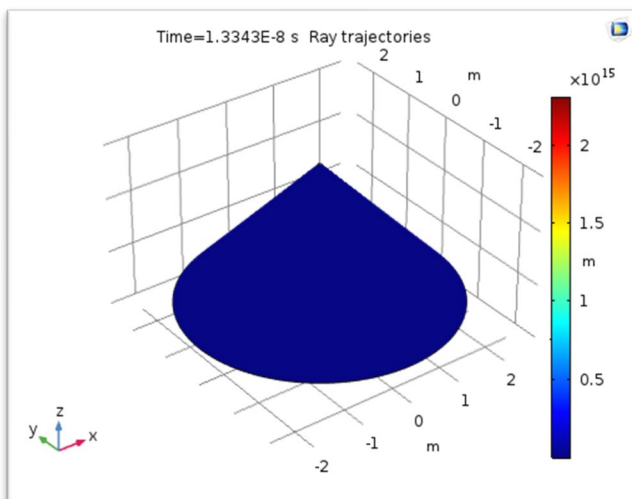


Figura 4.1.3.1: Trayectoria de rayos para ambos concentradores.

Irradiancia en el plano focal

En la Figura 4.1.3.2 se comparan los resultados para ambos concentradores respecto a la irradiancia.

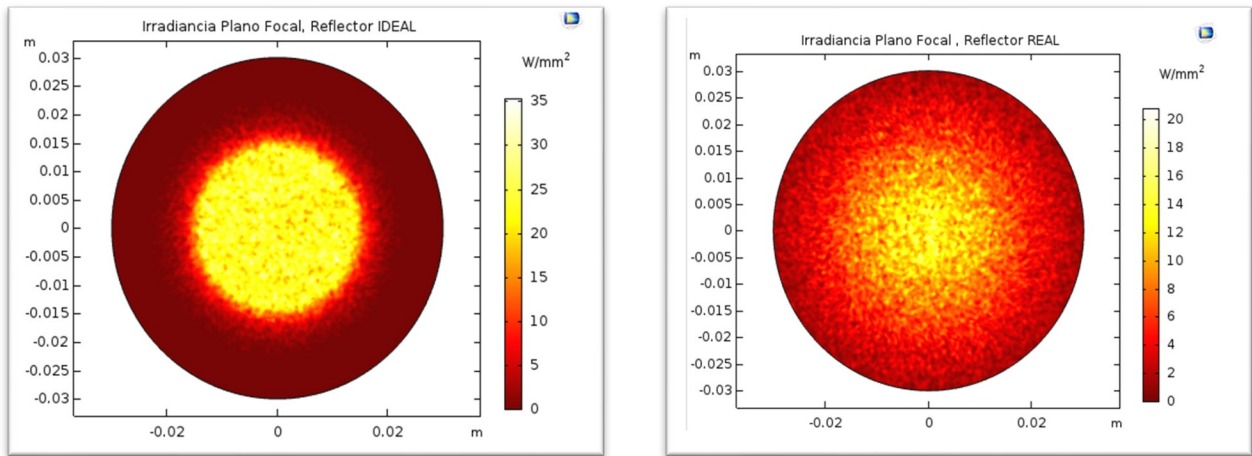


Figura 4.1.3.2: Irradiancia en el plano focal para ambos concentradores.

Observando los resultados respecto a la irradiancia se observa claramente que en el caso ideal la potencia está acotada en una región mientras en el caso no ideal decae radialmente. Además, la irradiancia es menor para el caso no ideal.

Radio de concentración

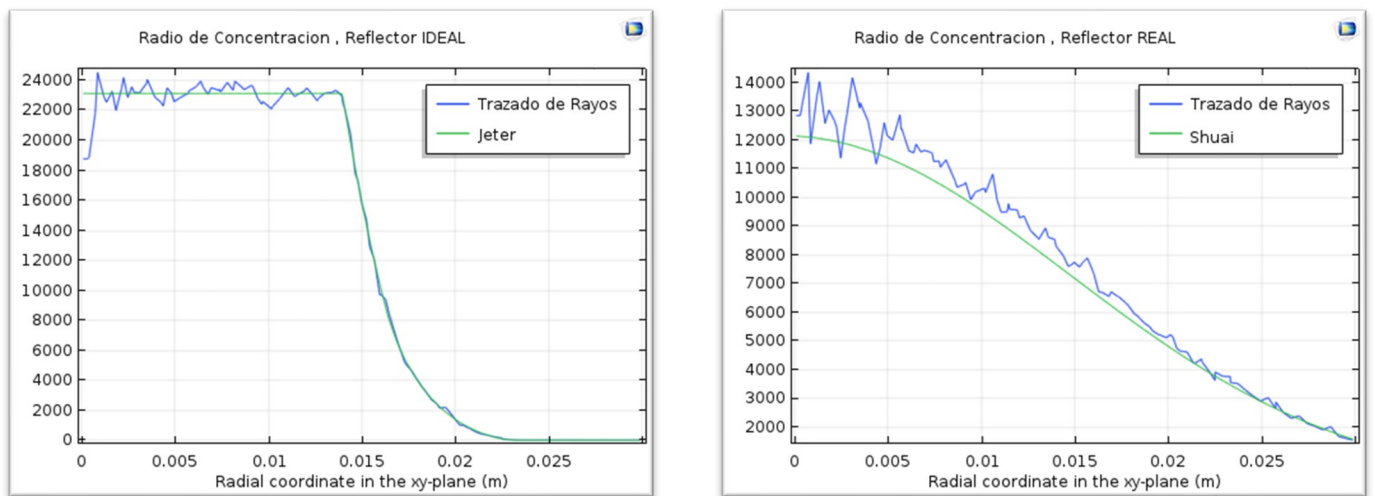


Figura 4.1.3.3: Comparación entre los radios de concentración para ambos casos.

Podemos observar como en el caso del concentrador no ideal el RC disminuye de forma constante desde el centro mientras que en el caso ideales constante hasta un radio de unos 15 cm y luego decae exponencialmente, dentro de ese radio.

4.2 Concentrador Ideal: Variación del ángulo de borde.

En esta sección vamos a estudiar cómo varía la irradiancia de un concentrador ideal en función del ángulo de borde manteniendo la distancia focal constante. La distancia focal es igual para todos, $f = 3 \text{ m}$.

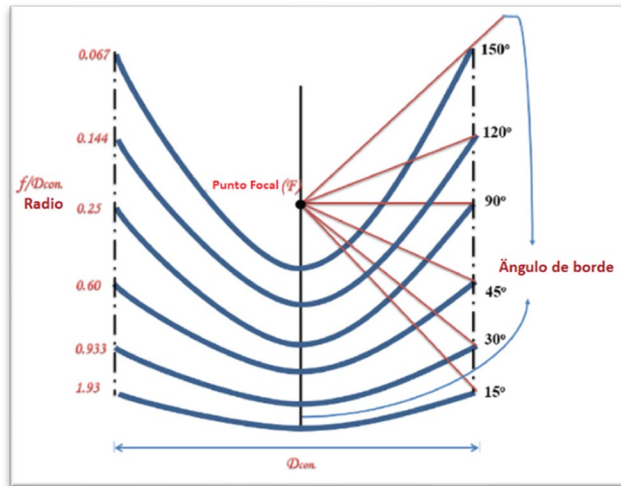


Figura 4.2: Distintos ángulos de borde para un mismo punto focal.

Al variar el ángulo de borde cambia el área del concentrador, cambiando la cantidad de radiación que intercepta el concentrador. A mayor ángulo de borde, se capta más radiación.

Se comparan estos resultados con los expuestos previamente para el concentrador ideal.

Como puede observar en las imágenes que siguen a continuación, a medida que aumenta el ángulo de borde, aumenta la irradiancia y el radio de concentración, esto se debe a que un mayor ángulo de borde implica mayor recolección de luz solar

4.2.1 $\theta_{\text{borde}} = 30^\circ$; Distancia focal, $f = 3 \text{ m}$

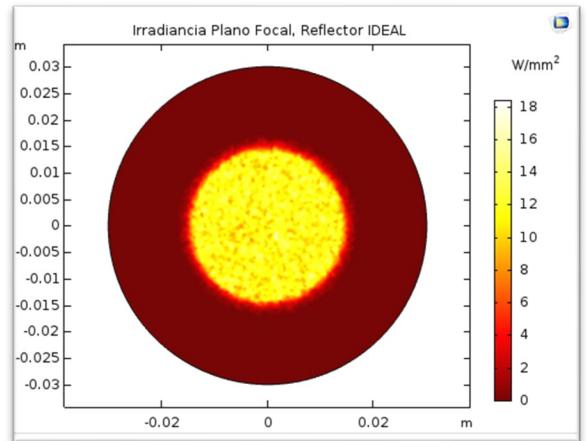
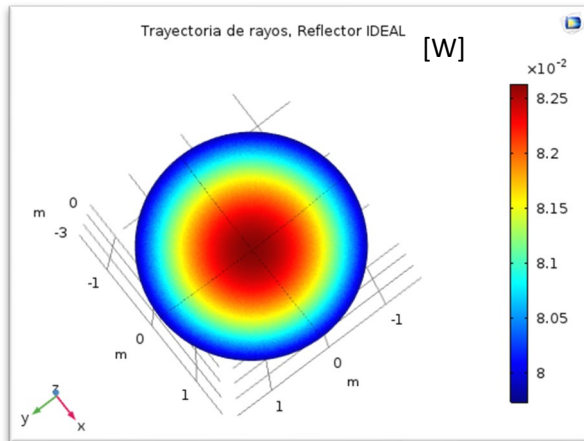


Figura 4.2.1.1: Trayectoria Concentrador Ideal.

Figura 4.2.1.2: Irradiancia plano focal concentrador ideal

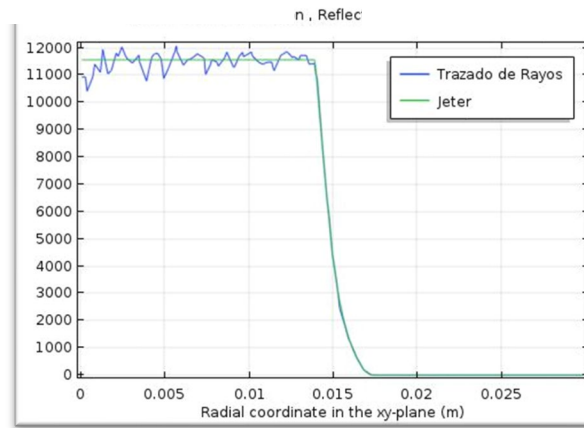


Figura 4.2.1.3: Radio de concentración concentrador ideal

4.2.2 $\theta_{\text{borde}} = 60^\circ$; Distancia focal, $f = 3 \text{ m}$

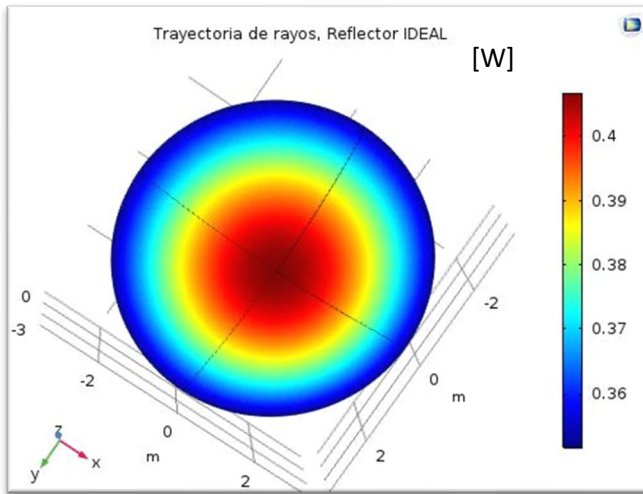


Figura 4.2.2.1: Trayectoria de rayos.

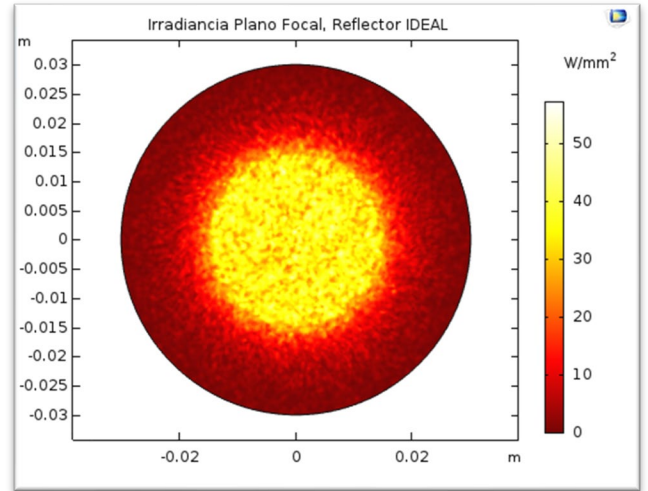


Figura 4.2.2.2: Irradiancia plano focal

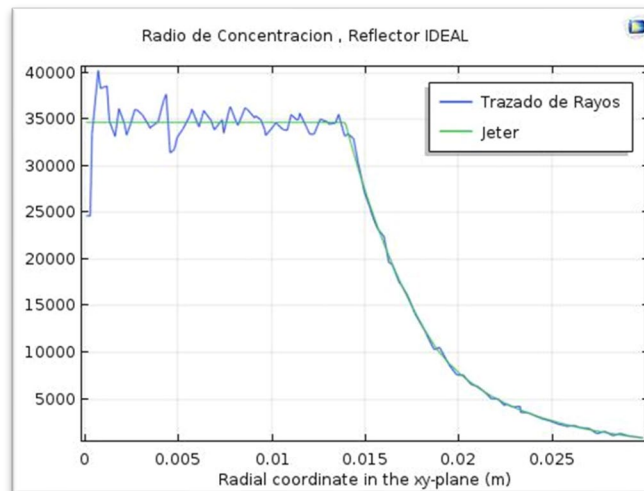


Figura 4.2.2.3: Radio de concentración

4.3 Concentrador con correcciones: variación de parámetros de absorción y rugosidad.

En esta sección se modificaron el coeficiente de absorción (α) y el coeficiente de rugosidad (σ), mientras se deja fijo el ángulo de borde. Luego se comparan los resultados con el concentrador con correcciones que se analizó en la sección 4.1.

4.3.1 Variación del parámetro de absorción α

En este estudio se modifica el coeficiente de absorción mientras se deja fijo el coeficiente de rugosidad.

En los resultados que se exponen se puede observar, como es de esperar, la irradiancia y el radio de concentración aumentan a medida que el coeficiente de absorción disminuye. Para una absorción del 50% la irradiancia disminuye considerablemente.

4.3.1.1 Distancia focal: $f = 3 \text{ m}$; Ángulo de borde: $\theta_{\text{borde}} = 45^\circ$; Parámetro de absorción: $\alpha = 0,02$; Coeficiente de rugosidad: $\sigma=1,75$.

Este valor de $\alpha = 0,02$ podría corresponder a aluminio pulido, acrílicos y ciertos films de polímeros. En este caso se tiene 2% de absorción (98 % de reflectividad).

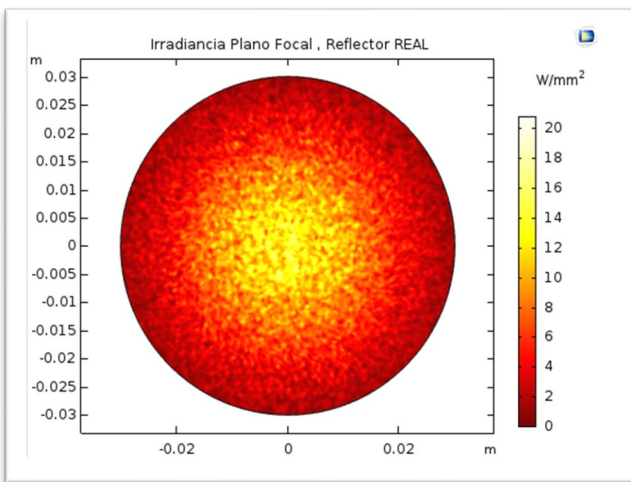


Figura 4.3.1.1.1: Irradiancia PF. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,02$; $\sigma=1,75$

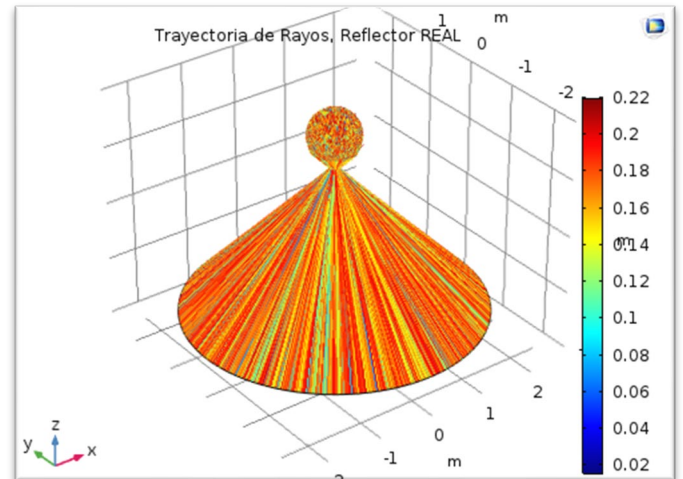


Figura 4.3.1.1.2: Trayectoria de Rayos. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,02$; $\sigma=1,75$

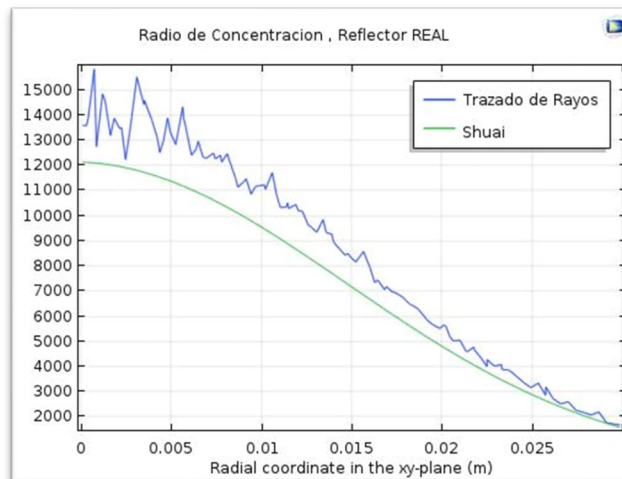


Figura 4.3.1.1.3: Radio de concentración. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,02$; $\sigma=1,75$

4.3.1.2 Distancia focal: $f = 3 \text{ m}$; Ángulo de borde: $\theta_{\text{borde}} = 45^\circ$; Parámetro de absorción: $\alpha = 0,5$; Coeficiente de rugosidad: $\sigma=1,75$.

Para este caso tenemos 50% de absorción. Este valor de α podría corresponder a acero inoxidable pulido, aluminio sin pulir, etc.

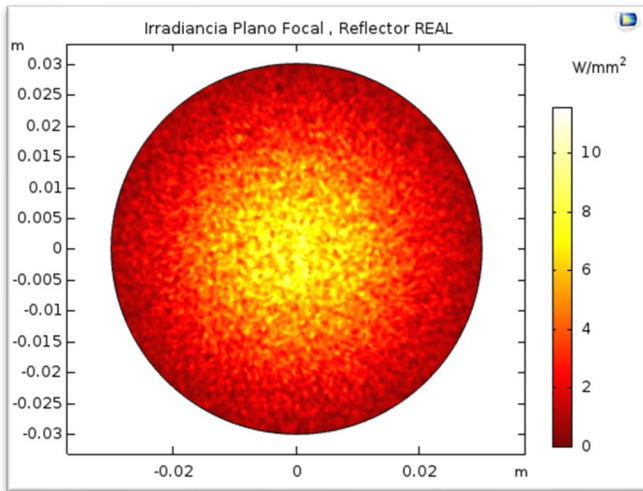


Figura 4.3.1.2.1: Irradiancia PF. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,5$; $\sigma=1,75$

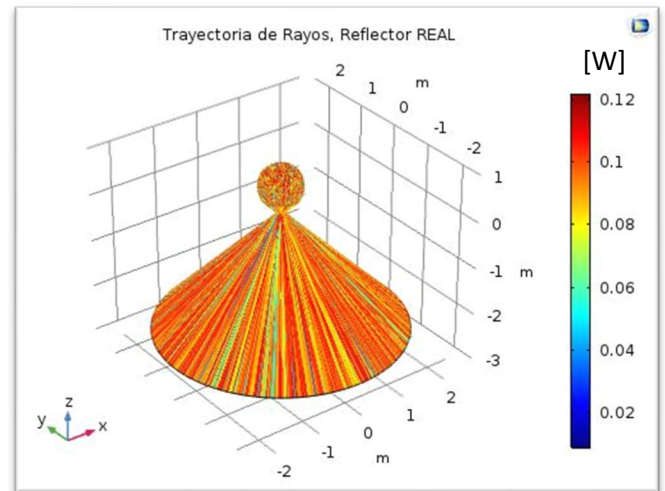


Figura 4.3.1.2.2: Trayectoria rayos. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,5$; $\sigma=1,75$

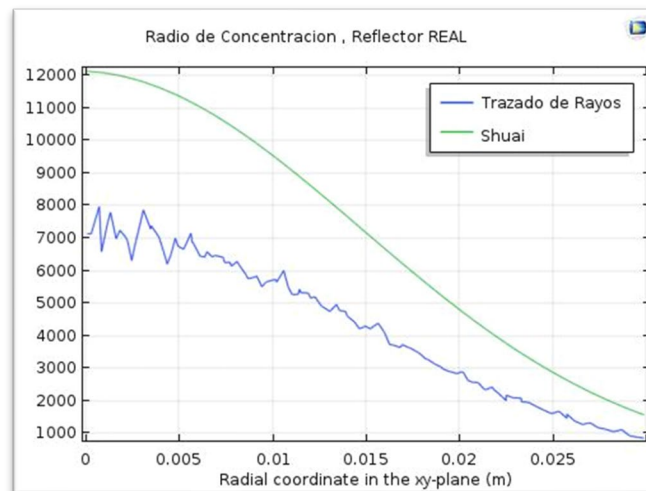


Figura 4.3.1.2.3: Radio de concentración. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,5$; $\sigma=1,75$

4.3.2 Variación del parámetro de rugosidad $[\sigma]$

En este caso se fija el ángulo de borde y el coeficiente de absorción mientras se modifica el coeficiente de rugosidad. Un coeficiente de rugosidad más bajo indica un material con menos rugosidad (más pulido). En un material más pulido se cumple la ley de reflexión especular de forma más exacta que para un material rugoso.

Como se aprecia en las siguientes figuras, la irradiancia sobre el plano focal disminuye para materiales más rugosos y aumenta considerablemente logrando superficies muy pulidas, resultado que es de esperarse.

4.3.2.1 Distancia focal: $f = 3 \text{ m}$; Ángulo de borde: $\theta_{\text{borde}} = 45^\circ$; Parámetro de absorción: $\alpha = 0,1$; Coeficiente de rugosidad: $\sigma=1$.

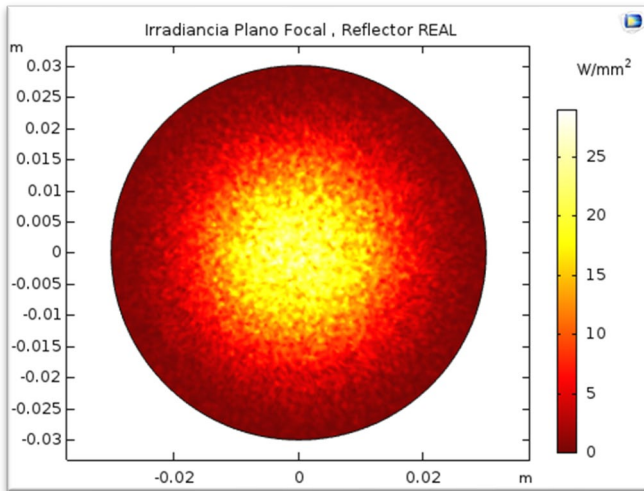


Figura 4.3.2.1.1: Irradiancia PF. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,1$; $\sigma=1$

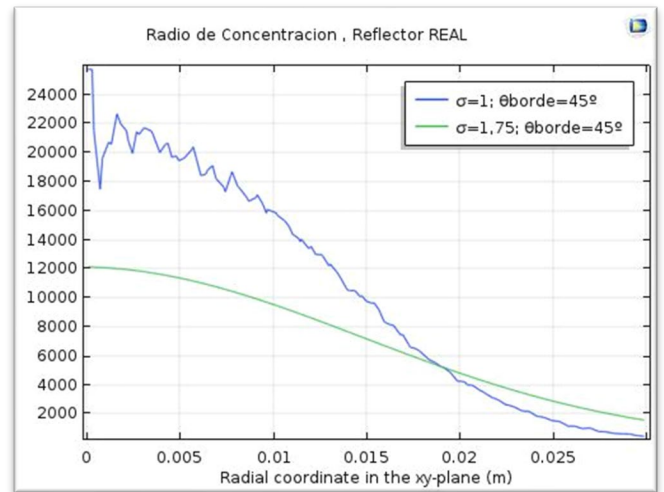


Figura 4.3.2.1.2: Radio de concentración. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,1$; $\sigma=1$

4.3.2.2 Distancia focal: $f = 3 \text{ m}$; Ángulo de borde: $\theta_{\text{borde}} = 45^\circ$; Parámetro de absorción: $\alpha = 0,1$; Coeficiente de rugosidad: $\sigma=2$.

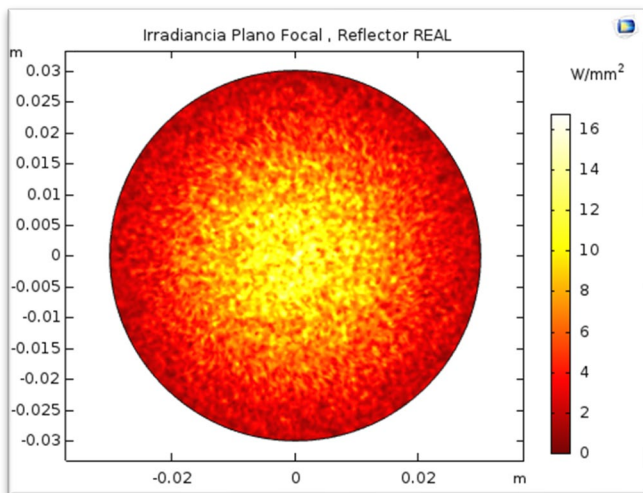


Figura 4.3.2.2.1: Irradiancia PF. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,1$; $\sigma=2$

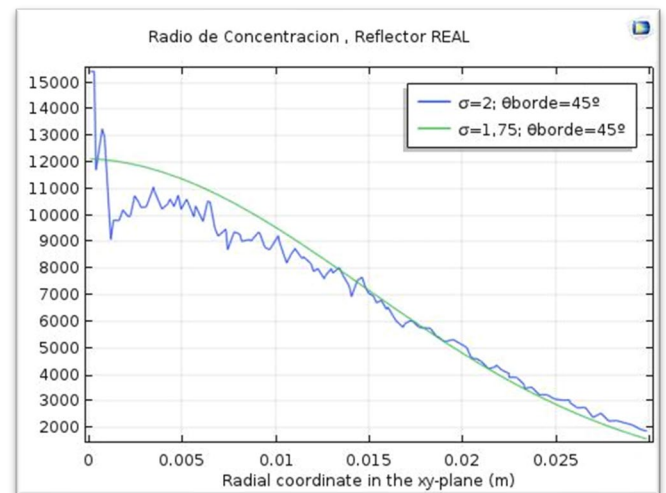


Figura 4.3.2.2.2: Radio de concentración. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,1$; $\sigma=2$

Como se puede observar en los resultados expuestos previamente, cuando el coeficiente de absorción disminuye, es decir, cuando la superficie encuentra más pulida, no solo aumentan los valores para la irradiancia, el radio de concentración aumenta considerablemente, mostrando un comportamiento más cercano al concentrador ideal. En cambio, para materiales muy rugosos la irradiancia se dispersa considerablemente, además de disminuir su valor.

Resumen de resultados: Irradiancia

En esta sección se presenta un resumen de los resultados obtenidos previamente.

4.3.3 Concentrador Ideal, Variación de ángulo de borde

La irradiancia aumenta considerablemente al aumentar el ángulo de borde. Además, también aumenta el área de concentración de los rayos.

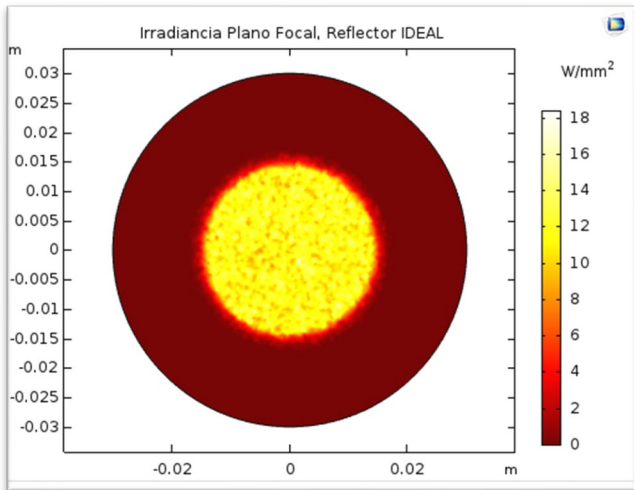


Figura 4.4.1.1: Irradiancia PF. $\vartheta=30^\circ$

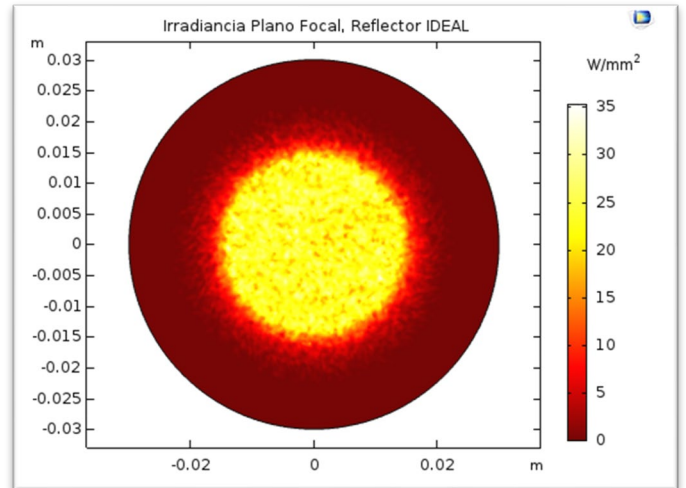


Figura 4.4.1.2: Irradiancia PF. $\vartheta=45^\circ$

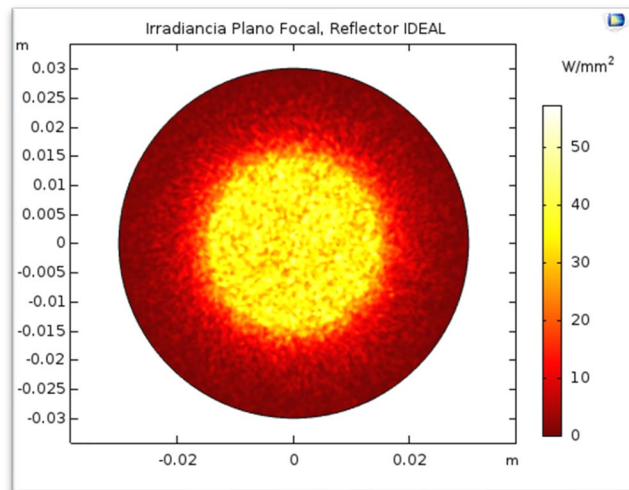


Figura 4.4.1.3: Irradiancia PF. $\vartheta=60^\circ$

Se puede ver como aumenta el radio de concentración al aumentar el ángulo de borde, pero también, la irradiancia sufre mayor dispersión más que para ángulos de apertura menores

4.3.4 Concentrador con Correcciones

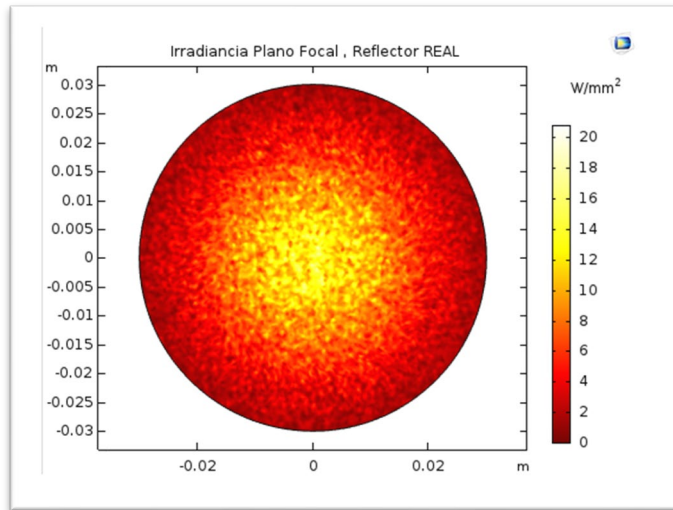


Figura 4.4.2.1: Irradiancia PF. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,1$; $\sigma=1,75$

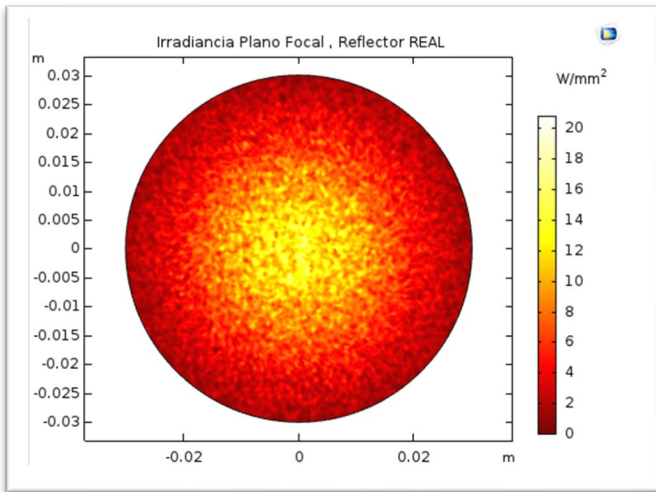


Figura 4.4.2.2: Irradiancia PF. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,02$; $\sigma=1,75$

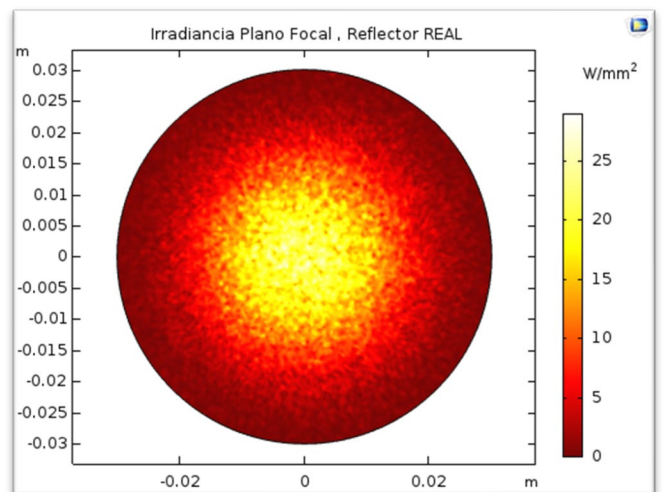


Figura 4.4.2.3: Irradiancia PF. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,1$; $\sigma=1$

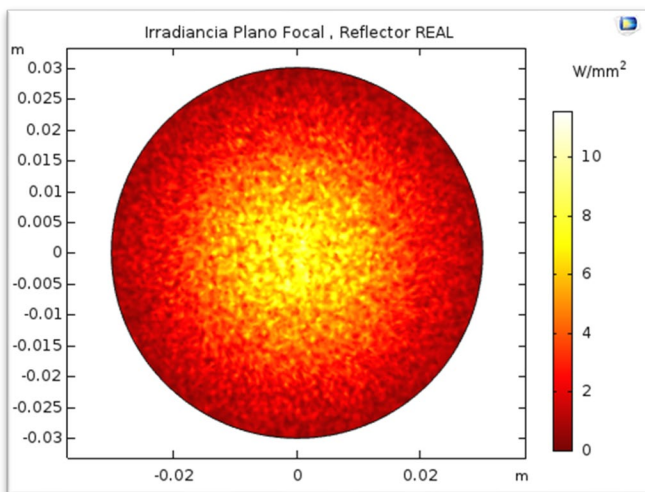


Figura 4.4.2.4: Irradiancia PF. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,5$; $\sigma=1,75$

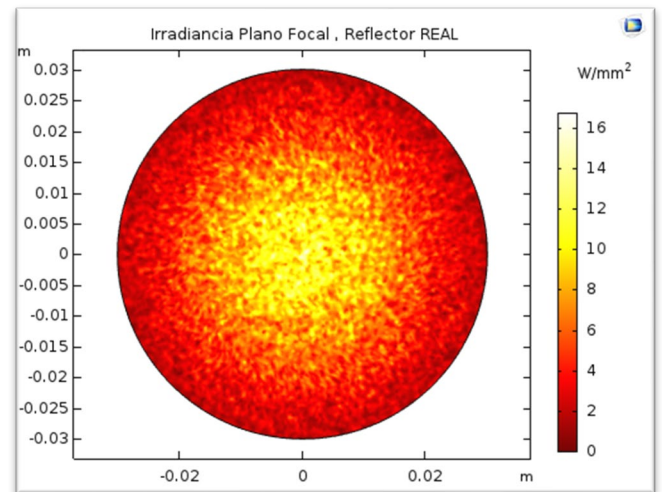


Figura 4.4.2.5: Irradiancia PF. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,1$; $\sigma=2$

En las imágenes previas se puede observar como varía la irradiancia cuando se modifican los parámetros de absorción y rugosidad, manteniendo el ángulo de borde constante.

Se puede ver que el máximo valor de la irradiancia se da para el valor más bajo de rugosidad, $\sigma=1$. Además, el radio de concentración aumenta, lográndose un comportamiento mejor aproximado al concentrador ideal.

Respecto a la absorción, no hay una diferencia apreciable entre un 90% y un 98 % de absorción, pero cuando se disminuye a un valor del 50% es considerable la disminución en la irradiancia.

4.4 Análisis de la potencia [W] del concentrador.

Una vez que se conoce la distribución de la Irradiancia [W/mm^2], se integra sobre el área total del concentrador y se obtiene la potencia total [W] en el plano focal provista por el concentrador.

En las gráficas que siguen se muestra el plano focal de un solo color, esto indica la potencia total del concentrador.

A continuación se presentan los resultados obtenidos respecto a la potencia de cada concentrador analizado previamente.

4.4.1 Comparación entre Concentrador Ideal y Concentrador con Correcciones

A continuación, se muestran los resultados respecto a la potencia para el concentrador ideal y el concentrador con correcciones para un ángulo de borde de 45° grados. Como es de esperar, el concentrador ideal tiene un mayor valor de potencia.

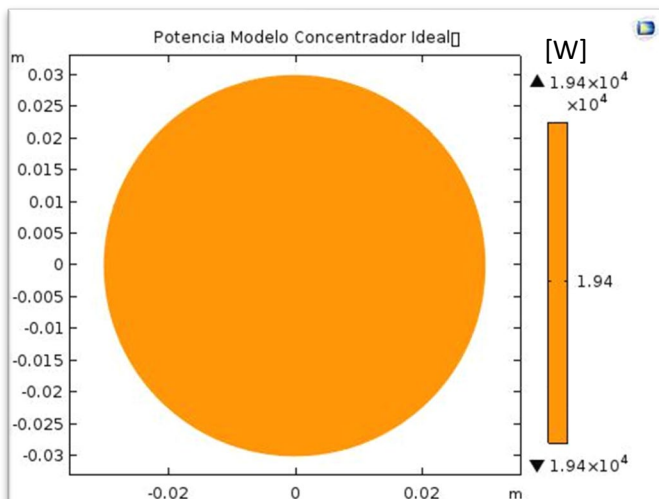


Figura 4.5.1.1: Potencia PF. $f=3\text{m}$ $\vartheta=45^\circ$

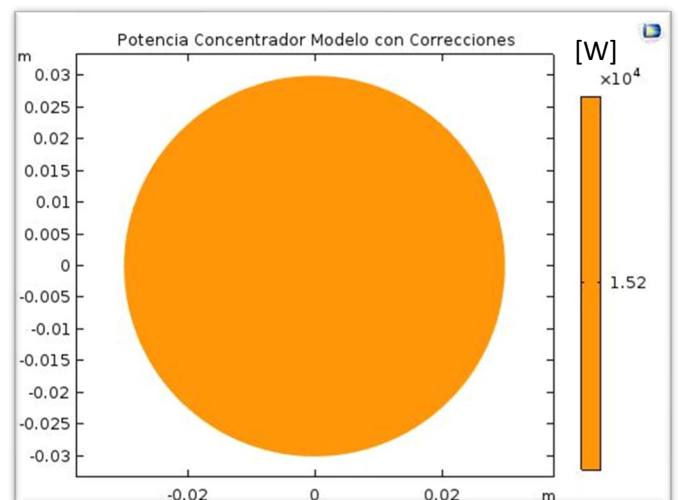


Figura 4.5.1.2: Potencia PF. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,1$; $\sigma=1,75$

4.4.2 Concentrador Ideal: Variación de ángulo de borde

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el concentrador ideal, modificándose el ángulo de borde.

Se observa como la potencia aumenta a medida que aumenta el ángulo de borde, correspondiéndose con una mayor área de recolección.

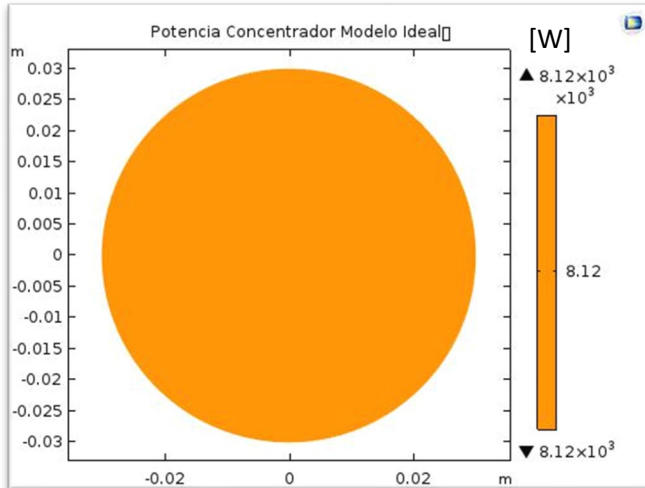


Figura 4.5.2.1: Potencia PF. $\vartheta=30^\circ$

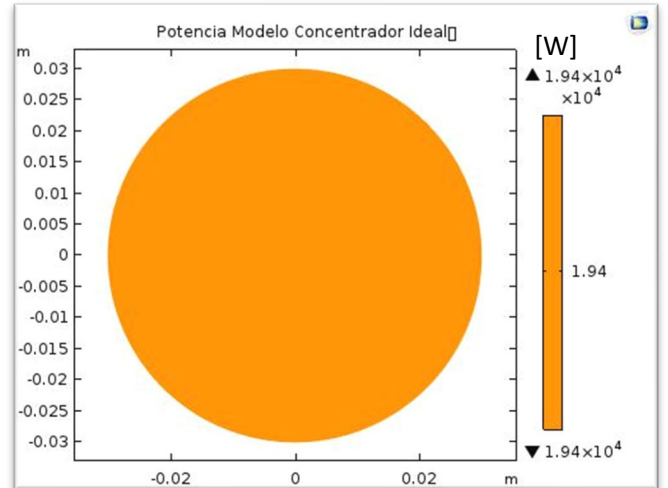


Figura 4.5.2.2: Potencia PF. $\vartheta=45^\circ$

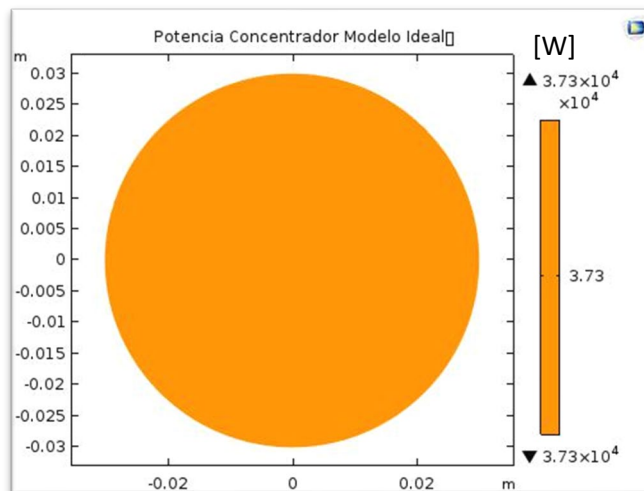


Figura 4.5.2.3: Potencia PF. $\vartheta=60^\circ$

4.4.3 Concentrador no ideal

Se modifican los parámetros de rugosidad y de absorción. Como es de esperar, la potencia del concentrador aumenta cuando disminuye la rugosidad, obteniéndose mayor potencia al aumentar la rugosidad por sobre la absorción.

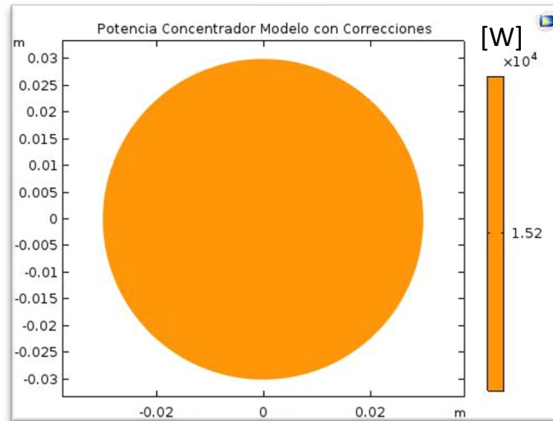


Figura 4.5.3.1: Potencia PF. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,1$; $\sigma=1,75$

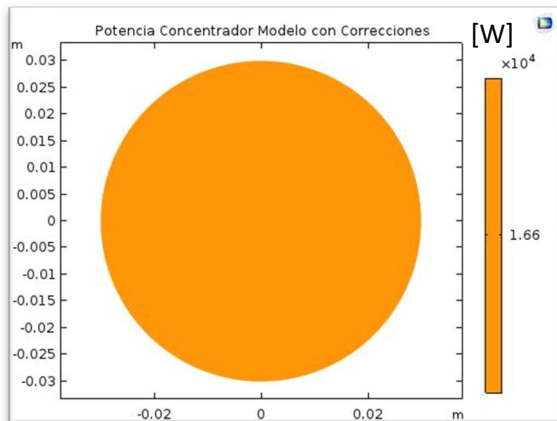


Figura 4.5.3.2: Potencia PF. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,02$; $\sigma=1,75$.

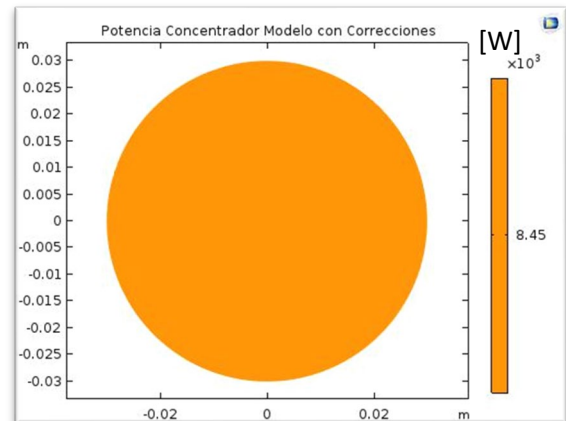


Figura 4.5.3.3: Potencia PF. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,5$; $\sigma=1,75$

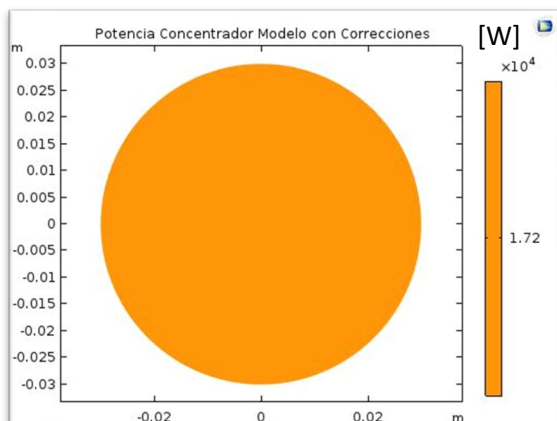


Figura 4.5.3.4: Potencia PF. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,1$; $\sigma=1$

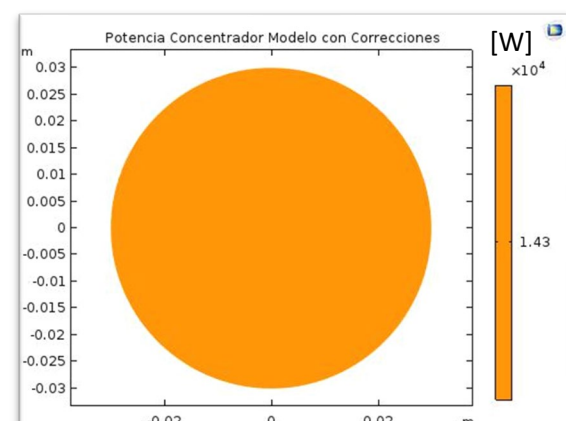


Figura 4.5.3.5: Potencia PF. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,1$; $\sigma=2$

4.4.4 Resumen de resultados

A continuación, se expone un resumen de los resultados obtenidos previamente.

4.4.4.1 Concentrador Ideal

En la tabla 4.5.1 se muestran los resultados obtenidos para la potencia utilizando el modelo del concentrador ideal, el parámetro de variación es el ángulo de borde. Como se aprecia dicha tabla la potencia aumenta al aumentar el ángulo de borde.

Tabla 4.5.1 Potencia Concentrador Ideal

Angulo de borde α [°]	Potencia [kW]
30	8,1
45	19,4
60	37,3

En la Figura 4.5.4.1 se grafican los resultados expuestos en la Tabla 4.5.1.

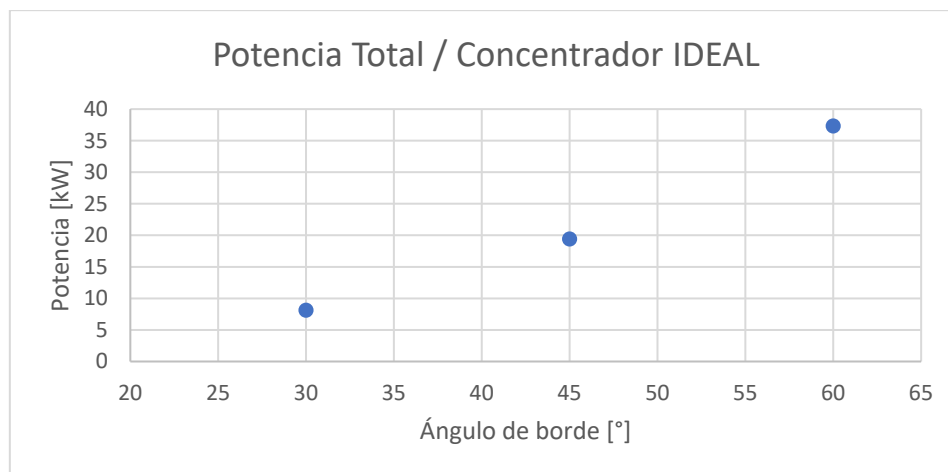


Figura 4.5.4.1: Concentrador Ideal: Potencia en función del ángulo de borde.

4.4.4.2 Concentrador con Correcciones

En la tabla 4.5.2 se muestran los resultados para la potencia de un concentrador no ideal. Para un ángulo de borde fijo de 45°, se modifican los parámetros de absorción y rugosidad.

Tabla 4.5.2: Potencia Concentrador con correcciones.

Angulo de borde = 45 °			
Coeficiente de absorción $\alpha = 0,1$		Coeficiente de rugosidad $\sigma = 1,75$	
Coef. de rugosidad	Potencia [kW]	Coef. de absorción	Potencia [kW]
1	17,2	0,02	16,6
1,75	15,2	0,1	15,2
2	14,3	0,2	13,5
		0,5	8,5

En la tabla se aprecia como aumenta la potencia del concentrador al disminuir el coeficiente de absorción y el coeficiente de rugosidad. Se obtiene un mayor valor de potencia al mejorar el coeficiente de absorción.

En las Figuras 4.5.4.2 y 4.5.2.3 se observan los resultados de la tabla 4.5.2

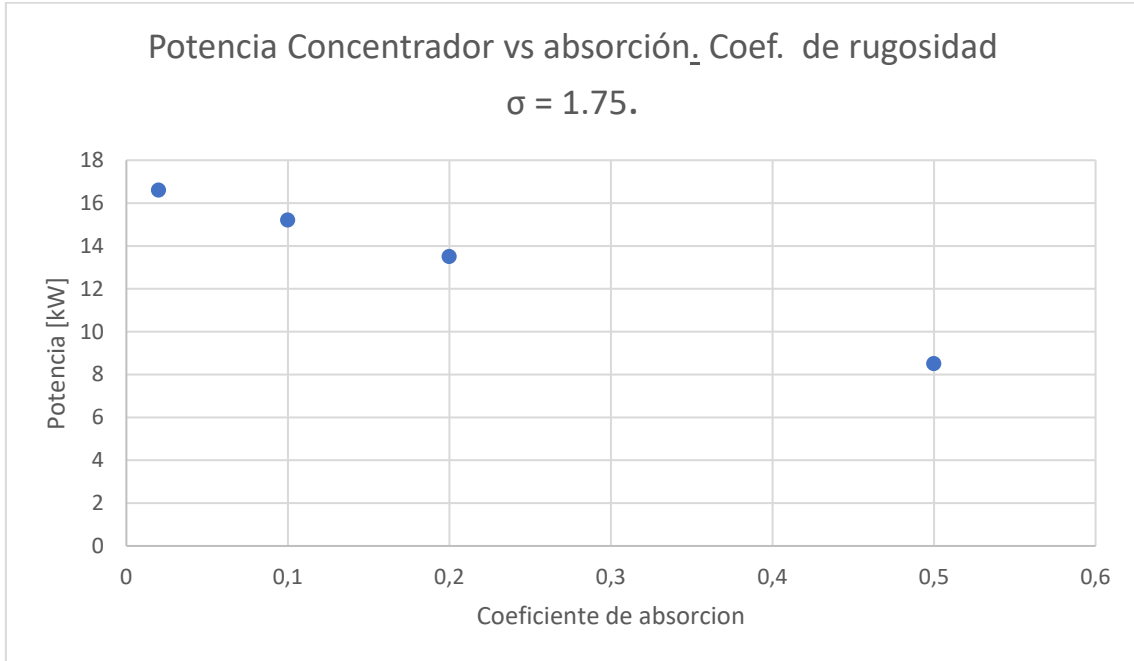


Figura 4.5.4.2: Concentrador No ideal: Coeficiente de rugosidad constante. Potencia en función de la absorción

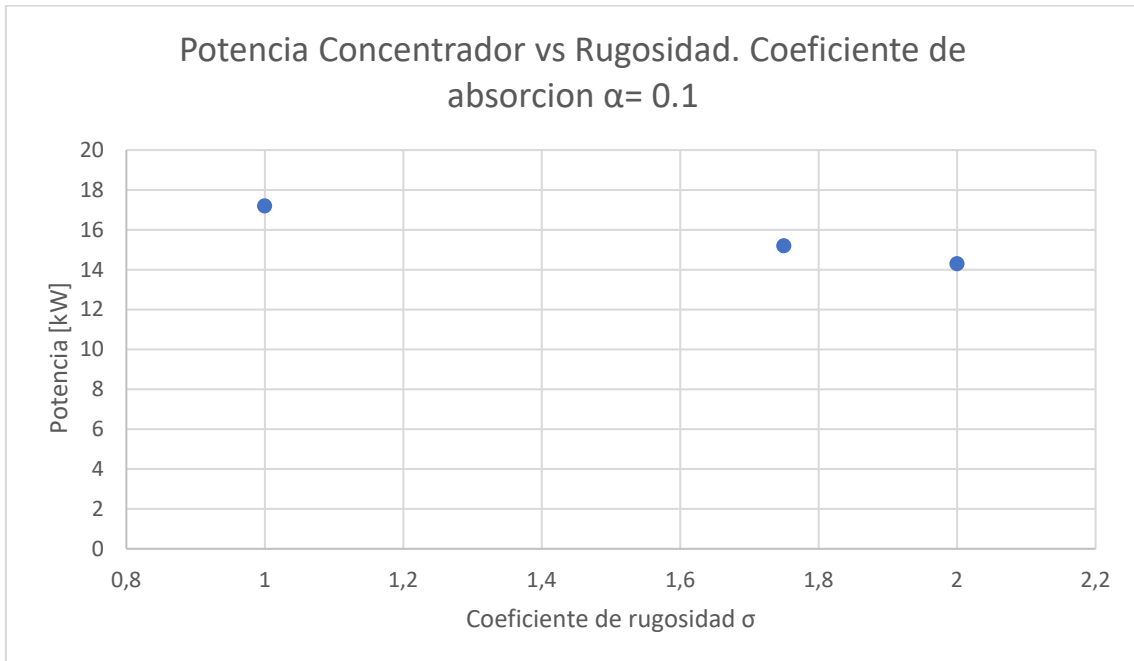


Figura 4.5.4.3: Concentrador No ideal: Coeficiente de absorción constante. Potencia en función de la rugosidad

4.5 Radio de Concentración

Los resultados obtenidos respecto al radio de concentración (RC) se exponen en la siguiente sección.

Se observa claramente como aumenta el radio de concentración al aumentar el ángulo de borde.

4.5.1 Radio de Concentración: Concentrador Ideal

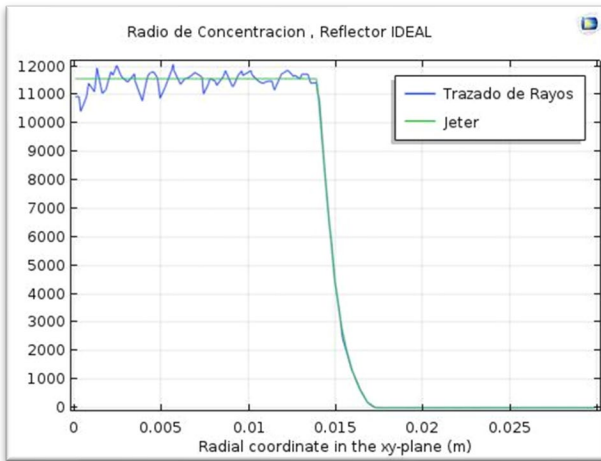


Figura 4.6.1.1: Radio de concentración. $\vartheta=30^\circ$

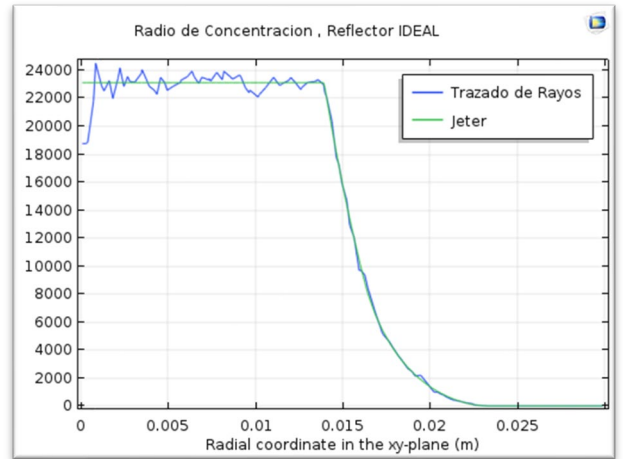


Figura 4.6.1.2: Radio de concentración. $\vartheta=45^\circ$

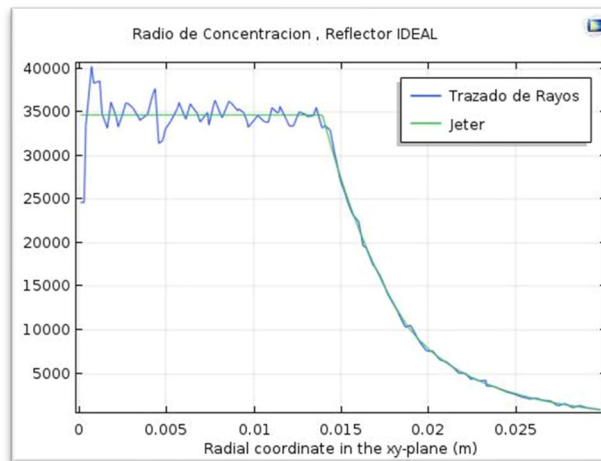


Figura 4.6.1.3: Radio de concentración. $\vartheta=60^\circ$

Tabla 4.6.1 Radio de Concentración. Concentrador Ideal

Angulo de borde α [°]	CR
30	12000
45	23000
60	35000

4.5.2 Radio de Concentración: Concentrador no ideal

Los resultados obtenidos para el concentrador no ideal se exponen a continuación,

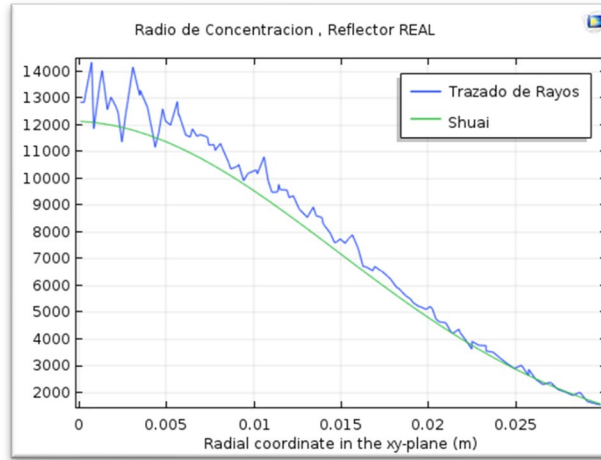


Figura 4.6.2.1: Radio de concentración. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,1$; $\sigma=1,75$

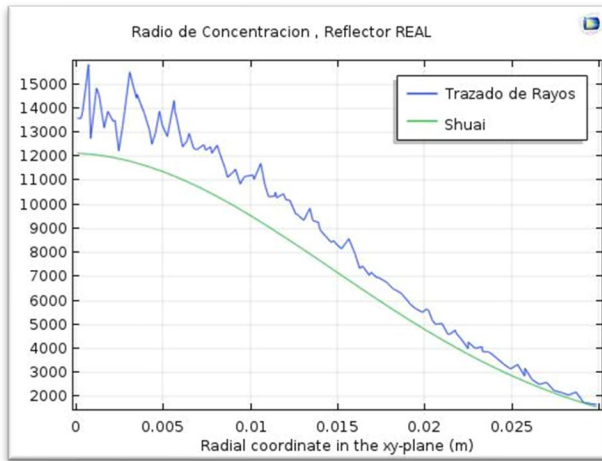


Figura 4.6.2.2: Radio de concentración. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,02$; $\sigma=1,75$

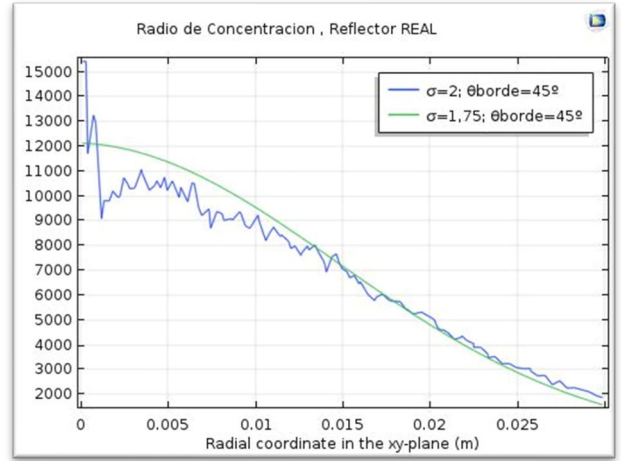


Figura 4.6.2.3: Radio de concentración. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,1$; $\sigma=2$

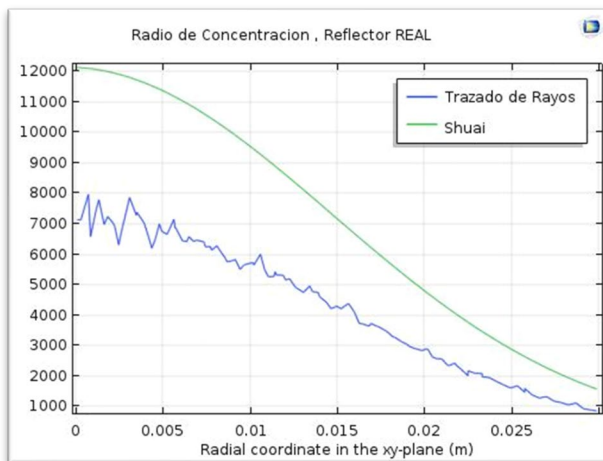


Figura 4.6.2.4: Radio de concentración. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,5$; $\sigma=1,75$

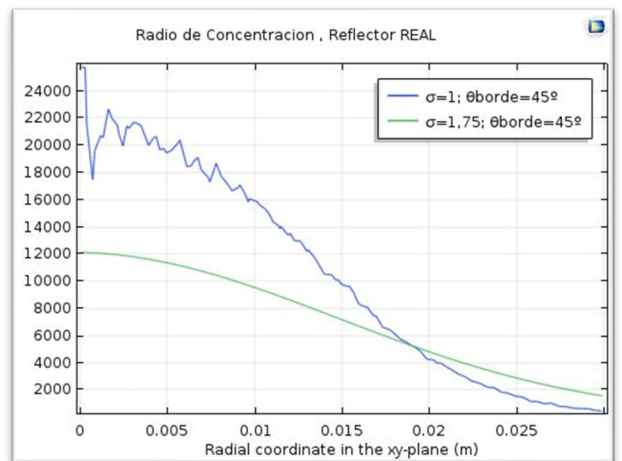


Figura 4.6.2.5: Radio de concentración. $\vartheta=45^\circ$; $\alpha=0,1$; $\sigma=1$

De la misma forma que la potencia y la irradiancia, el RC aumenta al disminuir los coeficientes de absorción y rugosidad. En todos los casos se aprecia como decae exponencialmente al alejarse del centro.

En la tabla 4.6.2 se exponen los resultados expuestos previamente.

Tabla 4.6.2: Radio de Concentración, concentrador con correcciones.

Angulo de borde = 45 °			
Coeficiente de absorción $\alpha = 0,1$		Coeficiente de rugosidad $\sigma = 1,75$	
Coef. de rugosidad	CR	Coef. de absorción	CR
1	22000	0,02	15000
1,75	14000	0,1	14000
2	11000	0,5	7000

5 ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

En este trabajo final se estudió en detalle el modelo propuesto por Jeter para un concentrador solar parabólico, el cual, se apoya principalmente en la óptica geométrica. Sobre este modelo, se modificaron los parámetros de absorción y rugosidad del concentrador, y se comparó los resultados con un modelo idealizado. Para modelar la variación de la intensidad solar, se tuvo en consideración un modelo exponencial.

Luego, se analizó, como la modificación de estos parámetros influye en la distribución de la irradiancia sobre el plano focal, la potencia total y el radio de concentración.

Conocer como estos parámetros afectan dicha distribución es importante a la hora optimizar el diseño de diversas tecnologías que hacen uso de un CSP.

5.1 Concentrador Ideal vs Concentrador con correcciones

Observando los resultados expuestos en la sección 4.1 donde se analiza un concentrador ideal y un concentrador no ideal, donde se modificaron los parámetros mencionados previamente, se puede observar, que tanto la potencia como la irradiancia del concentrador ideal son superiores al concentrador no ideal, este resultado coincide con lo esperado y lo observado.

Es interesante observar las gráficas referidas a la trayectoria de los rayos. En el caso ideal se observa como los rayos provenientes de la zona central del colector son los de mayor potencia, disminuyendo su intensidad hacia el borde del colector; mientras que en el caso no ideal observamos que esta distribución respecto a la potencia individual de cada rayo se distribuye de forma heterogénea en toda el área del colector.

Un resultado interesante se da respecto al radio de concentración, el cual, para el concentrador ideal es unas 10.000 veces mayor, indicando mayor concentración de la energía, además, el radio de concentración se mantiene constante para luego decaer exponencialmente en un pequeño intervalo, resultando en una distribución acotada en donde la irradiancia es prácticamente uniforme.

Respecto al concentrador no ideal, se observa que el radio de concentración decrece a medida que el radio aumenta, resultando en una distribución no uniforme de la irradiancia, decreciendo radialmente.

Además, la distribución de energía no se produce en el plano focal, más bien se dispersa sobre una región alrededor de este mismo, resultando en una pérdida significativa de energía en la región focal.

También influye de manera considerable la variación de la intensidad solar, provocando un importante descenso en la irradiancia.

5.2 Concentrador Ideal: variación del ángulo de borde

En este caso el único parámetro a modificar es el ángulo de borde. Analizando los resultados para el concentrador ideal se observa cómo tanto la irradiancia, la potencia y el radio de concentración aumentan de forma considerable al aumentar el ángulo de borde, esto se debe a que el área de “recolección” de radiación solar es mayor.

5.3 Concentrador no ideal.

Respecto a los parámetros de rugosidad y absorción se observa un aumento de la potencia al mejorar ambos parámetros, es decir, disminuir la rugosidad y aumentar la reflectividad, resultado que concuerda con lo esperado.

Comparando el coeficiente de rugosidad con el de absorción se obtiene un mayor valor de potencia mejorando la rugosidad del sistema por encima de la absorción.

Sin embargo, respecto al radio de concentración, es importante notar que aumenta de forma considerable cuando se disminuye el coeficiente de rugosidad, mientras que, mejorando la absorción, el radio de concentración no presenta una variación considerable.

Resumiendo lo expuesto, podemos concluir que una mejora en la rugosidad del material tiene impactos positivos en la potencia del concentrador, pero aumenta de forma considerable el radio de concentración, parámetro que nos indica la eficiencia de un concentrador.

Respecto al parámetro de absorción, si bien aumenta la potencia final, para valores mayores a un 90% de reflectividad no se produce variación considerable en el radio de concentración.

Es importante remarcar que valores bajos de absorción (menores al 60%) producen reducciones considerables en la potencia final del concentrador.

Considerando lo analizado previamente, podemos concluir que, de acuerdo al modelo propuesto, a la hora de considerar los materiales para la construcción de un colector solar parabólico, es preferible tener en cuenta materiales cuyos parámetros de rugosidad sean los más bajos posibles.

Respecto a los parámetros de absorción, materiales con reflectividades superiores al 80-85% producen buenos resultados no presentándose una diferencia considerable para valores superiores a estos.

Un aspecto importante que no se tuvo en cuenta en este modelo, y es importante mencionar es la forma parabólica del concentrador. En nuestro modelo no tuvimos en cuenta este parámetro, es decir, consideramos que la parábola es ideal, lo cual en la práctica es prácticamente imposible de lograr. Este parámetro tiene un impacto importante sobre el análisis desarrollado en este trabajo y es un factor que no es despreciable. En un modelo aún más preciso, es un parámetro que se debe tener en cuenta.

Perspectivas futuras

Como se mencionó en la introducción, el sistema de estudio es parte de las tecnologías de energías alternativas disponibles en la actualidad. Por tal motivo su investigación y desarrollo son importantes a la hora de aportar conocimiento a un campo que aún tiene un gran camino por recorrer.

El sistema propuesto es interesante para ser utilizado en regiones donde se dificulta el acceso a otros tipos de energía, o donde el sol es una fuente abundante de energía.

Se proponen los siguientes trabajos como posibles aplicaciones y ampliaciones del trabajo aquí expuesto:


- Utilización del CSP para la desalinización de agua. Estudio de rendimiento y factibilidad
- Extracción de hidrógeno por hidrólisis a través de un CSP. Rendimiento y factibilidad.
- Estudio de la estructura del concentrador: influencia de la estructura en la potencia final.

Bibliografía

- [1] M. Vázquez Espí. (1999).“Una brevísima historia de la arquitectura solar”. *Por una Arquit. y un Urban. Contemp*”.
- [2] IPCC.(2021). Assessment Report 6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis.
- [3] K. D. Burke, J. W. Williams, M. A. Chandler, A. M. Haywood, D. J. Lunt, and B. L. Otto-Bliesner.(2018). Pliocene and Eocene provide best analogs for near-future climates. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 115 (52). 13288–13293. doi:10.1073/pnas.1809600115.
- [4] IPCC.(2014). *Cambio climático 2014: Informe de Síntesis*. 2014.
- [5] BP.(2021). Statistical Review of World Energy, 2021. *BP Energy Outlook 2021*. 70, 8–20.
- [6] REN 21 (2021). REPORT, RENEWABLES 2020 GLOBAL STATUS. *REN 21*.
- [7] F. Jarabo Friedrich, C. Perez Dominguez, N. Elortegui Escartin, J. Fernandez Gonzalez, and J. J. Macias Hernandez .(1988).El Libro de las Energias Renovables.
- [8] NREL.Standard Extraterrestrial Spectrum Reference. <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-astm-e490.html>.
- [9] NREL. Standard Sea Level Spectrum Reference. <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>.
- [10] Kipp & Zonen. Solar Radiation Measurements for Solar Energy Applications. *Precis. Monit. Sol. Radiat. Photovolt. Therm. Conc. Sol. Energy Syst.* 18–30.
- [11] J. T. Kiehl and K. E. Trenberth. (1997). Earth ’ s Annual Global Energy Budget. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 78 (2), 197–208.
- [12] Solargis (2019). Radiación Directa Normal.
- [13] I. Renewable and E. Agency (2021). Estadísticas de capacidad renovable 2021.
- [14] Ministerio de Hacienda. (2019). Estado del Arte de la Tecnología de generación de energía eléctrica a partir de concentración de energía solar.
- [15] Solargis.(2019). Irradiancia Directa Argentina. <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/argentina>.
- [16] M. T. Islam, N. Huda, A. B. Abdullah, and R. Saidur.(2018). A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 91, 987–1018. doi: 10.1016/j.rser.2018.04.097.

- [17] A. Giovannelli.(2015). State of the art on small-scale concentrated solar power plants. *Energy Procedia*. 82, 607–614. doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.008.
- [18] Y. Shuai, X. L. Xia, and H. P. Tan.(2008). Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems. *Sol. Energy*, 82 (1), 13–21.
- [19] F. W. Lipps.(1976). Four different views of the heliostat flux density integral. *Sol. Energy*, 18 (6), 555–560. doi: 10.1016/0038-092X(76)90075-X.
- [20] S. M. Jeter.(1986). The distribution of concentrated solar radiation in paraboloidal collectors. *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, 108 (3), 219–225. doi: 10.1115/1.3268096.
- [21] X. Yu. Slope Error. 2, 2–5.
- [22] J. J. Kumler and J. B. Caldwell. (2007). Measuring surface slope error on precision aspheres. *Opt. Manuf. Test. VII*, 6671. doi: 10.1117/12.753832.
- [23] J. D. Jackson (1998). *Classical Electrodynamics*. 3ed.
- [24] D. Hestroffer and C. Magnan.(1998). Wavelength dependency of the Solar limb darkening. *Astron. Astrophys.* 333 (1), 338–342.
- [25] O. N. Stavroudis. (1972). *The Optics of Rays, Wavefronts, and Caustics*. Academic.

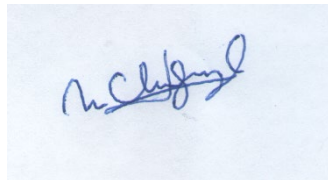
Los abajo firmantes, miembros del Tribunal de evaluación de tesis, damos fe que el presente ejemplar impreso se corresponde con el aprobado por este Tribunal.



Agustín Sigal



Dr. Carlos L. Di Prinzio



María Cecilia Gimenez

