

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



TESIS DOCTORAL

**Procesos de optimización de diseño óptico aplicados a dispositivos de
iluminación, balizamiento y concentración de luz**

**MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR**

Mario González Montes

Directores

Eusebio Bernabéu Martínez
Daniel Vázquez Moliní
Antonio Fernández Álvarez-Balbuena

Madrid, 2015

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE FÍSICAS



TESIS DOCTORAL

Procesos de optimización de diseño óptico aplicados a
dispositivos de iluminación, balizamiento y concentración
de luz

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR PRESENTADA POR:

Mario González Montes

DIRECTORES:

Eusebio Bernabéu Martínez

Daniel Vázquez Moliní

Antonio Fernández Álvarez-Balbuena

Madrid 2014



**PROCESOS DE OPTIMIZACIÓN DE DISEÑO ÓPTICO
APLICADOS A DISPOSITIVOS DE ILUMINACIÓN,
BALIZAMIENTO Y CONCENTRACIÓN DE LUZ**

MARIO GONZÁLEZ MONTES

Memoria de tesis doctoral presentada para optar al título de Doctor
en Física por la Universidad Complutense de Madrid.

Directores:

Dr. Eusebio Bernabéu Martínez

Dr. Daniel Vázquez Moliní

Dr. Antonio Fernández Álvarez-Balbuena

Madrid noviembre 2014

A mi familia.

Resumen

Esta memoria de tesis recoge el trabajo de diseño y optimización de distintos dispositivos ópticos de iluminación, balizamiento y concentradores de luz para aplicaciones en sistemas de iluminación natural, conversión de energía solar fotovoltaica y señalización. Durante este proceso se ha profundizado en el manejo de herramientas de diseño óptico, optimización multi-variable, implementación de rutinas de simulación y procesamiento de datos, así como en la metodología de adquisición experimental de medidas orientadas a montajes opto-mecánicos. A lo largo de esta memoria se sigue un método de trabajo basado una aproximación analítica al problema seguida de la implementación de un modelo teórico. Dicho modelo permite identificar los parámetros críticos del diseño y abordar de este modo el proceso de optimización. El software de cálculo matemático “Matlab” es la herramienta que gestiona todo el proceso de diseño y aporta las rutinas de optimización que coordinan el resto software empleado: “Autocad” y “Solidworks” para generar y modificar la geometría del dispositivo o sólido diseñado; y “Tracepro”, para el trazado de rayos, análisis y validación del comportamiento óptico del dispositivo. Por último la fase de prototipado del sistema nos permite verificar el comportamiento real del sistema ideado.

A lo largo de este trabajo se resumen y aplican diversos métodos de optimización óptica entre los que destaca el algoritmo de función de mérito dinámica (DMF). Este algoritmo se basa en una variación gradual de los valores de los pesos que conforman la función de mérito y demuestra su eficacia frente a el método de optimización estático en el ámbito del diseño óptico.

El presente trabajo recoge el diseño del sistema de iluminación natural para edificios no residenciales que basa su funcionamiento en el encauzamiento de la luz solar incidente en la fachada para distribuirla eficazmente por las estancias de su interior. Este proyecto culmina con la fabricación de un prototipo a tamaño real que actualmente está integrado en las instalaciones del grupo Lledó, empresa coordinadora del proyecto.

Se ha diseñado y fabricado con éxito un sistema de balizas para aeropuertos basado en tecnología de fuentes LED que satisface los requisitos de iluminación de la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional). Este proyecto emplea un sistema colimador LED, también de diseño propio, que permite dirigir el flujo de las fuentes de luz de forma adecuada y cuya geometría ha sido patentada por la UCM. A partir del modelo teórico se obtiene un prototipo real del sistema de balizas, fabricado por la empresa del sector de defensa INSTALAZA S.A, que proporciona unos resultados experimentales en consonancia con las simulaciones llevadas a cabo.

“Abstract”.

This thesis work includes the design and optimization of several optical devices for lighting , beacon and light concentrators for applications in solar lighting systems, photovoltaic solar energy conversion, and signaling. During this process it has been developed a deeply knowledge and management of optical design tools , multivariate optimization, implementation of simulation routines and data processing , as well as the methodology of experimental measurement acquisition oriented to opto-mechanic assemblies. Throughout this thesis a working method based on analytical approach to the problem followed by the implementation of a theoretical model. This model enables to identify critical design parameters and thus address the optimization process. The mathematical computing software “Matlab” is the tool that manages the entire process of design and provides the optimization routines that coordinate the rest of the software; “Autocad” and “Solidworks” to generate and modify the geometry of the solid or designed device ; “TracePro” for ray tracing, analysis and validation of the optical performance of the device. Finally the prototyping phase of the system allows us to verify the actual behavior of the system devised .

Throughout this thesis various methods of optical optimization are summarized and applied, among these arises the dynamically merit function (DMF) algorithm. This algorithm is based on a gradual variation of the weight’s values forming the merit function and demonstrates its effectiveness against static optimization method in the field of optical design and optimization.

This paper presents the design of natural lighting system aimed for non-residential buildings that bases its operation in channeling sunlight incident on the facade of the building to distribute efficiently inside the rooms. This project is culminated in the production of a full-size prototype that is currently integrated in the facilities of Lledo S.L, the coordinator member of the project.

It has been successfully designed and manufactured a beacon’s system for airports based on LED technology sources that meets the lighting requirements of ICAO (International Civil Aviation Organization). This project uses an LED collimator system, our own design patented by the UCM, that guides source’s light properly. Based on the theoretical model a real beacon system’s prototype has been manufactured by INSTALAZA company, this prototype provides experimental results that show a great agreement with the simulations carried out.

Agradecimientos

La elaboración de esta memoria de tesis doctoral ha supuesto un periodo de cambios e incertidumbres en el cual la única constante ha sido el apoyo de las personas de mi entorno. Entre estas personas es imprescindible nombrar a mis directores de tesis: Eusebio Bernabéu Martínez, Daniel Vázquez Moliní y Antonio Álvarez Fernández-Balbuena, sin cuyo conocimiento y supervisión continua hubiera sido imposible finalizar este trabajo. También he de agradecer su apoyo y motivación constante así como su trato amable y cercano a lo largo de estos años trabajando a su lado.

Es vital en estas líneas agradecer el papel mi familia, ellos suponen el apoyo más incondicional y constante desde que tengo memoria. A ellos les dedico especialmente esta tesis porque ninguno de mis logros sera suficiente para reflejar todo lo que hacen por mi. Y aprovecho para disculparme por todas las preocupaciones y desvelos que involuntariamente les causo.

Quisiera hacer extensiva mi gratitud a mis compañeros del Departamento de Óptica y en concreto al grupo de Óptica aplicada y de la Facultad de Óptica y Optometría de la universidad Complutense de Madrid. Entre todos no solo hemos formado un núcleo eficiente de trabajo en el que la cooperación nunca se ha visto perjudicada por la competitividad, si no que además se ha forjado un grupo de amigos (Fran, Axelfax, Pancetaman, Manunerd, Nitris, Elske) que me acompañará para siempre.

Por último necesito expresar mi gratitud a todos los amigos que siempre se han interesado y preguntado por mi tesis sin importar la distancia que nos separa o lo ajena que sea la materia de este trabajo para la mayoría de ellos. Me sería imposible nombrarles a todos sin embargo debo mencionar a las entrañables gentes de Astur-land: Sara&Juako, Chisar, Chals, Nachete; los amigos de Madrid, Luis, Adri, Jandro, Patri, Michel; los expatriados, Ivan, Pablo, Chan, Anna Tontinka, Alvaro; y por supuesto a mis compañeros que comparten el rock sudoroso de V8FORD, Will, Fada, Dudu y Rosa.

Lista de Figuras

1.1. Eratóstenes deducción de la circunferencia y el radio terrestre	3
1.2. Deducción de la ley de refracción a partir del principio de Fermat	10
1.3. Reflexión especular y difusa	11
1.4. Sistema formador de imagen y sistema anidólico	12
1.5. Étendue para un elemento diferencial de superficie y para un solido	14
2.1. Diagrama de flujo del algoritmo Nelder Mead	29
2.2. Diagrama de Flujo de DMF	35
2.3. Lente de concentración. Parámetros de optimización R_1, R_2, T	38
2.4. <i>DMF</i> aplicada a lente de concentración de 3 parámetros	39
2.5. Lente uniformizadora. Parámetros de optimización R_1, R_2, H	40
2.6. <i>DMF</i> aplicada a lente de uniformizadora de 3 parámetros	41
2.7. Colimador LED de señalización. Parámetros de optimización: D, r_5 y r_6	42
2.8. Optimización DMF aplicada a Colimador LED de señalización de 3 parámetros	43
2.9. Luminaria LED. Parámetros de optimización D, R, θ_1, θ_2	44
2.10. <i>DMF</i> aplicada a luminaria LED de 4 parámetros	45
2.11. <i>DMF</i> aplicada a lente concentradora de 2 y 3 parámetros	46
2.12. Colimador LED. 2 y 3 parámetros: D, R_2 y R_3	47
2.13. <i>DMF</i> aplicada al luminaria LED de 2 y 4 parámetros	48
3.1. Espectro solar	57
3.2. Coordenadas esféricas horizontales. Modelo solar	59
3.3. Desviación DT en minutos entre hora solar y hora estándar	61
3.4. Ángulo azimutal y altura solar para el 18 abril	62
3.5. Índice de refracción frente a la longitud de onda. PC y PMMA	67
3.6. Esquema del sistema acromático	68

3.7. Sección de la lente acromática	69
3.8. Rayo a través de la sección	69
3.9. Esquema del ángulo de salida respecto a la posición del prisma	70
3.10. Mapas de irradiancia de lente Fresnel frente a lente acromática 1 en la superficie de entrada de óptica secundaria	73
3.11. Eficiencia, η , frente a longitud de onda, λ . Ángulo de incidencia variable .	74
3.12. Eficiencia ponderada para todo el espectro (ASTM1) solar frente al ángulo incidente	75
3.13. Esquema del trazado de rayos de anillo de luz incidente de ángulo variable	76
3.14. Eficiencia radial de la lente acromática y Fresnel estandar	77
3.15. Sección de la lente híbrida	77
3.16. Factor de concentración frente al radio al cuadrado de la lente	78
3.17. Factor de concentración frente al ángulo de incidencia	80
3.18. Esquema sistema de iluminación	83
3.19. Parámetros de una parábola	84
3.20. Esquema CPC	85
3.21. Concentrador CPC en uso inverso	85
3.22. T-CPC. α : ángulo de truncamiento β :ángulo de inclinación	86
3.23. Matriz colector. a) T-CPC original b) Factor de compactación	87
3.24. Parámetros de la optimización	88
3.25. Objetivo de la optimización	89
3.26. Progreso de la optimización para la cantidad de luz [klm h] captada du- rante las horas de trabajo	89
3.27. Modelos del colector optimizado y diagramas de flujo luminoso (al final de la guía de luz)	91
3.28. Eficiencia colector+guía para modelo original y Var_G12	92
3.29. Trazado por segmentación de la fuente. Optimización de recursos	93
3.30. Posiciones solares simuladas	93
3.31. Simulación sistema iluminación completo	94
3.32. Flujo de cada luminaria	94
3.33. Opciones de diseño luminarias extractoras	95
3.34. Esquema de la red de Ronchi	96
3.35. Eficiencia luminarias	96
3.36. Uniformidad sistema básico especular	97

3.37. Material Softgloss Miro 720	98
3.38. Planos de irradiancia sistema básico especular frente a difusor Softgloss	100
3.39. Diagrama de Onion. Configuración Difusor	102
3.40. Prototipo sistema iluminación	103
3.41. Esquema del acristalamiento. Integración del sistema colector	104
3.42. Resultados del prototipo escalado frente a las simulaciones	105
3.43. Planos de irradiancia. Prototipo frente a simulaciones	106
4.1. Componentes del LED	116
4.2. Ángulo de emisión del LED	117
4.3. Espectro de emisión del LED. Fuente Luxeon	118
4.4. Esquema básico del colimador LED	121
4.5. Colimador parabólico inclinado	123
4.6. Ángulos de incidencia y transmisión en la región elíptica	126
4.7. Esquema de flujo transmitido por ventana de unión	127
4.8. Flujo total Φ frente al ángulo de rotación de la parábola α . Semiapertura de la fuente 80°	129
4.9. Flujo total Φ frente al ángulo de rotación de la parábola α . Semiapertura de la fuente 90°	129
4.10. Ángulo de inclinación de la ventana de union γ frente al ángulo de incli- nación del eje de la parábola α	130
4.11. Flujo total Φ frente al ángulo de rotación de la parábola α . Fuente lam- bertiana	131
4.12. Prototipo real del colimador	132
4.13. Mapas de irradiancia del sistema colimador, experimentales y simulados	133
4.14. Perfiles de irradiancia normalizados	134
4.15. Patente sistema balizamiento. Hans Ahlen, Leif Ek.	141
4.16. Ángulo vertical de salida de la baliza	142
4.17. Análisis del comportamiento óptico del sistema básico de balizamiento	143
4.18. Mapa rectangular de isocandelas para sistema básico de balizamiento	143
4.19. Configuración completa del sistema de balizamiento	145
4.20. Intensidad luminosa media y Eficiencia del sistema de balizas frente a radios de la lente $R_x R_y$	149

4.21. Eficiencia y Uniformidad del sistema de balizas frente a al periodo del Softgloss P y radio de la lente R_x	150
4.22. Intensidad luminosa media y Eficiencia del sistema frente a R_1 y R_2 . Pre- cisión $1mm$	151
4.23. Diagrama de flujo del proceso de optimización de la baliza	153
4.24. Evolución del error global respecto a los objetivos durante la optimización	155
4.25. Evolución de las variables de salida de la función objetivo durante la optimización	156
4.26. Evolución de las variables de salida de la función objetivo durante la optimización	157
4.27. Prototipo del sistema de balizas	159
4.28. Estabilidad del sistema de balizas	159
4.29. Mapas de isocandelas. Prototipo final	161
4.30. Baliza emitiendo	162

Lista de Tablas

2.1. Resultados <i>DMF</i> sistemas no formadores de imágenes	45
2.2. Resultados <i>DMF</i> sistemas no formadores de imágenes en función de los parámetros de su geometría	49
3.1. Parámetros distintivos del diseño de lentes acromáticas	72
3.2. Resultados configuraciones especular básica y difusor Softgloss	101
3.3. Dimensiones del prototipo	103
4.1. Requisitos ICAO para sistemas de balizas	137
4.2. Tabla de especificaciones LEDs	138
4.3. Estimación intensidad luminosa y numero de LEDs en baliza	140
4.4. Variables del sistema de balizas	146
4.5. Resultados configuración optima sistema de balizas	158
4.6. Resultados experimentales	160

Índice general

Resumen	I
Agradecimientos	IV
Lista de Figuras	V
Lista de Tablas	IX
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. Objetivos y motivación	6
1.3. Óptica geométrica	8
1.4. Óptica anidólica	12
1.4.1. Étendue	14
2. Optimización de sistemas ópticos no formadores de imagen	18
2.1. Conceptos básicos de optimización	19
2.1.1. Métodos exactos de optimización	23
2.1.1.1. Método de Newton	23
2.1.1.2. Programación cuadrática secuencial (<i>SQP</i>)	23
2.1.2. Métodos heurísticos	25
2.1.2.1. Los algoritmos genéticos.	25
2.1.2.2. Algoritmo Nelder-Mead	26
2.2. Optimización dispositivos ópticos no formadores de imagen mediante al- goritmo de función de mérito dinámica (DMF)	30
2.2.1. Función de mérito dinámica DMF	31
2.2.2. Ejemplos de optimización de sistemas no formadores de imágenes .	36
2.2.2.1. Lente de concentración	38

2.2.2.2.	Lente uniformizadora de iluminación	40
2.2.2.3.	Colimador LED aplicado a señalización	42
2.2.2.4.	Luminaria plana de tecnología LED	43
2.2.3.	Dependencia de la optimización DMF del número de parámetros	46
3.	Diseños ópticos aplicados al aprovechamiento de energía solar	53
3.1.	Radiación Solar	56
3.1.1.	Modelo de iluminación solar	58
3.2.	Lentes acromáticas para sistemas fotovoltaicos	64
3.2.1.	Introducción	64
3.2.2.	Descripción del sistema	65
3.2.3.	Diseño del doblete acromático	69
3.2.4.	Lentes de Fresnel standard frente al diseño acromático	71
3.2.5.	Diseño de lente Fresnel acromática híbrida	75
3.3.	Sistema de iluminación natural para edificios	81
3.3.1.	Introducción	81
3.3.2.	Sistema colector de luz solar	83
3.3.3.	Optimización del sistema colector	87
3.3.4.	Simulación del sistema de iluminación completo	92
3.3.5.	Medidas del prototipo	103
4.	Diseños ópticos para aplicaciones de fuentes LED	112
4.1.	Introducción	112
4.2.	Características de emisión de las fuentes LED	116
4.3.	Sistema colimador de flujo para fuentes LED	119
4.3.1.	Esquema básico del colimador	121
4.3.2.	Colimador parabólico inclinado	122
4.3.3.	Optimización del sistema colimador	124
4.3.3.1.	Análisis del flujo transmitido por la elipse	125
4.3.3.2.	Análisis del flujo transmitido por la ventana de unión	126
4.3.3.3.	Análisis del flujo total colimado	128
4.3.4.	Resultados experimentales	132
4.4.	Sistemas de balizas LED para aeropuertos	135
4.4.1.	Introducción	136
4.4.2.	Esquema básico y componentes del sistema de balizamiento.	136

4.4.3.	Requisitos de iluminación	137
4.4.4.	Diseño del sistema de balizas	139
4.4.4.1.	Sistema básico de balizamiento	139
4.4.4.2.	Optimización del sistema de balizamiento	146
4.4.4.2.1.	Análisis del rango de las variables de entrada	148
4.4.4.2.2.	Función de optimización “fgoalattain”.	150
4.4.4.2.3.	Proceso de optimización mediante “fgoalattain”	154
4.4.4.3.	Resultados experimentales	158
Conclusiones		165
Publicaciones generadas: Artículos		167
Publicaciones generadas: Congresos		168
5. Apéndice		169
5.1.	Programas empleados en el Capítulo 2	169
5.1.1.	minimiza.m	169
5.1.2.	optimizaMAESTRA.m	173
5.2.	Programas de diseño empleados en el Capítulo 3	176
5.2.1.	Lente acromática.scn	176
5.3.	Programas de optimización empleados en el capítulo 4	178
5.3.1.	Simula_la_baliza.m	178
5.3.2.	Porterias_isocd_catII.m	180

Capítulo 1

Introducción

La ingeniería de sistemas ópticos tiene como objetivo diseñar dispositivos e instrumentos, basados en elementos ópticos capaces de emplear la luz para resolver determinados problemas prácticos gracias a sus propiedades ópticas, su configuración geométrica y las propiedades intrínsecas de los materiales que los componen. Estos dispositivos ópticos están vinculados, según su aplicación, a multitud de campos de la investigación, entre los cuales se podrían destacar el de la energía solar, la iluminación, las comunicaciones ópticas o los sensores. Estas parcelas del conocimiento muestran un auge importante actualmente debido a su vez al desarrollo de otras líneas complementarias de investigación en fuentes de luz (tecnología LED, lasers), innovación en materiales (materiales semiconductores, de alta reflectividad, fotónicos...), y herramientas de computación (software de diseño óptico y cálculo matemático). El sector de la ingeniería y el diseño óptico también se está viendo favorecido por la tendencia actual de determinadas políticas, como la directiva europea que establece que cada Estado miembro elaborará un *Plan de Acción Nacional en materia de Energías Renovables* (PANER) y que en España se traduce en que las fuentes renovables representen al menos el 20% del consumo de energía final en el año 2020. Esto supondrá previsiblemente una inyección de recursos destinados a la investigación de nuevos dispositivos ópticos. Además la tendencia de los sistemas de iluminación evoluciona hacia un modelo inteligente de bajo consumo con que reemplazar los sistemas de alumbrado convencionales. Este panorama acentúa la importancia de la ingeniería óptica como herramienta clave para abordar los diseños de dispositivos para los nuevos sistemas de iluminación, señalización, energía fotovoltaica, etc. A lo largo de este trabajo se expondrá el proceso de diseño, análisis y optimización y verificación experimental de diversos dispositivos ópticos. Para alcanzar los requisitos impuestos en cada caso se hará uso de distintas herramientas de cálculo y trazado y optimización óptica.

1.1. Antecedentes

Las primeras evidencias que sugieren la aplicación de principios de la ingeniería óptica datan de hace 4000 años. En los restos de antiguas civilizaciones se encontraron objetos que nos dan una idea de los intereses de los hombres por los fenómenos ópticos. Estos indicios pueden observarse en, al menos, dos grandes estructuras sin ninguna conexión entre ellas llevadas a cabo en la antigüedad. Las personas que diseñaron y construyeron Stonehenge (2500 a. C aprox.) [1] y la Gran Pirámide de Keops (2570 a. C), usaron los principios básicos de la ingeniería óptica [2]. Estas estructuras tenían una conexión con la Tierra y el Sol; de manera que sus elementos constructivos eran orientados a los cuatros puntos cardinales de la Tierra o hacia la posición de estrellas sin la utilización de instrumentos ópticos. Estos hechos hacen suponer que los constructores tenían conocimientos de astronomía y propagación de la luz, ya que sabían que la luz viajaba en línea recta y entendían el ciclo de las estaciones.

Los primeros indicios de aprovechamiento de la energía solar datan del siglo V a. C., época en la que los griegos, romanos y árabes (conscientes del potencial de ciertos elementos ópticos) empleaban las propiedades de los espejos para focalizar la luz y cauterizar las heridas con lentes positivas o bien encender fuego mediante unas esferas de vidrio llenas de agua que concentraban la luz solar. Quizá la primera lente que hubo en el mundo fue la que construyó Aristófanes en el año 424 a. C. con un globo de vidrio soplado, lleno de agua, sin embargo su propósito no era la de amplificar imágenes, sino la de concentrar la luz solar. En este ámbito sigue siendo objeto de debate la veracidad del sistema de espejos cóncavos de gran tamaño, o ustorios (de ustoris, el que quema), ideado por Arquímedes para la defensa de Siracusa, mediante el cual supuestamente era capaz de incendiar los barcos romanos concentrando la luz solar. También hay constancia de arquitectos romanos como Palladio que proponen la orientación de las edificaciones como una manera de aprovechar la radiación solar. En el contexto del diseño óptico se podría citar a Euclides como un pionero ya que contribuyo mediante grandes avances en el estudio Geometría y la Óptica describiendo correctamente la formación de imágenes mediante espejos esféricos y parabólicos. Además anticipa una ley fundamental “el rayo, sea o no reflejado, sigue siempre el camino de tiempo más corto entre el objeto y el ojo” [3] que será reformulada por Fermat en términos generales en el siglo XVII.

Uno de los primeros ejemplos de óptica aplicada a la resolución de un problema global se encuentra en la obra del filósofo griego Eratóstenes (276 a.C.) que fue el tercer director de la biblioteca de Alejandría (Egipto). Durante el desempeño de su cargo realizó una de sus principales contribuciones a la ciencia y a la astronomía mediante su trabajo sobre la medición de la tierra.

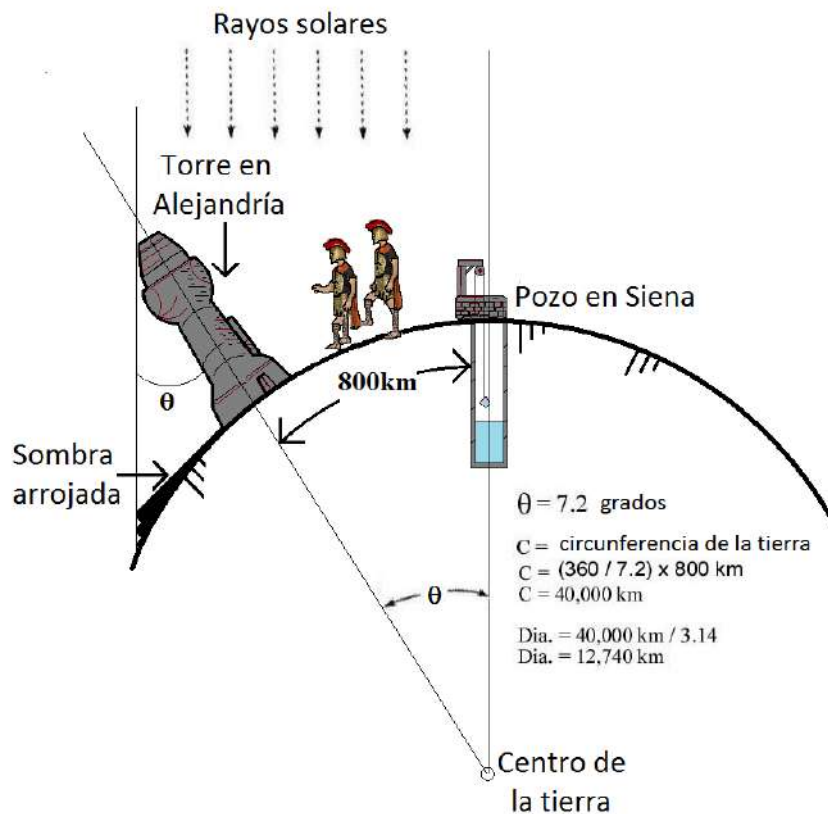


Figura 1.1: Eratóstenes deducción de la circunferencia y el radio terrestre

Eratóstenes, en sus estudios de los papiros de la biblioteca de Alejandría, encontró un informe de observaciones en Siena, unos 800 Km al sureste de Alejandría. En dicho estudio se constataba que los rayos solares al caer sobre una vara el mediodía del solsticio de verano (el actual 21 de junio) no producía sombra. De este modo la luz del sol que incidía directamente dentro de un pozo profundo en dichas condiciones podía ser observada al reflejarse directamente de vuelta tras incidir en la superficie del agua del fondo del mismo.

Entonces asumió de manera correcta que si el Sol se encontraba a gran distancia, sus rayos al alcanzar la tierra debían llegar en forma paralela, y si esta era plana como se creía en aquellas épocas entonces no se deberían encontrar diferencias entre las sombras proyectadas por los objetos a la misma hora del mismo día, independientemente de donde se encontraran dichos objetos. Eratóstenes observó que, en el mismo día (solsticio de verano), una torre de piedra vertical en Alejandría arrojaba una sombra de longitud fácil de medir. Con esta información se pudo concluir que el ángulo entre la torre y la luz del Sol incidente era de 7.2° . Supuso, basándose en la forma esférica de la tierra, que las extensiones del pozo en Siena y la torre vertical en Alejandría se cruzan en el centro de la tierra (fig.1.1). Con esta información se pudo calcular la circunferencia de la Tierra que sería 50 veces la distancia de Siena a Alejandría. En aquella época las largas distancias, como la existente entre Siena y Alejandría (800km), se estimaban mediante los días de marcha que empleaban las legiones romanas al recorrerlas, dado que la velocidad de las legiones era conocida al ser su avance tan fiable como regular. Con este dato se obtiene la primera estimación del diámetro de la Tierra, $diam = 12740km$ (fig.1.1), que resulta muy válida ya que solo difiere en un 0.1 % respecto a la magnitud aceptada en nuestros días [1].

Pese a que no es el objeto de esta memoria realizar un estudio pormenorizado de los avances históricos en la óptica no se debe dejar sin mencionar a los artífices de los conceptos e innovaciones sobre los que se fundamenta el presente trabajo. Willebrord Snell (Holanda 1580-1626) formuló la **ley de refracción** en 1621, que con tanta frecuencia se emplea en este y en cualquier estudio de diseño óptico. Esta ley a su vez se puede inferir del principio formulado por Pierre de Fermat (Francia, 1601- 1665) que fue un matemático francés cuya obra se encuentra esencialmente en su asidua correspondencia con los científicos contemporáneos, y que sienta las bases de la Óptica Geométrica.

Augustín Fresnel (Francia,1788-1827), realizó numerosos experimentos sobre interferencias y difracción y dio un gran impulso a la teoría ondulatoria, además ideó un sistema de enfoque (**Lente de Fresnel**) que se emplea actualmente y que proporciona una luminosidad cuatro veces mayor que la de un reflector ordinario además de ser un dispositivo empleado actualmente como concentrador solar [4]. Sin embargo, el problema de la calidad del vidrio todavía limitaba el diámetro de las lentes acromáticas ideadas por Chester Moor Hall (Inglaterra 1704-1717).

Es imprescindible mencionar en este trabajo, debido a las aplicaciones que su trabajo conlleva, a Alexandre-Edmond Becquerel (Francia 1820-1891) [5] descubridor en 1839 del efecto fotovoltaico, y también a Charles Fritts (1883) [6] que en base a este hallazgo desarrolla la primera célula fotovoltaica de Selenio con una eficiencia tan solo del 1%. Posteriormente (hacia 1941) Russell Ohl fabrica la primera célula de silicio de unión PN que logra una eficiencia del 5% y sienta la base estructural y tecnológica para el modelo actual de conversión de la radiación solar en electricidad.

Los procedimientos del diseño óptico se mantuvieron prácticamente sin cambios en la primera parte de la siglo XX. Las personas involucradas en el trabajo de diseño de las lentes y sistemas ópticos empleaban formulación matemática para el cálculo de las aberraciones y el trazado exacto de los rayos a través de los elementos ópticos. La exactitud requerida para todos los cálculos exigía extrema precaución, de modo que equipos de varios individuos eran asignados al diseño de lentes para ejecutar estos cálculos tediosos. No fue hasta 1930 que la primera calculadora mecánica fue desarrollada y esta carga se vio ligeramente reducida. Sin embargo, el diseño de una lente compleja implicaría la obra de varias personas, que trabajan durante períodos de meses y a menudo años.

En la década de 1950, la computadora electrónica apareció en escena y llegó a estar disponible para su uso en la solución de los problemas de diseño óptico. En el período desde 1960 hasta nuestros días, los avances en el área de hardware y software han sido más que notables. Un diseñador óptico tiene a su alcance multitud de herramientas de cálculo matemático, trazado de rayos y procesamiento de datos que multiplican la eficiencia de su trabajo así como la versatilidad y la robustez de sus diseños.

1.2. Objetivos y motivación

El aprovechamiento efectivo de la radiación luminosa como fuente de sistemas ópticos es una tarea compleja que requiere contemplar diversidad de planteamientos y métodos de diseño para desarrollar los dispositivos ópticos de mayor eficacia y funcionalidad. La motivación de este trabajo consiste en profundizar en estos métodos diseños y optimización aplicables a dispositivos de cualquier naturaleza y en concreto a sistemas ópticos de iluminación, balizamiento y concentración de luz.

El presente trabajo detalla diversos enfoques de diseño y optimización (Sección 1.4, Sección 1.4.1, Capítulo 2) junto una serie de aplicaciones ópticas que emplean las herramientas desarrolladas para el diseño y optimización de nuevos dispositivos (Capítulo 3, 4). El contenido de estos proyectos forma un compendio de protocolos y herramientas de optimización útiles para obtener un dispositivo óptico que se ajuste a las demandas de cada proyecto. Entre las condiciones para obtener un diseño competitivo están minimizar costes así como tiempo de fabricación, debido a la presión que ejerce un mercado en constante evolución como el de los dispositivos ópticos. El conjunto de herramientas y protocolos de diseño y optimización presentados facilitan la obtención de nuevos diseños ópticos y agilizan su comercialización.

Los objetivos concretos de esta memoria de tesis se pueden dividir en los siguientes puntos:

1. Introducir una serie de métodos de diseño de dispositivos ópticos no formadores de imagen basados en: el principio de rayo marginal (Secciones 4.3, 4.4), que describe la formación de la imagen de un punto objeto extremal a través del sistema óptico; la dispersión cromática (Sección 3.2), que contempla el rango espectral de la fuente como factor primordial del diseño; la emisión angular discriminada (Sección 4.3), que estructura los componentes del diseño en función de las características angulares de emisión de la fuente.

Además en este objetivo cabe incluir el desarrollo de rutinas de simulación específicas como: segmentación o división de fuente Capítulo 3.3, dividiendo la superficie de trazado de la fuente en varias superficies de menor capacidad de emisión para hacer abordable la simulación; o emisión zonal dedicada (Sección 4.4), donde el diseño del dispositivo se orienta a obtener distintos niveles de intensidad luminosa en cada zona determinada por los requisitos del sistema.

Estos métodos de diseño óptico ofrecen tanto la versatilidad necesaria para afrontar distintos tipos de problemas, como la eficiencia de recursos y de tiempo de ejecución empleados en las simulaciones.

2. Abordar distintas técnicas y algoritmos de optimización para lograr la mejor solución dentro del rango de variables de un sistema óptico y alcanzar de este modo el mayor rendimiento de un diseño óptico.

En este objetivo se aplican distintas técnicas de optimización según la naturaleza y complejidad del diseño: la optimización numérica por integral de flujo (Sección 4.3), maximizando el flujo luminoso transferido al receptor; la optimización de función de mérito estática (Sección 4.4), basada en el algoritmo Nelder-Mead que emplea a su vez el concepto de simplex; o por último la optimización de función de mérito dinámica (DMF)(Capítulo 2), basada en la variación dinámica de los pesos de la función de mérito.

3. Desarrollar un método automatizado para la gestión de las distintas herramientas de diseño y optimización empleadas. Lo cual es equivalente a desarrollar un programa maestro que controle y coordine el resto de recursos involucrados en diseño óptico en todas sus fases: generación de la geometría del sólido (herramientas CAD); simulación (programas de trazado de rayos); y procesamiento de resultados y optimización.

Para esta tarea se han desarrollado una serie de programas y macros (rutinas) detallados en el capítulo 5.

4. Reunir y caracterizar una serie de aplicaciones ópticas fruto del desarrollo de los métodos de diseño y optimización anteriormente mencionados.

A lo largo de este trabajo se presentan las siguientes aplicaciones:

- a) Un diseño novedoso de lente híbrida Fresnel-acromática ideada para sistemas ópticos de conversión de energía solar fotovoltaica que alcanza niveles de concentración y estabilidad difícilmente obtenidos lente Fresnel convencional.
- b) Un sistema de iluminación natural para edificios no residenciales basado en un colector de tecnología CPC (Compound Parabolic Concentrator) que recoge la luz solar incidente en la fachada de un edificio para complementar la iluminación convencional en el interior de las estancias.

- c) Un sistema colimador de fuentes LED de alta eficiencia y bajo coste que asegura una semiapertura de tres grados mediante una geometría sin superficies reflectantes.
- d) Un sistema de balizamiento de tecnología LED para aeropuertos que cumple con los requisitos OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) y ofrece un diseño embebido robusto y de bajo consumo.

1.3. Óptica geométrica

La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro. La descripción matemática de este fenómeno de propagación de energía se le atribuye a James Maxwell (Escocia 1831-1879) cuyas ecuaciones definen la luz como energía electromagnética, aunque dicha energía también pueda manifestarse mediante ondas de diferente naturaleza, ya sea como calor radiado, rayos X o rayos gamma por ejemplo. La diferencia fundamental respecto a las ondas electromagnéticas respecto a la propagación de cualquier otra perturbación es que no necesitan un medio material para transmitirse.

La óptica geométrica describe las trayectorias de los rayos luminosos mediante líneas rectas, sin embargo no explica efectos como la difracción o la interferencia que son estudiados mediante la óptica ondulatoria, la cual trata la luz como una onda electromagnética. Dichos efectos ondulatorios se pueden despreciar sin embargo cuando el tamaño la longitud de onda es muy pequeña en comparación de los objetos que la luz encuentra a su paso.

De acuerdo con la física moderna toda radiación electromagnética (incluida la luz visible) se propaga a una velocidad constante en el vacío. Sin embargo la velocidad luz depende de la naturaleza del medio por el cual esta se propague. El índice de refracción describe dicha dependencia y se define como la relación entre la velocidad de la energía radiante en el vacío c , y la velocidad de esta en un medio material v .

$$n = c/v. \tag{1.1}$$

La velocidad de propagación de la luz en un medio material depende entonces del índice de refracción del medio en el que se encuentre, pero este índice a su vez varía respecto a la longitud de onda debido a que el material absorbe y reemite la luz cuya frecuencia es cercana a la frecuencia de oscilación natural de los electrones que están presentes en el material. Por tanto el valor del índice de refracción debe ser definido para una longitud de onda concreta. Estas variaciones en la velocidad de propagación dependen del índice de refracción del material y hacen que la luz, para frecuencias diferentes, se propague de manera diferente (dispersión cromática). Si la luz se propaga por un medio isótropo entonces la velocidad de la luz será igual en cualquier punto del material con independencia de la dirección de propagación, por tanto el índice de refracción permanecerá constante. En caso de un medio anisótropo las propiedades del medio, entre ellas el índice de refracción, dependen de la dirección en que sean medidas, y por tanto la luz no se propagará a igual velocidad en todas las direcciones.

En cualquier trabajo de diseño óptico se hace imprescindible describir la propagación de la luz a través de los distintos medios físicos y materiales que componen el sistema, para lo cual es necesario recurrir al principio de Fermat. Este afirma que la trayectoria recorrida por la luz para ir de un punto a otro es tal que el camino óptico recorrido (o su longitud) es estacionario respecto a las variaciones de los caminos posibles. El postulado original de Fermat (recogido en su correspondencia con su colega y físico francés Cureau de la Chambre) hablaba de un camino óptico mínimo pero no es completamente riguroso porque la luz a veces recorre un camino óptico máximo.

El tiempo que tarda la luz en recorrer una distancia s en un medio isótropo dado es $t = s/v$, aplicando la ecuación [1.1] dicho tiempo se puede expresar como $t = \frac{sn}{c}$. Si ahora se considera un medio donde el índice de refracción dependa de la posición $n = n(s)$ (medio anisótropo) o bien una trayectoria que pase por medios de distinto índice de refracción entonces podemos estimar que una distancia diferencial ds se recorre en un tiempo $dt = \frac{n ds}{c}$, siendo el tiempo total en recorrer el camino entre un punto a y otro b la cantidad:

$$t = \frac{1}{c} \int_a^b n(s) ds, \quad (1.2)$$

donde $\int_a^b n(s) \cdot ds$ es la longitud del camino óptico (LCO) en un medio no homogéneo.

Sustituyendo en la ecuación [1.3] el índice de refracción por la ecuación [1.1] se llega a que la longitud del camino óptico (la cual debe ser estacionaria) es la distancia recorrida a la velocidad de la luz en el vacío en el tiempo t empleado por la luz para recorrer la distancia l en un medio con índice de refracción n .

$$LCO = \int_a^b n(s) \cdot ds = c \int_a^b \frac{ds}{dv} = c \int_a^b dt = ct. \quad (1.3)$$

A raíz de principio de Fermat se puede inferir directamente la ley de Snell, al igual que la ley de reflexión. Para ello se supone un rayo que es emitido desde el punto A y atraviesa la frontera entre dos medios homogéneos viajando hasta el punto B .

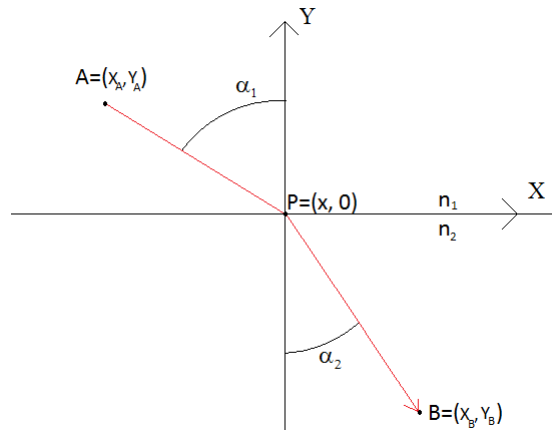


Figura 1.2: Deducción de la ley de refracción a partir del principio de Fermat

El camino óptico que recorre el rayo en el primer medio se expresa mediante la magnitud LCO_1 que resulta $LCO_1 = n_1 \sqrt{(X - X_A)^2 + Y_A^2}$, mientras que en segundo medio es $LCO_2 = n_2 \sqrt{(X_B - X)^2 + Y_B^2}$ y la suma de ambos será el camino óptico total que debe ser estacionario:

$$\frac{dLCO}{dx} = n_1 \frac{(X - X_A)}{\sqrt{(X - X_A)^2 + Y_A^2}} - n_2 \frac{(X_B - X)}{\sqrt{(X - X_B)^2 + Y_B^2}} = 0. \quad (1.4)$$

La anterior ecuación [ec. 1.4] se iguala a cero para asegurar el camino óptico extremal, en ella ambos sumandos coinciden con los senos de los ángulos de incidencia α_1 y del ángulo refractado α_2 por tanto:

$$n_1 \sin(\alpha_1) = n_2 \sin(\alpha_2). \quad (1.5)$$

Esta ecuación [ec. 1.5] constituye la ley de Snell que en óptica geométrica describe la refracción de un rayo al incidir en la frontera de dos medios de distinto índice de refracción. La refracción de una onda consiste en el cambio de dirección que experimenta cuando pasa de un medio a otro distinto. Este cambio de dirección se produce como consecuencia de la diferente velocidad de propagación que tiene la onda en ambos medios. En el cálculo de sistemas ópticos (por ejemplo en el diseño de lentes) a menudo se considera la aproximación paraxial, suponiendo que las trayectorias de los rayos de luz forman ángulos pequeños con el eje óptico. De esta manera en la ecuación de Snell [ec. 1.5] el seno de un ángulo se aproxima por el ángulo mismo (en radianes).

En el caso de que el rayo incida sobre una superficie reflectora entonces se propagaría toda su trayectoria por un mismo medio con velocidad constante y por tanto el ángulo de incidencia sería igual al de reflexión respecto al vector normal a la superficie. Precisamente para predecir el comportamiento de un haz de luz reflejado en una superficie reflectora es conveniente diferenciar según la dirección de su vector normal a la misma. Una superficie lisa y bien pulida (cuyo vector normal en cualquier punto de la misma es perpendicular a la superficie en su conjunto) produce una reflexión especular, la luz que incide en una dirección determinada la refleja en otra dirección bien determinada. Pero la mayoría de las superficies de los cuerpos son ásperas o irregulares (el vector normal a la superficie no está ligado a ninguna condición específica), y producen por ello una reflexión difusa enviando la luz reflejada en todas las direcciones posibles.

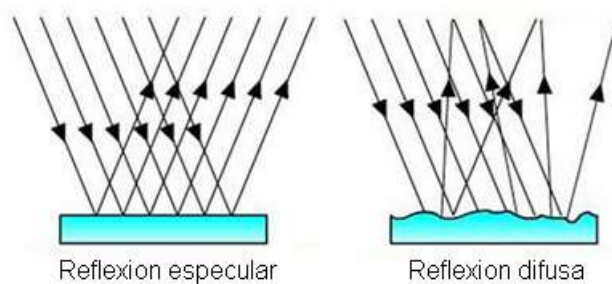


Figura 1.3: Reflexión especular y difusa

La introducción de superficies irregulares, aprovechando las características de la reflexión difusa, será común en los diseños ópticos abordados a lo largo de este trabajo (Secciones 3.3, 4.4). De modo que este tipo de superficies permiten dividir la concentración de flujo de manera aleatoria mejorando en la mayoría de los casos la uniformidad del diseño en detrimento de su eficiencia.

1.4. Óptica anidólica

La óptica anidólica es la rama de la óptica que se ocupa de la transferencia óptima de la radiación de luz entre una fuente y un receptor. Como su nombre indica (del Griego, an:sin eidolon:imagen) los sistemas anidólicos no están condicionados a formar una imagen aunque algunos sistemas consiguen proyectar una imagen nítida. Al contrario que los sistemas formadores de imágenes, que captan los rayos que parten del objeto para formar los puntos en la imagen, los sistemas anidólicos no precisan focalizar los rayos de la fuente en el receptor lo cual dota de un mayor grado de libertad al diseño.

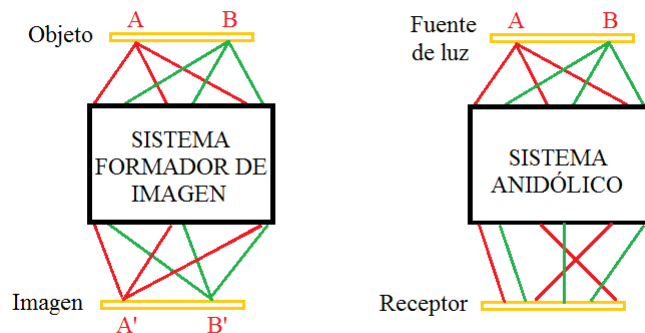


Figura 1.4: Sistema formador de imagen y sistema anidólico

La óptica anidólica tiene sus orígenes a principios de los 60 con la invención, por parte de Roland Winston, de los concentradores parabólicos compuestos (CPC) [7] que llevan desarrollándose y empleándose intensamente los últimos 40 años. Esta óptica pionera no formadora de imagen fue inicialmente empleada intensamente para aplicaciones térmicas de baja concentración solar aunque en la actualidad su uso está orientado a aplicaciones fotovoltaicas de alta concentración. Los métodos de diseño más importantes de óptica no formadora de imagen son el de Winston-Welford (línea de flujo) y el de Miñano-Benitez (simultaneous multiple surface SMS) [8].

Las aplicaciones más importantes de los sistemas no formadores de imágenes se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Sistemas de concentración de energía solar. Normalmente se precisa maximizar la transferencia de radiación lumínica a un receptor, típicamente una célula solar o un receptor térmico.

- Sistemas de iluminación. En este caso se busca la transferencia controlada de energía solar para lograr una distribución de la radiación o mapa de irradiancia específico.

Debido al reciente impulso en el campo de los dispositivos emisores de luz comerciales (LEDs) y la evolución reciente de los sistemas que integran displays (teléfonos móviles, PDAs, mini-cámaras, etc) se exploran nuevas aplicaciones en el campo de ICT (information and communications technology) para las cuales la implementación exitosa de la óptica anidólica es crucial.

Al contrario que en la óptica formadora de imagen, donde generalmente la secuencia de elementos que intervienen en el sistema está bien definida, la simulación de los sistemas ópticos anidólicos puede ser demasiado costosa computacionalmente si uno está obligado a calcular varios millones de rayos para asegurar la precisión deseada. El incremento del número de rayos inicial en cada refracción/reflexión a lo largo de la geometría anidólica podría hacer inviable un trazado de rayos exacto. Por ello una manera simple y práctica, aunque computacionalmente intensiva, de abordar el trazado de rayos de un determinado sistema anidólico es utilizar el método Monte-Carlo.

El método Monte-Carlo es un método estadístico numérico que permite resolver problemas físicos y matemáticos, mediante la simulación de variables aleatorias, que serían costosos de resolver por métodos exclusivamente analíticos o numéricos. Debido a la constante mejora de las capacidades de cálculo automatizado, métodos computacionalmente exigentes como es el método Monte-Carlo, son a día de hoy una opción viable para la resolución de multitud de problemas y por ello se encuentran integrados habitualmente en el software de trazado de rayos más popular.

Para aplicar el método Monte-Carlo es necesario asociar al sistema un modelo probabilístico artificial y simular los procesos de interés (ya sea al azar o no) utilizando los resultados de la simulación para calcular cantidades importantes, como podría ser el perfil de intensidad luminosa o la conservación de la Étendue.

1.4.1. Étendue

La **Étendue** es un parámetro clave en el diseño de muchos sistemas de iluminación y un concepto central en la óptica anidólica. Básicamente explica las características de la transferencia de flujo en un sistema óptico y además juega un papel fundamental en la forma de la distribución de radiación en el receptor.

En un sistema sin pérdidas todo el flujo que es transmitido por la pupila de entrada es emitido por la pupila de salida y por tanto la Étendue se conserva. La Étendue de un sistema se define como:

$$\xi = n^2 \iint_{pupil} \cos \theta dA_S d\Omega, \quad (1.6)$$

donde n es el índice de refracción en el espacio de la fuente, dA_s es un elemento diferencial de área de la fuente, θ es el ángulo que forma el vector normal a la superficie dA_s con el cono de emisión de ángulo sólido $d\Omega$, las integrales están definidas sobre el área de la pupila de entrada.

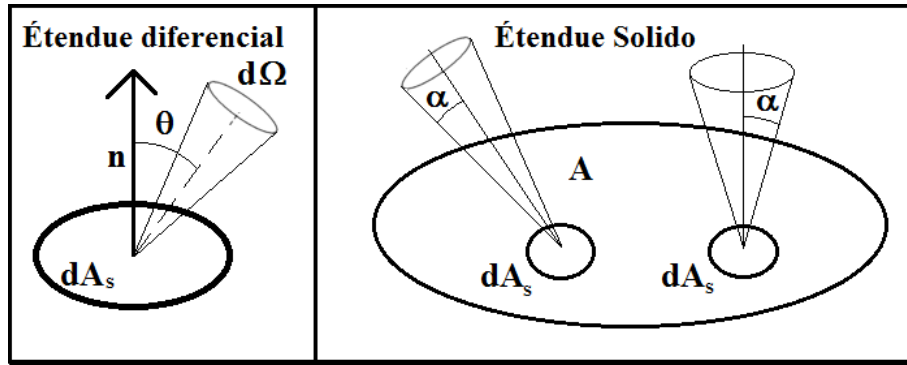


Figura 1.5: Étendue para un elemento diferencial de superficie y para un solido

El flujo total que se propaga a través de este sistema se expresa en función de $L(r, \hat{a})$ que es la radiancia en el punto r en la dirección del vector unitario \hat{a} . Integrando se obtiene el flujo:

$$\Phi = \iint_{pupil} L(r, \hat{a}) \cos \theta dA_S d\Omega. \quad (1.7)$$

Si se considera una fuente uniforme Lambertiana entonces la función de radiación de la fuente es dada por L_S , que substituyendo en [ec. 1.6] se obtiene:

$$\Phi = L_S \iint_{pupil} \cos \theta dA_S d\Omega. \quad (1.8)$$

Por tanto el flujo total transmitido por un sistema con un sistema lambertiano uniforme en términos de la Étendue viene dado por:

$$\Phi = \frac{L_S \xi}{n^2}. \quad (1.9)$$

La conservación de la Étendue implica un ángulo de propagación máximo, lo que significa una limitación del tamaño mínimo del sistema. Esta condición supone una cota máxima en el factor de concentración del sistema.

Considérese un area infinitesimal dA , inmersa en un medio de índice de refracción n emitiendo o recibiendo luz o dentro de un cono de ángulo α . La Étendue de este sistema viene dada por:

$$d\xi = n^2 dA \int \cos\theta d\Omega = n^2 dA \int_0^{2\pi} \int_0^\alpha \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi = \pi n^2 dA \sin^2 \alpha. \quad (1.10)$$

Nótese que el diferencial de ángulo sólido es expresado en coordenadas esféricas $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$, y se ha introducido el concepto de apertura numérica que se define como $NA = n \sin \alpha$, siendo α la mitad del ángulo de aceptación máximo del sistema. La apertura numérica (NA) es pues una magnitud adimensional que caracteriza el rango de ángulos para los cuales el sistema acepta luz.

Por tanto si una superficie A emite, o sobre ella incide, luz confinada en un cono de ángulo α , entonces la Étendue de la luz atravesando A será:

$$\xi = \pi n^2 \sin^2 \alpha \int dA = \pi n^2 A \sin^2 \alpha = \pi A N A^2. \quad (1.11)$$

Ahora se calculará el limite de concentración máxima de un sistema con una apertura de entrada A en el aire ($n_I = 1$) recibiendo luz dentro de un ángulo de aceptación 2α y dirigiendo la luz a un receptor de area menor S , e inmerso en un medio de índice de refracción n , cuyos puntos son iluminados dentro de un ángulo solido de apertura 2β . Según la anterior expresión [ec. 1.11], la Étendue de la luz incidente es:

$$\xi_I = \pi A \sin^2 \alpha. \quad (1.12)$$

Por tanto el valor de la Étendue de la luz que llega al receptor es:

$$\xi_R = \pi n^2 S \sin^2 \beta. \quad (1.13)$$

Por la conservación de la Étendue $\xi_I = \xi_R$

$$C = \frac{A}{S} = n^2 \frac{\sin^2 \beta}{\sin^2 \alpha}, \quad (1.14)$$

donde C es el factor de concentración del sistema óptico.

Para una apertura angular dada α , de la luz incidente, esta concentración C será máxima para el máximo valor de β , que es $\beta = \pi/2$. El máximo factor de concentración posible será pues:

$$C_{max} = \frac{n^2}{\sin^2 \alpha}. \quad (1.15)$$

En caso de que el índice de incidencia no sea uno tendríamos:

$$C_{max} = \frac{n_R^2}{NA_I^2}. \quad (1.16)$$

Este límite será una referencia para el diseño de aplicaciones orientadas a concentración que se desarrollan en el presente trabajo, representando un techo de concentración para las lentes acromáticas (Capítulo 3.2) o para el sistema colimador en su modo de funcionamiento inverso (Sección 4.3).

Otro teorema clave en muchos diseños no formadores de imagen es el principio de rayo marginal. Este teorema fue demostrado por Miñano a mediados de los 80 [9] y afirma que si los rayos de luz procedentes de los bordes de la fuente se redirigen hacia los bordes del receptor, esto asegurará que todos los rayos de luz procedentes de los puntos interiores en la fuente va a terminar también en la receptor. No hay ninguna condición de formación de la imagen, el único objetivo es transferir la luz desde la fuente al destino.

Bibliografía

- [1] B. H. Walker “Optical Engineering Fundamental” 2 ed. SPIE Press. (2009)
- [2] J. M. Enoch “Remarkable lenses and eye units in statues from the Egyptian Old Kingdom (ca. 4500 years ago): properties, timeline, questions requiring resolution” Proc. SPIE 3749, 18th Congress of the International Commission for Optics, 224 (1999)
- [3] A. M. Cetto “La luz en la naturaleza y en el laboratorio” 3 ed. Fondo de Cultura Economica. (2003)
- [4] E. Lorenzo, A. Luque “Comparison of Fresnel lenses and parabolic mirrors as solar energy concentrators” Applied Optics, vol. 21, Issue 10, pp. 1851-1853 (1982)
- [5] A. E. Becquerel “M´emoire sur les effets ´electriques produits sous linfluence des rayons solaires” Comptes Rendus, 9:561–567, (1839).
- [6] C. E. Fritts “A new form of selenium cell” American Journal of Science, 26:465–472, (1883).
- [7] R. Winston, W.T. Welford “The Optics of Non-Imaging Concentrators” Academic Press, New York, (1948).
- [8] P. Benitez, J.C. Miñano “Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions” Optical engineering 43(7), 1489-1502 (2004)
- [9] J.C. Miñano “Two dimensional nonimaging concentrators with inhomogeneous media: a new look” Journal of the Optical Society of America A 2(11), pp. 1826-1831, (1985)

Capítulo 2

Optimización de sistemas ópticos no formadores de imagen

Un sistema óptico es un conjunto de elementos que recogen y distribuyen la luz de la manera específica satisfaciendo los objetivos establecidos en cada caso particular. Las características de los sistemas ópticos dependen drásticamente de las fuentes de luz empleadas, bien sea luz solar, fuentes LED, lasers, etc. Las características del sistema óptico dependen también de la función para la cual este haya sido diseñado, algunos ejemplos podrían ser concentradores, formadores de imagen, iluminación, etc. Además el método y el dispositivo para captar, procesar y registrar los resultados puede condicionar el diseño del sistema óptico, ya sea el dispositivo de captación una pantalla, un fotodetector, una cámara CCD, o bien el ojo humano. Por tanto los sistemas ópticos según su complejidad pueden ir desde sencillos espejos o fibras ópticas hasta complicados telescopios, sistemas de iluminación natural o sondas ópticas para satélites.

La obtención de un sistema óptico eficaz para una aplicación determinada es un problema complejo, a menudo con diversas soluciones, que no se puede resolver aplicando una metodología simple de diseño. Por este motivo se debe recurrir al empleo de técnicas de optimización tal y como suele hacerse en multitud de otros campos de la ciencia. La optimización es una rama de las matemáticas aplicadas que consiste en la recopilación de principios y métodos usados para resolver problemas cuantitativos de distintas disciplinas científicas como la ingeniería, la óptica o la economía con el fin de obtener la mejor solución posible. Esto es equivalente a buscar los máximos y mínimos de una función que represente el problema a abordar.

A lo largo de este capítulo se describirán y aplicarán distintas técnicas de optimización a sistemas ópticos no formadores de imágenes. Se tendrá en cuenta tanto los resultados obtenidos respecto a los objetivos optimizados, como el tiempo de ejecución necesario y la complejidad de la geometría optimizada. En base a este criterio se elegirá el método de optimización más adecuado para cada diseño que será empleado en posteriores capítulos (Capítulos 3, 4)

2.1. Conceptos básicos de optimización

En ingeniería óptica, así como en la mayoría de las disciplinas científicas, se requiere obtener el mejor diseño posible por medio de los recursos a nuestra disposición. En el actual panorama tecnológico altamente competitivo ya no es suficiente diseñar un sistema cuyo cumplimiento de la tarea requerida sea únicamente satisfactoria, es además esencial obtener el mejor diseño dentro de las limitaciones establecidas. Para obtener nuevos productos en cualquier campo (aeroespacial, automotriz, fotónica, química, eléctrica, biomédica, agrícola, etc.) es necesario utilizar herramientas de diseño que proporcionen resultados óptimos de forma rápida y económica [1, 2]. La optimización numérica es una de las herramientas a nuestra disposición para alcanzar dicho objetivo.

Hoy en día el sector de la óptica está viendo como muchos de sus productos se incorporan e integran junto con dispositivos electrónicos, de modo que adoptan los ciclos de vida de este sector, con lo que con frecuencia los tiempos de lanzamiento se ven reducidos de una forma drástica. Este hecho hace aún más apremiante la necesidad de disponer herramientas automáticas que sean capaces de reducir el tiempo de diseño implicando la mínima interacción por parte del diseñador.

Un proceso de optimización consiste en la búsqueda, a partir de un diseño o configuración inicial de un sistema, de la mejor solución posible para un problema planteado. En el caso más simple consiste en maximizar o minimizar una función objetivo o función de mérito dado un dominio definido entre el que elegir las variables de entrada de dicha función real. En el campo del diseño óptico la función objetivo describe o engloba por lo general el comportamiento de un dispositivo óptico o un conjunto de los mismos que forma un sistema óptico.

Algunos de los conceptos básicos para un proceso de optimización se describen a continuación:

- **Algoritmo de optimización:** Un algoritmo es un conjunto de instrucciones y reglas que establecen un procedimiento formado por diferentes pasos o etapas sucesivas y que tiene como objetivo la resolución de un problema concreto. El algoritmo de optimización fija los valores de los parámetros del problema en cada iteración, y de esta manera establece un método automático que guía el desarrollo del proceso de optimización. Por tanto la convergencia del problema en una solución determinada, depende las características del algoritmo. Si el algoritmo de optimización empleado es el adecuado para el problema que se plantea entonces se obtiene una solución optima, sin embargo, dependiendo de la naturaleza del problema, los algoritmos son susceptibles de entrar en un bucle infinito sin alcanzar ninguna solución concreta. El proceso de optimización también depende del conjunto factible y las características de la función de mérito que se describen a continuación, aunque estas últimas se pueden considerar como parte del propio algoritmo de optimización.
- **Función de mérito (MF):** Durante la ejecución de un algoritmo de optimización de una función no lineal es necesario disponer de un criterio para determinar la bondad de la solución alcanzada en cada iteración del proceso. La función de mérito proporciona la información necesaria para establecer dicho criterio. Evaluando la función de mérito el algoritmo de optimización es capaz de elegir la mejor solución de todas las iteraciones. En el caso más sencillo se impone un único objetivo o parámetro de optimización, y el sistema estará caracterizado por una única variable, de este modo que el problema estará representado por una función de mérito de un solo argumento en la cual tanto el dominio como la imagen de la función serán números reales, y el valor óptimo corresponderá a un mínimo o a un máximo de dicha función.
- **Extremo relativo:** Un extremo relativo es un punto del dominio de la función en el cual la función alcanza un valor máximo o mínimo relativo respecto a su entorno. Para ello, la función debe estar en un punto en el cual no esta creciendo ni decreciendo y, por ende, su primera derivada debe ser igual a cero o indefinida $f' = 0$.

Un punto en el dominio de una función donde la derivada es igual a cero indefinida también es llamado punto o valor crítico.

$$f : M \rightarrow N, \quad \text{donde } M \subset \mathbb{R} \quad \text{y} \quad N \subset \mathbb{R}. \quad (2.1)$$

Pero el diseñador óptico se encuentran a menudo sistemas complejos compuestos por múltiples elementos, de modo que es preciso describirlos mediante funciones multivariantes que requieren la optimización simultánea de varios objetivos. A diferencia de los problemas de optimización con un único objetivo la optimización multivariable puede generar un conflicto entre objetivos de modo que el concepto de objetivo óptimo es ahora relativo y será necesario decidir de alguna forma cuál es la mejor solución al problema.

$$f(\bar{x}) : S \rightarrow T, \quad \text{donde } S \subset \mathbb{R}^n \quad \text{y} \quad T \subset \mathbb{R}^m. \quad (2.2)$$

■ **El conjunto factible:**

El conjunto de puntos que satisfacen la igualdad y restricciones de desigualdad [ec. 2.3] se llama el conjunto factible de la optimización. Sus elementos se denominan como puntos factibles.

En el caso de la optimización multivariable el dominio de la función delimita un rango de decisiones factibles (posibles soluciones) dentro del espacio vectorial \mathbb{R}^n . En la mayor parte de los problemas de diseño óptico están presentes ligaduras entre las variables o limitaciones en las mismas que vienen dadas por la naturaleza del sistema analizado, rango permisible de las variables, reglas de operación. etc.

Por ello un problema de optimización se formula habitualmente como:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f(\bar{x}), \\ g_i(\bar{x}) = c \quad \forall i \in \Gamma, \\ h_j(\bar{x}) \geq 0 \quad \forall j \in \Upsilon. \end{array} \right\} \quad (2.3)$$

donde g_i, h_j son un conjunto de funciones continuas de restricción. A menudo se imponen límites explícitos al valor de la función de restricción pero tales modelos más específicos también son susceptibles a la definición anterior [ec. 2.3].

La presencia de restricciones limita el espacio de búsqueda pero al mismo tiempo dificulta el encontrar la solución óptima porque se pueden perder algunos de los criterios como que el gradiente es nulo en la solución óptima (extremo relativo). Una estrategia orientada a calcular el óptimo sin restricciones y luego limitarlo al contorno de la región factible lleva a soluciones incorrectas.

En teoría, se precisan encontrar todas las soluciones globales para el modelo [ec. 2.3], suponiendo que el conjunto soluciones es finito. Sin embargo es más práctico y a menudo realista encontrar aproximaciones adecuadas del conjunto de óptimos globales tras un número finito de pasos en los que se evalúan el objetivo y las restricciones en los puntos de búsqueda seleccionados por el algoritmo de optimización.

A continuación se citarán las estrategias de optimización o algoritmos más frecuentes divididos en métodos exactos y métodos heurísticos, estos últimos se basan en formular conceptos que guíen el algoritmo observando el comportamiento de los casos particulares.[3]

Los algoritmos deterministas, pertenecientes al primer grupo, tienen una garantía rigurosa (al menos a priori) para encontrar al menos una o todas las soluciones globales. Sin embargo la carga computacional asociada puede llegar a ser excesiva a medida que aumenta la complejidad del modelo. En este caso, para enfrentarse a problemas de grandes dimensiones o sin estructura definida, es más práctico emplear algoritmos estocásticos y métodos heurísticos inteligentes que tienen un componente de búsqueda global estocástica. Los métodos heurísticos, por regla, no tienen estricta garantías de convergencia, sin embargo, en muchos casos pueden convertirse en una práctica herramienta para abordar modelos fuera del alcance de la rigurosa metodología exacta.

2.1.1. Métodos exactos de optimización

2.1.1.1. Método de Newton

El método de Newton (conocido también como el método de Newton-Raphson o el método de Newton-Fourier) es un algoritmo iterativo para encontrar los extremos relativos de una función aproximando esta a una función cuadrática. De acuerdo con la primera condición necesaria para que una función tuviera un extremo relativo o mínimo local se debe cumplir que $f'(x) = 0$. Por lo tanto podemos aplicar el método de Newton a la derivada:

$$x^{k+1} = x^k - \frac{f'(x^k)}{f''(x^k)}, \quad (2.4)$$

siendo x^k el valor dentro del conjunto factible de la iteración k -ésima y x^{k+1} el valor de la próxima iteración en el curso de la optimización.

Pero el método de Newton no asegura la convergencia global, ya que si existen varios extremos relativos entonces el método puede no alcanzar el extremo deseado si no se parte de un punto inicial suficientemente cercano. Además es necesario calcular tanto $f'(x)$ como $f''(x)$.

2.1.1.2. Programación cuadrática secuencial (SQP)

La programación cuadrática secuencial se considera como un método cuasi-Newton y es uno de los métodos más eficientes para optimización no lineal con restricciones. Numerosos paquetes de software soportan este método de optimización (Optima, Matlab, *OPSYC* o *SQP*). La idea de los métodos de programación cuadrática secuencial es modelar el problema no lineal para una iteración dada x^k (siendo k un número natural) mediante un sub-problema de programación cuadrática (*QP*) cuya solución se emplea para construir la siguiente iteración x^{k+1} del problema global [4].

Para describir el método *SQP* es necesario introducir el Lagrangiano, L , asociado a un problema no lineal bajo unas restricciones dadas [ec. 2.3].

$$L(\bar{x}, \lambda, \sigma) = f(\bar{x}) - \lambda^T(c - g(\bar{x})) - \sigma^T h(\bar{x}), \quad (2.5)$$

donde λ^T y σ^T son las matrices traspuestas de los multiplicadores de Lagrange, que se interpretan como el cambio de la variación de la función objetivo respecto de la función de restricción [ec. 2.3].

En su forma mas simple el algoritmo *SQP* reemplaza la función de mérito o función objetivo por una aproximación cuadrática que representa el subproblema a optimizar:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min q_k(d) \\ q_k(d) = \nabla f(x^k)^T d + \frac{1}{2} d^T \nabla^2 L(x^k, \lambda^k, \sigma^k) d \end{array} \right\}, \quad (2.6)$$

donde d es la matriz de dirección que nos indica el siguiente valor de la optimización dentro del conjunto factibl, $x^{k+1} = x^k + d$. El operador nabla, ∇ , representa el gradiente de una función que equivale a la matriz de las derivadas parciales, y ∇^2 el Laplaciano que equivale a la suma de las derivadas segundas parciales:

$$\nabla f(x^k) = \left(\frac{\partial f(x^k)}{\partial x_1}, \frac{\partial f(x^k)}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f(x^k)}{\partial x_n} \right), \quad (2.7)$$

$$\nabla^2 f(x^k) = \frac{\partial^2 f(x^k)}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 f(x^k)}{\partial x_2^2} + \dots + \frac{\partial^2 f(x^k)}{\partial x_n^2}, \quad (2.8)$$

donde $x^k = (x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k)$.

En el caso del método *SQP* las iteraciones x^k no necesitan ser puntos factibles, ya que el cálculo de los puntos factibles en el caso de funciones no lineales restringidas puede ser tan difícil como la solución de la propia optimización. Esta construcción se realiza de tal manera que la secuencia x^k converge a un mínimo local de la optimización a medida que $k \rightarrow \infty$. En este sentido se asemeja al método de Newton y los métodos cuasi-Newton para la solución numérica de sistemas algebraicos de ecuaciones no lineales. Sin embargo, la presencia de restricciones hace que tanto el análisis como la aplicación de métodos SQP sea mucho más compleja.

La aplicación del algoritmo SQP consta de tres etapas principales:

- **La actualización de la matriz de Hesse**

Se define como matriz Hessiana de una función f real como la matriz cuadrada de $n \times n$ de las derivadas segundas parciales:

$$H_f(x)_{i,j} = \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_i \partial x_j}. \quad (2.9)$$

La matriz hessiana es utilizada en problemas de optimización restringida. El determinante de sus principales menores se utiliza como criterio para determinar si un punto crítico de una función es un mínimo, máximo, punto de inflexión o no determinado.

- **Solución del problema de programación cuadrática**

El procedimiento de solución consta de dos fases. La primera fase consiste en el cálculo de un punto factible (si existe). La segunda fase implica la generación de una secuencia iterativa de puntos factibles que convergen a la solución.

- **Cálculo función de mérito**

La solución del sub-problema cuadrático genera un vector d^k [ec. 2.7] que es utilizado para la proxima iteración a la vez que permite calcular la función de mérito comprobando el progreso adecuado de la optimización.

2.1.2. Métodos heurísticos

2.1.2.1. Los algoritmos genéticos.

La optimización evolutiva permite un enfoque heurístico que pretende “imitar” modelos de evolución biológica. Diversos algoritmos determinísticos y estocásticos se pueden construir basándose en reglas evolutivas. Estas estrategias se aplican a problemas de optimización continuos y discretos bajo requisitos estructurales leves. Esta clase de optimización se basa en procesos de aprendizaje dentro de una población de individuos, cada uno de los cuales representa un punto en el espacio de soluciones potenciales al problema planteado.

Los algoritmos genéticos son capaces de evitar los problemas comunes de los algoritmos de optimización local, pero pueden converger prematuramente debido a una escasa población o demorarse en exceso en la búsqueda de soluciones que quizás no tengan cabida en el problema.

Los algoritmos evolutivos han sido aplicados de manera eficiente en cuanto a su estimación de parámetros en el contexto de simulaciones electromagnéticas de gran exigencia computacional, así como a la hora de optimizar la distribución de canal de frecuencia en fibras ópticas y determinar los modelos de dispersion de complejos materiales dieléctricos [5]. Además estos algoritmos han sido aplicados con éxito tanto al diseño de lentes de concentración para sistemas pasivos de seguimiento solar que guardan estrecha relación con algunas de las aplicaciones desarrolladas en este trabajo [6].

2.1.2.2. Algoritmo Nelder-Mead

El algoritmo Nelder-Mead, publicado en 1965, es un método de búsqueda directa muy popular para la minimización multidimensional sin restricciones. Una muestra de su impacto a día de hoy es su inclusión en la guía “Numerical Recipes” [7] (donde se le nombra como “moeba algorithm”) siendo estos los libros de métodos de programación científica más vendidos de todos los tiempos (según la editorial “Cambridge University Press”) con más de 3000 citas al año en la literatura científica [8]. Además este algoritmo de optimización es empleado en multitud de funciones de la toolbox del programa de cálculo numérico Matlab.

El algoritmo Nelder-Mead es un método heurístico que utiliza el concepto de simplex (aplicado con éxito a optimización de sistemas de iluminación [9]), que es un politopo de $N + 1$ vértices en N dimensiones. Siendo un politopo un objeto geométrico de bordes planos que existe en cualquier número de dimensiones. Así un polígono es un politopo en dos dimensiones, un poliedro en tres, etc. Los vértices del simplex son aproximaciones al óptimo global que se van modificando a medida que se encuentra un punto del conjunto factible para el cual se consigue mejorar la función objetivo respecto al simplex inicial.

El método Nelder-Mead es un algoritmo de búsqueda directa, no emplea información sobre la derivada de la función, que compara valores funcionales; los valores de la función objetivo son tomados en un conjunto de puntos muestreados (simplex) y son usados para continuar el proceso.

La variación del Simplex se lleva a cabo según 4 operaciones básicas: **reflexión, expansión, contracción y encogimiento**, que están asociadas a 4 parámetros respectivamente:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho > 0, \\ \chi > \max(\rho, 1), \\ 0 < \gamma < 1, \\ 0 < \sigma < 1. \end{array} \right\}. \quad (2.10)$$

A continuación se describe la obtención del simplex de dimensión $(dim + 1)$ correspondiente a la iteración k -ésima del algoritmo Nelder-Mead para minimizar una función objetivo. Durante la descripción del método Nelder-Mead el subíndice de la variable x indica el rango de puntos estudiados en cada iteración en lugar de las sub-variables que componen x como hemos visto hasta ahora.

1. Ordenación:

En primer lugar se ordenan los puntos del conjunto factible que componen el simplex para que los valores de la función de mérito en dichos puntos sigan un orden creciente.

$$x_1^{k-1}, x_2^{k-1}, \dots, x_{dim}^{k-1}, x_{dim+1}^{k-1} \quad k \geq 1, \quad (2.11)$$

$$f(x_1^{k-1}) \leq f(x_2^{k-1}) \leq \dots \leq f(x_{dim}^{k-1}) \leq f(x_{dim+1}^{k-1}). \quad (2.12)$$

Al tratarse de un problema de minimización el primer punto x_1^{k-1} es, hasta el momento, el mejor de las soluciones contenidas en el simplex.

2. Reflexión:

Se halla el punto de reflexión que será el punto simétrico, ponderado por ρ , de la peor solución respecto al valor medio de los dim mejores puntos del simplex.

$$\bar{x} = \frac{1}{dim} \sum_{i=1}^{dim} x_i^{k-1}, \quad (2.13)$$

$$x_{reflex} = \bar{x} + \rho(\bar{x} - x_{dim+1}). \quad (2.14)$$

Se evalúa la función de mérito en dicho punto $f(x_{reflex})$ y la siguiente operación del algoritmo depende de este resultado:

- a) $f(x_{reflex}) < f(x_1)$. En caso de que el punto de reflexión mejore el mejor de los puntos del simplex se procede a la operación de **expansión**
- b) $f(x_1) < f(x_{reflex}) < f(x_{dim})$. En caso de que el punto de reflexión no mejore el mejor de los puntos del simplex pero si alguno de los dim mejores se acepta el punto reflejado y se descarta el peor punto para formar un nuevo simplex. En este caso se da por concluida la iteración k-ésima.
- c) $f(x_{reflex}) \geq f(x_{dim})$. En caso de que el punto de reflexión no mejore ningún punto del los dim mejores simplex se procede a la operación de **contracción**.

Hay que tener en cuenta que x_{reflex} se evalúa respecto a los dim mejores puntos dejando fuera de la comparación el peor de todos x_{dim+1}

3. Expansión:

Se calcula el punto de expansión para ver si se puede mejorar aún más el punto de reflexión calculado:

$$x_{\text{expan}} = \bar{x} + \chi(x_{\text{refle}} - \bar{x}). \quad (2.15)$$

Se evalúa de nuevo la función de mérito $f(x_{\text{expan}})$, si se ha mejorado respecto al punto de reflexión, $f(x_{\text{expan}}) < f(x_{\text{reflex}})$, se acepta el punto de expansión y se descarta el peor punto para formar un nuevo simplex. En caso contrario, $f(x_{\text{expan}}) > f(x_{\text{reflex}})$, se acepta el punto reflejado en su lugar. En cualquiera de los dos casos se da por terminada la iteración.

4. **Contracción:** Esta operación se lleva a cabo si el punto reflejado, x_{reflex} , no ha mejorado ninguno de los dim mejores puntos del simplex, por tanto solo queda compararlo con el peor de todos los puntos x_{dim+1} . Dependiendo del resultado la operación de contracción se realizará hacia el mejor de estos dos puntos.

- **Contracción hacia fuera:** Si el punto reflejado es mejor que el peor de los puntos del simplex, $f(x_{\text{reflex}}) \leq f(x_{dim+1})$, entonces se calcula el punto contraído según la ecuación 2.16.

$$x_{\text{con-f}} = \bar{x} + \gamma(x_{\text{refle}} - \bar{x}). \quad (2.16)$$

A continuación se evalúa la función de mérito en el punto contraído $f(x_{\text{con-f}})$, si se ha mejorado $f(x_{\text{con-f}}) < f(x_{\text{reflex}})$ se acepta el punto contraído y se descarta el peor de los puntos dando por finalizada la iteración. En caso contrario se procede a la operación de **encogimiento**.

- **Contracción hacia dentro:** Si el punto reflejado iguala o empeora el peor de los puntos del simplex $f(x_{\text{reflex}}) \geq f(x_{dim+1})$, entonces se calcula el punto contraído según la ecuación 2.17.

$$x_{\text{con-d}} = \bar{x} + \gamma(x_{dim+1} - \bar{x}). \quad (2.17)$$

A continuación se evalúa la función de mérito en el punto contraído $f(x_{con-d})$, si se ha mejorado $f(x_{con-d}) < f(x_{dim+1})$, entonces se acepta el punto contraído y se descarta el peor de los puntos para formar un nuevo simplex y de este modo se llega al final de la iteración k -ésima. En caso contrario se procede a la operación de **encogimiento**.

5. Encogimiento:

Se toman dim nuevos puntos para el simplex.

$$\nu_i = x_1 + \sigma(x_i - x_1), \quad i = 2, \dots, dim + 1. \quad (2.18)$$

El nuevo simplex tiene pues como vertices los puntos $x_1, \nu_2, \dots, \nu_{dim+1}$ y se da por finalizada la iteración.

En la figura 2.1 se presenta una diagrama de flujo del algoritmo de Nelder-Mead que ilustra el funcionamiento anteriormente descrito.

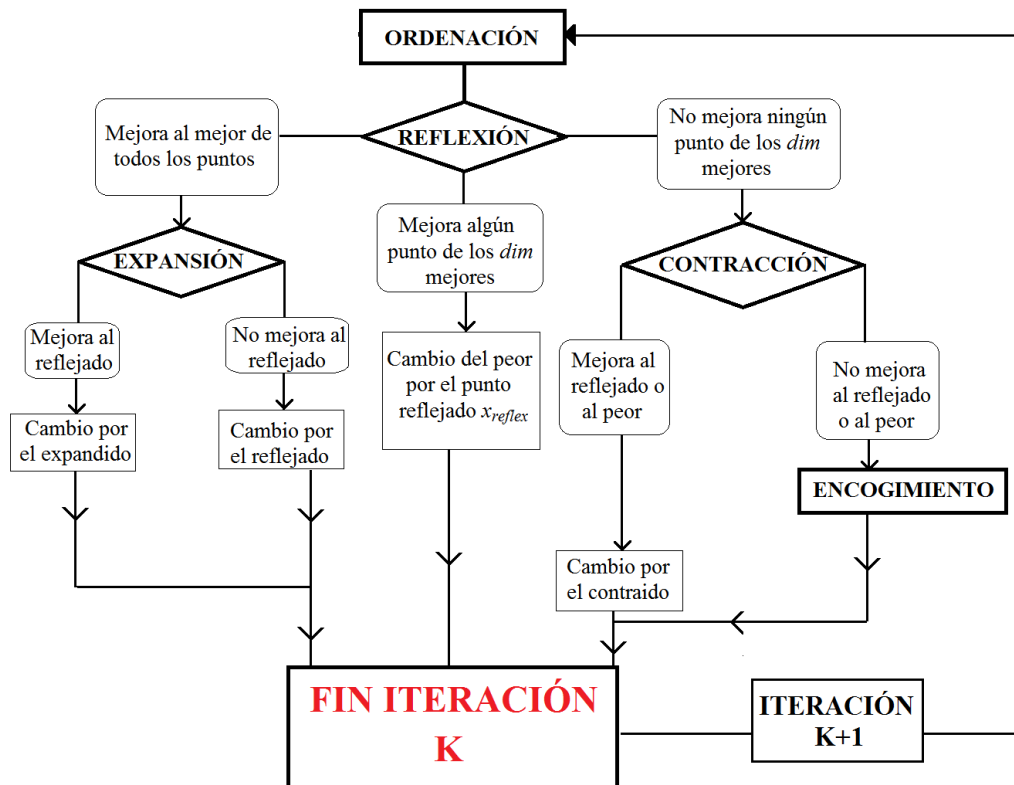


Figura 2.1: Diagrama de flujo del algoritmo Nelder Mead

La modificación del simplex que se produce a lo largo del algoritmo Nelder-Mead determina la solución óptima del sistema. De este modo se alcanza un valor mínimo de la función de mérito que depende a su vez de los parámetros empleados en el algoritmo. Estos parámetros vienen predeterminados por defecto por valores [ec. 2.19].

$$\rho = 1, \quad \chi = 2, \quad \gamma = 1/2, \quad \sigma = 1/2. \quad (2.19)$$

Estos valores por defecto se emplean en las optimizaciones presentadas a lo largo de este capítulo, así como en el resto de aplicaciones (Apartado 2.1.1.2) en cuya optimización recurren al algoritmo Nelder-Mead.

2.2. Optimización dispositivos ópticos no formadores de imagen mediante algoritmo de función de mérito dinámica (DMF)

Las técnicas de optimización automática han sido recientemente introducidas en el diseño de sistemas anidólicos [10]. Las herramientas de trazado secuencial de rayos junto con los sistemas ópticos complejos son los principales impedimentos para la aplicación extensiva de las técnicas de optimización automáticas (de pesos dinámicos) a sistemas ópticos no formadores de imágenes.

Recientemente, las mejoras en las prestaciones del hardware y software permiten la implementación de funcionalidades en los paquetes de software [11, 12] que las convierten en herramientas de gran potencial en los problemas de diseño de sistemas anidólicos. Los principales pasos en los procesos de optimización de sistemas no formadores de imágenes son:

1. La parametrización de sistemas ópticos, incluyendo la definición de las ecuaciones de restricción o ligadura.
2. La definición de la función de mérito (MF) que será objeto de la maximización o minimización [13].
3. La selección del algoritmo de optimización, en particular el algoritmo Nelder-Mead (descrito en el la sección 2.1.2.2) asegura un método robusto y convergente en optimización de sistemas anidólicos [14].

A lo largo de esta sección se centra la atención en la función de mérito ya que proporciona información imprescindible para el transcurso del proceso de optimización y según sus características puede condicionar la solución alcanzada. La forma más común para definir la función de mérito corresponde a la suma ponderada de la diferencia entre las variables y sus correspondientes objetivos al cuadrado [15]

$$MF = \sum_i w_i (V_i - T_i)^2. \quad (2.20)$$

Los pesos w_i son por lo general ajustados manualmente en un proceso de prueba y error [16], este método no es óptimo y sugiere la necesidad de introducir métodos de ajuste automático de los pesos w_i . En esta sección se propone el uso de un nuevo tipo de funciones de mérito dinámicas (*DMF*) que ajustarán automáticamente el valor de los pesos durante la optimización. La variación del valor de los pesos modifica el problema de optimización, alterando los extremos locales (máximos y mínimos), y por tanto la *DMF* se puede considerar un método global de optimización [17].

2.2.1. Función de mérito dinámica DMF

En los sistemas no formadores de imagen la designación de la función de mérito, así como la semilla y el algoritmo de optimización resultan factores decisivos para el propio proceso de optimización. El algoritmo tiene que ser robusto, preciso, y convergente, con una función de mérito que típicamente aporta información sobre la transferencia de flujo luminoso entre la fuente y el destino, así como su distribución. En cambio el diseño de sistemas formadores de imagen necesitan normalmente una función de mérito diferente y altamente dependiente de la aplicación.

El cálculo de la función de mérito requiere abordar el problema con la mayor exactitud posible, y en el caso de las optimizaciones por simulación de trazados ópticos esto se traduce en aumentar la cantidad de rayos con el fin de comprobar de manera precisa el comportamiento del sistema. Una elección incorrecta del número de rayos del trazado puede conducir a un error de cálculo que arroje un valor extremo en la función de mérito debido a los factores estocásticos que intervienen en el cálculo de la función de mérito y que se ven magnificados al reducir el número de rayos. Para remediar este problema la solución obvia es aumentar el número de rayos trazados en la simulación pero esto tiene el efecto adverso de reducir la velocidad de todo el proceso de optimización.

En el proceso de diseño óptico a menudo se encuentran sistemas complejos cuyo comportamiento debe ser caracterizado por múltiples parámetros. A la hora de optimizar estos diseños es necesario tener en cuenta diversos objetivos, lo cual hace más complejo el proceso ya que la tendencia de cada objetivo puede ser muy diferente entre sí en relación a cada parámetro de la optimización. Para reflejar esta realidad a menudo se emplean métodos basados en la combinación de objetivos, donde se introducen el concepto de coeficientes de peso, w_i , que establecen la importancia relativa de cada objetivo.

$$F(x) = w_1F_1(x) + w_2F_2(x) + \dots + w_nF_n(x). \quad (2.21)$$

Mediante la suma ponderada se obtiene una única función de mérito, $F(x)$, [ec. 2.21] que convierte el problema de optimización multi-objetivo en una optimización escalar. Se emplea la notación vectorial para las variables de la función de mérito y objetivos para representar las múltiples variables que caracterizan el sistema óptico.

Dependiendo de la naturaleza de los pesos se puede hablar de; **métodos de asignación de prioridades**, donde el valor de los pesos se establece exclusivamente según la importancia de cada objetivo; o bien **métodos de optimización por metas**, en la cual se establece un valor ideal para cada objetivo y cada uno de los pesos dependen a su vez de la distancia a dicha meta $w_i' = w_i|F_i - M_i|$; también se contemplan la **optimización de pesos estáticos** u **optimización convencional** si estos mantienen su valor a lo largo del proceso de optimización, o bien de **optimización de pesos dinámicos** si el valor asignado a dichos coeficientes se modifica a dinámicamente en función de la evolución de la optimización y los resultados alcanzados.

Los métodos de optimización dinámica aplicados sobre sistemas no lineales (sensibles a las condiciones iniciales) tienen la propiedad particular de automodificarse para optimizar su respuesta, de lo que surgen capacidades similares o comparadas a menudo con el aprendizaje humano. En este sentido la ciencia ha desarrollado sistemas similares denominados redes neuronales artificiales que permiten el análisis de múltiples tipos de datos y reflejan esta capacidad de aprendizaje. De este modo la optimización de pesos dinámicos incluida en este trabajo se podría también enfocar desde el punto de vista de una red neuronal donde cada peso corresponde a una neurona. Otra opción es introducir el concepto de función de mérito dinámica (**DMF**) que estaría englobado en la **optimización de pesos dinámicos** siendo esta función de mérito la que controla el valor de los pesos en cada iteración de la optimización.

Para determinar la técnica más efectiva orientada a la optimización de nuestros sistemas ópticos se desarrollará un estudio distinguiendo entre funciones de mérito constantes y dinámicas, lo que supone diferenciar entre optimización de pesos constantes o adaptativos. En este estudio se analizarán dispositivos no formadores de imágenes y se tendrán en cuenta tanto los resultados óptimos como los recursos y el tiempo de computación requerido.

Para diseños no formadores de imagen los objetivos mas comunes a optimizar son la eficiencia, uniformidad, emisión angular, factor de concentración, etc. [16], [17], [18], y normalmente varios de ellos deben ser optimizados simultáneamente. A lo largo de este capítulo la eficiencia de transferencia de flujo entre fuente-detector, y la uniformidad de la distribución de flujo en el plano de trabajo serán elegidos como objetivos de la función de mérito ya que forman los parámetros más típicos involucrados en los sistemas de ópticos no formadores de imágenes. La eficiencia, η , mide el flujo que llega a la pantalla del detector dividido por el flujo total emitido.

La uniformidad, U , se calcula como la media de irradiancia dividido por el máximo en la pantalla del detector.

$$\eta = \frac{\Phi_{detector}}{\Phi_{emitted}}, \quad U = \frac{\bar{E}}{E_{max}}. \quad (2.22)$$

Pero el equilibrio adecuado entre estos objetivos y por lo tanto la elección correcta de los pesos de función de mérito es todavía una cuestión de prueba y error [19] cuya elección óptima depende del problema particular considerado. Para asegurar los valores adecuados de los pesos se propone una función de mérito dinámica (DMF) que modifique los pesos de cada objetivo a medida que la optimización avanza.

$$DMF = 2 - [w_\eta(n)\eta + w_U(n)U] = 2 - [\lambda(n)\rho + (2 - \lambda(n))U], \quad (2.23)$$

donde η es la eficiencia, U la uniformidad, w_η es el peso para el objetivo de la eficiencia, w_U es el pesos para la uniformidad, n es el número de iteración de la optimización DMF , y λ define las restricciones entre los factores de los pesos:

$$w_\eta(n) = \lambda(n) \quad (2.24)$$

$$w_\eta(n) + w_U(n) = 2 \quad (2.25)$$

$$\lambda(n) \in [0, 2] \quad (2.26)$$

El algoritmo de Nelder-Mead será el elegido para llevar a cabo las optimizaciones *DMF*. Este método numérico (Apartado 2.1.2.2), basado en el concepto de simplex [20], es una técnica habitual para minimizar una función no lineal multi-objetivo. De esta manera el proceso de optimización se convierte en un problema de minimización y la *DMF* decrece a medida que los objetivos (η, U) aumentan [ec. 2.23]. El valor mínimo de *DMF* es cero ya que el valor máximo ideal de los objetivos es uno y λ varía entre 0 y 2 [ec. 2.24]. Durante este estudio los diferentes procesos optimización siempre se iniciarán con valores uniformes de los pesos $w_\eta=w_U=1$, que serán revisados cada iteración de *DMF*. En cambio la función de mérito convencional *CMF* emplea valores fijos de los pesos que no se modifican durante todo el proceso.

Un única iteración de *DMF* comprende pues varias iteraciones de *CMF* que se denotarán por el índice m (fig. 2.2). La optimización *CMF* concluye bajo dos condiciones autosuficientes; la primera condición se alcanza si la optimización *CMF* llega a la iteración máxima $m = M$; la segunda condición depende de los parámetros de tolerancia que establecen la variación mínima considerada para la función de mérito y la mínima variación de las variables o parámetros del sistema. Las variaciones de la *MF* junto con variables de la optimización tienen que ser simultáneamente menor que los respectivos valores de tolerancia ($TolFun, TolX$) para dar por finalizada la optimización *CMF*.

La técnica *DMF* tiende a equilibrar los pesos de la *MF* comparando los valores obtenidos de cada objetivo y sumando una cantidad D/n al coeficiente del peso del objetivo menor mientras resta ese mismo valor al objetivo más alto:

$$\left\{ \begin{array}{l} si(\eta(n) > U(n)) \Rightarrow w_\eta(n+1) = w_\eta(n) - \frac{D}{n}, w_U(n+1) = w_U(n) + \frac{D}{n} \\ si(\eta(n) < U(n)) \Rightarrow w_\eta(n+1) = w_\eta(n) + \frac{D}{n}, w_U(n+1) = w_U(n) - \frac{D}{n} \end{array} \right\} \quad (2.27)$$

o su equivalente en ecuaciones de restricción lineal de pesos:

$$\left\{ \begin{array}{l} si(\eta(n) > U(n)) \Rightarrow \lambda(n+1) = \lambda(n) - \frac{D}{n} \\ si(\eta(n) < U(n)) \Rightarrow \lambda(n+1) = \lambda(n) + \frac{D}{n} \end{array} \right\} \quad (2.28)$$

donde $D \in (0, 1)$.

A medida que la optimización *DMF* avanza (el índice n aumenta) la variación de los pesos (D/n) decrece dando como resultado una optimización convergente de alta precisión.

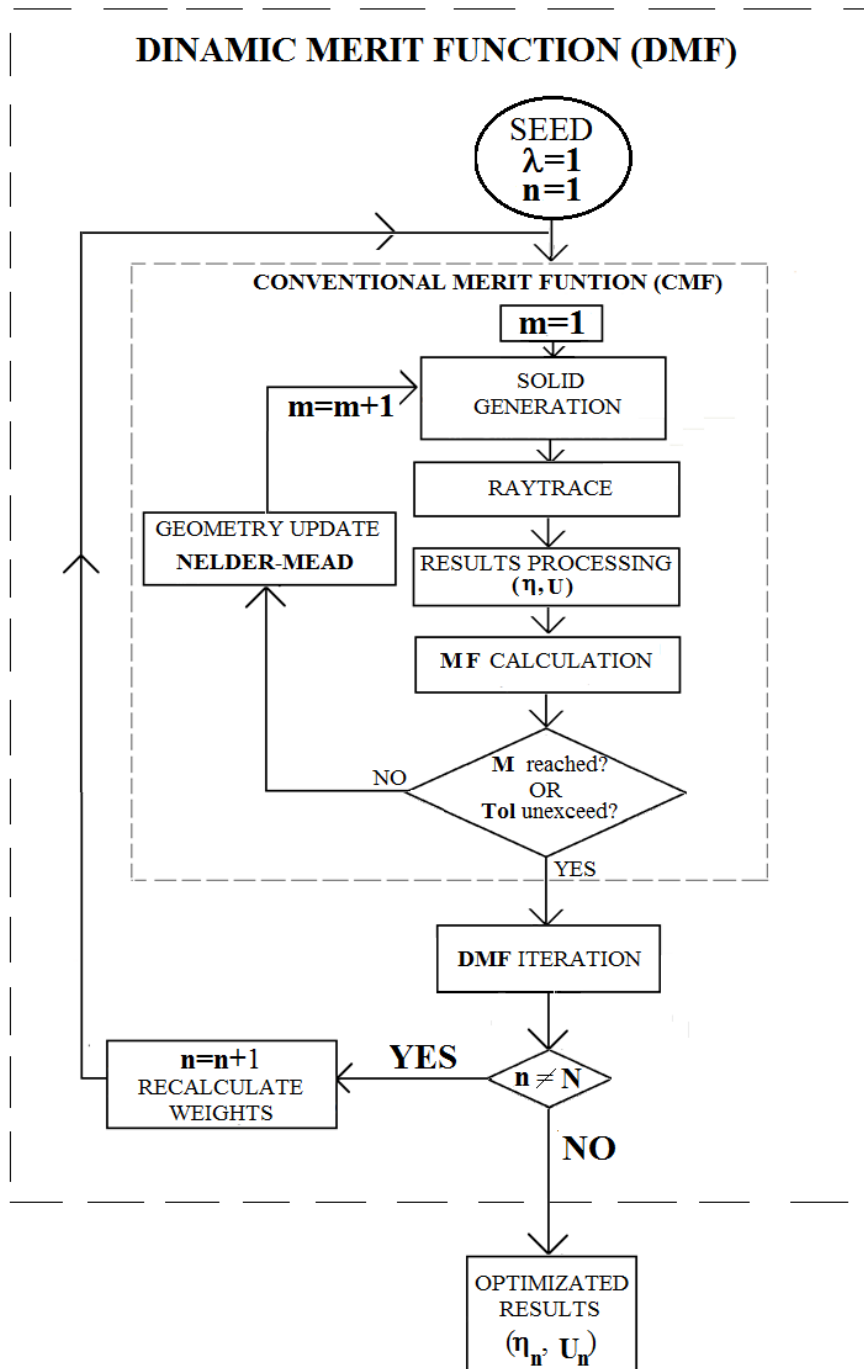


Figura 2.2: Diagrama de Flujo de DMF

2.2.2. Ejemplos de optimización de sistemas no formadores de imágenes

En esta sección se llevará a cabo un estudio comparando las funciones de mérito convencional y dinámica para analizar la efectividad de la técnica *DMF*, de esta manera la diferencia entre una optimización de pesos estáticos frente a esos mismos pesos de carácter dinámicos será presentada.

Para llevar a cabo este estudio se seleccionan los siguientes sistemas: **Lente de concentración, lente uniformizadora, Colimador LED de señalización y una luminaria plana de fuente LED**. Las lentes de concentración son típicamente dispositivos formadores de imagen pero en este capítulo la optimización que se lleva a cabo no persigue lograr una imagen precisa si no que busca una configuración óptima para aplicaciones de concentración de luz.

Las fuentes de luz empleadas para la lente de concentración es un patrón de $2 \cdot 10^5$ rayos colimados de distribución aleatoria, mientras que la fuente empleada para la lente uniformizadora, el Colimador LED de señalización y la luminaria LED cuenta con un modelo virtual de emisión de un LED Rebel Luxeon de InGaN de $5 \cdot 10^5$ rayos proporcionado por el fabricante.

Los objetivos de la optimización se miden en la pantalla del detector. La pantalla subtiende un ángulo de 5° para la lente de concentración y el Colimador LED, mientras que subtiende 60° para la lente uniformizadora y la luminaria LED. Las dimensiones de matriz empleada para procesar resultados son 512×512 pixels.

La contribución de los objetivos de la optimización a la *MF* deben de mantener un equilibrio en la medida de lo posible [21], la variación de los pesos sigue la relación lineal [ec. 2.24] que asegura el equilibrio de la contribución de los objetivos al ajustar el incremento de los pesos (D/n) dinámicamente [ec. 2.27]. Para el resto de optimizaciones de este capítulo se fija $D = 0.3$. Los parámetros de tolerancia de *CMF* se fijan según los siguientes valores: $TolFun=TolX=10^{-4}$.

El máximo de iteraciones de *DMF* se fija en $N = 3$, cada una de ellas equivalente a múltiples iteraciones de *CMF* (desde 60 iteraciones para la lente uniformizadora hasta más de 160 para la luminaria LED). El tiempo de ejecución requerido es proporcional al parámetro N ya que la optimización *DMF* requiere aproximadamente N veces el tiempo de ejecución de la optimización *CMF*. Este aumento del tiempo de ejecución merece la pena siempre que la optimización *DMF* alcance una mejora significativa de los objetivos respecto a *CMF*.

La mejora obtenida mediante el algoritmo DMF en comparación con CMF se medirá mediante las siguientes magnitudes:

$$\Delta\eta = (\eta_{DMF} - \eta_{CMF}), \quad \Delta U = (U_{DMF} - U_{CMF}), \quad (2.29)$$

donde η_{CMF} y U_{CMF} son los objetivos de Eficiencia y Uniformidad obtenidos al final de la optimización CMF (iteración M), equivalente a la primera iteración ($n=1$) del algoritmo DMF (fig. 2.2). Mientras que η_{DMF} y U_{DMF} son la Eficiencia y Uniformidad al final de la última iteración de DMF (iteración N).

La semilla de inicialización describe parte de los parámetros del algoritmo de optimización (numero máximo de iteraciones, precisión de la solución, etc) además de definir la primera configuración del sistema óptico. Dichos valores de inicialización tienen una gran repercusión en el sistema de optimización [22]. Si valores diferentes de inicialización conducen a resultados que difieren entre sí entonces una estrategia de múltiples re-inicializaciones será conveniente. Cada proceso de optimización presentado en este capítulo es precedido por un análisis de las variables iniciales de la configuración del sistema óptico. El tiempo de ejecución requerido en cada optimización determina si es más conveniente probar con una gran cantidad de valores iniciales o bien realizar una búsqueda más precisa de una semilla de inicialización óptima. La influencia del rango de valores de inicialización contemplados, con respecto al resultado obtenido, se especificará en cada optimización llevada a cabo.

2.2.2.1. Lente de concentración

En esta sección la optimización *DMF* se aplica a una lente biconvexa de concentración caracterizada por dos radios (R_1 , R_2), el índice de refracción n y el parámetro de espesor T (fig. 2.3). El índice de refracción del medio es $n'=1$ (aire).

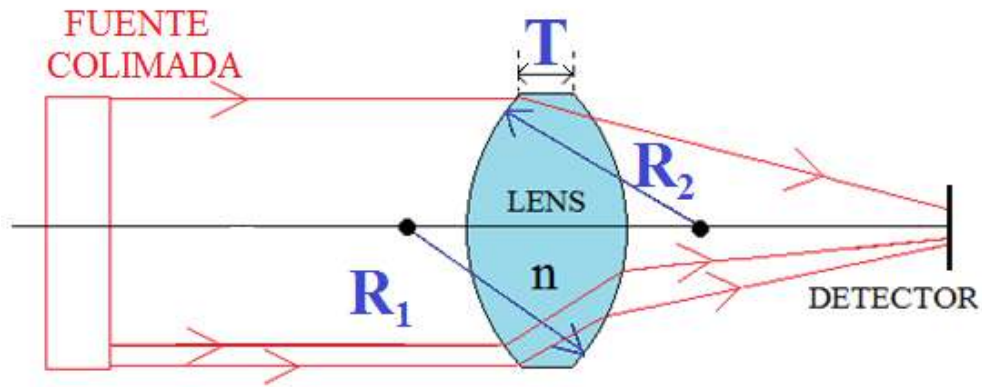


Figura 2.3: Lente de concentración. Parámetros de optimización R_1 , R_2 , T

El diseño de la lente de concentración está orientado a aplicaciones fotovoltaicas por tanto la magnitud de uniformidad no puede ser ignorada. Una distribución equilibrada en el haz de luz concentrado es conveniente para lograr una intensidad luminosa uniforme en el plano de la célula fotovoltaica [23]. La falta de uniformidad en una célula fotovoltaica puede producir una pérdida drástica de la eficiencia de conversión de energía solar a eléctrica [24]. Aunque una pérdida de uniformidad es inevitable si la lente de concentración reduce el área iluminada a una superficie menor que la del detector donde se calcula la uniformidad.

Para el proceso de optimización se eligen tres parámetros: R_1 , R_2 y T . El conjunto factible de soluciones está formado por los valores posibles, dentro de un intervalo restringido, de dichos parámetros. Los valores iniciales elegidos son $R_1=R_2=50\text{mm}$, $T=4\text{mm}$ y $n=1.59$ (Policarbonato). Este valor de la semilla se selecciona al ser el que conduce a unos resultados óptimos entre todos los puntos iniciales simulados. Dentro del rango de valores iniciales simulados los resultados obtenidos para la uniformidad varían en un 24% mientras que la variación relativa en eficiencia es del 5.6%. Es lógico que los resultados respecto a uniformidad muestren una mayor desviación relativa frente a la semilla de inicialización ya que el valor absoluto de este objetivo es menor que el de la eficiencia.

La optimización alcanza una solución óptima al final de la tercera iteración *DMF* (fig. 2.4), para esta configuración optimizada los parámetros finales son $R_1=92.9\text{mm}$, $R_2=409\text{mm}$, $T=1.2\text{mm}$. La optimización *DMF* aplicada a la lente de concentración biconvexa (descrita por 3 parámetros) alcanza una mejora del 13% de eficiencia junto con una ligera mejora del 1% (tabla 2.1) en comparación con la optimización *CMF*.

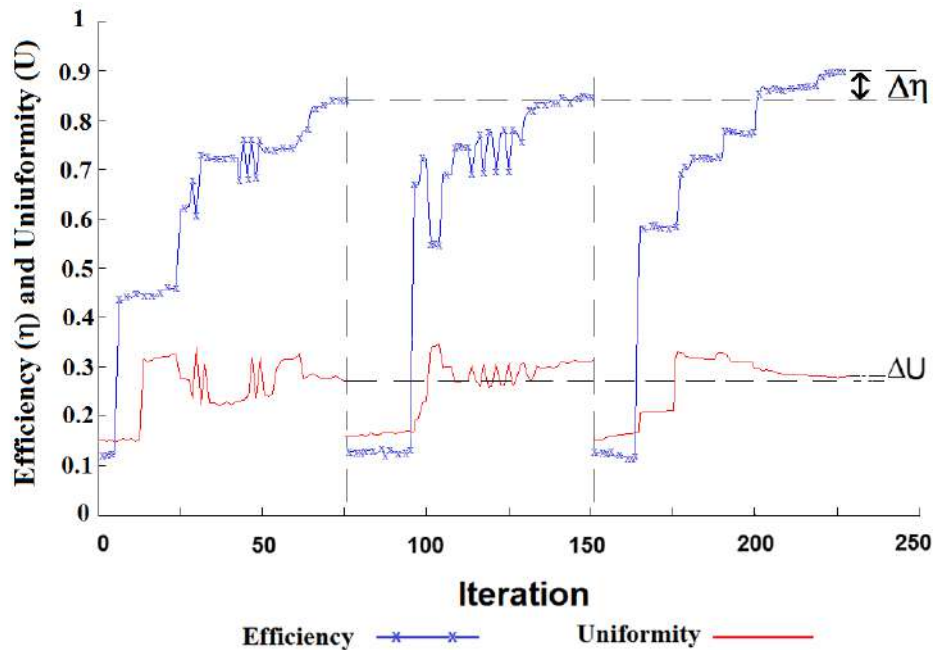


Figura 2.4: *DMF* aplicada a lente de concentración de 3 parámetros

Cada iteración de la *DMF* se delimita gráficamente mediante líneas verticales discontinuas (fig. 2.4). Si solo se hubiese ejecutado una única optimización *CMF* entonces el resultado final no habría alcanzado la solución óptima debido al efecto de un mínimo local en el espacio de variables de la función de mérito. La falta de capacidad de la optimización convencional para evitar los mínimos locales es precisamente la principal razón para desarrollar la técnica *DMF* la cual modifica el espacio de variables de la *MF* así como la distribución de los mínimos locales.

2.2.2.2. Lente uniformizadora de iluminación

La lente uniformizadora de iluminación es una geometría de revolución caracterizada por dos radios (R_1 , R_2), un parámetro de altura H , el espesor T , un ángulo de apertura α y el índice de refracción n (fig. 2.5). Las 3 primeras variables (R_1 , R_2 , H) serán seleccionados como parámetros de la optimización. Este dispositivo óptico se diseña para obtener un tipo de emisión “Batwing” que garantiza un elevado factor de uniformidad. Los valores iniciales de los parámetros son $R_1=R_2=50\text{mm}$ y $H=5\text{mm}$. El conjunto de puntos de inicialización simulado conllevan una variación relativa de la uniformidad del 16.2% y una variación de la eficiencia del 10.6%.

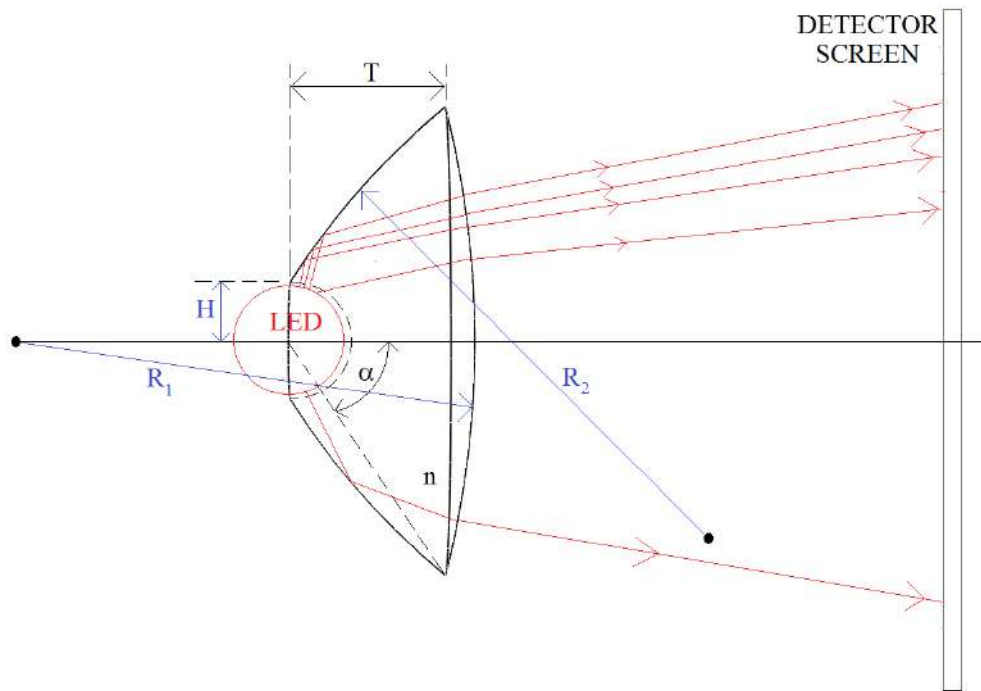


Figura 2.5: Lente uniformizadora. Parámetros de optimización R_1 , R_2 , H

Las lentes que ofrecen un patrón de emisión tipo “Batwing” a menudo se aplican en tareas de iluminación [25, 26], en las cuales no solo es importante obtener una emisión uniforme si no que además se requiere una transferencia de flujo eficiente [27]. La necesidad de reducir pérdidas y así obtener un sistema de iluminación eficiente es la principal razón para emplear, una vez más, la MF donde ambos objetivos están incluidos [ec. 2.23].

La optimización dinámica *DMF* demuestra su efectividad al incrementar la eficiencia cerca del 19.5% y la uniformidad un 9.5% (tabla 2.1) en comparación con la optimización *CMF* aplicada a la misma lente. La configuración final de la lente uniformizadora ($R_1=63.7\text{mm}$, $R_2=79.9\text{mm}$, $H=5.8\text{mm}$), alcanzada mediante *DMF* (fig. 2.6) depende no solo del valor de los pesos si no también de los valores iniciales de los parámetros. Dependiendo de la semilla de inicialización la optimización *DMF* puede tardar mas o menos iteraciones en alcanzar el resultado óptimo, mientras que los valores iniciales son especialmente relevantes en una optimización *CMF*, dado que su carácter invariable y su proximidad a un mínimo local pueden determinar la validez y efectividad de la optimización.

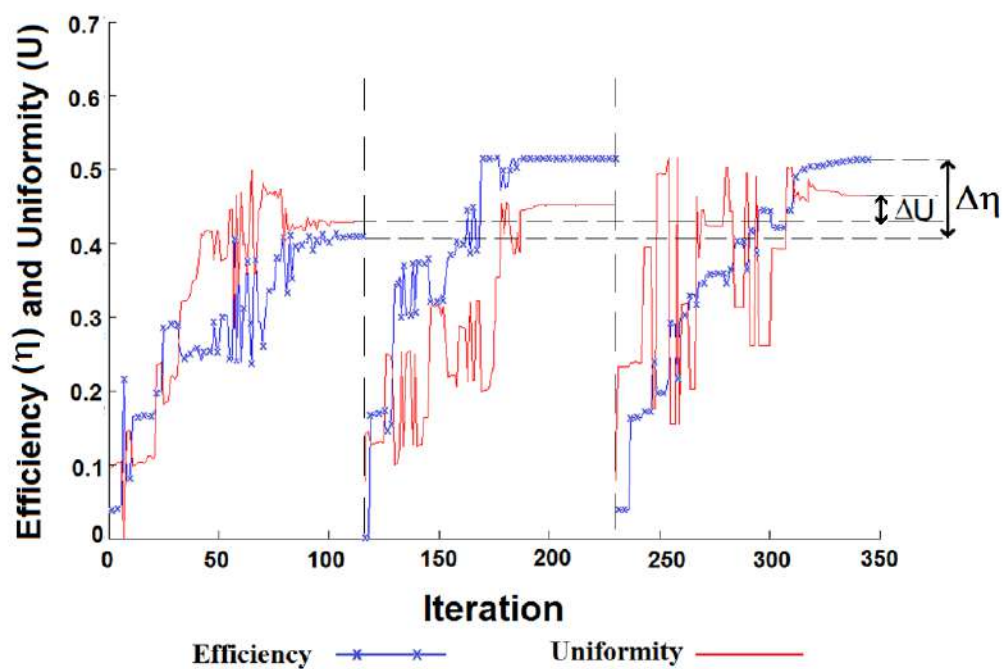


Figura 2.6: *DMF* aplicada a lente de uniformizadora de 3 parámetros

2.2.2.3. Colimador LED aplicado a señalización

Los colimadores LED aplicados a señalización se emplean habitualmente para orientar el flujo de las fuentes de luz en una determinada dirección dentro de sistemas ópticos más complejos, como por ejemplo en sistemas de balizamiento o luminarias LED. Estos sistemas de señalización se encuentran habitualmente bajo estrictos requisitos de eficiencia y uniformidad [28], por este motivo se volverá a emplear la *MF* que engloba los objetivos de uniformidad y eficiencia de la ecuación 2.23.

La geometría del modelo de colimador empleado en este apartado puede ser descrita por: el radio de acoplamiento al LED, r_1 ; los radios de entrada, r_2 , r_3 y r_4 ; el radio de la superficie TIR, r_5 ; el radio de salida, r_6 y la profundidad, D . El proceso de optimización considera tres parámetros: la profundidad D , y los radios r_5 y r_6 . El detector consistirá en un plano que subtende 3° desde el colimador y es en dicha superficie donde se evalúa la eficiencia y la uniformidad.

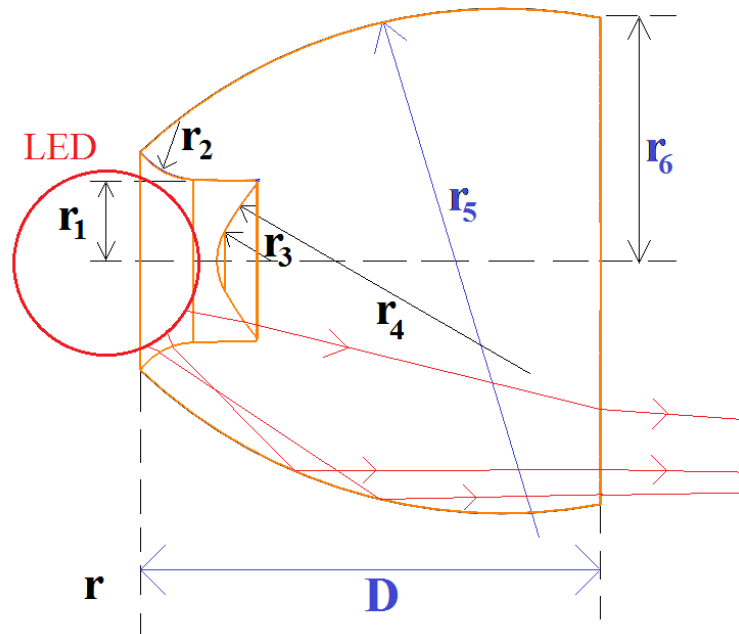


Figura 2.7: Colimador LED de señalización. Parámetros de optimización: D , r_5 y r_6

Los valores iniciales para los parámetros de optimización se fijan en $r_5=20\text{mm}$, $r_6=8\text{mm}$ y $D=15\text{mm}$. La optimización *DMF* del Colimador LED consigue una mejora de la eficiencia del $\Delta\eta = 13.6\%$ y la uniformidad de $\Delta U = 1.2\%$ (2.8), respecto a la optimización *CMF*. La configuración final concluye con los siguientes valores de los parámetros $r_5=17.3\text{mm}$, $r_6=9.3\text{mm}$ y $D=12.3\text{mm}$.

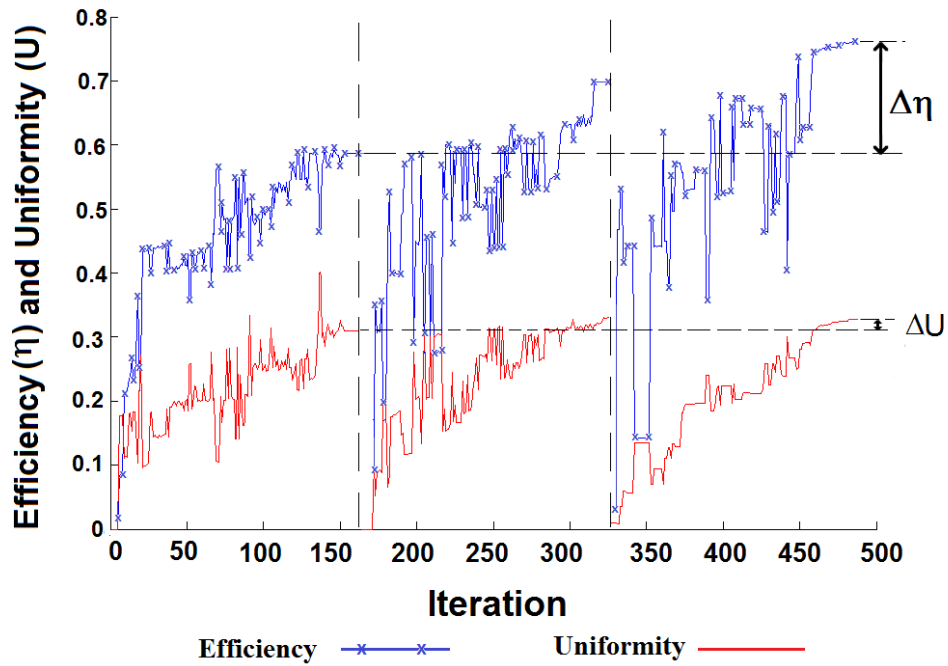


Figura 2.8: Optimización DMF aplicada a Colimador LED de señalización de 3 parámetros

2.2.2.4. Luminaria plana de tecnología LED

La optimización dinámica se aplica ahora a una luminaria plana de fuente LED que es un sistema considerablemente más complejo que los analizados previamente. Este tipo de dispositivos ha sido ampliamente sometido a optimizaciones para mejorar tanto su configuración como su ubicación [29, 30]. La luminaria estudiada en este apartado está compuesta por el colimador LED (optimizado en anterior apartado) de profundidad D , unido a un conducto escalonado en su superficie superior que refleja la luz a una matriz de distribución (basada en micro reflectores TIR), cuyos reflectores se caracterizan por el radio de entrada R , el radio de curvatura R_c , el ángulo de aceptación θ_1 , y el ángulo de emisión θ_2 (fig. 2.9). Entre estos parámetros se eligen D , R , θ_1 y θ_2 , como parámetros de la optimización. Los valores iniciales para los parámetros de la luminaria son: $D=12.3\text{mm}$, $R=2\text{mm}$, $\theta_1=\theta_2=12^\circ$. El conjunto de puntos de inicialización tenidos en cuenta implican una variación en los resultados de uniformidad del 36.2% y de la eficiencia del 12.8%.

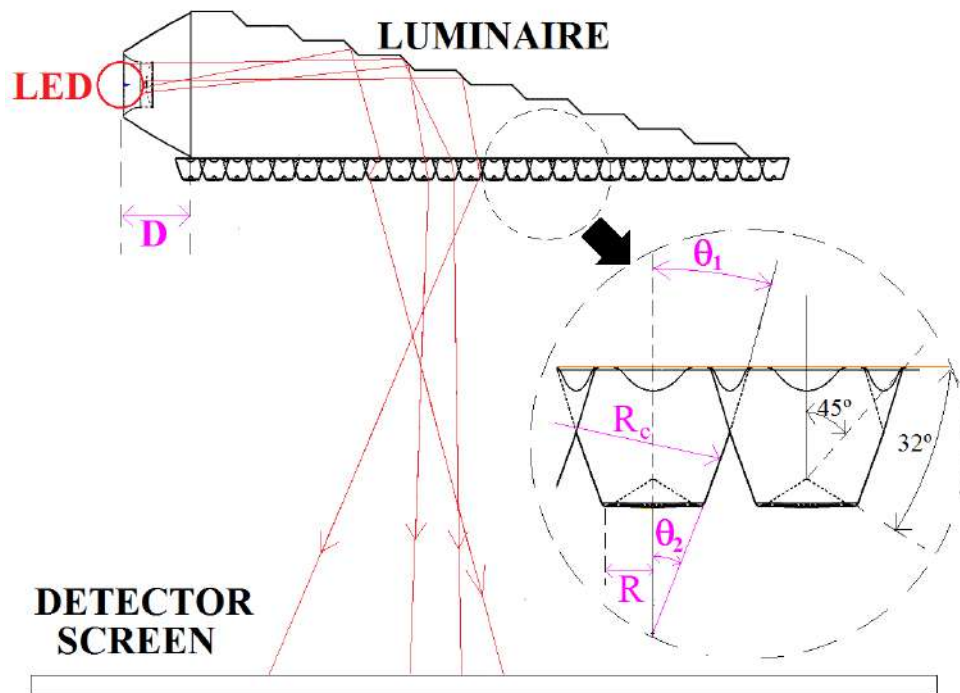


Figura 2.9: Luminaria LED. Parámetros de optimización D , R , θ_1 , θ_2

Los resultados de la optimización (fig. 2.10) muestran una gran mejora ($\Delta\eta=25\%$, $\Delta U=6\%$) comparados con los de la optimización CMF . Estos resultados sugieren que la optimización DMF es adecuada para sistemas ópticos complejos, pero esta hipótesis se confirmará más adelante. Los parámetros de la optimización alcanzan los siguientes valores finales: $D=10.4\text{mm}$, $R=1.1\text{mm}$, $\theta_1=15.3^\circ$, $\theta_2=21.4^\circ$

También se aprecia que la oscilación de los objetivos aumenta a medida que el peso asociado al correspondiente objetivo decrece (fig. 2.10). Esto es debido a que la influencia de dicho objetivo en la función de mérito se reduce y por tanto las oscilaciones del mismo se hacen menos relevantes en cuanto a su contribución a la MF ya que están moduladas por el peso de menor valor. En cambio el objetivo con el mayor peso asociado consigue una mayor influencia en la función de mérito y por tanto sus fluctuaciones se reducen ya que supondría un cambio brusco en la MF .

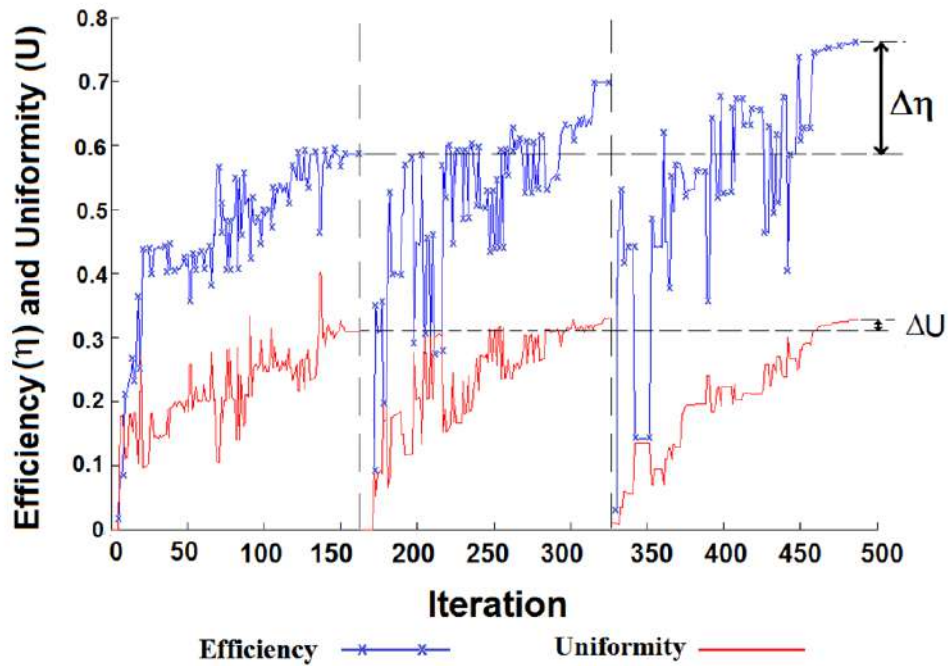


Figura 2.10: *DMF* aplicada a luminaria LED de 4 parámetros

Resultados de *DMF* para sistemas no formadores de imagen.

Los resultados de la optimización *DMF* aplicada a los sistemas no formadores de imágenes se muestran en la tabla 2.1. Se observa que la optimización *DMF* mejora simultáneamente la uniformidad y la eficiencia, con respecto a la optimización convencional *CMF*, para la mayor parte de los sistemas estudiados.

Sistema	$\Delta\eta$	ΔU
Lente de concentración (3 parámetros)	13.6 %	1 %
Lente uniformizadora (3 parámetros)	19.5 %	9.5 %
Colimador LED de señalización (3 parámetros)	13.6 %	1.2 %
Luminaria plana de fuente LED (4 parámetros)	24.3 %	6.1 %

Tabla 2.1: Resultados *DMF* sistemas no formadores de imágenes

2.2.3. Dependencia de la optimización DMF del número de parámetros

El éxito del proceso de optimización de un sistema óptico depende de diversos factores, algunos de ellos están relacionados con el espacio de variables que define la geometría del sólido que se va a optimizar. El número de mínimos locales en el espacio de variables de la función de mérito suele ser proporcional a la complejidad del sistema óptico, por tanto al incrementar el número de parámetros de la geometría se aumentan las probabilidades de que la geometría optimizada no sea una solución óptima global, sino que se establezca en un mínimo local.

Para analizar el efecto del número de parámetros en los resultados de la optimización se aplicará el método *DMF* a un mismo sistema descrito por diferente número de parámetros. En este apartado la optimización se aplicará a algunos de los sistemas previamente descritos: Lente de concentración, Colimador LED de señalización y Luminaria plana LED.

En primer lugar la lente de concentración se optimiza considerando 2 configuraciones diferentes: una descrita por dos parámetros: R_1 y T ; y otra de tres parámetros, R_1 , R_2 y T (fig. 2.3).

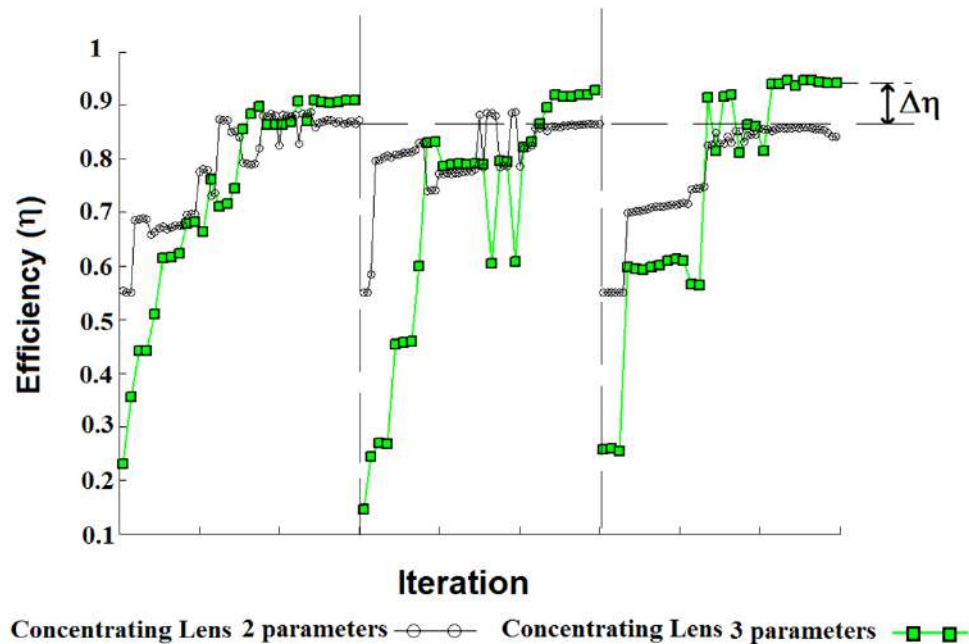


Figura 2.11: *DMF* aplicada a lente concentradora de 2 y 3 parámetros

Se puede observar (fig. 2.11) que la lente de concentración no alcanza mejoras significativas (comparada con la optimización *CMF*) si la optimización se aplica sobre 2 parámetros. Aunque estos resultados dependen, como en el resto de dispositivos estudiados, de la semilla de inicialización. Por otra parte la optimización *DMF* aplicada a la lente de 3 parámetros muestra una mejora notable ($\Delta\eta=16\%$).

A continuación se optimizará de nuevo el sistema colimador de fuentes LED (fig. 2.7). En esta ocasión las optimizaciones *DMF* serán llevadas a cabo dependiendo del número de parámetros que describen el colimador: la primera optimización considerará dos parámetros, profundidad D y el radio R_2 ; la segunda optimización elegirá tres parámetros entre los que caracterizan la geometría del solido, la profundidad D y los radios R_2 y R_3 (fig. 2.7).

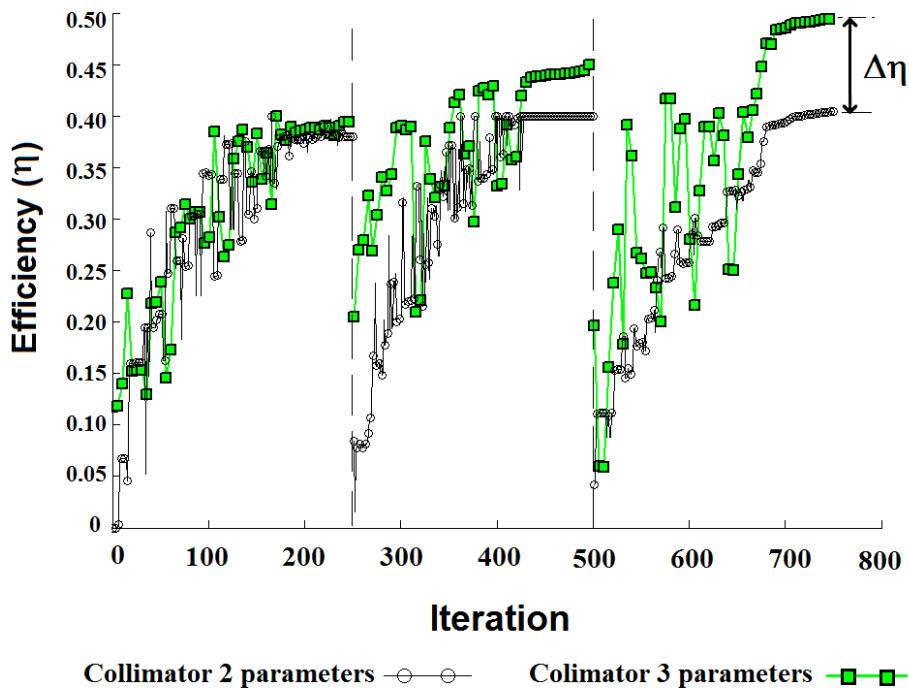


Figura 2.12: Colimador LED. 2 y 3 parámetros: D , R_2 y R_3

La optimización aplicada al colimador de 2 parámetros obtiene resultados similares sin importar el cambio de pesos en cada optimización *CMF* (fig. 2.12). Sin embargo los resultados obtenidos con el método *DMF* aplicado al mismo colimador pero añadiendo un grado de libertad a su geometría (3 parámetros) muestran (fig. 2.12) una notable mejora en términos de eficiencia $\Delta\eta=22.4\%$ (tabla 2.2) respecto la optimización *CMF* que equivale a la primera optimización de *DMF*.

La optimización *DMF* aplicada al colimador de 3 parámetros mejora la optimización inicial de pesos estáticos, ya que esta primera optimización (*CMF*) se estabiliza en un mínimo local de la *MF* debido a la mayor complejidad del espacio de variables comparado con el colimador de 2 parámetros.

Finalmente se retoma la luminaria LED considerando una optimización 2 y 3 parámetros y se comparan los resultados con la optimización previamente ejecutada de la luminaria (4 parámetros). La optimización de la luminaria de 2 parámetros selecciona la profundidad del colimador D y el radio del micro reflector R como parámetros de optimización, la optimización de tres parámetros tiene también en cuenta el ángulo de emisión θ_2 (fig. 2.9). La representación gráfica de la optimización de 3 parámetros no se muestra en la figura 2.13 porque la gran cantidad de oscilaciones de las tres curvas superpuestas dificultaría el discernimiento de cada una individualmente.

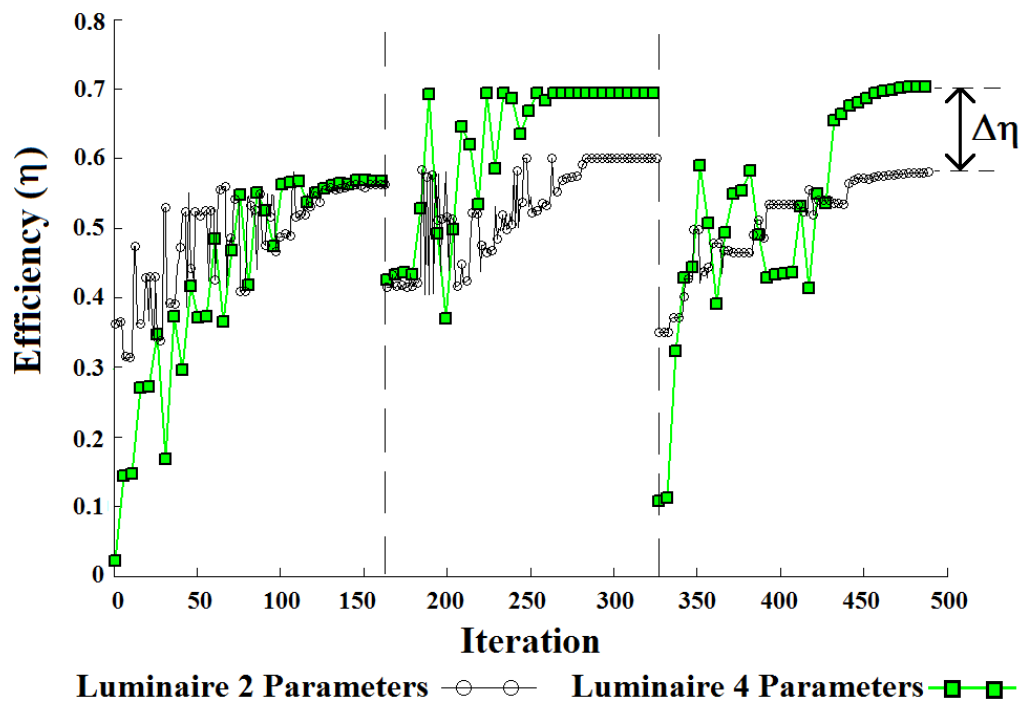


Figura 2.13: *DMF* aplicada al luminaria LED de 2 y 4 parámetros

La optimización *DMF* aplicada a una luminaria de 4 parámetros (fig. 2.13) obtiene mejores resultados, $\Delta\eta=24.3\%$ y $\Delta U=4.1\%$, comparados con la optimización *CMF* (primera iteración de la *DMF*), debido a la mayor complejidad de la geometría de la luminaria de 4 parámetros que genera una mayor densidad de mínimos locales en el espacio de la *MF*.

Resultados de la optimización DMF respecto al número de parámetros.

Sistema	$\Delta\eta$	ΔU
Lente de concentración (2 frente a 3 parámetros)	16 %	0.5 %
Colimador (2 frente a 3 parámetros)	22.4 %	-11.3 %
Luminaria LED (2 frente a 3 parámetros)	6.1 %	2.1 %
Luminaria LED (2 frente a 4 parámetros)	24.3 %	4.1 %

Tabla 2.2: Resultados DMF sistemas no formadores de imágenes en función de los parámetros de su geometría

Estos resultados obtenidos (tabla 2.2) corroboran la hipótesis de que la optimización DMF es adecuada para sistemas ópticos complejos cuya geometría se describe con un mayor número de parámetros y para los cuales la optimización convencional puede encontrar limitaciones debido a la presencia de mínimos locales. El potencial de la técnica de optimización DMF es prometedor aplicado a diseños ópticos complejos en los que una ligera mejora (del orden del 10 %) supone un valor diferencial y conduce a un producto más competitivo.

Bibliografía

- [1] D. Gagnon, J. Dumot, L. J. Dubé “Multiobjective optimization in integrated photonics design” *Optics Letters*, Vol. 38, Issue 13, pp. 2181-2184 (2013)
- [2] M. P. Wachowiak, R. Smolikova, J. M. Zurada, A. S. Elmaghraby “An approach to multimodal biomedical image registration utilizing particle swarm optimization” *Evolutionary Computation, IEEE Transactions*, Vol.8 , Issue 3 (2004)
- [3] R. Horst, P. M. Pardalos, H. E. Romeijn “Handbook of global optimization” Kluwer Academic Publishers (2002)
- [4] P. E. Gill, W. Murray, M.A. Saunders “SNOPT: An SQP Algorithms for large-scale constrained optimization” *Slam Review* (2005)
- [5] D. Erni, D. Wiesmann, M. Spuhler, E. Moreno “Aplication of evolutionary optimization algorithms in computational optics” *ACES Journal: Special Issue on Genetics Algorithms* (2000)
- [6] N. León, H. Aguayo, H. García, A. Anaya “Computer aided optimization of passive tracking solar concentration fresnel lens” *IFIP Advances in Information and Communication Technology* Vol. 355, pp 57-70 (2011)
- [7] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, W. T. Vettering “Numerical Recipes in C” Cambridge University Press, Cambridge, UK, (1988)
- [8] Thomson Reuters, Web of Knowledge, Cited Reference Search.
- [9] R. J. Koschel “Simplex optimization method for illumination system design” *Opt. Lett.* 30, 649 (2005).
- [10] W. J. Cassarly, M. J. Hayford “Illumination optimization: the revolution has begun” *Proc. SPIE* 4832, 258–269 (2002)

- [11] Tracepro software, <http://www.lambdares.com/>
- [12] Lighttools software, <http://www.opticalres.com/>
- [13] W. J. Cassarly “Illumination merit functions” Proc. SPIE, vol. 6670, pp. 142–154 (2007)
- [14] J. R. Koshel, “Aspects of Illumination system optimization” Proc. SPIE 5529, 206–217 (2004)
- [15] Z. Gao, Y. Wang, G. Gioia, A. M. Cuitiño “A global approach for digital speckle correlation” Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics (2002)
- [16] J. R. Koshel “Simplex optimization method for illumination design” Optics Letters, vol. 30 (6), pp. 649- 651, (2005)
- [17] Y. Jin, T. Okabe, B. Sendhoff “Adapting Weighted Aggregation for Multiobjective Evolution Strategies” Proceedings of the Evolutionary Multi-criterion Optimization Conference, EMO, pp. 96 -110, (2001)
- [18] X. Luo, H. Liu, Z. Lu, Y. Wang “Automated optimization of an aspheric light-emitting diode lens for uniform illumination” Applied Optics, vol. 50 (20), pp. 3412-3418 (2011)
- [19] R. J. Koshel “Fractional Optimization of illumination optics” proceedings of SPIE, vol. 7061, Novel optical systems design and optimization XI, (2008)
- [20] J. C. Lagarias, J. A. Reeds, M. H. Wright, P. E. Wright “Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions” SIAM J. Optim., vol. 9(1), pp. 112–147 (1998)
- [21] N. E. Shatz, J. C. Bortz, “Optimal design of a nonimaging TIR doublet lens for an illumination system using an LED source” SPIE Proc. of Nonimaging Optics and Efficient Illumination Systems I, vol. 8 (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (2004)
- [22] M. Gilli, E. Schumann “A note on ‘good starting values’ in numerical optimization” COMISEF Working papers series. (2010).

- [23] R. Kwangsun, R. Jin-Geun, P. Kang-Min, K. Jeong “Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system” *Solar Energy*, Vol. 80, Issue 12, pp.1580-1587 (2006)
- [24] R. Winston, J. C. Miñano, P. Benitez “Nonimaging Optics” ELSEVIER Academic Press, pp. 319-324 (2005)
- [25] G. ISPAS “A theoretical comparison between batwing and lambertian distributions of power LEDs related to an interior lighting system” *Advances in Environmental Technology and Biotechnology* (2014)
- [26] “The IESNA Lighting Handbook, Reference & applications” IESNA 9th ed. pp. 480-490, (2000).
- [27] R. Katzev “The Impact of Energy-Efficient Office Lighting Strategies on Employee Satisfaction and Productivity” *Environment and Behavior*, Vol. 24 no. 6 pp.759-778 (1992)
- [28] Mario González Montes, Antonio A. Fernandez-Balbuena, Eusebio Bernabeu “Beacon system based on light-emitting diode sources for runways lightin” *Opt. Eng.* 53(6), 066104 (2014)
- [29] S. H. Shikder, M. M. Mourshed, A. D. Price “Luminaire position optimisation using radiance based simulation: a test case of a senior living room” *Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering* (2010)
- [30] s. Kudaev, P. Schreiber “Automated optimization of non-imaging optics for luminaires” *Proc. SPIE 5962, Optical Design and Engineering II*, 59620B (2005)

Capítulo 3

Diseños ópticos aplicados al aprovechamiento de energía solar

La energía solar se conoce como toda aquella energía que deriva directamente del Sol y que por su naturaleza presenta multitud de ventajas respecto otras fuentes de energía. Entre estas ventajas destacan:

- La energía solar es un recurso prácticamente ilimitado y disponible en prácticamente cualquier localización por aislada que esta sea.
- Los costes asociados a su aprovechamiento son reducidos ya que se limitan a los componentes e instalación.
- Es una energía limpia y no contaminante, ya que no genera residuos, reduce el ruido y la emisión de gases de efecto invernadero, típicamente asociados a las fuentes de energía convencionales.

Sin embargo el Sol presenta una serie de características que condicionan el diseño de los sistemas ópticos que aprovechan su radiación como fuente de luz. Las características de emisión solar, así como sus variaciones temporales y espaciales, han de ser estudiadas en detalle para llevar a cabo el desarrollo los diversos dispositivos ópticos solares que componen este capítulo. De este modo se presenta un modelo matemático de emisión solar que será empleado en el proceso de diseño y aplicado en las distintas simulaciones de los dispositivos ópticos solares desarrollados en este capítulo.

También se detallan las características del espectro de radiación solar y los fenómenos principales que lo modulan, de manera que es posible cuantificar la contribución de energía disponible al nivel del mar respecto a su longitud de onda. De este modo se puede caracterizar el comportamiento de las aplicaciones solares en las que la dispersión cromática es un factor crítico (Sección 3.2). Además se presenta un modelo matemático que predice la posición solar aparente para un observador terrestre. Este modelo será útil para caracterizar el comportamiento de las aplicaciones solares cuyo rendimiento ha de ser analizado temporalmente (Sección 3.3)

El Grupo Complutense de Óptica Aplicada **AOCG** del departamento de Óptica de la Universidad Complutense de Madrid ha colaborado en el ámbito de proyectos de investigación orientados a la concentración y iluminación solar con empresas como “Abengoa Solar” o “Lledó”. Fruto de dicha colaboración se establece una línea de trabajo que determina parte de las aplicaciones presentadas en este capítulo.

A lo largo de este capítulo se analizarán distintas aplicaciones ópticas cuya fuente de luz común de luz es el Sol. Este tipo de sistemas, que hacen uso controlado de este recurso energético, son en su inmensa mayoría no formadores de imágenes (sección 1.4). Las aplicaciones ópticas que se muestran en este capítulo se puede dividir en dos grupos principales según su funcionalidad:

- **Concentradores solares.**

Tradicionalmente los sistemas concentradores han sido diseñados como ópticas focalizadoras principalmente mediante espejos parabólicos o lentes de Fresnel. Sin embargo en las últimas décadas los sistemas anidólicos han emergido como opción óptima para el diseño de concentradores [1, 2, 3]. Estos sistemas están diseñados para maximizar la energía solar transferida a un receptor que normalmente consiste en una célula fotovoltaica.

La óptica anidólica aplicada al diseño de concentradores ha logrado alcanzar prácticamente el límite teórico de concentración solar dictado por la segunda ley de la termodinámica que establece un factor de $C_{max} = 46000$ para una célula plana de una sola cara [4]. Este límite de concentración también puede deducirse por medio del concepto de Étendue, sin más que substituir la apertura angular del Sol $\theta = 0.265^\circ$ en la ecuación del factor máximo de concentración [ec. 1.16] para un sistema en contacto con el aire $n = 1$.

El gran potencial de la óptica anidólica en términos de factor de concentración, imposible de alcanzar en la práctica por sistemas formadores de imágenes, se debe principalmente a que el diseño apropiado de los sistemas anidólicos logra reducir el número de reflexiones a la vez que permite una filtración angular selectiva de la luz incidente seleccionando la radiación más eficiente para el sistema óptico.

Los sistemas de concentración solares han de considerar detenidamente los efectos cromáticos ya que el rango espectral sobre el que actúan puede extenderse por todo el espectro solar, como posteriormente se comprobará en las aplicaciones de lentes acromáticas (Sección 3.2).

■ **Sistemas de iluminación natural.**

Los sistemas de iluminación natural distribuyen la luz solar en determinadas zonas de interés, en la mayoría de los casos con unos niveles de intensidad específicos, mientras bloquean la luz incidente en otras que no precisan iluminación. Los sistemas de iluminación natural a menudo integran concentradores de luz solar (descritos en el anterior punto) que llevan a cabo una función de captación de luz o de acoplamiento y transporte dentro del sistema de iluminación.

Una gran variedad de sistemas y dispositivos de iluminación natural se han venido desarrollando ininterrumpidamente durante los últimos diez años [5], como una forma de aplicar el uso de tecnología al aprovechamiento de la energía solar. Se han planteado diferentes enfoques para este propósito basados en el principio físico de la propagación de la luz incluyendo: scattering y diffusion [6], reflexión especular [7], reflexión total interna, refracción y reflexión [8].

Para sistemas ópticos orientados a la iluminación el espectro visible es la contribución más importante dentro de la energía radiada por el Sol, si bien las propiedades del resto del espectro solar pueden contribuir a los efectos beneficiosos de un sistema de iluminación natural. El hecho de restringir los principales requisitos de iluminación (niveles mínimos, uniformidad, deslumbramiento) al espectro visible reduce sensiblemente las aberraciones cromáticas diseñando sistemas de comportamiento más estable.

3.1. Radiación Solar

El Sol es la estrella mas cercana a la Tierra y la mayor del Sistema Solar alrededor de la cual gira nuestro planeta recorriendo una órbita elíptica. La radiación solar constituye la mayor fuente de energía renovable a nuestro alcance (genera al anualmente 4500 veces la energía que se consume en la Tierra) y su calor y luz favorecen la vida en la Tierra. Otras formas de energía renovable, como el viento, las olas o la biomasa son simplemente manifestaciones indirectas de la radiación solar.

La energía solar llega a la superficie de la Tierra por medio de dos vías diferentes: radiación directa, que como su propio nombre indica consiste en los rayos que iluminan directamente los objetos y puede ser empleada como fuente de luz para sistemas de concentración e iluminación; o bien radiación indirecta o difusa, que se produce por reflexión de la radiación absorbida por el aire y el polvo atmosférico y típicamente es aprovechada por aplicaciones fotovoltaicas (PV).

La luz solar es policromática y el espectro que incide en la atmósfera terrestre está dividido en cinco regiones de orden decreciente de longitud de onda:

- Ultravioleta (UVC) que cubre el rango de longitudes de onda de 100nm a 280nm. Es invisible al ojo humano y solo una pequeña parte llega a la superficie de la Tierra.
- Ultravioleta B (UVB) que se extiende entre 280nm y 325nm, y es también absorbida en gran parte por la atmósfera.
- Ultravioleta A (UVA) que va de los 315nm a los 400nm.
- Rango visible o luz que comprende las longitudes de onda entre los 400nm y 700nm.
- Rango Infrarrojo (IR) que se extiende entre 700nm y $1\mu\text{m}$.

La atmósfera no es transparente si no que afecta a la radiación solar por medio de dos mecanismos principalmente, dispersión (scattering) y absorción. Dentro del fenómeno de dispersión se puede distinguir entre dispersión selectiva (Rayleigh) y no selectiva. La dispersión Rayleigh afecta sobre todo a las longitudes de onda corta, siendo el ángulo de dispersión proporcional al inverso de la longitud de onda a la cuarta potencia ($\sim \lambda^{-4}$). El color azul del cielo es debido a este efecto ya que el rango del azul está dentro del visible que se ve afectado por este tipo de dispersión.

ESPECTRO DE RADIACIÓN SOLAR

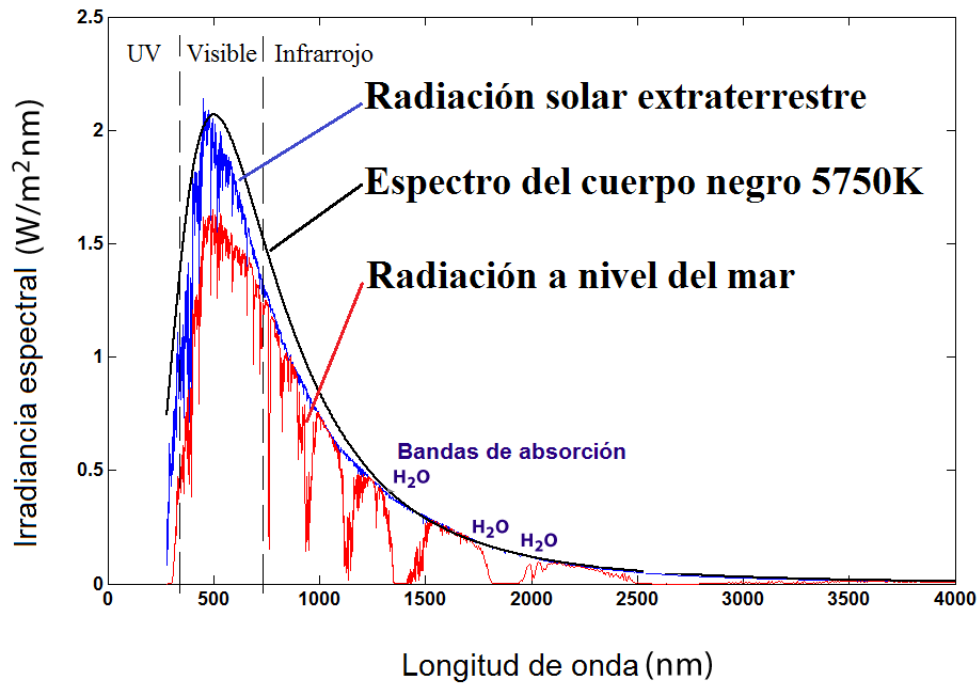


Figura 3.1: Espectro solar

La dispersión no selectiva tiene lugar cuando las partículas que interactúan con la luz son mucho mayores que las longitudes de onda de la misma, por ejemplo las gotas de agua de determinadas dimensiones (entre 5mm y 100mm de diámetro) que dispersan por igual todas las radiaciones en las regiones visible e IR cercano y medio. Este tipo de dispersión afecta indistintamente al espectro visible y es la causante del color blanco de las nubes (al dispersar la radiación roja, verde y azul).

Por otro lado en el fenómeno de absorción existe una transferencia de energía entre la radiación y las partículas de la atmósfera, esto implica la absorción de unas determinadas longitudes de onda dependiendo de la naturaleza del constituyente atmosférico (agua, ozono o dióxido de carbono principalmente) ya que los átomos de estas sustancias son excitados por la radiación electromagnética y los electrones corticales absorben la energía de los fotones alcanzando niveles orbitales superiores. Esto implica que la atmósfera se comportará de una forma opaca para determinados rangos espectrales mientras que ofrecerá ventanas libres para otros.

Se observa (fig. 3.1) que la mayor contribución a la energía radiada por el Sol que se recibe a nivel del mar concuerda con los efectos de dispersión y absorción descritos anteriormente. Siendo mayores las pérdidas respecto a la radiación fuera de la atmósfera para longitudes de onda corta (dispersión) y evidenciándose bandas de absorción correspondientes a cada constituyente atmosférico (H_2O , CO_2 , etc.).

También se observa (fig. 3.1) que la forma del espectro solar se puede aproximar por la radiación del cuerpo negro a la temperatura de 5750K aproximadamente, teniendo en cuenta que la intensidad (energía por unidad de área y unidad de tiempo) por unidad de longitud de un cuerpo negro a la temperatura absoluta T y para una longitud de onda fija λ viene dada por la ley de Planck:

$$\frac{dW_\lambda}{df} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right)}, \quad (3.1)$$

donde h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz en el vacío y k es la constante de Boltzmann.

3.1.1. Modelo de iluminación solar

La luz solar es un recurso natural esencial, fácilmente accesible y prácticamente inagotable que tiene la característica de variar en intensidad e incidencia tanto temporal como espacialmente. El grado de variación de la luz solar puede ser un factor deseable, tolerado o una desventaja según el uso particular del que sea objeto el diseño óptico. Para describir el comportamiento temporal y espacial de la emisión del Sol y abordar el diseño de los sistemas anidólicos apropiadamente es necesario conocer unas características fundamentales del Sol como fuente radiante:

- La apertura angular de la radiación solar es muy pequeña (confinada a un cono apertura angular $\theta = 0.265^\circ$) y por ello el máximo de concentración posible para la energía solar es muy alto [ec.1.16].
- La rotación de la Tierra sobre su eje, así como el recorrido de su órbita elíptica alrededor del Sol, produce una trayectoria aparente del Sol para un observador en la superficie terrestre. La variación de la posición aparente se puede describir, en coordenadas esféricas, mediante un ángulo azimutal a_s , el ángulo de altura solar, a_t , y la distancia promedio al Sol $R = 1.5 \cdot 10^8$.

- En las últimas décadas se han desarrollado diversos estándares [9, 10] y bases de datos que recogen información sobre el espectro solar fuera de la atmósfera y en la superficie terrestre para distintas condiciones como luz directa, difusa y global. A partir de estos datos se derivan la constante de irradiación solar $K = 1353 \text{ W/m}^2$ que representa la energía que llega al exterior de la atmósfera terrestre sobre una superficie perpendicular a los rayos solares.

En base a estos parámetros, previamente descritos, se puede desarrollar un modelo de iluminación solar que permita describir la posición y características radiantes del Sol a lo largo del año.

Primero definiremos los ángulos de incidencia, tanto azimutal, a_s como el ángulo de altitud o altura solar, a_t , en coordenadas esféricas horizontales (fig. 3.2). Las coordenadas horizontales tienen como plano de referencia el horizonte del observador. Tales coordenadas permiten ubicar la posición aparente de un astro para un observador cualquiera situado a una latitud y longitud dadas para un instante de tiempo concreto.

Se presentará la relación que liga los ángulos azimutal y de altura solar con el momento concreto del año para el cual se obtiene dicha incidencia. La posición aparente de Sol es una función de la latitud y longitud del lugar geográfico estudiado, el día del año y la hora local. La localización geográfica viene especificada por la longitud L y la latitud l . (En el caso de Madrid la latitud es $40^\circ 24''$ y la longitud $-3^\circ 41''$). Todos los ángulos se expresan grados a menos que se especifique lo contrario.

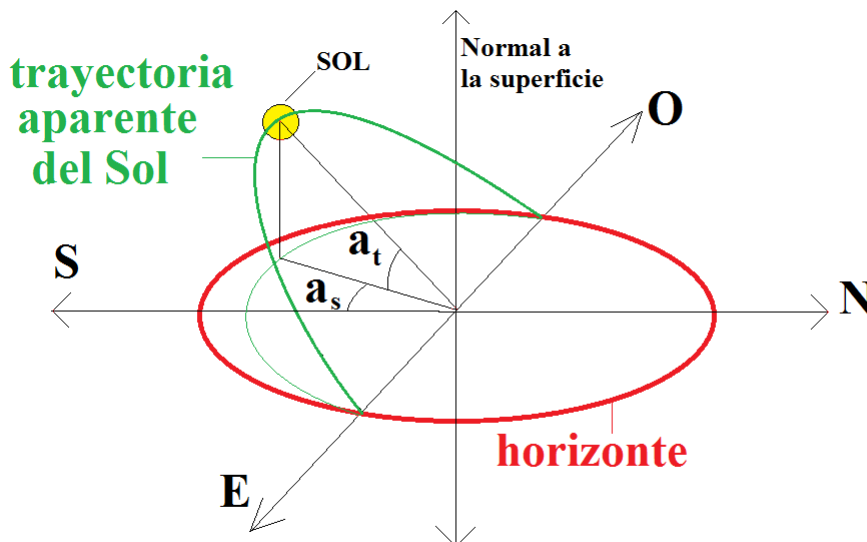


Figura 3.2: Coordenadas esféricas horizontales. Modelo solar

El modelo solar establece su variación temporal respecto al concepto de tiempo solar. El tiempo solar es una medida del tiempo en función del movimiento aparente del Sol sobre el horizonte del lugar geográfico estudiado. El mediodía solar coincide con el instante en el que el Sol traza un ángulo azimutal nulo y alcanza su máxima altura solar, de este modo las longitudes de las sombras que produce son mínimas ya la proyección del objeto en el eje azimutal coincide con el meridiano local.

La hora solar se calcula hallando su desviación respecto a la hora civil o estándar debido a la órbita elíptica de la tierra y la declinación de su eje. Para calcular dicha desviación se corrige la longitud de la localización geográfica dentro de la franja horaria:

$$DT = \frac{\Delta L}{15} - ET, \quad (3.2)$$

donde ΔL es la diferencia, expresada en minutos de arco, entre la longitud geográfica (meridiano local) del punto considerado y el meridiano estándar que sirve de referencia para la zona horaria. En España dicho meridiano es el meridiano 0° o meridiano de Greenwich.

ET hace referencia a la diferencia entre el tiempo solar medio y el tiempo solar aparente.

$$ET = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B), \quad (3.3)$$

donde $B = \frac{360(J-81)}{364}$ y J es la fecha juliana (Julian date) de 1 a 365.

De esta forma la desviación de la hora solar, t_s , respecto a la hora estándar, t , queda determinada por la curva de la figura 3.3. Además se aplicará el factor de corrección C (1 hora de abril a octubre ó 2 el resto del año) $t_s = (t - C) + DT$.

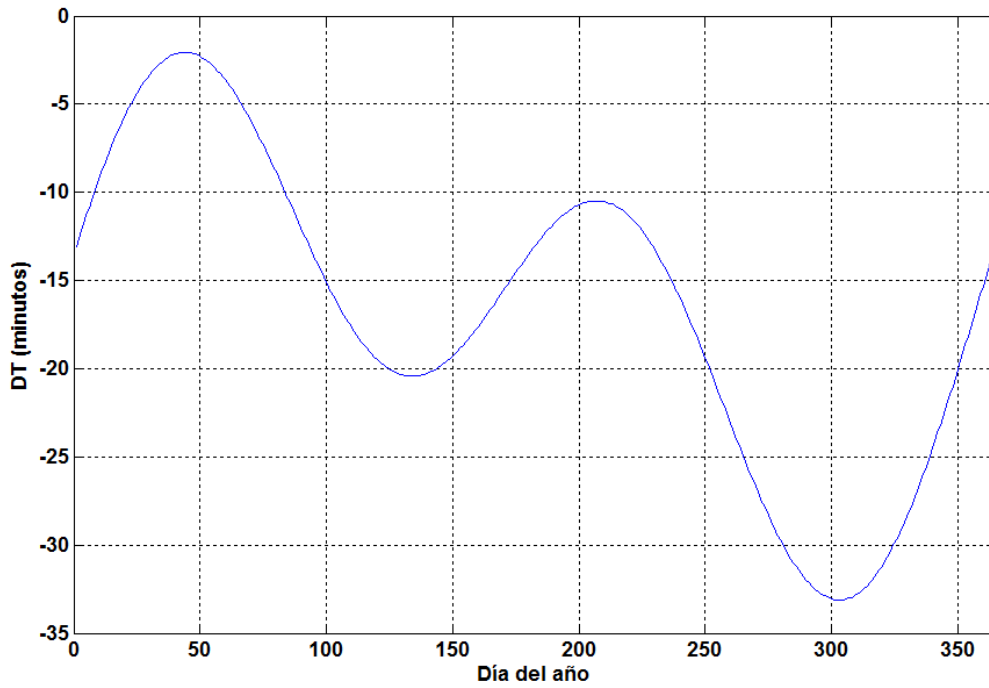


Figura 3.3: Desviación DT en minutos entre hora solar y hora estándar

La declinación solar, δ , es el ángulo que forma el rayo solar con el plano del ecuador en cada época del año. El valor de la declinación varía a lo largo del año de 23.45° (21 de junio), a -23.45° el (21 de diciembre) pasando por sus valores nulos en los equinoccios de primavera y otoño cuando el Sol está situado en el plano del ecuador terrestre.

$$\delta = 23.45 \sin \left(\frac{2\pi(J - 81)}{368} \right). \quad (3.4)$$

El ángulo horario, w , es el desplazamiento angular del Sol sobre el plano de la trayectoria solar, respecto al meridiano local, por la rotación de la Tierra a la velocidad angular de 15 grados por hora. Se toma como origen del ángulo el mediodía solar y valores crecientes en el sentido del movimiento del Sol.

$$w = 15(t_s - 12), \quad (3.5)$$

donde el tiempo solar t_s se expresa en horas decimales.

Una vez definidas todas las variables es posible calcular el ángulo azimutal y el de altura, que dependen de la latitud, l , la declinación solar, δ , y el tiempo solar, t_s (que a su vez depende de la longitud L):

$$a_t = \arcsin \left(\sin l \sin \delta + \cos l \cos \delta \cos(w) \right). \quad (3.6)$$

$$a_s = \arctan \left(\frac{\cos \delta \sin(w)}{\cos l \sin \delta + \sin l \cos \delta \cos(w)} \right). \quad (3.7)$$

donde el ángulo azimutal a_s tiene valores comprendidos entre: $0 \leq a_s < 2\pi$, y el ángulo de altura solar: $-\pi/2 \leq a_t \leq \pi/2$.

Se comprueba la validez del modelo comparando los valores de los ángulos proporcionados por las ecuaciones [ec. 3.6] [ec. 3.6] frente a los datos registrados a lo largo del año para distintas localizaciones geográficas [11] y programas de cálculo de magnitudes solares [12]. El modelo solar descrito predice con gran exactitud el movimiento aparente del Sol (fig. 3.4) coincidiendo con las medidas reales.

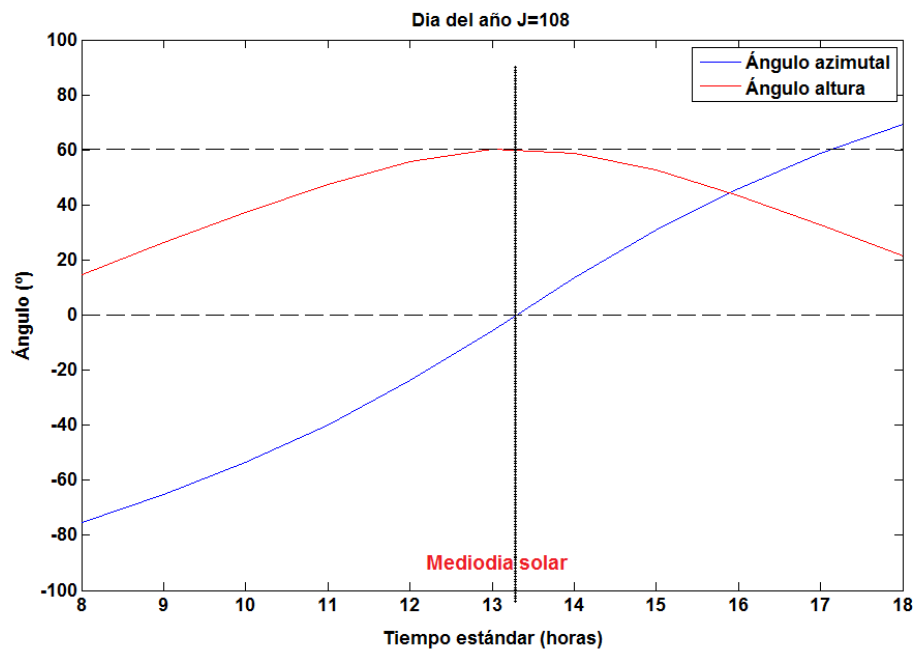


Figura 3.4: Ángulo azimutal y altura solar para el 18 abril

Una vez obtenidas las expresiones de los ángulos de incidencia en función del tiempo es posible simular un modelo de fuente solar que adopte las posiciones aparentes según el momento temporal considerado a lo largo del año. Conocer estos ángulos de incidencia será imprescindible para calcular el comportamiento de los sistemas de iluminación natural analizados (Sección 3.3) incorporando su variación temporal.

La radiación solar que incide sobre una superficie se expresa comúnmente de dos formas distintas: como irradiancia o como exposición radiante. La irradiancia es una medida de la tasa de energía recibida por unidad de superficie (W/m^2). La exposición radiante es una integral de tiempo, o suma de irradiación. Así pues un minuto de exposición radiante se define como una medida de la energía recibida por un metro cuadrado durante un minuto, o lo que es lo mismo, 1 minuto de exposición radiante = irradiación (W/m^2) x 60 segundos. El resultado se expresa en unidades de Julios por metro cuadrado (J/m^2), Watios-hora por metro cuadrado (Wh/m^2) o Kilo Watios-hora por metro cuadrado (kWh/m^2).

Los modelos de cálculo de radiación sobre una superficie inclinada tienen en cuenta tanto la radiación directa, la difusa como la reflejada por el suelo y el paisaje en general [13]. Estos modelos permiten determinar la irradiancia según el instante temporal, la inclinación y orientación de la superficie y su localización geográfica. También es necesario introducir parámetros como la turbidez del aire o la probabilidad de días nublados. Esta información permitirá en caso necesario establecer el flujo incidente del que dispone nuestro sistema óptico en un momento determinado.

3.2. Lentes acromáticas para sistemas fotovoltaicos

La iniciativa de desarrollar una lente acromática viene impulsada por el interés de varias empresas (“AOSA”, “Concentración Solar la Mancha”) que han participado en distintos proyectos de investigación con el grupo de óptica aplicada de la universidad complutense para mejorar la competitividad y eficiencia de sus productos.

A lo largo de esta sección se detalla el diseño de un doblete acromático híbrido de bajo coste de fabricación que presenta ventajas respecto al factor de concentración y la estabilidad en comparación con las lentes Fresnel de concentración convencionales. Las lentes acromáticas presentan la principal ventaja de atenuar significativamente las aberraciones cromáticas siendo de este modo un elemento clave en numerosas aplicaciones de concentración de energía solar. Además las lentes o dobletes acromáticos se encuentran generalmente en tecnologías de diseño de fase, dispositivos holográficos o aplicaciones de manipulación de haz laser, para reducir los efectos de las aberraciones cromáticas [14, 15].

En la actualidad los diseños de lentes acromáticas tienen una presencia importante en el mercado debido a su proceso de producción relativamente sencillo y a la diversidad aplicaciones anteriormente mencionadas. Se pueden encontrar multitud de soluciones comerciales fabricada por grupos tan importantes como “Thorlabs” o “Edmund”.

3.2.1. Introducción

Un doblete acromático es una lente capaz de reducir las aberraciones cromáticas y esféricas inherentes a las lentes estándar. Las lentes acromáticas están diseñadas para enfocar un haz de luz de entrada paralelo, de un cierto rango espectral acotado, en un punto de convergencia localizado a la distancia focal minimizando las aberraciones cromáticas [16]. El tipo más común de doblete acromático se compone de dos lentes individuales elaboradas a partir de vidrios con diferentes propiedades de dispersión.

A medida que aumenta el factor de concentración de un sistema óptico, del mismo modo el efecto de las aberraciones cromáticas [17] cobra importancia. Los diseños de sistemas acromáticos son bien conocidos desde el siglo XVIII cuando John Dollond (Inglaterra 1706-1761) hizo un primer sistema de lentes de cristal y agua.

El diseño de un doble prisma con dos materiales diferentes que revele propiedades acromáticos también es un tema explorado profundamente [18, 19].

El efecto acromático no solo aparece en las lentes estándar si no también en las lentes Fresnel no formadoras de imágenes. Las aberraciones cromáticas, presentes en lentes de tipo Fresnel que desempeñan la función de óptica primaria de concentración fotovoltaica (PV), son una limitación importante a fin de obtener altos niveles de concentración [20], conduciendo a nuevas soluciones para el sistema de concentración primario como pueden ser lentes aplanáticas (lente capaz de transmitir la luz sin introducir la aberración esférica), vidrios de baja dispersión y dobletes acromáticos [21].

Esta sección tiene como objetivo desarrollar un diseño de lente acromática, que combine las ventajas de las lentes de Fresnel (alta eficiencia, menor espesor, construcción ligera), junto con la estabilidad y la ausencia de aberraciones esféricas y espectrales de las lentes acromáticas. El diseño doblete acromático se llevará a cabo mediante un proceso de optimización paramétrico para rechazar las configuraciones menos eficientes lo que conduce a un conjunto de soluciones óptimas en términos de eficiencia, distribución de flujo, estabilidad, uniformidad, etc.

Se proporcionará diseños híbridos innovadores que aprovechan las zonas óptimas de operación de cada tipo de lente (Fresnel estándar y acromática) y se llevará a cabo un análisis exhaustivo teniendo en cuenta el rendimiento de cada diseño en relación con el ángulo de incidencia de la luz solar y su espectro.

3.2.2. Descripción del sistema

Como se ha explicado anteriormente el objetivo es el desarrollo de un sistema de concentración solar de alta apertura numérica en formato plano (Fresnel) de tal forma que se pueda aumentar la concentración sobre una célula fotovoltaica sin una disminución apreciable de la eficiencia.

El diseño acromático desarrollado se basa en las lentes Fresnel con perfil escalonado formado por anillos concéntricos, además debe presentar una primera superficie plana para evitar el deterioro de la misma por acumulación de residuos o por impacto de grano o arena. El hecho de introducir una primera superficie plana reduce la complejidad de los moldes empleados y por tanto el proceso global de fabricación. Las lentes Fresnel estándar se fabrican copiando directamente el perfil desde un molde negativo en vidrio mediante técnicas de polimerización ultravioleta o fotolitografía empleando una máscara que coincide con el patrón diseñado. El diseño de las lentes Fresnel está sujeto a ciertas limitaciones debido a la fabricación de moldes de que implica desviaciones de los dientes de alrededor $1 - 2\mu m$ [22] así como imprecisiones en las aristas [23]. Recientemente estos procesos han sido perfeccionados notablemente debido a mejoras en los procesos de fabricación y técnicas de control de temperatura, como el enfriamiento por flujo de aire [24]. Hoy en día las lentes de Fresnel para aplicaciones de concentración solar alcanzan unas dimensiones máximas de alrededor 150mm x 100mm y su techo de eficiencia media teórico es del 82% junto a factores de concentración máximos de alrededor de $800\times$ [22]. Estos niveles de concentración y eficiencia se logran para una incidencia perfectamente perpendicular y sin considerar ninguna apertura solar ni pérdidas en el sistema secundario y la célula fotovoltaica, por tanto las perspectivas reales en cuanto a eficiencia y concentración son mucho más modestas.

En la actualidad la tecnología más prometedora para células de nueva generación es la de multicapas, que permite aprovechar un intervalo mayor del espectro solar apilando unas células encima de otras y el nivel de eficiencia alcanzado por dispositivos de tres uniones ronda el 45% [25]. Y los modelos de concentradores tipo Fresnel comerciales ofrecen factores de concentración menores, alrededor de 300 soles, en parte para evitar el sobrecalentamiento de la célula fotovoltaica.

La mayor parte de las lentes Fresnel están hechas con vidrio, una de las mayores desventajas del vidrio como material de fabricación de estas lentes es la limitación para obtener un perfil operativo, para producción en masa (moldeo por inyección por ejemplo) de alta eficiencia. Esto es debido a su falta de flexibilidad a la hora de reducir la anchura de cada diente del perfil, que pueden llegar a ser de 0.3mm en las lentes de Fresnel modernas hechas de polímeros.

A lo largo de esta sección se llevará a cabo una serie de comparaciones entre lente de Fresnel estándar, considerando la lente Fresnel de facetas planas, en oposición a una serie de dobletes acromáticos, de diseños propio, que estarán formados por los siguientes materiales: polimetilmetacrilato (PMMA), el cual es uno de los materiales plásticos más empleados en aplicaciones de concentración solar debido a su alta transmitancia y baja dispersión. Las lentes de PMMA ofrecen además una baja rigidez mecánica y una gran estabilidad óptica; y policarbonato (PC) que presenta una alta resistencia a los impactos [26]. La existencia de dobletes acromáticos convencionales compuestos por estos mismos materiales son comunes [27], debido a su bajo coste y el comportamiento de refracción adecuado (una alta diferencia en el índice de refracción como se muestra en la Figura 3.5).

Con el fin de caracterizar los materiales empleados en el doblete acromático, se muestra el comportamiento del índice de refracción frente a la longitud de onda de la luz incidente (fig. 3.5).

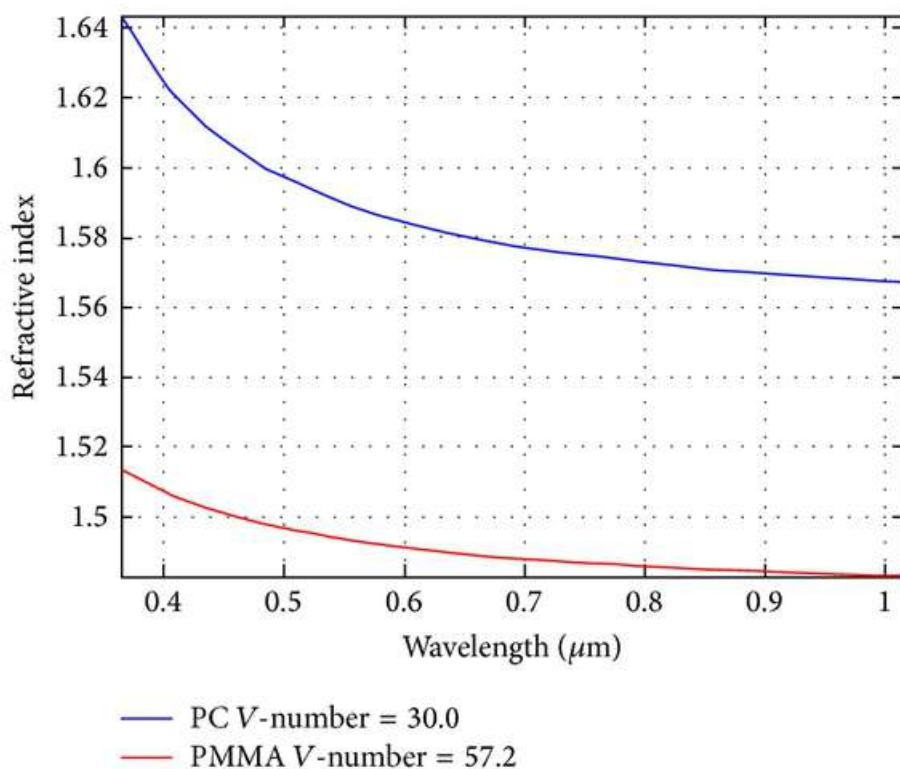


Figura 3.5: Índice de refracción frente a la longitud de onda. PC y PMMA

Para el diseño del doblete acromático se ha seleccionado una configuración del sistema fotovoltaico con una distancia focal de 155 mm y una apertura numérica en la entrada del secundario de $NA = 0.36$. En el punto focal se sitúa la óptica secundaria de vidrio BK7 con geometría prismática, la superficie de entrada de la óptica secundaria es un plano de 11 x 11 mm, la superficie de salida es un plano de 5.5 x 5.5 mm y la altura del prisma es de 38 mm se como se muestra en la figura (fig. 3.6).

La forma del reflector o sistema óptico secundario mas apropiado depende de las características del concentrador primario, la lente acromática en nuestro caso, ya que actúa sobre los rayos ya refractados por el sistema de concentración. Es posible encontrar una amplia gama de diseños diferentes de reflectores secundarios para aplicaciones fotovoltaicas, los más empleados se pueden clasificar en los siguientes grupos: tipo domo, CPC (Compound Parabolic Concentrator) y pirámides truncadas o conos [28].

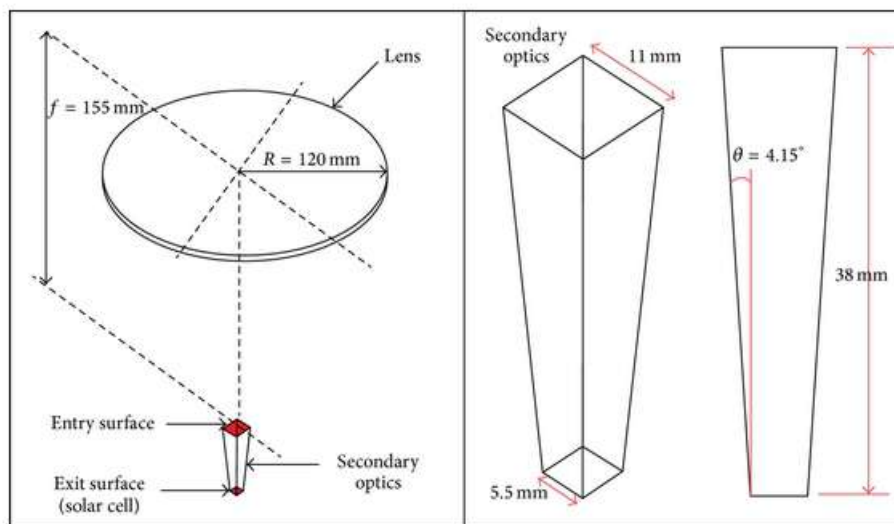


Figura 3.6: Esquema del sistema acromático

Basándonos en un formato doblete acromático estándar, ampliamente discutido en la literatura [29], se diseñará un doblete de formato Fresnel compuesto por dos materiales plásticos de diferente índice de refracción. Por lo tanto el diseño doblete acromático debe estar compuesto por dos fases: la primera consiste en un perfil de doble sierra de PMMA, la segunda fase está compuesta de una capa de PC como se describe en la Figura 3.7.

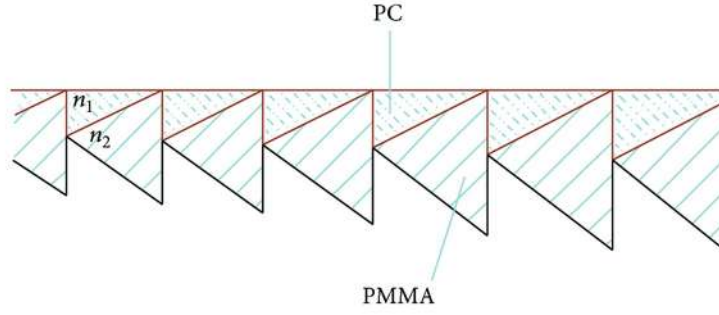


Figura 3.7: Sección de la lente acromática

3.2.3. Diseño del doblete acromático

El doblete acromático Fresnel, en adelante mencionado como lente acromática, constituye el núcleo de la presente aplicación y el objeto de las simulaciones llevadas a cabo. A continuación se muestra el desarrollo matemático basado en las ecuaciones Snell que conducen al diseño de la lente acromática:

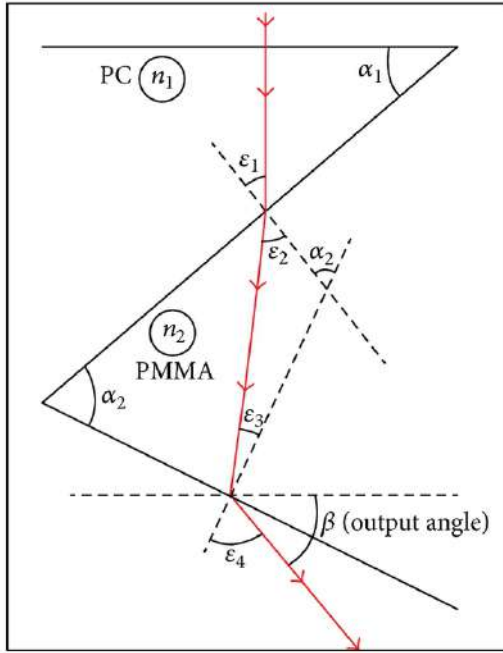


Figura 3.8: Rayo a través de la sección

Ecuaciones de Snell:

$$\begin{cases} n_1 \sin \epsilon_1 = n_2 \sin \epsilon_2 \\ n_2 \sin \epsilon_3 = \sin \epsilon_4. \end{cases} \quad (3.8)$$

Incidencia y refracción:

$$\epsilon_1 = \alpha_1. \quad (3.9)$$

Reescribiendo las ecuaciones de Snell:

$$\epsilon_2 = \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin(\epsilon_1) \right). \quad (3.10)$$

Por las propiedades del triángulo:

$$\epsilon_2 + \epsilon_3 + (180 - \alpha_2) = 180. \quad (3.11)$$

Substituyendo [ec. 3.10] y [ec. 3.11] en la ecuación de Snell para ϵ_4 reescrita:

$$\begin{aligned} \epsilon_4 &= \arcsin \left(n_2 \sin(\epsilon_3) \right) = \arcsin \left(n_2 \sin(\alpha_2 - \epsilon_2) \right) = \dots \\ &\dots = \arcsin \left(n_2 \sin \left(\alpha_2 - \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin(\epsilon_1) \right) \right) \right). \end{aligned} \quad (3.12)$$

Ángulo de salida:

Por último, el ángulo de salida del haz de luz que pasa a través de la lente acromática se puede expresar como una función que sólo depende de los ángulos $[\alpha_1, \alpha_2]$ de los prismas (PC & PMMA) y su respectivo índice de refracción $[n_1, n_2]$ simplemente sustituyendo las componentes del ángulo de salida por las ecuaciones [ec. 3.9], [ec. 3.10], [ec. 3.11] y [ec. 3.12]:

$$\begin{aligned} \beta &= 90^\circ + (\epsilon_2 - \epsilon_1) + (\epsilon_4 - \epsilon_3) = 90^\circ + \alpha_2 - \alpha_1 - \epsilon_4 = \dots \\ &\dots = 90^\circ + \alpha_2 - \alpha_1 - \arcsin \left(n_2 \sin \left(\alpha_2 - \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin(\alpha_1) \right) \right) \right). \end{aligned} \quad (3.13)$$

La condición de convergencia del flujo fija el ángulo de salida $\beta_{n(\lambda)}$ y en consecuencia los parámetros de diseño α_1 y α_2 del perfil de la lente.

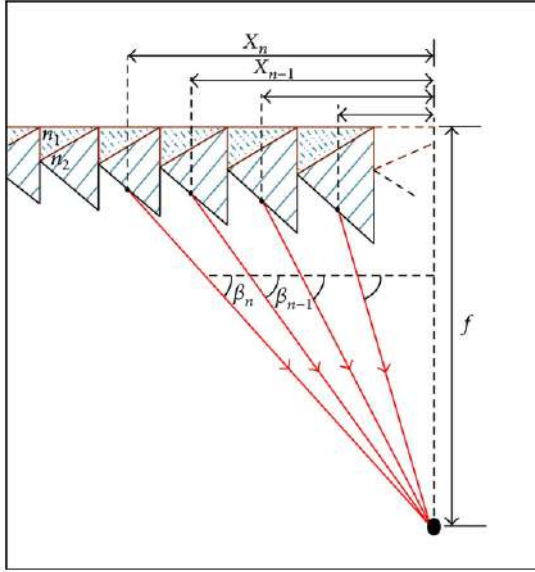


Figura 3.9: Esquema del ángulo de salida respecto a la posición del prisma

Debido a la condición de convergencia y suponiendo que la anchura de la lente es insignificante en comparación con la distancia focal f , el ángulo de salida se determina:

$$\beta_{n(\lambda)} = \arctan\left(\frac{f}{X_n}\right). \quad (3.14)$$

Finalmente los parámetros de diseño para cada segmento del perfil pueden ser calculados:

$$\beta_n = 90^\circ + \alpha_{n2} - \alpha_{n1} - \arcsin \left(n_2 \sin \left(\alpha_{n2} - \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin(\alpha_{n1}) \right) \right) \right) = \arctan\left(\frac{f}{X_n}\right). \quad (3.15)$$

A partir de la ecuación 3.15, y seleccionando de un rango de longitud de onda de trabajo adecuado [$\lambda_1 = 350nm$, $\lambda_2 = 1000nm$] (que establece el valor del índice de refracción n_1 y n_2 de cada material en cada longitud de onda), se puede determinar el perfil de la lente acromática cuyo comportamiento se pondrá a prueba en simulaciones posteriores.

El rango de longitud de onda ($[\lambda_1, \lambda_2]$) se delimita fundamentalmente por tres factores:

- El primero y más restrictivo es, obviamente, el espectro de emisión solar que determina un valor mínimo de longitud de onda para la radiación a nivel del mar alrededor de $300nm$.
- El mínimo de energía de los fotones radiados capaces de estimular los materiales utilizados para la fabricación de células fotovoltaicas. En el caso de Silicio (Si) la longitud de onda de corte es de $1100nm$, equivalente a $1.2e.V$ (electrón-voltio), [30] y determina el máximo de la de longitud de onda.
- Se debe tener en cuenta que el rango de longitud de onda seleccionado ($\lambda_1 - \lambda_2$) determina el máximo del factor de aberración cromática lineal (LCA) dentro de dicho rango de operación, que corresponde a la diferencia de las distancias focales.

$$LCA = f(\lambda_1) - f(\lambda_2). \quad (3.16)$$

3.2.4. Lentes de Fresnel standard frente al diseño acromático

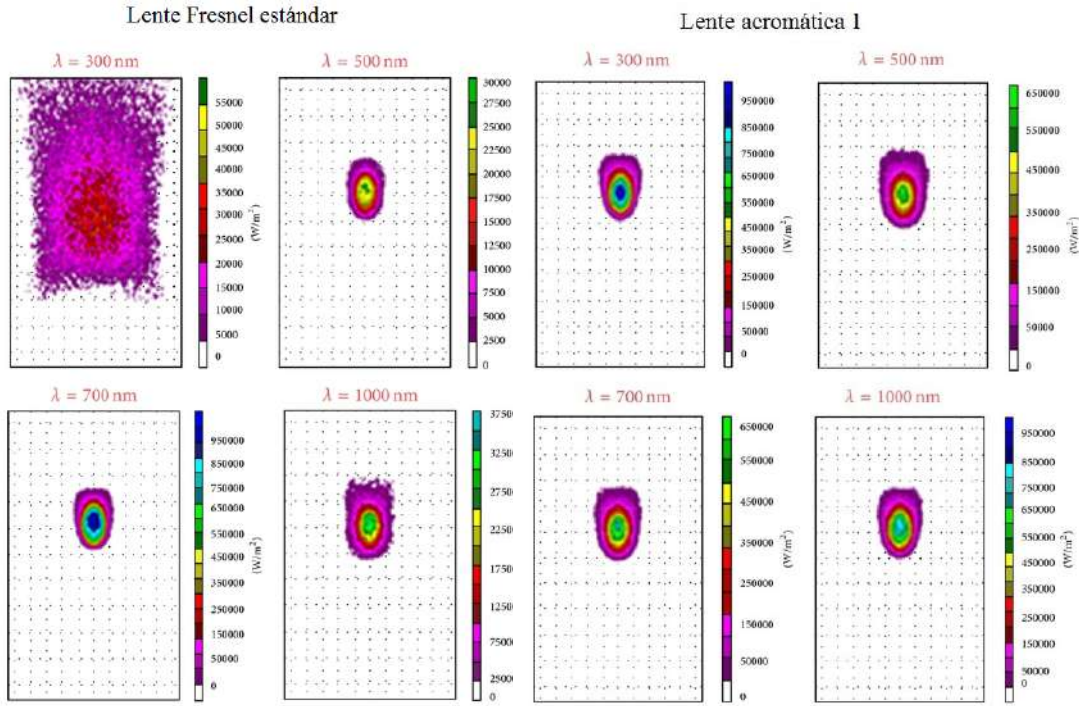
A continuación se realizará un estudio de la luz que incide sobre la superficie de entrada de la óptica secundaria. Este análisis tiene en cuenta la eficiencia, la uniformidad y el area del haz focalizado sobre la superficie de entrada del secundario. Las lentes empleadas en este análisis serán una Fresnel estándar circular y dos lentes acromáticas. Su distancia focal es de $155 mm$ y el tamaño del radio es $R = 120mm$, siendo la apertura numérica $AN = 0.36$. Estos parámetros de configuración no son muy restrictivos por lo que el diseño acromático se compara con un diseño estándar en su mejor zona de trabajo, no obstante este análisis permitirá apreciar las debilidades y fortalezas de cada una de las lentes.

<i>Diseño de parámetros</i>	<i>Lente acromática 1</i>	<i>Lente acromática 2</i>
Tamaño del paso	0.5	0.5
Ángulo del prisma	dif.min. (PC-PMMA)	dif.media (PC-PMMA)
Punto de referencia	Borde del prisma	Centro del prisma

Tabla 3.1: Parámetros distintivos del diseño de lentes acromáticas

La distinción entre las dos lentes acromáticas analizadas surge de su proceso de diseño, cuyos parámetros principales son: el tamaño del paso o diente de la lente, que determina precisión contemplada; el ángulo de los prismas de cada material que compone el doblete acromático (PC y PMMA); y el punto de referencia del ángulo de salida, cuya relevancia en el diseño es proporcional al tamaño del diente de la lente. De este modo se alcanza el mejor patrón geométrico entre las múltiples configuraciones posibles para cada prisma de la lente acromática. El criterio de selección de los dos diseños acromáticos finales se basa en maximizar la cantidad de flujo focalizado sobre el sistema secundario garantizando al mismo tiempo la dispersión cromática mínima.

El parámetro “ángulo del prisma” ha sido seleccionado entre las dos opciones que han demostrado ser óptimas. Estas opciones consisten en la diferencia máxima o media entre los ángulos de los prisma correspondientes (situados a la misma distancia del eje de la lente) de cada capa (PC-PMMA). El parámetro “punto de referencia” indica el punto respecto a cada prisma desde el cual se considera el ángulo de salida. Teniendo en cuenta estas diferentes estrategias de diseño se obtendrá un conjunto de lentes acromáticas de distintas características. El comportamiento de los dos diseños óptimos de las lentes acromáticas se han comparado frente a una lente de Fresnel estándar de focal y tamaño similar. En la figura 3.10 se muestran los mapas de irradiancia bajo incidencia normal considerando para la comparación únicamente el mejor diseño acromático obtenido (Lente acromática 1).



(a) Lente Fresnel. Mapas de irradiancia (b) Lente acromática 1. Mapas de irradiancia

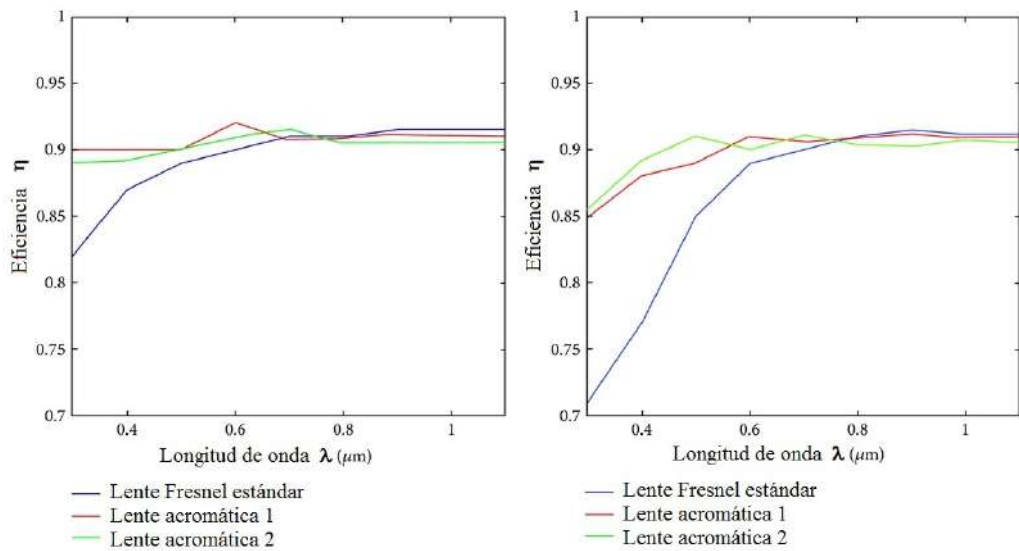
Figura 3.10: Mapas de irradiancia de lente Fresnel frente a lente acromática 1 en la superficie de entrada de óptica secundaria

Como se observa comparando los mapas de irradiancia de la figura 3.10, la zona iluminada en la superficie de entrada secundaria es mucho más reducida a través de la lente acromática en relación con la lente Fresnel estándar. Los diseños acromáticos minimizan las aberraciones, produciendo tamaños reducidos del area de la luz focalizada, que podría permitir el empleo de un sistema óptico secundario más compacto y por lo tanto una célula fotovoltaica menor.

La eficiencia del sistema η se define como la relación entre el flujo luminoso Φ en la superficie de entrada del secundario respecto al flujo total que incide en la lente de Fresnel:

$$\eta = \frac{\Phi_{IN_sec}}{\Phi_{IN_lens}}. \quad (3.17)$$

Para observar el efecto del espectro solar en el sistema además de la influencia del ángulo de incidencia de la luz es necesario cambiar la dirección del haz incidente antes de ser focalizado por la lente. La variación del ángulo de incidencia constituye una circunstancia común en sistemas concentración e iluminación solar al depender de una fuente de posición variable. Este efecto se puede observar en la figura 3.11.



(a) η frente a λ . Ángulo de incidencia 0.4° (b) η frente a λ . Ángulo de incidencia 1°

Figura 3.11: Eficiencia, η , frente a longitud de onda, λ . Ángulo de incidencia variable

La eficiencia de estas tres lentes (una Fresnel estándar y dos acromáticas), que se muestra en la figura 3.11, es casi equivalente aunque el rendimiento de la lente de Fresnel convencional se reduce dentro de un rango de longitud de onda corta, y esto es particularmente notable a medida que aumenta el ángulo de incidencia, provocando mayores pérdidas en el comportamiento de la lente Fresnel. Esta deriva es causada por el efecto de la dispersión cromática y acentuada por un alto ángulo incidente, aunque el diseño acromático mantiene el enfoque para un rango más amplio de longitudes de onda y ha aumentado el ángulo de aceptación.

A la vista de estos resultados se puede pensar en aumentar concentración a costa de reducir el tamaño de la célula pero se opta por mantener las medidas de esta por razones de sobrecalentamiento de la célula y mantener dimensiones estándares.

Con el fin de evaluar el efecto real de las aberraciones acromáticas se ha considerado la importancia de cada longitud de onda teniendo en cuenta la distribución espectral *ASTM1* (Terrestrial Reference Spectra [9]) de la luz solar.

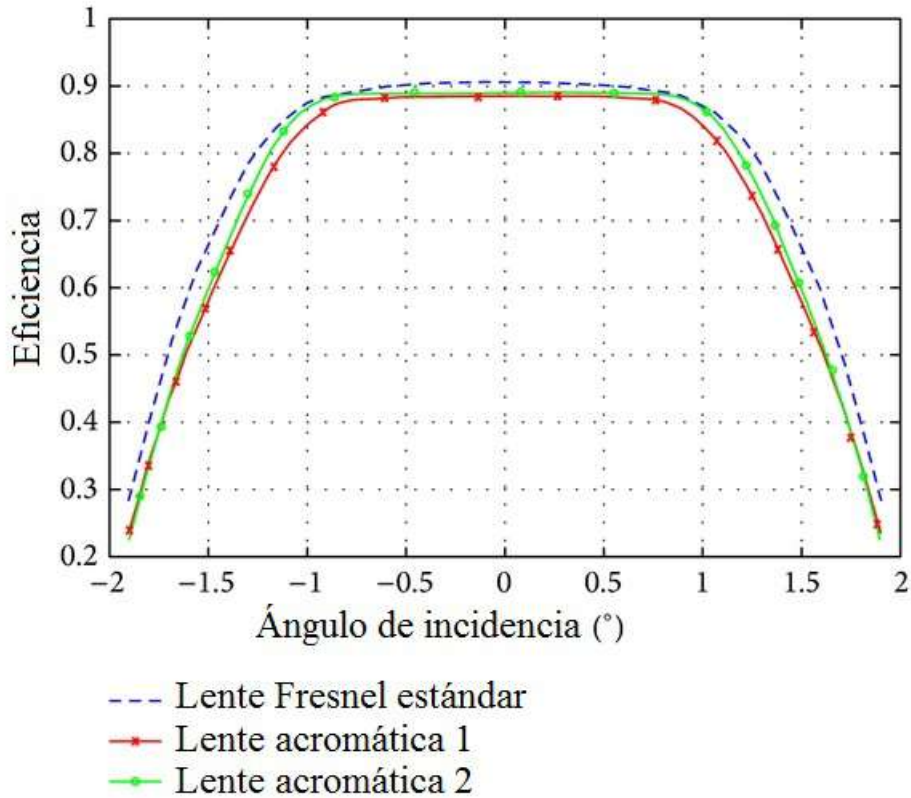


Figura 3.12: Eficiencia ponderada para todo el espectro (ASTM1) solar frente al ángulo incidente

En la figura 3.12 se observa que el comportamiento de la lente de Fresnel estándar (para la apertura numérica seleccionada y las características de la óptica secundaria) es todavía ligeramente mejor que el diseño acromático. Con el objetivo de obtener un diseño mas eficiente es necesario conocer la apertura mínima a partir de la cual la lente acromática se comporta mejor que la lente de Fresnel estándar y sacar el máximo partido al diseño acromático en dicha zona.

3.2.5. Diseño de lente Fresnel acromática híbrida

A raíz de los resultados anteriores se comprueba que el diseño Fresnel estándar es una solución bastante eficaz, siempre y cuando la apertura numérica esté limitada. Sin embargo si se persigue alcanzar un alto factor de concentración entonces se necesita aumentar la apertura numérica del sistema. A lo largo de esta sección se mostrará un diseño de lentes híbrido, combinando las zonas mas eficientes de cada diseño (diseño Fresnel estándar y acromático).

Para evaluar el rendimiento radial de la lente de Fresnel frente a ambos diseños acromáticos (tabla. 3.1) se han desarrollado una serie de simulaciones modificando el radio (R_n, R_{n+1}) de un anillo de luz incidente como se ve en la figura 3.14.

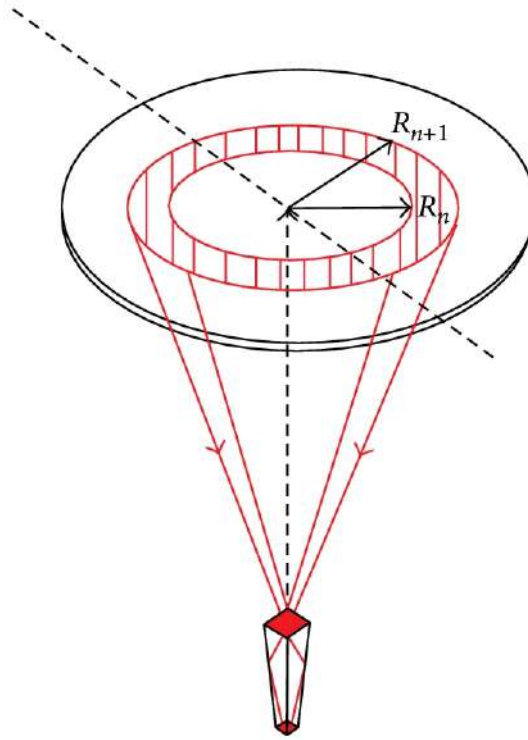


Figura 3.13: Esquema del trazado de rayos de anillo de luz incidente de ángulo variable

Es necesario dividir la superficie de la lente en elementos de área que contribuyan equivalentemente al comportamiento global. Para asegurarse de que la contribución a la concentración se mantiene constante el anillo incidente debe mantener su área en cada interacción de trazado de rayos. De este modo el flujo emitido por cada anillo se mantiene constante y la comparación, en términos de concentración, es relevante. Por lo tanto, el radio del disco luminoso cumple la ecuación 3.18.

$$R_n = \sqrt{n}R_1 \Rightarrow \Delta R = \pi(R_{n+1}^2 - R_n^2) = \pi R_1^2. \quad (3.18)$$

Este estudio confirmará las ventajas del diseño acromático frente a la lente Fresnel estándar a medida que la luz incide en la zona exterior de la lente. En la figura 3.14 se determina el límite de rendimiento radial entre la lente acromática y la lente de Fresnel estándar.

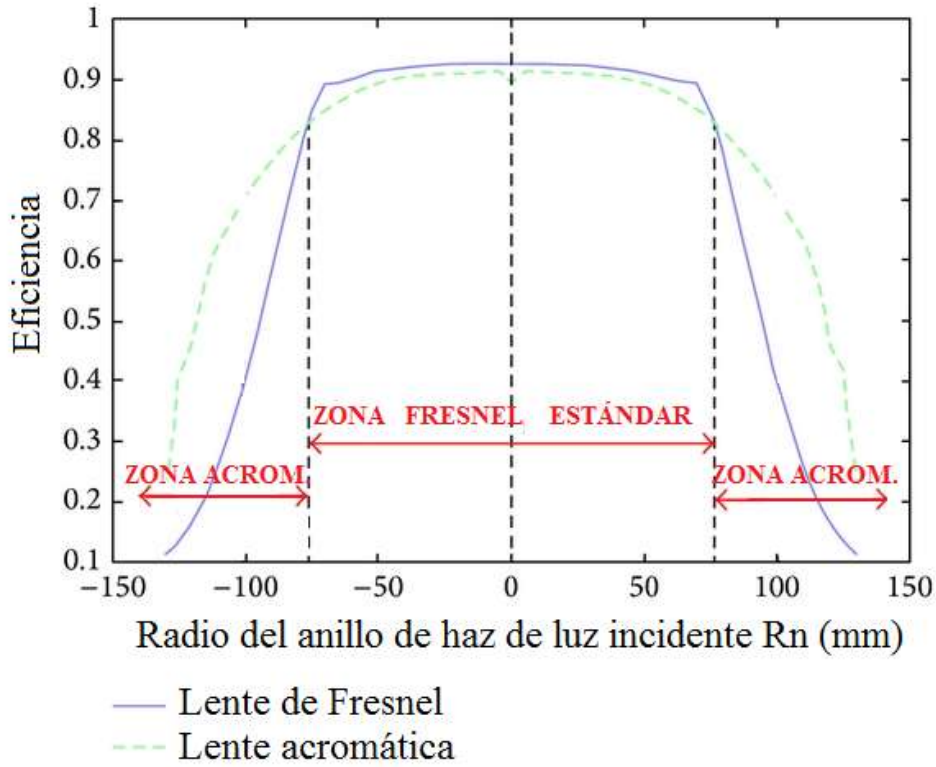


Figura 3.14: Eficiencia radial de la lente acromática y Fresnel estándar

En la figura 3.14 se comprueba que la lente de Fresnel estándar tiene una eficacia superior al diseño acromático hasta un valor del radio de la lente de $R_n = 76$ mm. Por tanto la apertura numérica a la entrada del secundario sería $NA = 0.26$ respecto la zona Fresnel estándar. Combinando esta zona central de la lente basada en el perfil de Fresnel estándar junto con un diseño acromático para la zona periférica se obtiene el diseño híbrido.

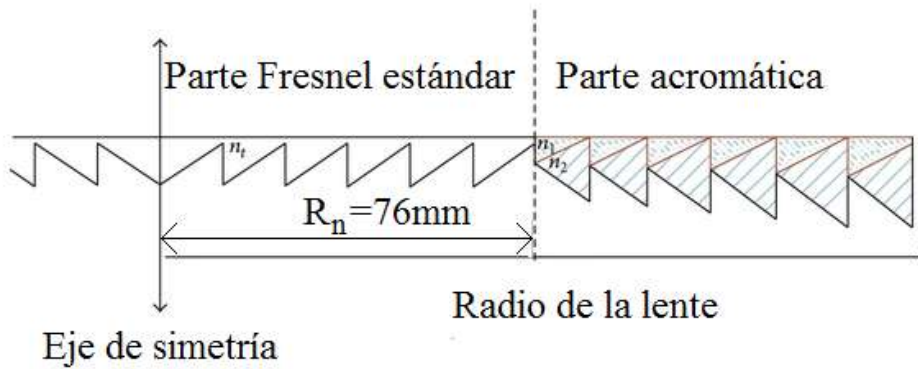


Figura 3.15: Sección de la lente híbrida

El mejor rendimiento de la lente acromática híbrida en comparación con el diseño convencional Fresnel se pone de manifiesto a medida que aumenta la zona de trabajo de la lente, esto se puede analizar con mayor detalle a través de un estudio de la concentración de la lente frente al radio de la misma al cuadrado. El factor de concentración (C) se ha medido en la superficie de salida de la óptica secundaria:

$$C = \frac{S_{Lens}}{S_{sec}} \eta, \quad (3.19)$$

donde η es la eficiencia del sistema medida respecto al flujo incidente en la superficie de salida óptica secundaria.

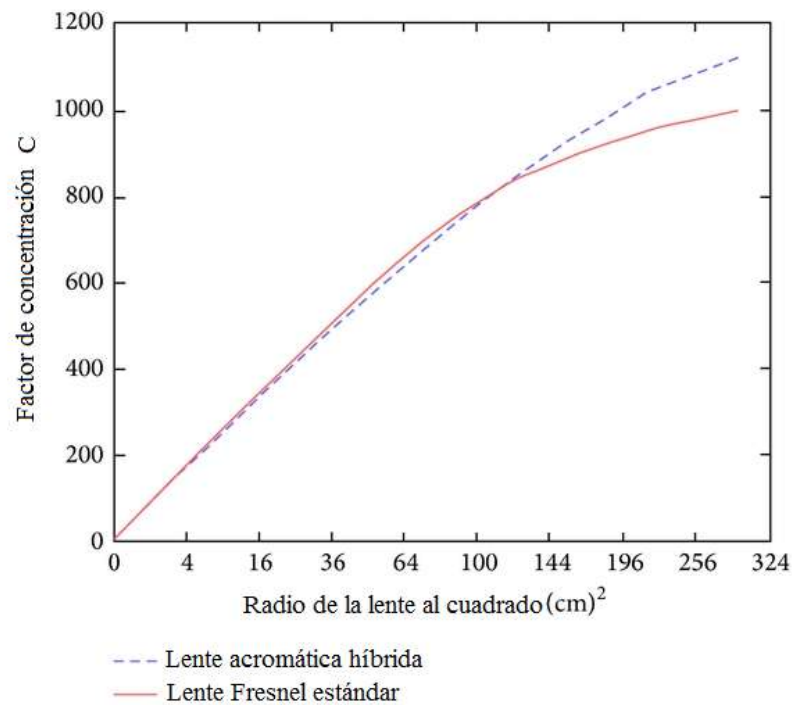


Figura 3.16: Factor de concentración frente al radio al cuadrado de la lente

Se verifica que la lente acromática híbrida ofrece ventajas a medida que aumenta el radio de la misma, alcanzando niveles de concentración (considerando la óptica secundaria) por encima de 1000 soles (fig. 3.16) que difícilmente logran una lente Fresnel convencional para unas dimensiones máximas establecidas, 120mm de radio.

En la figura 3.16 también se aprecia que el factor de concentración es prácticamente idéntico (salvo discrepancias debidas a la simulación) para la lente híbrida y la lente Fresnel estándar hasta un valor del radio de la lente cercano a R_n , ya que ambas lentes comparten la misma geometría delimitada por dicho valor radial.

Por el principio de la conservación de la Étendue (sección 1.4) se puede calcular el máximo teórico del factor de concentración para un sistema y una fuente de las características geométricas establecidas. Según la ecuación [ec. 1.14], se puede realizar una estimación del factor máximo teórico de concentración de la lente acromática en ausencia de pérdidas. Para ello se considera un semiángulo de aceptación de incidencia, α , de 1.8° que comprende un 70% del flujo luminoso, como se observa en la figura 3.12, y un ángulo de aceptación en el receptor, β , de 36.45° que se encuentra en un medio (aire) de índice de refracción $n=1$:

$$C_{acro} = n^2 \frac{\sin^2 \beta}{\sin^2 \alpha} = 370. \quad (3.20)$$

Este factor debe multiplicarse por la concentración propia del sistema secundario de superficie de entrada A y salida S .

$$C_{sec} = \frac{A}{S} = \frac{11.5^2}{5.5^2} = 4. \quad (3.21)$$

Por tanto el factor máximo teórico de concentración para el sistema completo será de $C_{max,etend} = 1468$. Que coincide aproximadamente con la concentración máxima derivada de la superficie de la lente entre la superficie de la célula fotovoltaica $C_{max} = 1481$.

Finalmente se muestran los niveles de concentración de la lente híbrida frente a la lente acromática y Fresnel estándar (fig. 3.17). Se puede apreciar el comportamiento superior para el diseño de la lente híbrida, sobre todo en comparación con la de Fresnel, este rendimiento es bastante notable para ángulos de incidencia relativamente bajos (menos de un grado) en el que alcanza un 18% de mejora.

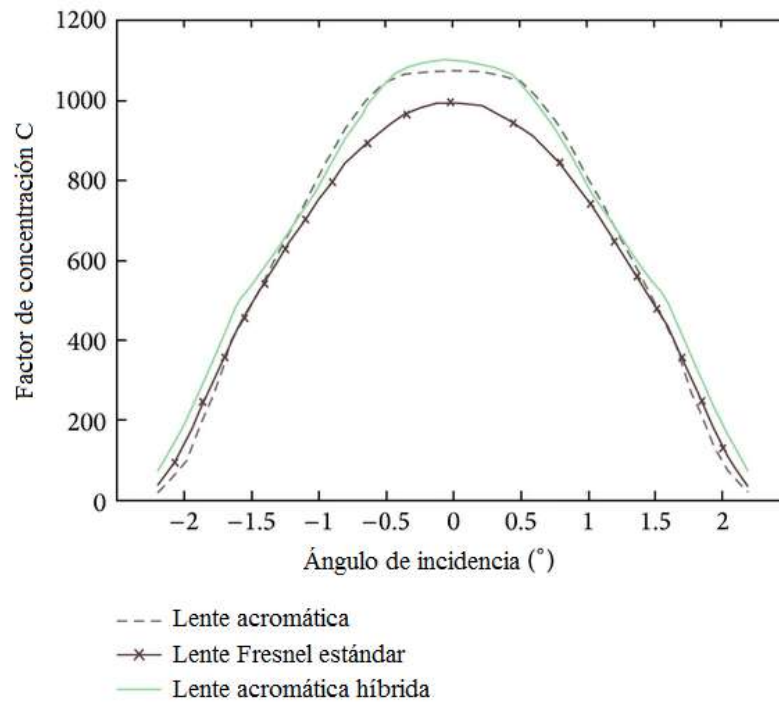


Figura 3.17: Factor de concentración frente al ángulo de incidencia

A medida que el ángulo de incidencia aumenta (fig. 3.17) los perfiles de concentración de los distintos diseños de lentes se homogenizan pero la lente híbrida mantiene un mejor rendimiento en comparación con el resto de diseños, y muestra un 9% más de concentración para 1.5° de ángulo de incidencia. A la vista de estos resultados se puede confirmar el diseño de una lente híbrida de alta eficiencia combinando las áreas favorables de dos tipos de lente (Fresnel estándar y acromática) que forma parte de un sistema de concentración de probada estabilidad frente al ángulo de incidencia y que muestra en su conjunto (incluyendo el sistema secundario) un factor de concentración superior los mil soles rondando el 81% del máximo factor de concentración teórico.

A través de un proceso de diseño óptico y optimización se ha obtenido una lente acromática híbrida; este tipo de lente combina las ventajas de las lentes de Fresnel estándar con las características más útiles de la lente acromática. El diseño acromático híbrido resulta una solución eficaz como óptica primaria para sistemas fotovoltaicos, maximizando el área de captura de la lente de enfoque sin sacrificar la eficiencia y disminuyendo el tamaño de la mancha. La lente acromática híbrida proporciona un mayor nivel de concentración que se mantiene durante un intervalo de tiempo más largo, al ser su comportamiento más estable frente a los cambios en la incidencia del haz.

3.3. Sistema de iluminación natural para edificios

El sistema de iluminación presentado en esta sección aprovecha la luz solar incidente en la fachada del edificio con fines de iluminación reduciendo el consumo de energía y complementándolo con energía renovable y limpia. El sistema de iluminación comprende un colector de luz situado en el exterior de la fachada vertical, una guía de luz modular que se extiende horizontalmente a través del falso techo y unas luminarias extractoras colocadas estratégicamente a lo largo de la guía.

El trabajo que se recoge en esta sección ha sido desarrollado dentro del proyecto Eureka 3575 “Active Daylighting System” (ADASY©) liderado por la empresa Lledó Iluminación S.A. junto con Bartenbach Lichtlabor (BLL), la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y la Universidad Complutense de Madrid (UCM).

Un prototipo a escala del sistema se ha fabricado satisfactoriamente en su totalidad y actualmente se encuentra integrado en las instalaciones de Lledó S.A.

3.3.1. Introducción

Actualmente la presencia de energías renovables aplicadas a entornos arquitectónicos ha adquirido gran importancia. El cambio de la mentalidad y las tendencias económicas de los agentes involucrados en este sector son ya una realidad, e impulsan las nuevas estrategias de construcción, materiales compatibles con la conservación del medio ambiente y la sostenibilidad energética. De esta forma los programas para el medio ambiente como el de las Naciones Unidas “Global Green New Deal” (Marzo 2009), el proyecto de la comisión europea “Greenligh” (Marzo 2006) son dos ejemplos de esta tendencia.

Los beneficios de la luz solar en los edificios de oficinas son bien conocidos [31, 32, 33]. El uso de la luz solar reduce los costes de mantenimiento y mejora el bienestar de los ocupantes del edificio. La productividad de los trabajadores se incrementa y el entorno de trabajo es más saludable. Mejorar la condiciones de los trabajadores les afecta directamente y repercute en la productividad de la empresa [34, 35]. Los efectos de los sistemas de iluminación solar en los edificios deben de suponer una consideración importante para los diseños de los mismos ya que significan un beneficio para todos; los ocupantes, los dueños y por extensión toda la sociedad. Para ofrecer unas condiciones visuales agradables en la habitación es indispensable asegurar ciertos valores en los niveles de iluminación, luminancia, índice de deslumbramiento y composición de color. Los niveles requeridos varían en función de las actividades realizadas en cada estancia [36].

Los sistemas no formadores de imágenes son soluciones adecuadas cuando son deseables factores de concentración y eficiencia elevados, los sistemas basados en dispositivos anidólicos han demostrado un gran potencial en el campo de los sistemas de iluminación natural aunque las soluciones comerciales no están extendidas ampliamente debido principalmente a sus elevados costes de fabricación e instalación. Diversos ejemplos de sistemas de iluminación anidólicos se pueden encontrar en la literatura junto con sus propios criterios de diseño, herramientas de simulación y resultados [5, 37].

La aplicación descrita en este trabajo pretende aprovechar la luz que llega a la fachada del edificio con fines de iluminación. El sistema está ideado para adaptarse a las características específicas de un edificio, aunque su rendimiento podría mejorarse si la planificación del edificio tuviera en cuenta la integración del sistema de iluminación y sus restricciones. En este sentido algunos estudios sugieren que la manera de optimizar el uso de la energía solar por parte de un edificio se debe planear desde las fases iniciales de construcción del mismo [38].

El diseño del sistema de iluminación será dividido teniendo en cuenta la funcionalidad específica de cada componente: captación transmisión y distribución.

- Sistema colector:

El sistema colector tiene dos funciones principales, la primera es captar el máximo flujo de luz posible y la segunda, y no menos importante, redirigir la luz con una orientación específica hacia interior de la guía de alta reflectividad. Es prioritario reducir el ángulo de salida de la luz del sistema colector que estará basado en una matriz de T-CPC (Truncated Compound Parabolic Concentrator).

El diseño del colector ha sufrido un proceso de optimización bajo las condiciones de irradiancia solar de la ciudad de Madrid. La innovación del colector reside tanto en la geometría de la unidad estructural de la matriz, CPC, como en los parámetros geométricos de la matriz: índice de compactación y ángulo de inclinación.

- Transmisión:

Una vez la luz solar incidente es captada se dirige el flujo a las zonas distantes de las ventanas donde la luz no alcanza directamente. Esto se consigue mediante la guía de luz horizontal dentro del falso techo. La luz se canaliza por reflexión en los espejos de alta reflectividad de las caras interiores de la guía. El análisis de la guía de luz está incluido en la optimización del colector anteriormente mencionada.

- Distribución:

Finalmente un sistema de extracción/distribución de luz será ideado con el objetivo de repartir la luz eficientemente y de forma equilibrada dentro de la habitación. Para llevar a cabo la extracción de luz se dispondrá de varias luminarias solares que trabajan eficientemente bajo un amplio rango de condiciones de incidencia y se complementarán con materiales de distinta rugosidad para romper las concentraciones excesivas de luz en determinados puntos del sistema. Estas luminarias también se diseñarán buscando un mínimo nivel de deslumbramiento.

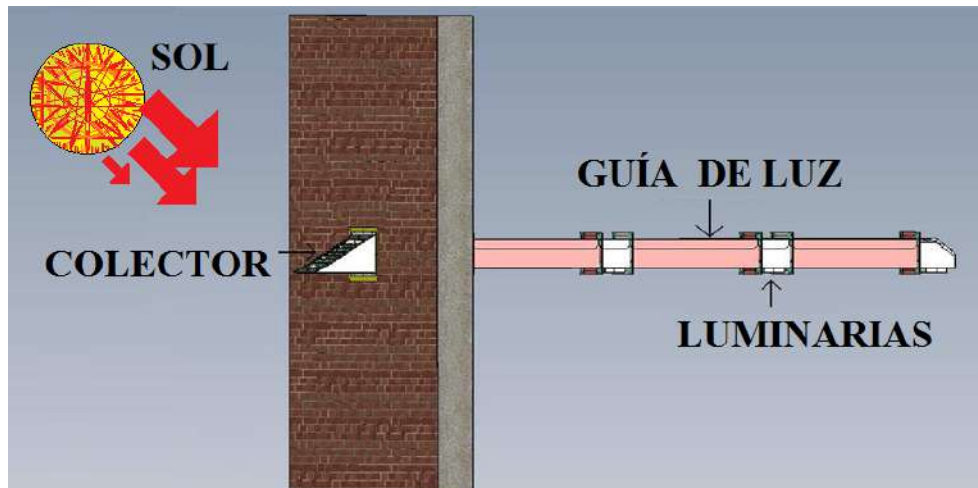


Figura 3.18: Esquema sistema de iluminación

3.3.2. Sistema colector de luz solar

El primer elemento del sistema es el colector anidólico, responsable de captar y redirigir la luz solar. Los componentes activos se descartan en el colector debido a que aumentaría en exceso el coste del producto y del mantenimiento. El colector debe operar bajo una alta apertura numérica (captando la mayor luz posible), garantizando una alta eficiencia (reduciendo pérdidas) y proporcionar una divergencia reducida en su flujo de salida para facilitar el guiado de la luz.

La matriz del sistema colector se trata mediante metalización PVD. La técnica PVD (Physical Vapor Deposition) consiste en la deposición física de películas delgadas a partir de la fase de vapor, al condensarse el vapor se forma una capa delgada sobre la superficie del substrato formando una superficie de alta reflectividad especular. En concreto la reflectancia del colector es $\rho_{t\text{cpc}} = 0.95$, que está conectado a su vez con la guía de luz de alta reflectancia $\rho_{\text{guía}} = 0.97$, y de dimensiones $1\text{m} \times 0.3\text{m} \times 10\text{m}$.

El nombre del reflector parabólico CPC proviene de la curva de la que obtiene su forma, la parábola es el conjunto de los puntos del plano que equidistan de un punto fijo llamado foco y de una recta llamada directriz. Se conoce como eje de simetría de la parábola a la recta perpendicular a la directriz que pasa por el foco. Se denomina vértice de la parábola al punto donde la curva corta al eje, dicho punto se encuentra a igual distancia de la directriz y el foco.

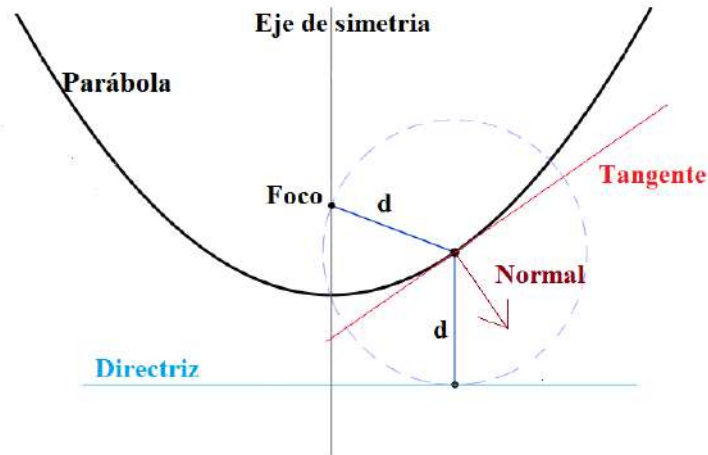


Figura 3.19: Parámetros de una parábola

La geometría del CPC se basa en aprovechar las propiedades del paraboloide de revolución. Las superficies de revolución o de rotación son engendradas por una línea generatriz que gira alrededor de una recta llamada eje. Cada punto de la generatriz describe una circunferencia, cuyo centro está en el eje. La superficie engendada al girar una parábola (curva generatriz) alrededor de su eje es una superficie Parabólica. El eje de simetría del CPC sin embargo no coincide con el eje de la parábola, sino que forma un ángulo conocido como ángulo de aceptación, θ , que determina a su vez el rango de aceptación de luz del CPC en su uso convencional como concentrador de luz.

La geometría del colector se basa en el reflector parabólico CPC en uso inverso [39] que tienen la capacidad de reflejar toda la radiación incidente dentro de un amplio rango angular, aumentando así la radiación potencialmente aprovechable. De modo que el ángulo de aceptación, θ , en su uso inverso se convierte en el ángulo de emisión del CPC (fig. 3.21). El potencial del CPC como captador de energía solar es bien conocido y ha sido descrito por Winston [40], Joseph J. O’Gallagher [41] o P. Sansoni [42] entre otros.

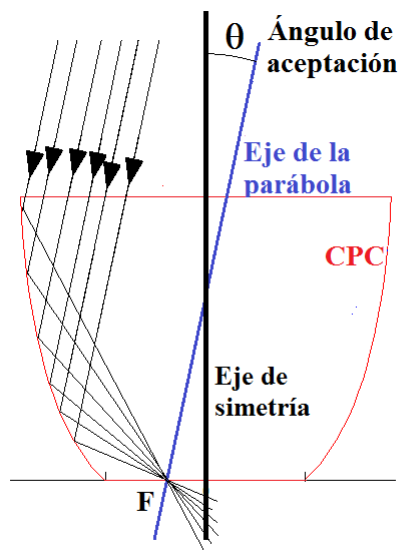


Figura 3.20: Esquema CPC

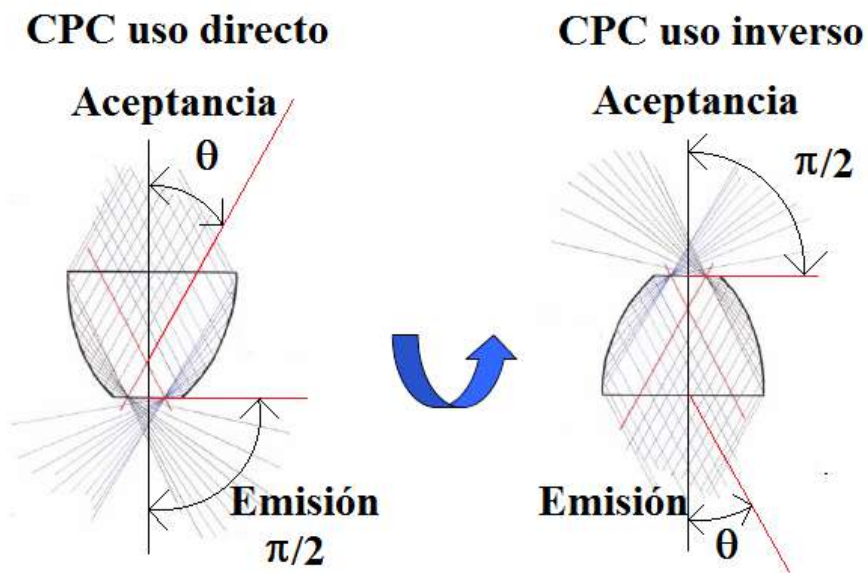


Figura 3.21: Concentrador CPC en uso inverso

Con el propósito de ampliar el ángulo de captación solar y aumentar la energía captada a lo largo del año se realiza en el colector una operación conocida como truncamiento que define una nueva geometría conocida como T-CPC (CPC truncado). Esto implica un corte en la geometría de entrada del CPC definido por un plano inclinado cierto ángulo de truncamiento α . Además se aplica otro ángulo de corrección, β , que llamaremos ángulo de inclinación, y junto con α permite orientar la superficie de entrada del colector con el plano de máxima irradiancia solar. El ángulo de inclinación β se mide entre el eje horizontal y el eje de simetría del CPC (fig. 3.22). El estudio pormenorizado de otros concentradores parabólicos similares es un tema estudiado en profundidad [43].

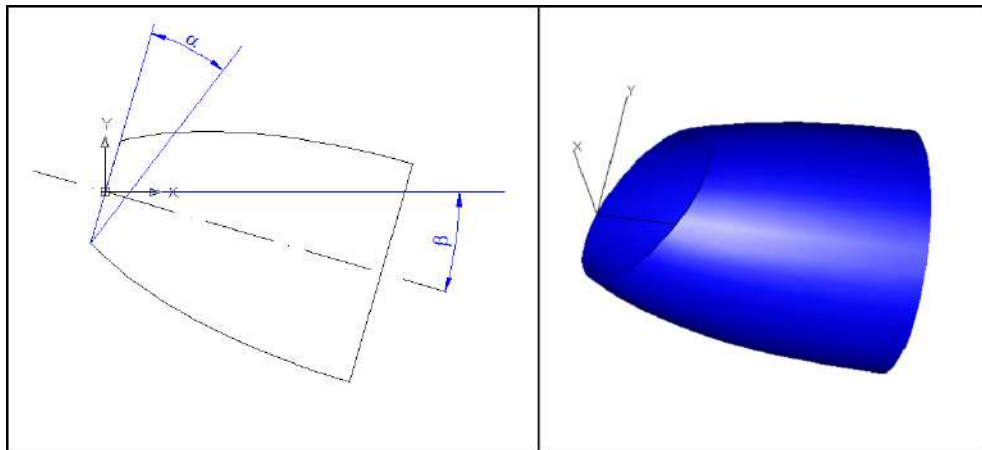


Figura 3.22: T-CPC. α : ángulo de truncamiento β :ángulo de inclinación

Otra ventaja que implica la implementación del ángulo de truncamiento α , es que los elementos T-CPC pueden formar una matriz, cuya superficie adopta la orientación deseada, mientras los T-CPCs que forman el colector no arrojarán sombra sobre el resto de componentes de la matriz ni se perjudica el ángulo de aceptación del sistema colector. Tanto la orientación del CPC, β , como el ángulo de truncamiento determinan la inclinación de la superficie de entrada de la matriz que condiciona el flujo incidente, así como el ángulo de aceptación [44]

Al considerar la estructura matricial se debe introducir un nuevo parámetro, el factor de compactación (dx, dy) (fig. 3.23.b). Este factor mide la distancia que se desplaza una unidad CPC respecto a su unidad vecina más próxima en la dirección del eje especificado (fig. 3.24). El objetivo del factor de compactación es reducir el gap o area inútil entre los T-CPCs favoreciendo el funcionamiento del sistema colector; apertura, ángulo de salida, eficiencia, distribución de flujo etc.

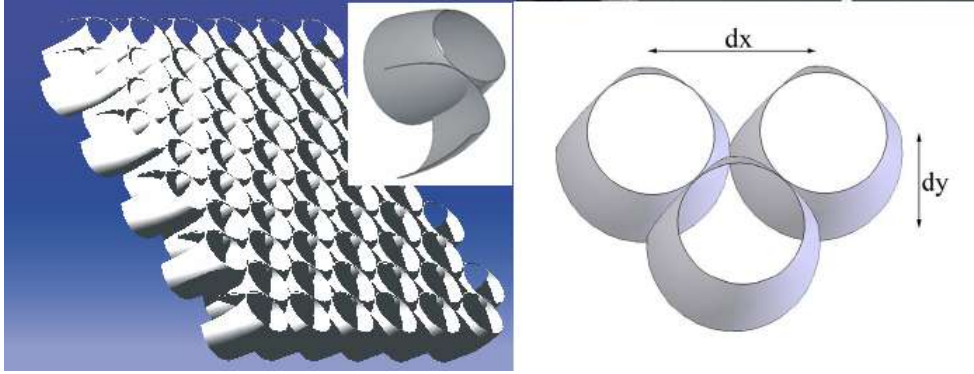


Figura 3.23: Matriz colector. a) T-CPC original b) Factor de compactación

3.3.3. Optimización del sistema colector

En apartado se pretende optimizar el comportamiento del sistema colector. Para llevar esta tarea a cabo es necesario primeramente fijar la posición y orientación del sistema colector. Los cálculos se han aplicado a 4 ciudades diferentes en España considerando una fachada orientada a Sur, aunque finalmente se presentan los resultados de la localización en Madrid. El proposito de esta optimización es maximizar el flujo al final de la guía, para ello es necesario calcular el flujo incidente en la entrada del colector proveniente de la radiación solar directa. Los datos del flujo incidente (W/m^2) en la localización fijada (Madrid) así como las probabilidades de días soleados empleados en la optimización final se obtienen de la base de datos europea “Satel-Light” [45]. Los datos climatológicos son registrados cada media hora y se han empleado los relativos al periodo 1996-2000. Al disponer de los valores de flujo medio para lapsos temporales fijos a lo largo de un año natural será posible determinar la cantidad de luz [klm h] durante las horas de trabajo. El cálculo del flujo incidente en el colector debe de tener en cuenta además de las probabilidades medias mensuales(o previsiones) de días soleados también los factores de turbidez T_L promediados mensualmente, siendo esta magnitud una medida de la falta de transparencia de un medio debido a las partículas que absorben la luz. Estos factores se pueden obtener por ejemplo del sitio web SoDa, de servicios de energía solar para profesionales [46].

Los parámetros de optimización considerados serán (fig. 3.24):

- el ángulo de truncamiento α
- el ángulo de inclinación del T-CPC β ;
- el ángulo de radiación de salida θ ;
- el factor de compactación (dx, dy) .

Los parámetros de optimización definen los grados de libertad del sistema, y su optimización favorecerá que el sistema evolucione hacia un modelo de colector capaz de capturar la mayor cantidad de energía incidente diaria y transmitirla en las condiciones óptimas a través de la guía de luz.

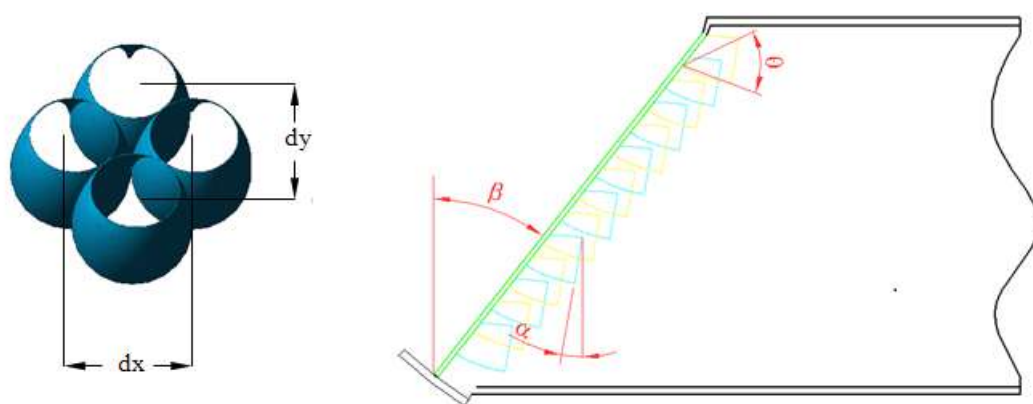


Figura 3.24: Parámetros de la optimización

La optimización del colector persigue captar la mayor cantidad de energía diariamente y anualmente pero además debe mantener un ángulo de emisión θ reducido para maximizar su propagación a lo largo de la guía. Con el fin de caracterizar este compromiso se definen los siguientes objetivos: la eficiencia del conjunto colector-guía, η_{cg} , que mide el flujo luminoso transportado al final de la guía; y la uniformidad de la luz proyectada al final de la guía, u' , considerando el máximo y el mínimo anual diario. Ambas variables, u' y η_{cg} se ligan para definir el último objetivo de la optimización r (fig. 3.25).

El proceso de optimización del sistema colector (3.26) parte de centenares valores iniciales distintos de los parámetros anteriormente introducidos (α , β , etc) y el algoritmo de optimización empleado, conocido como Nelder Mead (Sección 2.1.2.2), tiene como objetivos u' , η_{cg} y r . Este proceso de optimización ha sido desarrollado por el socio del proyecto Bartenbach Lichtlabor.

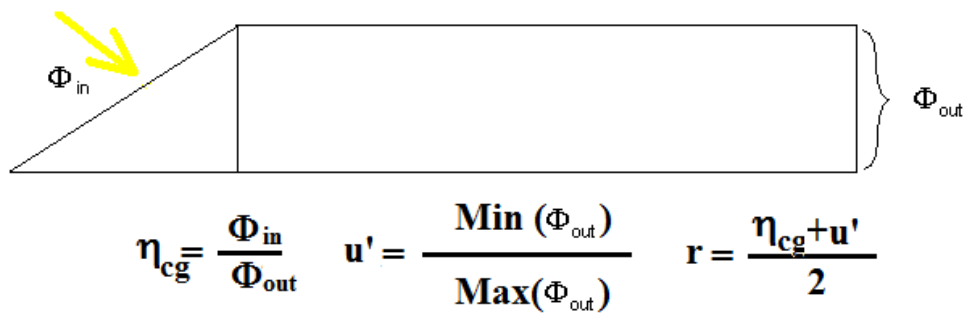


Figura 3.25: Objetivo de la optimización

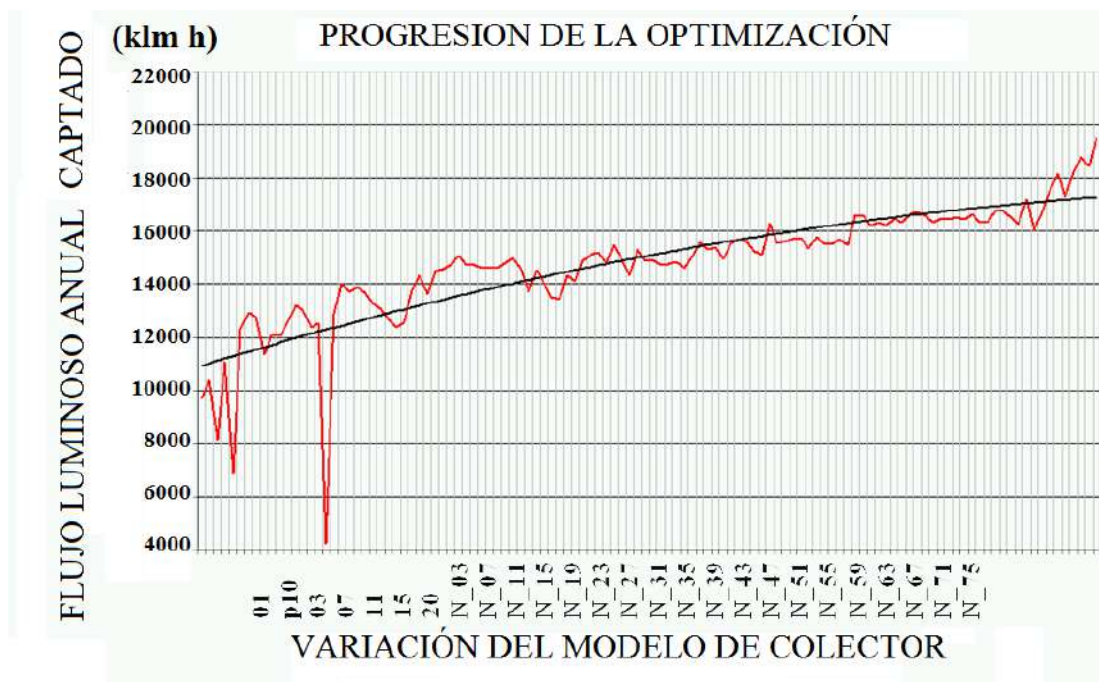


Figura 3.26: Progreso de la optimización para la cantidad de luz [klm h] captada durante las horas de trabajo

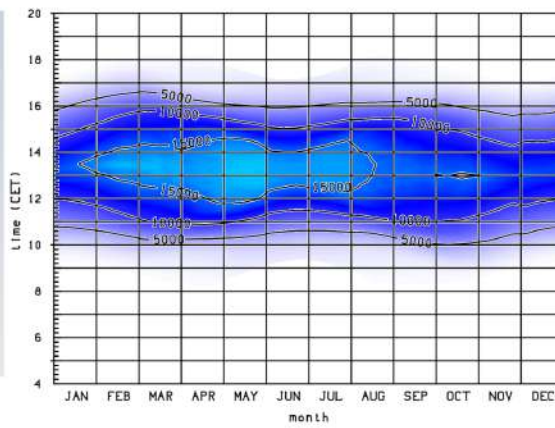
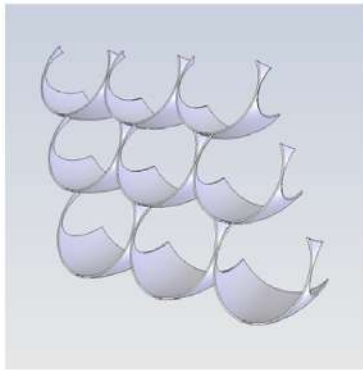
La geometría de la unidad estructural evoluciona desde el clásico CPC hasta una geometría parabólica tipo lama. Esta disminución de la superficie reflectante de la unidad estructural tiene su causa en la integración del T-CPC dentro de una matriz, ya que al acoplar varios concentradores parabólicos la superficie reflectante del conjunto suple la disminución de la superficie individual del T-CPC optimizado. De este modo, y considerando la posición solar incidente durante las horas de trabajo, la superficie total del colector puede verse reducida mejorando la eficiencia (menos pérdidas por reflexión en el colector) sin perjudicar seriamente la uniformidad.

Para caracterizar los sistemas de iluminación solar se emplean a menudo los diagramas tipo Onion (cebolla). Esta representación (fig. 3.27) proporciona información del sistema lo largo del año mediante niveles cromáticos de la variable analizada (en este caso la exposición radiante en $[klm h]$) y curvas isométricas. Como resultado de la optimización se obtienen diferentes modelos de colector (fig. 3.27) de entre los cuales destaca el modelo *VarG_12* que será la elección para el sistema de iluminación y por tanto la geometría que se empleará en el resto de simulaciones.

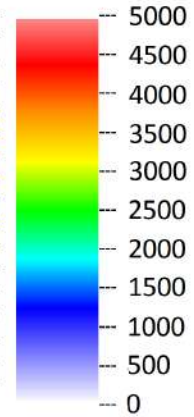
Pero este tipo de representación por medio de diagramas de Onion supone una gran carga de simulaciones ya que considera una multitud de puntos o configuraciones del sistema diferentes. En la figura 3.28 se representa la eficiencia del sistema colector-guía (tanto para su modelo original como para el colector optimizado *VarG_12*) frente 14 posiciones solares espaciadas de manera uniforme. El número de ángulos de incidencia seleccionados serán reducidos a la mitad en las simulaciones del sistema completo debido al aumento de la complejidad.

En la figura 3.28 se observa que el colector optimizado mejora la eficiencia respecto al colector original para la mayoría de los ángulos de incidencia solar analizados en un factor medio del 12 %. De este modo se obtiene un diseño del colector optimizado cuya eficiencia media, junto a la guía de luz, alcanza el 56 %.

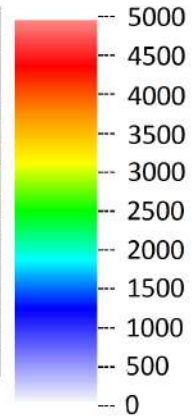
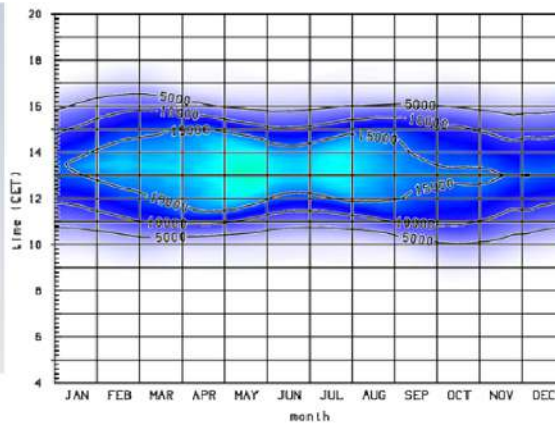
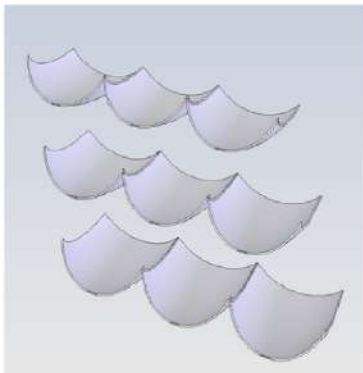
1-VARN_02



[klm h]



2-VARG_12



3-VARN_29

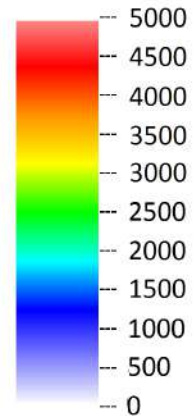
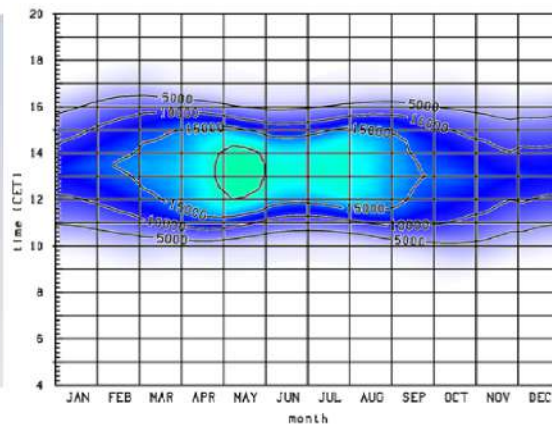


Figura 3.27: Modelos del colector optimizado y diagramas de flujo luminoso (al final de la guía de luz)

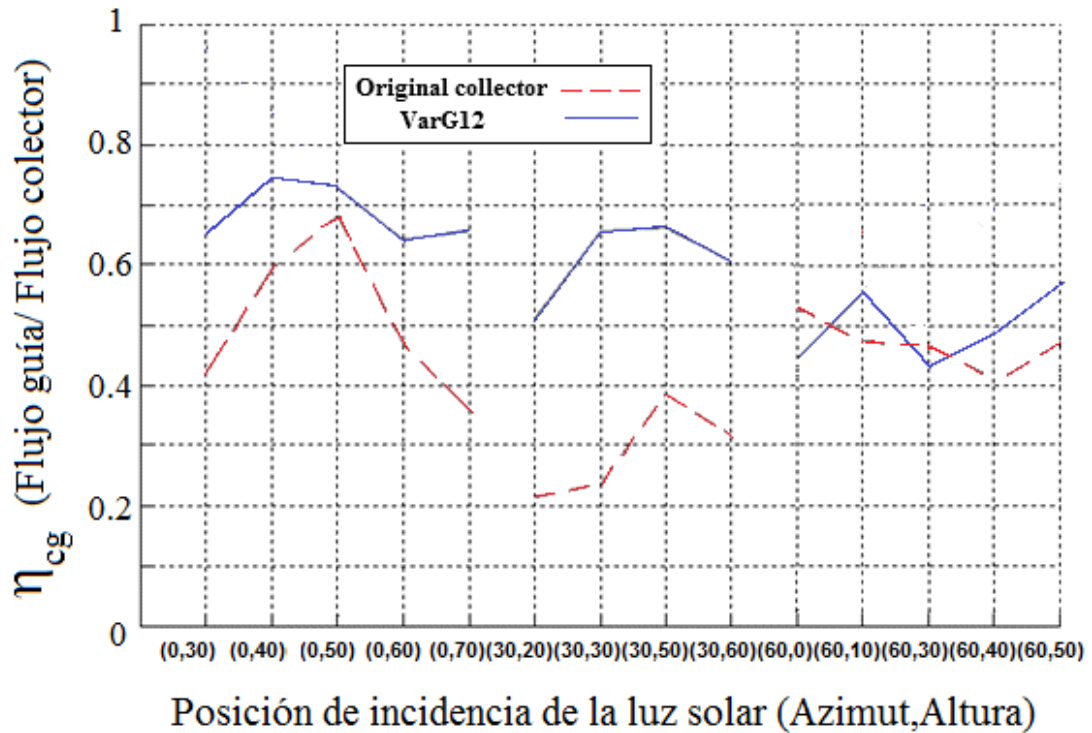


Figura 3.28: Eficiencia colector+guía para modelo original y Var_G12

3.3.4. Simulación del sistema de iluminación completo

De aquí en adelante el análisis considerará el sistema en su totalidad (no simplemente el colector y la guía), y se analizará el comportamiento del sistema de extracción (luminarias) bajo el flujo inyectado por el modelo de colector optimizado *VarG_12*. Las simulaciones proporcionarán información sobre el nivel de iluminación y mapas de irradiancia en el plano de trabajo, y en última instancia serán comparados con los resultados experimentales proporcionados por el prototipo real.

Para llevar a cabo una comparación precisa con el prototipo real será necesario aumentar el número de rayos trazados por la fuente. Con este propósito se recurrirá al sistema de división o segmentación de la fuente en determinadas simulaciones que implican especial complejidad. Esta técnica consiste en dividir la superficie total de emisión en un conjunto de fuentes de menor tamaño y número de rayos para poder simular cada una de manera independiente (y posteriormente sumar los resultados del conjunto). De este modo se dividen los requisitos computacionales entre los diversos procesos de simulación. En cuanto al tiempo de ejecución puede minimizarse siempre que los subprocesos de simulación se aborden simultáneamente en diferentes equipos de computación.

SIMULACIÓN POR SEGMENTACION DE LA FUENTE

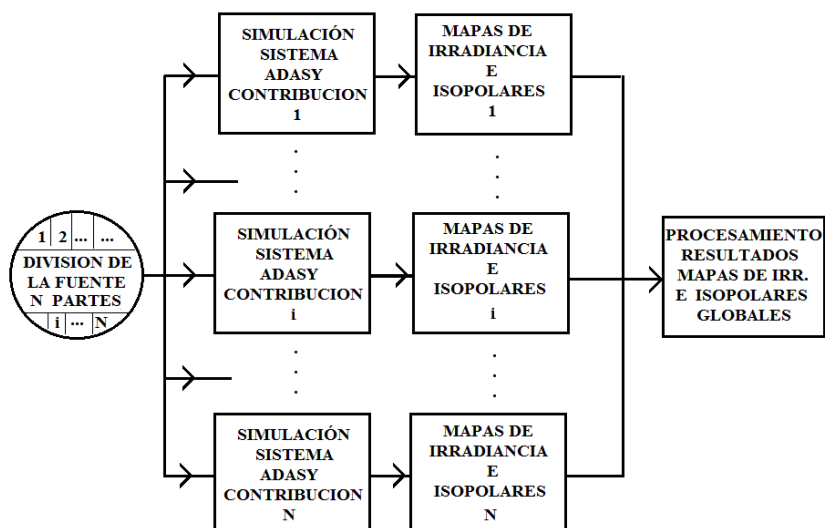


Figura 3.29: Trazado por segmentación de la fuente. Optimización de recursos

Mediante esta técnica son posibles trazados de varios millones de rayos para un sistema complejo de múltiples superficies reflectantes, que por el método convencional serían inviables. Como consecuencia de aplicar este método se puede estudiar con garantías la distribución del flujo y el deslumbramiento del sistema.

Para la ejecución de las posteriores simulaciones se muestrea la trayectoria aparente del Sol por medio de 7 duplas de ángulos de incidencia (fig. 3.30). Gracias al modelo matemático que describe la posición aparente del Sol (sección 3.1.1) se pueden derivar los instantes temporales a los que corresponden dichos ángulos solares.

Azimut (°)	Altura (°)
0	60
30	30
60	60
69	37
16	27
56	56
75	33

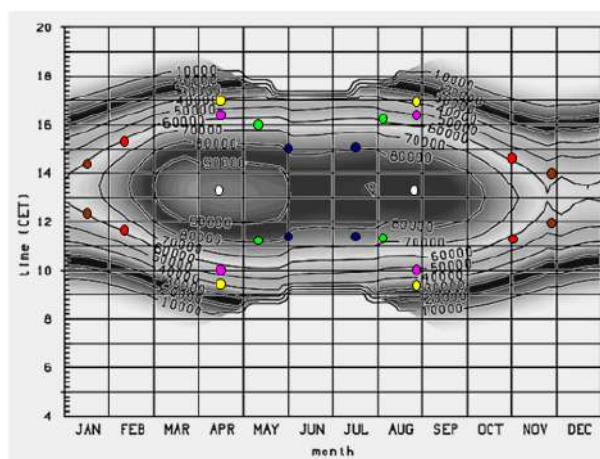


Figura 3.30: Posiciones solares simuladas

Además se establecen las dimensiones del plano de iluminancia (ancho $W=5m$, largo $L=11m$) situado a una distancia $H=1.85m$, de la guía de luz. La reflectancia del colector será $\rho_{t_{cpc}} = 0.95$, mientras que la reflectancia de la guía de luz es $\rho_{t_{cpc}} = 0.97$, (de dimensiones $1m \times 0.3m \times 10m$), reflectancia que coincide con la de las luminarias.

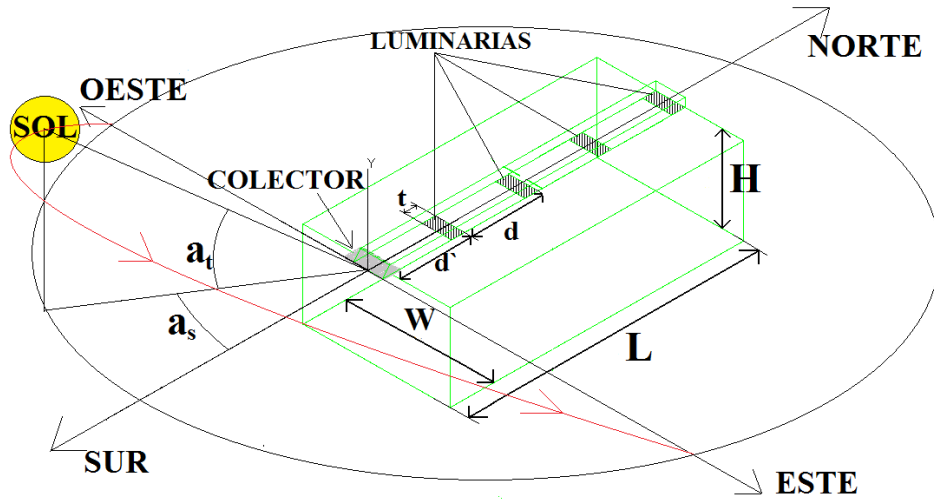


Figura 3.31: Simulación sistema iluminación completo

En el diseño de las luminarias solares se persigue tanto un equilibrio de flujo extraído por cada luminaria como una eficiencia global máxima del conjunto de las luminarias. Para cuantificar estos dos objetivos se definen tanto las eficiencias individuales de cada luminaria como la eficiencia global del sistema de extracción [ec. 3.22]:

$$\eta_{lum} = \frac{\Phi_{OUT_lum}}{\Phi_{IN_colec}} \quad \eta_{global_lum} = \sum_{i=1}^4 \eta_{lum}. \quad (3.22)$$

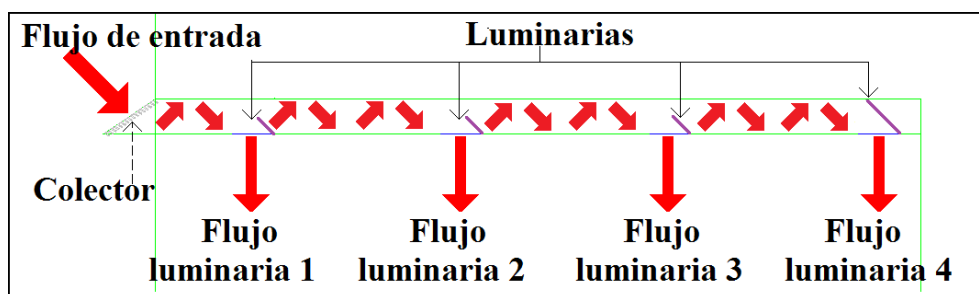


Figura 3.32: Flujo de cada luminaria

Para el diseño de las luminarias solares se contemplan distintas opciones de geometrías reflectantes (fig. 3.33) que son integradas en la guía, y sus parámetros de diseño son optimizados con respecto a los objetivos descritos en la ecuación [ec. 3.22].

La optimización de las luminarias no requiere un elevado número de rayos ya que el propósito no es obtener imágenes detalladas de los planos de irradiancia sino obtener una estimación del flujo emitido por cada luminaria. Esta ventaja en cuanto al tiempo de ejecución permite evaluar todo el rango de valores de los parámetros de diseño de las luminarias con una gran precisión.

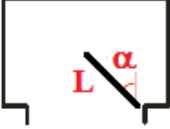



OPCIONES DE DISEÑO DE LUMINARIAS			
Espejo plano		Espejo concavo	
	Parámetros: -Longitud L -Ángulo α		Parámetros: -Longitud L -Ángulo α -Radio R
Red de Ronchi		Red de Ronchi concava	
	Parámetros: -Longitud L -Ángulo α -Duty cycle		-Longitud L -Ángulo α -Duty cycle -Radio R

Figura 3.33: Opciones de diseño luminarias extractoras

La red de Ronchi consiste en una geometría cuya superficie total es ajustable. De este modo la red de Ronchi puede solapar parte de su superficie reflectante caracterizándose la configuración adoptada mediante el parámetro “duty cycle” (DC). Entre las opciones consideradas la red de Ronchi plana demuestra un mejor equilibrio de flujo individual en cada luminaria.

La red de Ronchi puede variar la superficie reflectante presentada en cada luminaria independientemente. El parámetro DC varía desde el valor mínimo (para la máxima superficie solapada) DC_{min} hasta el doble de dicha cantidad cuando se proyecta la superficie reflectante total. Mediante la elección de la red de Ronchi se consigue equilibrar el flujo extraído en cada luminaria ya que esta red no condiciona el flujo extraído, de manera tan acentuada, al ángulo de propagación de la luz y número de reflexiones a lo largo de la guía. Esto se debe a que no presenta una superficie reflectante continua y además posibilita en el prototipo un ajuste manual de sus parámetros. Como consecuencia este grado de libertad reduce la dependencia del sistema frente a las variaciones temporales y condiciones climáticas.

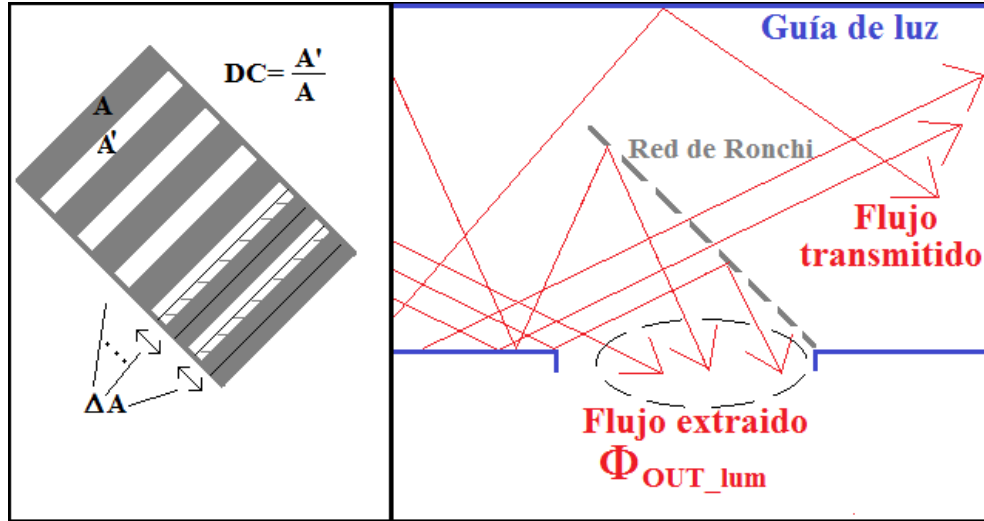


Figura 3.34: Esquema de la red de Ronchi

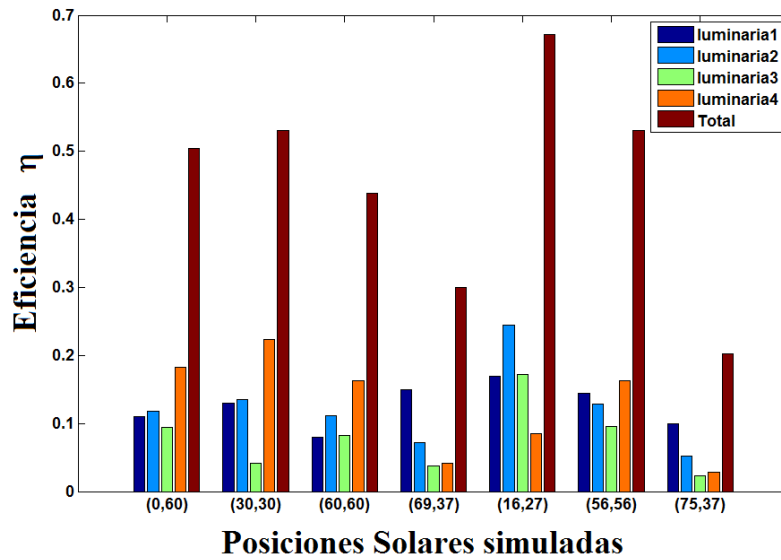


Figura 3.35: Eficiencia luminarias

Los resultados referentes a la eficiencia del sistema de extracción son prometedores (fig. 3.35) ya que se consigue aprovechar mas de la mitad de la luz incidente en el colector para la mayor parte de las posiciones estudiadas. Una vez determinadas las características de las luminarias extractoras es posible obtener los resultados del sistema completo.

Para medir el comportamiento global de la configuración del sistema de iluminación se emplean dos magnitudes, la Eficiencia total η y la uniformidad U de la radiación incidente, ambas medidas en el plano de trabajo (PT).

$$\eta = \frac{\Phi_{PT}}{\Phi_{IN\ colec}}, \quad U = \frac{\bar{\Phi}_{PT}}{Max(\Phi_{PT})}. \quad (3.23)$$

A partir de ahora se aplicará el método de simulación por división de fuente anteriormente mencionado ya que se necesita obtener una imagen de los planos de iluminación lo más precisa posible. La uniformidad, en el caso del sistema analizado, se puede considerar representativa si el número de rayos aumenta hasta varios millones. En los siguientes resultados se han trazado 4 millones y el plano de trabajo se registrará en una matriz de 1500 x 4500 pixels.

Los valores de uniformidad para la configuración actual del sistema (referido como sistema básico especular a partir de ahora) se aprecian en el diagrama de barras de la figura 3.36.

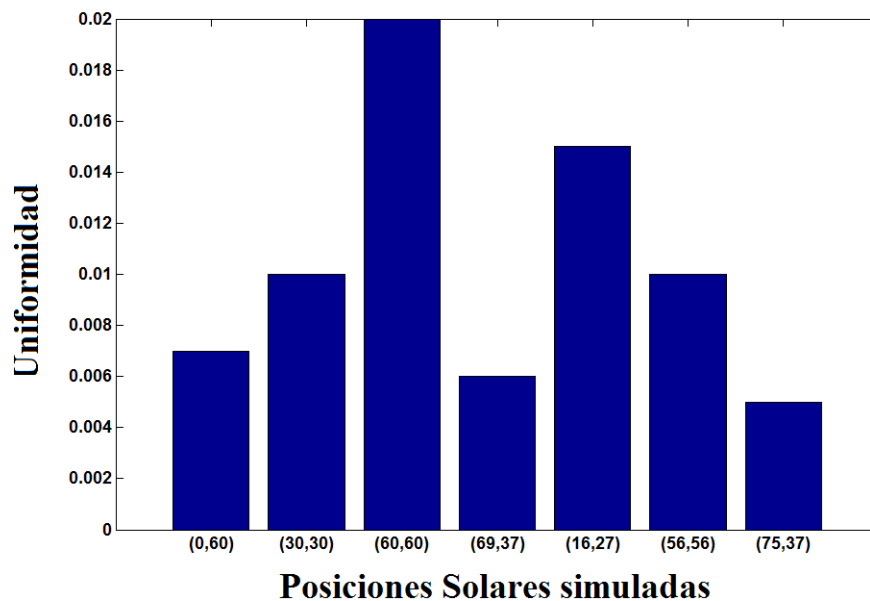


Figura 3.36: Uniformidad sistema básico especular

La CIE (Comisión internacional en iluminación) promueve, mediante una serie de recomendaciones [47] la uniformidad de iluminación en el espacio de trabajo como una parámetro importante para evitar los deficits lumínicos. Considerando los beneficios psicológicos y físicos de los sistemas de iluminación solar se deben de considerar criterios específicos en cuanto a niveles de uniformidad para los sistemas de iluminación natural (Collins, 1975,1976).

Para establecer el criterio cuantitativo para los niveles de uniformidad en iluminación se pueden emplear una serie de indicaciones provenientes de guías técnicas relacionadas con tareas de iluminación en el entorno de trabajo [48]. Estas recomendaciones indican que el factor entre el nivel medio y máximo de iluminación en la zona de trabajo no debe ser menor de 0.5. Sin embargo el criterio de uniformidad no debe ser tan riguroso cuando se aplica a sistemas de iluminación natural. Además hay que tener en cuenta que este sistema de iluminación solar está diseñado para complementar, y no sustituir, el sistema de iluminación convencional. La distribución equilibrada de la iluminación natural lleva a reducir el mínimo de iluminancia aceptable como varios estudios indican [47, 49]. Además la calidad espectral de la luz natural puede compensar la menor iluminancia obtenida en ciertas zonas de la distribución que hacen caer el factor de uniformidad.

Sin embargo los niveles de uniformidad de nuestro sistema mostrados en la figura 3.36 son excesivamente bajos, la falta de uniformidad del sistema es causada por el flujo excesivamente concentrado (“hot spots”) en determinadas zonas del plano de irradiancia. Esta concentración se puede distribuir en un area mas amplia mediante la introducción de materiales difusores situados al inicio de la guía de luz. Concretamente Alanod, empresa especializada en materiales de recubrimiento en aluminio, dispone de un producto llamado “Softgloss Miro 720” diseñado a partir de un perfil sinusoidal que proporciona una apertura del haz de luz parametrizable.

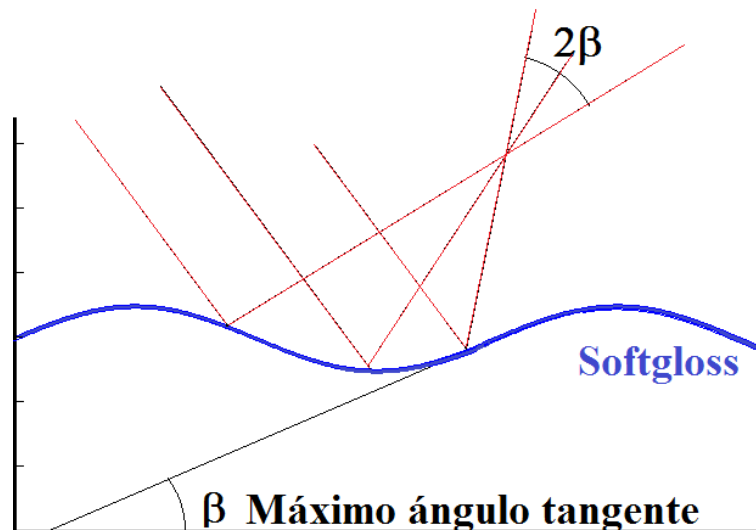


Figura 3.37: Material Softgloss Miro 720

No se conocen los valores exactos de los parámetros del material Softgloss ya que Alanod no pone estos datos a disposición del consumidor, para caracterizar dichos materiales se procede a la Microscopía Confocal. El sólido difusor empleado en las simulaciones toma la media estadística de los parámetros obtenidos en la topografía, además este difusor se escala uniformemente (conservando las propiedades ópticas) para aumentar el sólido y reducir el número de ondulaciones y por tanto las superficies introducidas en la simulación (reduciendo la carga de ejecución).

Se tendrán en cuenta distintas orientaciones del material Softgloss así como la introducción de vidrios rugosos y celosías de apantallamiento. La opción que mejores resultados ofrece es el difusor Softgloss colocado transversalmente a la guía de luz sin ningún otro sistema difusor o micro rugosidad salvo un vidrio rugoso en la salida de la luminaria. Este vidrio tiene dos funciones primordiales, aumentar la uniformidad e impedir la acumulación de residuos dentro de la guía. Los resultados de esta configuración se muestran a frente al sistema sin ningún elemento difusor (fig. 3.38) para diferentes posiciones de incidencia solar.

Las imágenes de los planos de irradiancia (fig. 3.38) se han procesado mediante un filtro de media móvil con un kernel de convolución que afecta a los 10 x 10 píxeles vecinos. Este filtro es necesario para homogeneizar la irradiancia evitando valores extremos que falseen la uniformidad. También es aplicada a la imagen una escala logarítmica para diferenciar los cambios de irradiancia inapreciables en escala lineal.

Se observa claramente (fig 3.38) que el efecto del Softgloss permite romper la concentración excesiva de determinadas zonas favoreciendo la uniformidad. Del mismo modo introduce una componente difusa al comienzo de la guía que aumenta el número de reflexiones y perjudica la eficiencia del sistema como se observa en los resultados de la configuración con difusor (tabla 3.2).

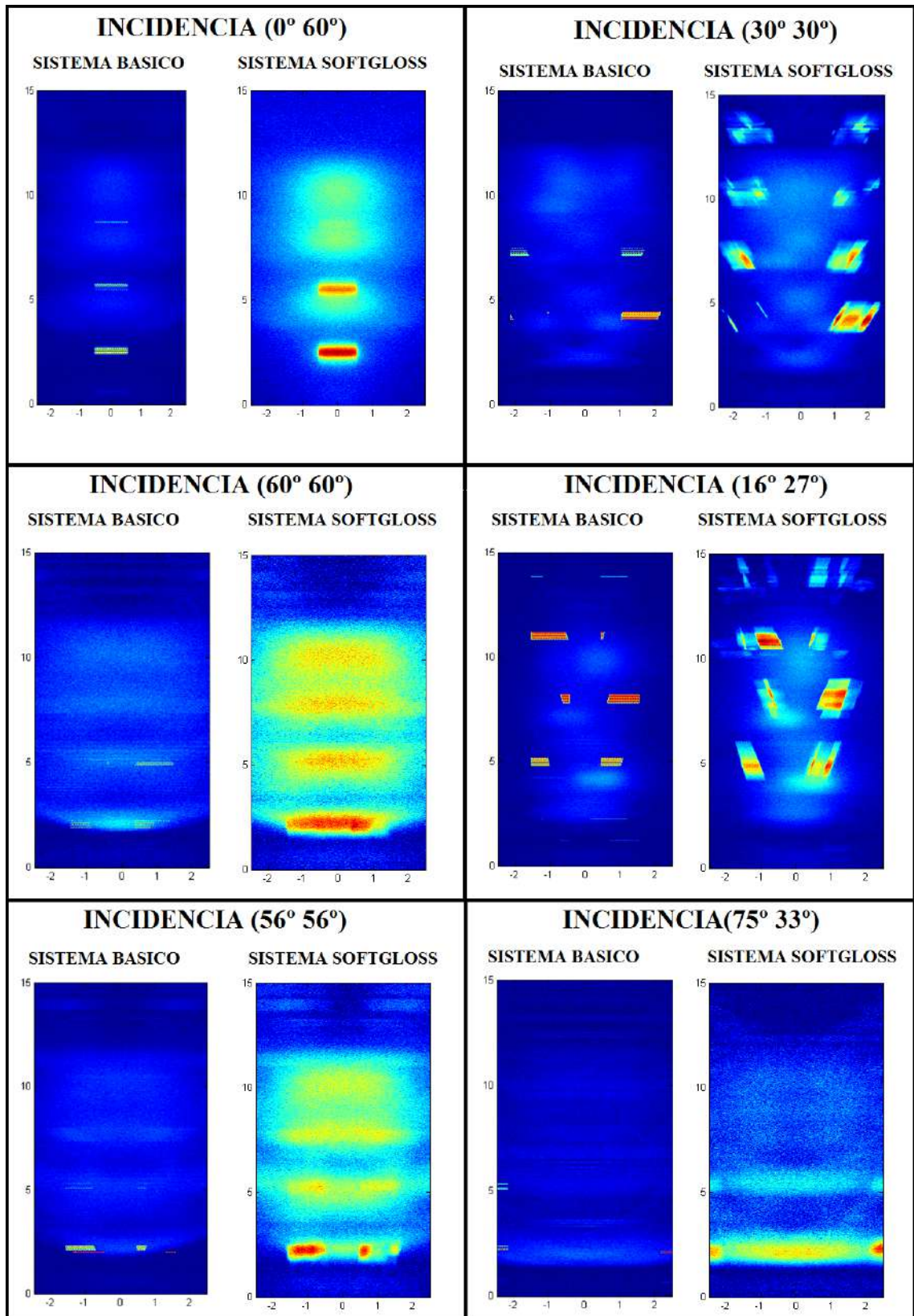


Figura 3.38: Planos de irradiancia sistema básico especular frente a difusor Softgloss

	Sistema básico especular		Sistema difusor softgloss	
Angulo de incidencia	Eficiencia	Uniformidad	Eficiencia	Uniformidad
0 60	51 %	0.007	41.6 %	0.07
30 30	54.3 %	0.01	45.6 %	0.08
60 60	42 %	0.02	32.3 %	0.24
69 37	26.9 %	0.006	15.4 %	0.08
16 27	64.2 %	0.015	51.6 %	0.09
56 56	46.3 %	0.01	36.1 %	0.17
75 33	16.8 %	0.005	7.9 %	0.1

Tabla 3.2: Resultados configuraciones especular básica y difusor Softgloss

Al añadir el material difusor se obtiene una mejora notable en términos de uniformidad, que aumenta cerca del 9 % de media. Este efecto tiene como contrapartida una disminución de la eficiencia un factor medio del 10 %, sin embargo esta pérdida de flujo luminoso es asumible ya que el difusor logra distribuir la luz de forma más homogénea el plano de trabajo aumentando las opciones de aprovechamiento por los ocupantes de la estancia. Los anteriores resultados no tiene en cuenta un acristalamiento colocado a la salida de las luminarias que consiste en un vidrio rugoso. Este nuevo elemento difusor aumenta notablemente la uniformidad hasta valores próximos a la recomendación para sistemas convencionales de iluminación (0.5) a costa de introducir otro factor de pérdidas cercano al 10 %.

Ahora que se ha alcanzado la configuración óptima del sistema de iluminación es posible caracterizar su comportamiento de manera más detallada a lo largo de todo el año. Para ello se aumenta el número de posiciones aparente del Sol bajo las que se simula el comportamiento del sistema de iluminación.

De esta forma se genera un diagrama de Onion más completo que no requiere de simulaciones exhaustivas ya que su objetivo no es obtener planos detallados de irradiancia ni calcular la uniformidad del sistema. Este diagrama de Onion se ha calculado con medio millón de rayos por simulación.

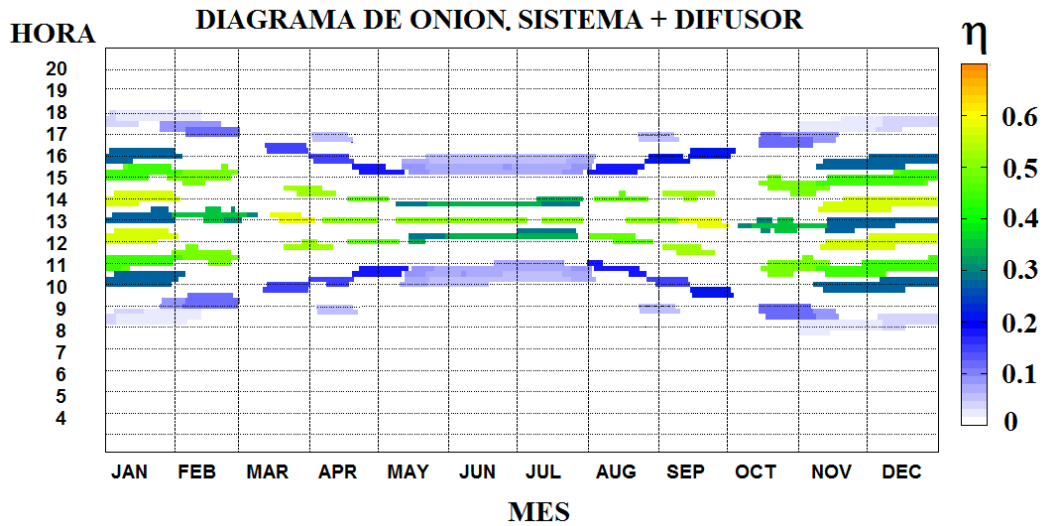


Figura 3.39: Diagrama de Onion. Configuración Difusor

La figura 3.39 muestra que la eficiencia del sistema alcanza un valor medio aproximado del 40 % para la franja horaria central que abarca de 10:30 a.m a 15:30 p.m. Este valor medio de la eficiencia se debe corregir con el 10 % de pérdidas por el vidrio rugoso a la salida de las luminarias que no ha sido contemplado, sin embargo sigue siendo un valor óptimo si se toma como referencia sistemas anidólicos de iluminación solar de estructura similar presentes en la literatura [7, 50]. En estos sistemas el límite de eficiencia se establece alrededor del 32 % debido a pérdidas se asociadas a cada componente. A continuación se especifica la eficiencia media de cada componente:

- Doble acristalamiento de entrada 74 %
- colector anidólico 72 % (en función del modelo)
- guía de luz 68 % (en función del material y longitud)
- Acristalamiento de salida 84 %

En nuestro sistema de iluminación la eficiencia del conjunto colector-guía supera en un 16 % la eficiencia prevista por un sistema estándar (fig. 3.28), sin embargo las pérdidas por el acristalamiento son ligeramente mayores y hay que considerar también las pérdidas que introducen las luminarias extractoras que no están presentes en el estudio de los sistemas estándar [50]. Analizando estos factores es lógico que la eficiencia global del sistema se equipare con la de los sistemas anidólicos de referencia, sin embargo muestra otras ventajas en comparación, como son un nivel superior de uniformidad e independencia temporal, debido al diseño innovador del colector y de las luminarias.

3.3.5. Medidas del prototipo

Con el fin de validar las simulaciones llevadas a cabo y respaldar el comportamiento del diseño del sistema iluminación se ha fabricado un prototipo del sistema por parte de la empresa Lledó iluminación. El excesivo tamaño del sistema de iluminación hace necesario escalar el prototipo y, aunque en principio se consideró una escala lineal, finalmente se ha fabricado un prototipo a diferente escala en cada eje.

Dimensiones (metros)	Prototipo	Sistema simulado
Ancho de la guía	0.57	1.1
Alto de la guía	0.30	0.5
Largo de la guía	5.79	11
Distancia al plano análisis	1.85	1.85
Ancho del plano de análisis	5	5
Largo del plano de análisis	9	11

Tabla 3.3: Dimensiones del prototipo



Figura 3.40: Prototipo sistema iluminación

El modelo de colector *VarG_12* ha sido fabricado por inyección en molde y vaporización, y se separa del exterior mediante un doble acristalamiento para prevenir la condensación y mantener un buen aislamiento. Para describir en detalle la integración del colector dentro del sistema de iluminación se muestra un esquema del acristalamiento (fig. 3.41) y la posición relativa del mismo respecto a la guía de luz.

La guía de luz está recubierta de un material de alta reflectividad (Miro Silver) y acoplada al cierre externo. Debido a que el conjunto cerramiento-colector-guía está totalmente sellado el mantenimiento es extremadamente simple y solo requiere una limpieza periódica del exterior del cerramiento de cristal del colector.

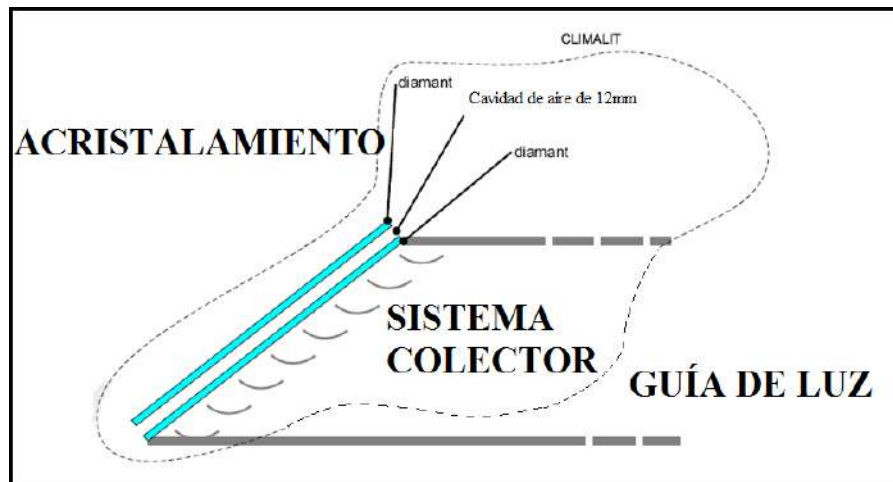


Figura 3.41: Esquema del acristalamiento. Integración del sistema colector

Este prototipo se ha empleado para tomar medidas dentro de un simulador solar que se encuentra en las instalaciones de la empresa Bartenbach y cuya fuente adopta las posiciones de la fuente contempladas en las simulaciones para así verificar los resultados obtenidos por trazado de rayos. Al mismo tiempo se integran los diseños de luminarias extractoras para evaluar el sistema completo. Las medidas del plano de irradiancia han sido tomadas por Bartenbach mediante una cámara CCD calibrada.

Los resultados del prototipo muestran una eficiencia inferior, en la mayor parte de posiciones solares analizadas, con respecto a las simulaciones. Este desajuste, inferior al 10% (fig. 3.43), puede deberse a que las dimensiones del prototipo no son las mismas que las del sistema simulado además de las pérdidas causadas por las imperfecciones y desajustes propios de cualquier prototipo.

Las imágenes del plano de irradiancia generadas por el prototipo conservan una gran semejanza (fig. 3.43) respecto a la distribución de flujo obtenida por las simulaciones ejecutadas a lo largo de este capítulo. Las zonas donde se localizan las mayores concentraciones de flujo coinciden, teniendo en cuenta el factor de escala aplicado a las dimensiones del prototipo.

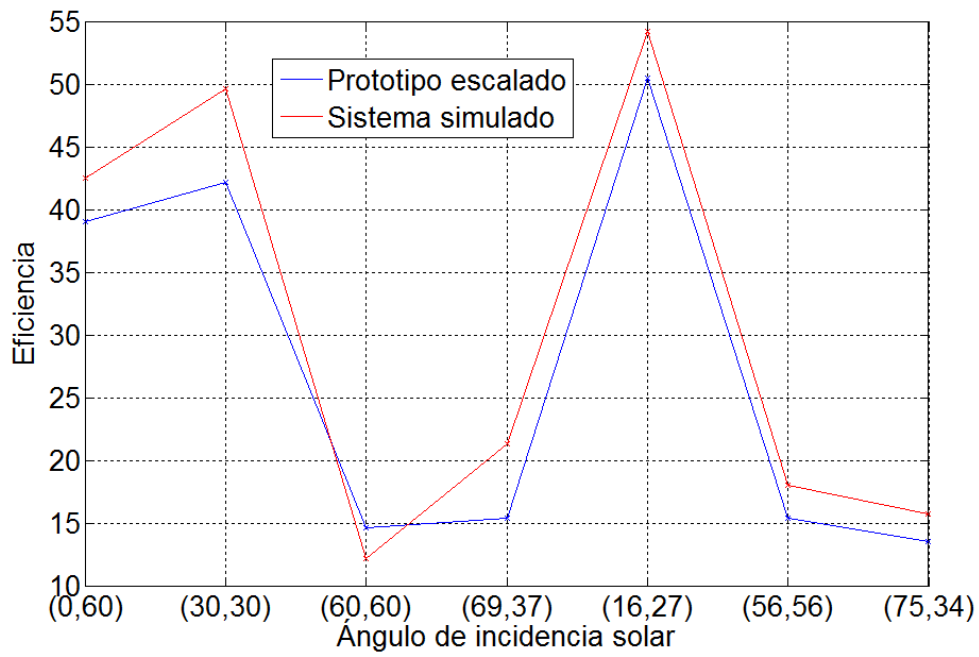
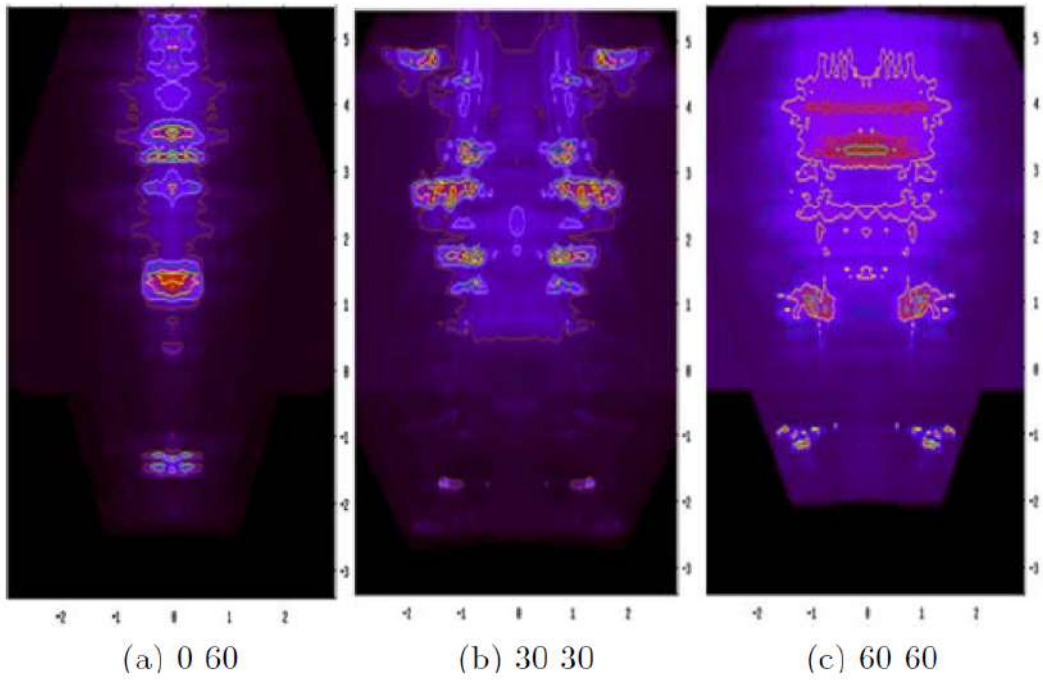


Figura 3.42: Resultados del prototipo escalado frente a las simulaciones

En la actualidad el sistema de iluminación descrito en esta sección se encuentra integrado en las instalaciones de la empresa Lledó iluminación, en Mostoles, donde asegura un nivel de iluminación medio de 300-400lx durante las horas de trabajo en un area de 4m x 10m, es decir $40m^2$.

PROTOTIPO



SIMULACIÓN

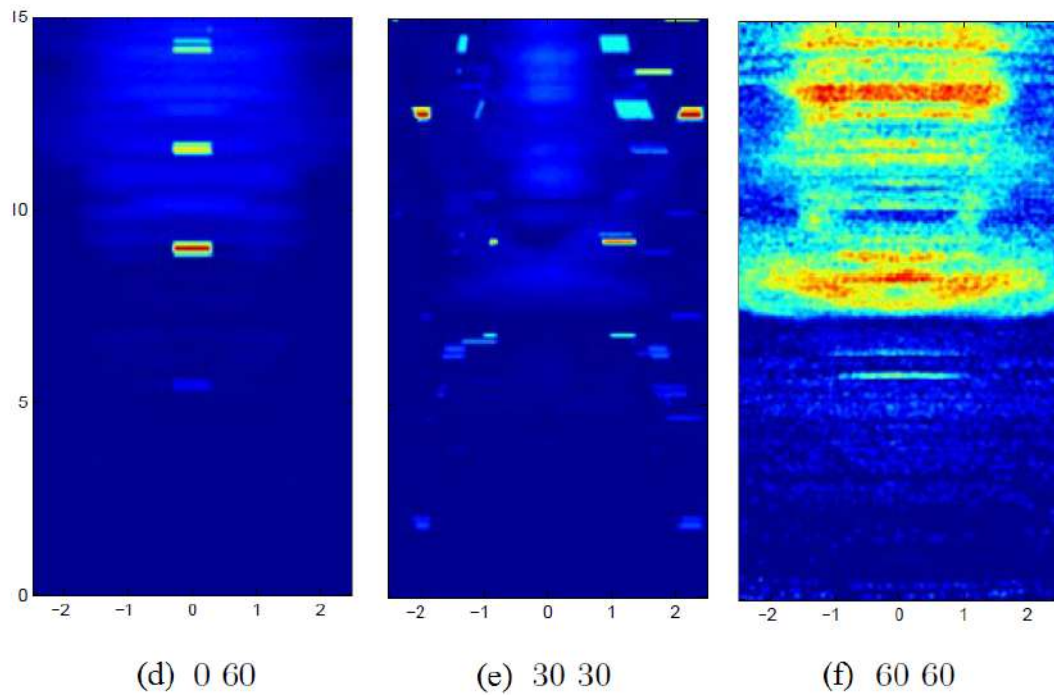


Figura 3.43: Planos de irradiancia. Prototipo frente a simulaciones

Bibliografía

- [1] R. Leutz, A. Suzuki “Nonimaging Fresnel Lenses: Design and Performance of Solar Concentrators” Springer, Berlin (2001)
- [2] W. T. Welford, R. Winston “The Optics of Nonimaging Concentrators” Light and Solar Energy, Academic Press, New York (1978)
- [3] J.C. Miñano, J.C. González “ New method of design of nonimaging concentrators” Applied Optics, vol. 31, pp. 3051-3060 (1992)
- [4] G. Smestad, H. Ries, R. Winston, E. Yablonovitch, “The thermodynamic limits of light concentrators” Sol. Energ. Mat. vol.21, pp.99-111, (1990)
- [5] J. L. Scartezzini, G. Courret “Anidolic Daylighting systems” Solar Energy, vol. 73, no. 2, pp. 123–135, (2002)
- [6] J. Dengler. V. Wittwer. “Glazings with granular aerogels” SPIE, vol. 255, pp. 718-727 (1994)
- [7] F. Linhart, S. K. Wittkopf, J. L. Scartezzini “Performance of Anidolic Daylighting Systems in tropical climates – Parametric studies for identification of main influencing factors” Solar Energy, vol. 84, pp. 1085–1094 (2010)
- [8] S. Wittkopf, L. O. Grobe, D. Geisler-Moroder, R. Compagnon, J. Kampf, F. Linhart, J. L. Scartezzini “Ray tracing study for non-imaging daylight collectors” Solar Energy, vol. 84, 986–996 (2010)
- [9] American Society for Testing and Materials. “Standard solar constant and air mass zero solar spectral” irradiance tables, ASTM E490-73a. Philadelphia: ASTM. (1987)
- [10] Illuminating Engineering Society of North America. (IESNA). “Nomenclature and Definitions for Illuminating Engineering” ANSI/IES, (1996)

- [11] CLEANERGY SOLAR - Portal sobre la energía limpia, renovable y eficiente.
<http://www.cleanergysolar.com/2011/05/07/tutorial-tablas-azimut-y-alturas-solares-segun-la-latitud/>
- [12] Herramientas para los consumidores y los diseñadores de la energía solar.
<http://www.sunearthtools.com/>
- [13] M. Gulin, M. Vasak, M. Baotic “Estimation of the global solar irradiance on tilted surfaces” 17th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (2013)
- [14] W. Zhang, C.S. Ih, H.F. Yan, M.J. Chang “Photovoltaic concentrator using a holographic optical element” *Appl. optics*, vol. 27, n°16, pp. 3556-3560 (1988)
- [15] J. Strong “Achromatic Doublet Lenses for Infrared Radiation”, *Applied Optics*, vol. 10, Issue 6, pp. 1439-1443 (1971)
- [16] V. N. Mahajan. “Optical imaging and aberrations: Ray geometrical optics” SPIE Optical Engineering Press (1998)
- [17] E. Lorenzo “Chromatic aberration effect on solar energy systems using Fresnel lenses”, *Appl. Optics*, vol. 20, no. 21, pp. 3729 - 3732 (1981)
- [18] E. Hecht “Optics (4th Edition)” Addison Wesley Longman (2001)
- [19] G.K. Skinner “Design and imaging performance of chromatic diffractive-refractive x-ray and gamma-ray Fresnel lenses” *Appl. Optics*, vol. 43, no. 25, pp. 4845-4853 (2004)
- [20] E.M. Kritchman, A.A. Friesem, G. Yekuiteli, “Highly concentrating Fresnel lenses” *Applied optics*, vol. 18, no. 15, pp. 2688- 2695 (1979)
- [21] F. Languy, C. Lenaerts, J. Loicq, S. Habraken, T. Thibert “Performance of solar concentrator made of an achromatic Fresnel doublet measured with a continuous solar simulator and comparison with a singlet” *Solar Energy Matters and Solar Cells*, vol. 109, pp. 70-76 (2013)
- [22] . M.Z Shvarts, V.M. Andreev, V.S. Gorohov, V.A. Grilikhes, A.A. Soluyanov, N.H. Timoshina, E.V. Vlasova, E.M. Saharevich “Flat-Plate Fresnel Lenses with improved concentrating capabilities: Designing, Manufacturing and testing” *Photovoltaic Specialists Conference. 33rd IEEE* (2008)

- [23] A. Davis, K. Levesque, S. Wilt “Prism peak rounding in injection molded Fresnel lens solar concentrators” Conference paper, Optifab (2011)
- [24] K. Maekawa, Y. Hachisu, H. Ohmori, K. Katahira, Y. Takizawa, Y. Takahashi, A. Zuccaro, R. Ypung “JEM-EUSO lens manufacturing” 32ND International Cosmic Ray Conference, Beijing (2011)
- [25] “Best Research-Cell Efficiencies” Energy Informative (2014).
<http://energyinformative.org/nrel-efficiency-record-two-junction-solar-cell>
- [26] “Fresnel lens brochure of the Fresnel Technologies Inc” (2011)
www.fresneltech.com/materials.html
- [27] F. Languy, C. Lenaerts, J. Loicq, S. Habraken “Experimental Results of Hybrid and Refractive achromatic Doublets Made of PC and PMMA” Optics for Solar Energy, Conference Paper, SM2A, (2012)
- [28] M. Victoria, C. Domínguez, I. Antón, G.l. Sala “Comparative analysis of different secondary optical elements for aspheric primary lenses” Optics Express, vol. 17, Issue 8, pp. 6487-6492 (2009)
- [29] M. Laikin. “Lens Design” CRC Press, 4th edition, pp. 44-49 (1991)
- [30] G. M. Masters. “Renewable and Efficient Electric Power Systems” John Wiley & Sons (2004)
- [31] Lighting Futures “To Capture the Sun and Sky” Polytechnic Institute Lighting Research Center, vol. 1, no. 4. ed. (1998)
- [32] J. Heerwagen, J. A. Johnson “Energy Effectiveness and the Ecology of Work: Links to Productivity and Well-Being” The American Council for an Energy-Efficient Economy, pp. 123–132 (1998)
- [33] G. Franta, K. Anstead “Daylighting Offers Great Opportunities” Window & Door Specifier-Design Lab, Spring, pp. 40-43. (1994)
- [34] J. Pierson “If Sun Shines In, Workers Work Better, Buyers Buy More” The Wall Street Journal, pp. 1-7 (1995)
- [35] W.R. Pape “At What Cost Health? Low Cost, As It Turns Out” Inc. Online. (1998)
<http://www.inc.com/extra/stories/06169821.html>

- [36] G. K. Oral, A. K. Yener, N. T. Bayazit “Building envelope design with the objective to ensure thermal, visual and acoustic comfort conditions” *Building and Environment*, vol 39, pp. 281-287 (2004)
- [37] F. Linhart, K.F. Wittkopf, J.L Scartezzini “Performance of Anidolic Daylighting Systems in tropical climates – Parametric studies for identification of main influencing factors” *Solar Energy*, vol. 84, pp. 1085–1094 (2010)
- [38] J.H Kampf, D. Robinson “Optimization of building form for solar energy utilization using constrained evolutionary algorithms” *Solar Energy and Building*, vol. 42, pp. 807-814 (2010)
- [39] M. González-Montes, D. Vázquez-Moliní, A. García-Botella, A. A. Fernández-Balbuena, T. Galán, L. García,W. Polh, E. Bernabéu “Horizontal daylighting system for office buildings” *Energy and Buildings*, vol. 67, pp. 525-530 (2013)
- [40] R. Winston “Principles of solar concentrators of novel design” *Solar Energy*, vol. 16, pp. 16:89–95. (1974)
- [41] J. O’Gallagher “Nonimaging Optics in Solar Energy” Morgan & Claypool Publishers (2008)
- [42] P. Sansoni, D. Fontani, F. Francini, D. Jafrancesco, G. Longobardi “Optical design and development of fibre coupled, compact solar collectors” *Lighting Research & Technology*, vol. 39, no. 1, pp. 17–30 (2007)
- [43] A. García-Botella, A. A. Fernández-Balbuena, E. Bernabéu, D. Vazquez, A. Gonzalez-Cano “Hyperparabolic concentrators”, *Appl. Opt.* vol. 48, no. 4, (2009)
- [44] S. A. Kalogirou “Solar thermal collectors and applications” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 30, pp. 231–295 (2004)
- [45] “The European Database of Daylight and Solar Radiation” (2013) <http://www.satel-light.com/>
- [46] “Solar Energy Services for Professionals” (2012) <http://www.soda-is.com/>
- [47] International Commission on Illumination “Guide on interior lighting” Paris: The Commissions, Publication CIE 2nd edition (1986)
- [48] CIBSE “Code for interior lighting” Chartered Institution of Building Services Engineers (1994)

- [49] M. Fontoynt “Perceived performance of daylighting systems: lighting efficiency and agreeableness” *Solar Energy*, vol. 73, no. 2, pp. 83–94 (2002)
- [50] G. Cow-ret, J. L. Scartezzini, D. Francioli, J. J. Meyer “Design and assessment of an anidolic light-duct” *Energy and Buildings*, vol. 28, pp. 79-99 (1998)

Capítulo 4

Diseños ópticos para aplicaciones de fuentes LED

En este capítulo se recogen una serie de aplicaciones cuya fuente de luz en común son los dispositivos LED (Light Emitting Diodes). Estas aplicaciones se enmarcan principalmente dentro del campo de la señalización, iluminación e instrumentación. Para describir este tipo de fuentes es antes necesario detallar el funcionamiento así como las principales magnitudes que caracterizan a los LEDs. El diseño de cada sistema óptico será planteado teóricamente para después sufrir un proceso de optimización y finalmente se fabricará un prototipo para corroborar los resultados con medidas experimentales. A lo largo de este capítulo se emplearán distintos tipos de fuentes LED cuyo modelo virtual será aplicado a las simulaciones y posteriormente el dispositivo físico de la fuente será integrado en el prototipo.

4.1. Introducción

Los diodos emisores de luz o LEDs se vienen usando desde la década de 60, sin embargo la tecnología empleada ha cambiado notablemente desde entonces. Los primeros LEDs comerciales se desarrollaron en el año 1962 combinando Galio, Arsénico y Fósforo (GaAsP) y emitían exclusivamente luz roja de baja intensidad empleándose generalmente como pilotos indicadores de luz de diversos dispositivos electrónicos. La evolución desde los primeros modelos de LED ha sido enorme, y recientemente los inventores del LED azul [1] han sido galardonados con el premio Nobel que reconoce la revolución de este tipo de fuentes de luz en la iluminación actual. Este hito permitía completar la matriz RGB imprescindible para obtener luz blanca con fuentes LED.

Los diodos actuales están basados en la unión de dos cristales semiconductores dopados con impurezas de otro metal o compuesto químico. Dependiendo de la naturaleza química de estas impurezas se formarán en el cristal enlaces covalentes deficitarios en electrones provocando que los portadores mayoritarios sean huecos (semiconductor tipo P) o por el contrario se formarán enlaces en los que los portadores mayoritarios serán electrones (semiconductor tipo N). La unión de un semiconductor de cada tipo se conoce como unión PN.

Cuando se juntan dos portadores de distinto signo, un electrón libre y un hueco, se produce el fenómeno conocido como recombinación. Existen dos tipos de recombinación de portadores:

- la recombinación no radiante, que se da en semiconductores de gap indirecto (como el Silicio y Germanio) en los cuales el rendimiento de la emisión de luz es bastante pobre ya que la recombinación entre los electrones de la banda de conducción con los huecos de la banda de Valencia genera fonones (Calor).
- la recombinación radiante, que se observa en semiconductores de gap directo (como el Arseniuro de Galio NaGa) en la cual la energía se libera en forma de radiación cumpliéndose:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}, \quad (4.1)$$

donde E es la energía del fotón, c la velocidad de la luz ($3 \cdot 10^8$ m/s), y h la constante de Planck ($6.624 \cdot 10^{-34}$ Js).

Un diodo semiconductor convencional permite la corriente de eléctrica en un solo sentido $P \rightarrow N$ (debido al flujo de electrones en el sentido opuesto) sin embargo no emite luz ya que la recombinación producida es no radiante. El dispositivo LED sin embargo es un diodo semiconductor que emite luz cuando se polariza de manera directa y conduce una corriente eléctrica a través de él. El semiconductor empleado en la fabricación del LED es la clave para favorecer la recombinación radiante que generará la energía en forma de luz.

La luz emitida por un LED, cuyo espectro se caracteriza por un ancho de banda reducido, se corresponde con una determinada frecuencia del espectro electromagnético que depende de la diferencia energética de la banda prohibida, o gap, del material empleado para fabricar el dispositivo.

En la actualidad los dispositivos LED son capaces de emitir una radiación constante de alta intensidad y relativamente bajo consumo asegurando a su vez un tiempo de vida superior a las lámparas convencionales. El uso de las nuevas tecnologías de iluminación basadas en LED proporciona soluciones con un mayor rendimiento, y con reducciones de consumo entorno al 70 % [2]. Las aplicaciones de las fuentes LED son numerosas entre las que destacan: luminarias, señalización de tráfico, alumbrado inteligente, automoción, fotografía, etc. [3, 4].

Algunas de las ventajas más importantes que presenta la tecnología LED, al igual que los inconvenientes y barreras que limitan su uso se resumen a continuación [5, 6]:

- **Ventajas**

1. **Eficiencia:** Los LEDs proporcionan más cantidad de luz en relación a la potencia consumida comparados con las lámparas convencionales más comunes. El límite de eficiencia de los LEDs actuales ronda los 150lm/w [7].
2. **Bajo consumo:** Los LED no requieren excesiva alimentación para su funcionamiento. El rango de corrientes con el que se puede alimentar a un diodo LED depende del modelo empleado, los valores recomendados más comunes varían entre 350mA y 2100mA, pero una ventaja de alimentar el LED con una corriente baja es que se alarga su vida útil ya que la temperatura del LED disminuye cuanto más pequeña es la corriente que conduce. Además si el LED requiere una menor corriente de alimentación se pueden conectar muchos más LED en paralelo para una misma potencia. De esta forma disminuye la corriente que circula por ellos.
3. **Capacidad de regulación y control:** Para la mayoría de las aplicaciones los LED pueden ser diseñados junto con controles de regulación de brillo, como la modulación de anchura de pulsos (PWM) ya que los ciclos de encendido/apagado de alta frecuencia no afectan su vida útil. Además es común emplear sensores de movimiento para ajustar ciclos de trabajo. De este modo se reducen las horas anuales de funcionamiento dando lugar a un mayor ahorro de energía.
4. **Tamaño:** Los LEDs suelen tener unas dimensiones reducidas (menores de $2mm^2$) y pueden ser fácilmente integrados prácticamente en cualquier circuito de iluminación así como en circuitos impresos.

5. **Robustez y tiempo de vida:** Los LEDs tienen una menor tasa de fallos y una vida media entre 40000-70000 horas [7], además muestran una mayor resistencia al impacto al estar fabricados por un material sólido (Solid State Lighting SSL) y carecer de filamento como las lámparas convencionales.
6. **Espectro:** Los LEDs emiten radiación cuyo espectro característico presenta un reducido ancho de banda, lo que permite un obtener luz prácticamente monocromática sin necesidad de filtros que reduzcan la eficiencia como ocurre en las fuentes de luz convencionales.
7. **Diseño y fabricación:** La tecnología LED es objeto de un gran interés debido a la diversidad de aplicaciones que presenta y a sus características de diseño y fabricación. Esto se traduce en una ventaja competitiva para la industria de producción de fuentes de luz. Los LEDs presentan una enorme flexibilidad en el diseño que permite fabricar modelos de diversos tamaños y características de emisión. Además la ausencia de elementos tóxicos, como el mercurio o el plomo, y la posibilidad de reciclar ciertos componentes, como la carcasa de aluminio, permiten mejorar el proceso de fabricación reduciendo costes y aumentando la competitividad del producto.

- Desventajas

1. **Dependencia de la temperatura:** El comportamiento del LED depende notablemente de la temperatura del entorno de operación. El sobrecalentamiento puede tener como consecuencia la pérdida de emisión e incluso el fallo del dispositivo a largo plazo.
2. **Sensibilidad a la alimentación:** Los LEDs deben ser alimentados mediante un voltaje o diferencia de potencial por encima de una tensión umbral para que emita luz. Por otro lado la corriente que circula por el LED debe ser limitada para no dañar irreversiblemente el dispositivo. Estas condiciones implican la necesidad de un sistema regulador de corriente o controlador.
3. **Coste:** El coste de las fuentes LED es inicialmente mayor que el de las lámparas convencionales, además de la necesidad de un sistema controlador para su alimentación. Sin embargo esta inversión se ve amortizada con el tiempo debido a su mayor eficiencia de consumo respecto a las fuentes convencionales.

4.2. Características de emisión de las fuentes LED

Las fuentes LED están compuestas por multitud de componentes (encapsulado, empaquetamiento, chip, etc.) por tanto las características de emisión de la luz pueden variar dependiendo de la posición relativa y las características de cada una de sus partes.

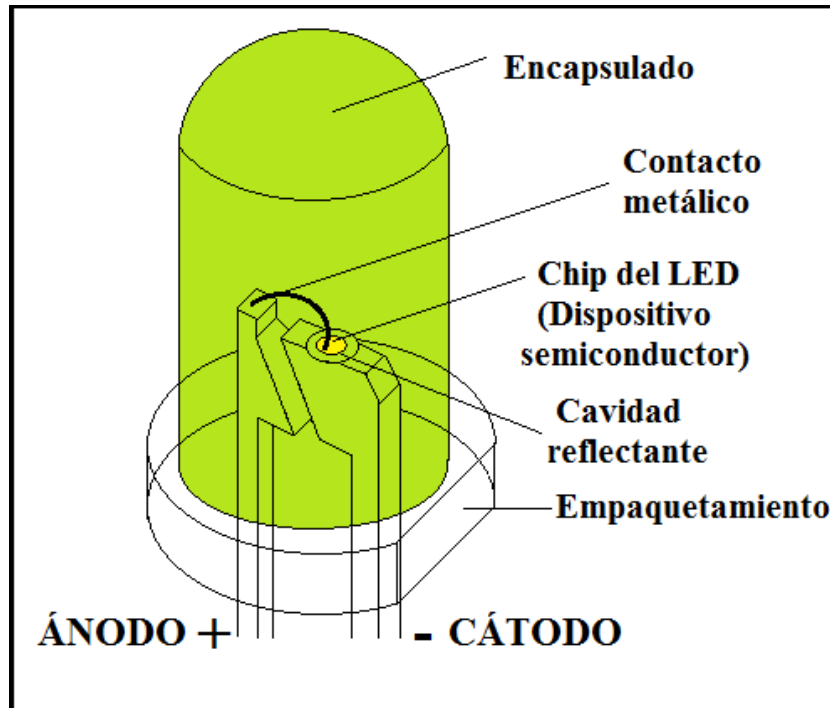


Figura 4.1: Componentes del LED

Para describir las características de emisión del LED se introducen los siguientes parámetros:

- **Flujo luminoso.** El flujo luminoso es la medida de la potencia luminosa percibida y, a diferencia de la potencia total emitida, está ajustada para reflejar la sensibilidad del ojo humano a diferentes longitudes de onda. La unidad de medida del flujo luminoso es el lumen (lm), y en este capítulo se emplearán modelos de LED cuyo flujo luminoso oscila entre los 40lm-100lm.
- **Eficiencia luminosa de la fuente.** Es la relación entre la flujo luminoso emitido frente a la potencia eléctrica consumida para generar dicho flujo. Se representa normalmente por el símbolo η_v . Los valores habituales oscilan entre los 120-150 lm/W.

- Apertura θ_e .** Este ángulo determina la directividad de la luz al ser emitida desde el LED. El ángulo de semiapertura se mide desde el eje óptico hasta el ángulo donde la intensidad de luz I_V (Flujo luminoso dividido por unidad de ángulo sólido) disminuye a la mitad respecto al máximo (intensidad en el eje directo) (fig. 4.2). El eje óptico no tiene porque coincidir con el eje mecánico, perpendicular al chip del LED y empaquetamiento, debido a que siempre se produce un pequeño desajuste. Es por tanto desde este eje óptico desde el que se mide el ángulo de emisión θ .

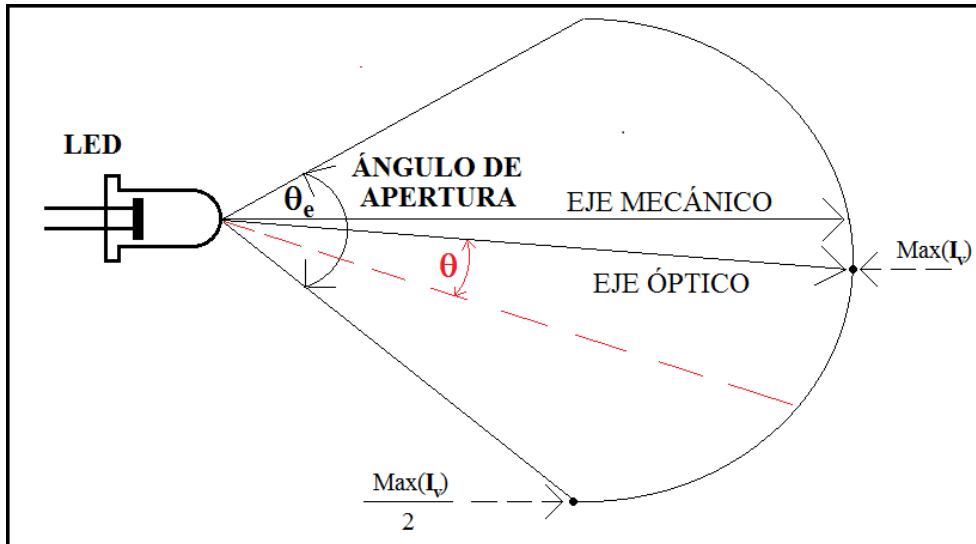


Figura 4.2: Ángulo de emisión del LED

En determinadas ocasiones el patrón angular de emisión del LED se pueden aproximar mediante el modelo de fuente lambertiana. La ley de emisión de Lambert dice que la intensidad radiante o intensidad luminosa observada a partir de una fuente difusa ideal es directamente proporcional al coseno del ángulo de emisión θ entre la línea de visión del observador y el eje óptico (fig. 4.2).

- Espectro** Los dispositivos LED emiten luz prácticamente monocromática que viene determinada por el material semiconductor empleado para su fabricación. La emisión espectral se define por: la longitud de onda de pico λ_p , que corresponde a la potencia radiada máxima; la anchura espectral a mitad del máximo, $FWHM$ (Full Width Half Max); y la longitud de onda central λ_c , que se encuentra en el medio del intervalo $FWHM$ (fig. 4.3).

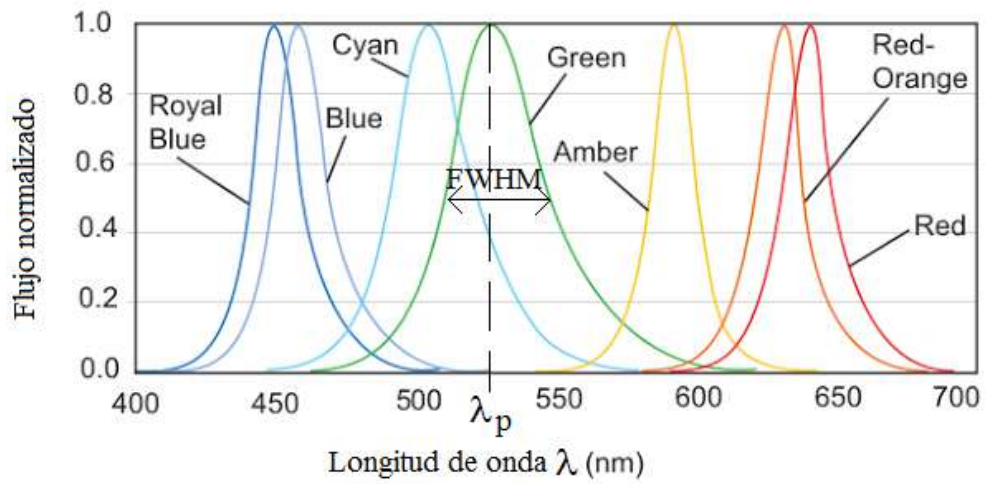


Figura 4.3: Espectro de emisión del LED. Fuente Luxeon

Estos parámetros se muestran para los espectros de emisión de alguno de los modelos de LED (fig. 4.3) que se emplearán a lo largo de este capítulo, de este modo se caracteriza el espectro emitido por las fuentes empleadas en aplicaciones de señalización e iluminación.

4.3. Sistema colimador de flujo para fuentes LED

La óptica anidólica es un campo dedicado al diseño de sistemas tales como concentradores solares, dispositivos de iluminación o colimadores ópticos. Estos sistemas se basan generalmente en simetrías traslacionales, simetrías rotacionales o superficies “free-form” [8, 9].

Si se considera un dispositivo concentrador que transforma luz de entrada con una gran apertura y una pequeña divergencia en salida de luz con un ángulo de divergencia mayor y una apertura menor, entonces un sistema colimador se puede definir como el dispositivo óptico cuyo comportamiento es el inverso al del concentrador [10]. De este modo el dispositivo colimador asegura un haz de luz de salida de reducida divergencia que se puede utilizar para calibrar otros dispositivos, comprobar su alineación en el eje óptico o medir diferentes parámetros ópticos o geométricos. Los colimadores se han convertido en un sistema óptico fundamental de una amplia gama de dispositivos y aplicaciones tales como cámaras, telescopios, láser, aceleradores lineales (tratamientos de radioterapia), acopladores LED, sistemas de iluminación, etc. [11, 12, 13, 14]

Aunque los colimadores son capaces de dirigir el flujo de luz dentro de los sistemas de iluminación y mejorar la resolución en los sistemas ópticos, también pueden reducir la intensidad bloqueando parte de la radiación incidente, lo cual no sería recomendable para instrumentos de medida o de concentración de energía. Sin embargo estas limitaciones no excluyen el uso de colimadores como herramientas de iluminación fiables y de bajo coste, especialmente apropiados para colimación de fuentes LED.

Para facilitar el diseño del colimador LED se asumen una series de hipótesis: fuentes puntuales, emisión angular uniforme y radiación monocromática. Estas premisas son muy razonables debido al tipo de fuente empleada, que si bien no es puntual si tiene un tamaño muy reducido (aproximadamente el radio del encapsulado ronda un milimetro). Su emisión angular no es exactamente uniforme y bajo ciertas condiciones se puede suponer lambertiana (proporcional al coseno del ángulo con la perpendicular a la superficie de emisión). Llegado el momento se contemplarán ambas hipótesis (uniforme y lambertiana) para el modelo de emisión de la fuente.

Las dimensiones del sistema y el índice de refracción del material empleado juegan un papel importante en la forma y la eficiencia máxima del sistema colimador. De este modo debe de ser alcanzado un equilibrio entre las dimensiones del dispositivo y su comportamiento óptico.

Reducir las dimensiones del sistema es conveniente para facilitar la integración del diseño del colimador en cualquier dispositivo óptico, además podría ser una ventaja para reducir costes de fabricación. Hay dos limitaciones principales en esta tendencia a reducir el tamaño del colimador. En primer lugar las inevitables imprecisiones de fabricación, que se hacen más relevantes a medida que decrecen las dimensiones del sistema y son perjudiciales para la eficiencia del colimador. En segundo lugar se debe considerar el teorema de conservación de la Étendue.

La magnitud Étendue (Sección 1.4), que caracteriza el área y el ángulo de propagación de la luz en un sistema óptico, es proporcional al índice de refracción del medio, la relación entre el área de la fuente y el receptor, y la dispersión angular de la luz [15]. Por lo tanto, si las características de la fuente y el medio son bien conocidas, entonces la conservación de la Étendue implica un límite del ángulo de propagación máximo, lo que significa una limitación del tamaño mínimo del sistema. Esta consideración (Étendue) no es aplicable al diseño del colimador teórico debido a la consideración de fuente puntual, sin embargo debe ser tenido en cuenta para el desarrollo del prototipo del colimador. Además como ya se ha mencionado el dispositivo colimador puede actuar como concentrador y en este caso el teorema de conservación de la Étendue fija el factor de concentración ideal máximo.

Se propone inicialmente un sistema básico de simetría rotacional, y a partir de dicho sistema tendrá lugar un proceso de revisión y optimización.

A lo largo de este proceso la geometría básica sufrirá una serie de modificaciones en sus parámetros ópticos con el objetivo de alcanzar el máximo rendimiento manteniendo las restricciones de tamaño y fabricación. Conjuntamente, una serie de simulaciones y mediciones experimentales serán llevadas a cabo para confirmar el funcionamiento del sistema de colimación.

Una vez finalizado el proceso de optimización, basado en una función de mérito que contempla el flujo total colimado, se realizará un prototipo del sistema colimador de LED en material Polimetilmetacrilato (PMMA), y se llevarán a cabo medidas experimentales empleando como fuente de luz un LED Luxeon Ámbar modelo Rebel.

4.3.1. Esquema básico del colimador

La premisa fundamental del diseño básico del colimador consiste en redirigir el flujo emitido por la fuente empleando una geometría reflectiva/refractiva compacta de dimensiones mínimas. La luz, tras su interacción con el sistema colimador, debe de propagarse paralela al eje óptico para contribuir a aumentar el flujo total colimador. La geometría del colimador, así como el índice de refracción, debe elegirse para asegurar equilibrio entre las dimensiones del colimador y su eficiencia final.

Como se puede observar en la figura 4.4 la geometría básica del colimador está compuesta de una componente parabólica, orientada para reflejar los haces de luz de mayor ángulo de emisión (grupo (1)), y una componente elíptica, colocada para transmitir el flujo de bajo ángulo de emisión (grupo (2)). Además los focos de la parábola y la elipse coinciden con la ubicación de fuente y sus ejes son comunes coincidiendo con el eje óptico.

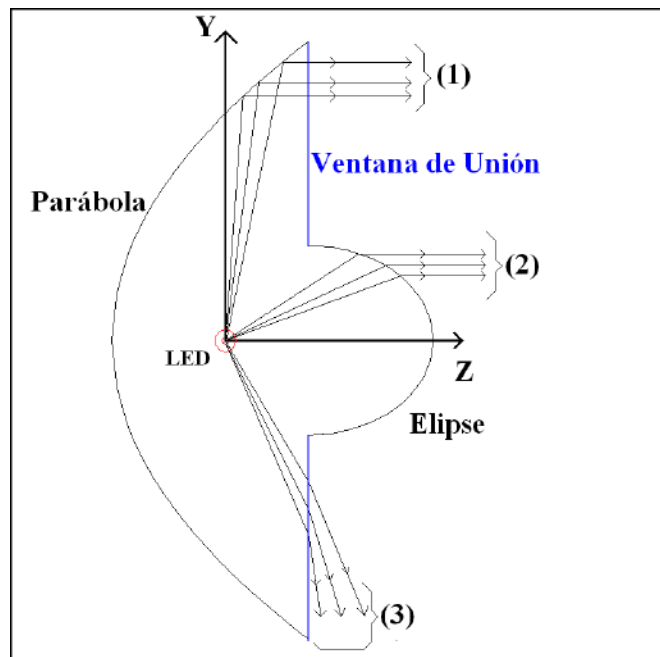


Figura 4.4: Esquema básico del colimador LED

En la figura 4.4 se muestra la sección transversal del sistema colimador, el dispositivo posee realmente simetría rotacional respecto al eje Z. La coincidencia entre la ubicación de la fuente y los focos de la parábola y la elipse aseguran la colimación del flujo representados por los grupos (1) y (2). Para simplificar el diseño y con motivos de facilitar la simulación, la posición de la fuente será fijada a su vez en el origen de coordenadas y será considerada puntual.

Se denominarán “ventanas de unión” a las rectas (en el plano sección del colimador) que unen la componente parabólica y la elíptica de la sección transversal del colimador (fig. 4.4). Las ventanas de unión son perpendiculares al eje óptico y permiten que los rayos reflejados en la componente parabólica (grupo **(1)**) se transmitan paralelos a dicho eje (colimados). Pero todavía falta por contemplar el flujo transmitido por la ventana de unión proveniente directamente del LED, sin reflejarse en la componente parabólica (grupo **(3)**). Con el diseño actual este rango angular de emisión está siendo desaprovechado y no contribuye al flujo total colimado.

Dependiendo de la distribución angular real del flujo emitido por el LED la contribución de uno de estos tres grupos puede llegar a predominar respecto al resto repercutiendo en el posterior proceso de optimización.

4.3.2. Colimador parabólico inclinado

Para resolver el problema de la pérdida de flujo (grupo **(3)**) planteado en el esquema básico del colimador (fig. 4.4), es necesario llevar a cabo algunas modificaciones en el diseño. Utilizando el principio de rayo marginal aplicado al diseño básico del colimador, y considerando la fuente LED (al objeto de desarrollar la primera aproximación) como una fuente de emisión puntual, se obtiene una geometría de ventanas de unión inclinadas cuya proyección converge en la posición de la fuente. Se define como γ el ángulo que forma la ventana de unión con el eje Z (eje óptico).

Debido a esta modificación en la geometría del colimador el haz divergente (grupo **(3)**) se cancela pero la componente parabólica ha de ser rotada. El eje de la parábola se rota cierto ángulo, α , para asegurar la condición de colimación de los rayos reflejados en la componente parabólica y transmitidos por la ventana de unión inclinada (grupo **(1)**). También se fija un diámetro máximo Y_{max} para determinar las dimensiones del sistema.

Los rayos trazados en la figura 4.5 representan el rango completo de emisión para una fuente de semiángulo de apertura 90° . Dependiendo de la apertura de la fuente y de la distribución angular considerada el proceso de optimización conducirá a diferentes resultados para adaptarse a las características del LED.

La relación entre el ángulo de rotación de la parábola, α , y el ángulo de inclinación de las ventanas de unión, γ , que permite asegurar el flujo de salida colimado se expresa en ecuación 4.2.

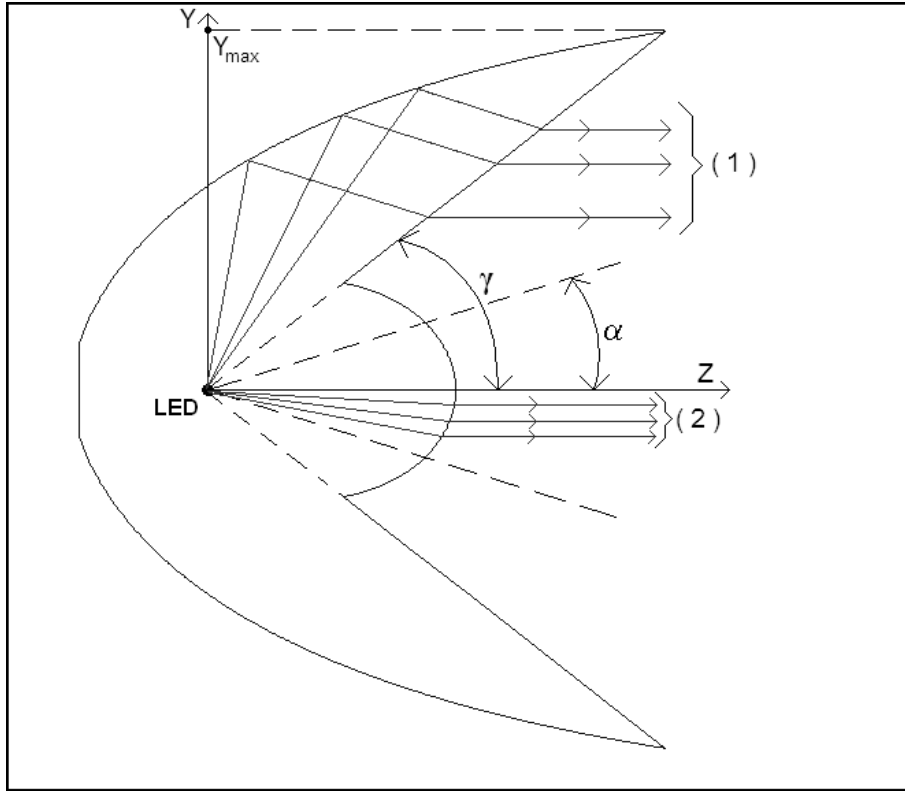


Figura 4.5: Colimador parabólico inclinado

$$\alpha = 90^\circ - \left\{ \alpha + \arctan \left[\frac{n_2 \sin(\alpha)}{n_1 - n_2 \cos(\alpha)} \right] \right\}. \quad (4.2)$$

La ecuación 4.2 se deriva aplicando la ley de Snell a los rayos transmitidos por la ventana de unión. Las variables n_1 y n_2 corresponden a los índices de refracción del material colimador y del medio exterior (aire) respectivamente. La dimensión del sistema respecto al eje óptico viene determinada por el ángulo de inclinación de las ventanas de unión que depende a su vez de los índices de refracción y del ángulo de rotación del eje de la parábola. Por tanto, como los índices de refracción son conocidos una vez elegido el material de fabricación del colimador, el único parámetro que falta por determinar es el ángulo de rotación de la parábola α . Se asume que la distancia focal tanto de la parábola como de la elipse no son determinantes en el rendimiento del sistema mientras cumplan las condiciones de reflexión total (parábola) y dimensiones mínimas (elipse).

4.3.3. Optimización del sistema colimador

Una vez definida la geometría definitiva del colimador y los parámetros de diseño es necesario el desarrollo de un proceso de optimización que conduzca al valor idóneo de dichos parámetros. El principal propósito de este análisis es encontrar el valor óptimo del ángulo de rotación de la parábola α para asegurar la máxima eficiencia del sistema.

La condición de máxima eficiencia se alcanza cuando se logra el nivel más alto de flujo colimado de salida Φ . Teniendo en cuenta que el sistema está diseñado sin ninguna superficie espejada, asumiendo una fuente puntual, emisión angular uniforme y un semi-ángulo de apertura de 90° , el flujo emitido paralelo al eje óptico se puede expresar por la integral de flujo 4.3.

$$\Phi = I \times \left[\int_0^{2\pi(1-\cos(\gamma))} T_{ellip}(\alpha, \beta) d\Omega + \int_{2\pi(1-\cos(\gamma))}^{2\pi} T_{unionPE}(\alpha) \cdot R_{parabola}(\alpha, \beta) d\Omega \right], \quad (4.3)$$

donde I es una constante de proporcionalidad, T_{ellip} es la transmitancia de la componente elíptica, Ω es el ángulo sólido, $T_{unionPE}$ es la transmitancia de la ventana de unión y $R_{parabola}$ es la reflectancia de la parábola la cual depende del ángulo de rotación α y del ángulo de emisión β .

Substituyendo, en la ecuación 4.3, el ángulo sólido Ω por su ecuación en función del ángulo de emisión β , y expresando la transmitancia de la elipse T_{ellip} como función de la reflectancia R_{ellip} :

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos(\beta)), \quad (4.4)$$

$$d\Omega = 2\pi \sin(\beta), \quad (4.5)$$

$$T_{ellip} = 1 - R_{ellip}. \quad (4.6)$$

Se obtiene la ecuación 4.7:

$$\Phi = K \times \left[\int_0^\gamma [1 - R_{ellip}(\alpha, \beta)] 2\pi \sin(\beta) d\beta + \dots \right. \\ \left. \dots + \int_\gamma^{90} [1 - R_{unionPE}(\alpha)] R_{parabola}(\alpha, \beta) 2\pi \sin(\beta) d\beta \right]. \quad (4.7)$$

La ecuación 4.7 depende de la constante de proporcionalidad K al tratarse de una fuente de luz que emite uniformemente con independencia del ángulo de emisión. La constante de proporcionalidad K no es relevante en nuestro estudio porque el objetivo es encontrar el máximo de la ecuación 4.7.

La primera integral de la ecuación 4.7 representa el flujo transmitido por la región elíptica, nótese que el límite superior de la integral es γ , el ángulo de inclinación de la ventana de unión. La segunda integral de la ecuación 4.7 da cuenta del flujo reflejado por la parábola y transmitido por la ventana de unión. Debido a la simetría del sistema el límite inferior de integración es cero, la contribución del cuadrante negativo es equivalente al de la ecuación 4.7 y por tanto puede ser incluido en la constante de proporcionalidad K sin más efecto sobre la búsqueda del máximo.

También es necesario calcular las expresiones de la reflectancia en función del ángulo de entrada θ_1 y de salida θ_2 teniendo en cuenta la superficie de transmisión considerada en cada caso (Elipse, Parábola o Ventana de unión). Las dos componentes de la reflectancia y la magnitud global R pueden calcularse por medio de las ecuaciones 4.8

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{parallel} = \frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)}, \\ R_{perpend} = \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}, \\ R = \left(\frac{R_{parallel}}{2} + \frac{R_{perpend}}{2} \right). \end{array} \right. \quad (4.8)$$

Para calcular la integral de flujo de la ecuación 4.7, antes es necesario expresar θ_1 y θ_2 como función del ángulo de emisión β , teniendo en cuenta si el flujo es transmitido por la elipse (fig.4.5, grupo (2)) o reflejada por la parábola y luego transmitida por la ventana de unión (fig.4.5, grupo (1)).

4.3.3.1. Análisis del flujo transmitido por la elipse

Si el flujo incide directamente en la región elíptica, los ángulos de incidencia θ_1 y de transmisión θ_2 se derivan del siguiente esquema:

A partir de la figura 4.6 se formulan las ecuaciones iniciales para la transmisión en la región elíptica:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_2 = \theta_1 + \beta, \\ n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2. \end{array} \right. \quad (4.9)$$

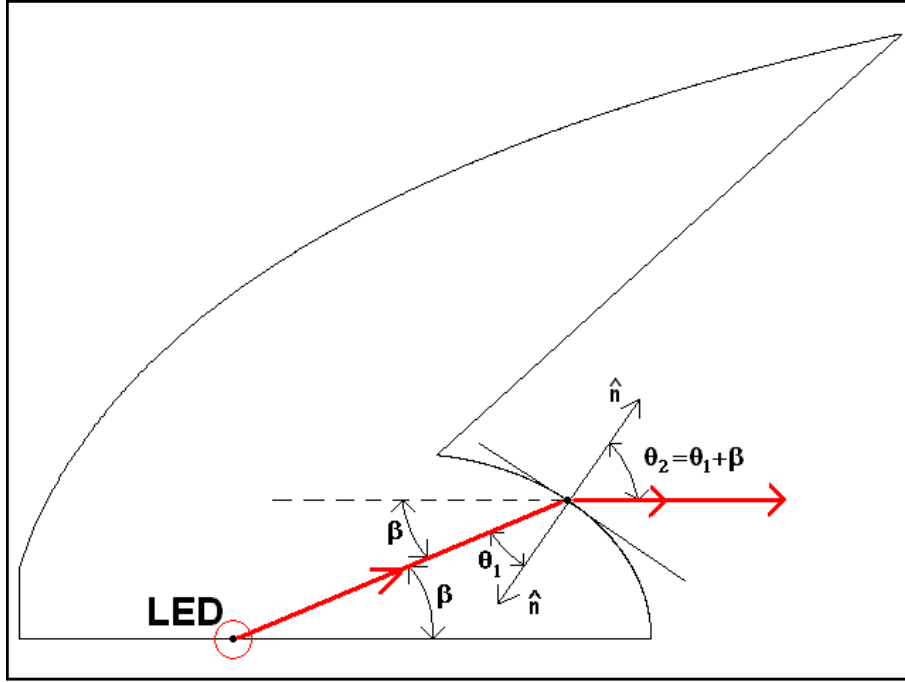


Figura 4.6: Ángulos de incidencia y transmisión en la región elíptica

Un simple desarrollo matemático conduce a las ecuaciones siguientes, donde θ_1 y θ_2 son funciones de β :

$$\theta_1 = \arctan \left\{ \frac{n_2 \sin(\beta)}{n_1 - n_2 \cos(\beta)} \right\}, \quad (4.10)$$

$$\theta_2 = \arctan \left\{ \frac{n_1 \tan(\beta)}{n_1 - n_2 [\cos(\beta) + \sin(\beta) \tan(\beta)]} \right\}. \quad (4.11)$$

Con estas expresiones [ec. 4.11, ec. 4.11] podemos despejar la reflectancia de la elipse R_{ellip} como función del ángulo de emisión β y sustituirla dentro de la primera componente integral de la ecuación [4.7] para calcular el flujo parcial transmitido por la elipse.

4.3.3.2. Análisis del flujo transmitido por la ventana de unión

Si el flujo emitido incide en la región parabólica, entonces θ_1 y θ_2 tendrán que ser calculadas de acuerdo a la trayectoria adecuada del rayo emitido. En este caso el flujo es reflejado por la parábola y transmitido por la ventana de unión, como se observa en la figura 4.7.

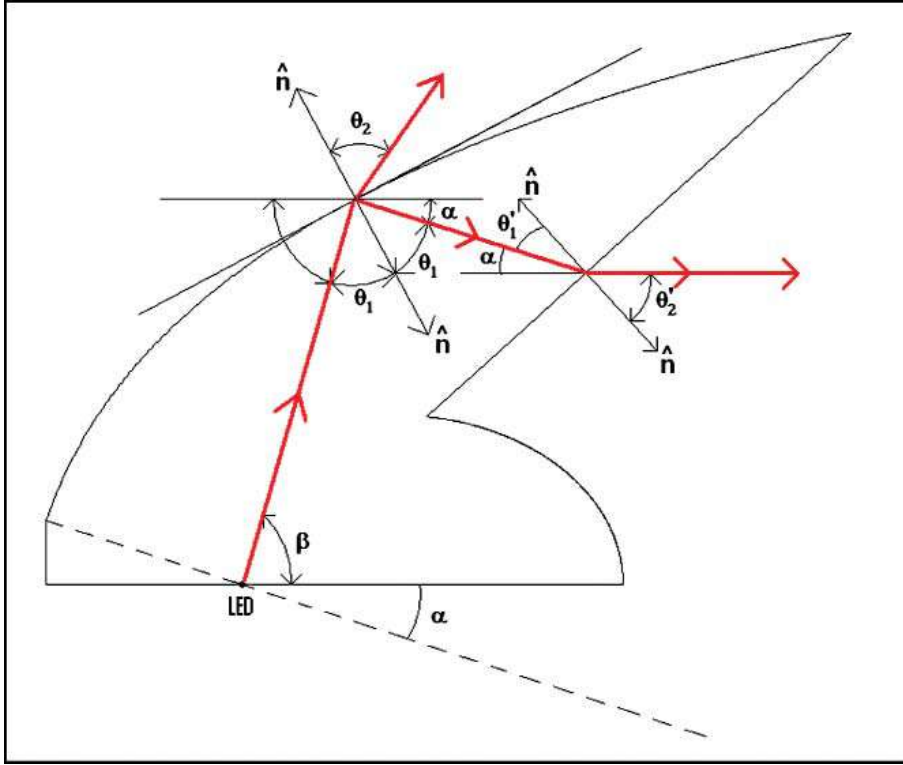


Figura 4.7: Esquema de flujo transmitido por ventana de unión

Primero se calculan los ángulos de entrada y salida en la región parabólica:

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta + 2\theta_1 + \alpha = 180 \\ n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \end{array} \right\}, \quad (4.12)$$

$$\theta_1 = \left(\frac{180 - \alpha - \beta}{2} \right), \quad (4.13)$$

$$\theta_2 = \arcsin \left[\frac{n_1}{n_2} \sin \left(\frac{180 - \alpha - \beta}{2} \right) \right]. \quad (4.14)$$

θ_1 y θ_2 dependen tanto del ángulo de emisión β , como del ángulo de rotación α , por tanto la reflectancia en la parábola, $R_{parabola}$, es función de ambas variables. De hecho este termino es el único que depende del ángulo de rotación α entre los factores que contribuyen al flujo colimado total.

La transmitancia de la ventana de unión, T_{ellip} , se calcula también a partir del esquema correspondiente (fig. 4.7), pero considerando los ángulos de incidencia θ'_1 y transmisión θ'_2 correspondientes a la de la ventana de unión .

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta'_2 = \theta'_1 + \alpha \\ n_1 \sin(\theta'_1) = n_2 \sin(\theta'_2) \end{array} \right\}, \quad (4.15)$$

$$\theta'_1 = \arctan \left[\frac{n_2 \sin(\alpha)}{n_1 - n_2 \cos(\alpha)} \right], \quad (4.16)$$

$$\theta'_2 = \alpha + \arctan \left[\frac{n_2 \sin(\alpha)}{n_1 - n_2 \cos(\alpha)} \right]. \quad (4.17)$$

Finalmente la integral del flujo colimado [ec. 4.7] puede ser descrita en función del ángulo de emisión (variable de integración), y del ángulo de inclinación del eje de la parábola α . El límite de integración, γ , también puede ser expresado como función de α [ec. 4.2]. Esto nos permite llevar a cabo el proceso de optimización con α como única variable.

4.3.3.3. Análisis del flujo total colimado

Una vez completado el desarrollo matemático se puede emplear un método de cálculo numérico para encontrar el valor del parámetro de rotación α que garantice la máxima cantidad de flujo colimado [ec. 4.7]. Empleando el programa de matemático Matlab se calculará la integral de flujo [ec. 4.7] y se representarán gráficamente la ecuación de flujo.

Para obtener resultados numéricos se asignarán valores específicos a los índices de refracción n_1 y n_2 . Se emplea Polimetilmetacrilato (PMMA) para fabricar el prototipo del colimador cuyo índice es $n_1 = 1.49$, y el medio exterior es aire $n_2 = 1$. En las figuras 4.8 y 4.9 se muestran los resultados obtenidos al evaluar la integral de flujo [ec.4.7] en función del ángulo de inclinación del eje de la parábola.

La condición de alineamiento entre la ventana de unión inclinada y la fuente de luz se mantiene independientemente del valor del ángulo de rotación α . Esta restricción limita la contribución al flujo colimado de la geometría parabólica para un rango bajo del ángulo de rotación α (fig. 4.8, fig. 4.9). Incluso, si la semiapertura de la fuente es menor de 90° (fig. 4.8), la contribución al flujo de la región parabólica se hace nula hasta que el ángulo de rotación α es suficientemente grande para forzar el valor mínimo del ángulo de inclinación de la ventana de unión γ . Es decir, la contribución parabólica al flujo colimado empieza a ser relevante cuando el ángulo de inclinación de la ventana de unión α sitúa a la fuente (debido a la condición de alineamiento) en una posición para la cual la apertura de emisión de la fuente es lo suficientemente grande como para incidir sobre una zona considerable de la región parabólica.

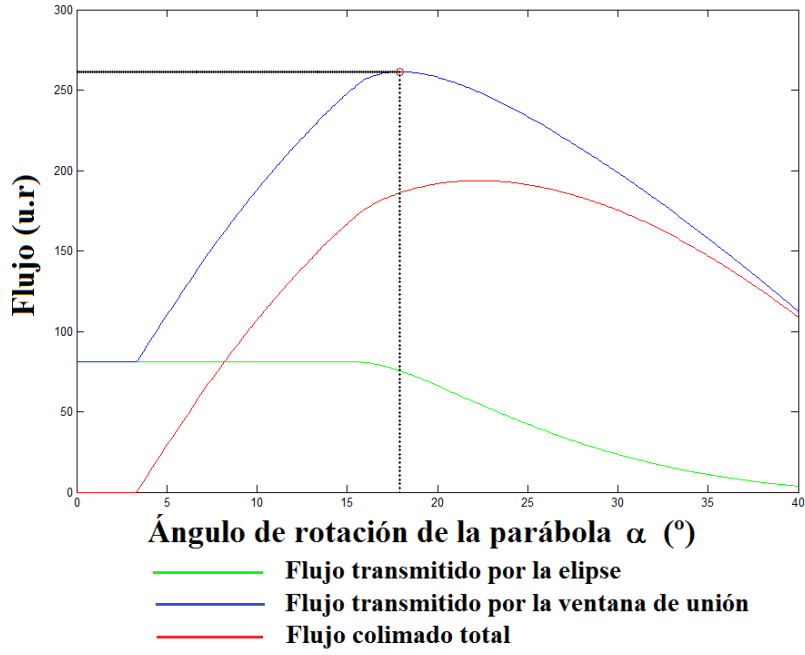


Figura 4.8: Flujo total Φ frente al ángulo de rotación de la parábola α . Semiapertura de la fuente 80°

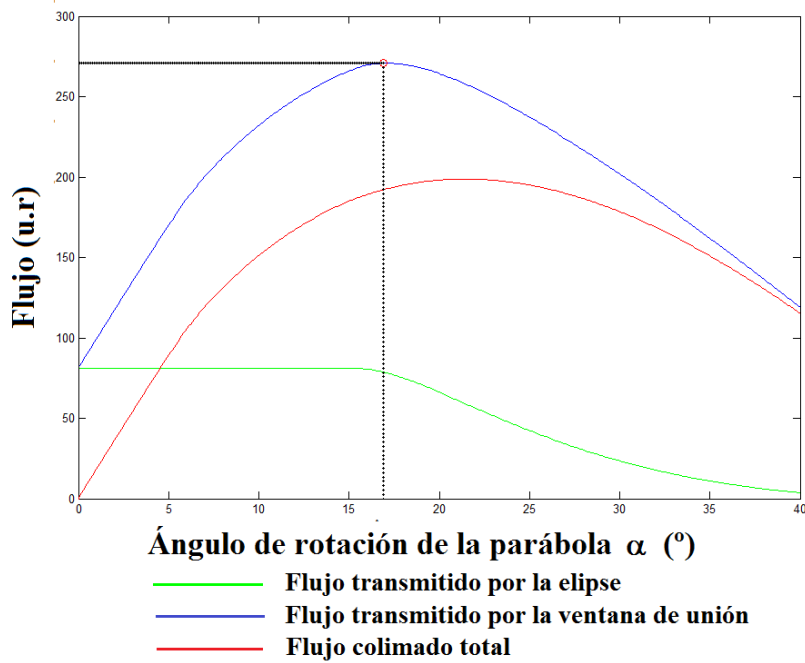


Figura 4.9: Flujo total Φ frente al ángulo de rotación de la parábola α . Semiapertura de la fuente 90°

Respecto a la contribución de flujo transmitido por la ventana de unión se mantiene constante hasta que el aumento del ángulo de rotación causa una caída de la reflectancia parabólica (debido a la variación del ángulo de incidencia θ_1).

Por otra parte, la contribución de la región elíptica al flujo colimado (grupo **2**, fig.4.5) está limitada por el ángulo de incidencia máximo en una interfase refractiva. Aplicando la ley de Snell a la región elíptica [ec. 4.17] se obtiene el ángulo crítico por debajo del cual se garantiza flujo colimado. Este parámetro crítico se obtiene para un el ángulo de refracción $\theta_2=\theta_{2c}=90^\circ$.

$$\theta_{1c} = \arcsin\left(\frac{n_2 \sin(\theta_{2c})}{n_1}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{n_1}\right) = 42.12^\circ, \quad (4.18)$$

$$\beta_c = \theta_{2c} - \theta_{1c} = 90 - 42.12 = 47.78^\circ. \quad (4.19)$$

De este modo el rango de emisión efectivo se adapta a las consideraciones específicas de la geometría elíptica del colimador. Si el ángulo de emisión es mayor de β_c entonces la región elíptica actúa por reflexión total interna y la luz emitida no contribuye al flujo colimado. El rango de emisión real que impacta sobre la región elíptica lo delimita el ángulo de la ventana de unión γ (fig. 4.5), y el ángulo de inclinación depende a su vez del ángulo de rotación α [ec. 4.2] como se observa en la figura 4.10:

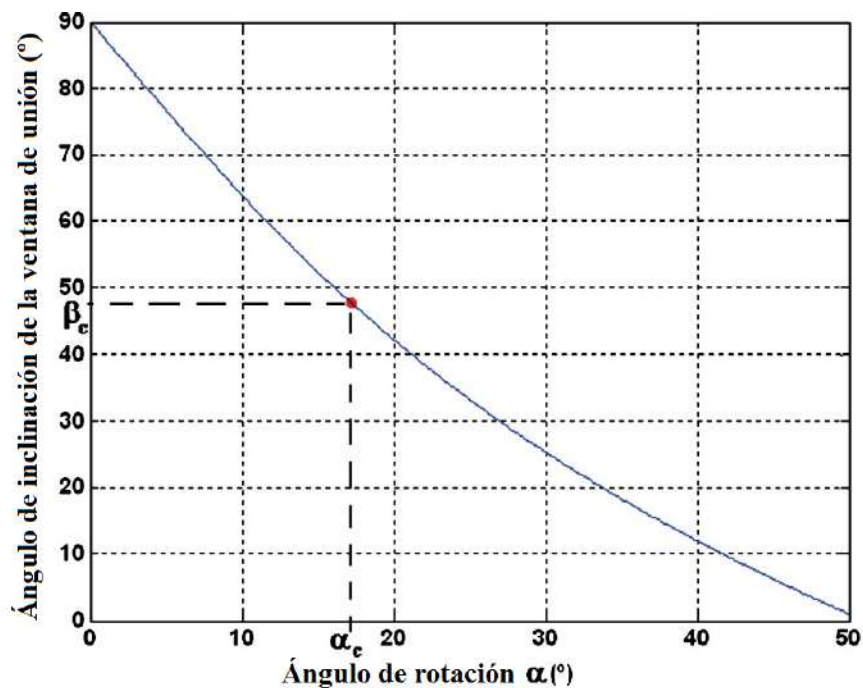


Figura 4.10: Ángulo de inclinación de la ventana de union γ frente al ángulo de inclinación del eje de la parábola α

A medida que aumenta el ángulo α la inclinación de la ventana de unión decrece (fig. 4.10) y la región elíptica reduce su area en favor de la extensión de la región parabólica. Pero la componente elíptica del flujo permanece constante hasta que el ángulo de inclinación de la ventana de unión alcanza el valor crítico γ_c y de este modo la región elíptica comienza a reducir su geometría por debajo del rango efectivo de emisión. Este efecto se observa en la disminución de la componente del flujo transmitido por la elipse (fig. 4.8, fig. 4.9).

La solución numérica a la ecuación de flujo [ec. 4.7] nos proporciona el parámetro esencial del proceso de optimización, que consiste en el valor del ángulo de inclinación del eje de la parábola, α_{max} , que asegura el mayor valor del flujo colimado. En el caso concreto de un colimador fabricado en PMMA y cuya fuente emite uniformemente con una semiapertura de 90° el valor óptimo de α se encuentra en el entorno de $\alpha_{max} = 17^\circ$. Pero este valor depende de las características de la fuente considerada y el material empleado en la fabricación del colimador.

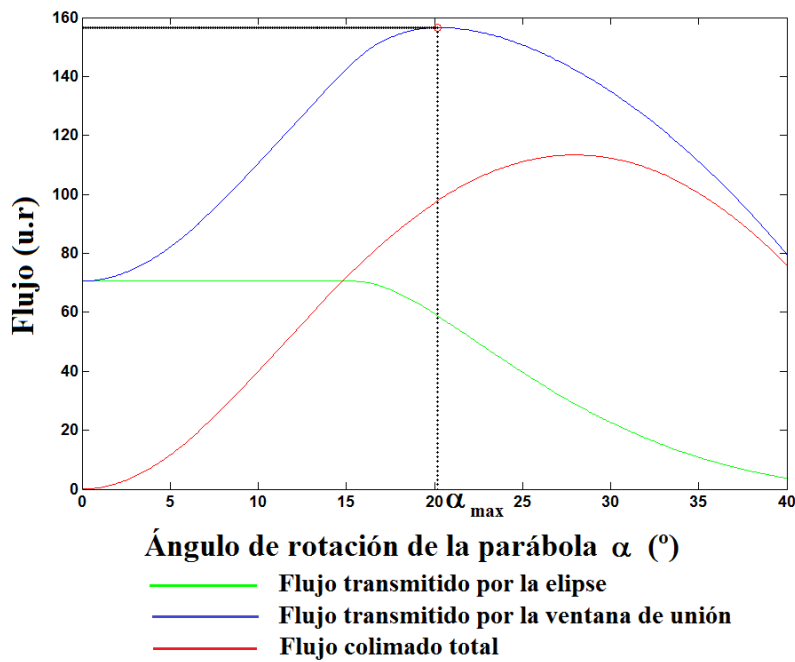


Figura 4.11: Flujo total Φ frente al ángulo de rotación de la parábola α . Fuente lambertiana

La solución para una fuente de emisión lambertiana de la misma apertura varía debido al factor $\cos(\beta)$ que modula la radiación emitida respecto al eje óptico. Aplicando este factor en las ecuaciones de flujo se obtiene una solución que difiere notablemente respecto a la obtenida considerando fuente angular uniforme. En el caso de emplear una fuente lambertiana el valor del ángulo de rotación óptimo del eje de la componente parabólica aumenta hasta $\alpha_{max} = 20^\circ$, como se aprecia en la figura 4.11. Este aumento de la rotación del eje de la parábola implica un menor ángulo de la inclinación de la ventana de unión por tanto una disminución de la superficie elíptica.

4.3.4. Resultados experimentales

Se ha fabricado un prototipo real para comparar su rendimiento con los resultados teóricos. Las dimensiones del prototipo están determinadas por el encapsulado del LED. La fuente seleccionada para comprobar el rendimiento del prototipo es un modelo Rebel de Luxeon, y el material usado para fabricar el prototipo será PMMA (poly methyl methacrylate). Las medidas experimentales se han tomado usando una cámara CCD (The Imaging Source DFK 41BU02.H) situada a 5 metros de distancia de la fuente (LED), detrás de una pantalla lambertiana en el centro de la imagen proyectada. Los resultados experimentales se compararán con una serie de simulaciones ejecutadas mediante el software de trazado de rayos Tracepro que considera las pérdidas por absorción/transmisión del material, además de simular las dimensiones y características reales de la fuente, que en el modelo teórico era considerada como puntual y de emisión uniforme o lambertiana.



Figura 4.12: Prototipo real del colimador

El prototipo (fig. 4.12) del colimador se fabrica mediante impresión 3D y posteriormente, mediante un proceso de pulido, se suavizan las facetas e imperfecciones inherentes al proceso de fabricación.

Los mapas de irradiancia (fig. 4.13) que representan la potencia por unidad de superficie del flujo emitido por colimador LED muestran una similitud notable entre los resultados experimentales y aquellos obtenidos mediante el proceso de simulación. Teniendo en cuenta las tolerancias de fabricación del prototipo, este hecho asegura la validez del diseño del colimador y también proporciona una información detallada de la distribución del flujo emitido.

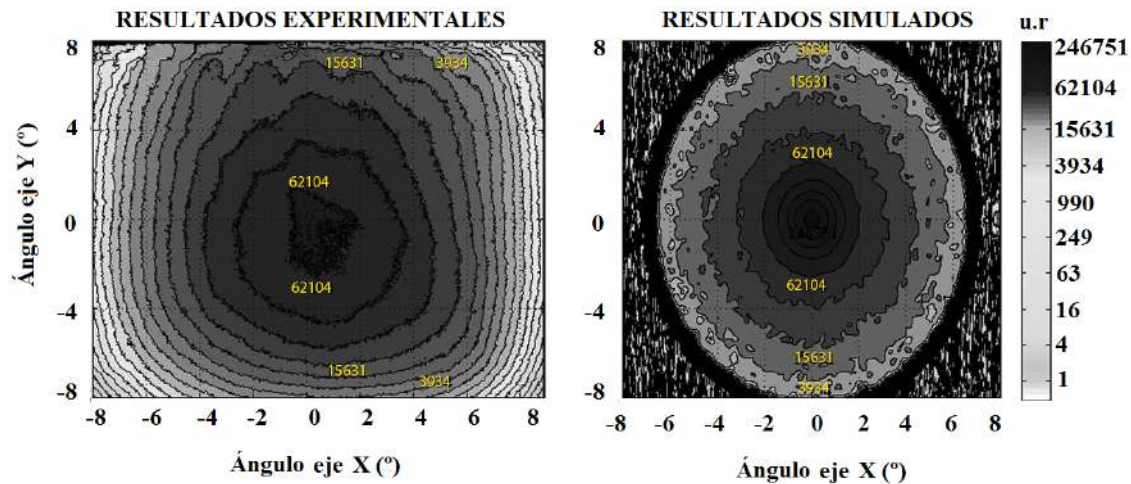


Figura 4.13: Mapas de irradiancia del sistema colimador, experimentales y simulados

Los perfiles normalizados (fig. 4.14) muestran un semiángulo de apertura de emisión (rango angular para el cual el perfil de intensidad luminosa decrece un 50 %) de 2.68° para el mapa de irradiancia simulado y de 3.1° para el experimental. Es razonable asumir que la mayoría de la energía está contenida en este intervalo, lo cual representa un resultado prometedor en cuanto a comportamiento del colimador. Este dato de la apertura del colimador (3.1°) se puede interpretar como el semiángulo de aceptación α del sistema si se considera el dispositivo en modo de funcionamiento inverso, es decir actuando como sistema concentrador. En este caso el factor de concentración del mismo se podría calcular mediante la ecuación [ec. 1.14] asumiendo una aceptación en el receptor equivalente a la apertura de emisión de una fuente lambertiana $\beta = 60^\circ$ y teniendo en cuenta que el índice de refracción del sistema es $n = 1.49$:

$$C_{col} = n^2 \frac{\sin^2 \beta}{\sin^2 \alpha} = 569. \quad (4.20)$$

El factor de concentración obtenido sitúa al colimador en funcionamiento inverso dentro del rango medio de concentradores si atendemos por ejemplo a aplicaciones fotovoltaicas [16].

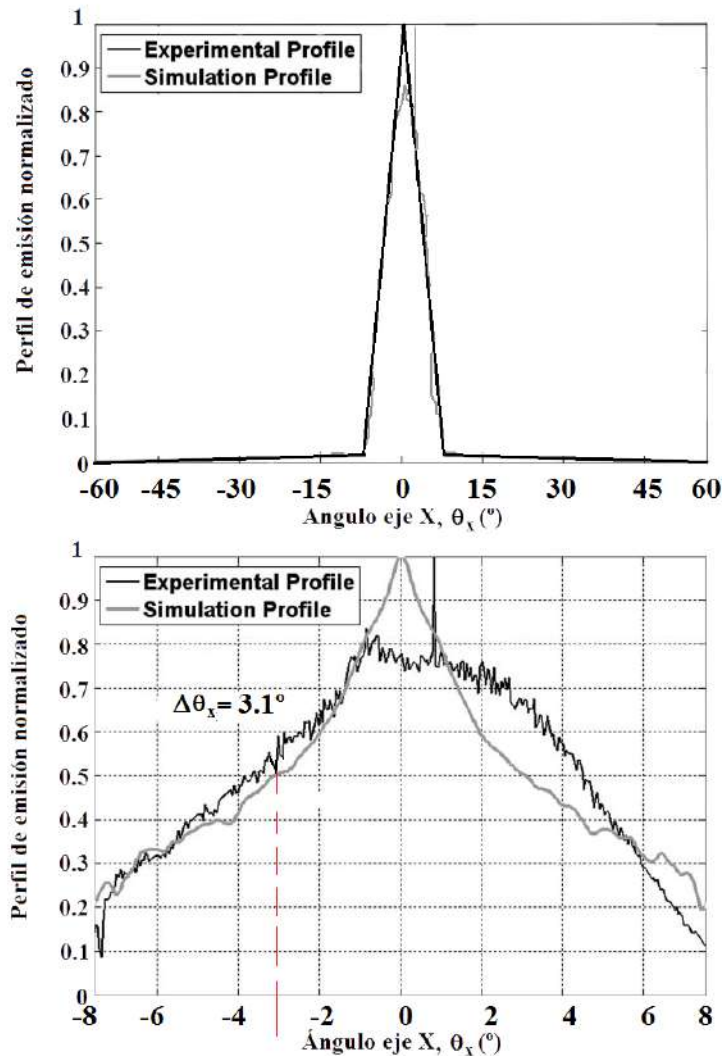


Figura 4.14: Perfiles de irradiancia normalizados

Además los perfiles normalizados (fig. 4.14) muestran que el nivel de flujo (Wattios) cae a un 10 % para una semiapertura de 8 grados, por lo tanto el 90 % de la energía del colimador está contenida en dicho intervalo angular.

El proceso de diseño y optimización del colimador LED concluye en la fabricación de un prototipo compacto sin superficies espejadas que le proporciona una ventaja competitiva respecto a costes de fabricación. Además su reducida apertura de emisión le equipara a los diseños comerciales mas eficientes [17].

4.4. Sistemas de balizas LED para aeropuertos

Nuevas técnicas de iluminación aeronáutica están cobrando gran importancia para aumentar la seguridad y reducir los costes mantenimiento de las pistas de aterrizaje y despegue. Hasta hace escasos años la iluminación de las pistas consistía en sistemas embebidos basados en lámparas incandescentes.

Pero dichas lámparas presentan serias desventajas:

- Frecuentes averías que derivan en un alto coste de mantenimiento. De media una lámpara debe ser reemplazada cada 1500 horas operativas.
- Alto consumo energético.
- Esta tecnología no hace posible la introducción de nuevas funciones de iluminación, como el manejo y modificación de señales.

Para resolver estos problemas se han desarrollado sistemas basados en tecnología LED. Este tipo de fuentes presentan las siguientes ventajas:

- La iluminación por medio de LEDs consume una décima parte de energía.
- Permite el mantenimiento preventivo (La vida útil de un LED está alrededor de 40000-70000 horas)
- La iluminación de tecnología LED puede ser controlada remotamente de acuerdo a las necesidades de la configuración de pista.

Hasta ahora solamente habían sido desarrollados sistemas de iluminación de tecnología LED no embebidos. Los sistemas embebidos no habían podido ser empleados debido a las restricciones específicas de la normativa y la regulación de aeropuertos, mensiones máximas de balizamiento, tecnología del sistema de alimentación, etc.

En el desarrollo de esta aplicación se define una arquitectura de iluminación embebida que cumple las regulaciones vigentes para iluminación en pistas aeroportuarias [18]. Para lograrlo se divide el diseño en tres tareas clave:

- Desarrollo de un sistema óptico para optimizar la iluminación.
- Fabricación del prototipo.
- Validación del modelo de iluminación.

4.4.1. Introducción

Un elemento fundamental para el guiado de las aeronaves dentro de la zona aeroportuaria son las ayudas visuales. La principal razón de las luces aeronáuticas es que el piloto sepa por donde conducir la aeronave sin riesgos, tanto en tierra como en su aproximación a las pistas de vuelo. Este tipo de información es complementaria a la información que facilita el controlador aéreo.

En esta sección llevará a cabo el diseño de un sistema de balizas unidireccionales de tecnología LED que satisfagan los requisitos **OACI** (Organización de Aviación Civil Internacional) de iluminación. Para ello se empleará el diseño de colimador descrito en la anterior aplicación (Sección 4.3. Sistema Colimador de Flujo para fuentes LEDs). El análisis que se va desarrollar teniendo en cuenta tres modos de emisión distintos, correspondientes a los tres modelos de fuente empleados, el sistema debe alcanzar, mediante una geometría común, un comportamiento lo más estable posible para las tres configuraciones. El procedimiento consiste en diseñar un sistema óptico que cumpla las especificaciones para los tres modos de funcionamiento y una vez fijados los parámetros que caracterizan la geometría del sistema, aplicar un método de optimización que permita ajustar con mayor precisión la configuración final de la baliza.

El trabajo presentado en este capítulo se ha desarrollado por la U.C.M por encargo de la empresa Instalaza en el ámbito del proyecto Eureka 3456 E3L (Embed Led Landing Light) y tiene como objetivo específico el desarrollo de un sistema de balizamiento basado en fuentes de tecnología LED (Light Emitting Diode) para aeropuertos que cumpla las normativas OACI (Organización de Aviación Civil Internacional). Tanto el diseño como la validación experimental se ha llevado a cabo por el grupo de óptica aplicada (AOCG) de la Universidad Complutense de Madrid.

4.4.2. Esquema básico y componentes del sistema de balizamiento.

El requisito para hablar de un sistema de iluminación embebido es disponer de un sistema que pueda ser alojado en un volumen donde las dimensiones son habitualmente críticas y que asimismo integre todos los componentes esenciales para su funcionamiento:

- **Una carcasa exterior** capaz de albergar el resto de componentes y permitir diferentes configuraciones predeterminadas del sistema.
- Una o varias **fuentes de luz** (Diodos Emisores de Luz en nuestro caso) que aseguren la cantidad de luz adecuada para alcanzar las prestaciones exigidas al sistema.

- **Sistemas y dispositivos ópticos** (colimadores de luz, lentes, materiales difusores, etc.) necesarios para lograr el rendimiento óptimo aprovechando al máximo la energía proporcionada por las fuentes emisoras de luz.
- **Sistema de control y comunicaciones.** El sistema de balizas ha de permitir el control remoto y transmitir la información sobre el estado del mismo.
- **Sistema de alimentación,** necesario para suministrar la energía eléctrica que alimenta las fuentes de luz del sistema, y el sistema de control de la baliza.

Esta sección se centrará en el diseño de los sistemas y dispositivos ópticos del sistema de balizamiento, dejando en un segundo plano el diseño del resto de componentes de la baliza, aunque teniendo siempre en cuenta sus restricciones y particularidades mecánicas así como su integración en el sistema embebido.

Una unidad de balizamiento de aeropuerto incluye una luz intermitente y omnidireccional para ayudar al piloto en la localización de los límites de la pista y otra fuente de luz direccional para guiar al piloto en el acercamiento final a la pista. El diseño que se presenta en este proyecto es el de la baliza de luz direccional y para ello será primordial emplear un sistema colimador de flujo que dirija la luz emitida por los LEDs a través del sistema óptico que forma la baliza.

4.4.3. Requisitos de iluminación

La **OACI** establece una normativa para la iluminación terrestre de aeropuertos que se divide en tres categorías, esta clasificación responde a las condiciones de visibilidad mínima que se dan en el momento del aterrizaje.

En este estudio nos centraremos en los requisitos exigidos para el tipo II, que es de un nivel de exigencia intermedio y las zonas de interés son rectangulares.

<i>Tipo</i>	<i>Media I_v (cd)</i>	<i>Minimo I_v (cd)</i>	<i>Apertura horizontal ($^\circ$)</i>	<i>Apertura vertical ($^\circ$)</i>	<i>Comentarios</i>
II	200	100	-10+10	1-9	Rectangular
II	200	100	-3.5+3.5	1-9	Rectangular
II	100	50	-19.2+19.2	1-4	Rectangular

Tabla 4.1: Requisitos ICAO para sistemas de balizas

Como se observa en la tabla 4.1 se delimitan tres zonas diferentes en las que se fijan unos valores medios y mínimos de intensidad luminosa en candelas. La intensidad luminosa se define como la cantidad de flujo luminoso por unidad de ángulo sólido. Su unidad de medida es la candela (*cd*) y se expresa mediante la ecuación 4.21:

$$I_V = \frac{d\Phi}{d\Omega}, \quad (4.21)$$

donde I_v es la intensidad luminosa en Candelas, Φ es el flujo luminoso en lumens y $d\Omega$ el diferencial de ángulo sólido en estereorradianes. El flujo luminoso Φ se obtiene ponderando la potencia de la fuente para cada longitud de onda con la función de luminosidad, que representa la sensibilidad del ojo en función de la longitud de onda.

Para analizar el comportamiento del sistema de balizas se van a emplear como fuentes de luz los LED modelo Rebel de la casa Luxeon. Esta elección se basa en sus adecuadas características de consumo y potencia así como sus dimensiones idóneas para el sistema embebido y su bajo coste. A continuación se muestran las características técnicas del modelo Rebel para las tres longitudes de onda (Ámbar, Verde y Rojo) empleadas en el diseño de la baliza:

<i>LED</i>	<i>REFERENCIA</i>	<i>FLUJO TÍPICO</i>	<i>CONSUMO TÍPICO</i>
AMBAR	LXM2-PL01-0000	70lm	1.1W
VERDE	LXML-PM01-0100	100lm	1.1W
ROJO	LXML-PD01-0040	40lm	1.1W

Tabla 4.2: Tabla de especificaciones LEDs

Una misma baliza puede albergar varios LEDs que emitan simultáneamente, y una forma para equilibrar el funcionamiento de los diferentes modos de emisión podrá ser disponer de distinto número de LEDs dependiendo del modo de emisión. Como se puede observar (tabla 4.2) el flujo típico varía notablemente dependiendo de cada modelo. Teniendo en cuenta esta diferencia de emisión es lógico anticipar que los niveles de flujo serán más difíciles de alcanzar en el modo de emisión que utiliza los LEDs rojos, ya que ofrecen el flujo nominal más bajo.

4.4.4. Diseño del sistema de balizas

4.4.4.1. Sistema básico de balizamiento

En este apartado se va a proceder a diseñar el sistema óptico de la baliza. Lo primero que se debe decidir es el número de fuentes de luz (LED) de los que dispondremos en cada baliza. El número máximo de fuentes está limitado por el tamaño total de baliza que impone la carcasa, y esta a su vez tiene unas dimensiones máximas para su correcta integración en las zonas habilitadas junto a la pista de aterrizaje. Las dimensiones estándar de las balizas permiten albergar un máximo de 5 LEDs, con sus respectivos sistemas de colimación diseñados anteriormente. Sin embargo para cumplir los requisitos se comprobará que no es necesario disponer de los 5 LEDs emitiendo simultáneamente.

Se realizarán un cálculo previo para comprobar si es viable el diseño con este número limitado de LEDs. Se supone una emisión angular uniforme que simplifica el cálculo medio de intensidad luminosa, además se aplicará un factor de corrección para introducir la eficiencia de la baliza, η .

Se considera la región angular más amplia de la tabla 4.1 (semiapertura horizontal), y se supone una eficiencia del sistema $\eta = 70\%$ (más adelante se comprobará la validez de esta hipótesis). El requisito que se fija para la zona de estudio es el más exigente para asegurarnos de cumplir el caso más desfavorable.

La intensidad luminosa se calcula según la ecuación [ec. 4.21]:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} = \eta \left(\frac{\Phi_{R,V,A}}{2\pi(1 - \cos(\text{Max}(\theta_{Hor})))} \right), \quad (4.22)$$

donde $\Phi_{R,V,A}$ es el flujo emitido por cada LED dependiendo del modelo (longitud de onda). También se asume que el flujo estará confinado en la zona de interés más amplia, ($\text{Max}(\theta_{Horizontal})$), guiado por la geometría de la baliza. Esta hipótesis se confirmará en la media que se logre una baliza que encauce el flujo apropiadamente en cada zona de interés.

La eficiencia η se define como el flujo total en el plano del detector, la union de las tres zonas de estudio (tabla 4.1), respecto al flujo total emitido por los tres LEDs:

$$\eta = \frac{\Phi_{detector}}{\Phi_{R,V,A}}. \quad (4.23)$$

<i>LED</i>	<i>INTENSIDAD LUMINOSA</i>	<i>REQUISITOS</i>	<i>Nº FUENTES</i>
AMBAR	129cd	200cd	2
VERDE	184cd	200cd	2
ROJO	72cd	200cd	3

Tabla 4.3: Estimación intensidad luminosa y numero de LEDs en baliza

A partir de los resultados de la tabla 4.3 se deriva que son necesarios al menos 3 LEDs (rojos) en el peor de los casos para satisfacer los requisitos establecidos. Esto no genera ningún conflicto porque tenemos espacio hasta 5 LEDs dentro de la carcasa. De este modo se asignarán 3 LEDs para cada configuración (Rojo, Ámbar y Verde) aplicando un margen de seguridad sobre los requisitos de la iluminación. De ahora en adelante las simulaciones emplearán LEDs rojos ya que su modo de emisión cuenta con el margen más crítico sobre los requisitos impuestos. Una vez que los requisitos se cumplan para esta configuración el resto de modos de operación (Ámbar y Verde) deberán, lógicamente, alcanzar también los requisitos establecidos.

Una vez asignado el número de fuentes de cada tipo en la baliza se puede comenzar a diseñar el sistema óptico para distribuir el flujo apropiadamente en cada zona de interés. Primero se va a presentar un modelo de baliza convencional procedente de una patente estadounidense “Embedded light fitting for runways” [19], que puede servir como modelo inicial ya que se corresponde a un esquema básico común en diversos sistemas de balizamiento.

En la figura 4.15 se observa el funcionamiento de modelo de baliza, el flujo es emitido por la fuente e incide en el reflector, parte de ese flujo se dirige a la entrada de luz y se convierte en flujo de salida abandonando la baliza. Otra parte del flujo emitido por la fuente tras reflejarse en el reflector incide en el espejo y vuelve al reflector para acabar encauzado en la baliza. Pero este sistema sufre pérdidas de flujo que no se muestran en la Figura 4.15, como por ejemplo los rayos que inciden en un borde del espejo de tal forma que no vuelven a la superficie del reflector, además del flujo emitido por la fuente y que no llega a incidir en el reflector y no se dirige por tanto a la entrada de luz.

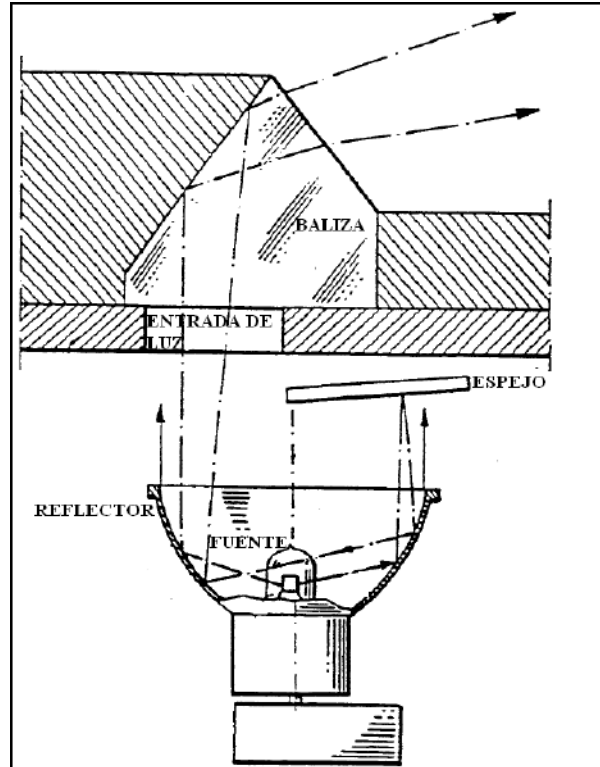


Figura 4.15: Patente sistema balizamiento. Hans Ahlen, Leif Ek.

Para comenzar con el diseño de la baliza se realizará un esquema con un trazado básico que logre la orientación adecuada de la luz concentrando el flujo luminoso en la zona requerida. Como se observa en la tabla 4.1 las zonas de interés se centran a una altura aproximada de $\theta_{SAL} = 5^\circ$ en el eje vertical.

El ángulo vertical de salida (altura) de la baliza se deriva de la figura 4.16:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_1 = 90 - \varphi \\ \theta_2 = 2\theta_1 - 90 = 90 - 2\varphi \end{array} \right\}, \quad (4.24)$$

$$\theta_{SAL} = \arcsin\left(\frac{n_1 \sin(\theta_2)}{n_2}\right) = \arcsin\left(\frac{n_1 \sin(90-2\varphi)}{n_2}\right). \quad (4.25)$$

Sustituyendo los índices de refracción por sus valores ($n_1 = 1.49$ PMMA) ($n_2 = 1$ Aire), y despejando en ángulo de inclinación φ , se puede averiguar la inclinación de la baliza para un ángulo de salida deseado $\theta_{SAL} = 5^\circ$:

$$\varphi = \frac{90 - \arcsin\left(\sin\left(\frac{\theta_{SAL}}{n_1}\right)\right)}{2} = \frac{90 - \arcsin\left(\sin\left(\frac{5}{1.49}\right)\right)}{2} = 43.32^\circ. \quad (4.26)$$

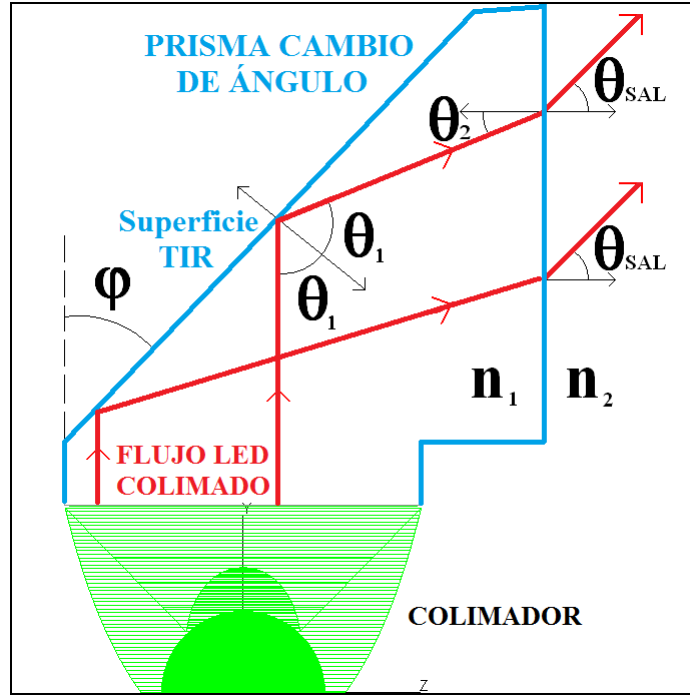


Figura 4.16: Ángulo vertical de salida de la baliza

Se va a comprobar que el valor obtenido para el ángulo del codo de la baliza, φ , está dentro de los límites de reflexión total, de esta forma se evitan pérdidas por reflexión en el interior de la baliza. A partir de las leyes de Snell se deriva el ángulo límite φ_{max} :

$$\left\{ \begin{array}{l} n_1 \sin(\theta_{1min}) = n_2 \sin(90) \Rightarrow \theta_{1min} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \\ 180 = \theta_1 + 90 + \varphi \Rightarrow \varphi = 90 - \theta_1 \end{array} \right\}, \quad (4.27)$$

$$\varphi_{max} = 90 - \theta_{1min} = 90 - \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = 47.78^\circ. \quad (4.28)$$

Como se puede comprobar el valor del ángulo φ obtenido está dentro del límite de reflexión φ_{max} . De esta forma se ha fijado el primer parámetro de la geometría de la baliza, ahora se va a simular mediante el programa de trazado óptico TracePro un el sistema básico para analizar su comportamiento:

En la figura 4.17 se muestra un trazado de rayos en el modo de emisión de los LEDs rojos, situados dentro de la baliza como se observa en el plano X-Z. Al tratarse de una primera aproximación a la geometría del sistema no se trata de cumplir los requisitos en las tres zonas sino simplemente comprobar que el flujo se propaga con el ángulo de altura deseado $\theta_{SAL} = 5^\circ$.

A continuación (fig. 4.18) se muestra un mapa rectangular de iso-candelas que sitúa el flujo en el espacio angular, la simulación ha sido realizada emitiendo con los LEDs rojos con 100 lm de flujo luminoso cada LED.

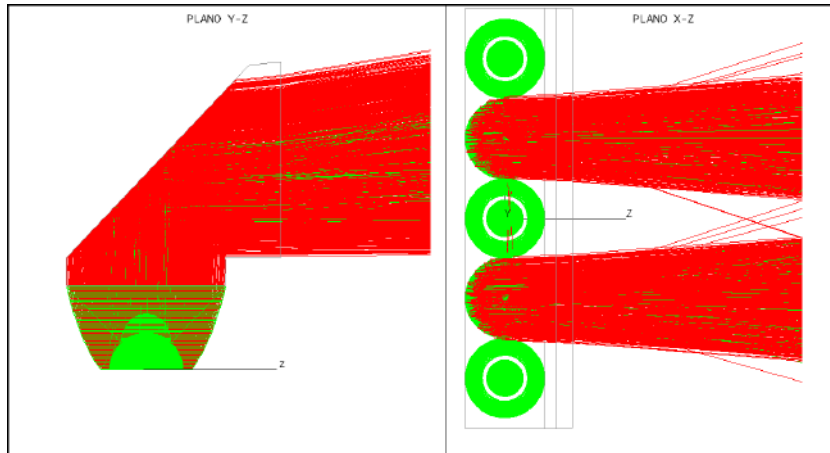


Figura 4.17: Análisis del comportamiento óptico del sistema básico de balizamiento

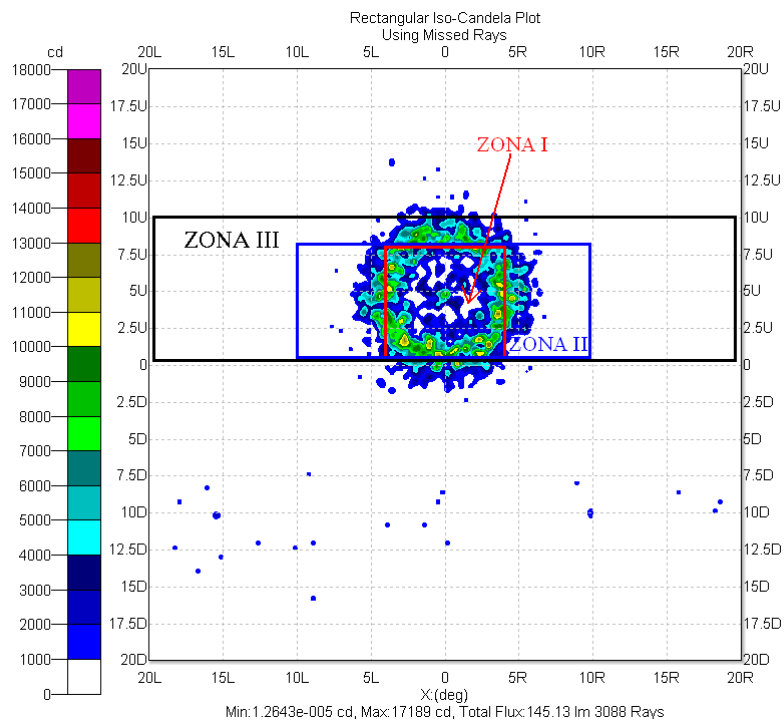


Figura 4.18: Mapa rectangular de isocandelas para sistema básico de balizamiento

En la figura 4.18 se aprecia que el flujo de salida de la baliza se distribuye alrededor del ángulo de altura deseado 5° . La escala cromática de candelas, a la izquierda de la figura, muestra un nivel muy alto, entre 2000 y 10000 candelas, pero es debido a que el flujo se concentra en un espacio angular muy reducido. Si calculásemos teóricamente el flujo con 200 lumens en una región angular de $\pm 5^\circ$ se obtendrían aproximadamente 5000 candelas, dato que concuerda con el obtenido por la simulación.

Por otra parte se puede comprobar que el flujo total de salida es 145 lm lo que corresponde a un 72.5 % de eficiencia, validando la hipótesis del rendimiento del sistema aplicada en los cálculos preliminares sobre el número de LED necesarios para satisfacer los requisitos de iluminación (tabla 4.3). En un primer análisis de la distribución de flujo se aprecia (fig. 4.18) que la energía se concentra principalmente en la Zona I (rectángulo rojo) y por tanto las dos zonas restantes no alcanzan el mínimo nivel requerido de intensidad luminosa. El siguiente paso consiste en expandir el flujo para cubrir una región angular mayor, se tratará de distribuir el flujo emitido por la baliza en un área delimitada por las especificaciones de la tabla 4.1. Para esta labor se ha realizado un exhaustivo estudio en el que se combinan el uso de superficies rugosas que optimicen la uniformidad con superficies cilíndricas y esféricas que aumentan la apertura del haz de luz emitido. Al introducir dichos elementos ópticos se gana en uniformidad (ajustándose a los niveles de flujo exigidos) y se consigue una región angular de emisión que se adapta a las zonas de estudio. El principal inconveniente es que se introducen pérdidas al desviar la trayectoria de la luz y añadir un mayor número de interfaces ópticas. El sistema de balizamiento completo se muestra en el siguiente esquema, en el que se aprecian los elementos ópticos (lente plano-convexa convergente y material difusor Softgloss) añadidos respecto al sistema básico.

A raíz de añadir al sistema los nuevos elementos ópticos se le dota de mayor complejidad y es necesario fijar una serie de parámetros para su completa caracterización. El material rugoso Softgloss ya ha sido descrito con anterioridad (Sección 3.3) y se puede caracterizar mediante la relación entre el periodo y la amplitud de su ondulación, ya que el perfil del Softgloss se puede aproximar a una sinusoidal.

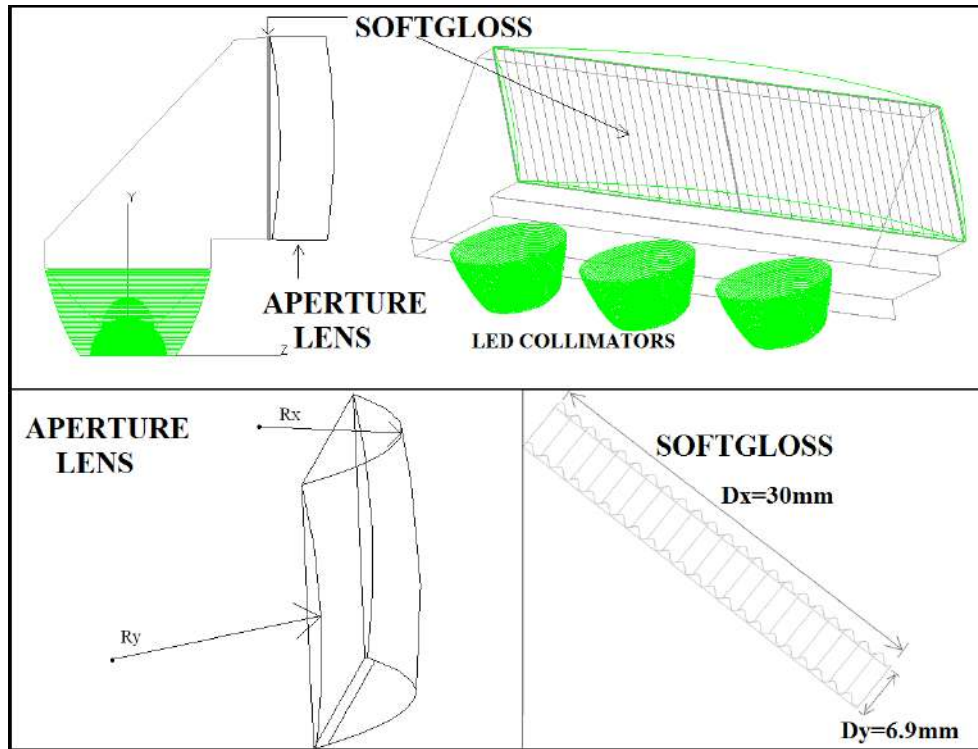


Figura 4.19: Configuración completa del sistema de balizamiento

Una vez introducidos los nuevos elementos ópticos, la configuración del sistema de balizas se puede definir por medio de una serie de parámetros (tabla 4.4) que influyen de forma decisiva en el comportamiento de la baliza. De este modo los resultados del sistema óptico (eficiencia, uniformidad, e intensidad luminosa media en cada zona de interés) se pueden analizar en función de los parámetros de la geometría de la baliza establecidos.

Se supone una amplitud fija para el Softgloss de modo que solo se considera el periodo como parámetro característico del sistema. La intensidad luminosa media se mide en candelas como se ha visto anteriormente [ec. 4.21] y la uniformidad queda definida por la intensidad luminosa media dividida por el máximo de intensidad, teniendo en cuenta la región de interés estudiada en cada caso.

$$U_n = \frac{I_n}{\max(I_n)}, \quad (4.29)$$

donde I_n es la intensidad media del flujo luminoso en cada zona, y U_n el factor de uniformidad correspondiente.

Variables de entrada del sistema	Variables de salida del sistema
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Radios de lente Plano-convexa: R_x, R_y ▪ Periodo del Softgloss: \mathbf{P} 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eficiencia del sistema: η. ▪ Intensidad Luminosa media en cada una de las zonas de interés: I_1, I_2, I_3 ▪ Uniformidad en cada una de las zonas de interés: U_1, U_2, U_3

Tabla 4.4: Variables del sistema de balizas

4.4.4.2. Optimización del sistema de balizamiento

A través del proceso de diseño se ha obtenido una configuración de la baliza puede ser tratada como una función multi-variable y con múltiples salidas. Por tanto es posible llevar a cabo un proceso de optimización de la función que caracteriza la emisión de la baliza y de este modo alcanzar una configuración óptima que asegure un comportamiento que cumple con los requisitos establecidos por la normativa OACI.

Para desarrollar el proceso de optimización se emplea un conjunto de funciones que son capaces de minimizar y maximizar funciones no lineales e implementan algoritmos de optimización específicos. En concreto se empleará un algoritmo basado en SQP (Programación Cuadrática Secuencial), introducido previamente (Sección 2.1.1.2), y que resuelve un problema, caracterizado por una función de mérito, que tiende a una serie de objetivos definidos por el usuario.

Los métodos basados en SQP efectivo para optimizar el rendimiento de sistemas de iluminación [20]. En concreto el algoritmo empleado permitirá asignar prioridades entre los objetivos y la definición de ciertos umbrales mínimos (aplicados en nuestro caso a la Eficiencia y Uniformidad) junto con la posibilidad de establecer valores de objetivos exactos que serán útiles para establecer niveles de intensidad media. Además se podrá restringir el rango de las variables de la función por medio de valores límite. De este modo el proceso de optimización buscará la configuración del sistema mas eficiente y uniforme manteniendo los niveles de intensidad en cada una de las tres zonas (optimización de Pareto [21]).

Las tareas previas, necesarias para abordar el sistema de optimización son las siguientes:

1. Desarrollar mediante Tracepro una serie de simulaciones paramétricas en función de los radios de la lente y el periodo del Softgloss.

Será necesario desarrollar macros que generen la geometría de la lente planoconvexa y el Softgloss en función de los parámetros de entrada y las añadan a la configuración básica del sistema. Una vez establecida la configuración completa del sistema se trazan los rayos considerando como fuentes los LEDs correspondientes al modo de emisión. Por último se guardarán los resultados (mapas de Irradiancia e Iso-candelas) obtenidos por la simulación para su posterior procesamiento.

2. Implementar una función *Simula_la_baliza.m* en lenguaje *Matlab* cuya tarea consista en gestionar las simulaciones paramétricas de Tracepro y procese los resultados obtenidos en dichas simulaciones para calcular las variables de salida $\eta, I_1, I_2, I_3 \dots$. De este modo se equipara el sistema de balizas a una función de *Matlab* lo que permite aplicar un proceso de optimización del sistema. La función *Simula_la_baliza.m* se muestra en el capítulo de apéndices.

3. Por último se aborda el propio proceso de optimización de la función “**Simula_la_baliza.m**” antes descrita.

En esta ocasión se empleará la función “**fgoalattain.m**” de la Toolbox de optimización de *Matlab*, que emplea un método de optimización SQP. Para emplear correctamente la función de optimización es necesario definir una serie de variables y opciones que vienen descritas en la ayuda de la propia función y que se describen brevemente en este trabajo.

Algunos factores determinantes en el proceso de optimización serán:

- **El tiempo de ejecución de la función a optimizar.** Al tratarse de una función que simula un sistema de trazado óptico el tiempo de ejecución depende del número de rayos emitidos por cada fuente. Para lograr un resultado realista se necesitan del orden de 10^5 rayos por cada fuente LED, esta cifra implica un tiempo de ejecución de varias horas por iteración. Por tanto serán necesarios varios días (incluso semanas) para completar un proceso de optimización, dependiendo del número de iteraciones necesarias para alcanzar los objetivos fijados.

Para llevar a cabo ese volumen de cálculos se dispone de varias estaciones de trabajo multi-núcleo que pueden dividir el tiempo de trabajo al simular en paralelo.

- **El valor inicial de las variables de entrada.** El valor de las variables iniciales de la geometría de la baliza puede influir en la determinación de la solución final. Para minimizar el efecto del valor inicial de los parámetros del sistema se ejecutará el proceso de optimización considerando varios puntos iniciales del espacio de variables. Además se realizará un estudio previo del rango idóneo de las variables del sistema.
- **El valor de los objetivos que se tratan de alcanzar y los pesos de la función de optimización.** Dependiendo de los requisitos impuestos en este caso a los sistemas de balizamiento para los aeropuertos se fijan los objetivos de la función de optimización. Por otra parte los pesos de la función de optimización fijan las prioridades a la hora de elegir una configuración del sistema frente a otra. Es decir, dependiendo de cómo se establezcan los pesos de la función de optimización se considerará prioritario alcanzar el objetivo relativo a una variable de salida del sistema frente a otra. Por ejemplo en nuestro sistema de balizamiento podría interesar obtener una configuración de mayor eficiencia en detrimento de la uniformidad de la luz en cada zona de estudio.

4.4.4.2.1. Análisis del rango de las variables de entrada Resulta fundamental para acometer el proceso de optimización un análisis previo del comportamiento de la función dependiendo del rango considerado de las variables de entrada. En este apartado se evaluará la función que simula el comportamiento de la baliza para diferentes valores de los radios de la lente R_x , R_y y del periodo P del Softgloss.

En principio se considera un intervalo extenso tanto de los radios como del periodo y es necesario disminuir la densidad de medidas para abarcar todo el rango. Por tanto las curvas que se muestran en la figura 4.20 tienen una precisión de $5mm$ respecto a R_x y R_y y una precisión de $0.5mm$ respecto al periodo del Softgloss P .

Los valores mínimos de R_x y R_y vienen impuestos por las dimensiones de la salida de la baliza, mientras que el periodo del Softgloss P varía entre $0.5mm$ (límite de fabricación) y $3mm$ (valor para el cual el efecto difusor deja de ser relevante).

Se observa (fig. 4.20) una dependencia notable de la Intensidad luminosa media en las tres zonas (I_1, I_2, I_3) frente a los radios de la lente (R_x, R_y). En cambio la Eficiencia del sistema (η) no se ve apenas alterada por la variación de los radios de la lente.

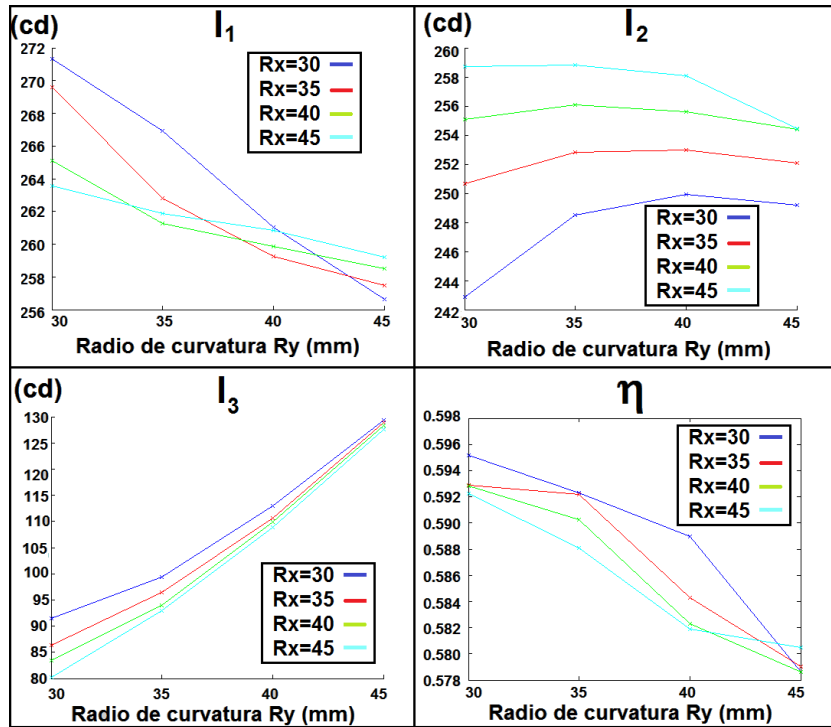


Figura 4.20: Intensidad luminosa media y Eficiencia del sistema de balizas frente a radios de la lente $R_x R_y$

Esto se debe a que el flujo que alcanza la zona de detección varía en su distribución pero la energía no abandona la union de las tres zonas de interés.

El hecho de que la eficiencia permanezca estable fig. (fig. 4.20) se debe también a la elección del valor del periodo P , eligiendo un rango adecuado del periodo se asegura un valor óptimo de la uniformidad manteniendo el nivel de la eficiencia y además permite cierta libertad en la elección de los valores R_x y R_y para ajustarse a los requisitos establecidos en cada zona. En cambio una elección errónea del periodo del Softgloss P puede derivar en unos resultados que se alejan de los objetivos, ya que el sistema depende drásticamente de este parámetro.

En la figura 4.21 se aprecia justo el efecto del periodo P , tanto en la eficiencia como en la uniformidad en las tres zonas de estudio. Como se había anticipado la eficiencia muestra una fuerte dependencia respecto al periodo del Softgloss. Por su parte la uniformidad en cada una de las zonas varía también respecto al periodo, al igual que ocurre si modificamos los radios de curvatura de la lente. En el caso de la eficiencia no se aprecia apenas dependencia con el radio R_x , resultado que concuerda con el obtenido anteriormente (fig. 4.20).

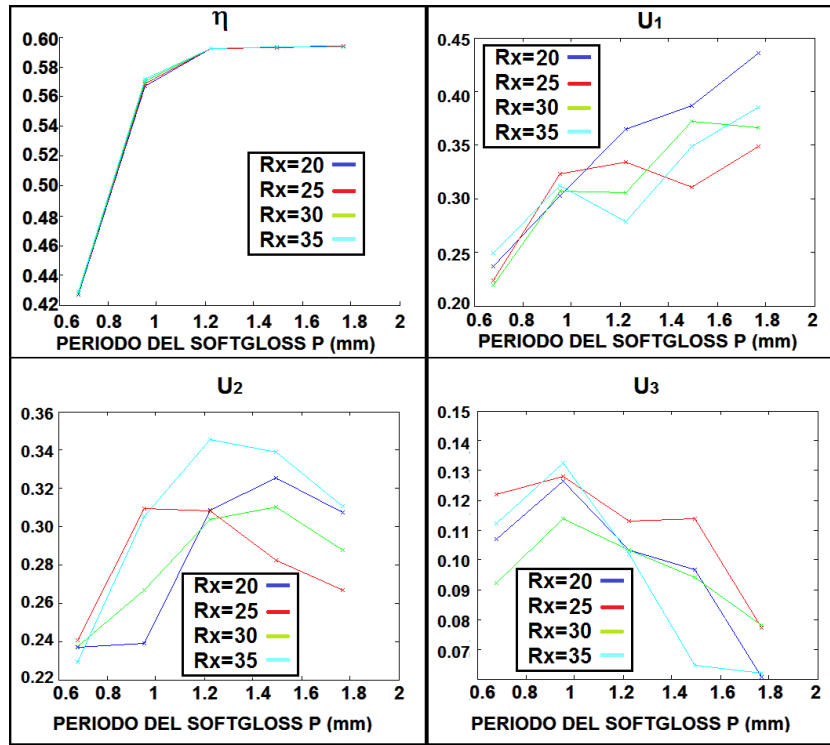


Figura 4.21: Eficiencia y Uniformidad del sistema de balizas frente a al periodo del Softgloss P y radio de la lente R_x

Una vez acotado el rango de trabajo de la baliza se puede aumentar la densidad de medidas. A la hora de restringir el intervalo de las variables de entrada se considerará fundamental un alto nivel de eficiencia sin renunciar a una buena uniformidad en las zonas II y III (U_2, U_3), por tanto el rango de valores del periodo P queda limitado al intervalo $P \in [1, 2]$.

Limitando a su vez el rango de variación de los radios de la lente se obtienen unas curvas de resultados de mayor precisión como las que se muestran en la figura 4.22.

4.4.4.2.2. Función de optimización “fgoalattain”. Para desarrollar el proceso de optimización se emplea la Toolbox de optimización de *Matlab*. La Toolbox de optimización consiste en una colección de funciones que amplían la capacidad de computación numérica del programa *Matlab*. Este conjunto de funciones logran minimizar o maximizar funciones no lineales generales. Todas las funciones que incluye la Toolbox son ficheros con extensión “.m”, contruidos con código de *Matlab* que implementan algoritmos de optimización específicos.

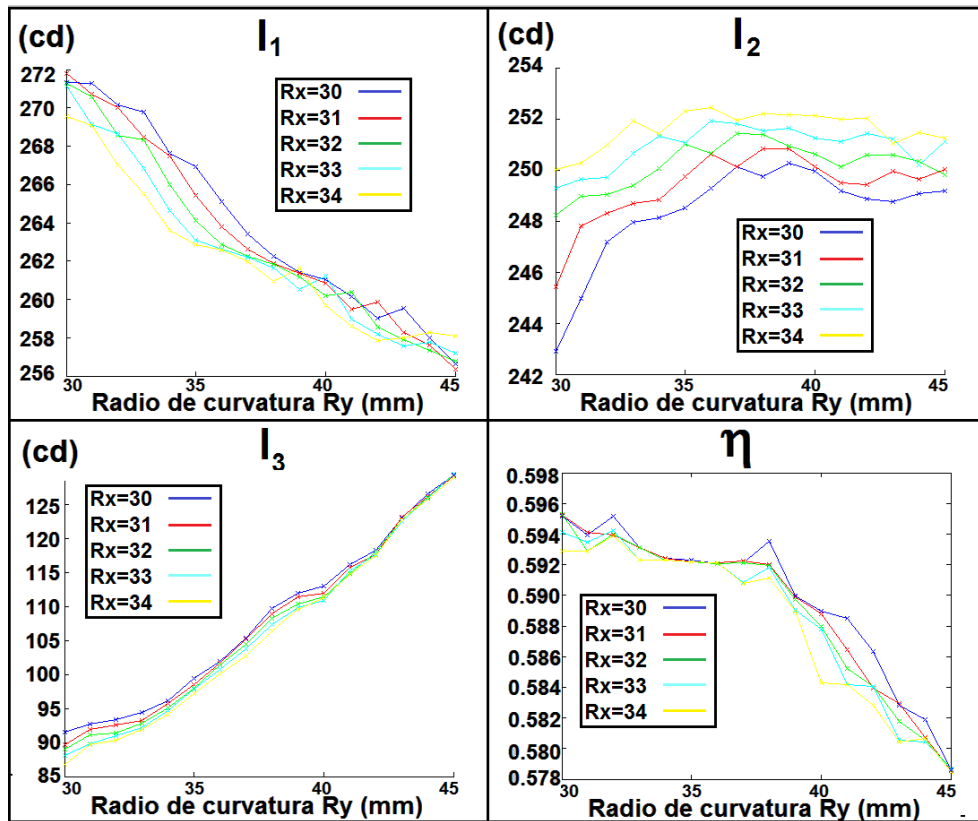


Figura 4.22: Intensidad luminosa media y Eficiencia del sistema frente a R_1 y R_2 . Precisión 1mm

En concreto la función “fgoalattain” resuelve un problema, caracterizado por una función de mérito, alcanzando una serie de cotas u objetivos especificados por el usuario. Esta función es eficaz para optimizar la función que simula el sistema de balizamiento ya que permite asignar prioridades a determinados objetivos así como especificar unos umbrales mínimos (Eficiencia, Uniformidad) junto con unos objetivos exactos (Intensidad luminosa media). Además de poder restringir el rango de las variables de la función mediante unos valores límite. De este modo el proceso de optimización buscará una configuración del sistema de baliza que sea lo más eficiente y uniforme posible, sin alejarse de los niveles de intensidad luminosa requeridos en cada una de las tres zonas.

A continuación se describirá brevemente el algoritmo y los argumentos que emplea la función “fgoalattain”, para una información más precisa se puede consultar la ayuda de *Matlab*. La función “fgoalattain” resuelve el problema de objetivos múltiples descritos por la ecuación 4.30:

$$\text{Minimizar}(\gamma)_{x,\gamma} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} F(x) - pesos \cdot \gamma \leq objetivos \\ lb < u < ub \end{array} \right\} \quad (4.30)$$

donde $F(x)$ es la función que describe el comportamiento del sistema (la baliza) y que se pretende optimizar, x es el vector de variables de entrada, $pesos$ es el vector de pesos, $objetivos$ es el vector de objetivos, γ es el parámetro a minimizar y $[lb, ub]$ son los vectores que limitan el valor inferior y superior de cada una de las variables del vector x .

Como se puede observar en el conjunto de ecuaciones [ec.4.30], la función “fgoalattain” evalúa la desigualdad $[F(x) - pesos \cdot \gamma \leq objetivos]$ modificando el valor del vector de variables x (siempre dentro del intervalo $[lb, ub]$) para minimizar el parámetro γ que intuitivamente se puede interpretar como el error de la optimización o la función de mérito.

El signo del vector de pesos indica si el objetivo correspondiente es un límite superior o inferior y por tanto si ha de superarse o rebajarse en la mayor medida de lo posible. En este proceso de optimización se emplea un algoritmo de pesos constantes u optimización convencional *CMF* (Sección 2.2), ya que emplear una función de mérito dinámica aumentaría el tiempo de ejecución excesivamente, además los objetivos exactos que se pretenden alcanzar respecto a las intensidades medias reducen la influencia de dichos pesos en el resultado de la optimización.

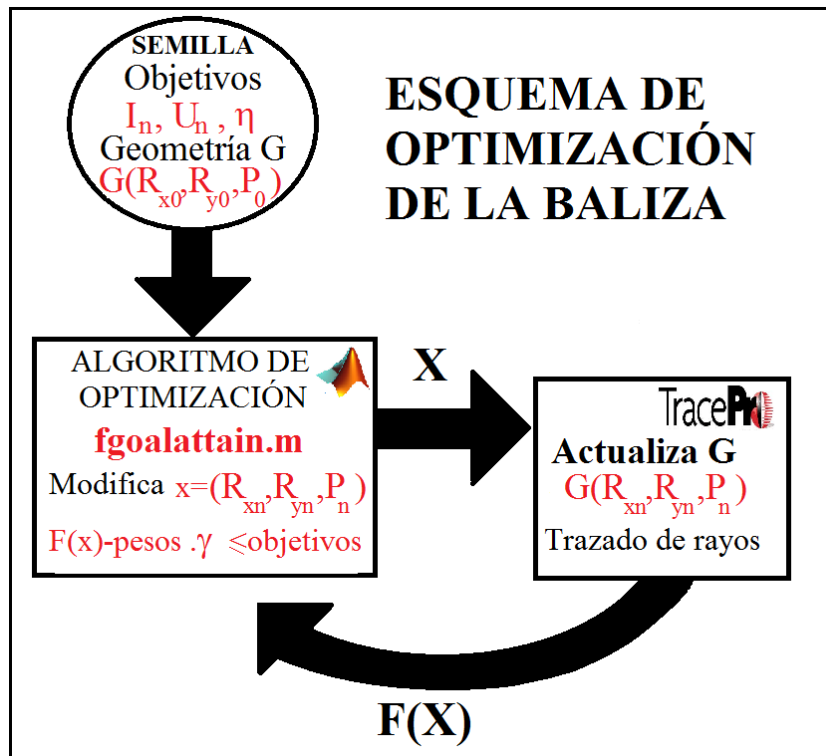


Figura 4.23: Diagrama de flujo del proceso de optimización de la baliza

La magnitud de cada componente del vector de pesos indica la prioridad de alcanzar el objetivo correspondiente. Cuanto menor sea el peso más prioritario es el objetivo, pudiendo incluso, si alguna o varias componentes disminuyen lo suficiente, ignorar el resto de objetivos en favor de los que corresponden a las componentes más reducidas del vector de pesos. También es posible determinar el valor inicial de las variables de entrada x_0 desde el cual se comienza el proceso de optimización, y como ya se ha comentado anteriormente puede ser decisivo a la hora de encontrar un máximo absoluto o relativo.

Además la función “fgoalattain” cuenta con una serie de opciones a las que se accede mediante la orden “optimset” y que permiten fijar el número máximo de iteraciones y de tiempo de ejecución del proceso de optimización, los límites $[lb, ub]$ del vector de variables entrada, y el modo de interpretar los objetivos (para activar el modo de objetivos exactos en lugar de límites inferiores o superiores) entre otras muchas opciones. La función “fgoalattain” ofrece además un mayor grado de complejidad mediante una serie de argumentos y opciones adicionales que por el momento no se aplicarán al proceso de optimización.

4.4.4.2.3. Proceso de optimización mediante “fgoalattain” Una vez familiarizados con la función de optimización “fgoalattain” se inicia el proceso de optimización con el que se pretende obtener una configuración que cumpla con todos los requisitos impuestos al sistema de balizamiento y presente unos niveles óptimos de eficiencia y uniformidad.

A continuación se define el valor de los parámetros de la optimización que se va a realizar. En cada caso se podrán ajustar unos valores diferentes tanto del vector de pesos como de las variables iniciales de entrada. También se probará a modificar las opciones de la función de “fgoalattain”, como pueden ser el tiempo máximo de ejecución “MaxTime”, o el modo “GoalsExactAchieve” para alcanzar los objetivos exactos en lugar de fijar límites inferiores o superiores.

- **Vector de Objetivos:** $[\eta \ I_1 \ I_2 \ I_3 \ U_1 \ U_2 \ U_3]=[0.65 \ 250 \ 250 \ 125 \ 0.3 \ 0.3 \ 0.15]$. La eficiencia se fija en un 65 %, basado en las simulaciones previas y las pérdidas introducidas por los elementos añadidos a la configuración básica. Los niveles de Intensidad luminosa se fijan un 25 % por encima de los requisitos OACI para asegurarnos que el prototipo cumpla los requisitos, ya que el comportamiento experimental ofrece, por lo general, un rendimiento inferior al de las simulaciones. Los objetivos respecto a la uniformidad se estiman a partir de los resultados mostrados en la figura 4.21.
- **Vector de Pesos:** Se fija un vector de signo negativo y magnitud igual al valor de los objetivos que se pretende alcanzar. De este modo se busca una configuración cuyo vector de salida diste equitativamente de cada uno los objetivos. También se llevarán a cabo optimizaciones con búsqueda exacta de objetivos, esta opción es la más adecuada para mantener una proporción exacta entre los niveles de intensidad luminosa media de las 3 zonas.
- **Rango de variables:** Se acotan los posibles valores de las variables de la función objetivo entre los valores obtenidos en el análisis previo (Sección 4.4.4.2.1). Límite inferior $lb=[R_{xmin} \ R_{ymin} \ P_{min}]=[20 \ 35 \ 1]$, Límite superior $ub=[R_{xmax} \ R_{ymax} \ P_{max}]=[40 \ 55 \ 2]$
- **Valores iniciales:** Se elige un valor inicial x_0 de las variables de entrada dentro del rango establecido previamente. Se llevarán a cabo varios procesos de simulación escogiendo distintos valores iniciales

- **Opciones de “fgoalattain”:** Para el resto de opciones de la función se utilizan los valores por defectos, salvo el tiempo máximo de ejecución que se amplía a una semana ($MaxTime = 604800$). El número máximo de iteraciones no es crítico ya que cada vez que se evalúa la función objetivo se emplea un tiempo de ejecución de varias horas (3 horas aproximadamente), y por tanto en una semana el número de iteraciones no superará el centenar.

A continuación se analizará en detalle la evolución y los resultados del proceso de optimización que alcanza la configuración óptima de entre todas las optimizaciones llevadas a cabo. En la figura 4.24 se muestra la evolución del parámetro de acercamiento, “Attainfactor”, durante el proceso de optimización.

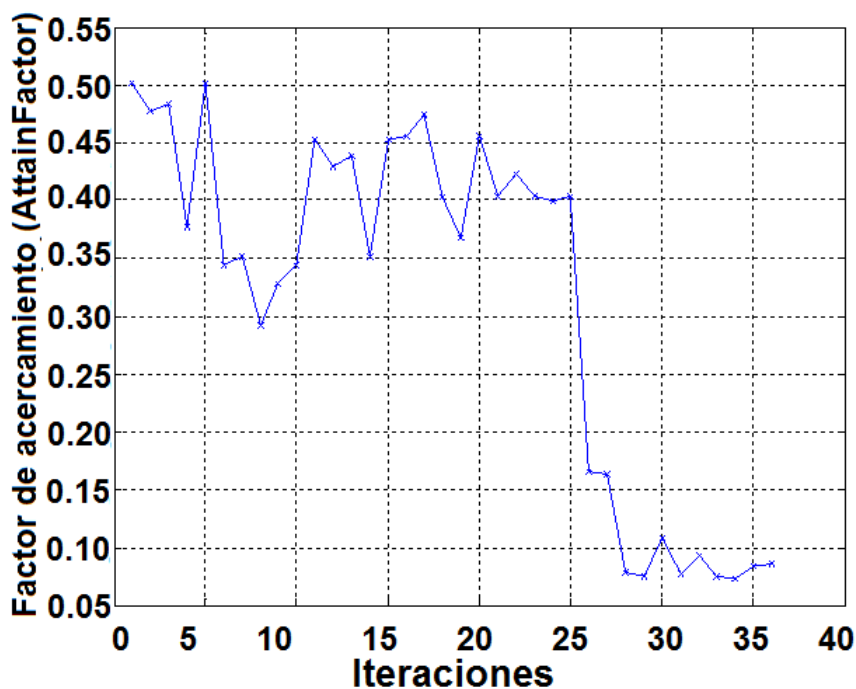


Figura 4.24: Evolución del error global respecto a los objetivos durante la optimización

En la figura 4.24 se observa que el factor de acercamiento “AttainFactor”, que se puede interpretar como el error frente a los objetivos fijados, se va reduciendo a medida que avanzan el número de iteraciones. Lo que significa que el sistema tiende a una configuración óptima. Si se analizan las variables de salida “normalizadas” frente a los objetivos (no están estrictamente normalizadas porque el valor máximo puede ser superior a uno cuando una variable de salida supere su correspondiente objetivo), se puede observar el efecto positivo de la optimización en la respuesta del sistema.

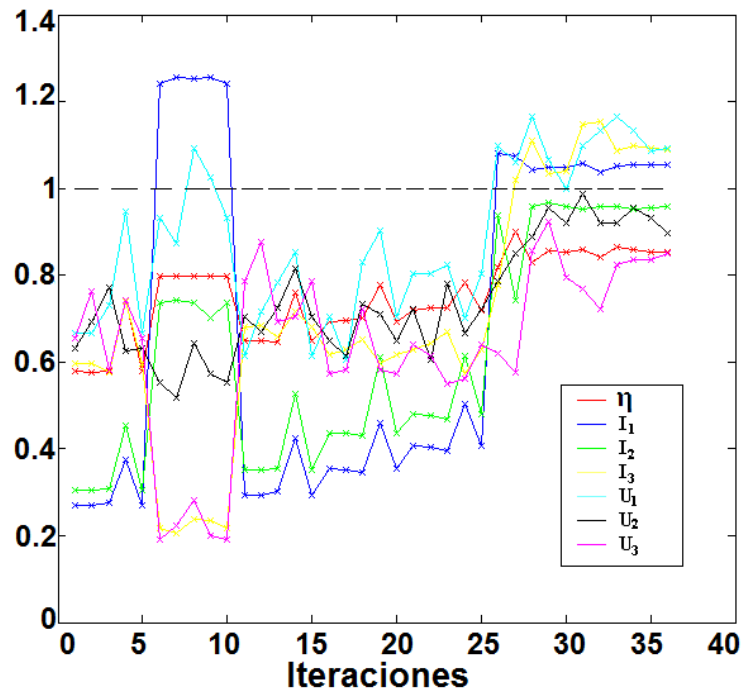


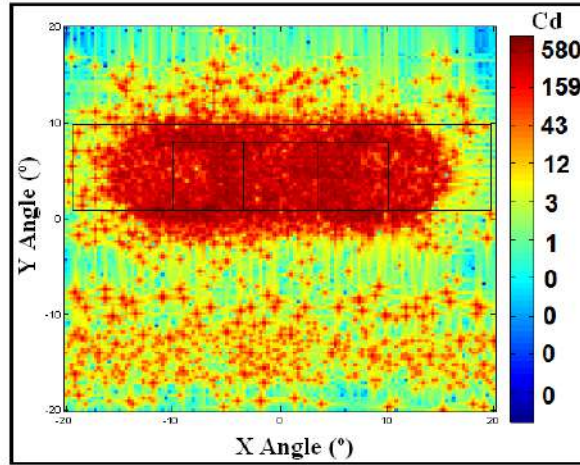
Figura 4.25: Evolución de las variables de salida de la función objetivo durante la optimización

En la Figura 4.25 se aprecia una evolución notable de la respuesta del sistema, también se puede comprobar que el proceso de optimización ha utilizado un vector de pesos que asegure un equilibrio entre las variables de salida. De modo el proceso de optimización no se estabiliza en una configuración del sistema en la cual una variable supera su objetivo correspondiente (valor superior a uno), si en dicha configuración no se obtiene simultáneamente una mejora del resto de las variables de salida.

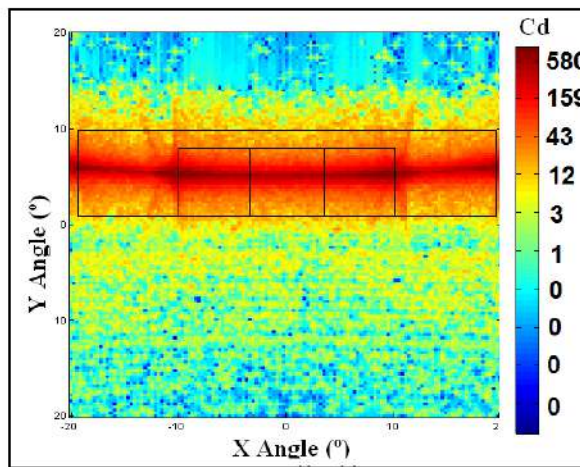
En este caso el proceso de optimización encuentra una configuración que no es capaz de mejorar, y se estabiliza el factor de acercamiento en su valor mínimo. El proceso de optimización termina (tras más de 4 días de tiempo de ejecución) al llegar a una desviación de las variables de entrada inferior al doble del parámetro $TolX$, que se puede fijar en las opciones de la función “fgoalattain” y que limita la precisión con la que se debe buscar una configuración óptima.

En el mapa de Iso-Candelas obtenido se hace patente una mejora en uniformidad y distribución en las tres zonas de interés que es precisamente el objetivo del proceso de optimización (fig. 4.26).

Iteración 5



Iteración 15



Iteración 34

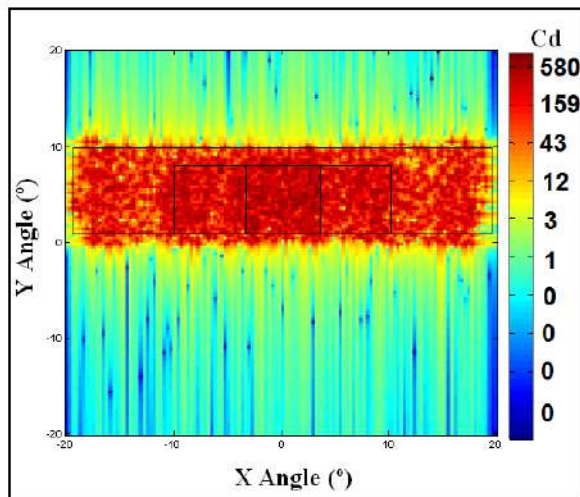


Figura 4.26: Evolución de las variables de salida de la función objetivo durante la optimización

η	$I_1(cd)$	$I_2(cd)$	$I_3(cd)$	U_1	U_2	U_3
62 %	263	238	134	0.22	0.19	0.08

Tabla 4.5: Resultados configuración optima sistema de balizas

En la figura 4.26 se muestra la configuración optima que genera el proceso de optimización (Iteración 34). En este mapa de Iso-candelas se puede observar como la mancha producida por el flujo de salida de la baliza se adapta adecuadamente a las tres zonas de interés. Dando lugar a unos niveles de intensidad luminosa, uniformidad y eficiencia que se recogen en la tabla 4.5.

La tabla 4.5 muestra unos resultados que cumplen los requisitos en cuanto al nivel de intensidad luminosa y conservan unos valores adecuados de uniformidad y eficiencia, por tanto esta configuración del sistema es adecuada para generar un prototipo de la baliza y medir los resultados experimentalmente para contrastar el trabajo análisis llevado a cabo mediante las simulaciones.

4.4.4.3. Resultados experimentales

En esta sección se muestran los resultados experimentales del sistema de balizas previamente diseñado. Para llevar a cabo este análisis se fabrica un prototipo basado en la mejor configuración obtenida mediante el proceso de optimización. Sin embargo se aplican ciertas modificaciones al mismo para facilitar su fabricación. Estas modificaciones están orientadas principalmente a acomodar los componentes de la baliza dentro de la carcasa y no alteran la emisión ni la propagación del flujo luminoso.

El sistema de iluminación se muestra en la figura 4.27. Dentro de la carcasa se acomodan 3 LEDs junto a los correspondientes dispositivos ópticos (colimadores, prismas, materiales rugosos). Se ha introducido una ligera curvatura en el soporte de metal que ancla a los LEDs (fig.4.27 b). esta desviación está motivada por razones técnicas y, como se observará posteriormente, no afecta al comportamiento actual de la baliza. Además de los dispositivos ópticos, la carcasa también alberga los sistemas de alimentación y control de la baliza. Como requisito previo para empezar el análisis experimental es necesario llevar a cabo un estudio de la estabilidad, asegurando así la validez de las medidas sin importar el instante de tiempo en el que han sido tomadas.

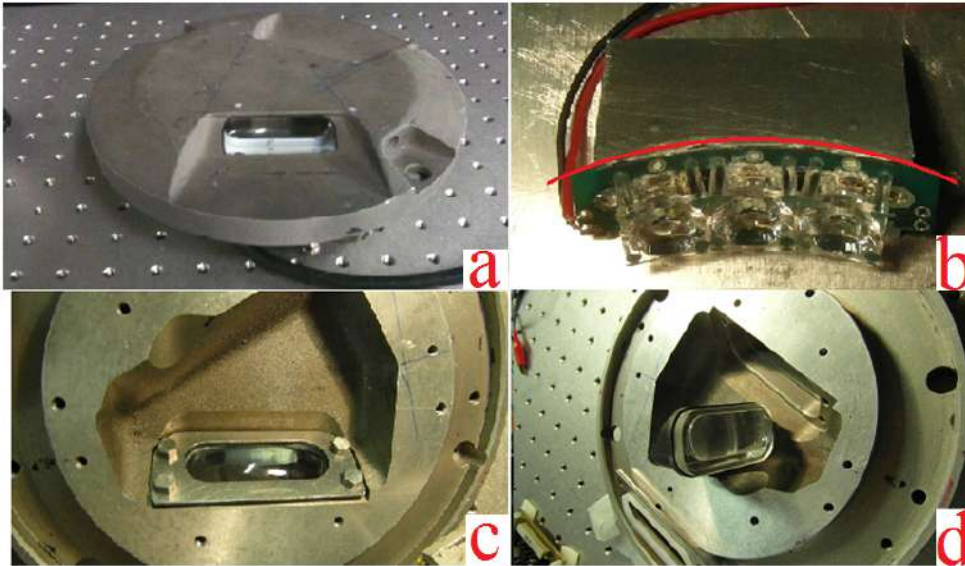


Figura 4.27: Prototipo del sistema de balizas

La estabilidad nos da una idea de la robustez del sistema que debe de mantener estables los niveles de flujo luminoso en cada zona de emisión para alcanzar los requisitos OACI.

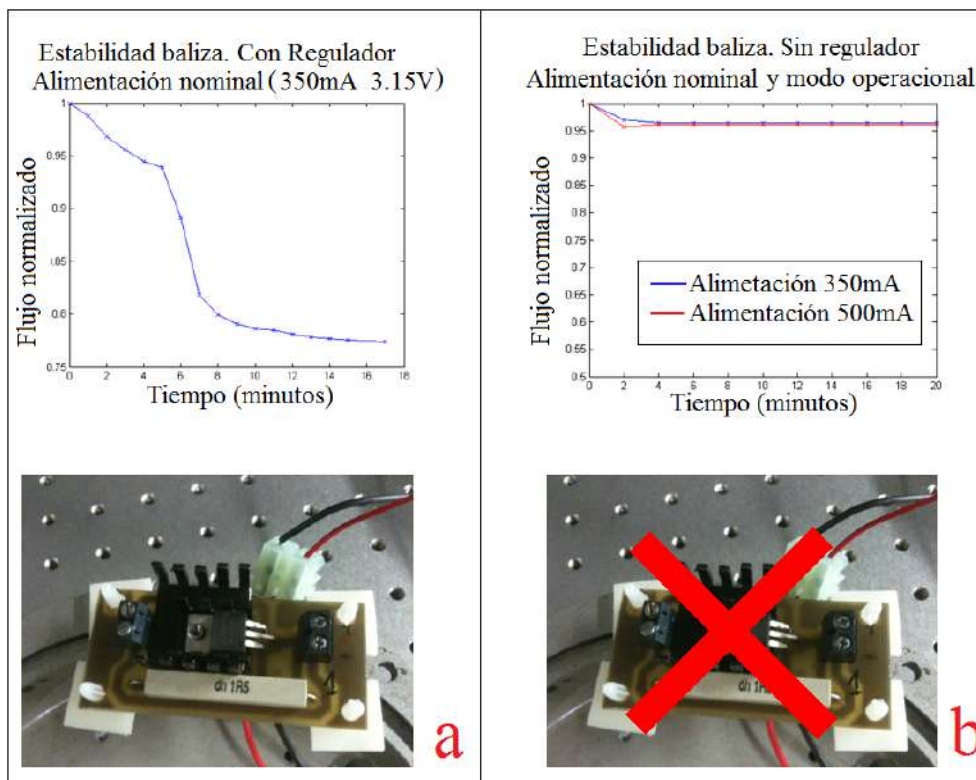


Figura 4.28: Estabilidad del sistema de balizas

<i>LED</i>	<i>Analysis zone</i>	<i>Average Intensity (cd)</i>	<i>Minimum Intensity (cd)</i>
Ámbar	1	255	123
Ámbar	2	191	118
Ámbar	3	139	82
Rojo	1	212	125
Rojo	2	168	113
Rojo	3	124	61
Verde	1	309	148
Verde	2	243	127
Verde	3	192	113

Tabla 4.6: Resultados experimentales

El regulador de intensidad integrado (fig. 4.28.a) incrementa la inestabilidad de la baliza. A medida que el regulador comienza a operar calienta los LEDs y el flujo emitido decrece. La solución consiste en ubicar el sistema regulador lo más lejos posible de las fuentes LED (fig. 4.28.b). Una vez los ajustes de la estabilidad han sido llevados a cabo se pueden registrar las medidas experimentales del prototipo para caracterizar el verdadero comportamiento del sistema de balizas. Se consideran dos modos de emisión dependiendo de la alimentación aplicada a las fuentes LED; nominal ($350mA$) o típica ($500mA$).

Finalmente se muestran los resultados que proporciona el prototipo y que reflejan la coherencia entre la optimización (fig. 4.26) y los resultados experimentales (fig.4.29). Los resultados se logran por medio de una alimentación nominal por tanto existe un amplio margen para incrementar la potencia suministrada a la baliza hasta el modo de operación típico.

La tabla 4.6 muestra que los resultados respecto a la intensidad de flujo media que alcanza el prototipo para cada area. Los umbrales mínimos de iluminación también se alcanzan, sin embargo estos niveles medidos dependen de las dimensiones de la matriz empleada para almacenar los mapas de isocandelas, así como el procesamiento de las imágenes.

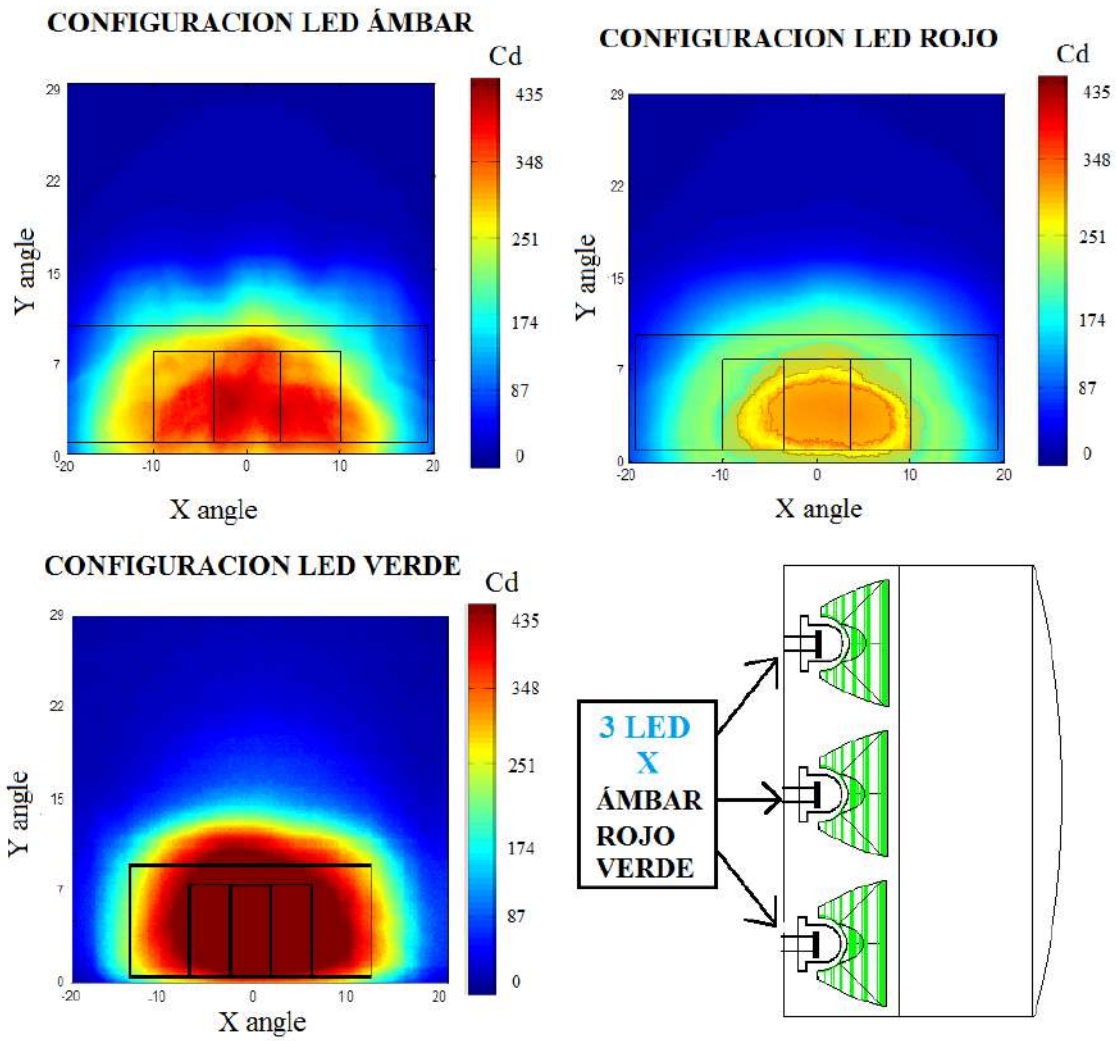


Figura 4.29: Mapas de isocandelas. Prototipo final

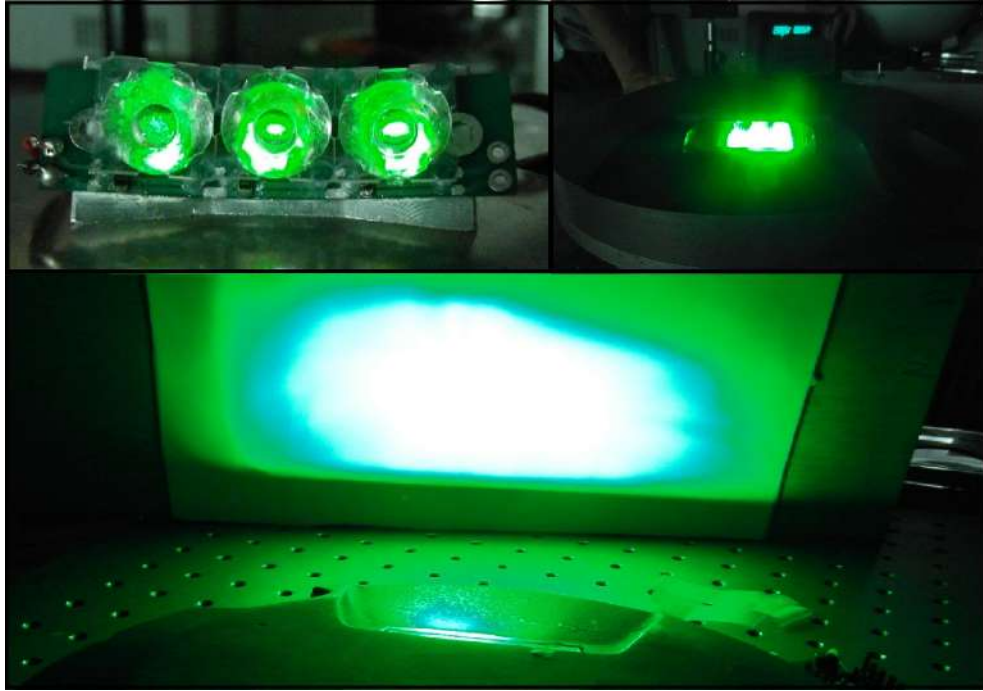


Figura 4.30: Baliza emitiendo

A raíz de estos resultados (4.29) se puede asegurar que el flujo emitido por el sistema de iluminación se adapta de forma precisa a los límites de la zona de interés más amplia (Zona III). Por tanto el flujo emitido por el sistema de balizamiento no se desperdicia ni interfiere con otros posibles sistemas de balizas vecinos. Prácticamente todo el flujo emitido por el sistema esta comprendido en los márgenes impuestos por los requisitos OACI con una desviación de cerca de 3° en el eje vertical en el peor de los casos.

Bibliografía

- [1] I. Akasaki, H. Amano, S. Nakamura. “Nobelprize” http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/press.html (2014)
- [2] S. Suehiro, Y. Shibata “Energy Conservation, Special Topic: LED Dissemination and Technology Development” Energy Conservation Center (2011)
- [3] J. Y. Tsao, “Light emitting diodes for general illumination” Optoelectronics Industry development association (2002)
- [4] “Adoption of Light-Emitting Diodes in Common Lighting Applications” Office of Energy Efficiency and Renewable Energy U.S(2013)
- [5] “Energy Savings Estimates of Light Emitting Diodes in Niche Lighting Applications” Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. (2008)
- [6] X. Jeremy. “Biggest Barrier to LED lighting” Illumra Green Systems (2009)
- [7] B. Hahn, A. Weimar, M. Peter, J. Baur “High-power InGaN LEDs: present status and future prospects” Proc. SPIE 6910, Light-Emitting Diodes: Research, Manufacturing, and Applications XII (2008)
- [8] R. Winston, J. Miñano, and P. Benitez “Nonimaging Optics” Elsevier, New York, (2005).
- [9] A. García-Botella, A. Fernández-Balbuena, and E. Bernabéu “Elliptical concentrator”, Appl. Opt, vol.45(29), pp. 7622-7627 (2006).
- [10] S. V. Kudaev, and P. Schreiber, “Parametric design of Non-Imaging Collimators” Optical Society of America (2006).
- [11] J. H. Lee, “LED light coupler design for a ultra thin guide”, Journal of the Optical Society of Korea, vol. 11, No. 3, pp. 111–113 (2007).

- [12] X. J. Lu, Y. L. Ho, L. Tan “LED-based projection systems” *Journal of display technology*, vol. 3, pp. 295–303 (2007).
- [13] T. Marshall, M. Pashley “LED collimation optics with improved performance and reduced size” U.S. patent No. 6547423 (2003).
- [14] E. A. Roth “LED collimator having spline surfaces and related methods”, WO Patent No. 064275 (2009).
- [15] J. Chaves “Introduction to Nonimaging Optics” CRC Press, pp. 55–65 (2008).
- [16] “A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology Photovoltaic technology platform” (2010) <http://cordis.europa.eu/technology-platforms/pdf/photovoltaics.pdf>
- [17] H. J. Cornelissen, M. Haiyan “Compact collimators for high brightness blue LEDs using dielectric multilayers” *Proc. of SPIE*, vol. 8123 (2010)
- [18] “Organización de Aviación Civil Internacional” <http://www.icao.int/Pages/default.aspx> (2014)
- [19] H. Ahlen, E. Leif “Embedded light fitting for runways” U.S Patent. 5438495. (1995)
- [20] F. Anrys, P. Dutré “Image-Based Lighting Design” *Proceedings of the 4th IASTED International Conference on Visualization, Imaging, and Image Processing* (2004).
- [21] J. Legriel, C. Le Guernic, S. Cotton, O. Maler “Approximating the Pareto Front of Multi-Criteria Optimization Problems” *Proceedings of the 16th international conference on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems*, pp. 69-83(2010).

Conclusiones

El trabajo que conforma esta Memoria de Tesis doctoral se ha focalizado en el desarrollo de diversas tareas de investigación en el ámbito de los dispositivos ópticos de iluminación, balizamiento y concentración de luz. Estos diseños están sometidos normalmente a unos requisitos y normativas que imponen altos niveles de exigencia respecto a su diseño. Este hecho motiva el desarrollo de algoritmos de optimización avanzados como medio para alcanzar los objetivos impuestos para los diferentes sistemas ópticos.

Se ha desarrollado un método de diseño automatizado que incluye la gestión de diversos programas de cálculo y simulación, y supone una herramienta de diseño óptico de gran potencial. Este método incluye un novedoso algoritmo de optimización de pesos variables que permite abordar diseños complejos caracterizados por múltiples parámetros geométricos y ópticos. En estas conclusiones se recogen los resultados más importantes obtenidos en el proceso de diseño de cada sistema óptico, así como los objetivos alcanzados y el comportamiento de sus respectivas aplicaciones. Las Conclusiones más relevantes de esta tesis se numeran a continuación:

1. Algoritmo de optimización de función de mérito dinámica *DMF*.

Se ha desarrollado un nuevo algoritmo de optimización que emplea el concepto de función de mérito dinámica (*DMF*). Este algoritmo ha sido aplicado con éxito a distintos dispositivos ópticos no formadores de imagen de complejidad variable. Se llega a la conclusión de que su efectividad (en comparación con otros algoritmos convencionales de optimización) se hace especialmente patente para sistemas cuya geometría se describe por 3 o más parámetros, alcanzando para dichos sistemas una mejora media que ronda el 14 % en eficiencia y el 5 % uniformidad.

2. Lente acromática de Fresnel para conversión solar fotovoltaica.

Se ha diseñado un novedoso doblete acromático Fresnel híbrido compuesto de PC (policarbonato) y PMMA (polimetilmetacrilato) que combina las ventajas de las lentes de Fresnel estándar con las características más útiles de la lente acromática. Este diseño ofrece ventajas en términos de eficiencia, superior al 85% y de concentración, por encima de 1000 soles.

3. Sistema de iluminación natural para edificios no residenciales.

Se ha desarrollado un innovador sistema de iluminación natural y disposición horizontal que aprovecha la luz solar incidente en la fachada de un edificio y asegura una distribución equilibrada de flujo en el interior del mismo.

El sistema colector permite captar de 15000 klm h/año, y la configuración final optimizada del sistema de iluminación es capaz de mantener un factor de uniformidad diaria cercano a 0.5 en una habitación de 40 m^2 .

4. Colimador parabólico elíptico para fuentes LED

Se ha desarrollado un colimador Parabólico-Elíptico que muestra una distribución de flujo muy uniforme junto con una apertura de emisión muy reducida (aproximadamente 3° para el prototipo del colimador). Estas características ópticas aseguran un comportamiento fiable como colimador LED de alta eficiencia. El diseño del colimador llevado a cabo también ofrece otras ventajas, como pueden ser un elevado índice de compactación, una alta eficiencia y un bajo coste de fabricación debido a la ausencia de superficies espejadas.

5. Sistemas de balizamiento de tecnología LED para aeropuertos

Se ha desarrollado un sistema de balizas de tecnología LED con el objetivo de cumplir la normativa OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) vigente para la iluminación terrestre de aeropuertos. El sistema de iluminación dispone de varios grados de libertad debido al diseño y ajuste de los dispositivos ópticos que lo componen, y por ello se ha llevado a cabo un proceso de optimización de las variables más significativas, teniendo en cuenta diferentes semillas de inicialización y parámetros del algoritmo. Tras del proceso de diseño y optimización se ha fabricado un prototipo del sistema de balizas que cumple los requisitos OACI.

Publicaciones generadas:

Artículos

- **High-efficiency light-emitting diode collimator.**
Optical Engineering 49(12), 123001 (Diciembre 2010).
Autores: Mario González-Montes, Daniel Vázquez-Moliní, Antonio Alvarez Fernandez-Balbuena, Angel Garcia-Botella, Eusebio Bernabeu-Martinez
- **Horizontal daylighting system for office building.**
Energy and Buildings vol. 67, pp. 525-530 (Diciembre 2013).
Autores: Mario González-Montes, Daniel Vázquez-Moliní, Antonio Alvarez Fernandez-Balbuena, Angel Garcia-Botella, Eusebio Bernabeu-Martinez, Wilfried Pohl.
- **Achromatic Fresnel Lens with Improved Efficiency for PV Systems.**
International Journal of Photoenergy (2014).
Autores: Mario González-Montes, Daniel Vázquez-Moliní, Juan Carlos Martínez-Antón, Antonio Alvarez Fernandez-Balbuena, Eusebio Bernabeu-Martinez.
- **Beacon system based on light-emitting diode sources for runways lighting.**
Optical Engineering 53(6), 066104 (Junio 2014).
Autores: Mario González-Montes, Daniel Vázquez-Moliní, Antonio Alvarez Fernandez-Balbuena, Eusebio Bernabeu-Martinez.
- **Application of dynamic merit function to nonimaging systems optimization.**
Optical Engineering (Aceptada Enero 2015).
Autores: , Antonio Alvarez Fernandez-Balbuena, Mario González-Montes, Daniel Vázquez-Moliní,Angel Garcia-Botella .

Publicaciones generadas:

Congresos

- **ADASY (Active Daylighting System). Guiding daylight into a building for energy-saving illumination.**

SPIE Newsroom. DOI: 10.1117/2.1200911.1825 (Noviembre 2009).

Autores: Mario González-Montes, Daniel Vázquez-Moliní, Antonio Alvarez Fernandez-Balbuena, Angel Garcia-Botella, Eusebio Bernabeu-Martinez, Lucas García-Rodríguez, Wilfred Pohl.

- **Optics detailed analysis of an improved collimation system for LED light sources.**

SPIE Illumination Optics II. Proceedings Vol. 8170. 21 (Septiembre 2011).

Autores: Mario González-Montes, Daniel Vázquez-Moliní, Antonio Alvarez Fernandez-Balbuena, Eusebio Bernabeu-Martinez.

Capítulo 5

Apéndice

En este capítulo se recogen los programas empleados para llevar a cabo parte de las simulaciones y diseños que se describen a lo largo de esta tesis. Se mostrará una selección de todos los programas desarrollados según un criterio que pretende elegir los mas representativos, entre estos programas se encuentran los correspondientes al método de optimización de función de mérito dinámica (Capítulo 2), los correspondientes al diseño del doblete acromático (Capítulo 3), y por último varios programas empleados en el desarrollo y medición del sistema de balizamiento (Capítulo 4)

A lo largo de este trabajo se ha empleado el programa de cálculo numérico Matlab como herramienta básica no solo para procesar los resultados de las simulaciones si no para coordinar y controlar el resto de software involucrado en los procesos de simulación y optimización. También se ha empleado intensivamente el programa de trazado de rayos TracePro en el cual se emplea el lenguaje de programación LISP (basado en listas) para compilar las Macros o rutinas de trazado automatizado.

5.1. Programas empleados en el Capítulo 2

5.1.1. `minimiza.m`

En primer lugar se muestra la función principal “`minimiza.m`” de la optimización que se encargará de inicializar los parámetros de la optimización de sistemas ópticos no formadores de imagen, así como optimizar las funciones secundarias “`optimizaMAESTRA.m`” e iniciar la ejecución de los programas CAD (Solidworks) y de trazado de rayos (Tracepro). Esta función ha sido empleada, con las correspondientes modificaciones, para optimizar la lente de concentración, la lente uniformizadora y la luminaria LED plana del capítulo 2.

```

1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2 % Función de minimiación-optimización
3 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
4
5 clc , close all , clear all
6 global canal
7 global contador
8 global parametros
9 global pesos
10 global Eficiencia
11 global Uniformidad
12 global DATOS
13 global f , global horainicio , global DATOSvectorx0
14 contador=0;
15 iteracion=0;
16 hora=clock;
17 horainicio=hora(4)*60+hora(5)+hora(6)/60; %En minutos
18 save iteracion.txt iteracion -ascii
19 tic
20
21 \% Conecta matlab con TracePro no esta abierta la conexión
22 !"C:\Program Files (x86)\Lambda Research Corporation\TracePro60\
    TracePro60.exe" &
23 %pause(15)
24 canal = ddeinit('TracePro','scheme')
25
26 if canal==0
27     \%!"C:\Program Files\Lambda Research Corporation\TracePro70\
        TracePro70.exe" &
28     !"C:\Program Files (x86)\Lambda Research Corporation\TracePro60\
        TracePro60.exe" &
29     canal = ddeinit('TracePro','scheme')
30 end
31 % For example, to initiate a conversation with Microsoft Excel
32 % for the spreadsheet 'forecast.xls':
33 % channel = ddeinit('excel','forecast.xls');
34

```

```

35 %parametros iniciales
36 LB=[45,45] % mínimo de R1 R2
37 UB=[2000,2000] % máximo de R1 R2
38
39 %valores iniciales del proceso de optimización
40 vectorX0=[50,50]
41 pesos=[1,1]
42
43 %Bucle de optimización dinámico
44 for f=1:5,
45     % Función de minimización Nelder Mead
46     disp('Numero de iteracion dinámica:')
47     f,
48     %Comienza la optimizacion mediante la función fminsearch
49     vectorX0=fminsearchbnd(@optimizaMAESTRA,vectorX0,LB,UB,optimset('
        MaxIter',300,'TolFun',1e-4,'Display','iter','Tolx',1e-4,'
        PlotFcns','optimplotfval'))
50     % Ejecuta la funcion optimizaMAESTRAvectorx0 que comprueba la
        solución
51     %optima y guarda los resultados.
52     optimizaMAESTRAvectorx0(vectorX0)
53     %El algoritmo para modificar los pesos linealmente según el
        resultado
54     %obtenido para los objetivos (Eff y Unif) de la función a
        optimizar
55
56     if Eficiencia<Uniformidad,
57         pesos(1)=pesos(1)+(0.3/f)*pesos(1);
58         pesos(2)=2-pesos(1);
59     elseif Uniformidad<Eficiencia,
60         pesos(2)=pesos(2)+(0.3/f)*pesos(2);
61         pesos(1)=2-pesos(2);
62     end
63 pesos;
64 end
65
66
67

```

```

68 % cierra TracePro
69 ddeexec(canal, '(file:close-all)'); % ejecuta comando tracepro clear
    canal y borro variable canal de conexión
70
71 %Calcula y muestra por pantalla el tiempo empleado en la optimización
    .
72 tiempo=toc/60;
73 msgbox(strcat(num2str(tiempo), ' minutos'), 'Optimización finalizada', '
    help');
74 %Representa los puntos del espacio de variables elegidos por la
    rutina de optimizacion
75 plot(parametros(:,1),parametros(:,2), 'x'), xlabel('R1'), ylabel('R2'),
    text(parametros(contador,1),parametros(contador,2)*1.0015,num2str(
    contador));
76
77 %Representación gráfica de los resultados de la optimización
78 load('DATOSlente.txt')
79 subplot(1,3,1), plot(DATOS(:,3), 'r')
80 xlabel('iteración')
81 hold on
82 subplot(1,3,1), plot(DATOS(:,4), 'g')
83 subplot(1,3,1), plot(DATOS(:,5), 'b')
84 legend('función mérito', 'eficiencia', 'uniformidad')
85 subplot(1,3,2), plot(DATOS(:,2), 'r'), hold on
86 subplot(1,3,2), plot(DATOS(:,6), 'g')
87 subplot(1,3,2), plot(DATOS(:,7), 'b')
88 legend('rebucle', 'peso1', 'peso2')
89 subplot(1,3,3), plot(DATOS(:,8), 'g'), hold on
90 subplot(1,3,3), plot(DATOS(:,9), 'b')
91 legend('R(1)', 'R(2)')
92
93 load datosvectorx0lente.txt
94 plot(datosvectorx0lente(:,1),datosvectorx0lente(:,2), 'r')
95 hold on
96 plot(datosvectorx0lente(:,1),datosvectorx0lente(:,3), 'g')

```

5.1.2. optimizaMAESTRA.m

A continuación se mostrará la función “optimizaMAESTRA.m” que se encarga de gestionar la generación de la geometría del sistema no formador de imagen (en Solidworks) sobre el cual se aplicará la optimización, así como ejecutar las simulaciones en Tracepro. Esta función tiene como salida el valor de los objetivos que son los que se encargará de optimizar la función “fminsearch.m”, esta última función “fminsearch.m” no se recoge en el apéndice ya que no ha sido desarrollada por el autor de esta tesis, sin embargo viene descrita detalladamente en la toolbox de optimización de Matlab.

```
1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2 % Macro maestra de optimización TracePro + SW + Matlab
3 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
4
5
6 function [flujooptimiza]=optimiza(R)
7 global canal
8 global contador
9 global parametros
10 global pesos
11 global Eficiencia
12 global Uniformidad
13 global iteracion
14 global DATOS
15 global f, global horainicio, global DATOSvectorx0
16
17
18 load('iteracion.txt')
19
20 % Ruta de trabajo
21 camino='C:\Users\usuario\Desktop\Curro\Mario\Mario optimizacion\
22     resultados_lente\constante\';
23 camino2=strrep(camino, '\\', '/');
24 %actualiza el contador
25 contador = contador+1;
26 parametros(contador,1)=R(1);
27 parametros(contador,2)=R(2);
28
```



```

29 %Escribe en la tabla de Excel asociada al solido generado en
    Solidworks
30 SUCCESS = xlswrite('SW\lente.xlsx',R(1), 'Hoja1', 'D3');
31 SUCCESS = xlswrite('SW\lente.xlsx',R(2), 'Hoja1', 'B3');
32 pause(15)
33
34 % Abre SW+Esfera0, guarda SAT y cierra SW
35 comandoSW=strcat('!"C:\Program Files\SolidWorks Corp\SolidWorks\
    SLDWORKS.exe" /m " ', camino, 'SW\LENTEgeneraSATycierraSW.swp" &')
    ;
36 eval(comandoSW); % Ejecuta orden SW
37
38 % Esperar a que SW genere el SAT.
39
40 figure1=waitbar(0, 'generando solido');
41 while exist(strcat(camino2, 'SW\lente.sat'), 'file')==0
42     pause(5)
43 end
44
45 pause(15)
46 delete(figure1)
47
48 % envía comandos a TracePro
49 ddeexec(canal, '(file:new)'); % ejecuta TP abre archivo en blanco
50 comandoTP=strcat('(insert:part "', camino2, 'SW/lente.SAT")'); %
    inserta SAT
51 ddeexec(canal, comandoTP); % ejecuta comando tracepro
52 pause(5)
53
54 % Ordenes en TP para rotar y aplicar un material a la lente
55 ddeexec(canal, '(edit:rotate (entity 1) 0 0 0 0 1 0 -90)')
56 ddeexec(canal, '(property:apply-material (entity 1) "Plastic" "
    Polycarb" (gvector 0 0 0))'); % aplico material
57 pause(5)
58 %Orden en TP para insertar el detector
59 ejecutamacro1=strcat('(load "', camino2, 'TP/insertaDETECTOR.scm")');
60 ddeexec(canal, ejecutamacro1); % ejecuta comando tracepro
61 pause (10)

```

```

62 %Orden en TP para trazar los rayos
63 ejecutamacro2=strcat('(load "',camino2,'TP/trazaRAYOS.scm")');
64 ddeexec(canal,ejecutamacro2); %ejecuta comando tracepro
65 figure1=waitbar(0,'trazando rayos');
66 %Bucle para esperar a que termine el proceso de trazado de rayos
67 while exist(strcat(camino2,'terminado.oml'))==0
68 pause(5)
69 end
70 delete(figure1)
71 %Borra los archivos generados como alerta
72 delete(strcat(camino2,'terminado.oml'))
73 delete(strcat(camino2,'SW\lente.sat'))
74 %Selecciona el detector en Tracepro y guarda los resultados de flujo
75 ejecutamacro3=strcat('(load "',camino2,'TP/seleccionaDETECTOR.scm")')
76 ;
77 ddeexec(canal,ejecutamacro3); %ejecuta comando tracepro
78 pause(10)
79 ejecutamacro4=strcat('(load "',camino2,'TP/guardaMAPA.scm")');
80 ddeexec(canal,ejecutamacro4); %ejecuta comando tracepro
81 %Calcula la eficiencia y la uniformidad
82 [matrizin,Maxirrin,Flujorecibido,Flujoemitido]=
83 leeflujonormalizadoTP6('pantalla.txt');
84 Eficiencia=(Flujorecibido/Flujoemitido)
85 Uniformidad=(mean(matrizin(:)))/(max(matrizin(:)))
86 %Calcula la función de mérito
87 flujooptimiza=2-(pesos(1)*Eficiencia+pesos(2)*Uniformidad); %
88 % cierra archivo tracepro
89 hora=clock;
90 hora=hora(4)*60+hora(5)+hora(6)/60;
91 pause(5) %para que de tiempo a cerrarse TracePro
92 %Guarda los datos
93 iteracion=iteracion+1;
94 DATOS(iteracion,:)= [iteracion;f;flujooptimiza;Eficiencia;Uniformidad;
95 pesos(1);pesos(2);R(1);R(2); hora-horainicio]
96 save iteracion.txt iteracion -ascii
97 save datoslente.txt DATOS -ascii
98 ddeexec(canal,'(file:close-all)');

```

5.2. Programas de diseño empleados en el Capítulo 3

5.2.1. Lente acromática.scm

En esta ocasión se muestra el código empleado para las simulaciones de trazados de rayos de la lente acromática. La macro consiste primero en una función auxiliar (nth) que permite seleccionar los elementos de la geometría en lenguaje LISP de manera mas cómoda. El resto de la macro consiste en un bucle que modifica la longitud de onda de la luz emitida por la fuente, traza los rayos en el sistema óptico previamente generado en un archivo de TracePro y por último salva los mapas de irradiancia obtenidos asignando al nombre de cada uno las variables empleadas en cada trazado de rayos para asignarles un nombre identificativo.

```
1
2 ; Funciones auxiliares
3
4 ;; nth : elemento n de la lista. NO usar n <= 0
5 (define (nth l n)
6   (if (= n 1) (car l)
7       (nth (cdr l) (- n 1))))
8
9 (define alfa 90)
10 (define repeticionesalfa 1)
11 (define pasoalfa 0.1)
12 (define repeticioneslambda 4)
13 (define lambda 0.3)
14 (define pasolambda 0.2)
15
16
17 ;Bucle variando las longitudes de onda
18 (do ((vec)
19     (j 0 (+ j 1)))
20     ((= j repeticioneslambda) vec)
21
22     (print lambda)
23 \newpage
24 ;Trazamos rayos
25 (raytrace:set-analysis-mode-on)
26 (analysis:set-display-rays #f)
```

```

27 (raytrace:set-grid-origin (position 0.000000 200.000000 0.000000) "
    Sol")
28 (raytrace:set-grid-orientation-euler-degrees (gvector 90.000000
    0.000000 0.000000) "Sol")
29 (raytrace:set-grid-boundary-annular 120.000000 0.000000 "Sol")
30 (raytrace:set-grid-pattern-random 700000 61.500000 "Sol")
31 (raytrace:set-grid-emission-type 1 "Sol")
32 (raytrace:set-grid-total-flux 61.500000 "Sol")
33 (raytrace:set-grid-raycolor (color:rgb 1.000000 0.000000 0.000000)
    "Sol")
34 (raytrace:set-beam-spatial-profile-uniform "Sol")
35 (raytrace:set-beam-spatial-weighting-uniform-flux "Sol")
36 (raytrace:set-beam-angular-profile-uniform 0.000000 "Sol")
37 (raytrace:set-beam-angular-weighting-uniform-flux "Sol")
38 (raytrace:set-beam-orientation-perpendicular "Sol")
39 (raytrace:set-degree-of-polarization 1.000000 "Sol")
40 (raytrace:set-polarization-state-unpolarized "Sol")
41 (define wvList (list (list lambda 1.000000)))
42 (raytrace:set-wavelengths wvList (raytrace:source-get-by-name "Sol"
    ))
43 (raytrace:all-sources)
44 ;Seleccionar la entrada del sistema secundario y salvar los mapas
    irradiancia
45 (edit:select (entity:get-by-name "Entrada"))
46 (analysis:irradiance)
47 (analysis:irradiance-save (string-append "medidas/" "
    Fresnel_longonda_"(number->string lambda)".bmp"))
48 (analysis:irradiance-close)
49
50
51 (tools:delete-raydata-memory)
52 (raytrace:clear-wavelengths)
53 (set! lambda (+ lambda pasolambda))

```

5.3. Programas de optimización empleados en el capítulo

4

5.3.1. Simula_la_baliza.m

La función de Matlab “simula_la_baliza.m” define la geometría de la baliza empleando los parámetros obtenidos en el proceso de optimización. Además la función “simula_la_baliza.m” ejecuta la macro de Tracepro “Optimiza.scm” que generará la geometría y trazará los rayos para simular el comportamiento de la configuración específica de la baliza.

```
1 function [Salida]=Simula_la_baliza(Parametros)
2 %Variables iniciales
3 %-----
4 lb=[15 25 1];
5 ub=[40 45 2];
6 f=1e-7;
7 Parametros=lb+(Parametros-lb)./f;
8 R1=Parametros(1);
9 R2=Parametros(2);
10 Escala=Parametros(3);
11 tam=1024;
12 ano='2010';
13 %-----
14 %Generamos una macro de variables para TracePro
15 ruta='C:\\Documents and Settings\\iluminacion\\Desktop\\Baliza\\
    Baliza definitiva\\Optimizar baliza\\';
16 file=strcat(ruta,'variables.scm');
17 fid = fopen(file,'w+');
18 fprintf(fid,'(define rootPath "C:/Documents and Settings/iluminacion/
    Desktop/Baliza/Baliza definitiva/Optimizar baliza/")');
19 fprintf(fid,'(define R1 %g) \n',R1);
20 fprintf(fid,'(define R2 %g) \n',R2);
21 fprintf(fid,'(define Escala %g) \n',Escala);
22 fprintf(fid,'(load (string-append rootPath "Optimiza_baliza.scm" ))
    \n');
23 fprintf(fid,'(file:close-all)');
24 fprintf(fid,'(file:exit)');
25 fclose('all');
```

```

26 %Para abrir TracePro
27 !"C:\Program Files (x86)\Lambda Research Corporation\TracePro\
    TracePro.exe" "C:\Documents and Settings\iluminacion\Desktop\
    Baliza\Baliza definitiva\Optimizar baliza\Variables.scm"
28 delete(file);
29 %Almacenamos los resultados obtenidos con Matlab
30 Nombre=sprintf('IRR.LED.VERDELENTE.R1-%g-R2-%g-Escala-%g.txt',R1,R2,
    Escala);
31 Nombre_irr=strcat(ruta,'medidas\\',Nombre);
32 Nombre=sprintf('ISO-CD.LED.VERDELENTE.R1-%g-R2-%g-Escala-%g.txt',R1,
    R2,Escala);
33 Nombre_iso=strcat(ruta,'medidas\\',Nombre);
34 %Llamamos a las funciones que obtienen el flujo y el resto de
    variables (Eff, I1, I2, I3, U1, U2, U3)
35 [Flujo]=fileloader_simple_tam(Nombre_irr,tam);
36 [candelas_aver_fact,unif,maximo_fact,minimo]=Porterias_isocd_catII(
    Nombre_iso,ano);
37 %Salvamos los resultados procesados en medidas
38 Nombre_2=sprintf('PROCESADOS.LED.VERDELENTE.R1-%g-R2-%g-Escala-%g.
    txt',R1,R2,Escala);
39 file2=strcat(ruta,'/medidas/procesados/',Nombre_2);
40 fid = fopen(file2,'w+');
41 %fprintf(fid,'R1      R2      Escala      ———>      Flujo      cd(Zona1)
    cd(Zona2)      cd(Zona3)      unif(Zona1)      unif(Zona2)
    unif(Zona3)      max(Zona1)      max(Zona2)      max(Zona3)      min(
    Zona1)      min(Zona2)      min(Zona3) \n');
42 fprintf(fid,'%g %g %g %g %g %g %g %g %g %g\n',R1,R2,Escala,Flujo/200,
    candelas_aver_fact(1),candelas_aver_fact(2),candelas_aver_fact(3),
    unif(1),unif(2),unif(3));
43 fclose('all');
44 Flujo=round(Flujo*100)/100;
45 %Se define la salida de la función
46 Salida=[Flujo,candelas_aver_fact,unif];
47 sprintf('Parametros: %g %g %g. Attainment factor: %g. Salida %g %g %g
    %g %g %g %g',R1,R2,Escala,sum([1 1 1 1 1 1 1]-(Salida./[150 500
    500 250 0.3 0.3 0.15])))/7,Salida),
48 end

```

5.3.2. Porterias_isocd_catII.m

Esta función calcula el vector de objetivos $[\eta \ I_1 \ I_2 \ I_3 \ U_1 \ U_2 \ U_3]$ y representa el mapa de emisión de la baliza delimitando las zonas de interés correspondientes.

```
1  %Representa el mapa de isocandelas de las porterias y calcula los
    objetivos
2  %de la optimización.
3  function [candelas_aver_fact , unif , maximo_fact , minimo]=
    Porterias_isocd_catII(nombre , ano)
4  dim_pantalla=3.638;
5  ang_max=20;
6  %Se obtiene la matriz imagen (irr)
7  irr=fileloader_definitivo_ISOCD(nombre , ano);
8  pixels=length(irr);
9  dang=(2*ang_max/pixels);
10 dangsol=2*pi*(1-cosd(dang));
11 dsup=2*dim_pantalla/pixels;
12 irr_cd=irr;
13 maximo_iso=max(max(irr_cd));
14 minimo_iso=min(min(irr_cd));
15 %Se fijan las zonas de interés donde medir intensidad luminosa media
16 a=[3.5 10 19.25];
17 b=[8 8 10];
18 num_curv=length(a);
19 norma=[200 100 100];
20 irr_cd_norma=zeros(pixels , pixels);
21 for i=1:num_curv
22 minim_ejex(i)=round(-a(i)/dang)+pixels/2+1;
23 maxim_ejex(i)=round(a(i)/dang)+pixels/2+1;
24 eje_x=(minim_ejex(i):maxim_ejex(i));
25 eje_ang=-a(i):(2*a(i)/(length(eje_x)-1)):a(i);
26 curv_isoc_pos=ones(1,length(eje_x))*b(i);
27 curv_isoc_pos_pix=-1*round(curv_isoc_pos/dang)+pixels/2+1;
28 curv_isoc_neg=ones(1,length(eje_x));
29 curv_isoc_neg_pix=-1*round(curv_isoc_neg/dang)+pixels/2+1;
30 puntos(:,1)=[eje_x'; flipud(eje_x')];
31 puntos(:,2)=[curv_isoc_pos_pix'; flipud(curv_isoc_neg_pix')];
32 interv(i)=abs(curv_isoc_pos_pix(1)-curv_isoc_neg_pix(1));
33
```

```

34 %hacemos la suma de los puntos dentro del intervalo de la zona
35 if i>1
36 candelas_aver(i)=mean(mean(irr_cd(pixels/2:-1:pixels/2-interv(i) ,[
      minim_ejex(i):minim_ejex(i-1) maxim_ejex(i-1):maxim_ejex(i)])));
37 unif(i)=candelas_aver(i)/max(max(irr_cd(pixels/2:-1:pixels/2-interv(i)
      ) ,eje_x)));
38 maximo(i)=max(max(irr_cd(pixels/2:-1:pixels/2-interv(i) ,[minim_ejex(
      i):minim_ejex(i-1) maxim_ejex(i-1):maxim_ejex(i)])));
39 minimo(i)=min(min(irr_cd(pixels/2:-1:pixels/2-interv(i) ,[minim_ejex(
      i):minim_ejex(i-1) maxim_ejex(i-1):maxim_ejex(i)])));
40 if interv(i-1)<interv(i)
41 matriz2=irr_cd(pixels/2-interv(i-1):-1:pixels/2-interv(i) ,[
      minim_ejex(i-1):maxim_ejex(i-1)]);
42 candelas_aver2(i)=mean(mean(matriz2));
43 candelas_aver(i)=mean([candelas_aver(i) candelas_aver2(i)]);
44 unif(i)=candelas_aver(i)/(max([maximo(i) max(max(matriz2))]));
45 irr_cd_norma(pixels/2-interv(i-1):-1:pixels/2-interv(i) ,[
      minim_ejex(i-1):maxim_ejex(i-1)])=irr_cd(pixels/2-interv(i-1)
      :-1:pixels/2-interv(i) ,[minim_ejex(i-1):maxim_ejex(i-1)])-
      norma(i);
46 end
47 irr_cd_norma(pixels/2:-1:pixels/2-interv(i) ,[minim_ejex(i):
      minim_ejex(i-1) maxim_ejex(i-1):maxim_ejex(i)])=irr_cd(pixels
      /2:-1:pixels/2-interv(i) ,[minim_ejex(i):minim_ejex(i-1)
      maxim_ejex(i-1):maxim_ejex(i)])-norma(i);
48 else
49 candelas_aver(i)=mean(mean(irr_cd(pixels/2:-1:pixels/2-interv ,eje_x)
      ));
50 unif(i)=candelas_aver(i)/max(max(irr_cd(pixels/2:-1:pixels/2-interv(i)
      ) ,eje_x)));
51 maximo(i)=max(max(irr_cd(pixels/2:-1:pixels/2-interv(i) ,eje_x)));
52 minimo(i)=min(min(irr_cd(pixels/2:-1:pixels/2-interv(i) ,eje_x)));
53 irr_cd_norma(pixels/2:-1:pixels/2-interv ,eje_x)=irr_cd(pixels/2:-1:
      pixels/2-interv ,eje_x)-norma(i);
54 end
55 puntos=[];
56 end
57

```



```

58 %Representación gráfica porterias
59 num_leyend=3;
60 ajuste=20;
61 color_plot=logspace(-1,log10(maximo_iso),num_leyend)/ajuste;
62 set(gca,'YTickLabel',[1:num_leyend]);
63 colorbar('YTickLabel',{num2str(round(minimo_iso)),num2str(round(
    maximo_iso/10^5)),num2str(round(maximo_iso/10^4)),num2str(round(
    maximo_iso/10^3)),num2str(round(maximo_iso/10^2)),num2str(round(
    maximo_iso/10^1)),num2str(round(maximo_iso))})
64 colorbar('YTickLabel',round((color_plot)))
65 colorbar;
66 title(['Mapa isocandelas. Lente inclinada ',num2str(inclinacion),'°.
    Eficiencia ',num2str(Eficiencia)]);
67 set(gca,'XTick',linspace(1,pixels,5))
68 set(gca,'XTickLabel',[-ang_max -ang_max/2 0 ang_max/2 ang_max])
69 set(gca,'YTick',linspace(1,pixels,5))
70 set(gca,'YTickLabel',[ang_max ang_max/2 0 -ang_max/2 -ang_max])
71 xlabel('Angulo eje X (°)')
72 ylabel('Angulo eje Y (°)')
73 candelas_aver_fact=candelas_aver/5;
74 unif;
75 maximo_fact=maximo/10;
76 minimo;
77 figure(2);
78 imagesc(irr_cd_norma);
79 hold on;
80 [h j]=find(irr_cd_norma<0);
81 plot(j,h,'xblack');
82 colorbar;
83 title(['Mapa candelas frente a la norma. Lente inclinada ',num2str(
    inclinacion),'°. Eficiencia ',num2str(Eficiencia)]);
84 set(gca,'XTick',linspace(1,pixels,5))
85 set(gca,'XTickLabel',[-ang_max -ang_max/2 0 ang_max/2 ang_max])
86 set(gca,'YTick',linspace(1,pixels,5))
87 set(gca,'YTickLabel',[ang_max ang_max/2 0 -ang_max/2 -ang_max])
88 xlabel('Angulo eje X (°)')
89 ylabel('Angulo eje Y (°)')
90 end

```