UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA - SOLAR FOTOTÉRMICA

CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DE CONCENTRADORES SOLARES

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
MANUEL IGNACIO PEÑA CRUZ

TUTOR PRINCIPAL
DR. CAMILO ALBERTO ARANCIBIA BULNES. IER-UNAM
COMITÉ TUTOR
DR. CLAUDIO ALEJANDRO ESTRADA GASCA. IER-UNAM
DR. JOSÉ RUFINO DÍAZ URIBE. CCADET-UNAM
DR. DAVID RIVEROS ROSAS. IG-UNAM
DR. MARCELINO SÁNCHEZ GONZÁLEZ. CENER

MÉXICO, D. F. MAYO 2015

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	Dr. Claudio Alejandro Estrada Gasca
Secretario:	Dr. José Rufino Díaz Uribe
Vocal:	Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes
$1^{er.}$ Suplente:	Dr. David Riveros Rosas
$2^{do.}$ Suplente:	Dr. Marcelino Sánchez González

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Energías Renovables, UNAM.
Temixco, Morelos. México.

TUTOR DE TESIS

DR. CAMILO ALBERTO ARANCIBIA BULNES. IER-UNAM
COMITÉ TUTOR
DR. CLAUDIO ALEJANDRO ESTRADA GASCA. IER-UNAM
DR. JOSÉ RUFINO DÍAZ URIBE. CCADET-UNAM
DR. DAVID RIVEROS ROSAS. IG-UNAM
DR. MARCELINO SÁNCHEZ GONZÁLEZ. CENER

FIRMA

Resumen

A lo largo de este documento, se realiza una breve introducción a la tecnología solar. Se destacan sus características esenciales y los principales componentes que la conforman. Además, se describen las bases y el funcionamiento de diversas metodologías de caracterización óptica de concentradores solares que han surgido a través de los años gracias al esfuerzo de diversos autores. Se presenta en detalle la teoría detrás de la técnica de Reflexión de Franjas (también llamada Deflectometría a lo largo del documento). Esta técnica está basada en los principios de la interferometría, pero que para este trabajo es modificada y adaptada como herramienta de caracterización de superficies especulares de concentradores solares, debido a las múltiples ventajas que ésta presenta sobre otras técnicas. Se hace énfasis en el desarrollo de los lineamientos a seguir, con la finalidad de obtener un proceso riguroso y estandarizado para efectuar una correcta evaluación del captador y en la descripción de la matemática involucrada durante el proceso. Así mismo, se hacen notar las particularidades a superar en cada uno de los ellos.

La metodología desarrollada para la cualificación óptica de concentradores solares entra en la categoría de las técnicas de *reflexión de luz estructurada*, en la cual, patrones de franjas sinusoidales son proyectados en una pantalla y su reflejo en una superficie especular es adquirido como imagen por una cámara digital. Las distorsiones observadas en la imagen se pueden relacionar directamente con desviaciones de la geometría ideal en la superficie. Aspectos relevantes de la técnica son su alta resolución espacial (más de un millón de puntos por faceta), un tiempo relativamente corto necesario para la medición y un arreglo sencillo y de bajo costo. La herramienta desarrollada nombrada *FOCuS* (por el acrónimo del inglés "Fringe Optical Characterization of Surfaces"), es capaz de obtener las desviaciones de pendiente local con respecto al diseño geométrico ideal de diversos tipos de concentradores solares y calcular su valor RMS (media cuadrática), utilizado como un factor de calidad de la muestra.

Abstract

Throughout this paper, a brief introduction to solar technology is presented. The document highlights the essential characteristics and major components that comprise it. Additionally, describes the foundation and operation of various methodologies of optical characterization of solar concentrators that have emerged over the years through the efforts of several authors. Additionally, it is presented in detail the theory behind the technique of fringe reflection (also called Deflectometry throughout the document). This technique is based on the principles of interferometry, but in this work is modified and adapted as a tool for characterization of specular surfaces of solar concentrators , due to the many advantages it has over other techniques. It is emphasized the development of guidelines to be followed, in order to obtain a rigorous and standardized process for making a correct collector evaluation and in the description of the mathematics involved in the process. Furthermore, the particularities of the method are noted in order to overcome each of them.

The developed methodology for the optical qualification of solar concentrators falls into the category of *structured light reflections* techniques, in which, sinusoidal fringe patterns are projected on a screen and its reflection with the specular surface is acquired as an image by a digital camera. The observed distortions in the image can be related directly with deviations of the ideal surface geometry. Relevant aspects of the technique are its high spatial resolution (more than a million points per facet), relatively short measurement time and a simple and low cost arrangement. The developed tool named *FOCuS* (for the acronym "Fringe Optical Characterization of Surfaces"), is capable of obtain local slope deviation with respect to the ideal geometry of several solar concentrators designs and compute the RMS (root mean square), utilized as a quality factor of the sample.

Agradecimientos

Al Dr. Camilo Alberto Arancibia Bulnes, director de esta tesis, por su apoyo, disposición y enseñanzas tanto académicas como personales. Su paciencia es digna de una mención honorífica. Un verdadero ejemplo a seguir en todos los sentidos. Al Dr. Marcelino Sánchez González, quien me otorgó su confianza para involucrarme en proyectos de gran impacto que se desarrollan en su centro y me dio la oportunidad de aprender de primera mano como la investigación y el desarrollo industrial siempre van de la mano. A él, le agradezco haber vivido una de las etapas más emocionantes de mi vida profesional. Al Dr. Claudio Alejandro Estrada Gasca, quien su visión y tenacidad hizo posible la realización de este trabajo. Sin duda, uno de los mayores exponentes de la tecnología solar en el mundo. Al Dr. David Riveros Rosas y al Dr. Rufino Díaz Uribe, por todas sus observaciones y sugerencias para la mejora de este trabajo.

Al Instituto de Energías Renovables de la UNAM (IER-UNAM) y a todo el personal académico por permitirme desarrollar mis habilidades y conocimientos en un ambiente de alto nivel. En particular, al Ing. José de Jesús Quiñones Aguilar y al Dr. Carlos Alberto Pérez Rábago por el apoyo técnico en la selección y adquisición de equipo.

A todo su personal académico y administrativo del Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) en España. En particular, quisiera expresar mi enorme gratitud al Jefe de Servicio Medida y Caracterización del Departamento de Energía Solar Térmica: Alberto García de Jalón, por todo el apoyo brindado y por permitirme trabajar de cerca con un equipo técnico tan profesional como divertido; Ana Monreal, Fabienne Sallaberry, Amaia Motuberria, Edurne Elizari, Martín Gastón, Roberto Astíz, David Pérez... Muchas gracias por todo y por tanto.

Al personal técnico y académico de la Agencia Nacional de Nuevas Tecnologías, Energía y Sustentabilidad Económica (ENEA), por la logística y el apoyo brindado durante la campaña de caracterización de los concentradores de canal parabólico. En especial, al Dr. Marco Montecchi por sus ideas y recomendaciones para la mejora de este trabajo.

A la Universidad de Sonora, por todas las facilidades otorgadas durante el desarrollo del proyecto de Campo Experimental de Torre Central (CEToC), y a los investigadores involucrados en el proyecto: Dr. Rafael Cabanillas y Dr. Fernando Hinojosa. En particular, al equipo técnico involucrado en el proyecto: Rodolfo Peón, Pablo Sosa, Cuitláhuac Iriarte.

A la Estación Regional del Noroeste de la UNAM (ERNO-UNAM), por el espacio brindado para la realización de este trabajo. En especial, al área administrativa: Lic. Daniel Arizmendi, por todas las facilidades otorgadas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de mis estudios de posgrado y al *proyecto 123767 Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar (LACYQS)* por el financiamiento de las actividades realizadas en el Campo Experimental de Torre Central (CEToC).

Al programa Solar Facilities for the European Research Area (SFERA) de la Unión Europea, por otorgar el proyecto *Parabolic Trough Mirror Modules Characterization by FOCuS Tool - Proposal P13043000040303*, que también apoyó económicamente la realización de este trabajo.

A todas y cada una de las personas que de alguna manera tuvieron una aportación en la realización de este trabajo.

Dedicatoria

Dedico estas páginas con todo mi cariño...

A mis padres, que son como mis maestros: Salvador y Leticia, por sus enseñanzas y apoyo más que incondicional...

A mis hermanos, que son como mis pilares: Chava y Vero, por estar a mi lado en todo momento...

A mis amigos, que son como mis hermanos: Erik, Marlon, Joel, David, Roberto, Daniel, Hugo, Adrián, Sergio, Kike, Miguel, Chino, por todas las distracciones tan necesarias...

A mi novia, que es como mi todo: Zeidy, por haber estado, por estar, y por que estemos...

Contenido

Lista de Figuras **ix**

Lista de Tablas **xv**

1 Introducción **5**
1.1 Antecedentes 5
1.2 Tecnologías de concentración solar 7
1.2.1 Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar 11
1.3 Errores ópticos 13
1.3.1 Parámetros de caracterización 15
1.4 Objetivos 18
1.4.1 Objetivos específicos 18
1.5 Justificación 19
1.6 Estructura de la tesis 19

2 Estado del arte **21**
2.1 Metodologías de evaluación de concentradores solares 21
2.1.1 Pruebas ópticas de baja precisión 23
2.1.2 La técnica de Hartmann y otros métodos relacionados 25
2.1.3 Métodos intrusivos: La Fotogrametría 29
2.1.4 El método del observador distante 30
2.1.5 Reflexión de patrones estructurados 32
2.1.6 Reflexión de luz estructurada 33
2.1.7 Precisión, resolución y alcance de los métodos 35

3 Conceptos Fundamentales **39**
3.1 Conceptos generales de la técnica de reflexión de franjas 40
3.2 La teoría detrás del análisis de franjas 40
3.3 Algoritmos para la recuperación de la fase 42
3.3.1 Escalamiento de fase 42
3.3.2 Detección directa de fase (DPD) 45
3.3.3 Transformada de Fourier para el análisis de franjas (FFA) 47

3.4 Desempaquetamiento de fase . . . 48
3.4.1 Desempaquetado unidimensional por medio del método de Itoh . . . 51
3.4.2 Desempaquetado de mapas consistentes de fase . . . 52
3.4.3 Desempaquetado de mapas no-consistentes de fase y basados en la clasificación de la confiabilidad . . . 53

4 Metodología 55
4.1 Modelo geométrico . . . 56
4.1.1 Arreglo experimental . . . 56
4.1.2 Estadística de caracterización . . . 61
4.2 Sensibilidad del método . . . 62
4.2.1 Homogeneidad de la cámara . . . 62
4.2.2 Sensibilidad del sistema a la iluminación . . . 63
4.2.3 Sensibilidad del sistema al contraste . . . 64
4.2.4 Sensibilidad del sistema a la frecuencia . . . 65
4.3 Análisis de incertidumbre . . . 67

5 Resultados y discusión 73
5.1 Pruebas de laboratorio . . . 73
5.1.1 Concentradores curvos . . . 74
5.1.2 Reflectores planos deformables . . . 94
5.2 Análisis en campo . . . 101
5.2.1 Colectores de canal parabólico . . . 101
5.2.2 Helióstatos . . . 110
5.3 Discusión: Dificultades, limitaciones y ventajas de la metodología . . . 116
5.3.1 Dificultades y limitaciones presentes en la metodología desarrollada . 116
5.3.2 Ventajas del desarrollo FOCuS con respecto a otras técnicas . . . 117

6 Conclusiones y perspectivas 119

Referencias 125

7 Anexo 131
7.1 Calibración de la cámara . . . 131
7.1.1 Geometría de proyección . . . 131
7.1.2 Distorsión de la lente . . . 132
7.2 Calibración del proyector . . . 134
7.2.1 Efecto *Keystone* . . . 134
7.2.2 Correción Gamma . . . 134
7.3 Adquisición de imágenes y su procesamiento digital . . . 137
7.3.1 Algoritmo de enmascarado . . . 137
7.3.2 Filtrado y reducción de ruido en la imagen . . . 138

Lista de Figuras

1.1 Demanda y precios históricos a nivel mundial de combustibles fósiles y escenario previsto para 2035. Gráfica tomada de la ref.[4]. 5
1.2 Históricos de mediciones de concentraciones de gas de efecto invernadero (izquierda). Temperatura anual global (derecha). Gráficas tomadas de la ref.[76]. 6
1.3 Mapa de recurso solar mundial (W/m^2). Tomado de la ref. [20]. 7
1.4 Planta de generación de potencia de Torre Central en Sanlucar, España. . . . 8
1.5 Sistema de Canal Parabólico instalado para minería en Atacama, Chile. . . . 9
1.6 Prototipo EURODISH de generador eléctrico de Disco Stirling. 9
1.7 Concentradores Fresnel. AREVA Solar 10
1.8 Instalaciones de investigación del LACYQS. Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HoSIER). 12
1.9 Instalaciones de investigación del LACYQS. Planta Solar para el Tratamiento Fotocatalítico de Aguas Residuales (PSTFAR). 12
1.10 Instalaciones de investigación del LACYQS. Campo Experimental de Torre Central (CEToC). 13
1.11 Principales causas de error en la reflexión solar de un concentrador. (a) Rugosidad en la superficie. (b) Errores en la geometría. (c) Errores de canteo. (d) Resultado en la desviación de un rayo reflejado. 14
1.12 Ángulo de desviación de pendiente para la coordenada x proyectada sobre el plano z. 16

2.1 Listado de técnicas de caracterización óptica con sus respectivas características. 22
2.2 Sistema de espejos para la técnica de retroreflexión 23
2.3 Modelado de un canal cilindro-parabólico en Tonatiuh. Imagen tomada de su sitio web libre. 25
2.4 Imágenes del método CTM desarrollado por Lupfert 25
2.5 Esquema general de la prueba de Hartmann (izquierda). Una prueba Hartmann clásica utilizando una pantalla (derecha). 26
2.6 Prueba de Hartmann reversible. 27
2.7 Arreglo de láseres paralelos utilizados para la prueba LSLHT. 28
2.8 Imagen de prueba con un análisis de profilometría. 28
2.9 Arreglo para la caracterización de helióstatos por el método SCCAN 29

2.10 Imagen de captador parabólico con una serie de puntos para el análisis de fotogrametría. 31
2.11 Imagen del tubo receptor reflejándose en las facetas de un captador cilindro-parabólico. 31
2.12 Diagrama experimental de la técnica de pantallas nulas. 33
2.13 Arreglo para la prueba de reflexión de franjas codificadas por colores. 33
2.14 Principio de medición de la técnica de reflexión de franjas. 34
2.15 Faceta de colector solar plano bajo el análisis de reflexión de franjas. 35

3.1 Arreglo típico de reflexión de franjas 40
3.2 Figuras representativas de un patrón de referencia que no presenta distorsión (izquierda) y el de uno distorsionado por una superficie con deformaciones (derecha). 41
3.3 Diagrama de flujo representativo para la técnica de DPD. 46
3.4 Valores de fase (a) empaquetada y (b) desempaquetada para un patrón de franjas de un objeto real con distorsión. 49
3.5 Camino seleccionado para el desempaquetamiento por el método L. 53

4.1 Arreglo de geométrico del experimento. 57
4.2 Arreglo geométrico para la dirección Y. 58
4.3 Arreglo geométrico para la dirección X. 60
4.4 Esfera de luz utilizada para mapear el sensor de la CCD de la cámara. . . . 62
4.5 Análisis de linealidad sobre la intensidad en el sensor CCD de la cámara. . . 63
4.6 Análisis de sensibilidad sobre la iluminación en el sistema. Con iluminación de fondo (izquierda). Sin iluminación de fondo (derecha). 64
4.7 Análisis de sensibilidad sobre la iluminación en el sistema. Con iluminación de fondo (izquierda). Sin iluminación fondo (derecha). 64
4.8 Sustracción de ambos mapas de desviación para el análisis de sensibilidad a la iluminación. 65
4.9 Análisis de sensibilidad al contraste en el sistema. Enfoque total (izquierda). Suavizado por desenfoque (derecha). 66
4.10 Análisis de sensibilidad al contraste en el sistema. Enfoque total (izquierda). Suavizado por desenfoque (derecha). 66
4.11 Sustracción de ambos mapas de desviación para el análisis de sensibilidad al contraste. 67
4.12 Análisis de sensibilidad sobre la frecuencia en el sistema. Mayor frecuencia o menor periodo (izquierda). Menor frecuencia o mayor periodo (derecha). . . 67
4.13 Análisis de sensibilidad a la frecuencia de franjas. Periodo 65 milímetros (izquierda). Periodo 130 milímetros (derecha). 68
4.14 Sustracción de ambos mapas de desviación para el análisis de sensibilidad a la frecuencia de franjas. 69

4.15 Cambio resultante en la desviación local de pendiente obtenida al variar los parámetros de entrada. Punto específico al centro de la faceta (arriba). Media cuadrática (abajo). 70

5.1 Arreglo teórico de laboratorio usado para la caracterización de facetas. . . . 74
5.2 Esquema de análisis de una faceta. Anclado: Con tornillos ajustados a un marco de soporte (izquierda). Libre: Sin tornillos de sujeción sobre los cojinetes de soporte (derecha). 75
5.3 Disposición y dimensiones de las facetas RP3 de Rioglass en un colector de canal parabólico. 77
5.4 Arreglo experimental usado en el laboratorio para la caracterización de facetas. 77
5.5 Imagen de la pantalla principal de la herramienta FOCuS. 79
5.6 Faceta interna bajo el análisis de franjas. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha). 80
5.7 Mapa de desviación local de pendiente (mrad). Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha). 81
5.8 Mapa de desviación focal para la faceta interna. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha). 81
5.9 Imagen muestra de la faceta modelada por elementos finitos dentro del software de trazo de rayos Tonatiuh y su interacción con un receptor tubular de 70mm de diámetro. 82
5.10 Factor de interceptación solar para la faceta interna con respecto a un receptor tubular de 70mm de diámetro. 83
5.11 Faceta externa bajo el análisis de franjas. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha). 84
5.12 Mapa de desviación local de pendiente (mrad). Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha). 85
5.13 Mapa de desviación focal para la faceta externa. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha). 85
5.14 Factor de interceptación solar para la faceta externa con respecto a un receptor tubular de 70mm de diámetro. 86
5.15 Arreglo experimental del análisis de gravedad de la faceta RP3 de Rioglass. . 87
5.16 Mapa de desviación local de pendiente (mrad). Modo vertical anclado (izquierda). 45 grados anclado (derecha). 88
5.17 Mapa de desviación focal para la faceta externa. Modo vertical anclado (izquierda). 45 grados anclado (derecha). 88
5.18 Disposición y dimensiones del captador Flabeg. 89
5.19 Faceta interna bajo el análisis de franjas. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha). 91
5.20 Mapa de desviación local de pendiente para la faceta interna Flabeg (mrad). Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha). 91
5.21 Mapa de desviación focal para la faceta interna Flabeg. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha). 92

5.22 Factor de interceptación solar para la faceta interna de Flabeg con respecto a un receptor tubular de 70mm de diámetro. 92
5.23 Faceta externa bajo el análisis de franjas. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha). 93
5.24 Mapa de desviación local de pendiente para la faceta externa Flabeg (mrad). Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha). 94
5.25 Mapa de desviación focal para la faceta externa Flabeg. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha). 94
5.26 Factor de interceptación solar para la faceta externa de Flabeg con respecto a un receptor tubular de 70mm de diámetro. 95
5.27 Esquema de dimensiones de faceta deformable. 95
5.28 Estructura de faceta deformable. Tornillo de ajuste mecánico (izquierda). Marco de sujeción (derecha). 96
5.29 Arreglo experimental para la prueba de franjas de la faceta deformable. . . . 97
5.30 Faceta plana bajo el análisis de franjas. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de concentración (derecha). 98
5.31 Mapa de desviación local de pendiente para la faceta plana (mrad). Dirección de concentración (izquierda). Dirección de concentración (derecha). 98
5.32 Mapa de desviación focal para la faceta plana. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de concentración (derecha). 99
5.33 Faceta deformable bajo el análisis de franjas. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de concentración (derecha). 100
5.34 Mapa de desviación local de pendiente para la faceta deformable (mrad). Dirección de concentración (izquierda). Dirección de concentración (derecha). . 100
5.35 Mapa de desviación focal para la faceta plana. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de concentración (derecha). 101
5.36 Imágenes de la unidad de prueba de colectores solares ENEA. Cassaccia, Italia. 102
5.37 Esquema dimensional de los colectores de canal parabólico de ENEA. 102
5.38 Imágenes del proceso de fabricación del módulo de caracterización para la prueba de franjas. 103
5.39 Arreglo experimental para el análisis de un lazo de captador de canal parabólico ENEA. 104
5.40 Faceta interna bajo el análisis de franjas. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha). 105
5.41 Mapa de desviación local de pendiente para la faceta interna ENEA (mrad). Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha). 105
5.42 Mapa de desviación focal para la faceta interna ENEA. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha). 106
5.43 Factor de interceptación solar para la faceta interna de ENEA con respecto a un receptor tubular de 70mm de diámetro. 106
5.44 Faceta interna bajo el análisis de franjas. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha). 107

5.45 Mapa de desviación local de pendiente para la faceta interna ENEA (mrad). Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha). 108
5.46 Mapa de desviación focal para la faceta interna ENEA. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha). 108
5.47 Factor de interceptación solar para la faceta interna de ENEA con respecto a un receptor tubular de 70mm de diámetro. 109
5.48 Plataforma Solar Hermosillo (PSH), Hermosillo, Sonora. 110
5.49 Arreglo experimental para la prueba de franjas aplicado a un helióstato. . . . 111
5.50 Faceta plana bajo el análisis de franjas. Dirección de concentración y (izquierda). Dirección de concentración x (derecha). 112
5.51 Mapa de desviación local de pendiente del helióstato (mrad). Dirección de concentración y (arriba). Dirección de concentración x (abajo). 113
5.52 Mapa de desviación focal del helióstato. Dirección de concentración y (arriba). Dirección de concentración x (abajo). 115
5.53 Trazado de rayos del helióstato UNAM-CC-36A para un 13 de octubre. . . . 116

7.1 Modelo de proyección de la cámara (*Pinhole Model*). 131
7.2 Modelo de distorsión radial de una cámara caracterizada. 133
7.3 Modelo de distorsión tangencial de una cámara caracterizada. 133
7.4 Patrón "checkboard" utilizado para la calibración de la cámara. 134
7.5 Proyección trapezoidal del proyector por la no orientación perpendicular. . . 135
7.6 Proyección de un patrón de franjas con corrección Gamma. 136
7.7 Extracción de la fase empaquetada sin el uso de procesamiento de imágenes. 139
7.8 Extracción de la fase empaquetada usando técnicas de procesamiento de imágenes. 139

Lista de Tablas

1.1 Comparativa de desarrollo de tecnologías de CSP. Tomada de [12] 10
1.2 Descripción de errores posibles en una superficie especular 15

2.1 Softwares disponibles para la simulación por trazado de rayos de la mancha solar concentrada 24

3.1 Fase y rango de valores de acuerdo al signo del numerador ($\sin\Phi$)y denominador ($\cos\Phi$) en la expresión de la $\tan\Phi$ 50

4.1 Valores de intensidad en el mapa de grises del análisis de sensibilidad de la cámara 63
4.2 Estadistica del análisis de sensibilidad sobre la iluminación en el sistema. . . 65
4.3 Estadistica del análisis de sensibilidad sobre el contraste en el sistema. 65
4.4 Estadistica del análisis de sensibilidad sobre la frecuencia en el sistema. . . . 68
4.5 Valores de incertidumbre para los parámetros de entrada de la herramienta FOCuS. 69
4.6 Márgenes de oscilación de la magnitud con respecto a su valor nominal y la incertidumbre de medición (banda de error). 71
4.7 Incertidumbre estándar combinada. Resultado de la medición de la incertidumbre de los valores de cada parámetro de entrada. 71

5.1 Tabla de valores de entrada para el análisis de franja en las facetas Rioglass. 78
5.2 Datos estadísticos sobre la faceta interna RP3 de Rioglass. 83
5.3 Datos estadísticos sobre la faceta externa RP3 de Rioglass. 86
5.4 Datos estadísticos RMS para el análisis de afectación de gravedad sobre la faceta externa RP3 de Rioglass. 89
5.5 Tabla de valores de entrada para el análisis de franjas de la faceta Flabeg . . 90
5.6 Datos estadísticos sobre la faceta interna RP3 de Flabeg. 93
5.7 Datos estadísticos sobre la faceta externa RP3 de Flabeg. 94
5.8 Tabla de valores de entrada para el análisis de franja en la faceta deformable de helióstato. 97
5.9 Datos estadísticos sobre la faceta deformable plana. 99
5.10 Datos estadísticos sobre la faceta deformada. 100

5.11 Datos de entrada para el análisis de franjas del colector ENEA-SOLTERM. . 104
5.12 Datos estadísticos sobre la faceta interna del colector ENEA-SOLTERM. . . 107
5.13 Datos estadísticos sobre la faceta externa del colector ENEA-SOLTERM. . . 109
5.14 Tabla de valores de entrada para el análisis de franjas del helióstato UNAM-CC-36A. 111
5.15 Datos estadísticos Helióstato UNAM-CC-36A $SDy \| SDx$ (mrad). 114
5.16 Datos estadísticos Helióstato UNAM-CC-36A $FDy \| FDx$ (mm). 114

7.1 Niveles de grises correspondientes al número de bits 137

Nomenclatura

Simbología

Símbolo	Unidades	Descripción
(x, y)		Coordenadas espaciales
I	n-bit	Patrón de intensidad
A	n-bit	Iluminación de fondo
B	n-bit	Amplitud (contraste)
Φ	rad	Fase global
$f_{(x,y)}$	$1/m$	Frecuencia espacial
$T_{(x,y)}$	$1/m$	Periodo espacial
η	rad	Constante de desplazamiento
I_r	n-bit	Patrón de intensidad reflejado
ϕ	rad	Fase modulada
MW		Mega Watts
m		metros
$mrad$		miliradianes
σ_E	rad	Error óptico global
$\sigma_{especular}$	rad	Error óptico especular
$\sigma_{pendiente}$	rad	Error óptico pendiente
σ_{forma}	rad	Error óptico forma
σ_{canteo}	rad	Error óptico canteo
θ	rad	Ángulo reflejado
$\Delta\theta$	rad	Desviación con respecto al rayo reflejado ideal
F	m	Distancia focal
RMS		Root mean square
γ	rad	Deformación local angular
Z_B		Rayo ideal reflejado
Z_D		Rayo real reflejado
α	grad	Ángulo de visión de la cámara
β	grad	Ángulo de inclinación de la faceta

θ	grad	Ángulo de apertura del rayo ideal y la cámara
ω	grad	Ángulo entre el rayo real reflejado y la perpendicular
ϵ	grad	Ángulo entre el rayo ideal reflejado y la perpendicular
$\Delta Z_{(x,y)}$		Diferencia espacial entre rayo reflejado ideal y real
RMS		Media cuadrática

Abreviaciones

Simbología

Símbolo	Significado
CSP	Concentración Solar de Potencia
IEA	Agencia Internacional de Energía
ID	Investigación y Desarrollo
CR	Ciclo Ranking
CB	Ciclo Brayton
CC	Ciclo Combinado
CS	Ciclo Stirling
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (Centro Aeroespacial Alemán)
$ENEA$	Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l energia e lo sviluppo economico sostenibile
CMT	Camera Target Method
$SHOT$	Scanning Hartmann Optical Testing
$SCOTS$	Software Configurable Optical Test System
$LSLHT$	Line Scanning Laser Hartmann Test
$SCCAN$	Solar Concentration Characterization At Night
TOP	Theoretical Overlay Photographic
$TARMES$	Trough Absorber Reflection Measurement System
CcD	Colour-coded Deflectometry
CPD	Colour Pattern Deflectometry
$SOFAST$	Sandia Optical Fringe Analysis Tool
FOCuS	Fringe Optical Characterization of Surfaces
SAR	Synthetic Aperture Radar

$4PS$	Four-Phase Shifting
DPD	Direct Phase Detection
FM	Frecuencia Modulada
BPF	Band Pass Filter
FFA	Fourier Fringe Analysis

Chapter 1
Introducción

1.1 Antecedentes

El desmesurado crecimiento de la población, el sector industrial y el estilo de vida moderno de los últimos años, ha propiciado que los requerimientos de energía hayan aumentado significativamente, provocando una mayor demanda de combustibles fósiles (petróleo, gas, carbón) para poder subsanar la necesidad energética global. La extracción indiscriminada de combustibles no renovables para satisfacer la demanda energética ha mermado considerablemente las reservas de estos productos, lo que ha hecho más difícil su obtención y que su costo haya tendido a elevarse significativamente. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) en su reporte anual de tendencias [4], los costos de los combustibles fósiles, en especial el del petróleo, tenderán a duplicarse en los próximos 20 años, llegando aproximadamente a requerir más de 100 mil millones de barriles de petróleo para 2035.

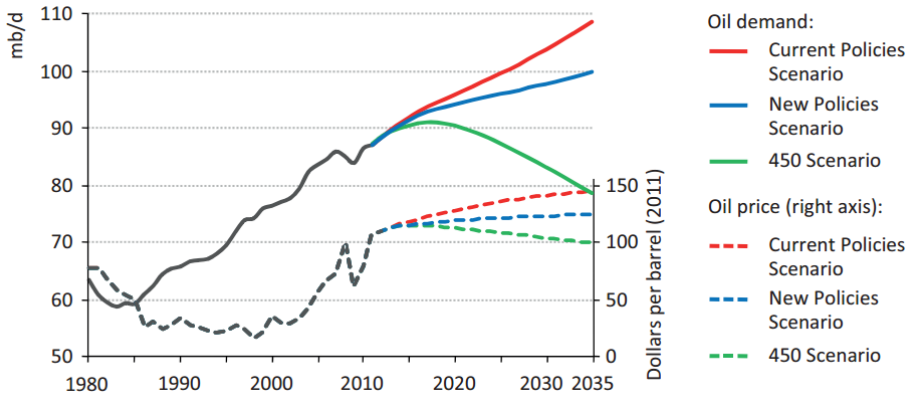

Figure 1.1: Demanda y precios históricos a nivel mundial de combustibles fósiles y escenario previsto para 2035. Gráfica tomada de la ref.[4].

Subsanar la alta demanda energética no solo se vuelve un problema monetario por los altos costos del combustible. Las consecuencias de este fenómeno han sido graves también para el medio ambiente, debido al incremento en la emisión de contaminantes y dióxido de carbono que genera la quema de combustibles fósiles [76], contribuyendo de primera mano

a la elevación de la temperatura del planeta, provocando el llamado efecto invernadero (Ver Fig. 1.2).

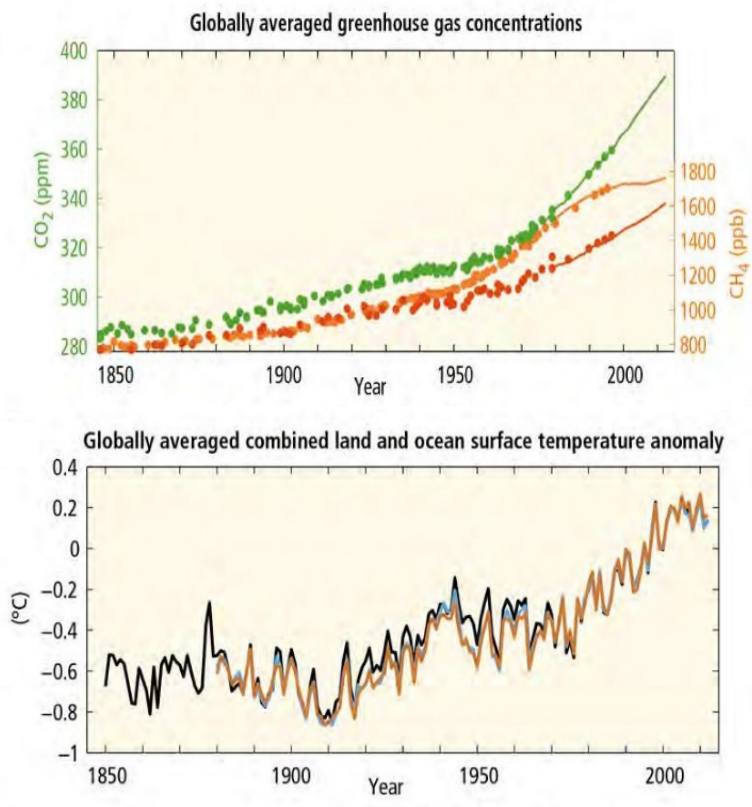

Figure 1.2: Históricos de mediciones de concentraciones de gas de efecto invernadero (izquierda). Temperatura anual global (derecha). Gráficas tomadas de la ref.[76].

Una alternativa para satisfacer la necesidad energética mundial y reducir la dependencia de los combustibles fósiles se presenta al aprovechar el recurso energético proveniente del sol. La tecnología solar en si misma no es una tecnología nueva, sus inicios se remontan al 212 a.C. cuando cuenta la leyenda, Arquímedes instruyó a sus soldados a que utilizaran el reflejo del sol sobre sus escudos pulidos, orientándolos de manera cuidadosa sobre las velas de los barcos enemigos para prenderles fuego. En 1615 Salomón de Caus desarrolló un pequeño motor de potencia solar que consistía en lentes de vidrio y un recipiente metálico hermético que contenía agua y aire. A pesar de que para 1913 se instalaba ya la primera planta a nivel industrial de aprovechamiento solar en Maadi (Egipto) para el bombeo de agua [44], no fue sino hasta la década de los años de setentas que debido a la crisis mundial de petróleo se impulsaron actividades de I+D en concentración solar de potencia y numerosas plantas piloto fueron construidas y probadas, de manera que la tecnología solar de concentración llegó a nivel industrial y comercial [12]. Para 1977, el conocimiento y la experiencia adquirida por diversos prototipos desarrollados hacía posible la recolección de energía térmica mediante alternativas viables [32]. Como resultado, la primera planta comercial ha estado operando

en California (Estados Unidos) desde entonces. Pero la súbita disminución de los precios del petróleo en la década de los noventas y la falta de apoyo político hicieron que la energía solar perdiera su entrada al mercado mundial de la energía.

La radiación solar es el "combustible" utilizado en la tecnología de Concentración Solar de Potencia (CSP) para la generación térmica de potencia eléctrica. La luz solar llega a la superficie de la tierra con una densidad de flujo radiativo de entre 900 y 1,000 W/m 2 en días despejados [45]. Una buena radiación solar la podemos encontrar regularmente en zonas áridas o semi-áridas con cielos relativamente claros, que típicamente se encuentran entre las latitudes 15 Norte - Sur; como lo son las zonas del norte y sur de África, Medio Oriente, el noroeste de la India, el sur de los Estados Unidos, México, Perú, Chile, una parte del oeste de China y Australia entre otras, tal como se puede apreciar en la Figura 1.3.

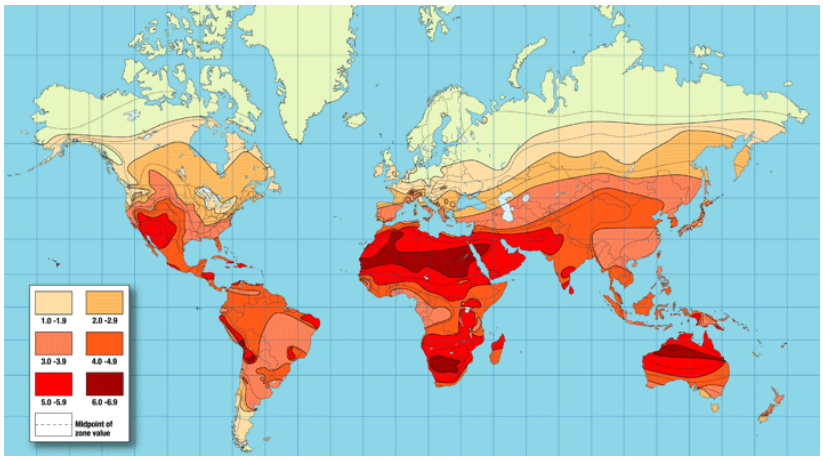

Figure 1.3: Mapa de recurso solar mundial (W/m^2). Tomado de la ref. [20].

Si bien la cantidad de energía que llega a la tierra proveniente del sol en un día es cinco mil veces mayor a la demanda energética mundial (la cual es del orden de 18 TW eléctricos) [78], ésta tiene una densidad energética relativamente baja con respecto a los recursos convencionales de energía; por lo que el uso de dispositivos ópticos de concentración solar es necesario para incrementar su densidad, permitiendo así su uso en aplicaciones técnicas [44].

1.2 Tecnologías de concentración solar

Las tecnologías de concentración solar de potencia producen electricidad concentrando la luz proveniente del sol por medio de superficies reflectantes hacia un receptor, el cual suministra suministra la energía concentrada a un fluido de trabajo (agua, aire, aceite térmico) convirtiéndolo a su vez en una fuente térmica de alta temperatura. La fuente térmica es usada entonces para transformar agua en vapor por medio de un intercambiador de calor. El vapor entonces hace girar una turbina convencional que genera energía eléctrica debido al movimiento mecánico. Para lo anterior y en base a los desarrollos que se han realizado a través de los años, se han dispuesto diversas configuraciones de sistemas concentradores.

- Sistemas de Torre Central: Este sistema emplea arreglos de espejos individuales llamados helióstatos, capaces de seguir la trayectoria solar y concentrar la luz en un receptor montado encima de una torre. Ver Fig. 1.4.

Figure 1.4: Planta de generación de potencia de Torre Central en Sanlucar, España.

- Canal Parabólico: Consiste en un espejo con curvatura parabólica en una sola dirección, en forma de canaleta, el cual refleja la luz solar de manera directa a un tubo que pasa por su línea focal, conteniendo un fluido térmico el cual se usa para producir vapor. Este dispositivo es uno de los más desarrollados y viables económicamente en lo que se refiere a la producción de energía por concentradores solares (Fig. 1.5).

- Disco Stirling: Este dispositivo consisten en discos parabólicos capaces de reflejar la luz solar en un receptor montado en el punto focal del mismo, el cual contiene un fluido térmico que al calentarse produce energía eléctrica por medio de un motor Stirling, como puede apreciarse de la Figura 1.6.

- Reflectores Fresnel: Consisten en un arreglo de reflectores alargados planos o ligeramente curvos, alineados en diferentes ángulos, formando un arreglo de reflectores de Fresnel. En su foco, concentra la radiación en un receptor tubular alargado. Ver Fig. 1.7.

La tecnología de CSP tiene varias opciones de configuración: El arreglo del campo, los sistemas de seguimiento, el tipo de receptor, el fluido térmico utilizado para la operación, la tecnología de almacenamiento y los sistemas de conversión de potencia pueden variar y para ellos existen diversos prototipos. Como fluido térmico, la sal fundida es ampliamente usada en plantas comerciales. También son usuales los aceites sintéticos y el vapor saturado.

Figure 1.5: Sistema de Canal Parabólico instalado para minería en Atacama, Chile.

Figure 1.6: Prototipo EURODISH de generador eléctrico de Disco Stirling.

Figure 1.7: Concentradores Fresnel. AREVA Solar

Los sistemas de conversión de potencia (ciclo termodinámicos) utilizados actualmente por la tecnología de canal parabólico, de torre central y fresnel son el ciclo Rankine, ciclo Brayton y ciclos combinados. La tecnología de disco parabólico utiliza el ciclo Stirling.

En la Tabla 1.1 se presenta una breve comparación entre las tecnologías de CSP, para cada tecnología la eficiencia general de todo el sistema varia con la localización, el clima y el día del año.

Tabla 1.1: Comparativa de desarrollo de tecnologías de CSP. Tomada de [12]

Tecnología CSP	**Canal Parabólico**	**Torre Central**	**Disco Stirling**	**Fresnel**
Colectores	Foco lineal	Foco puntual	Foco puntual	Foco lineal
Ciclo	CR, CC	CR, CB, CC	CR, CS	CR
Concentración	70-80	>1000	>1300	>60
Temperatura ($°C$)	Media	Alta	Alta	Baja
Eficiencia (%)	15-16	16-17	20-25	8-10
Capacidad (MW)	10-300	10-200	0.01-0.025	10-200
Desarrollo	Comercial probada	Comercial	Demostrativa	Piloto

Si bien es cierto que la tecnología solar se encuentra en una etapa inicial de comercialización, y que los costos de producción eléctrica son aún mayores que los de las tecnologías convencionales, esto está cambiando. Las plantas termosolares se encuentran en una curva de abaratamiento en sus componentes por la creciente puesta en operación de plantas en el mundo. Los desarrollos tecnológicos son cada vez mayores y un gran número de compañías y centros de investigación se han ido sumando a la fabricación y caracterización de los concentradores solares, lo que ha permitido desarrollos más económicos y eficientes, mientras que la tendencia en la producción eléctrica por tecnologías convencionales indica que sus costos

seguirán aumentando [53].

1.2.1 Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar

Con el objetivo de impulsar el desarrollo de las tecnologías de concentración solar en México, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) aprobó en el año 2007, el proyecto de *Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar* (LACYQS). Este proyecto, concebido y dirigido por el Prof. Dr. Claudio Alejandro Estrada Gasca, ha sido financiado conjuntamente por el CONACyT, la Universidad Nacional Autónoma de México y la Universidad de Sonora, y actualmente se encuentra en su segunda etapa de implementación. Uno de los objetivos del LACYQS ha sido el de desarrollar en México infraestructuras de alto nivel para la investigación y el desarrollo sobre tecnologías de concentración solar. Este laboratorio nacional consta de tres instalaciones y cada una de ellas tiene sus objetivos estratégicos:

- El Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HoSIER), ubicado en las instalaciones del Instituto de Energías Renovables de la UNAM en Temixco, Morelos, es un instrumento que usa la energía solar concentrada para realizar investigación científica y tecnológica; en particular para el estudio de procesos industriales y el desarrollo de componentes de tecnologías para la generación termosolar de potencia eléctrica y la producción de combustibles fósiles. Ver Figura 1.8.

- La Planta Solar para el Tratamiento Fotocatalítico de Aguas Residuales (PSTFAR), tal como su nombre lo indica, tiene como objetivo contribuir a la implementación de una tecnología ambientalmente favorable en el tratamiento de aguas residuales por medio de la fotocatálisis heterogénea. Se encuentra ubicada en las instalaciones del Instituto de Energías Renovables de la UNAM en Temixco, Morelos. Ver Figura 1.9.

- Campo Experimental de Torre Central (CEToC), ubicado en los terrenos del Departamento de Agricultura y Ganadería de la UNISON, en Hermosillo, Sonora, consta de sistemas que permiten la evaluación de helióstatos aplicados a plantas solares de generación de potencia de torre central. En esta instalación se lleva a cabo investigación aplicada y desarrollo tecnológico dirigido a la optimización y el mejoramiento en el rendimiento óptico y mecánico de los helióstatos. Ver Figura 1.10.

Se espera que el LACYQS permita posicionar a México en el ámbito mundial en la investigación sobre las tecnologías de concentración solar e impulse el desarrollo de una industria nacional de estas tecnologías, así como la formación de recursos humanos de alto nivel. En este sentido, la presente tesis se enmarca en dicho proyecto.

Figure 1.8: Instalaciones de investigación del LACYQS. Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HoSIER).

Figure 1.9: Instalaciones de investigación del LACYQS. Planta Solar para el Tratamiento Fotocatalítico de Aguas Residuales (PSTFAR).

Figure 1.10: Instalaciones de investigación del LACYQS. Campo Experimental de Torre Central (CEToC).

1.3 Errores ópticos

Debido a la necesidad de competitividad y consideraciones en el costo de una planta, la alta precisión óptica no es una meta asequible para los concentradores solares. Existe un compromiso entre rendimiento y coste para los desarrolladores, lo cual hace inclinar la balanza del lado de la baja precisión óptica más que del uso de instrumentos ópticos robustos y complejos. En los concentradores solares la formación de imágenes generalmente no es una preocupación importante, pues se basan en la llamada óptica de no-imagen. Por lo tanto, la imperfección óptica es un hecho intrínseco en su fabricación y con la cual hay que lidiar a la hora del diseño y evaluación de estos sistemas.

La calidad y la forma de la superficie reflectante de un concentrador solar determina el nivel de concentración alcanzado y los detalles de la distribución de flujo concentrado en el receptor. Por lo general, la forma de las superficies de concentración solar se desvían de las curvas de diseño ideales, lo que provoca errores o desviaciones a la ley de reflexión especular. Errores de canteo, o desviaciones de la orientación de las facetas individuales con respecto a las direcciones nominales contribuyen aún más a estos errores. Además, las superficies en si mismas pueden no ajustarse a la ley de reflexión especular, debido a rugosidades en su superficie que producen la dispersión de la luz. En la Fig 1.11, se ilustran las causas principales que causan una reflexión imperfecta de la radiación solar de un concentrador.

Es posible alcanzar un conocimiento completo de la óptica del concentrador solar, si las desviaciones locales de la forma teórica de la superficie y la función de dispersión característica del material reflejante se conocen a detalle. Entonces, la distribución de flujo en el receptor se puede predecir a cualquier nivel de precisión deseado por medio de un trazado de rayos. Este conocimiento completo sin embargo, es una situación ideal que no ocurre generalmente

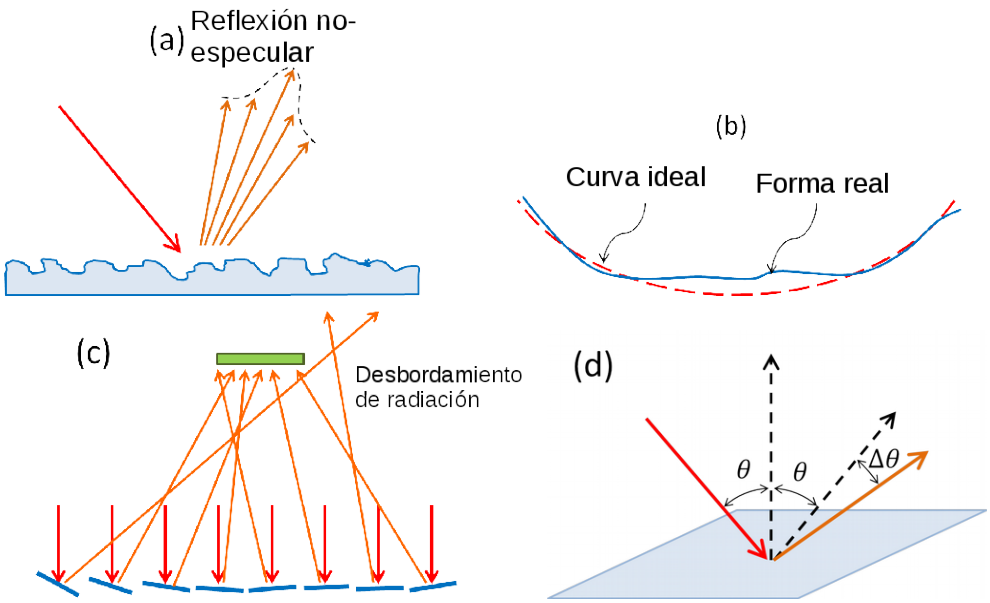

Figure 1.11: Principales causas de error en la reflexión solar de un concentrador. (a) Rugosidad en la superficie. (b) Errores en la geometría. (c) Errores de canteo. (d) Resultado en la desviación de un rayo reflejado.

en el mundo real. Más aún, un exceso de detalle puede ser engorroso a la hora de modelar una distribución de flujo producida por un gran número de facetas. En la práctica, las características ópticas y la forma de los concentradores solares requieren ser conocidas a diferentes niveles de detalle.

A continuación se enlistan algunos de los errores más comunes encontrados al analizar superficies de concentradores solares:

- Errores de especularidad: Son ocasionados por la textura de la superficie, la cual presenta una rugosidad a escala micro o mesoscópica en el depósito de platinado que produce dispersión de la luz reflejada.

- Errores de forma: Al utilizar sistemas de conformado tales como rodillos, marcos de succión y tratamientos térmicos, es posible que las superficies resultantes no correspondan necesariamente con la forma deseada. Por lo que las pendientes de su superficie en cada punto difieren de las que idealmente debería tener.

- Errores de canteo: Dado que es difícil y costoso construir concentradores grandes de una sola pieza, estos se fabrican por segmentos o facetas. Cada faceta es montada en una estructura y debe ser orientada correctamente para que enfoque a una dirección. A este proceso de ajustar la orientación se le llama canteo y siempre tiene una precisión limitada, generando el error de canteo.

- Errores de seguimiento: Este error ocurre debido a que el apuntamiento del concentrador hacia el Sol nunca es perfecto.

Tabla 1.2: Descripción de errores posibles en una superficie especular

.

Nivel de descripción	Información
Completo	Reflectancia angular de la superficie ρ_θ y mapa detallado de la forma $Z(x, y)$.
Medio	Reflectancia promedio ρ, forma efectiva de la superficie, ${\sigma^2}_{especular}$, ${\sigma^2}_{forma}$, ${\sigma^2}_{canteo}$.
Elemental	Reflectancia promedio ρ y ${\sigma^2}_{global}$.

Al nivel más simple, dos parámetros son suficientes para describir las características reflectivas de un concentrador solar: La reflectancia promedio de la superficie, y la desviación estándar σ_{global} de la función global de error óptico. Esta función, es una distribución Gaussiana que describe la distribución de las desviaciones angulares de rayos $\Delta\theta$ (Fig. 1.11(d)) con respecto a la ley especular [13]. La mayoría de los códigos de trazado de rayos para concentradores solares llevan a cabo sus cálculos basados en estos dos parámetros. La simulación óptica de una planta completa de CSP con parámetros más detallados es a la vez engorroso e innecesario.

La desviación estándar σ_{global} se llama simplemente al error óptico global de la superficie. Se compone del error especular $\sigma_{especular}$, y el error de la pendiente $\sigma_{pendiente}$. Se ha observado que el error de especularidad, que expresa la dispersión debido a la rugosidad de la superficie, puede ser bien descrito por una función Gaussiana [61]. El error de pendiente a su vez se puede dividir en un error de forma σ_{forma}, que caracteriza las desviaciones de curvatura de las facetas, y un error de canteo de la faceta σ_{canteo}, que describe el error de alineación de esas facetas con respecto a la superficie geométrica general a representar.

$$ {\sigma^2}_{global} = {\sigma^2}_{especular} + {\sigma^2}_{forma} + {\sigma^2}_{canteo} \tag{1.1} $$

Un más alto nivel de descripción implica la determinación de todas estas contribuciones al error óptico global por separado. Esto requiere, utilizar metodologías que nos proporcionen un conocimiento detallado de la rugosidad, la forma y el canteo para con ello obtener una descripción completa del comportamiento óptico de la superficie y determinar el grado de calidad de la misma. La Tabla 1.2 se puede resumir el nivel de descripción de una superficie especular.

1.3.1 Parámetros de caracterización

Una superficie reflectante de un concentrador solar puede presentar desviaciones en su superficie con respecto a su forma ideal, lo que ocasiona que los rayos de luz incidentes sobre el colector no se reflejen de manera correcta a la distancia focal de diseño y se distribuyan de manera uniforme. Más aún, estos rayos pueden terminar fuera del área del receptor dependiendo la magnitud de su error, lo que ocasiona grandes pérdidas de energía al sistema.

Como se detalló en la sección anterior (Secc. 1.3), existe diversos errores que contribuyen de distinta manera a la calidad de concentración del sistema. En particular, es el error geométrico o de desviación de pendiente es uno de los que determina en mayor proporción que fracción de los rayos solares incidentes van a dar al receptor y como es su distribución de flujo. De tal manera que para poder caracterizar propiamente un colector, es necesario contabilizar la cantidad con que se desvía la pendiente de la forma ideal del concentrador.

Desviación de pendiente

El ángulo que se forma entre la normal real $\overrightarrow{n_r}$ y la normal ideal $\overrightarrow{n_i}$ de una superficie especular es una medida de la precisión con la superficie refleja los rayos incidentes en ella. Este valor de precisión es llamado desviación local de pendiente o *local slope deviation* (SD) y es comúnmente expresado en miliradiantes (mrad). La desviación local de pendiente es calculada por separado para ambas direcciones de una superficie (SD_x, SD_y) en el plano z, tal como se indica en la Figura 1.12.

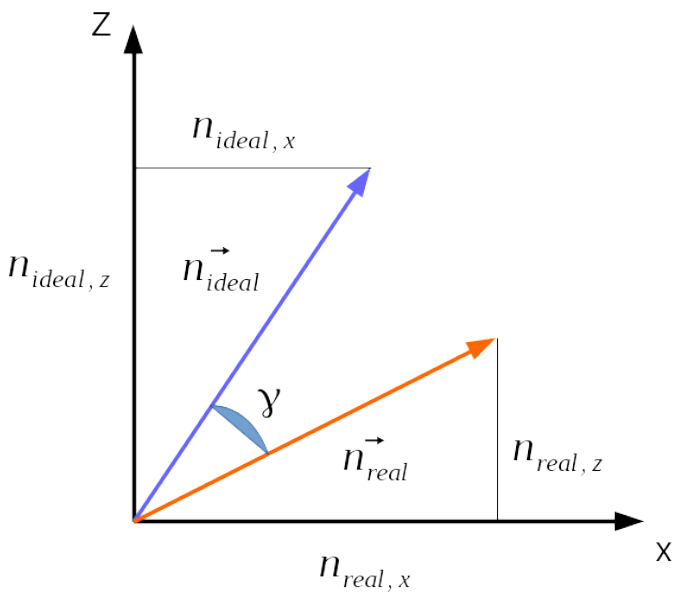

Figure 1.12: Ángulo de desviación de pendiente para la coordenada x proyectada sobre el plano z.

De esta manera, es posible obtener el valor de desviación del ángulo γ por medio de la suma de las componentes rectangulares de los vectores $\overrightarrow{n}$:

$$SD = \gamma = \arctan\left(\frac{n_{real,(x,y)}}{n_{real,z}}\right) - \arctan\left(\frac{n_{ideal,(x,y)}}{n_{ideal,z}}\right) \tag{1.2}$$

Una revisión estadística de la desviación local de pendiente provee valiosa información sobre la precisión total del colector. El valor medio de la pendiente local indica el ángulo

de desviación promedio en la orientación de la superficie reflectante. La desviación estándar es una medida de la desviación total de la faceta en si misma, la cual puede ser englobada junto con el valor medio al calcular la media cuadrática o RMS. El valor de RMS se basa en el cálculo de los valores de desviación de pendiente sobre área ponderada para ambas direcciones respectivamente.

$$RMS_{SDx} = \sqrt{\sum_{n=1}^{N} \left(\gamma_x^2 \frac{a_n}{A_{total}} \right)}, RMS_{SDy} = \sqrt{\sum_{n=1}^{N} \left(\gamma_y^2 \frac{a_n}{A_{total}} \right)} \tag{1.3}$$

donde a representa un elemento de área del plano total de la proyección A_{total}

Desviación focal

Debido a que la desviación local de pendiente depende particularmente de la distancia de la faceta al elemento receptor, es deseable poder expresar la diferencia en milímetros que sufre la desviación del rayo reflejado con respecto a su punto focal para poder ser corregido. Por ello, se ha introducido un nuevo parámetro para caracterizar la precisión de la faceta [71]. La desviación focal de una faceta es un valor estadístico que representa las desviaciones entre el foco real y el foco teórico de referencia. Este puede ser calculado a partir del doble valor de la desviación de pendiente SD (debido a las leyes de reflexión) y a la distancia de la superficie al elemento receptor o distancia focal F:

$$FD = 2 \cdot SD \cdot F \tag{1.4}$$

De manera similar, dicho valor puede ser representado como un factor RMS o desviación media cuadrática, y se define como la proyección de los planos transversal (SDy) y longitudinal (SDx) de las desviaciones calculadas.

$$RMS_{FDx} = \sqrt{\sum_{n=1}^{N} \left(FD_x^2 \frac{a_n}{A_{total}} \right)}, RMS_{FDy} = \sqrt{\sum_{n=1}^{N} \left(FD_y^2 \frac{a_n}{A_{total}} \right)} \tag{1.5}$$

Si bien, estos valores solo pueden ser aplicables para aquellos reflectores que se encuentran a una distancia focal bien definida del receptor (i.e. captadores cilindro parabólicos, plato parabólico, etc.), es una herramienta significativa para obtener mayor información sobre aquellas facetas que se encuentren disponibles.

Trazo de rayos y el factor de interceptación

Con el fin de obtener un modelo computarizado del rendimiento óptico de una faceta bajo condiciones de operación, es conveniente determinar el factor de interceptación del arreglo mediante un análisis de trazo de rayos. En este análisis, rayos ópticos simulados son incididos sobre la superficie y su trayectoria de impacto es analizada a lo largo del camino. El porcentaje de radiación que se emite de la fuente de luz y que logra impactar en la superficie del receptor (que se intercepta) es el denominado factor de interceptación (FI).

Diferentes factores de interceptación pueden ser obtenidos debido a la dependencia que estos tienen sobre el tipo de fuente de luz a la que son sometidos. Comúnmente, el factor de interceptación láser es el más ampliamente reportado debido a que las consideraciones que se tienen que tener en cuenta sobre el trazador de rayos son menores. Un número considerable de rayos láser virtuales actúan a manera de fuentes de luz puntuales, de tal manera que salen de manera paralela y su reflejo sobre la superficie y posterior impacto sobre el receptor es calculado. Esta aproximación, si bien sirve para obtener un panorama general de la condición de la faceta, no toma en cuenta condiciones del mundo real. Para ello, se dispuso un análisis más complejo considerando la propagación de los rayos solares incidiendo sobre un colector. Debido a que la luz solar presenta un cono de propagación mucho mayor que la aproximación láser, resulta en condiciones de simulación más apegadas a la realidad. Típicamente se utiliza la forma solar universal, con un radio circunsolar de 3.5% [87].

1.4 Objetivos

El objetivo general que se pretende para este trabajo es desarrollar un sistema integral de caracterización óptica de concentradores solares basado en la técnica de reflexión de franjas. Esta técnica, es deseable, permita obtener información detallada y con un gran nivel de resolución de la forma y comportamiento óptico de diversas facetas de concentradores solares. Además, establecer una metodología que permita la evaluación de facetas en un arreglo de laboratorio y a nivel industrial.

1.4.1 Objetivos específicos

Para llevar a cabo lo anterior es necesario lograr lo siguiente:

- Llevar acabo una revisión bibliográfica que permita identificar las áreas de oportunidad en las técnicas de caracterización óptica desarrolladas anteriormente.
- Comprender a detalle la teoría y matemática detrás del método de reflexión de franjas.
- Diseñar y construir un sistema mecánico que permita la caracterización de facetas en un ambiente controlado de laboratorio.
- Desarrollar un software de evaluación robusto y eficiente que incluya las consideraciones pertinentes observadas en las pruebas iniciales.
- Llevar a cabo campañas de caracterización a distintas facetas de concentradores solares y ensayos en campo.
- Realizar lineamientos sólidos que permitan el uso conjunto de las herramientas digitales y experimentales a nivel laboratorio e industrial.

- Identificar valores que permitan establecer parámetros de calidad sobre el comportamiento óptico de los concentradores solares y buscar con ello generar normativas para el rendimiento de las plantas de CSP.

1.5 Justificación

Siendo el campo de captadores solares el componente que presenta el mayor costo de inversión en una planta termosolar, es necesario asegurar el óptimo desempeño de éste, así como caracterizar las posibles deficiencias que los colectores pudiesen presentar para su posterior corrección. Por ello, es necesario el desarrollo de un sistema de caracterización veloz, robusto, eficiente y de alta resolución que identifique los posibles errores ópticos presentes en los sistemas reflejantes de la tecnología de concentración solar. Al aumentar la eficiencia óptica de los concentradores, crecería considerablemente la eficiencia térmica de la planta y con ello los costos nivelados de generación eléctrica serían cada vez más competitivos.

1.6 Estructura de la tesis

A lo largo de los capítulos siguientes, se detallan los conceptos fundamentales que rigen la técnica. En particular, el capítulo 2 realiza un histórico sobre la evolución de las técnicas de evaluación que han sido propuestas por diversos autores a lo largo del tiempo, esto con la finalidad de establecer los criterios ha tomar en cuenta a la hora de diseñar una metodología de caracterización. El capítulo 3 nos adentra en la teoría detrás del método propuesto en este trabajo, en las ecuaciones que rigen el principio de la reflexión de franjas y en como las modificaciones a la base matemática nos permiten obtener el mapa de desviaciones de pendiente de una manera más eficiente. En el capítulo 4, se describe la metodología a seguir para poder obtener los resultados deseados. En él, se hacen notar las las particularidades a tomar en cuenta en el arreglo geométrico. Se describe a detalle aquellos factores que intervienen con un mayor impacto en el cálculo de la pendiente y se da una explicación sobre como superarlos. El capítulo 5 presenta los resultados y la discusión de diversas pruebas que se hicieron, tanto al poner a prueba el arreglo en laboratorio, como en campo. Se detalla la infraestructura utilizada y las distintas muestras que fueron analizadas. Las conclusiones obtenidas a lo largo de la experimentación son reportadas en el capítulo 6. En éste, se destacan las particularidades del método, las ventajas e inconvenientes encontrados, y se da una previsión a futuro sobre las implicaciones de la técnica y el trabajo que aún se puede realizar para hacerla aún más efectiva. Un capítulo extra es agregado al final como Anexo. Este capítulo presenta toda aquella teoría y metodología que si bien no se requiere explicarla con tanto nivel de detalle para entender la técnica, aquí es ampliada y comentada con la finalidad de darle completitud al trabajo.

Chapter 2
Estado del arte

En esta sección se enlistan las diversas metodologías de caracterización de colectores solares que han surgido a través de los años. Se trata de un análisis exhaustivo y realizado con búsquedas tanto en revistas indexadas como en memorias de congresos. En cada una se detallan las ideas tras su funcionamiento, algunas de sus características principales y las ventajas y desventajas propias de dicha técnica.

2.1 Metodologías de evaluación de concentradores solares

La caracterización óptica de concentradores solares es una tarea difícil de llevar a cabo debido al gran tamaño de los componentes involucrados en los sistemas. Un lazo de colectores cilindro-parabólicos puede llegar a medir hasta 400 metros de largo y un helióstato en un sistema de receptor central puede tener un área de captación de hasta 150 metros cuadrados y una distancia focal de hasta 1 kilómetro. Aunado a esto, las superficies de los espejos están montadas sobre numerosos soportes y tornillos, los cuales pueden introducir un sin fin de deformidades al diseño estructural inicial. Finalmente, estas metodologías tienen que ser capaces de trasladarse de entornos controlados de laboratorio a entornos más complejos como plantas industriales. Es por ello que lo anterior abre la necesidad de desarrollar metodologías de cualificación que sean precisas, de bajo costo y fáciles de implementar a grandes estructuras.

Las metodologías de evaluación han ido evolucionando a lo largo del tiempo. Avances en los sistemas de cómputo y adquisición de imágenes han permitido realizar mediciones más precisas de los componentes y obtener técnicas de evaluación más robustas. La inclusión y adaptación de técnicas de caracterización utilizadas en otros ramas de la óptica, han sido adaptadas también para utilizarse en la evaluación de concentradores solares con resultados favorables.

En la Figura 2.1, se propone una clasificación de las técnicas utilizadas para la caracterización de superficies reflectantes de concentradores solares. Otras clasificaciones podrían ser posibles, pero se ha elegido ésta basado en las características comunes de las diferentes técnicas.

Familia	**Metodología**	**Información obtenida**	**Resolución**
Pruebas de baja precisión	• Papel fotográfico • Trazado de rayos	Global	Muy baja
Pruebas tipo Hartmann	• SHOT • VSHOT • SCOTS • LSLHT • SCCAN • Perfilometría	Especular / Forma	Baja
Métodos intrusivos	• Fotogrametría	Forma / Canteo	Media
Observador Distante	• NREL DOM • TOP • TARMES • DOM Aéreo	Forma / Canteo	Alta
Reflexión de patrones estructurados	• Pantallas nulas • CcD • CpD	Forma / Canteo	Media
Reflexión de luz estructurada	• Fresnel FR • SOFAST • AIMFAST • QDec • CM • FOCuS	Especular / Forma /Canteo	Muy alta

Figure 2.1: Listado de técnicas de caracterización óptica con sus respectivas características.

2.1.1 Pruebas ópticas de baja precisión

Las primeras metodologías aplicadas para la caracterización de superficies de los colectores solares fueron importados de los métodos desarrollados para la óptica de imagen. Pruebas ópticas tales como "Ronchi test", "Focault knife test", "Hartmann test", etc., fueron diseñados para medir la desviación de la imagen de la muestra con respecto a una imagen ideal [52]. Sin embargo, los concentradores solares están diseñados para concentrar la radiación solar en lugar de formar una imagen (óptica de no-imagen). El primer autor en investigar esto fue Speyer [75]. Él se dio cuenta que el costo era el aspecto principal a tomar en cuenta en el desarrollo de concentradores solares, mucho más que las aberraciones ópticas o la perfección geométrica. Propuso un método para evaluar físicamente el factor de concentración de un espejo paraboloide usado en un horno solar, al exponer un papel fotográfico en la región focal y medir su densidad y comparar con el resultado de la densidad de un papel fotográfico expuesto a la radiación directa incidente.

Otra técnica desarrollada por la misma época, fue la técnica de caracterización con haz retro-reflecjante. Esta técnica llegó a la comunidad científica propuesta por Bodenheimer et al [33]. Utiliza una fuente de luz autocolimada, posicionada a lo largo del eje de concentración de la parábola. El haz colimado es interceptado por un espejo plano, estrategicamente posicionado, y retro-reflejado en la muestra a evaluar, el cual refleja la fuente en el foco de la parábola adjacente a la fuente de luz. La imagen y la fuente están desplazadas simétricamente una de otra relativo al espejo principal, como se muestra en la Figura 2.2. La técnica fue desarrollada para evaluar los reflectores parabólicos de la planta "Schemes" (Israel) en la etapa de posproducción.

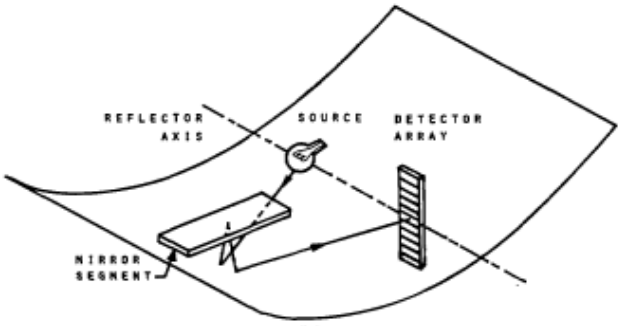

Figure 2.2: Sistema de espejos para la técnica de retroreflexión

Análisis de flujo y trazado de rayos

Uno de las primeras herramientas sofisticadas desarrolladas para la caracterización de superficies reflejantes desde que el concepto de planta solar de potencia emergió, fue el modelado del *spot* solar o el análisis del flujo solar reflejado, por medio de un algoritmo de trazado de rayos [43].

En la década de los años 70, y debido al desarrollo del proyecto piloto de torre central SolarOne en el desierto de Mojave en EUA, una variedad de códigos de trazados de rayos fueron desarrollados con la finalidad de obtener una mayor precisión en el modelado de la reflexión de los rayos en el receptor [29]. La mayoría de estos códigos desde la revisión de Garcia et al., en 2007 han sido modificados y otros nuevos han emergido.

En la siguiente tabla 2.1 se detallan aquellos disponibles:

Tabla 2.1: Softwares disponibles para la simulación por trazado de rayos de la mancha solar concentrada

Metodología	Autor	Tecnología	Método
HFLCAL	DLR	Helióstato	Convolución
SolTrace	NREL	Todos	MonteCarlo
Tonatiuh	CENER	Todos	MonteCarlo
STRAL	DLR	Helióstato	MonteCarlo
Tonali	UNAM	Horno Solar	Convolución

Un algoritmo de trazado de rayos modela la interacción de los rayos provenientes del sol y que se reflejan en la superficie de un concentrador. Por medio de elementos finitos y métodos estadísticos como la convolución o la generación de núneros aleatorios por Monte-Carlo, millones de rayos son simulados para observar como interaccionan con los elementos reflectivos del sistema y de esa forma reproducir su trayectoria hasta dar con un receptor. La forma solar obtenida en el receptor, se compara entonces con una serie de imágenes de las distribuciones reales de irradiancia y se tratar de reproducir esas imágenes mediante un trazado de rayos iterativo hasta lograr ajustarlo y que con ello obtener el error óptico global del concentrador σ_{global}.

SolTrace de NREL [56] y el código MonteCarlo de trazado de rayos *Tonatiuh* de CENER [14], son capaces de modelar un número considerable de formas de concentradores, tienen un sistema de acceso libre o código abierto y una interfaz amigable, lo que los hacen los códigos de trazo de rayos más ampliamente usados por la comunidad científica.

Desarrollos posteriores hechos por Lupfert et al., [70] hacen posible el uso de esta técnica para el análisis de colectores parabólicos. El método *camera-target* (CTM), es capaz de visualizar los rayos provenientes del sol, reflejados por el colector dirigidos hacia el tubo receptor, por medio de posicionar una pantalla plana y difusa perpendicular al tubo absorbedor. Después, se adquieren imágenes digitales de la pantalla con los rayos reflejados y, a partir la cantidad de rayos que no alcanzan a dar en el objetivo, es posible calcular el factor de interceptación del sistema [10].

Una segunda metodología para el cálculo del flujo radiativo se propuso por el mismo autor. La idea consiste en colocar un arreglo de sensores de luz o fotodiodos en la región focal del colector, los cuales son alineados a lo largo del eje del tubo receptor. Un arreglo de 96 fotodiodos es colocado en frente del tubo receptor, y uno más por la parte de atrás para detectar aquellos rayos que se desvían del objetivo. El autor expone que con esta propuesta se superan los problemas que acarrea el uso de arreglos de cámaras.

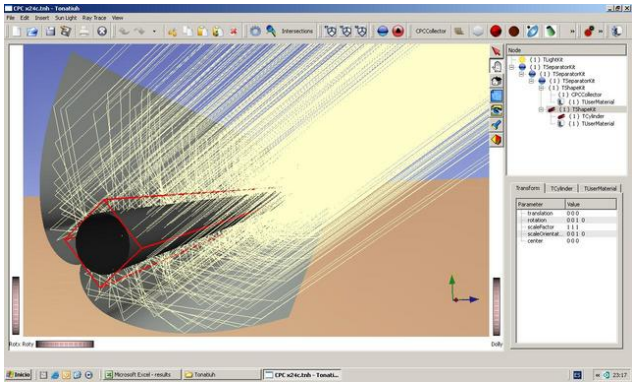

Figure 2.3: Modelado de un canal cilindro-parabólico en Tonatiuh. Imagen tomada de su sitio web libre.

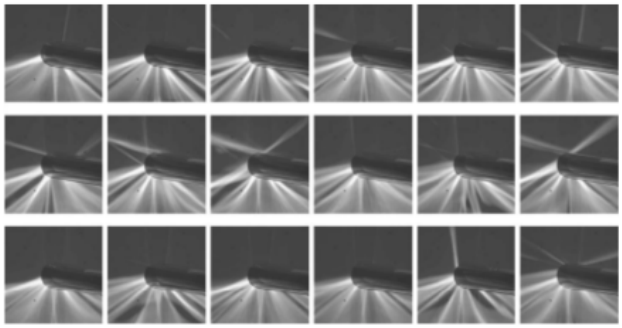

Figure 2.4: Imágenes del método CTM desarrollado por Lupfert

2.1.2 La técnica de Hartmann y otros métodos relacionados

Esta familia de pruebas se basa en la observación de las desviaciones de los rayos de luz reflejados en diferentes partes de un espejo, de tal manera que se pueda detectar desviaciones de la pendiente local. Una malla predefinida de puntos láser se muestrea en el espejo, y los rayos reflejados de estos puntos se observan en una pantalla o detector para evaluar su desviación con respecto a las trayectorias ideales. Si se desea la forma del espejo que se está evaluadon, ésta tiene que ser reconstruida a partir de las pendientes locales. Las diferencias entre los distintos métodos se encuentran principalmente en la manera de mapear y registrar la información.

La prueba de Hartmann clásica [52] se basa en la utilización de una pantalla perforada situada al frente del espejo que está siendo analizado (Ver Fig. 2.5). Un frente de onda esférico se pasa a través de estas perforaciones y su reflejo se hace pasar por las mismas perforaciones para luego incidir sobre una pantalla de observación, creando el patrón de puntos de Hartmann reflejados. De esta manera los orificios de la máscara sirven para definir la malla discreta de puntos de muestra bajo la parte delantera esférica producida por la iluminación de la lámpara. La configuración adoptada es uno donde la fuente de luz es

ligeramente por delante del centro de curvatura del espejo (distancia 2F), produciendo un punto conjugado ligeramente por detrás del centro de curvatura, y la pantalla de observación está situado en frente de este punto conjugado. En la versión clásica de la prueba, esta pantalla era una placa fotográfica que registra simultáneamente la reflexión desde cada punto, produciendo así el patrón de Hartmann.

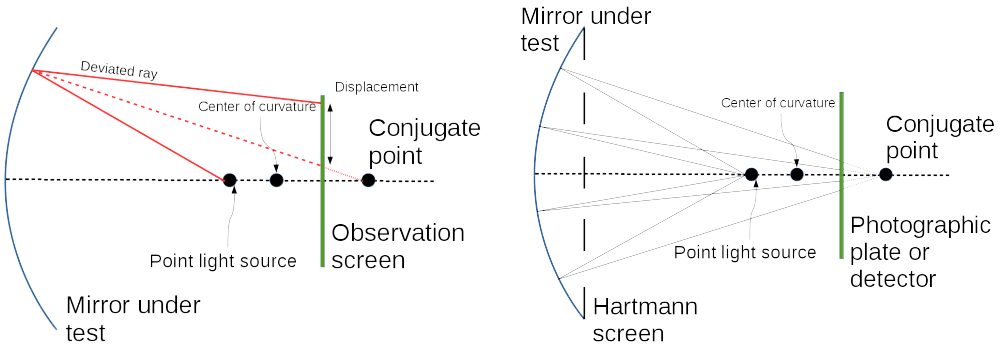

Figure 2.5: Esquema general de la prueba de Hartmann (izquierda). Una prueba Hartmann clásica utilizando una pantalla (derecha).

En la década de los 80tas, y debido a la alta precisión que los dispositivos láser podían alcanzar, varios sistemas basados en esta ventaja fueron desarrolados. Hansche [6] y Kohene [22] propusieron paralelamente, un sistema de caracterización con rayos láser para concentradores cilindro-parabólicos, el cual funcionaba mediante el uso de un láser con libertad de movimiento en un eje perpendicular al del foco del concentrador. Para ajustar la posición del láser se utiliza un brazo mecánico que lo posiciona según el tubo receptor. De esta manera y mediante cálculos geométricos a partir de las leyes de reflexión se pueden obtener lineas representativas de la desviación del rayo reflejado en el eje de medición. Finalmente los datos son tratados mediante un ajuste por mínimos cuadrados a una superficie teórica para obtener la desviación y la distancia focal del concentrador. El sistema reportaba una incertidumbre de 20 mrad según sus registros.

Unos años después, un sistema de medición llamado VSHOT fue desarrollado por Jones et al. [69] y Lewandowski et al. [3]. El sistema VSHOT es una evolución del sistema SHOT (Scanning Hartmann Optical Testing) para la caracterización de sistemas de foco puntual [66], el cual en lugar de utilizar una máscara para mapear puntos discretos en el concentrador, se automatizó mediante un sistema de barrido láser capaz de apuntar con precisión a diferentes puntos en el espejo. Las reflexiones del láser se registraban por medio de una placa fotográfica. El VSHOT cambia respecto al lo anterior al remplazar la placa fotográfica por una cámara de video, como sensor para registrar los impactos del láser. La cámara se ubica observando los a pantalla donde impacta el rayo al ser reflejado. Conociendo las coordenadas del punto de impacto del rayo reflejado en la pantalla y con la distancia previamente medida del concentrador y el emisor de luz, la diferencia entre la superficie teórica y la superficie medida puede calcularse. El sistema VSHOT es capaz de determinar la media cuadrática (RMS) para el error óptico de pendiente con respecto al contorno parabólico ideal, también llamado

error de pendiente o **SD**, acrónimo de *slope deviation error* en inglés. Además, provee información adicional con respecto a su forma y orientación de paneles individuales con respecto al ideal. El error máximo esperado para este sistema de medicion está reportado en menos de 0.2 mrad, haciendo del VSHOT una herramienta suficientemente precisa para caracterizar sistemas de ópticos de concentración solar, debido a que las pendientes ideales caen en el rango de 0.5 a 3.0 mrad. Desarrollos posteriores de esta metodología fueron llevados a cabo por Wendeling et al. [67] donde aplicaron esta herramienta a lazos completos de captadores cilindro-parabólicos. Su meta fue caracterizar un lazo completo de la instalación Solargenix Test Loop en Boulder City, Nevada, EUA. No se reportaron los tiempos de operación.

Su et al. [37] incorporó una prueba de Hartmann inversa como parte de su sistema de Software de pruebas óptico configurable (SCOTS por su acrónimo del inglés). Inicialmente propuesto por Roger Angel, del Observatorio Steward de la Universidad de Arizona, esta prueba utiliza una pantalla LCD situada en frente del espejo como una fuente de luz. Píxeles en la pantalla se encienden y se apagan de forma secuencial en el fondo oscuro, y su reflejo en el espejo es capturado por una cámara en imágenes consecutivas. Si la superficie del espejo es perfecta, sólo un área del espejo debe iluminarse para cada pixel de la pantalla, de acuerdo con la ley de la reflexión especular. Sin embargo, debido a las desviaciones de la pendiente local en diferentes partes del espejo, varias zonas del espejo aparecen iluminadas para cada imagen, debido a que la luz difusa emitida por la pantalla es capaz de llegar a la cámara a través de diferentes caminos. Los autores describen esto como una prueba de Hartmann inversa, porque los rayos podrían ser imaginados como si viajaran hacia atrás desde la matriz de pixeles de la cámara CCD, saliendo de la lente en diferentes direcciones para impactar diferentes puntos en el espejo, y que inciden sobre diferentes píxeles de la pantalla LCD (ver Fig. 2.6).

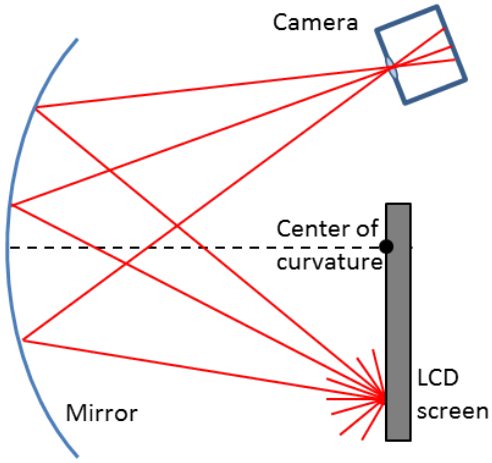

Figure 2.6: Prueba de Hartmann reversible.

El grupo de la Universidad de Arizona también ha desarrollado una prueba Hartmann relacionada con espejos cilindro-parabólicos, la hacen llamar LSLHT (Line Scanning Laser Hartmann Test) [38]. En esta prueba, se utiliza un haz de luz en paralelo, en contraste con

la prueba clásica Hartmann, donde se utiliza una onda esférica divergente. Por lo tanto, en este caso, la luz incide sobre cada parte del espejo viajando en paralelo al eje óptico. Esto se logra mediante el uso de una barra móvil con una arreglo de láseres montados lado a lado (ver Fig. 2.7). Estos láseres están alineados cuidadosamente para asegurar el paralelismo de la luz emitida. Esto permite escanear una línea del espejo a la vez. La barra se desplaza perpendicularmente a su longitud sobre dos rieles paralelos, con el fin de explorar secuencialmente diferentes líneas del espejo, y una cámara se coloca en la zona focal, que se mueve junto con los láseres.

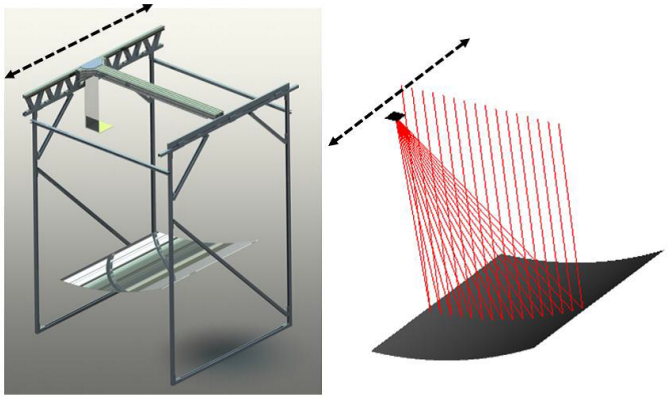

Figure 2.7: Arreglo de láseres paralelos utilizados para la prueba LSLHT.

Una metodología de evaluación óptica basada en el mismo principio láser fue desarrollada por Sansoni et al. [74]. Este método utiliza dispositivos de profilometría más modernos y su enfoque propuesto utiliza un láser de multiples impactos, el cual puede mapear la superficie entera de un colector en posiciones relevantes. El software puede analizar estos puntos y analizar las desviaciones del diseño del colector. Los autores señalan que su arreglo es rápido y poco costoso.

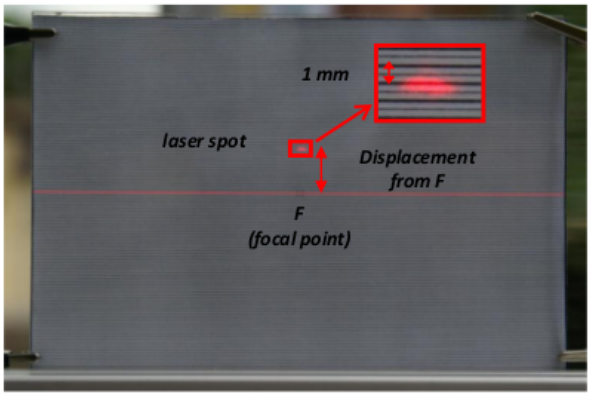

Figure 2.8: Imagen de prueba con un análisis de profilometría.

Conceptualmente en la misma familia que las pruebas de tipo Hartmann, un novedoso método para la caracterización de helióstatos en una sistema de torre central fue propuesto. Este método, propuesto por Arqueros et al. fue diseñado para evaluar la precisión óptica de un campo de helióstatos de manera nocturna [1].

El método llamado SCCAN (Solar Concentrator Characterization At Night), consiste en fotografiar desde la distancia focal un objeto de la bóveda celeste (estrellas o planetas) a través del reflejo que forma en uno o más espejos, con lo cual se realiza un mapeo a fin de caracterizar las normales en los puntos reflejados y compararlos con los valores teóricos. El sistema funciona con una cámara fija en un punto del foco del concentrador y utilizando el sistema de seguimiento propio del helióstato, se va moviendo el espejo de manera que refleja la estrella elegida en distintas zonas del mismo (Ver Figura 2.9).

Este método fue creado para la evaluación de concentradores solares con una distancia focal muy grande, y fue puesto a prueba en las instalaciones de la Plataforma Solar de Almería CESA-I en España. Aunque este método fue creado pensando en evaluar concentradores con grandes distancias focales, la resolución del mismo no es muy grande. Particularmente, la técnica depende de la precisión de los ángulos reportados por el sistema de seguimiento del helióstato, cuyos errores pueden llegar a ser similares o superiores a las desviaciones angulares (errores de pendiente) de las superficies que se quieren medir. Aunado a esto, la necesidad de condiciones claras de cielo nocturno en los cuales las estrellas sean visibles y el tiempo de evaluación requerido para la prueba hacen de este desarrollo una técnica poco robusta. Hasta la fecha, no se han reportado nuevos avances en la técnica.

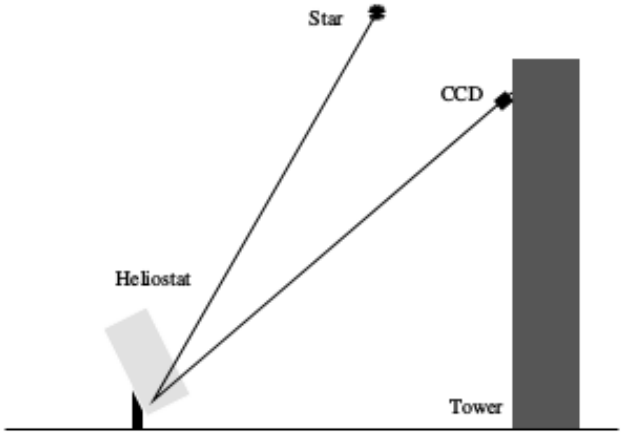

Figure 2.9: Arreglo para la caracterización de helióstatos por el método SCCAN

2.1.3 Métodos intrusivos: La Fotogrametría

La fotogrametría es una técnica de medición que ha sido utilizada en diversos campos de la ciencia desde que la fotografía moderna existe. Consiste principalmente en determinar las propiedades geométricas de un objeto mediante imágenes adquiridas del mismo. Si se requiere

conocer la distancia entre dos puntos de la imagen, solo es necesario conocer el factor que escala a la imagen de su versión real y dividirlo entre este. Para aplicaciones solares, se utiliza principalmente en sistemas de concentración de tamaño moderado como canal parabólicos y de disco parabólico, puesto que es necesario llenar la superficie reflejante a analizar con una serie de marcas o patrones a los cuales se les toma una imagen.

Pottler et al. [50], utiliza este principio al llenar la superficie de un canal parabólico con numerosas marcas y después adquirir imágenes del mismo. Las marcas se utilizan como puntos de referencia sobre la superficie (ver Figura 2.10), al conocer la distribución original de estas antes de instalarse y al observar en la imagen el cambio en su separación, le permite evaluar la deformación que sufre la superficie debido a la influencia mecánica. Shortis et al [27], [28] utilizan esta técnica para evaluar la superficie de un panel de un canal parabólico al pegar una hoja adhesiva con cerca de 3000 puntos (marcas circulares) y realizar la evaluación a través de un software comercial (AICON 3D Studio) que genera la información de las coordenadas para cada punto individual. Esta información es muy útil para calcular las mediciones en la deformación.

De acuerdo con los lineamientos general reportados [72],[35], los *targets* deben tener un contraste alto, ser de un color sólido y de un diámetro aproximado de 5 a 10 pixeles en la imagen. Además:

- Se requiere una alta resolución de la cámara digital, ya que es necesario que los pequeños puntos impresos en las hojas se puedan apreciar claramente.
- La cámara debe ser posicionada en diversas orientaciones con respecto a la superficie que está siendo analizada para poder realizar la triangulación de los puntos.
- Para la calibración y procesamiento de la información, es común utilizar software comercial, desarrollado expresamente para el análisis fotogramétrico, tales como: Photomodeler, Autodesk, Image Modeler o PhotoSketch.

Aunque es una técnica muy robusta, y el equipo necesario para su implementación no es muy costoso, el tiempo que se requiere para la adquisición de la información dependerá del área del concentrador a evaluar. Aunque pocos autores reportan los tiempos de operación, Pottler et al [50] reporta que apoyándose en el uso de grúas y equipo especial, el tiempo necesario es de un día completo para la totalidad de un módulo.

2.1.4 El método del observador distante

El método del observador distante o *Distant Observer Method*, fue desarrollado expresamente para la evaluación de colectores cilindro-parabólicos. Propuesto inicialmente por Stynes et al. [24], se basa principalmente en la reflexión que produce el tubo absorbedor sobre las facetas del colector, de tal manera que, si un observador se posiciona a una determinada distancia en dirección a los rayos incidentes, el observador verá reflejado el tubo. En otras palabras, si el observador está alineado con el eje óptico del concentrador, verá la imagen reflejada del tubo absorbedor a lo largo de los espejos del concentrador, y conforme se aleje del colector,

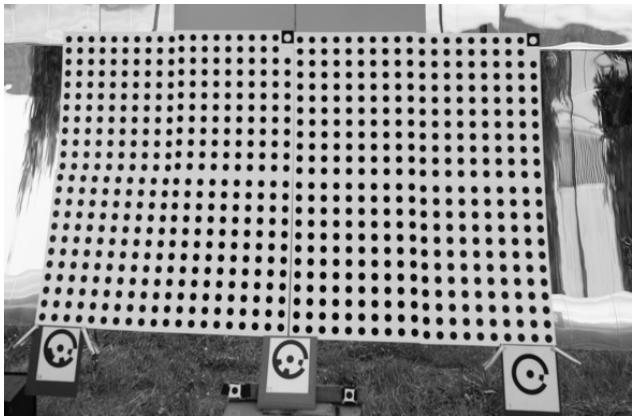

Figure 2.10: Imagen de captador parabólico con una serie de puntos para el análisis de fotogrametría.

la imagen irá creciendo hasta que cubra la totalidad de la apertura. De esta manera, se puede revisar cualitativamente las zonas donde el espejo muestra una imagen diferente a la del tubo, por lo tanto, aquellas que no reflejan los rayos.

Si el observador es reemplazado por una cámara digital, una serie de imágenes pueden ser adquiridas del concentrador. Un procesado computacional posterior puede realizarse para obtener cuantitativamente el factor de interceptación del espejo, lo cual se traduce en conocer el porcentaje de rayos que llegan al receptor, reflejados por el espejo. La principal desventaja de este método radica en que el observador debe posicionarse a más de cien veces la distancia focal nominal del concentrador (ver Figura 2.11).

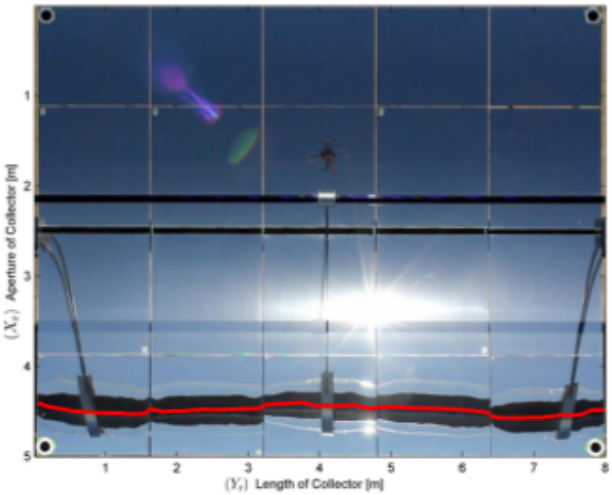

Figure 2.11: Imagen del tubo receptor reflejándose en las facetas de un captador cilindro-parabólico.

El llamado *Theoretical Overlay Photographic* o (TOP), fue desarrollado por Moss et al.

[64] con el propósito de alinear correctamente las facetas un colector parabólico. Esta técnica, similar y basada en el método del Observador Distante, consiste en utilizar un arreglo de 5 cámaras digitales, alineadas verticalmente sobre la apertura del concentrador, de tal manera que las cámaras vean reflejada la linea focal del absoberdor sobre una fila de espejos. Sabiendo la distancia vertical de la cámara en relación al colector, es posible calcular la imagen ideal que debería de reflejarse por el absorbedor en los espejos y compararla con la imagen real, obtenida por las cámaras. Finalmente, y con un software desarrollado especialmente por Sandia National Laboratories, los datos son procesados y los ajustes mecánicos necesarios para correr las facetas son obtenidos. El tiempo de ajuste para cada módulo se reporta de casi 1.5 horas, con una precisión de 1 mrad.

El sistema TARMES *Trough Absorber Reflection Measurement System* propuesto por Ulmer et al. [41], es capaz de caracterizar la superficie de un captador cilindro-parabólico, al hacer uso de un sistema como los descritos anteriormente. La diferencia radica en que el sistema TARMES fija una cámara a un brazo y hace variar la inclinación del colector. Las imágenes resultantes son procesadas mediante el software Optimas, obteniendo una serie de contornos de los cuales es posible reconstruir la superficie bajo análisis. Los autores reportan una precisión de 0.6 mrad.

Un sistema novedoso, basado en el principio del observador distante, se diseño para la cualificación de campos de colectores cilindro-parabólicos con un dispositivo aéreo o microdrón de nombre QFly [51]. Utiliza una cámara montada sobre un quadricóptero el cual es comandado para volar a lo largo de un campo de colectores. La cámara, al igual que el método del observador distante, captura la reflexión del tubo receptor con las facetas del colector y calcula la desviación con respecto a la posición ideal. Este método afirma que el tiempo de evaluación se reduce considerablemente. Algunos inconvenientes son sus restricciones del equipo, debido a que el quadricóptero está ligado a condiciones ambientales y a la velocidad del viento. También, calcular con suficiente precisión la posición relativa del microdrón es una tarea compleja.

2.1.5 Reflexión de patrones estructurados

Un desarrollo novedoso para caracterizar colectores cilindro-parabólicos utilizando un principio llamado *null flat screen*, o de pantalla plana, fue realizado por Moreno Oliva et al. [55]. La metodología utiliza una pantalla plana a modo de *target*, cubierta con marcas elipsoidales diseñadas de acuerdo con la superficie a evaluar. La reflexión de estas marcas con la superficie reflejante es vista a través de una cámara CCD. Diferencias con los puntos elipsoidales son indicativos de errores o defectos en la superficie (ver Figura 2.12).

Una metodología mejorada de las pantallas plantas fue reportada unos años después, por Beltran and Díaz [62]. La nueva metodología utiliza una serie de puntos elipsoidales codificados por colores, lo cual de acuerdo con sus autores, proporciona una mejor correspondencia y hace más fácil llevar a cabo la prueba.

Existe otra técnica con un enfoque distinto, que utiliza una impresión de lineas de colores (patrón estructurado de colores o *Coloured coded Deflectometry*) en una placa que se coloca a manera de blanco o *target* en la zona cercana al foco de un concentrador. El observador

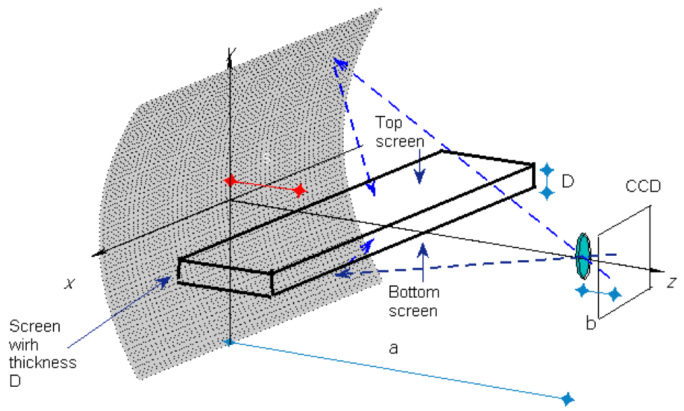

Figure 2.12: Diagrama experimental de la técnica de pantallas nulas.

verá en la superficie del concentrador, un patrón de colores deformado debido a los errores en la superficie reflectante. Los patrones utilizados se componen tanto con líneas horizontales como verticales, para así descomponer la información de la pendiente de la superficie en ambas direcciones. El tratamiento de imágenes posterior, se realiza con un software desde donde se obtienen, los gradientes de colores, osea las deformaciones de la superficie [60]. Otro método similar es el usado por Scott et al. [26], llamado *Coloured pattern Deflectometry*, el cual utiliza de igual manera una superficie impresa con franjas de colores, pero con un equipo y estructuras más simplificadas para realizar el procesamiento. Sin embargo, este método actualmente se encuentra muy poco desarrollado. Ambos métodos tienen severas complicaciones al necesitar grandes distancias para su manipulación debido a que necesitan posicionar la pantalla muy cerca del foco y la cámara a una distancia muy alejada del foco.

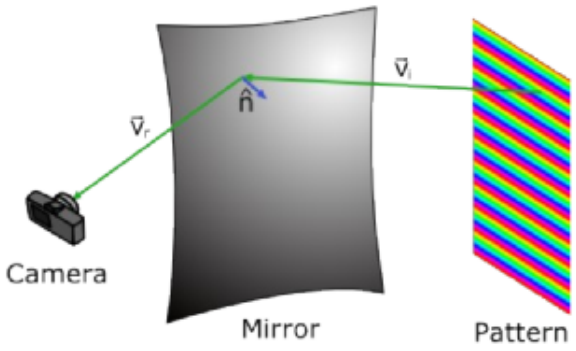

Figure 2.13: Arreglo para la prueba de reflexión de franjas codificadas por colores.

2.1.6 Reflexión de luz estructurada

La primera introducción a la técnica de reflexión de franjas para la evaluación de concentradores solares fue propuesta por Fontani et al. [57] en el año 2005. Estos autores desar-

rollaban una metodología llamada *Reflection Grating Moiré Method* o reflexión de rejillas de Moiré, método proveniente de la interferometría, en la cual proyectaban sobre una pantalla un patrón luminoso estructurado cuya reflexión con una superficie de muestra es comparada con una imagen de referencia. De esta manera, era posible obtener las pendientes locales para la superficie bajo análisis.

Recientemente y retomando las investigaciones anteriormente realizadas, un par de grupos empezaron a implementar y desarrollar un nuevo acercamiento a esta técnica de medición, previamente utilizado para la reconstrucción y cualificación de superficies especulares (diseño CAD, superficies 3D, industria automotriz) [59],[25]. Este método utiliza un patrón luminoso regular y con perfil sinusoidal proyectado sobre una pantalla, del cual su reflexión en un espejo es observada por una cámara. Las deformaciones en el patrón original de franjas pueden ser utilizadas para evaluar los errores en las pendientes locales del espejo (ver Figura 2.14).

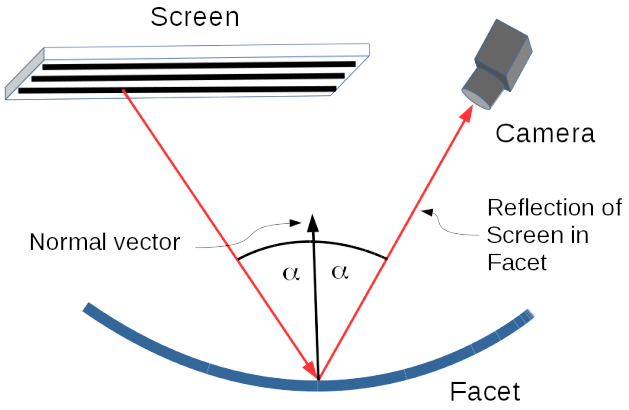

Figure 2.14: Principio de medición de la técnica de reflexión de franjas.

Uno de los primeros trabajos que aplicaron esta técnica a la industria termo-solar, fue el trabajo de Hemisath et al. [79]. Este desarrollo utilizaba esta técnica para evaluar colectores lineales de tipo Fresnel, al proyectar sobre una pared un patrón sinusoidal y observar la reflexión que produce sobre el colector plano con una cámara digital. Además, propuso un arreglo móvil que podía ser trasladado a colectores ya instalados a nivel industrial, al utilizar un monitor LCD de gran tamaño en lugar de la pantalla de proyección. Una vez calculados las pendientes en la superficie, el sistema es capaz de compararlos contra un plano con pendiente ideal (aquella que en el caso sin errores debería apreciarse) para obtener así la desviación de la faceta plana.

De nombre SOFAST (*Sandia Optical Fringe Analysis Slope Tool*), Andraka et al. [15], [16] desarrollaron un software propio para caracterizar discos parabólicos, en el cual utilizan un monitor LCD para generar las franjas sinusoidales y observar la reflexión sobre el concentrador con una cámara digital. Su metodología se ha reportado exclusivamente para concentradores de foco puntual.

Ulmer et al. [11] extendieron esta metodología para helióstatos, al utilizar un proyector convencional para proyectar franjas sobre un blanco Lambertiano montado sobre la torre del

receptor central. De manera similar, una cámara realiza la adquisición de imágenes de la reflexión del patrón con el helióstato.

Cabe destacar que todas estas técnicas resuelven de manera similar la ecuación de intensidad para obtener las desviaciones de pendiente, en la cual es necesario proyectar al menos cuatro patrones escalados en fase por $\pi/2$ entre cada uno de ellos y recurren al principio de desplazamiento de fase por jerarquías para resolver la ambigüedad en la ecuación resultante de la fase, lo cual aumenta el número de patrones proyectados a más de dieciséis para cada eje de evaluación.

Una modificación a la metodología de análisis fue propuesta por Su et al. [37]. En ella, utiliza una detección de centroides provenientes de la teoría de pruebas de Hartmann. El autor pretende que con esta modificación, la técnica sea menos sensible a las variaciones luminosas y reducir así las posibles inconsistencias.

En la Figura 2.15 se observa una faceta plana bajo el análisis de franjas. En ella se puede apreciar ligeras deformaciones en el frente de onda de las franjas reflejadas debido a pequeñas irregulares en la superficie plana.

Figure 2.15: Faceta de colector solar plano bajo el análisis de reflexión de franjas.

2.1.7 Precisión, resolución y alcance de los métodos

Analizar la precisión de una medida y el alcance de una técnica no es una tarea fácil; el desarrollador tiene que hacer frente a numerosas variables, tener en cuenta una variedad de instrumentos de medición y diversas condiciones de prueba, con el fin de obtener un valor efectivo. Diversos autores han analizado la exactitud de sus metodologías de caracterización resolviendo la resolución de error de pendiente. No todas las técnicas reportadas en este trabajo explican ampliamente la metodología con la que obtienen su incertidumbre, de hecho, algunos de ellos no muestran procedimiento alguno. En esta sección se desea recopilar la mayor información posible sobre este tema y dar una medida comparativa de los alcances de los métodos.

Hansche [6] hizo uno de los primeros aportes al establecer una medida para su metodología de arreglo láser. A pesar de que sus sistema de medición tenía que ser calibrado constantemente y los resultados variaban de acuerdo a estos, pudo establecer una media de alrededor

de 0,63 mrad para su técnica. Lewandowski et al. [3] también llevó a cabo el análisis de la incertidumbre de su herramienta de caracterización láser VSHOT. El error máximo esperado de este sistema de medición se reporta como menos de 0,2 mrad, haciendo de la herramienta VSHOT una herramienta suficientemente precisa para la caracterización óptica de concentradores solares, puesto que los errores de pendiente típicos están en el rango de 0,5 a 3,0 mrad. Si bien esta técnica logró ser suficientemente precisa gracias al esfuerzo de diversos autores, su resolución la convirtió en una metodología poco apropiada para grandes superficies (como es el caso de los colectores solares). Más aún, los arreglos láser suelen ser muy delicados e influenciables por condiciones externas, lo que llevó a esta metodología a no poder ser implementada con facilidad en pruebas de campo.

En lo que respecta a la técnica de Fotogrametría, es necesario recordar que esta proporciona coordenadas en lugar de información pendiente; la pendiente debe determinarse a partir de las diferencias de coordenadas entre pares adyacentes de puntos. El análisis de propagación de error dio como límite superior para la precisión en el rango de 0.5-1.0 mrad, tanto para la desviación de la pendiente local y promedio superficial de RMS [18]. Los autores concluyeron que la técnica de Fotogrametría tiene la precisión requerida para la evaluación de paneles reflectores, basado en los valores típicos de las desviaciones de pendiente RMS entre 1.5 y 3.0 mrad. A pesar de que es una técnica que tiene la ventaja de utilizarse en los distintos sistemas de concentración existentes, su mayor inconveniente radica en su baja resolución espacial (pues la distancia entre sus puntos es del orden de 2 a 5 cm), la dificultad de adherir las hojas de vinilo en un ambiente desafiante (ya que se requiere limpieza excesiva, el material pierde adherencia, las burbujas de aire suelen afectar los resultados, etc.) lo que lleva a que el tiempo requerido para llevar a cabo el análisis sea considerablemente alto, del orden de un día para un modulo completo [50].

Un desarrollo novedoso es el caso de la técnica del observador distante en su versión TARMES [23] y QFly [51], los autores reportan que los resultados de la incertidumbre del método es una medida máxima de 0.1 mrad, en donde las principales medidas que influyen en sus resultados fue su disposición geométrica. Esta metodología es capaz de analizar con mucha precisión la desviación de los rayos incidentes sobre el receptor, y el uso del cuadricóptero es muy prometedora. Sin embargo, esta técnica solo puede utilizarse para caracterizar sistemas de canal parabólico y no resuelve por completo la problemática. Además, en el caso de la técnica de observador distante en tierra, es necesario tener grandes distancias focales, lo que complica la prueba por la cercanía que generalmente existe entre los lazos. En su versión aérea, las ráfagas de viento, que suelen ser constantes a la altura del cuadricóptero, provocan que la adquisición de fotografías de buena calidad para realizar el procesamiento sea una tarea difícil. Además, las consideraciones de seguridad debido a que un percance pueda ocurrir por un objeto sobrevolando el área de captadores no es un tema menor. Por lo tanto, la resolución que los autores afirman tener para la técnica es el límite en condiciones ideales, las cuales se estiman muy poco realizables. Es decir, si se requiere esperar períodos de calma para la evaluación, esto limita mucho su utilidad práctica.

La técnica de reflexión de franjas (**FR**) es una técnica que ha captado gran atención en el mundo de la caracterización óptica debido a su flexibilidad, su alta resolución y al

bajo costo de sus componentes. Burke et al. [63] discuten la aplicación de la técnica de reflexión de franjas como una herramienta de alta precisión para espejos parabólicos en diferentes aplicaciones, incluidos los concentradores solares y telescopios. Argumentan que esta técnica ha evolucionado hasta el punto de ser capaz de competir en precisión con técnicas de interferometría, cuando se utilizan arreglos cuidadosamente calibrados y alineados. Ellos señalan y discuten los errores sistemáticos que dificultan la reconstrucción de la forma de la superficie del espejo en las mediciones, en particular, la influencia de la medición precisa de la distancia entre el espejo-cámara y algunas ideas para superar esta y otras dificultades. Para la aplicación de la reflexión de franjas para helióstatos, Ulmer et al. [11] reportó el desarrollo de un modelo matemático que incluye todas las incertidumbres conocidas para estimar la precisión del método, aunque no se dan detalles sobre este modelo. Se reportó una resolución de más de un millón de puntos de medición por helióstato, con un error de medición local de menos de 0.2 mrad. Los detalles del procedimiento se describen en otro artículo de Marz et al. [18], en el cual, para facetas cilindro-parabólicos se encontraron incertidumbres en la desviación de pendientes locales de alrededor de 0.4 y 0.5 mrad, en la dirección de curvatura y no-curvatura, respectivamente. Para los valores de RMS en general las incertidumbres eran menores de 0.2 mrad. El análisis de incertidumbre del método de reflexión de franjas se ha descrito con mucho más detalle por Finch y Andraka [5]. Para llevar a cabo este análisis, utilizaron datos experimentales de una faceta de de plato parabólico, obtenidos con el sistema SOFAST. La sensibilidad del método fue analizada por medio de propagación de errores de Gauss, llevando a cabo varios ejecuciones del programa de procesamientos de datos. En cada ejecución, los parámetros de entrada del arreglo experimental introducidos en el software se variaron sobre su banda de incertidumbre, para determinar la sensibilidad a las variaciones de estos parámetros. Encontraron que eran capaces de determinar una medición de desviación de pendiente local de ± 0.05 mrad, y el RMS dentro de ± 0.005 mrad.

Chapter 3

Conceptos Fundamentales

En años recientes, el uso de técnicas de análisis de franjas para generar modelos y obtener información de una superficie se ha convertido en uno de las áreas de investigación más activas de la metrología óptica. El análisis de franjas es considerada como una técnica efectiva, confiable y robusta para caracterizar superficies por medio de métodos ópticos de no-contacto. Derivada de la evolución de la técnica de Moiré, utiliza solo uno de los dos patrones de rejilla superpuestos necesarios para crear un interferograma, lo que resulta en un procedimiento de análisis mucho mas sencillo y robusto [68], [77]. Debido a lo anterior y a que la técnica utiliza componentes de bajo costo para llevar a cabo el análisis, ha encontrado numerosas aplicaciones en diversos campos de la ingeniería. Aplicaciones biomédicas, imágenes 3D no invasivas, análisis de vibraciones, deformaciones en superficies, mediciones de forma y posición de objetos, etc. Su flexibilidad hace posible el análisis de medición de micro componentes mecánico-eléctricos hasta la caracterización de planitud para grandes superficies.

En particular, se puede hablar de dos tipos de análisis de franjas los cuales son utilizados dependiendo de las características particulares del arreglo. La llamada técnica de proyección de franjas es capaz de obtener información tridimensional de un objeto al hacerle incidir un patrón luminoso con estructura sinusoidal y observar la deformación que ocurre en él debido a la estructura de la muestra. Pero debido a las características intrínsecas de reflexión que una superficie especular presenta, no es posible proyectar el patrón directamente sobre la misma para hacer uso de la técnica anterior, por lo que es necesario utilizar una superficie a modo de pantalla o "target" que permita realizar el análisis mediante la observación del reflejo de las franjas sobre la muestra. De esta manera, se puede identificar más propiamente a este análisis como una técnica de reflexión de franjas. Una consideración relevante de la técnica de reflexión de franjas es que permite obtener las pendientes de una superficie especular con un alto grado de resolución, lo que la convierte en una técnica ideal para la cualificación de concentradores solares. Una comparativa mas exhaustiva entre ambas técnicas fue presentada por Hung et al. [9].

3.1 Conceptos generales de la técnica de reflexión de franjas

Un arreglo típico de reflexión de franjas consiste en un monitor de video o proyector digital, un adquisidor digital de imágenes, la muestra a analizar y una unidad de procesamiento y análisis. El análisis involucra proyectar un patrón luminoso, con una estructura bien definida por valores de intensidad conocidos (usualmente se utiliza un patrón modelado por una ecuación sinusoidal) en una pantalla o blanco Lambertiano; adquirir imágenes del reflejo del patrón proyectado sobre la pantalla en el objeto de muestra, y analizar la distorsión de las franjas observadas en el reflejo y relacionarlas directamente con las desviaciones de pendiente de la superficie con respecto a sus valores ideales (ver Fig. 3.1).

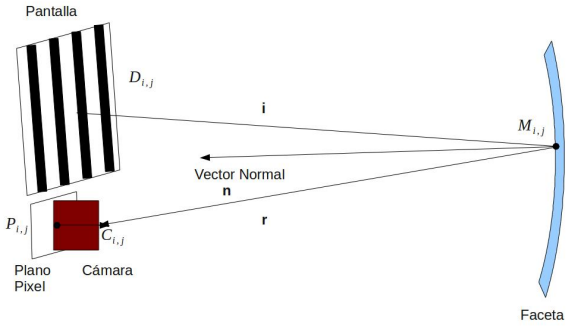

Figure 3.1: Arreglo típico de reflexión de franjas

En la Figura 3.2, es posible observar un patrón de franjas sinusoidales y la adquisición de su reflexión sobre un objeto de prueba. Es notable la presencia de distorsiones aleatorias a lo largo de su superficie debido a deficiencias en la calidad de la muestra y a deformaciones inducidas.

3.2 La teoría detrás del análisis de franjas

En esta sección, llevaremos a cabo la descripción de la matemática que gobierna la metodología de reflexión de franjas, describiendo las ecuaciones que juegan un papel trascendental en el modelado de nuestro sistema y las variables que intervienen para obtener la información de interés. Así mismo, en las secciones posteriores se discutirá a detalle las posibles opciones que se proponen como métodos de solución de las mismas y los factores que incidieron en la toma de decisiones de nuestro método.

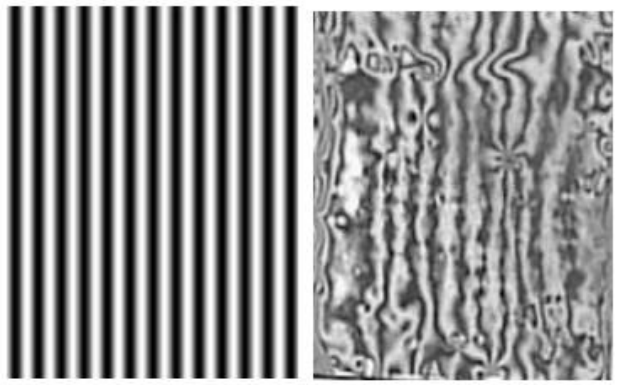

Figure 3.2: Figuras representativas de un patrón de referencia que no presenta distorsión (izquierda) y el de uno distorsionado por una superficie con deformaciones (derecha).

El principio de la reflexión de franjas requiere construir un patrón de líneas o franjas bien definidas, que cumplan ciertas condiciones de tal manera que sean capaces de mapear una superficie. Para ello, es necesario generar dos patrones de franjas de manera numérica por medio de las ecuaciones que gobiernan los frentes de onda para ambos ejes coordenados de evaluación x y y. La intensidad de un patrón en la dirección y puede ser expresada entonces como:

$$I_m(x, y) = A(x, y) + B(x, y)cos[2\pi fy] \tag{3.1}$$

donde $I_m(x, y)$ es la variación de intensidad del patrón; modulado en función del *coseno* de la frecuencia espacial de las franjas f y del eje coordenado de evaluación y, $A(x, y)$ representa la iluminación de fondo y $B(x, y)$ la amplitud de modulación de las franjas (contraste).

Una vez que el patrón es visto a través de la reflexión de la pantalla con la superficie especular bajo análisis, la ecuación que gobierna la variación de intensidad del patrón toma la siguiente forma:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[2\pi fy + \phi(x, y)] \tag{3.2}$$

O en su forma más general:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[\Phi(x, y)] \tag{3.3}$$

Donde el valor de $\Phi(x, y)$ contiene los valores de $2\pi fy$ correspondientes a la linealidad de las franjas moduladas por un valor de $\phi(x, y)$ que está en función de la forma de la superficie en evaluación. De esta manera, ahora se puede hablar de un termino general de fase $\Phi(x, y)$ que se desconoce y que incluye toda la información del patrón original proyectado modulado por de las irregularidades y deformaciones de la superficie misma (como se puede apreciar con mayor claridad en el ejemplo de la Fig. 3.2). Estas variaciones observadas entre la distribución de las franjas proyectadas y reflejadas, se deben a la modificación angular del vector normal resultante calculado a partir de la trayectoria de los rayos de luz que salen

de la pantalla y que impactan en la muestra (de acuerdo con la ley de reflexión). Dicho lo anterior, es posible entonces determinar la importancia de recuperar la información inherente a la forma de la superficie contenida en este término de la ecuación, de tal manera que nos permita reconstruir la geometría de la superficie. Si bien esto sería una operación sencilla de realizar en la ecuación origen de intensidad (Ecuación 3.1), en la forma modulada los términos de iluminación y contraste a y b son ahora también desconocidos, pues se encuentran en función de las condiciones de iluminación ambientales y las características de los dispositivos de proyección y adquisición de imágenes. De esta manera, la solución al problema inicial se torna más compleja, ya que ahora se cuenta con una ecuación que presenta tres incógnitas que necesitan ser resueltas para encontrar la información de interés.

Varios algoritmos para recuperar la fase $\Phi(x, y)$ han sido discutidos por diferentes autores [40],[36], [39] a lo largo del tiempo. En la siguiente sección 3.3, se describen aquellos que por sus características los hacen relevantes para nuestro estudio.

3.3 Algoritmos para la recuperación de la fase

Para obtener la información contenida en el término de fase de la ecuación de la imagen reflejo, es necesario superar el problema de tener un sistema de una ecuación con tres incógnitas. Esto no es posible sin utilizar alguna herramienta matemática que permita la eliminación directa de al menos dos de los términos que obstaculizan la recuperación de $\Phi(x, y)$ y que no modifiquen su valor.

Los algoritmos de recuperación de fase se pueden clasificar en dos categorías principalmente: Técnicas temporales y técnicas espaciales. Las técnicas temporales son aquellas que requieren el uso de al menos tres patrones escalonados entre si; técnica que fue denominada como de escalamiento de fase (proveniente del inglés *phase stepping*). Ésta técnica, propuesta inicialmente en 1974 por Bruning et al. [34], presenta numerosas ventajas por su sencillez computacional y ha sido desarrollada a partir de entonces por numerosos autores [7], [19], [8]. La técnica espacial obtienen el valor de fase de un elemento en un patrón de franjas en dependencia con los elementos vecinos del patrón. Ejemplos de esta categoría son la Detección Directa de Fase y el análisis de franjas de Fourier.

3.3.1 Escalamiento de fase

El escalamiento de fase consiste en una ingeniosa estrategia matemática que requiere contar con al menos tres ecuaciones o patrones de intensidad, de tal manera que se pueda resolver el sistema de ecuaciones con tres incógnitas. Las ecuaciones propuestas pueden tener cualquier variación que escale la fase por un factor constante, mientras este sea conocido 3.4. Por lo que podemos definir entonces una constante η arbitraria en la ecuación y asumir que la primera medición de escalonamiento de fase es η_1, la segunda es η_2, la tercera η_3, y así sucesivamente [49].

$$I_m(x, y) = A(x, y) + B(x, y)cos[2\pi fy + \eta] \tag{3.4}$$

o en su forma reflejada:

$$I(x,y) = A(x,y) + B(x,y)cos[\Phi(x,y) + \eta] \tag{3.5}$$

Algoritmo de tres escalones

Como ya se mencionó anteriormente, para determinar la fase sin ninguna ambigüedad, es necesario un mínimo de tres ecuaciones que nos permitan resolver el sistema con tres incógnitas. Esto se logra proyectando tres patrones de franjas desplazados entre sí por fases constantes y adquiriendo las imágenes correspondientes a su reflejo. Consideremos el caso de la adquisición de los tres patrones reflejados en la dirección y con fases iniciales arbitrarias y diferentes η_1, η_2, η_3. Así, podemos escribir:

$$\begin{aligned} I_1(x,y) &= a(x,y) + b(x,y)\cos(\Phi(x,y) + \eta_1) \\ I_2(x,y) &= a(x,y) + b(x,y)\cos(\Phi(x,y) + \eta_2) \\ I_3(x,y) &= a(x,y) + b(x,y)\cos(\Phi(x,y) + \eta_3) \end{aligned} \tag{3.6}$$

Estas expresiones también pueden ser escritas mediante el desarrollo de *cosenos* como:

$$\begin{aligned} I_1 &= a + b\cos\eta_1 cos\Phi(x,y) - b\sin\eta_1\sin\Phi(x,y) \\ I_2 &= a + b\cos\eta_2 cos\Phi(x,y) - b\sin\eta_2\sin\Phi(x,y) \\ I_3 &= a + b\cos\eta_3 cos\Phi(x,y) - b\sin\eta_3\sin\Phi(x,y) \end{aligned} \tag{3.7}$$

donde la dependencia de x y y es implícita y que será considerada así de ahora en adelante. Resolviendo encontramos que:

$$\frac{I_2 - I_3}{2I_1 - I_2 - I_3} = \frac{(\cos\eta_2 - \cos\eta_3) - (\sin\eta_2 - \sin\eta_3)\tan\Phi(x,y)}{(2\cos\eta_1 - \cos\eta_2 - \cos\eta_3) - (2\sin\eta_1 - \sin\eta_2 - \sin\eta_3)\tan\Phi(x,y)} \tag{3.8}$$

Esta es la expresión general de un algoritmo para un muestreo de tres imágenes o escalones en las coordenadas (x,y). Consideraremos de manera superficial algunos casos particulares.

Un caso particular del método de tres escalones es tomar los valores en grados de $\eta_1 = 60$, $\eta_2 = 180$, $\eta_3 = 300$. De tal manera que se obtiene el siguiente resultado en módulo π para la fase:

$$\tan\Phi(x,y) = -\sqrt{3}\frac{I_1 - I_3}{I_1 - 2I_2 + I_3} \tag{3.9}$$

Otro caso particular del método de tres escalones es el llamado tres escalones en "T invertida", que es cuando se utilizan los valores de $\eta_1 = 0$, $\eta_2 = 90$, $\eta_3 = 180$. En este caso, se obtiene el siguiente resultado para la fase:

$$\tan\Phi(x,y) = \left[\frac{-I_1 + 2I_2 - I_3}{I_1 - I_3}\right] \tag{3.10}$$

Como se puede ver de lo anterior, al aplicar valores particulares de η a la ecuación e identidades trigonométricas, es posible resolver de manera algebraica la ecuación de intensidad $I(x, y)$ y con ello obtener el valor de $\Phi(x, y)$.

Algoritmo de cuatro escalones

Si bien en la subsección anterior (3.3.1) se había definido que para resolver la ecuación de intensidad era necesario contar con un sistema de tres ecuaciones para poder encontrar la variable Φ, esto no limita que matemáticamente sea posible el uso de un número mayor de ecuaciones para resolver la misma variable. La técnica para obtener la fase en este trabajo se basa en el uso de cuatro ecuaciones y es denominada *Four-Phase Shifting* o de cuatro escalones 4PS. Esta se logra proyectando cuatro patrones de franjas bien definidas, desplazando η entre si por cambios de fase constantes y bien conocidos de $\frac{\pi}{2}$, en donde $\eta_1 = 0$, $\eta_2 = \frac{\pi}{2}$, $\eta_3 = \pi$ y $\eta_4 = \frac{3\pi}{2}$ o su equivalente en grados. Entonces, la intensidad de los cuatro patrones puede expresarse entonces de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} I_1 &= a + b\cos(\Phi(x, y) + 0) \\ I_2 &= a + b\cos(\Phi(x, y) + \frac{\pi}{2}) \\ I_3 &= a + b\cos(\Phi(x, y) + \pi) \\ I_4 &= a + b\cos(\Phi(x, y) + \frac{3\pi}{2}) \end{aligned} \tag{3.11}$$

Restando I_3 a I_1 tenemos:

$$I_1 - I_3 = 2b\cos(\Phi(x, y)) \tag{3.12}$$

De la misma manera sustrayendo I_2 a I_4 obtenemos:

$$I_4 - I_2 = 2b\sin(\Phi(x, y)) \tag{3.13}$$

Dividiendo las ecuaciones resultantes y despejando el valor de la tangente da como resultado la información de la fase requerida.

$$tan\Phi(x, y) = \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \tag{3.14}$$

Ahora, solo es necesario aplicar las diferencias matriciales de las imágenes para eliminar los términos indeseados.

A pesar que la ecuación 3.14 aparentemente nos otorga el término de fase Φ si simplemente despejamos el término de la tangente, este no estará del todo representado como un mapa suave, sino que se encontrará en forma de diente de sierra debido al proceso de "empaquetamiento" en módulo π que genera la tangente. En secciones posteriores (3.4), retomaremos éste término y daremos una explicación más detallada de porque se produce y como es posible superarlo.

Algoritmo de cinco escalones

Si bien es posible el uso de tres y cuatro escalones 3.3.1 3.3.1, esto no limita a la matemática a la posibilidad de resolverse con un mayor número de ecuaciones o en su defecto imágenes de patrones escalonados. En este algoritmo, los valores de la irradiancia son medidos en cinco valores diferentes (grados) de la fase $\eta_1 = 36$, $\eta_2 = 108$, $\eta_3 = 180$, $\eta_4 = 252$, $\eta_5 = 324$.

$$\begin{aligned} I_1 &= a + b\cos(2\Phi(x,y) + 36) \\ I_2 &= a + b\cos(2\Phi(x,y) + 108) \\ I_3 &= a + b\cos(2\Phi(x,y) + 180) \\ I_4 &= a + b\cos(2\Phi(x,y) + 252) \\ I_5 &= a + b\cos(2\Phi(x,y) + 324) \end{aligned} \tag{3.15}$$

Luego, la solución es:

$$\tan\Phi(x,y) = \left[\frac{\sum_{i=1}^{6} \sin\frac{2\pi}{5} I_n}{\sum_{i=1}^{6} \cos\frac{2\pi}{5} I_n}\right] \tag{3.16}$$

Como ya se demostró, es posible resolver la ecuación inicial siempre y cuando se cuente con sistema de ecuaciones que sea mayor a tres. Por ello, existe una discusión activa [49], [52] sobre las ventajas y desventajas que acarrea el uso de un mayor número de patrones para resolver la fase. Si bien el autor ha trabajado con todos los presentados aquí, solo ha encontrado diferencias significativas al usar tres patrones en lugar de un mayor número. Ello es posible se deba a que al trabajar con tres patrones la ecuación tiene las mínimas condiciones para resolverse, por lo que cualquier irregularidad o deficiencia en el proceso de generación y adquisición del patrón no puede ser suavizada por patrones restantes. Como es posible preverse, un mayor número de patrones puede ser efectivo si el arreglo experimental tiende a ser muy inestable.

Una particularidad de utilizar los métodos de escalonamiento para recuperar la fase, radica en la inclusión de un término de frecuencia $2\pi fy$ en la variable de fase general Φ. Pues si recordamos que la ecuación particular del caso reflejado 3.2 nos presenta una sumatoria de dos términos $2\pi fy + \phi$, al utilizar el término de fase general Φ para solucionar la ecuación, en realidad estamos incluyendo una función que crece linealmente al término ϕ y que podemos denominar como frecuencia portadora. Este término de frecuencia portadora tiene que ser ser eliminado mediante un ajuste de mínimos cuadrados para recuperar exclusivamente el valor de interés ϕ.

3.3.2 Detección directa de fase (DPD)

La Detección Directa de Fase (Direct Phase Demodulation) es un desarrollo matemático que adopta los métodos de recuperación de fase de la teoría de comunicaciones, donde es usada para demodular señales FM (Frecuencia Modulada) de radio y que en este caso se aplica para

analizar patrones luminosos de franjas [48]. Si bien es un desarrollo que parte de el análisis de espectros de ondas de radio, hemos de recordar que la luz y el sonido son señales que se comportan de manera similar pero que tienen longitudes de onda distintas, por lo que es posible trabajar de manera similar las ecuaciones, utilizando técnicas de procesamiento de imágenes.

A continuación se muestra un diagrama con la metodología a seguir para obtener la fase y el análisis matemático del mismo:

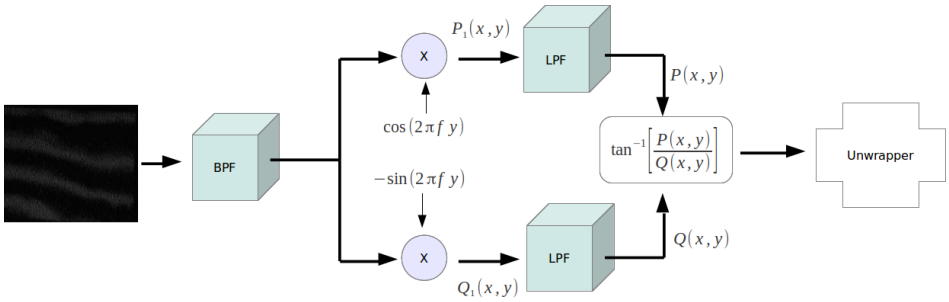

Figure 3.3: Diagrama de flujo representativo para la técnica de DPD.

Como se puede apreciar en la Figura 3.3, el primer paso para resolver la ecuación de intensidad requiere aplicarle un Filtro Pasa Bandas o *Band Pass Filter* (BPF) de tal manera que remueva la iluminación de fondo (que es de baja frecuencia espacial) y el ruido de altas frecuencias.

Si habíamos definido anteriormente el perfil de intensidades de un patrón de franjas reflejado para ambas direcciones de la siguiente manera:

$$I(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos[2\pi fy + \phi(x,y)] \tag{3.17}$$

Entonces, aplicando el filtro BPF deberá remover la componente $a(x,y)$. Y la ecuación quedará de la siguiente manera:

$$I(x,y) = b(x,y)cos(2\pi fy + \phi(x,y)) \tag{3.18}$$

El siguiente paso, podría considerarse como un truco matemático dentro del desarrollo, pues a la imagen ya filtrada se le aplican dos multiplicadores bien definidos por los términos $\cos(2\pi fy)$ y $-\sin(2\pi fy)$.

$$\begin{aligned} I(x,y) &= b(x,y)\cos(2\pi fy + \phi(x,y)) * \cos(2\pi fy) \\ Q(x,y) &= b(x,y)\cos(2\pi fy + \phi(x,y)) * -\sin(2\pi fy) \end{aligned} \tag{3.19}$$

Estos multiplicadores tienen esta forma bien definida y no otra por la posibilidad que dan de desarrollar las ecuaciones aplicando identidades trigonométricas y cancelando varios términos que de otra manera producirían inconsistencias al obtener la fase, de tal forma que quedan de la siguiente manera:

$$
\begin{aligned}
I(x,y) &= \frac{b(x,y)}{2}\left[(\cos(4\pi fy + \phi(x,y)) + \cos(\phi(x,y))\right] \\
Q(x,y) &= \frac{-b(x,y)}{2}\left[(\sin(4\pi fy + \phi(x,y)) - \sin(\phi(x,y))\right]
\end{aligned}
\tag{3.20}
$$

A las ecuaciones resultantes es necesario aplicar un función que atenúe los componentes de alta frecuencia que surgen del proceso de multiplicación. Por lo que es necesario utilizar un Filtro De Baja Frecuencias o *Low Pass Filter* (LPF), con lo que se obtiene:

$$
\begin{aligned}
I(x,y) &= \frac{b(x,y)}{2}\cos(\phi(x,y)) \\
Q(x,y) &= \frac{b(x,y)}{2}\sin(\phi(x,y))
\end{aligned}
\tag{3.21}
$$

Hasta este punto es apreciable que el camino seguido permite efectuar la división de las ecuaciones anteriores para cancelar el término sobrante y desconocido de $b(x,y)$ y entonces obtendremos la distribución de fase cuya información es requerida.

$$
\tan\phi(x,y) = \left[\frac{I(x,y)}{Q(x,y)}\right] \tag{3.22}
$$

A diferencia del método de Cuatro Patrones, el método de Detección Directa de Fase solo requiere la captura de una imagen del patrón reflejado en la superficie. El diseño matemático y el uso de filtros de frecuencias permite remover las variables indeseadas para así recuperar la fase.

3.3.3 Transformada de Fourier para el análisis de franjas (FFA)

La transformada de Fourier para el análisis de franjas (*Fourier Fringe Analysis*) fue propuesta por Takeda en 1982 [73] y se convirtió desde entonces en una técnica muy popular en el campo de mediciones de no-contacto y en la reconstrucción de superficies en tres dimensiones.

Como se ha mencionado anteriormente, para el análisis de franjas es necesario extraer la variable de fase $\phi(x,y)$ del perfil de distribución de intensidad $I(x,y)$.

$$
I(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos[2\pi fy + \phi(x,y)] \tag{3.23}
$$

Para extraer la información de la fase codificada en el patrón de franjas, se propuso el uso de la Transformada de Fourier en una dimensión. Takeda expresó el término del coseno de la ecuación 3.23 como la suma de dos exponentes, tal y como se puede observar en la siguiente ecuación:

$$
I(x,y) = a(x,y) + c(x,y)e^{i2\pi fy} + c'(x,y)e^{-i2\pi fy} \tag{3.24}
$$

donde:

$$\begin{aligned} c(x,y) &= \frac{b(x,y)}{2} e^{\phi(x,y)} \\ c'(x,y) &= \frac{b(x,y)}{2} e^{-i2\pi f y} \end{aligned} \tag{3.25}$$

Planteando la transformada de Fourier en una dimension de la siguiente forma:

$$G(f_x, y) = A(f_x, y) + C(f_x - f_0, y) + C'(f_x + f_0, y) \tag{3.26}$$

Donde $A(f_x, y)$ describe el espectro de la iluminación de fondo, $C'(f_x + f_0, y)$ es el espectro de las franjas deformadas y $C(f_x - f_0, y)$ es la información de fase deseada.

Si transformamos nuevamente el término $C(f_x - f_0, y)$ a su dominio espacial usando una transformada inversa de Fourier en una sola dirección, obtendremos el término $c(x, y)$

Entonces, las partes reales e imaginarias del término $c(x, y)$ son:

$$\begin{aligned} \Im(c(x,y)) &= b(x,y)\sin(\phi(x,y)) \\ \Re(c(x,y)) &= b(x,y)\cos(\phi(x,y)) \end{aligned} \tag{3.27}$$

De esta manera, la información de fase deseada está dada por:

$$\tan\phi(x,y) = \left[\frac{\Im(c(x,y))}{\Re(c(x,y))}\right] \tag{3.28}$$

Como se puede apreciar, la distribución de fase resultante en el método de FFA al igual que en los métodos de escalonamiento y de Detección Directa de Fase, se encuentra siempre "empaquetada" por un término tangente que es necesario despejar de la ecuación (véase Ec. 3.14, 3.22 y 3.28), y que restringe los valores resultantes de fase a un rango de $(-\pi, \pi)$. Es por ello que es necesario el diseño de algoritmos de "desempaquetamiento" que eliminen esta restricción, con el fin de obtener los valores verdaderos de fase de manera satisfactoria. En la siguiente sección 3.4 abordaremos tan relevante tema a detalle.

3.4 Desempaquetamiento de fase

Para entender el significado del empaquetamiento consideremos por ejemplo la Ecuación 3.14 para el método de cuatro escalones. Aparentemente, si tomamos la tangente inversa de esta ecuación, obtendremos la fase. Sin embargo, esto no es tan simple, ya que la tangente inversa no es una función biunívoca. Es decir, todos los valores de la fase, que pueden ser múltiplos arbitrarios de π, se ven forzados por la función tangente inversa a caer en el intervalo de $-\pi/2$ a $\pi/2$. Esto crea discontinuidades en la fase que deben ser resueltas. Esto se ilustra claramente en la figura 2.11, en donde se muestran los valores de fase empacada de un patrón de franjas reflejadas aproximadamente sinusoidales (cada linea corresponde al cambio de la

fase a lo largo de una línea de pixeles de la imagen del patrón). Cada linea de fase es aproximadamente una línea recta $2\pi fy$, pero debido al empaquetamiento son representados para este rango restringido formando un diente de sierra. Cuando el patrón ha sido deformado por la reflexión en una superficie irregular ya no es perfectamente sinusoidal.

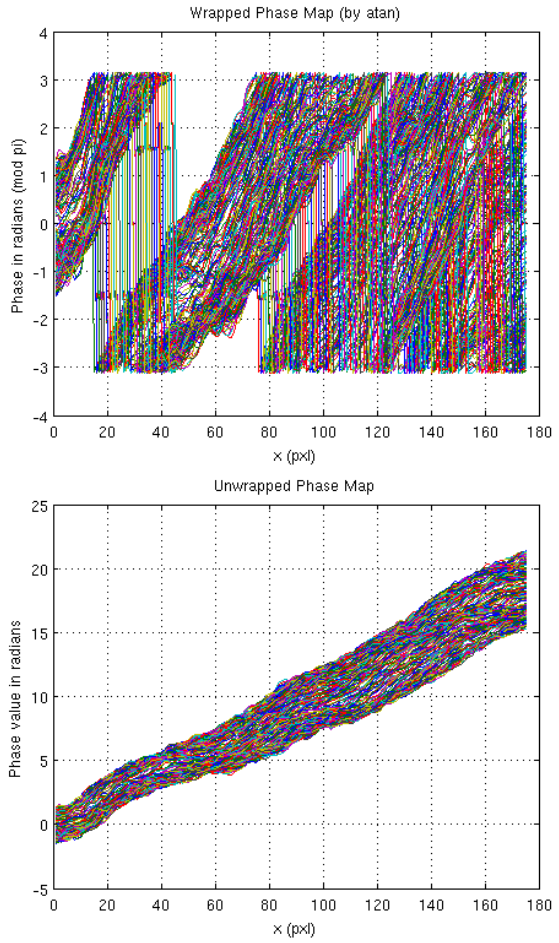

Figure 3.4: Valores de fase (a) empaquetada y (b) desempaquetada para un patrón de franjas de un objeto real con distorsión.

Idealmente, la función que calcula el arctan debe tener como parámetros de entrada no el valor final del cociente ($\sin\Phi/\cos\Phi$), sino los valores del numerador ($\sin\Phi$) y del denominador ($\cos\Phi$) para evitar perder información útil. Este par de valores nos permiten calcular el ángulo en el circulo entero de 0 a 2π o de $-\pi$ a π. Una vez calculado el ángulo en las condiciones propuestas en la tabla 3.1, debe llevarse a cabo correcciones a los valores finales generados por la función arctan para obtener los ángulos en el círculo entero. Para este propósito, el signo del sin y del cos debe ser usado, dependiendo el rango que sea requerido ($-\pi$ a π o de 0 a 2π).

Si bien se ha definido las correcciones necesarias a la función tangente, es meritorio destacar que no se puede hacer uso de la función tan tal como está definida por sus ar-

Tabla 3.1: Fase y rango de valores de acuerdo al signo del numerador ($\sin\Phi$)y denominador ($\cos\Phi$) en la expresión de la $\tan\Phi$

$\sin\Phi$	$\cos\Phi$	Fase Ajustada ($-\pi$ a π)	Fase Ajustada (0 a 2π)
$\sin\Phi > 0$	$\cos\Phi > 0$	Φ	Φ
$\sin\Phi > 0$	$\cos\Phi < 0$	$\Phi + \pi$	$\Phi + \pi$
$\sin\Phi < 0$	$\cos\Phi < 0$	$\Phi - \pi$	$\Phi + \pi$
$\sin\Phi < 0$	$\cos\Phi > 0$	Φ	$\Phi + 2\pi$
$\sin\Phi > 0$	$\cos\Phi = 0$	$\pi/2$	$\pi/2$
$\sin\Phi = 0$	$\cos\Phi < 0$	π	π
$\sin\Phi < 0$	$\cos\Phi = 0$	$3\pi/2$	$3\pi/2$
$\sin\Phi = 0$	$\cos\Phi > 0$	0	0

gumentos, pues la realidad es que se desconocen los valores individuales del numerador y denominador. Actualmente y gracias a los desarrollos en los métodos numéricos es posible utilizar una función arctan2 que provee la tangente inversa de cuatro cuadrantes y que modifica la limitante de $-\pi/2$ a $\pi/2$ y otorga valores del circulo entero [84].

El problema de desenvolvimiento de fase se torna relativamente sencillo para mapas de fase empaquetada en donde se tiene una calidad suficiente de muestreo de franjas y mientras estas satisfagan las siguientes condiciones [46]:

1. La señal está libre de ruido.

2. La condición de Nyquist no se viola, lo que significa que el valor absoluto de la diferencias de fase entre cualquiera de dos muestras de fase consecutivas (pixeles) es menor a π.

La condición de Nyquist puede ser expresada matemáticamente como:

$$\frac{\partial\Phi(x,y)}{\partial y} < \frac{\lambda}{2\Delta y} \tag{3.29}$$

donde Δy es la distancia entre dos pixeles consecutivos y λ la longitud de onda de las franjas. En otras palabras, la pendiente del frente de onda tiene un valor máximo el cual no puede ser excedido.

Otra manera de escribir la condición de Nyquist suele ser:

$$\mid \Delta\Phi(x,y) \mid < \pi \tag{3.30}$$

donde $\Delta\Phi(x,y)$ es el paso de fase correcto entre dos pixeles consecutivos.

La condición de Nyquist es muy importante, pues si el muestreo es muy pobre (pixeles demasiado grandes o mucho ruido en la muestra), puede haber brincos de tamaño π o mayor entre pixeles contiguos debido a efectos físicos. El problema es que estos brincos se confunden con los brincos artificiales introducidos en la fase empacada por la función tangente inversa

(cuando cambia bruscamente de $-\pi$ a π), creando una función de diente de sierra. En dicho caso no hay manera de recuperar la información física.

El problema aquí es que una vez que la fase ha sido calculada es muy complicado determinar si la condición de Nyquist ha sido violada o no. Esta incertidumbre es debido a que no podemos identificar cual de los dos posibles brincos de fase es el correcto. Idealmente es mejor asegurarse que se tiene una separación entre franjas en las direcciones X y Y mayores que medio pixel de separación. Asumiendo que la condición de Nyquist se cumpla para todos los puntos y que no exista ruido considerable, el desempaquetamiento de un patrón es sencillo. Para un patrón bidimensional (que es el caso en general), se trata de partir de un pixel y luego seguir una ruta predefinida para ir saltando entre pixeles vecinos. Cada vez que se encuentra una discontinuidad mayor a π en los datos de la fase, se agrega o sustrae 2π según sea el caso [80], [21]. Se puede demostrar que esto es equivalente a ir integrando las diferencias de fase empaquetadas a lo largo de una coordenada específica [30],[42].

Como ya se explicó más arriba, el desempaquetado de la fase se vuelve más complicado cuando las diferencias de la fase absoluta entre pixeles adyacentes en puntos distintos a las discontinuidades de la función arco-tangente son mayores que π. Estas discontinuidades pueden tener su origen en:

1. Ruido de alta frecuencia o alta amplitud.

2. Discontinuidades de fase.

3. Baja frecuencia espacial de muestreo del patrón de franjas.

En particular, las discontinuidades pueden ser físicas; debidas a una discontinuidad en el objeto (orillas, fracturas, agujeros, etc.), o pueden ser producto de errores o ruido en las imágenes. Dichas inconsistencias generan errores en la fase (saltos de fase inesperados), los cuales se propagan a lo largo de la dirección de desempaquetado. Como consecuencia, el proceso de desempaquetado se vuelve dependiente del camino; esto conlleva a obtener diferentes valores de la fase desempaquetada dependiendo del camino elegido del desempaquetado, es decir del algoritmo que se use.

Ghiglia et al. [30] describen en detalle el desempaquetado de la fase, llevando a cabo inicialmente la identificación y aislamiento de esas discontinuidades erróneas antes de iniciar el proceso. Las inconsistencias en la fase pueden ser detectadas cuando la suma de las diferencias de fase empaquetada a lo largo de cualquier camino cerrado alrededor de un punto no es cero. En este caso se dice que existe un residuo y que el punto en cuestión es inconsistente. En esta sección, analizaremos algunas técnicas de desenvolvimiento de fase que van desde los casos unidimensionales, hasta el caso de mapa de fases inconsistentes.

3.4.1 Desempaquetado unidimensional por medio del método de Itoh

En 1982 Itoh analizó el problema unidimensional de desempaquetado de fase y mostró que desenvolvimiento de fase puede ser obtenido al integrar (sumar) las diferencias de fase em-

paquetadas [?]. El resultado será igual a la fase verdadera "true phase" que aportan las diferencias de fase si son menores a π radianes en magnitud para cualquier punto. En otras palabras, si la fase verdadera no presenta insuficiencia en el muestreo (ósea que cumple la condición de Nyquist), el desenvolvimiento es correcto.

$$W\{\Phi_w(n)\} = \Phi(n) = \Phi_w(n) + 2\pi k(n) \tag{3.31}$$

donde $n = 0, 1, 2, ..N - 1$ y $k(n)$ es un arreglo de enteros conocido como "número de campo", es la fase empaquetada Φ_w y $\Phi(n)$ es la fase desempaquetada.

3.4.2 Desempaquetado de mapas consistentes de fase

La técnica de desenvolvimiento de fase mostrada en esta sección es uno de los métodos más simples para desempaquetar un buen y casi consistente (poco ruido) mapa de fases [49]. Consiste en integrar las diferencias de fase a lo largo de un camino; Asumimos que el mapa de fases completo esta dado por un arreglo bidimensional L de N $\times$ N pixeles. Podemos desempaquetar este mapa de fases al desenvolver el primer renglón ($y = 0$) y después tomar ese último valor como nuestra condición inicial para desenvolver a lo largo del siguiente renglón del mapa de fases en la dirección positiva. Podemos realizar esto utilizando la siguiente ecuación:

$$\Phi(x_{i+1}, y_0) = \Phi(x_i, y_0) + V[\Phi_w(x_{i+1}, y_0) - \Phi(x_i, y_0)]; 1 \leq i \leq N \tag{3.32}$$

donde la función de empaquetado es $V(x) = [x - 2\pi \mid (x/\pi) \mid]^2$ y que permite sumar o sustraer los valores de discontinuidad válido en el intervalo $(-\pi, \pi)$. Ésta función también puede expresarse como $V(x) = tan^{-1}(sin(x)/cos(x))$ en el mismo rango.

En la ecuación 3.32 se puede utilizar como condición inicial que $\Phi(x_0, y_0) = \Phi_0$. Es decir, que se puede utilizar un valor arbitrario como fase inicial, pues esto no afecta la información de la forma del objeto contenida por la fase.

Habiendo desenvuelto a lo largo del primer renglón, podemos usar nuestro último valor de fase desempaquetado como nuestra condición inicial para desenvolver el reglón siguiente ($j = 1$) en la dirección opuesta; esto es:

$$\Phi(x_{i-1}, y_1) = \Phi(x_i, y_1) + V[\Phi_w(x_{i-1}, y_1) - \Phi(x_i, y_1)]; 1 \leq i \leq N \tag{3.33}$$

Para desenvolver en la dirección opuesta (Ecuación), debemos usar como nuestra condición inicial:

$$\Phi(x_{N-1}, y_1) = \Phi(x_{N-1}, y_0) + V[\Phi_w(x_{N-1}, y_1) - \Phi(x_{N-1}, y_0)] \tag{3.34}$$

El proceso de desempaquetado ahora procede al siguiente renglón ($j = 2$) en la dirección positiva como:

$$\Phi(x_{i+1}, y_2) = \Phi(x_i, y_2) + V[\Phi_w(x_{i+1}, y_2) - \Phi(x_i, y_2)]; 1 \leq i \leq N \tag{3.35}$$

y como condición inicial:

$$\Phi(x_0, y_2) = \Phi(x_0, y_1) + V[\Phi_w(x_0, y_2) - \Phi(x_0, y_1)] \tag{3.36}$$

El proceso de escaneo se sigue tal y como se describió hasta que se haya completado el mapa de fases y este haya sido desenvuelto. Es necesario hacer notar que este algoritmo requiere que las trayectorias de cada línea sean perpendiculares a la dirección de las franjas, porque de lo contrario al brincar entre dos líneas podríamos encontrarnos con un salto real de fase y no podríamos usar la condición final de una línea como condición inicial para la siguiente.

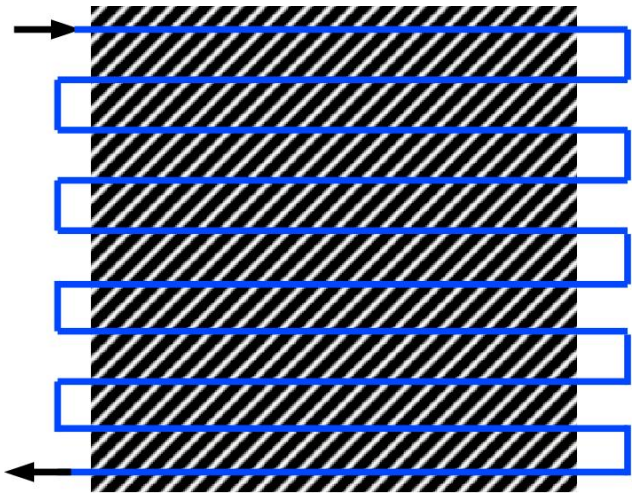

Figure 3.5: Camino seleccionado para el desempaquetamiento por el método L.

3.4.3 Desempaquetado de mapas no-consistentes de fase y basados en la clasificación de la confiabilidad

El algoritmo de desempaquetado de fase basado en la clasificación de la confiabilidad cae en la categoría de los métodos guiados por calidad propuesto por Herraez et al. [47]. La idea principal del algoritmo es el uso de un mapa de calidad, el cual consiste en un arreglo de valores que define la calidad o "el que tan bueno" es cada valor de fase de cada pixel. Para esto, hay dos temas principales a considerar: la elección de la función de confiabilidad y el diseño del camino de desempaquetado.

- **La elección de la función de confiabilidad:** Para este análisis en particular, la función de confiabilidad se basa en las segundas diferencias entre un pixel y sus vecinos. Esto permite una mejor detección de las posibles inconsistencias en el mapa de fases que el criterio de gradientes usado comúnmente.

$$D(x,y) = [H^2(x,y) + V^2(x,y) + D_1^2(x,y) + D_2^2(x,y)]^{1/2} \tag{3.37}$$

donde:

$$\begin{aligned} H(x,y) &= \eta[\Phi_w(x-1,y) - \Phi_w(x,y)] - \eta[\Phi_w(x,y) - \Phi w(x+1,y)] \\ V(x,y) &= \eta[\Phi_w(x,y-1) - \Phi_w(x,y)] - \eta[\Phi_w(x,y) - \Phi w(x,y+1)] \\ D_1(x,y) &= \eta[\Phi_w(x-1,y-1) - \Phi_w(x,y)] - \eta[\Phi_w(x,y) - \Phi w(x+1,y+1)] \\ D_2(x,y) &= \eta[\Phi_w(x-1,y+1) - \Phi_w(x,y)] - \eta[\Phi_w(x,y) - \Phi w(x+1,y-1)] \end{aligned} \tag{3.38}$$

donde η es un simple operador de desempacado que remueve cualquier brinco de π entre dos pixeles consecutivos.

Entonces, la función de confiabilidad puede proponerse como:

$$R = \frac{1}{D} \tag{3.39}$$

Es decir, que mientras menores sean las diferencias de fase con desempaquetado simple entre un pixel y sus vecinos, más confiable es el valor de fase.

- **El diseño del camino de desempaquetado:** El camino de desempaquetado no puede ser definido relativo a la confiabilidad de los pixeles. En su lugar, debe ser definido por la confiabilidad de los bordes de los pixeles mismos. El borde de un pixel es la intersección de dos pixeles que están conectados horizontal o verticalmente. La confiabilidad de un borde se define como la sumatoria de las confiabilidades de los dos pixeles que el borde conecta. Los bordes son almacenados en un arreglo y ordenados por su valor de confiabilidad. Aquellos bordes con alta confiabilidad son desempaquetados primero.

Una vez obtenido el mapa de fase, es posible entonces aplicar la metodología de análisis para relacionar a éste con el problema de la superficie real. El problema quedará expuesto en el siguiente capítulo.

Chapter 4
Metodología

Una vez desarrollada y comprendida la matemática que gobierna el proceso de extracción de la fase, es necesario ahora considerar los diversos factores que intervienen en el proceso la obtención del mapa de pendientes de las superficies bajo análisis. En una primera aproximación, hemos de identificar aquellos componentes del sistema que intervengan de manera significativa en el cálculo de la pendiente. Debido a la sencillez de la técnica, el arreglo experimental de la misma se compone de muy pocos elementos, lo que hace que cada uno de ellos tenga una relevancia significativa en los cálculos.

Como ya hemos establecido en secciones previas, el equipo que compone al sistema se basa en un proyector digital y una pantalla donde se hacen incidir una serie de patrones generados por un sistema de cómputo conectado al proyector. Estos patrones se definen numéricamente de manera sinusoidal y tienen la forma matricial de la ecuación de intensidad definida en el capítulo 3 para ambos ejes coordenados. Una cámara digital, que hace la función de el observador, adquiere un conjunto de imágenes que son transferidas a un sistema de cómputo y almacenadas para su análisis posterior.

Al estar estos sistemas descritos anteriormente, a expensas de las condiciones de manufactura del fabricante y expuestos a condiciones ambientales cambiantes, es necesario realizar una calibración previa del instrumento que permita conocer las variables internas de funcionamiento, para que se tomen a consideración a la hora de procesar la información.

A continuación se enlistan las consideraciones previas a realizar para poder tener una imagen utilizable por la técnica de reflexión de franjas:

- Calibración de la cámara
- Calibración del proyector
- Adquisición de imágenes
- Procesamiento digital de imágenes

Si bien cada uno de estos elementos conlleva el uso de ciertos conocimientos y habilidades, estos se detallarán en la sección anexa de este documento para evitar desviar al lector de la continuidad literaria.

4.1 Modelo geométrico

El modelo geométrico del análisis de franja parte primordialmente de la superficie que está siendo analizada. Un espejo plano tenderá a reflejar las franjas sin distorsión, de la misma manera en que fueron proyectadas en la pantalla. Por lo tanto, un espejo curvo generará un reflejo de franjas distorsionadas en proporción al grado de curvatura del espejo.

El uso de técnicas de recuperación de fase y desempaquetamiento de fase posterior nos permite entonces obtener una representación de la superficie bajo análisis. Esta superficie se puede comparar con su forma ideal por medio de la ecuación general de las cónicas en coordenadas cartesianas como:

$$Z = C_1x^2 + 2C_2xy + C_3y^2 + 2C_4x + 2C_5y + C_6 \tag{4.1}$$

en la que, en función de los valores de los parámetros se tendrá para que para $C_2^2 > C_1C_3$ representa una hipérbola, $C_2^2 = C_1C_3$ una parábola y $C_2^2 < C_1C_3$ una elipse.

Esta ecuación permite distintas distancias focales en la dirección X y Y (representados aquí por los términos C_1 y C_3) para cubrir así las distintas geometrías de concentradores solares. Si algún término de la ecuación no corresponde con el modelo geométrico de la faceta, es simplemente descartado sin afectar los términos restantes. Un ajuste de mínimos cuadrados nos relaciona la superficie generada por el modelo geométrico ideal con el modelo generado de la extracción de la fase. Una vez sustraída la fase portadora sobre los puntos de la superficie a analizar, se obtiene una representación de las desviaciones de fase de cada punto de la faceta, lo que se puede relacionar con el ángulo de desviación de pendiente mediante el planteamiento del arreglo geométrico experimental.

Para lograr lo anterior, habremos de considerar un arreglo geométrico general a fin de detallar los componentes que tienen lugar en la experimentación y como estos afectan en el cálculo del mapa de pendientes final.

4.1.1 Arreglo experimental

Un arreglo geométrico general del experimento pordría partir de un análisis de la Figura 4.1. Un proyector se sitúa a una distancia suficiente de la pantalla para que el patrón de franjas abarque por completo una superficie blanca lambertiana montada paralela a la faceta. Una cámara digital localizada en la parte superior de la pantalla toma imágenes de la faceta, los cuales son orientados de tal manera que el blanco lambertiano con el patrón de franjas pueda ser visto en la reflexión.

Un análisis más cuidadoso de la configuración geométrica de la figura nos provee dos modelos matemáticos para convertir la fase calculada en ángulos locales de los puntos de la superficie $\phi_{x,y}$ (i.e., la deformación local angular) para los ejes x y y respectivamente. Este modelo combina un amplio número de parámetros del sistema, tales como el cambio de fase debido a la pendiente de la superficie, la distancia entre la faceta y la pantalla lambertiana, la altura y los ángulos de la cámara y la faceta, etc.

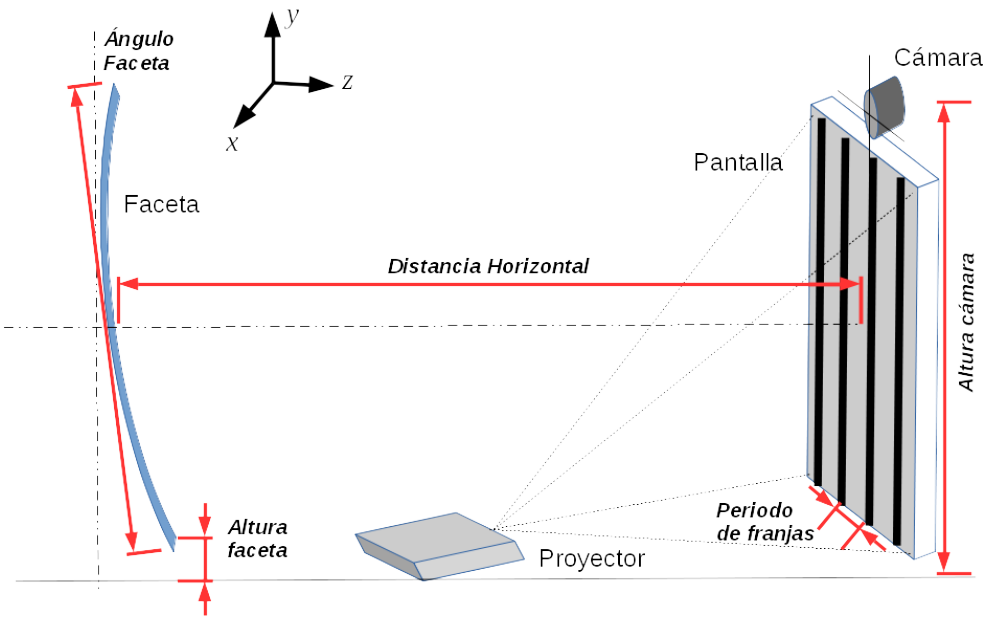

Figure 4.1: Arreglo de geométrico del experimento.

A partir de este concepto general, es posible reconstruir la trayectoria que sigue un rayo que parte de la pantalla, se refleja en la faceta y va a dar a la apertura óptica de la cámara, como se muestra en la Figura 4.2.

Partiendo del triángulo que se forma entre el rayo ideal Z_B y el ángulo α de la cámara en la figura 4.2 tenemos que la suma de sus lados es de $\pi/2$:

$$(\beta - \theta) + \alpha = \pi/2 \tag{4.2}$$

Despejando:

$$\theta = \beta + \alpha - \pi/2 \tag{4.3}$$

Si utilizamos el mismo razonamiento para el ángulo ω, tenemos que el triángulo que se forma equivale a:

$$\beta + \theta + (-2\phi_y) + \omega = \pi/2 \tag{4.4}$$

Sustituyendo la ecuación 4.3 en 4.4 y despejando para ω, tenemos que :

$$\omega = \pi - 2\beta - \alpha + 2\phi_y \tag{4.5}$$

De la misma forma que los ángulos anteriores 4.3 y 4.5, es posible determinar el valor de ϵ por el triángulo que se forma de los rayos y la sustitución de los ángulos previamente calculados:

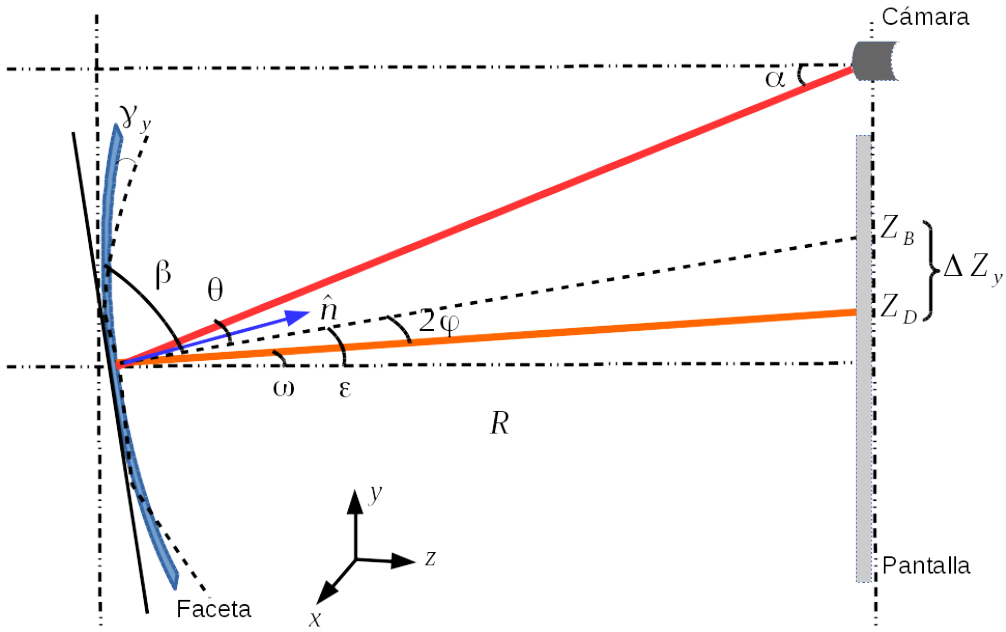

Figure 4.2: Arreglo geométrico para la dirección Y.

$$\epsilon = \pi - 2\beta - \alpha \tag{4.6}$$

Una vez obtenidos los ángulos, es posible obtener la posición del punto ideal reflejado Z_B y el punto real reflejado Z_D:

$$\begin{aligned} Z_B &= R \tan \epsilon \\ Z_D &= R \tan \omega \end{aligned} \tag{4.7}$$

Los términos de la Ecuación 4.7 nos reflejan la diferencia que se forma de un rayo reflejado por una superficie con una curvatura ideal Z_B y un rayo reflejado por una superficie con irregularidades Z_D. Esta información es obtenida mediante del el análisis de franjas.

$$\begin{aligned} \Delta Z_y &= Z_B - Z_D \\ \Delta Z_y &= R \tan \epsilon - R \tan \omega \end{aligned} \tag{4.8}$$

Las diferencia de fase ΔZ_y puede ser escritas en términos del mapa de fase calculado ϕ_y. Además, proporciona parámetros adicionales del sistema como el periodo de las franjas T_{xy}, o escrito en términos de la frecuencia f_{xy}, en la dirección y de la siguiente manera:

$$\Delta Z_y = \phi_y \frac{T_y}{2\pi} = \frac{\Phi_y}{2\pi f_y} \tag{4.9}$$

Esto quiere decir que un desplazamiento de un ángulo 2ϕ se puede expresar como una fracción del periodo de las franjas T_y por un factor de 2π, lo cual se traduce en un desplazamiento de una fracción de franja en la pantalla.

Para conocer la variación de la pendiente o *slope deviation* es necesario conocer el ángulo, en este caso representado por el término ϕ_y, formado por ΔZ_y:

$$\Delta Z_y = R\left[\tan(\pi - 2\beta - \alpha) - \tan(\pi - 2\beta - \alpha + 2\phi_y)\right] \tag{4.10}$$

Despejando la ecuación anterior, es posible calcular el ángulo de la pendiente:

$$\phi_y = \beta + \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{2}\tan^{-1}\left[\frac{\Delta Z_y}{R} - \tan(2\beta + \alpha)\right] \tag{4.11}$$

donde α y β son ángulos que pueden obtenerse de la triangulación geomérica del arreglo experimental, H y h son constantes simples de altura del arreglo. Ahora que se conoce el ángulo de la pendiente, es posible calcularla sabiendo que la variación de pendiente corresponde a una derivada parcial del término bajo análisis de la siguiente forma:

$$\frac{\partial h}{\partial y} = tan\phi_y \tag{4.12}$$

En el caso de el modelo matemático para la dirección x de la Figura 4.1, es apreciable que para obtener el ángulo de desviación ϕ_x, no solo dependerá de los desplazamientos de franja ΔZ_x que ocurran debido a la desviación de los rayos reflejados por la forma de la superficie, si no que también dependerán del desplazamiento de franja que ocurra en ΔZ_y. Esto se puede visualizar si trazamos un rayo que vaya hacia el punto Z_B, pero que la superficie presente una irregularidad que lo haga desviarse hacia un punto Z_Q de tal manera que exista un ΔZ_x, como se ilustra en la Fig. 4.3.

Es posible entonces determinar la variación de la pendiente en dirección x, si partimos entonces que el ángulo ϕ_x se puede expresar como:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \tan 2\phi_x = \frac{\Delta Z_x}{\overline{OD}} \tag{4.13}$$

De tal manera que $\overline{OD}$ se puede calcular como:

$$\overline{OD} = \sqrt{(\Delta Z_P + \Delta Z_y)^2 + R^2} \tag{4.14}$$

Donde:

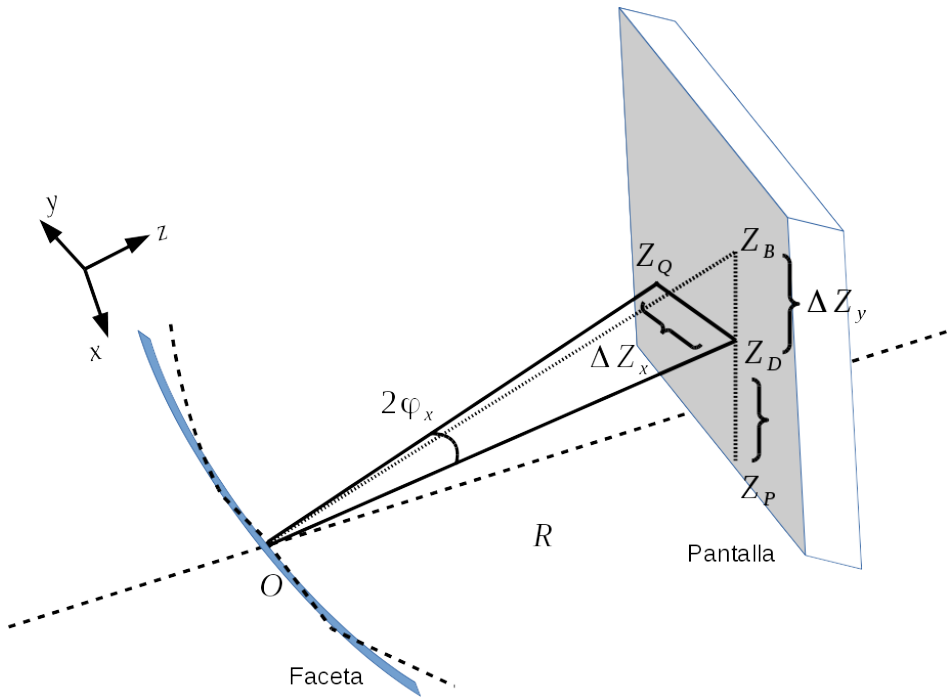

Figure 4.3: Arreglo geométrico para la dirección X.

$$\begin{aligned} \Delta Z_P &= R\tan(\pi - 2\beta - \alpha) \\ \Delta Z_y &= R[-\tan(2\beta + \alpha) + \tan(2\beta + \alpha - 2\phi_y)] \end{aligned} \tag{4.15}$$

Entonces es posible calcular la desviación de pendiente en la dirección x de la Ecuación 4.13 como:

$$\phi_x = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left[\frac{\Delta Z_x}{R\sqrt{\tan(\pi - 2\beta - \alpha)^2 + 1 + \left(\frac{\Delta Z_y}{R}\right)^2}}\right] \tag{4.16}$$

Donde ΔZ_x puede obtener como a partir del análisis de franjas como:

$$\Delta Z_x = \phi_x \frac{T_x}{2\pi} = \frac{\phi_x}{2\pi f_x} \tag{4.17}$$

Un ángulo positivo de $\phi_{x,y}$ nos define una rotación de la desviación de pendiente con respecto a la pendiente ideal hacia los bordes exteriores del colector, por consiguiente, un ángulo negativo nos define una rotación hacia el centro de la faceta.

Si bien la geometría del problema puede cambiar con cada arreglo en particular, parte de las mismas bases y puede ser analizado de manera similar para cada caso.

4.1.2 Estadística de caracterización

Una vez determinado el mapa de desviaciones locales de pendiente para ambos ejes (Ecs. 4.11 y 4.16), es posible entonces obtener los parámetros de caracterización que permiten establecer la calidad de la faceta y el grado de precisión con que concentraría la radiación solar.

Uno de los parámetros más usado para caracterizar la calidad óptica de una faceta es el error óptico de pendiente, el cual es igual al promedio RMS de las desviaciones de pendiente. El factor RMS de la desviación de pendiente local podría ser expresado entonces de la siguiente manera:

$$RMS_{\phi_{x,y}} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} \mid \phi_{x,y} \mid^2} \tag{4.18}$$

La media cuadrática de la desviación de pendiente es de extrema importancia para la cualificación de facetas concentradores, pues nos define el grado de calidad global de la faceta. Altos valores de RMS tienden a representar facetas defectuosas o con alto grado de dispersión con respecto al valor ideal, por consiguiente, bajos valores de RMS suelen representar facetas con una forma y especularidad muy cercanos a los diseños teóricos.

Un parámetro alternativo importante es la desviación de la distancia focal. Esta se puede calcular una vez obtenido el mapa de desviaciones de pendiente utilizando la ecuación del capítulo uno para la desviación focal.

$$RMS_{FD_{x,y}} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} \mid FD_{x,y} \mid^2} \tag{4.19}$$

Este término cobra notoria importancia pues nos permite identificar cuantitativamente las zonas de máxima desviación presentes en la faceta con respecto a la distancia focal del concentrador.

Si bien los términos estadísticos de desviación de pendiente y desviación focal son suficientes para obtener una representación real de la calidad óptica del concentrador, pues se basan en medidas directas a la óptica de la superficie, es meritorio un cálculo adicional para complementar el comportamiento de la faceta bajo condiciones de operación: el factor local de intercepción, es decir, la fracción de rayos incidentes que realmente llegarían al receptor, para cada región de la faceta.

Una vez que los vectores normales de la superficie se calculan a partir de los mapas de desviación de pendiente, esta información se utiliza para llevar a cabo una simulación del comportamiento óptico de la faceta con el software de trazo de rayos basado en método Montecarlo *Tonatiuh*. Este software es un trazador de rayos de código abierto, desarrollado por CENER que tiene la ventaja de ser flexible y fácil de implementar. Como no hay ningún software de trazado de rayos actualmente disponible que permita el uso de puntos de desviación de pendiente como entradas para el modelado de una superficie, un desarrollo específico para incluir esta característica se ha llevado a cabo para este propósito para ser utilizado en Tonatiuh. Esta plug-in desarrollado específicamente carga la matriz de datos

de pendiente y reconstruye la geometría de la superficie de la faceta con elementos finitos. Para cada uno de estos elementos de superficie creados, asigna la normal correspondiente y posiciona la faceta en la ubicación correspondiente en el diseño. El receptor se coloca en su posición teórica, como un segundo componente del escenario simulado, de acuerdo con el diseño de un colector. Las dimensiones elegidas para el receptor son de acuerdo al modelo específico utilizado en el sistema bajo evaluación. Como resultado de la simulación se determina que porcentaje de los rayos que inciden en cada pixel de la faceta llegarán a pegar en el receptor elegido; es decir, se determina el factor de intercepción para cada pixel, con lo cual se obtiene un mapa de factores de intercepción para la faceta.

Si bien no es el alcance de este trabajo el diseño y funcionamiento de un trazador de rayos, se deja el código de operación en la sección anexa para darle completitud al trabajo.

4.2 Sensibilidad del método

Una vez determinado el mapa de pendientes y la estadística de la técnica, es necesario realizar un exhaustivo análisis de la sensibilidad del método. Esto es necesario, puesto que muy a pesar de diseñar una técnica rápida y económica, es necesario diseñar una con un alto grado de robustez y de baja incertidumbre.

En la sección que a continuación se describe se detalla diversas pruebas que se le realizan a la metodología de caracterización, con la finalidad de detectar posibles fuentes de incertidumbre y altas sensibilidades en los componentes del equipo utilizado para el análisis.

4.2.1 Homogeneidad de la cámara

El uso de una *esfera de luz*, ofrece la posibilidad de obtener el comportamiento lumínico del sensor CCD de la cámara. Su funcionamiento es bastante simple y se basa en una esfera con una entrada y una salida de luz. En el interior, la esfera está recubierta con una pintura *lambertiana* que garantiza la reflexión total de la luz.

Figure 4.4: Esfera de luz utilizada para mapear el sensor de la CCD de la cámara.

Se realizaron diversas tomas de la apertura de la esfera en regiones características de la

CCD, con la finalidad de obtener el mayor número de muestras del sensor y obtener así un promedio de su comportamiento ante la luz.

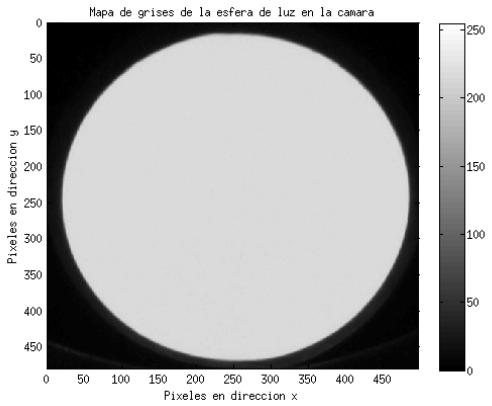

Figure 4.5: Análisis de linealidad sobre la intensidad en el sensor CCD de la cámara.

Como puede apreciarse en la Figura 4.5, es posible observar la correcta composición de grises a lo largo y ancho de la CCD. Los valores se pueden apreciar en la Tabla 4.1. Esto significa que para un arreglo casi perfecto de reflexión, los valores de intensidad se mantienen casi constantes y con una baja desviación estandar.

Tabla 4.1: Valores de intensidad en el mapa de grises del análisis de sensibilidad de la cámara

Valor Media	Desviación Estándar	Valor máximo	Valor mínimo
217.06	0.89	224	213

4.2.2 Sensibilidad del sistema a la iluminación

Para realizar las pruebas de sensibilidad a la iluminación, es necesario variar considerablemente las condiciones ambientales de iluminación al realizar la prueba. Si bien es posible realizar otro tipo de análisis para observar la injerencia de la variación luminosa en la prueba, ésta metodología nos ahorra múltiples pasos y nos genera una variación sobre el resultado final. Este acercamiento nos da la ventaja de observar en el mapa final las diferencias entre un resultado y otro. A pesar de que adelantaremos algunos resultados en esta sección, evitaremos el análisis de ellos para centrarnos en las diferencias numéricas de resultados generados con el mismo arreglo y procesamiento.

Se realizó una sesión experimental utilizando un cuarto oscuro controlado para realizar la prueba de franjas y otra prueba utilizando luminarias de techo encendidas, de tal manera que los valores de iluminación de fondo y contraste en las franjas se vieran alterados. Como se puede apreciar en ambos juegos de imágenes de la Fig. 4.6 y 4.7, las diferencias de iluminación entre las tomas iniciales realizadas a la faceta bajo análisis son bastante aparentes. No obstante, los resultados posteriores no reflejan de manera evidente una variación significativa

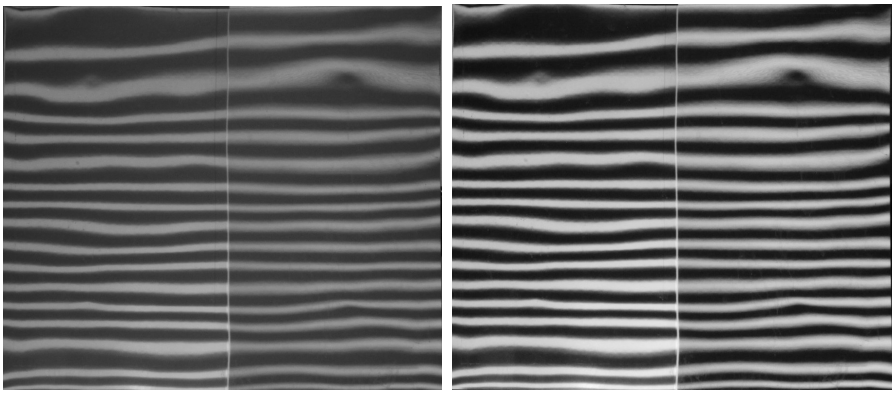

Figure 4.6: Análisis de sensibilidad sobre la iluminación en el sistema. Con iluminación de fondo (izquierda). Sin iluminación de fondo (derecha).

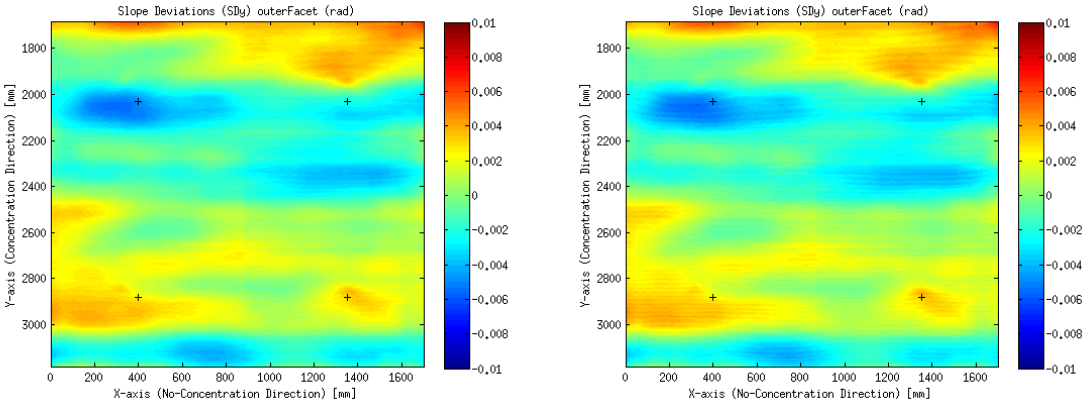

Figure 4.7: Análisis de sensibilidad sobre la iluminación en el sistema. Con iluminación de fondo (izquierda). Sin iluminación fondo (derecha).

en los cálculos. Es por ello, que es necesario obtener valores estadísticos que nos permitan comparar de una manera más cuantitativa las diferencias entre ambos.

En la Tabla 4.2, es posible apreciar la estadística calculada de ambas pruebas. En ella se observa claramente que existe una diferencia muy poco significativa del orden de 10^{-06} mrad entre la media de ambos resultados. Lo que se puede confirmar con el análisis de su media cuadrática, que tiene una diferencia de 10^{-04} mrad.

4.2.3 Sensibilidad del sistema al contraste

En esta sección se realizan pruebas con el sistema de enfoque del proyector. Este sistema permite enfocar y desenfocar las franjas proyectadas sobre la pantalla, con lo que se generan lineas con un fuerte contraste (funciones sinusoidales con valles y crestas más pronunciadas), y un contraste suave, lo que provoca un mayor valor de la amplitud de la onda sinusoidal.

En ambos juegos de imágenes 4.9 y 4.10, se puede apreciar las diferencias de contraste

Tabla 4.2: Estadistica del análisis de sensibilidad sobre la iluminación en el sistema.

	Slope Deviation Mean	Slope Deviation RMS
Con iluminación artificial (mrad)	-2.43×10^{-5}	0.0022
Sin iluminación artificial (mrad)	-2.53×10^{-5}	0.0022
Diferencia (mrad)	-2.24×10^{-6}	2.66×10^{-4}

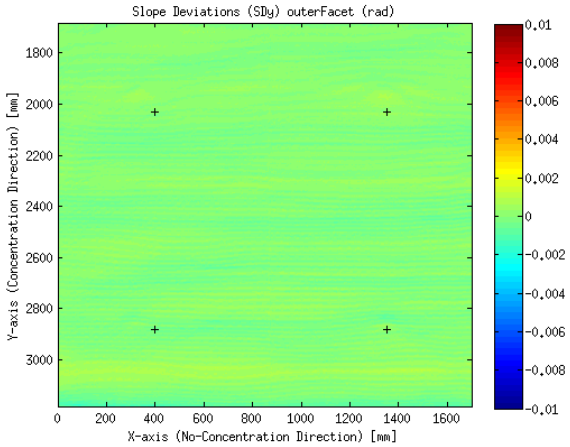

Figure 4.8: Sustracción de ambos mapas de desviación para el análisis de sensibilidad a la iluminación.

entre las tomas iniciales realizadas a la faceta bajo análisis. No obstante, los resultados posteriores reflejan una nula variación en los cálculos. Es necesario obtener los valores estadísticos para poder comparar de una manera más cuantitativa las diferencias entre ambos.

Tabla 4.3: Estadistica del análisis de sensibilidad sobre el contraste en el sistema.

	Slope Deviation Mean	Slope Deviation RMS
Con enfoque (mrad)	-2.42×10^{-5}	0.0022
Sin enfoque (mrad)	-2.32×10^{-5}	0.0022
Diferencia (mrad)	-9.84×10^{-7}	2.97×10^{-4}

En la Tabla 4.3, es posible apreciar la estadística calculada de ambas pruebas. En ella se observa claramente que existe una nula diferencia, del orden de 10^{-07} mrad, entre la media de ambos resultados. Lo que también se puede confirmar con el análisis de su media cuadrática, que tiene una diferencia de 10^{-04} mrad. Esto es una revelación importante, pues esto nos comprueba de primera mano que la metodología es prácticamente invariante a la amplitud de la onda sinusoidal; es decir, no es muy sensible al contraste de las franjas.

4.2.4 Sensibilidad del sistema a la frecuencia

En esta sección, se detallan las pruebas realizadas al sistema con un cambio significativo en la frecuencia (número de franjas por unidad de longitud) de las franjas proyectadas. Este

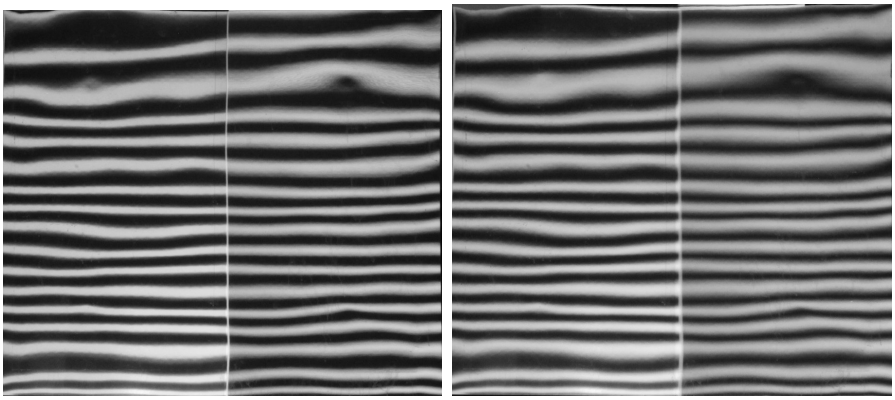

Figure 4.9: Análisis de sensibilidad al contraste en el sistema. Enfoque total (izquierda). Suavizado por desenfoque (derecha).

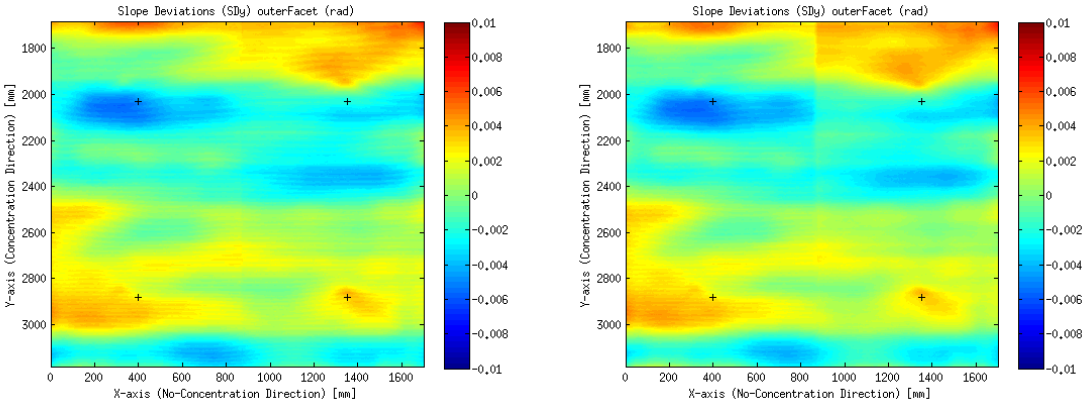

Figure 4.10: Análisis de sensibilidad al contraste en el sistema. Enfoque total (izquierda). Suavizado por desenfoque (derecha).

análisis nos da un indicio sobre si el uso de franjas más delgadas o gruesas, causado por la multiplicación de franjas en el espacio, puede afectar o no la resolución y la detección de pequeñas deformaciónes en la superficie de la muestra.

Es posible apreciar en el primer juego de imágenes 4.12, el cambio de frecuencia proyectado entre ambas imágenes y como estas afectan el cálculo del mapa de pendientes, ilustrados por las Figuras 4.13.

En la Tabla 4.4, es posible apreciar la estadística calculada de ambas pruebas. En ella se observa claramente que existe una poca diferencia del orden de 10^{-07} mrad entre la media de ambos resultados. Lo que también se puede confirmar con el análisis de su media cuadrática, que tiene una diferencia de 10^{-04} mrad. Si bien en la imagen del mapa de pendientes se pueden apreciar zonas focalizadas donde se observa una diferencia considerable (principalmente zonas con mayor error), esto no se refleja en el resultado global, pues es promediado por la parte mayoritaria que no se ve afectada.

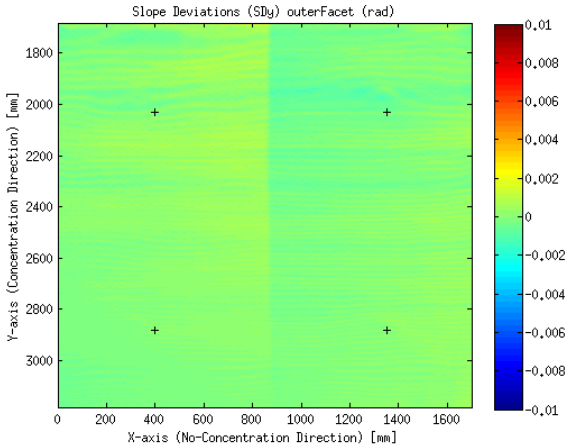

Figure 4.11: Sustracción de ambos mapas de desviación para el análisis de sensibilidad al contraste.

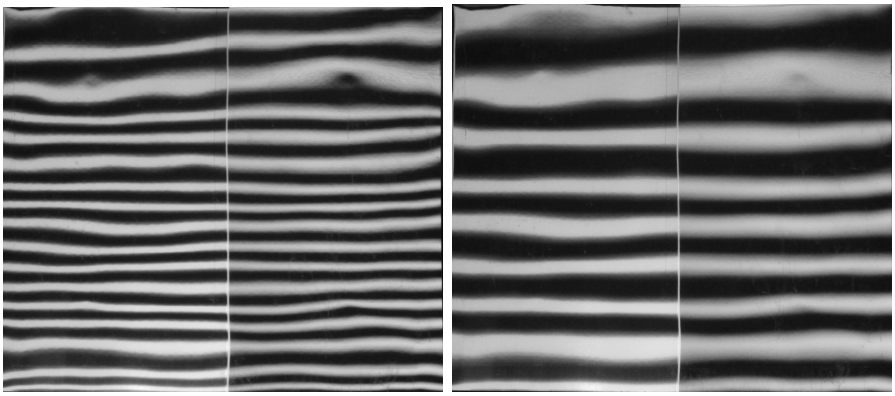

Figure 4.12: Análisis de sensibilidad sobre la frecuencia en el sistema. Mayor frecuencia o menor periodo (izquierda). Menor frecuencia o mayor periodo (derecha).

4.3 Análisis de incertidumbre

En todo sistema de medición existe errores en la determinación de las cantidades físicas involucradas en el análisis. El caso de la deflectometría no es la excepción. En este capítulo se intentará describir las mediciones y los factores que interfieren de manera significativa en el proceso de la obtención del mapa de pendientes. Además, se planteará la ecuación matemática que rige el análisis de incertidumbres bajo el modelo de la Ley de Propagación de Errores.

Mediciones involucradas en el análisis

El modelo matemático de la herramienta desarrollada en este trabajo requiere de la medición de entradas físicas de la geometría del arreglo de las ecuaciones 4.11 y 4.16), de tal manera

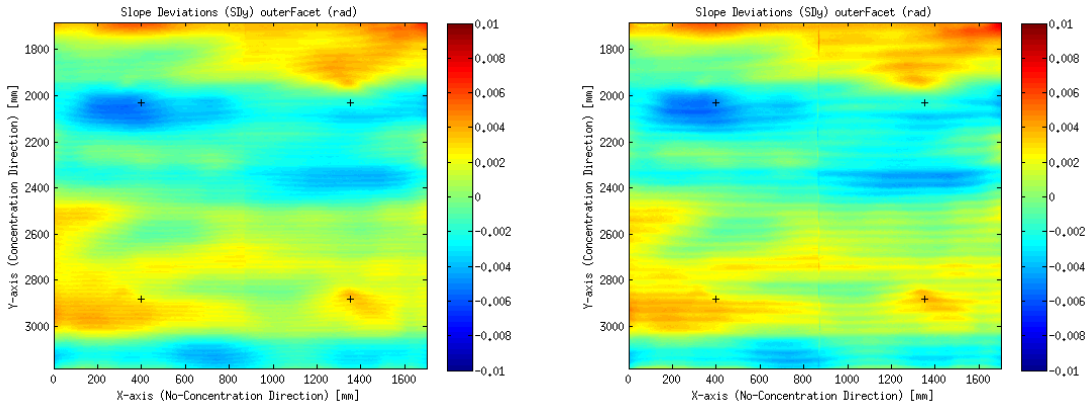

Figure 4.13: Análisis de sensibilidad a la frecuencia de franjas. Periodo 65 milímetros (izquierda). Periodo 130 milímetros (derecha).

Tabla 4.4: Estadistica del análisis de sensibilidad sobre la frecuencia en el sistema.

	Slope Deviation Mean	Slope Deviation RMS
Mayor frecuencia de franjas (mrad)	-2.42×10^{-5}	0.0022
Menor frecuencia de franjas (mrad)	-2.46×10^{-5}	0.0023
Diferencia (mrad)	-6.90×10^{-7}	3.36×10^{-4}

que pueda convertir las franjas reflejadas en desviaciones de pendiente (SD) respecto al diseño ideal de la faceta. Parámetros como las dimensiones de la faceta (ancho y largo), la distancia focal, los ángulos de rotación de la cámara, el periodo de las franjas, etcétera, requieren ser medidos con precisión antes de procesar las imágenes. Estos parámetros representan variables de entrada que influencian el resultado final y la incertidumbre típica ha sido estimado para cada uno de ellos.

Para cuantificar la sensibilidad y la incertidumbre del cálculo de la desviación de pendiente generado por la herramienta desarrollada aquí, un colector cilindro-parabólico fue caracterizado, variando sistematicamente los valores de entrada. La variación de los parámetros ha sido cuidadosamente elegida de acuerdo con la incertidumbre de medición del dispositivo y considerando el modelo físico presentado en este capítulo 4.1.1.

La incertidumbre de cada parámetro característico ha sido calculado de acuerdo a los métodos publicados en la Guía Internacional de Estándares ISO/IEC Guide 98-3.

De acuerdo con la ecuación de la Ley de Gauss para la propagación de errores, la incertidumbre de una medición puede ser calculada por:

$$\rho_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial P_1}\Delta P_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial P_2}\Delta P_2\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial P_3}\Delta P_3\right)^2 + ... + \left(\frac{\partial f}{\partial P_n}\Delta P_n\right)^2} \tag{4.20}$$

Donde P_1, P_2, P_3,..,P_n son los parámetros que influencian el cálculo de la pendiente, los términos derivativos pueden representarse como la pendiente de los puntos que varían del

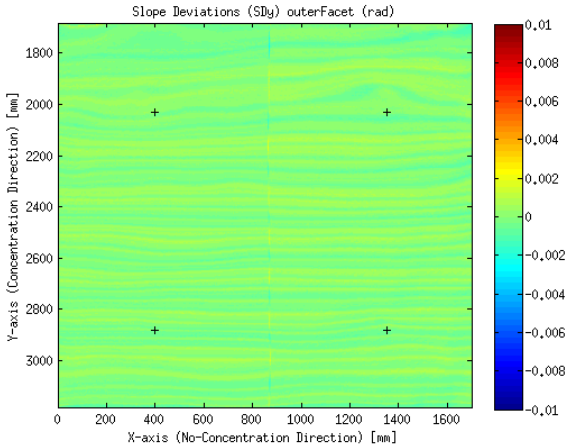

Figure 4.14: Sustracción de ambos mapas de desviación para el análisis de sensibilidad a la frecuencia de franjas.

Tabla 4.5: Valores de incertidumbre para los parámetros de entrada de la herramienta FOCuS.

Parámetro de entrada	Herramienta de medición	Incertidumbre
Periodo de las franjas P	Vernier	± 1.0 mm
Distancia horizontal R	Cinta métrica	± 10.0 mm
Altura de la cámara H	Cinta métrica	± 10.0 mm
Altura de la faceta-pantalla h	Cinta métrica	± 10.0 mm
Inclinación de la faceta β	Angulímetro digital	± 1.0 grados

valor nominal, y ΔP_n representa la incertidumbre de la herramienta de medición.

Resultado de la sensibilidad

Los valores de sensibilidad fueron calculados para cada variable de salida del sistema, variando los parámetros de entrada en 37 incrementos igualmente espaciados a lo largo del rango de incertidumbre de cada herramienta de medición. Las variaciones fueron elegida de acuerdo con cada dispositivo utilizado para la medición en la prueba. El software fue ejecutado en ciclos de operación, variando el parámetro de análisis y dejando fijos los restantes.

La Figura 4.15 ilustra la sensibilidad del cálculo de la desviación de pendiente de un punto específico en el centro de la faceta y de la media cuadrática del mapa completo de desviaciones.

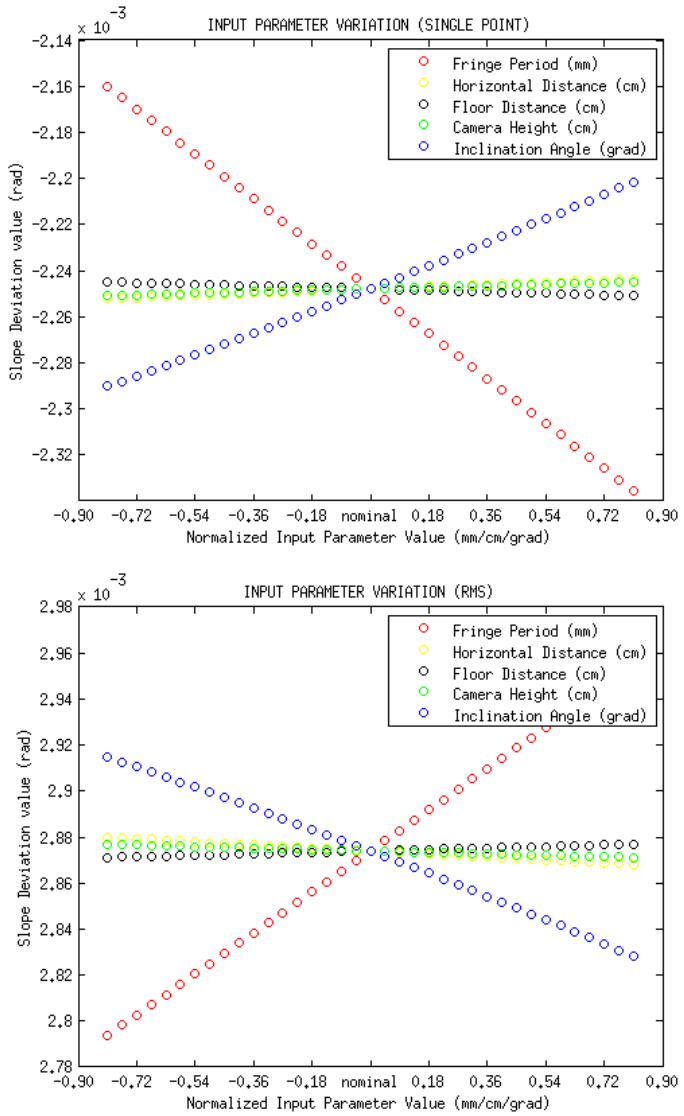

Figure 4.15: Cambio resultante en la desviación local de pendiente obtenida al variar los parámetros de entrada. Punto específico al centro de la faceta (arriba). Media cuadrática (abajo).

Resultados de incertidumbre

El análisis de incertidumbre presentado en este documento, asume que todas las variables de entrada son independientes entre las demás variables. Además, que están distribuidas uniformemente a lo largo de la incertidumbre de la medición y que la correlación entre las variables de entrada y salida es lineal.

Tabla 4.6: Márgenes de oscilación de la magnitud con respecto a su valor nominal y la incertidumbre de medición (banda de error).

Parámetro de salida	Nominal	Nominal-	Nominal+	Error
Error de pendiente local, Punto 1 (mrad)	-2.24	-2.23	-2.25	$\pm 0.44\%$
Error de pendiente promedio (mrad)	-0.02155	-0.02180	-0.02128	$\pm 1.5\%$
Error de pendiente RMS	2.873	2.867	2.879	$\pm 0.20\%$

De esta manera, es posible estimar el valor de la incertidumbre compuesta para nuestro sistema:

Tabla 4.7: Incertidumbre estándar combinada. Resultado de la medición de la incertidumbre de los valores de cada parámetro de entrada.

Parámetro de salida	Valor nominal
Error de pendiente local máximo	0.0024 mrad
Error de pendiente local combinado	0.0009 mrad
Error de pendiente RMS	0.0010 mrad

Chapter 5
Resultados y discusión

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos en distintas pruebas de reflexión de franjas realizadas a una variedad de colectores solares. Si bien actualmente no existe una normativa estandarizada asociada a la caracterización de colectores solares, este trabajo tratará de establecer una serie de parámetros que ayuden a delimitar las áreas de acción a la hora de evaluarlos. Es por ello, que en este capítulo se presentarán los resultados de las evaluaciones a la totalidad de los modelos de colectores que se tuvo acceso durante la realización de este trabajo aunado a un análisis riguroso sobre los diversos factores que intervienen en la evaluación de los colectores y que podrían ser un tema a incluir en una posible revisión de la materia.

El capítulo de resultados se divide a grandes rasgos en dos secciones principales, las cuales son resultado directo de las metas propuestas al inicio de este trabajo: Una meta consistía en el desarrollo de un sistema de caracterización robusto y eficiente, que permita el perfeccionamiento del diseño y la cualificación de facetas dentro de un ambiente controlado de tipo laboratorio. Ésta sección (Ver Sección 5.1), presenta las caracterizaciones realizadas en laboratorio de facetas individuales para distintos modelos de colectores cilindro parabólicos y facetas planas de helióstatos. La segunda sección (ver Sección 5.2), intenta cubrir la meta final propuesta para este trabajo, en la cual se busca utilizar los desarrollos realizados previamente en el sistema de laboratorio, para extrapolar los ensayos de caracterización óptica a pruebas de campo con colectores solares a gran escala.

5.1 Pruebas de laboratorio

Un análisis de facetas en laboratorio permite evaluarlas en un ambiente controlado y protegido de los cambios ambientales repentinos, y con ello, enfocarse en determinar las posibles fuentes de error que el modelo pueda presentar al ser trasladado a pruebas de campo de acuerdo con la Figura 5.1. Además, la caracterización óptica de facetas en laboratorio es aquí una herramienta poderosa, pues logra emular el funcionamiento de un sistema de cualificación en una línea de producción industrial, lo que permite garantizar la calidad de la faceta desde el inicio de su fabricación hasta su puesta en operación en la planta.

La caracterización óptica por el método de reflexión de franjas en un arreglo de laboratorio se realizó en dos ubicaciones. Por una parte, se construyó un banco de pruebas en

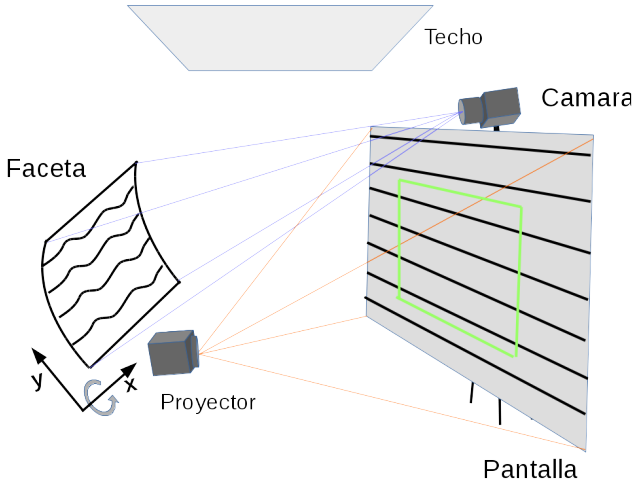

Figure 5.1: Arreglo teórico de laboratorio usado para la caracterización de facetas.

las instalaciones del Centro Nacional de Energías Renovables de España (CENER) para la cualificación de facetas de canal parabólico. Si bien no existe una gran base de empresas que se dediquen a fabricar espejos para colectores solares, sí se tuvo acceso a dos tipos de facetas que suelen ser las más manufacturadas e instaladas en las plantas termosolares de canal parabólico: La faceta modelo RP3 de la empresa española RioGlass y una faceta proporcionada por el equipo técnico del DLR fabricada por la empresa alemana Flabeg FE. Ambas facetas, a pesar de ser específicas para el modelo RP3, se diferencian en sus dimensiones, en su conformado, en el espesor y en el sistema de sujeción al colector.

Por otra parte, un estudio sobre la planicidad de facetas de helióstato y su posible deformación mecánica fue llevado a cabo. Este estudio tenía la finalidad de analizar el grado de distorsión que podía ser aplicado a la faceta por medio del sistema de moldeo mecánico y fue realizado en el Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar (LACYQS) en Hemosillo, Sonora.

A continuación haremos una descripción de las facetas a las que se tuvo acceso durante la realización de este trabajo y de sus características principales.

5.1.1 Concentradores curvos

Las facetas de un captador cilindro-parabólico son superficies especulares, generalmente hechas de vidrio platinado, curvas en un eje y planas en el otro. Debido a que es una tarea difícil construir una parábola de vidrio de grandes dimensiones, ésta se suele conformar en segmentos de una parábola completa con una distancia focal definida. Sus dimensiones suelen ser variables y en general dependen del fabricante y de las especificaciones de tamaño del colector. Utilizan una serie de tornillos de sujeción por la parte de atrás adheridos mediante cojinetes de cerámica, que hacen la función de puntos de anclaje sobre el armazón del concentrador. Suelen ser hojas de vidrio de espesor variable (típicamente de 3 a 5 mm), con

un depósito de platinado que produce la reflexión-concentración de los rayos de luz sobre un receptor. Además, suelen llevar un recubrimiento especial de pintura vinílica por la parte trasera y orillas para evitar el desgaste y la corrosión.

Si bien hasta la fecha no existe un consenso generalizado y/o normativas aplicables sobre la manera idónea para evaluar una faceta, existen diversos arreglos en los que se puede colocar una faceta para su análisis 5.2. En general se puede hablar de cuatro posiciones principales y modos de montaje:

- Horizontal anclado: Faceta con su eje de concentración orientado hacia el cenit y con un marco soportado con tornillos.
- Horizontal libre: Faceta con su eje de concentración orientado hacia el cenit y libre de tornillos.
- Vertical anclado: Faceta orientada 90 grados en su eje de concentración con respecto al cenit y sujeta por tornillos.
- Vertical libre: Faceta orientada 90 grados en su eje de concentración con respecto al cenit y libre de tornillos.

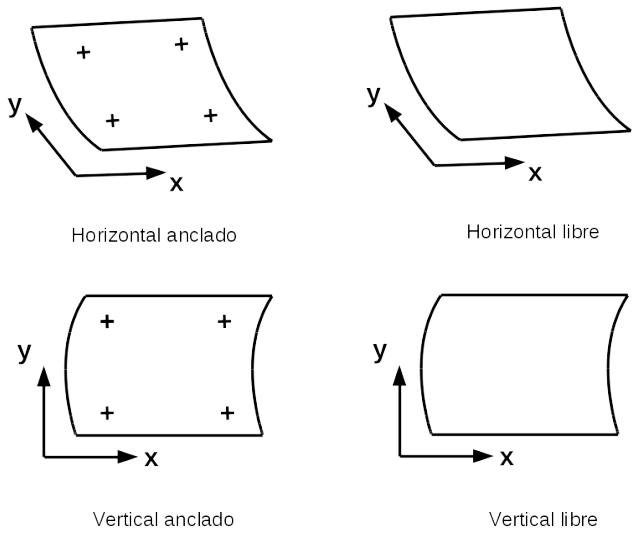

Figure 5.2: Esquema de análisis de una faceta. Anclado: Con tornillos ajustados a un marco de soporte (izquierda). Libre: Sin tornillos de sujeción sobre los cojinetes de soporte (derecha).

A partir de estos arreglos típicos, es posible realizar un sin número de variantes al análisis. La discusión sobre el tipo de montaje y arreglo previo al análisis de la faceta se centra en el argumento de la influencia de la gravedad sobre el eje de concentración del espejo curvo y por ende, que la acción de su propio peso pueda incurrir en distorsiones adicionales a la

geometría de la faceta. Sin embargo, otro argumento respalda el uso de este arreglo debido a que durante la vida operativa de la faceta, ésta presentará este escenario en el colector. Otro punto punto de conflicto radica en el uso o no de un marco de sujeción atornillado a los cojinetes de la faceta. De igual manera que el punto anterior, el uso o no de estos podría eventualmente generar tensión sobre los cojinetes, lo que tiende a deformar las áreas cercanas a estos. Si bien los argumentos sobre este tema pueden ser complementados y extendidos con una mayor discusión, en este trabajo se analizaron varios modos de operación con la finalidad de observar así el comportamiento de la muestras ante la prueba de reflexión de franjas.

Facetas RP3 Rioglass

Las facetas RP para colectores de canal parabólico se caracterizan por ser uno de los modelos más utilizados en la industria de generación térmica-eléctrica. En particular, el modelo RP3 se encuentra entre los más extendidos, debido a que su relación dimensión/potencia son idóneas para permitir obtener temperaturas de operación para la aplicación en la generación eléctrica. El modelo RP3 de Rioglass es fabricado por la empresa española Rioglass Solar [85], bajo un procedimiento de conformado en secciones por medio de rodillos de presión y tratamiento térmico, lo que moldea el vidrio a la forma parabólica deseada. Su faceta interna (aquella más cercana al tubo receptor), tiene una dimensión de 1700 mm x 1630 mm. La faceta exterior por su parte, tiene dimensiones lineales de 1700 mm x 1500 mm.

Un módulo tradicional está distribuido en secciones de cuatro facetas sobre el eje de concentración de la parábola, repartidos a ambos lados del tubo receptor como se muestra en la Figura 5.3. Cada una de las facetas presenta cuatro puntos de sujeción de tipo almohadilla con tornillos estándar que se sujetan al marco de la parábola. Están compuestas por un vidrio reflectante de 3 mm y recubierto por detrás con pintura vinílica para evitar la corrosión. A especificaciones del fabricante, la distancia focal de arco de la parábola completa es de 1710 mm.

El arreglo de laboratorio para realizar la caracterización óptica es similar al de la Figura 5.4. La faceta es montada sobre una estructura de tipo pedestal de aluminio, construida expresamente para este fin, la cual tiene unos brazos rígidos horizontales que la soportan y permiten orientarla mediante tornillos asegurados en sus cojinetes. En la parte central del bastidor se cuenta con un tornillo de rotación, con el cual es posible orientar la faceta en distintos ángulos, limitados por 45 grados a 90 grados con respecto a la vertical.

En un primer análisis, se detallada la prueba realizada a una faceta soportada sobre los brazos del pedestal a un ángulo máximo de 90 grados sobre la vertical; esto es con el eje óptico lo más perpendicular posible al observador (cámara). Además, se encuentra anclada sobre un marco de aluminio rígido y no deformable, mediante tornillos largos de acero. Esto tiene dos motivaciones: por una parte representa el arreglo de laboratorio más sencillo y sólido, y por el otro, es la condición donde la faceta se encuentra en su situación más desfavorable, pues las fuerzas gravitatorias y el estrés mecánico a la cual se ve sometida deforma considerablemente su geometría de la misma con respecto a su diseño ideal.

Los datos de entrada para el cálculo de la desviación de pendiente se resumen en la Tabla 5.1. Estos datos fueron obtenidos en parte de la información presentada por el fabricante

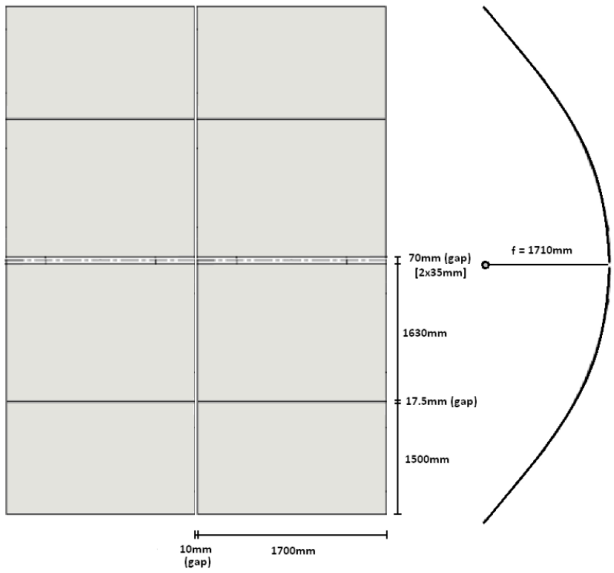

Figure 5.3: Disposición y dimensiones de las facetas RP3 de Rioglass en un colector de canal parabólico.

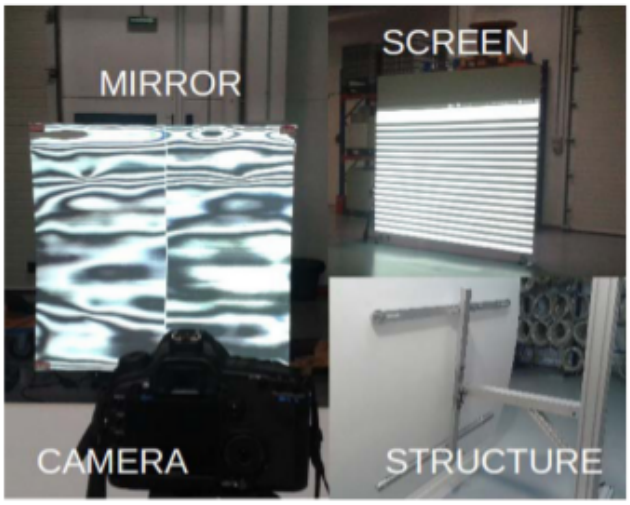

Figure 5.4: Arreglo experimental usado en el laboratorio para la caracterización de facetas.

en las hojas de especificaciones y por otro, a través de cuidadosas mediciones realizadas por el equipo técnico de CENER con instrumentos de precisión, tales como cintas métricas, goniómetros digitales y reglas Vernier.

Tabla 5.1: Tabla de valores de entrada para el análisis de franja en las facetas Rioglass.

Variable	Valor
Largo Interna (mm)	1700
Ancho Interna (mm)	1630
Largo Externa (mm)	1700
Ancho Externa (mm)	1500
gap1 (mm)	35
gap2 (mm)	17
Hcam (mm)	1400
Hfloor (mm)	40
R (mm)	3420
β (grad)	87
Distancia Focal (mm)	1710
Periodo Franjas (mm)	60

Una vez obtenidos los datos promedio de las mediciones del equipo técnico y de la hoja de especificaciones, son entonces introducidas en una herramienta de software desarrollada como parte de este trabajo para este propósito 5.5. Esta herramienta de análisis, se instala de manera independiente de cualquier lenguaje de programación y está disponible para todos los sitemas operativos. Además, se ejecuta como un proceso automatizado, pues solo es necesario que el usuario proporcione las imágenes de la muestra a analizar mediante un menú desplegable.

Para información más detallada sobre la instalación, núcleo y características relevantes de este software y su operación, se remite al lector a los manuales de operación y documentación correspondiente creada para ese fin (ver sección Anexa *The FOCuS Tool Documentation: Hardware and setup explained*).

El caso del análisis de la faceta interna RP3 de Rioglass, se obtuvieron las imágenes que se presentan en la Figura 5.6. Las franjas reflejadas por la faceta en la dirección de concentración presentan un grado de distorsión considerable, lo que de antemano nos otorga cualitativamente una idea de la calidad de la misma. Sin embargo, se tiene que tener cierta precaución con esta idea para facetas curvas, puesto que este tipo de facetas concentradoras ya por su naturaleza presentarán cierto grado de distorsión en las franjas, pues en la dirección de concentración las facetas tienen la forma de un corte parabólico, lo que conlleva a redireccionar todos los rayos de luz incidentes por el reflejo a una banda concentrada y por ende distorsionar levemente las franjas. Por otra parte, es notorio que las franjas en la dirección de no-concentración tenderán a representar una forma menos distorsionada y acorde con las franjas proyectadas. Esto se debe a que en esta dirección las facetas tienen una representación en su forma de un espejo plano.

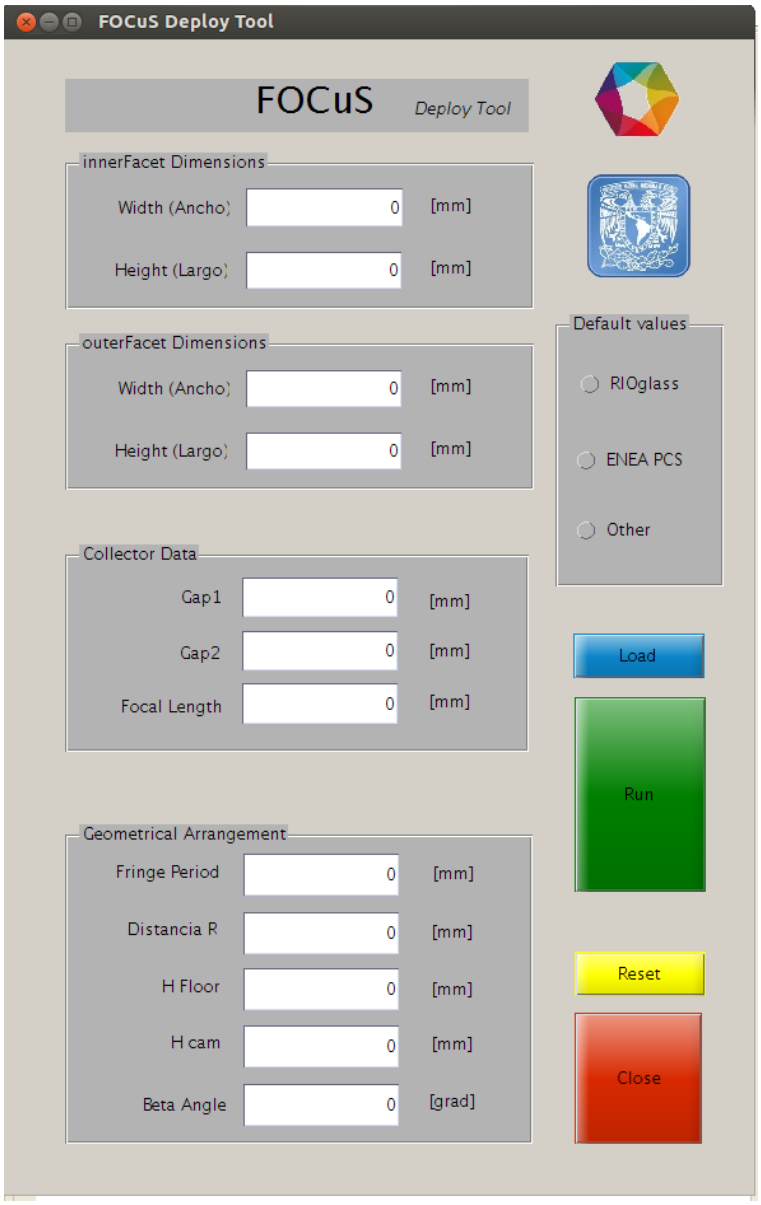

Figure 5.5: Imagen de la pantalla principal de la herramienta FOCuS.

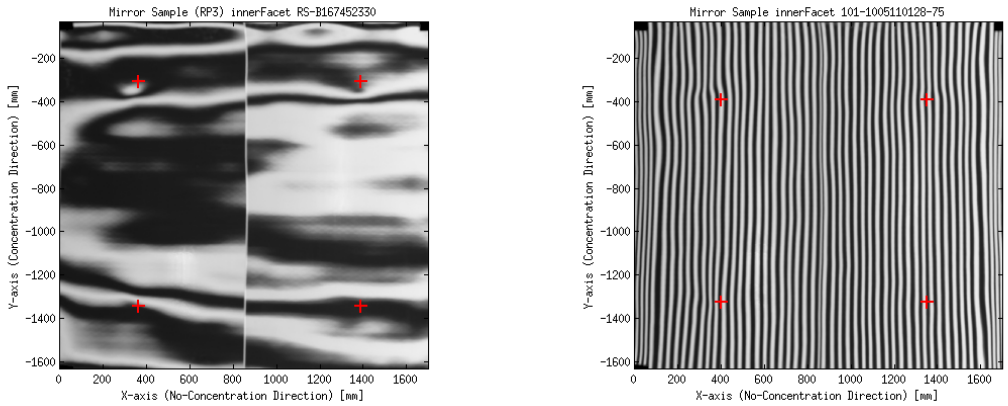

Figure 5.6: Faceta interna bajo el análisis de franjas. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha).

Las imágenes de las facetas presentan señalamientos indicativos de la posición de los cojinetes. Para este caso en particular, una cruz (+) representa de acuerdo con el esquema 5.4, que la faceta está atornillada al marco del bastidor. Además, un detalle observable sobre las imágenes, es una franja en el centro de la faceta que parece dividirla. Esto es resultado de la utilización de dos proyectores alineados uno con respecto al otro para lograr un mayor tamaño de pantalla. Si bien se pudo demostrar que no tiene afectación considerable en los resultados, esto es más un hecho fortuito por las condiciones del laboratorio de experimentación y sus limitaciones de espacio para realizar las pruebas.

Los mapas de desviación local de pendiente del análisis de reflexión de franjas se pueden apreciar en la Figura 5.7. Este análisis es indicativo del grado de desviación que sufre la faceta con respecto a su diseño ideal. La barra de intensidad va desde los -10 mrad a los 10 mrad; esto está elegido de esta manera por convención, pues representa los intervalos de error comunes que sufren las facetas de este tipo. Errores positivos (rojos) representan desviaciones de pendiente hacia los bordes de la faceta, por consiguiente, errores negativas (azules) representan desviaciones de pendiente hacia el centro de la faceta.

Como se puede apreciar en las imágenes de los mapas de desviaciones, existen grandes zonas ubicables de desviación de la pendiente ideal en las facetas representadas por las variantes de colores. Es notorio que los bordes de las facetas presentan algunas de los mayores errores en la imagen, no obstante esto es normal y consistente para el caso de la faceta interna, puesto que las orillas tienden a ser las más afectadas por el peso de la misma y su curvatura tiende a ser más pronunciada, lo que acarrea en una mayor posibilidad de error. Por otro lado, existen grandes zonas identificables que pueden ser divididas en cuatro cuadrantes. Esto tiene una explicación racional por el hecho de que en el proceso de conformado de la faceta, se instalan cuatro tornillos de sujeción al captador mediante una almohadilla adherible (ubicables por las cruces), lo que distorsiona la faceta incorporándole una serie de crestas y valles a la parábola y que son apreciables en los mapas de pendiente.

El mapa de desviación de pendientes, si bien nos da valiosa información sobre la local-

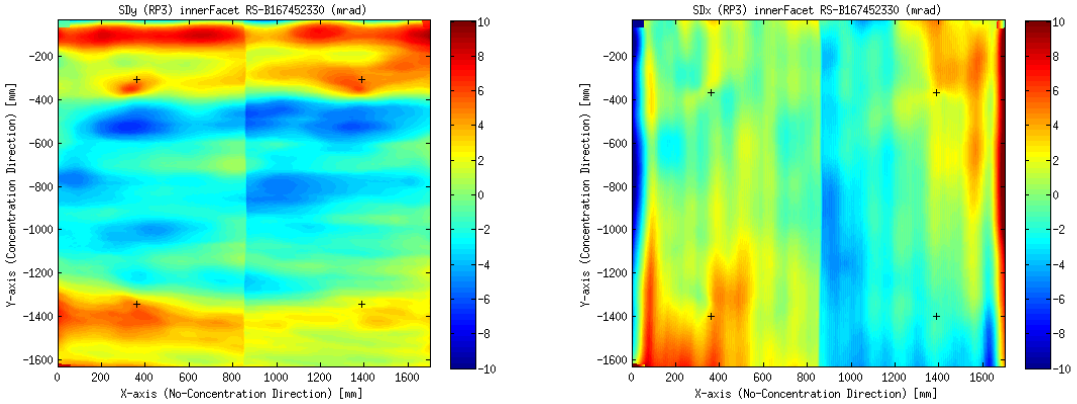

Figure 5.7: Mapa de desviación local de pendiente (mrad). Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha).

ización de los errores presentes en la faceta, no es un valor suficiente para establecer el grado de calidad de la faceta. Por lo tanto, habremos de calcular la desviación presente en la faceta con respecto a su distancia focal ideal. Esta distancia focal ideal es aquella que se compromete alcanzar al confeccionar en su etapa de producción.

El mapa de desviación focal se presenta en la Figura 5.8. Si bien es un mapa estructurado de manera similar que el de desviación local de pendiente, este mapa está escalado en distintas unidades y representa la desviación local focal en unidades de milímetros. La información expresada por el mapa de desviación focal es de suma importancia, pues nos representa localmente el grado de corrección a nivel milimétrico que se tiene que realizar sobre la faceta de tal manera que ésta pueda tener la distancia focal ideal con la que fue diseñada.

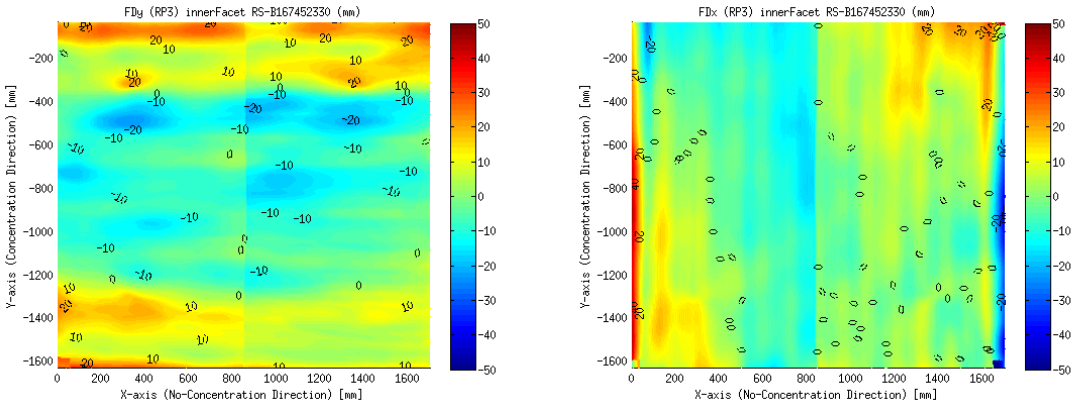

Figure 5.8: Mapa de desviación focal para la faceta interna. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha).

Consistente con el mapa de desviación local de pendiente, el mapa de desviación focal presenta mayores errores sobre las áreas de influencia de gravedad y de torsión. Es posible notar en los bordes y cojinetes desviaciones del orden de ±20mm.

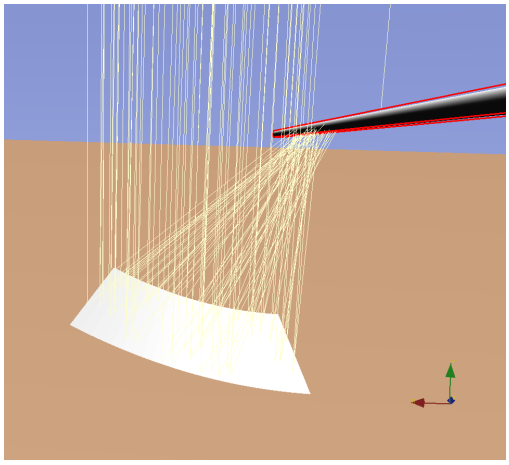

Figure 5.9: Imagen muestra de la faceta modelada por elementos finitos dentro del software de trazo de rayos Tonatiuh y su interacción con un receptor tubular de 70mm de diámetro.

Una vez obtenidos todos estos valores, es posible modelar una faceta en un entorno de simulación de trazado de rayos mediante un *script* desarrollado exclusivamente para el sistema FOCuS 5.9. Esta faceta es reconstruida virtualmente con elementos finitos, mediante un algoritmo iterativo que secciona la faceta en una cuadrícula de dimensiones obtenidas del mismo mapa y obtiene los valores del mapa de pendientes asignando cada uno de ellos a los elementos de la matriz. De esta manera, es posible reconstruir la faceta en un ambiente simulado con información extraída de su comportamiento real y modelarla en un entorno de operación.

La Figura 5.10 nos otorga el comportamiento óptico de concentración que presentaría la faceta en un ambiente de operación. En ella se puede destacar que la faceta en su conjunto presenta un grado de interceptación considerable. Por una parte mantiene un promedio superior al 95%, con zonas focalizadas de gran desviación. Es apreciable, éstas zonas son consistentes con las grandes desviaciones de pendiente obtenidas mediante el análisis de reflexión de franjas.

En la Tabla 5.2, se detalla la estadística obtenida en el proceso de evaluación. A la fecha de este trabajo, no existe un consenso generalizado en la comunidad científica estableciendo normativas y parámetros de calidad sobre el comportamiento aceptable de un concentrador para aplicaciones solares. Esta información es valiosa para establecer parámetros de calidad sobre el comportamiento general de la faceta.

Es posible apreciar que altos valores de desviación de pendiente (SD) corresponden linealmente con altos valores de desviación focal (FD). Estos resultados son consistentes con la naturaleza del problema, pues ambos valores están co-relacionados por la superficie y distancia focal ideal. A su vez, grandes errores en estos factores representan grandes irregulares en la superficie del concentrador que repercuten en la trayectoria de los rayos solares. Debido a esto, altas combinaciones de estos errores producen grandes pérdidas de energía en el concentrador, de tal manera que el factor de interceptación (IF) de la faceta alcanzará valores inferiores al cien por ciento.

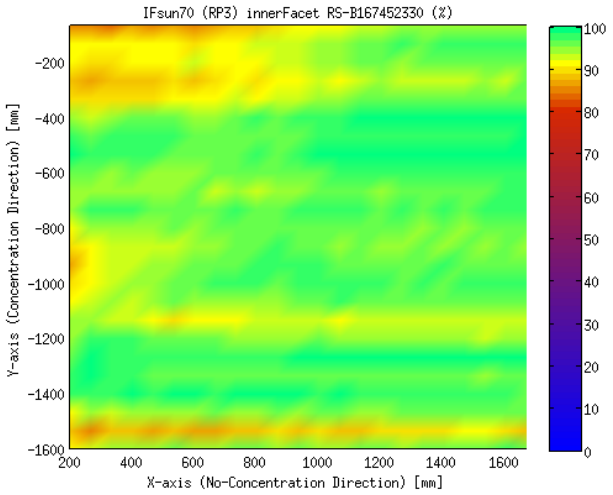

Figure 5.10: Factor de interceptación solar para la faceta interna con respecto a un receptor tubular de 70mm de diámetro.

Tabla 5.2: Datos estadísticos sobre la faceta interna RP3 de Rioglass.

Variable	Medición	Descripción
SDy	3.1 mrad	Desviación de pendiente en dirección de concentración (rms)
SDx	3.5 mrad	Desviación de pendiente en dirección de no-concentración (rms)
FDy	11.01 mm	Desviación focal en dirección de concentración (rms)
FDx	11.47 mm	Desviación focal en dirección de no-concentración (rms)
$IF_{sun}70$	95.02%	Factor de interceptación solar en tubo de 70mm

El análisis realizado a la faceta externa es similar al presentado para la faceta interna. La faceta externa es sometida a un análisis de franjas cercano a 90 grados sobre su vertical, sujeta sobre el marco del bastidor por tornillos estándar (indicados con cruces). En la Figura 5.11 se puede apreciar el mapeo de las franjas.

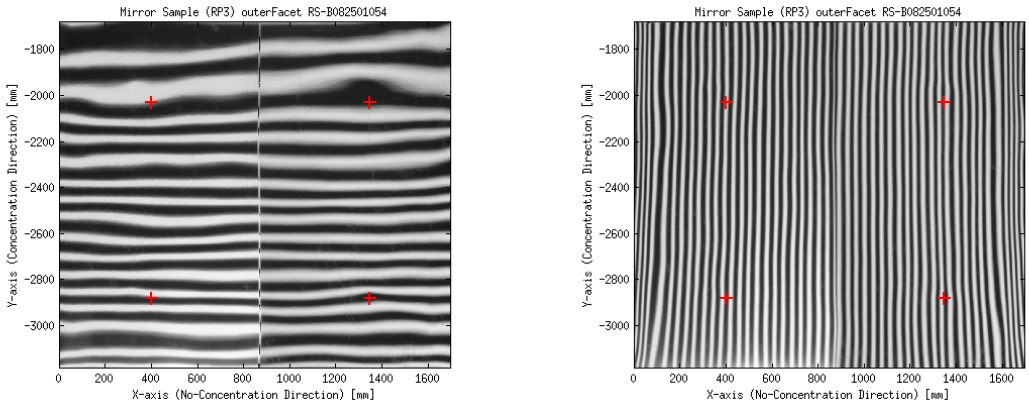

Figure 5.11: Faceta externa bajo el análisis de franjas. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha).

Es notable que en comparación con la faceta interna, la faceta externa presenta menor grado distorsión en las franjas para la dirección de concentración. Esto es explicable bajo el argumento de que las facetas externas son menos curvas, pues el corte parabólico tiene a suavizarse en los extremos del eje de concentración. Además, las facetas externas son menores en dimensión en comparación con las internas, lo que acarrea que su peso se distribuya de una manera más uniforme y tienda a curvar menos los bordes por la acción de la gravedad.

En la Figura 5.12 se puede apreciar el mapa de desviación local de pendiente. Es apreciable que los ejes coordenados están en función del lado negativo de la faceta. De tal manera que esté representando uno de los arreglos laterales del colector (izquierda con respecto al tubo receptor), designado así por cuestión de convención.

También puede apreciarse que el grueso de las desviaciones locales de pendiente oscilan entre ± 2 mrad, teniendo zonas focalizadas del orden de ± 6 mrad, comúnmente en las áreas de los cojinetes y los bordes de la faceta.

Para el caso de la dirección de no-concentración, es notable la similitud con el análisis de la faceta interna en la dirección de no-concentración 5.7. Esto se debe a que ambas facetas se comportan de manera plana en esa dirección, lo que ocasiona que conforme se avance sobre la longitud de la faceta, empiece a sufrir estrés por acción de diseño y tensión mecánica.

Consistente con el análisis del mapa de desviación de pendiente, el análisis de desviación focal presenta promedios de desviación del orden de ± 10 mm a lo largo de la faceta en dirección de concentración. En la dirección de no-concentración existen zonas focalizadas (principalmente en los bordes) con desviaciones máximas del orden de 40 mm. Si bien es un valor considerable, es necesario obtener el valor de media cuadrática para poder establecer como parámetro su afectación total.

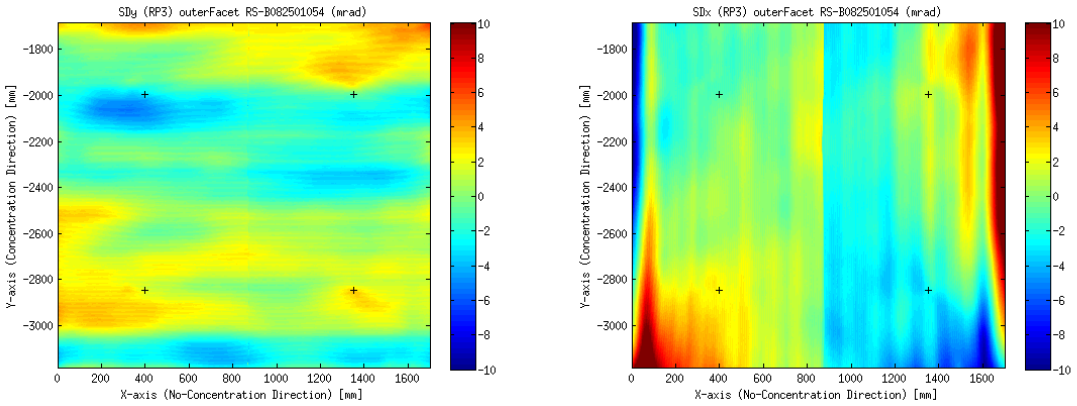

Figure 5.12: Mapa de desviación local de pendiente (mrad). Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha).

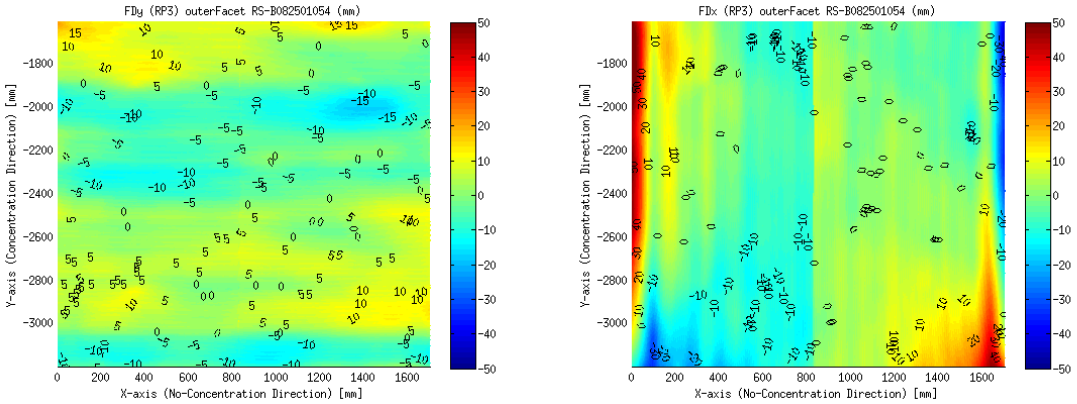

Figure 5.13: Mapa de desviación focal para la faceta externa. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha).

El análisis de trazo de rayos para la faceta externa conlleva a modificar el diseño del algoritmo inicial con la faceta interna para posicionar la nueva faceta a lo largo del eje de dimensión que le corresponde.

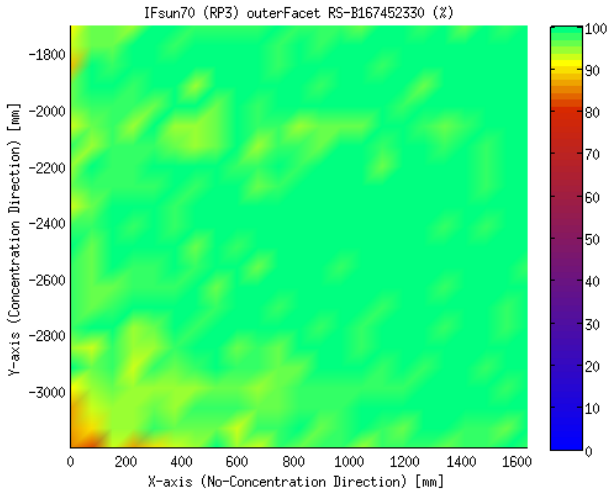

Figure 5.14: Factor de interceptación solar para la faceta externa con respecto a un receptor tubular de 70mm de diámetro.

Como se puede apreciar en el análisis de trazo de rayos de la Figura 5.14, la faceta aunque presenta una zona focalizada de desviación, se comporta relativamente bien en promedio a lo largo de ambas dimensiones.

Un análisis estadístico de los mapas de resultados obtenidos para la faceta exterior nos proporciona una idea del comportamiento general de la misma.

Tabla 5.3: Datos estadísticos sobre la faceta externa RP3 de Rioglass.

Variable	Medición	Descripción
SDy	2.0 mrad	Desviación de pendiente en dirección de concentración (rms)
SDx	3.1 mrad	Desviación de pendiente en dirección de no-concentración (rms)
FDy	6.85 mm	Desviación focal en dirección de concentración (rms)
FDx	10.73 mm	Desviación focal en dirección de no-concentración (rms)
$IF_{sun}70$	98.12%	Factor de interceptación solar en tubo de 70mm

Como resumen del análisis para ambas facetas, podemos establecer que la curvatura de diseño, la dimensión y el actuar de la fuerza de gravedad sobre la faceta produce un efecto significativo en la capacidad de la misma de concentrar la luz solar. Además, es notable que los mecanismos diseñados para el soporte de la faceta sobre el armazón del colector, influyen de manera significativa en los valores estadísticos de desviación de pendiente y desviación focal, aunque no es tan claro que esta desviación sea suficientemente grande como para influir en el factor de interceptación.

Influencia de la gravedad

Una segunda modo de evaluación (de acuerdo con la Figura 5.2) se presenta al analizar la faceta en alguna posición de giro cercana a su posición horizontal, o de cero grados al cenit. Si bien este análisis no fue posible debido a las consideraciones de espacio necesario para el arreglo experimental, sí se realizó un análisis de franja a un ángulo de orientación intermedio. Este análisis presentado aquí es de un valor muy considerable, pues simula la posición de la faceta en un ángulo típico de operación y e igual de factible que el de ceros grados. Además, permite realizar una comparación punto a punto sobre la posición anterior cercana a 90 grados y ponderar con ello la influencia que sufre la faceta por acción de la gravedad en las pruebas

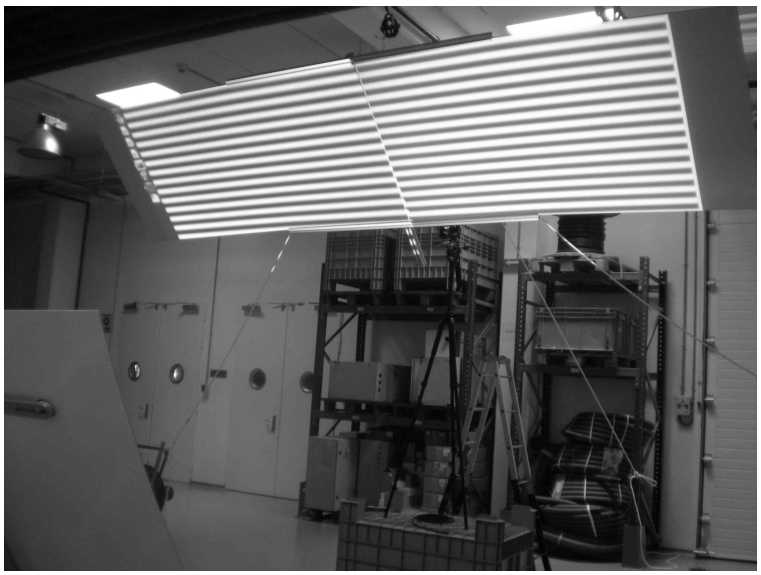

Figure 5.15: Arreglo experimental del análisis de gravedad de la faceta RP3 de Rioglass.

La Figura 5.15, nos da una idea de las modificaciones realizadas al arreglo experimental. La pantalla fue posicionada mediante un brazo hidráulico a una altura cercana al techo, y mediante cables de anclaje, orientada y fijada al ángulo deseado. El brazo de la faceta por su parte fue girado, de tal manera que la pantalla y el eje de faceta se encontraran en un arreglo paralelo. A continuación, se montó la cámara en consistencia geométrica con el arreglo de 90 grados y se procedió a orientar los proyectores para cubrir la pantalla y realizar el análisis. Si bien la orientación del plano de la faceta se mantiene paralelo a la pantalla, la acción de la gravedad sobre los puntos de anclaje y los bordes tendería a relajarse cada vez más conforme nos acercamos a su orientación horizontal.

Un análisis comparativo se puede llevar a cabo y es presentado entre ambas facetas en la Figura 5.16. Esta figura nos proporciona ambos mapas de desviación de pendiente para la misma faceta y bajo exactamente las mismas condiciones de operación. De acuerdo con la teoría planteada inicialmente, en este análisis se puede corroborar que existe un afectación real provocada por la tensión deformadora a la fuerza de gravedad. Zonas cercanas a los

tornillos de sujeción se ven suavizadas y los bordes curvados de la faceta ideal son menores.

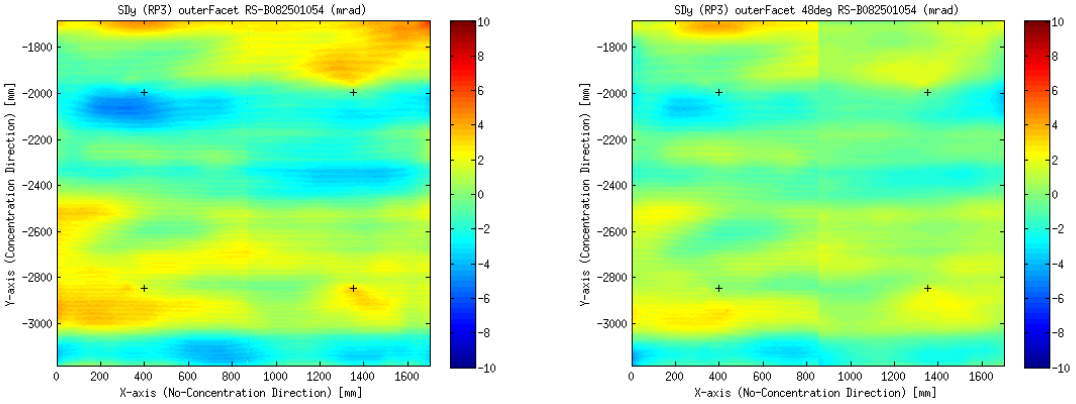

Figure 5.16: Mapa de desviación local de pendiente (mrad). Modo vertical anclado (izquierda). 45 grados anclado (derecha).

Consistente con los valores obtenidos por el mapa de desviación de pendiente, se puede apreciar de la Figura 5.17, desviaciones promedio pequeñas para la faceta entera en comparación con el análisis vertical.

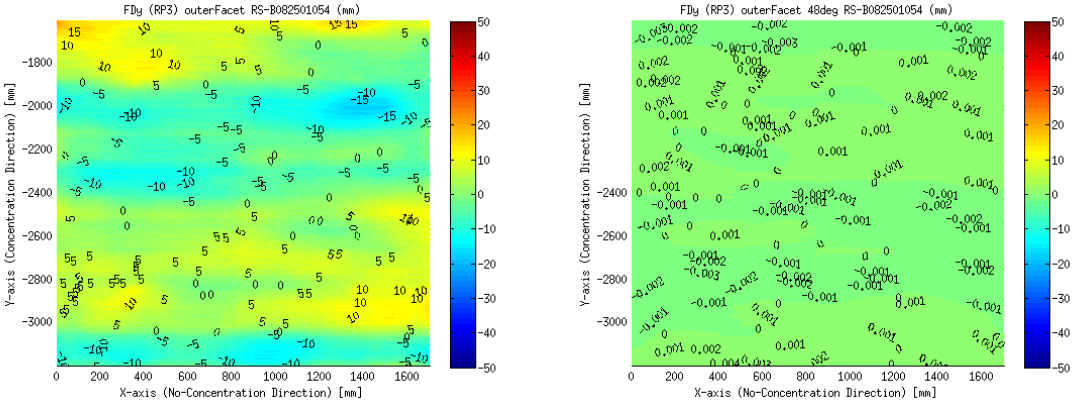

Figure 5.17: Mapa de desviación focal para la faceta externa. Modo vertical anclado (izquierda). 45 grados anclado (derecha).

Cabe hacer notar, de la tabla de resultados estadísticos 5.4, la disminución considerable de la media cuadrática de todos los términos obtenidos por el análisis de franja. Estos resultados son destacables, pues hasta la culminación de este documento, no se han reportado trabajos que analicen a detalle este tema y determinen el grado de afectación que sufre la faceta al giro del colector en un ambiente de operación real.

Tabla 5.4: Datos estadísticos RMS para el análisis de afectación de gravedad sobre la faceta externa RP3 de Rioglass.

Variable	Vertical anclado	Inclinado anclado	Variación
SDy (mrad)	2.0	1.4	±0.60
FDy (mm)	6.85	4.18	±2.67

Faceta RP3 Flabeg

Las facetas RP3 Flabeg fueron diseñadas y fabricadas por la empresa FLABEG Technical Glass [83]. Son facetas de vidrio de 4 milímetros; conformadas en una mesa especial que curva los espejos por medio de un molde al aplicarle succión de aire (creando un vacío en la cámara), y un tratamiento térmico que garantiza que la deformación sea permanente y con lo cual se logra la distancia focal requerida. Para la faceta interna (más cercana al receptor) cuenta con unas dimensiones de 1700 mm x 1641 mm, y para su faceta exterior 1700 mm x 1500 mm.

En la Figura 5.18, se presenta un esquema del diseño y arreglo del captador RP3 de Flabeg. Si bien su distancia focal se mantiene en el orden de 1710 mm como en el colector RP3 de Rioglass, se puede apreciar dimensiones ligeramente mayores y una mayor separación entre sus facetas o *gap*.

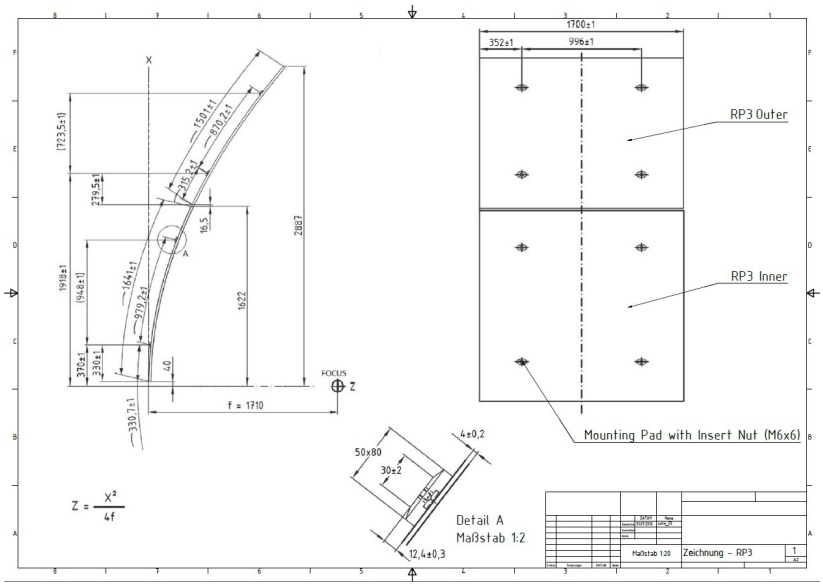

Figure 5.18: Disposición y dimensiones del captador Flabeg.

La prueba de franjas realizada a las facetas de Flabeg consistió en utilizar el esquema vertical libre de la Figura 5.4. Esta elección ayuda a realizar un análisis de una faceta sin el estrés característico de los tornillos de sujeción. Además, la faceta se colocó sobre un perfil de aluminio diseñado expresamente para este fin, con el que se le daba cierta rigidez a la sección vertical de la faceta y con lo que se evitaba la acción total de la gravedad sobre el lado curvo

de la misma. Si bien este análisis no corresponde del todo con el arreglo de operación de los colectores, nos otorga valiosa información sobre el comportamiento libre de una faceta.

En la Tabla 5.5, se detallan los valores obtenidos por el equipo técnico de medición al realizar la campaña de evaluación del concentrador RP3 de Flabeg.

Tabla 5.5: Tabla de valores de entrada para el análisis de franjas de la faceta Flabeg

Variable	Valor
Largo Interna (mm)	1700
Ancho Interna (mm)	1641
Largo Externa (mm)	1700
Ancho Externa (mm)	1500
gap1 (mm)	40
gap2 (mm)	16.5
Hcam (mm)	1362
Hfloor (mm)	200
R (mm)	4000
β (grad)	89.5
Distancia Focal (mm)	1710
Periodo Franjas (mm)	110

Para el caso del análisis de la faceta interna RP3 de Flabeg, se puede apreciar en la adquisición de imágenes de la Figura 5.19. Las franjas reflejadas por la faceta en la dirección de concentración presentan un grado de distorsión relativamente bajo. Es apreciable en esta dirección, pequeñas deformaciones sobre el área de los cojinetes libres (marcados aquí por pequeños círculos). Si bien los tornillos de sujeción no están insertados en este análisis, el proceso de adherencia de los cojinetes utiliza una silicona de contacto térmico, lo que al enfriar contrae las áreas en las que ha sido colocada. Por otra parte, las franjas en la dirección de no-concentración presentan una forma menos distorsionada y acorde con las franjas proyectadas. Igualmente se nota una muy leve curvatura en las franjas, principalmente en las áreas de los cojinetes.

El mapa de desviación de pendiente de la Figura 5.20 nos confirma errores de forma y promedios relativamente de bajos, del orden de ± 4 mrad para el comportamiento general de la faceta. Se observan pequeñas zonas focalizadas con valores mayores que es posible se deban exclusivamente al proceso de manufactura o al tratamiento reflectante de la faceta en su fabricación. Para el caso de la dirección de no-concentración, se comporta de acorde a lo estimado, presentando bordes con errores relativos en comparación con el buen comportamiento general del resto de la faceta.

El análisis de desviación focal de la faceta interna de Flabeg nos otorga suficiente información para considerar que la faceta presenta un comportamiento muy cerca de su diseño teórico (Ver Fig. 5.21). Se puede observar que en general existe un error de desviación focal del orden de 0 mm para la dirección de concentración y, consistente con el análisis del mapa de desviación de pendiente de la Figura 5.20, un comportamiento muy cercano al diseño para

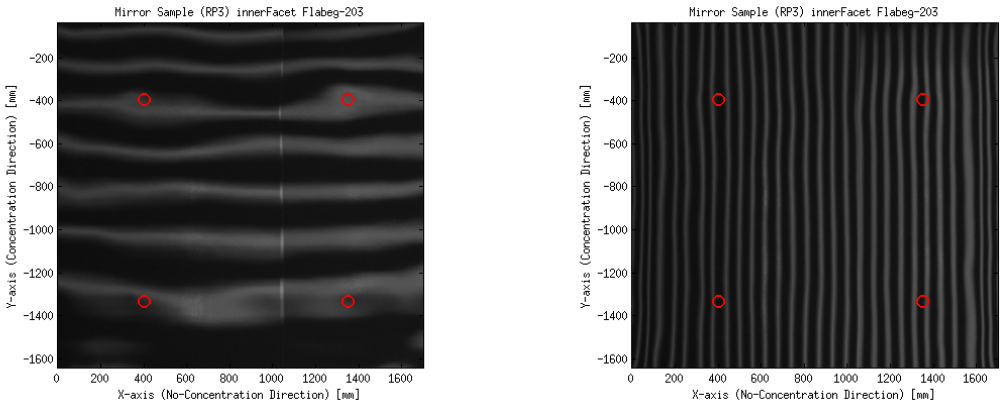

Figure 5.19: Faceta interna bajo el análisis de franjas. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha).

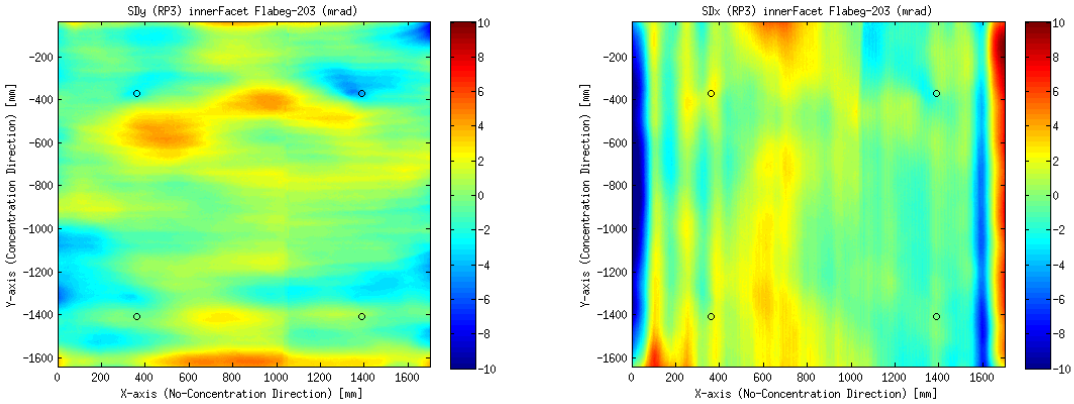

Figure 5.20: Mapa de desviación local de pendiente para la faceta interna Flabeg (mrad). Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha).

la mayor parte de la faceta a excepción de los bordes.

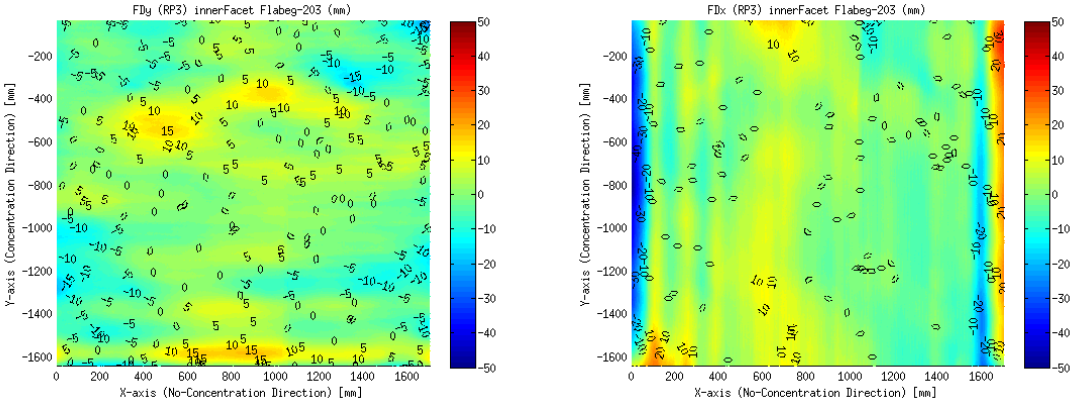

Figure 5.21: Mapa de desviación focal para la faceta interna Flabeg. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha).

En la Figura 5.22 se presenta el análisis de trazo de rayos con las características intrínsecas de la faceta interna de Flabeg. Es consistente que el buen comportamiento obtenido de los análisis anteriores produzca factores de interceptación relativamente altos. Si bien se puede apreciar cierto sombreado de regiones que no alcanzan el cien por ciento de interceptación (sombreados amarillos en la región central), esto puede deberse en parte al algoritmo de interpolación utilizado para reconstruir los elementos de la faceta.

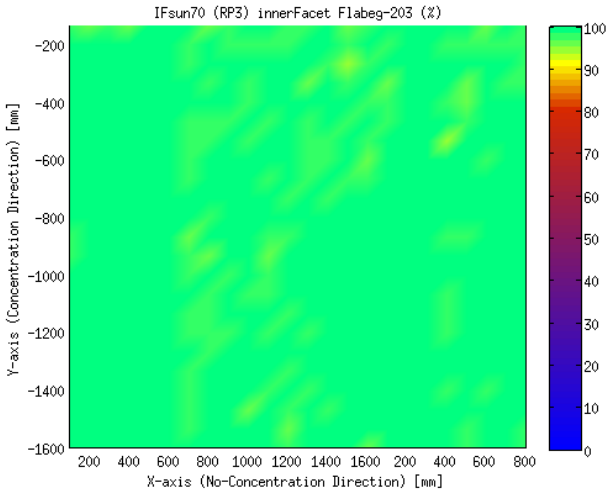

Figure 5.22: Factor de interceptación solar para la faceta interna de Flabeg con respecto a un receptor tubular de 70mm de diámetro.

En la Tabla 5.6 de resultados de la faceta interna de Flabeg, se presentan los valores que nos proporcionan información estadística sobre el comportamiento general de la faceta.

En ella se puede apreciar valores relativamente bajos y un comportamiento muy apegado al diseño teórico de la misma.

Tabla 5.6: Datos estadísticos sobre la faceta interna RP3 de Flabeg.

Variable	Medición	Descripción
SDy	1.7 mrad	Desviación de pendiente en dirección de concentración (rms)
SDx	2.4 mrad	Desviación de pendiente en dirección de no-concentración (rms)
FDy	5.74 mm	Desviación focal en dirección de concentración (rms)
FDx	8.24 mm	Desviación focal en dirección de no-concentración (rms)
$IF_{sun}70$	99.19%	Factor de interceptación solar en tubo de 70mm

El análisis realizado a la faceta externa (Fig. 5.23) del captador RP3 de Flabeg es similar al realizado a su faceta interna. La faceta se posiciona en un estilo de orientación vertical libre (como se puede apreciar de la Figura 5.4) sin tornillos de fijación sobre los cojinetes.

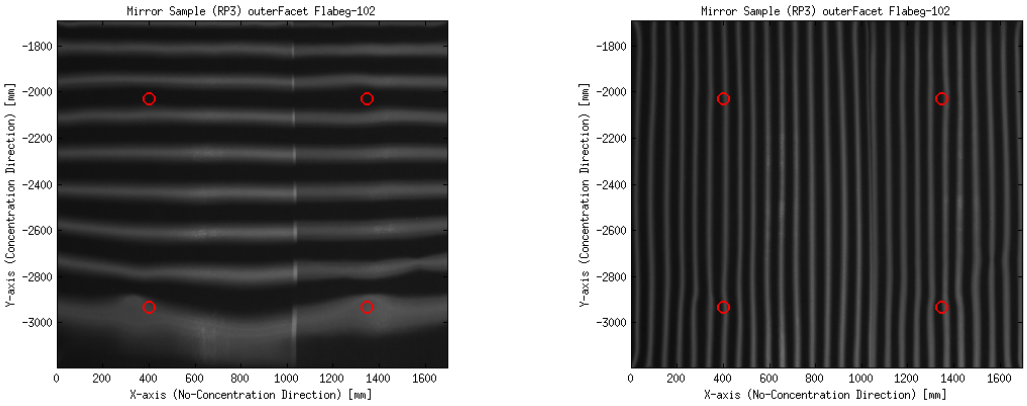

Figure 5.23: Faceta externa bajo el análisis de franjas. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha).

Como se puede apreciar del resultado del mapa de pendientes, los errores son relativamente bajos, causados únicamente por la aplicación de pegamentos de silicona que al solidificarse contraen áreas pequeñas de la faceta y por presión mecánica aplicada de manera fortuita posiblemente por el arreglo técnico.

En la Figura 5.25 correspondiente al mapa de desviación focal, se observan que estas distorsiones afectan levemente el factor de distancia focal a lo largo de la faceta. Se observan casi en la totalidad de la faceta errores promedio de ± 5 mm.

Consistente con el análisis realizado anteriormente, la Figura que representa el factor de interceptación de la facet 5.26 muestra un porcentaje de interceptación muy cercano al cien por ciento.

En la Tabla de resultados 5.13, se aprecian medias cuadráticas muy bajas y un factor de interceptación muy alto, casi cercano al cien por ciento. Esto nos da una idea de el grado de calidad de la faceta, bajo una prueba con condiciones muy poco demandantes.

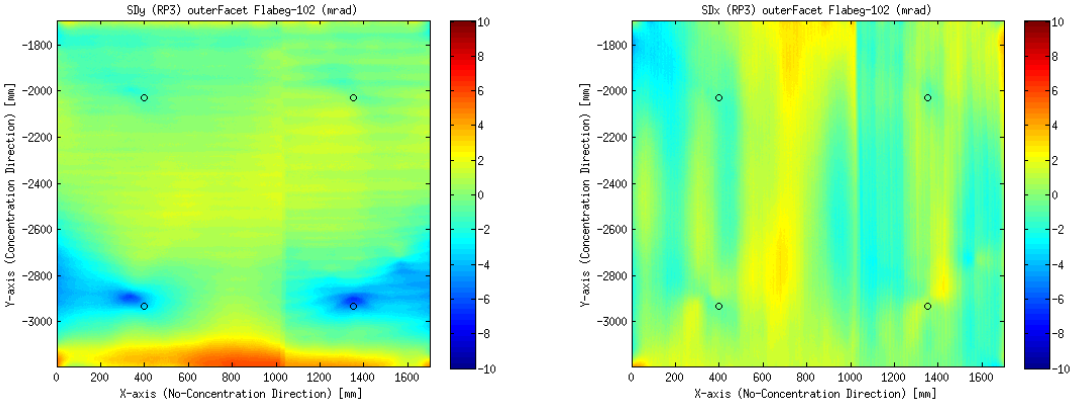

Figure 5.24: Mapa de desviación local de pendiente para la faceta externa Flabeg (mrad). Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha).

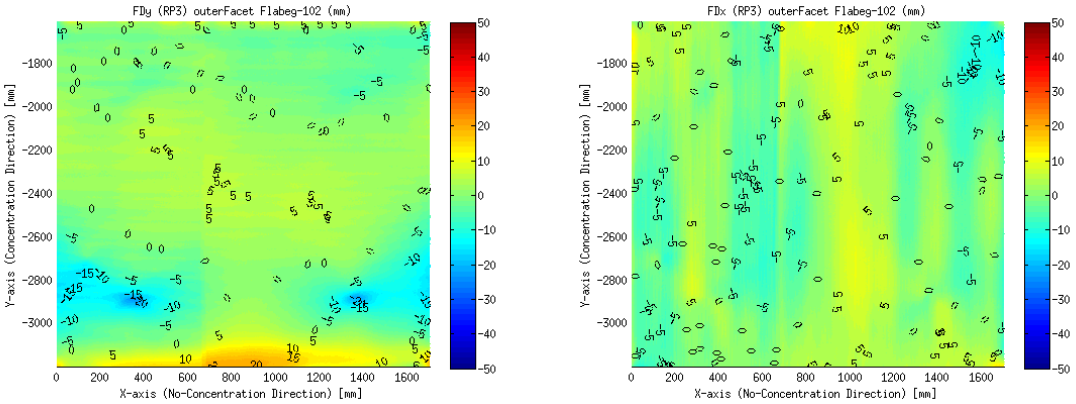

Figure 5.25: Mapa de desviación focal para la faceta externa Flabeg. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha).

Tabla 5.7: Datos estadísticos sobre la faceta externa RP3 de Flabeg.

Variable	Medición	Descripción
SDy	1.6 mrad	Desviación de pendiente en dirección de concentración (rms)
SDx	1.3 mrad	Desviación de pendiente en dirección de no-concentración (rms)
FDy	5.42 mm	Desviación focal en dirección de concentración (rms)
FDx	4.45 mm	Desviación focal en dirección de no-concentración (rms)
$IF_{sun}70$	99.95%	Factor de interceptación solar en tubo de 70mm

5.1.2 Reflectores planos deformables

A continuación, se presenta una descripción detallada de los resultados obtenidos de un análisis de reflexión de franjas realizado a un elemento de faceta deformable utilizado en concentradores de tipo helióstato. Los resultados corresponden a ambas direcciones de evaluación

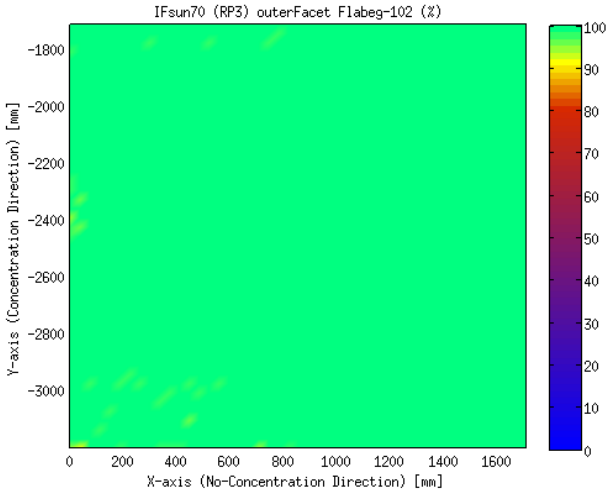

Figure 5.26: Factor de interceptación solar para la faceta externa de Flabeg con respecto a un receptor tubular de 70mm de diámetro.

con distintos modos de ajuste del sistema mecánico de deformación.

La faceta, como elemento singular, es un espejo de vidrio platinado de 3 mm de espesor y cuyas dimensiones lineales son del orden de 1300 mm de alto por 900 mm de ancho (Ver Figura 5.27). Las facetas planas son comúnmente utilizadas en dispositivos de tipo helióstato para re-direccionar los rayos provenientes del sol sobre un receptor de grandes dimensiones montado sobre una torre.

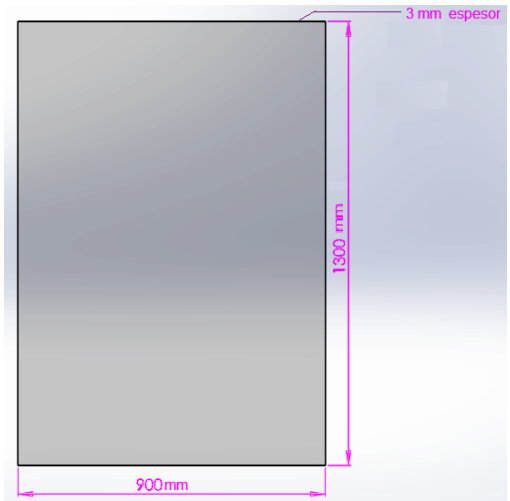

Figure 5.27: Esquema de dimensiones de faceta deformable.

Esta faceta en particular, cuenta con un dispositivo de tipo tornillo/chupón instalado en la parte posterior, lo que permite curvar el centro del espejo para realizar ajustes en su su forma y longitud focal (Ver Figura 5.28).

La faceta se montó sobre un armazón de metal para garantizar un soporte rígido y móvil, de tal manera que pudiera posicionarse en zonas de un campo de helióstato y pudiera simular su comportamiento bajo distancias de operación, como se observa en la Figura 5.28.

Figure 5.28: Estructura de faceta deformable. Tornillo de ajuste mecánico (izquierda). Marco de sujeción (derecha).

El arreglo experimental para el análisis de franjas de una faceta deformable es similar al realizado para facetas concentradoras de canal parabólico. Como se puede observar en el esquema de la Figura 5.29, las dimensiones del sistema son las que varían de manera considerable. El blanco lambertiano montado sobre la torre central se utiliza a modo de pantalla. La calidad del proyector es un tema relevante en el análisis de campo, pues es necesaria una potencia lumínica suficiente para que la densidad de las franjas sea suficiente para representar la función sinusoidal de la prueba, típicamente mayores a 1100 lúmenes. Además, dependiendo la posición del proyector en el campo, suelen ser posibles ajustes de perspectiva (el llamado efecto *keystone*). La cámara es otro de los instrumentos que bajo este esquema de análisis tiende a ser muy relevante. Debido al diseño estructural de la tecnología de torre central, las distancias en las cuales hay que trabajar son muy grandes, es necesario una lente con distancias focales lo suficientemente grandes que permitan alcanzar los reflejos de los helióstatos más lejanos, además que cuenten con una calidad óptica suficiente que no agreguen errores por distorsiones ópticas (efecto barril) a la adquisición de imágenes.

Las dimensiones del arreglo experimental son de acuerdo al diagrama que se muestra en la Figura 5.29. La faceta se posiciona a una distancia sobre el eje vertical de la torre, a unos 46 metros aproximadamente. La distancia focal de la faceta, calculada según la triangulación con la altura de la torre de 26 metros, es de 53.06 metros.

La Tabla 5.8 resume los valores de entrada para el análisis de la herramienta de reflexión de franjas. Los datos fueron obtenidos por el equipo técnico de la Plataforma Solar Hermosillo

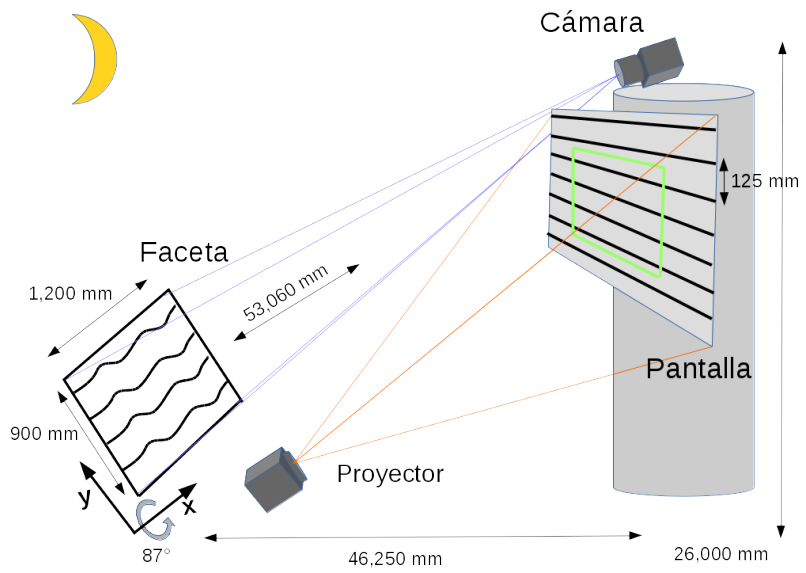

Figure 5.29: Arreglo experimental para la prueba de franjas de la faceta deformable.

[54] para el análisis de comportamiento de un prototipo de faceta deformable para helióstatos.

Tabla 5.8: Tabla de valores de entrada para el análisis de franja en la faceta deformable de helióstato.

Variable	Valor
Largo (mm)	900
Ancho (mm)	1200
Hcam (mm)	26000
Hfloor (mm)	500
R (mm)	46250
β (grad)	87
Distancia Focal (mm)	53060
Periodo Franjas (mm)	125

Faceta plana

Para el caso del análisis de la faceta deformable de helióstato, se puede apreciar en la adquisición de imágenes de la Figura 5.30, que las franjas reflejadas por la faceta en ambas direcciones presentan un grado de distorsión considerablemente baja en función de una faceta plana, lo que de antemano nos otorga cualitativamente una idea de la calidad de la misma. La idea de este análisis parte de la noción de que tan plana puede ser una faceta salida del proceso de fábrica y montada sobre un helióstato.

Como se puede observar en los mapas de resultados de desviación local de pendiente 5.31, las errores por deformación son considerablemente pequeños dado que se tuvo que escalar la

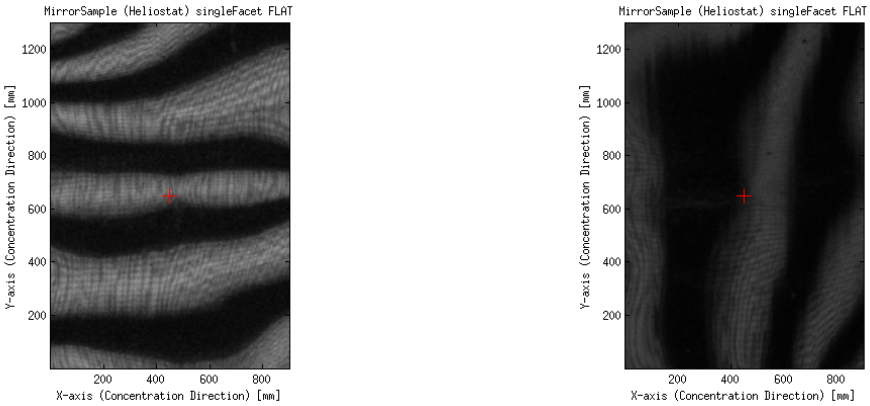

Figure 5.30: Faceta plana bajo el análisis de franjas. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de concentración (derecha).

imagen dentro de un rango de ±1 mrad para que pudieran ser visibles.

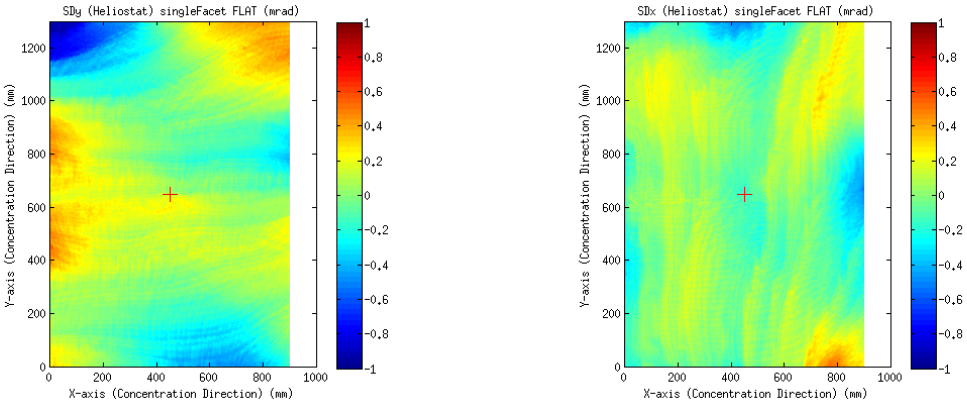

Figure 5.31: Mapa de desviación local de pendiente para la faceta plana (mrad). Dirección de concentración (izquierda). Dirección de concentración (derecha).

Si bien los errores de desviación son pequeños, estos tienen un impacto significativo en el error de desviación focal, puesto que este error está en función de la desviación de pendiente y la distancia focal, como ya ha sido planteado en capítulos anteriores. De tal manera que, aunque se tienen errores pequeños de pendiente, se traducen en desviaciones focales de ±100 milímetros, de acuerdo con la Figura 5.32.

La Tabla de resultados muestra las medias cuadráticas de los mapas de errores 5.9. En ellos se puede demostrar de una manera cuantitativa que pequeños errores de desviación de pendiente se traducen en grandes errores desviación focal.

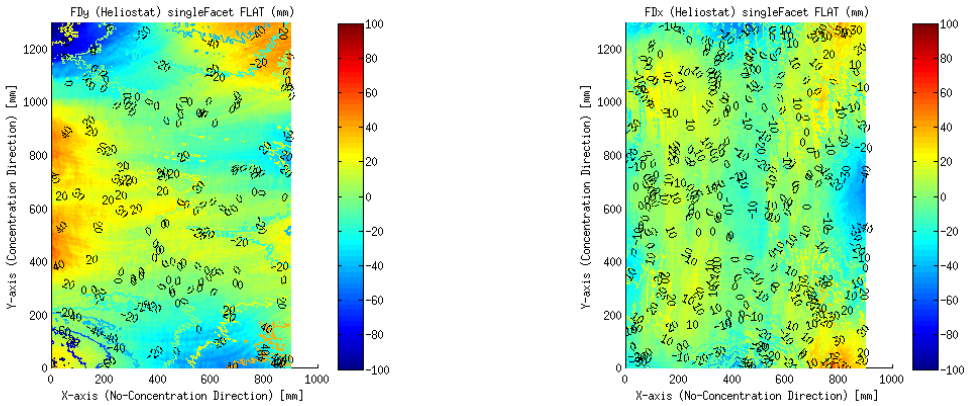

Figure 5.32: Mapa de desviación focal para la faceta plana. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de concentración (derecha).

Tabla 5.9: Datos estadísticos sobre la faceta deformable plana.

Variable	Medición	Descripción
SDy	0.22 mrad	Desviación de pendiente en dirección de concentración (rms)
SDx	0.13 mrad	Desviación de pendiente en dirección de no-concentración (rms)
FDy	23.34 mm	Desviación focal en dirección de concentración (rms)
FDx	14.32 mm	Desviación focal en dirección de concentración (rms)

Faceta deformada

Similar al análisis realizado para una faceta plana, en esta sección se realizó una prueba de franjas a la misma faceta pero utilizando el tornillo de deformación mecánica, con la finalidad de darle una curvatura de forma cóncava. Se puede apreciar, de la adquisición de imágenes (Figura 5.33), que las franjas reflejadas por la faceta en ambas direcciones presentan un grado de distorsión considerable con respecto a una faceta plana, lo que de antemano nos otorga cualitativamente una idea de la calidad de la misma. La idea de este análisis se basa en observar el comportamiento de la faceta utilizando el mecanismo de deformación. Si bien son solo pruebas preliminares, es posible comparar el grado de influencia que tiene un ligero ajuste en la curvatura del espejo con respecto a una faceta plana perfecta.

Es posible observar del mapa de desviación de pendiente (Figura 5.34) la afectación del tornillo de ajuste mecánico. Aunque cabe aclarar que debido a lo pequeño de estos errores fue necesario recomponer los ejes de visualización en el rango de ± 1 mrad para que esto fuera apreciable.

Si bien el ajuste realizado fue muy pequeño debido a que tensiones extremas en el vidrio son fácilmente capaces de quebrarlo, su afectación a la distancia focal resultó considerable, pues el mapa obtenido (Figura 5.35) tuvo que ser escalado hasta los valores máximos, del orden de ± 100 milímetros para una buena visualización.

La estadística de resultados para el caso de la faceta deformada está presenteda en la Tabla 5.10.

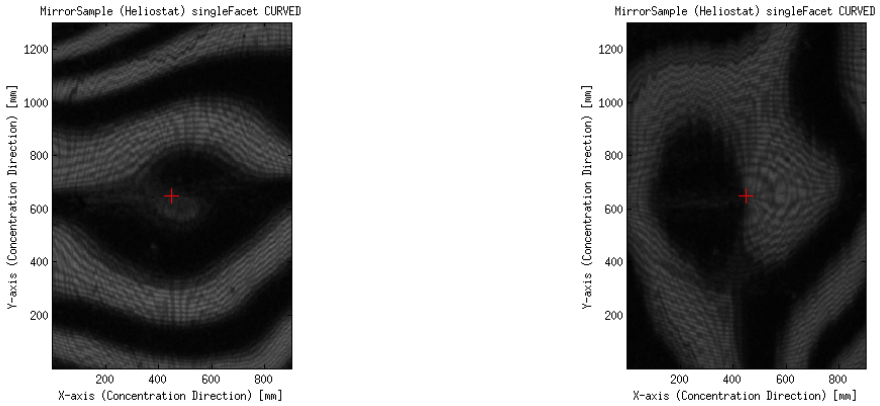

Figure 5.33: Faceta deformable bajo el análisis de franjas. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de concentración (derecha).

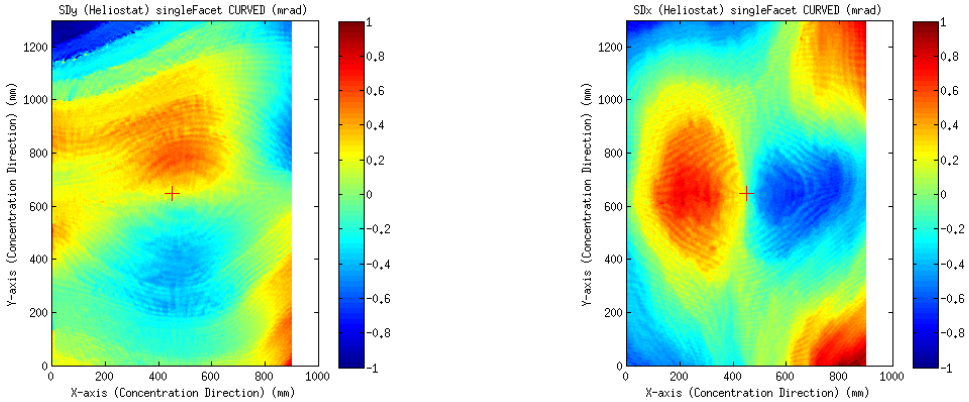

Figure 5.34: Mapa de desviación local de pendiente para la faceta deformable (mrad). Dirección de concentración (izquierda). Dirección de concentración (derecha).

Tabla 5.10: Datos estadísticos sobre la faceta deformada.

Variable	Medición	Descripción
SDy	0.27 mrad	Desviación de pendiente en dirección de concentración (rms)
SDx	0.34 mrad	Desviación de pendiente en dirección de no-concentración (rms)
FDy	29.28 mm	Desviación focal en dirección de concentración (rms)
FDx	36.36 mm	Desviación focal en dirección de concentración (rms)

Como puede apreciarse, se obtuvieron valores de media cuadrática muy pequeños para el caso de facetas planas con ajuste, pero valores mayores para desviaciones focales. Pues como se había explicado anteriormente, pequeños errores de desviación local inducen grandes errores a distancias focales mayores.

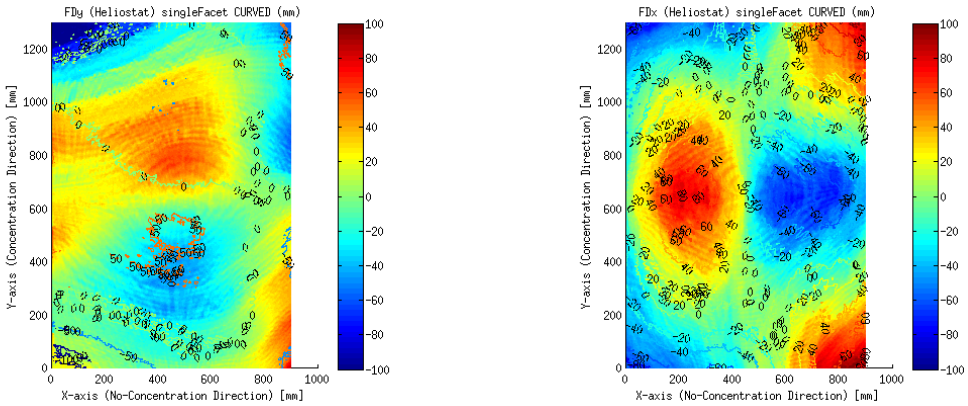

Figure 5.35: Mapa de desviación focal para la faceta plana. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de concentración (derecha).

5.2 Análisis en campo

Como parte de las metas definidas para el presente trabajo, se incluía el objetivo de aplicar los desarrollos en software y hardware hechos en el arreglo de laboratorio a plantas solares de generación de potencia de escala industrial. Para ello, había que identificar y superar las dificultades técnicas que podrían presentarse al extrapolar el arreglo de condiciones controladas, a uno expuesto a condiciones ambientales cambiantes.

A continuación se detallan, en concordancia con el análisis en laboratorio, las pruebas realizadas a concentradores solares de tamaño industrial instalados en plantas solares de generación de potencia. Un primer análisis se llevó a cabo a las facetas de un lazo de colector de canal parabólico instalado en una planta solar de canal parabólico demostrativa. En un segundo análisis, se realizó un análisis de reflexión de franjas a un helióstato de 32 metros cuadrados dividido en un arreglo de 25 facetas, instalado en una planta piloto de torre central.

5.2.1 Colectores de canal parabólico

Gracias a la concesión de una beca de investigación se logró el financiamiento para realizar una estancia de investigación en las instalaciones de la Agencia Nacional de Nuevas Tecnologías, Energía y Sustentabilidad Económica (ENEA) por sus siglas en italiano. Dicha beca fue otorgada en un proceso de concurrencia competitiva por la Unión Europea a través de su programa SFERA (Solar Facilities for the European Research Area) al Departamento de Energía Solar-Térmica de CENER, resultando premiado el proyecto **Parabolic Trough Mirror Modules Characterization by FOCuS Tool - Proposal P13043000040303**, derivado de éste trabajo de tesis. Los experimentos fueron llevados acabo en la unidad de pruebas de colectores solares de ENEA, en Cassaccia, Italia. La unidad, es una réplica construida con fines académicos de la planta de generación eléctrica de canal parabólico *Archimede*, instalada en Sicilia, Italia. El diseño de esta planta permite obtener de valiosa

información sobre el funcionamiento y las mejoras que se pueden realizar a las plantas solares de generación de potencia de canal parabólico.

En la Figura 5.36 se observan imágenes de la unidad experimental y el arreglo de los colectores.

Figure 5.36: Imágenes de la unidad de prueba de colectores solares ENEA. Cassaccia, Italia.

Los colectores instalados en la ENEA-SOLTERM tienen una longitud de 48 metros divididos en 4 módulos de 12 metros aproximadamente y conforman un lazo de cerca de 100 metros, tal como se puede observar del diagrama de la Figura 5.37. Las facetas internas (más cerca del tubo receptor) tienen una longitud de 1549 mm, y las facetas exteriores (más alejadas del tubo receptor) una longitud de 1350 mm. Ambas facetas comparten su anchura de 1200 mm. La distancia focal de diseño del colector es de 1810 mm.

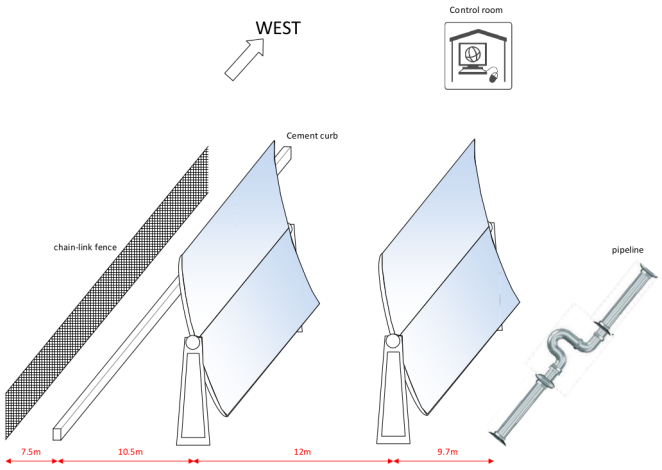

Figure 5.37: Esquema dimensional de los colectores de canal parabólico de ENEA.

Para poder caracterizar las facetas en el campo abierto de los colectores, fue necesario re diseñar varias partes del arreglo experimental. En principio, las distancias que se tenían

para un análisis en campo eran mucho mayores, por lo que fue necesario construir una más robusta que pudiera ser capaz de soportar la intemperie y que fuese lo suficientemente sólida para evitar vibraciones causadas por ráfagas de viento incidentes. Además, la necesidad de mapear el colector completo de una manera mucho más rápida requería el uso de una pantalla de mayor tamaño. Debido a lo anterior, se dispuso un arreglo de tubos de acero liviano y un sistema de doble pantalla de espuma plastificada. Habiendo diversos prototipos, éste arreglo fue elegido debido a su maleabilidad, su resistencia y su precio.

Las imágenes de la Figura 5.38 muestran el proceso de manufactura de la pantalla. En ellas se puede apreciar la densidad de la hoja y su calidad lambertiana. Además, la pantalla completa posicionada en relación al colector.

Figure 5.38: Imágenes del proceso de fabricación del módulo de caracterización para la prueba de franjas.

La pantalla lambertiana fue el elemento principal que se tuvo que tomar en cuenta para extrapolar el análisis de laboratorio al campo de pruebas. La cercanía de los demás elementos, y el amplio espacio que se tenía entre los lazos de colectores, permitió que no hubiera grandes modificaciones a los elementos de cámara y proyector. La habilidad de posicionar el colector al ángulo requerido por medio del control externo de sus motores permitió también simplificar el desarrollo de la experimentación.

El arreglo experimental mostrado en la Figura 5.39 nos da una idea del proceso de evaluación que se llevó a cabo en las campañas de caracterización. A simple vista, el arreglo podría parecer distinto al propuesto para cualificar facetas individuales, pero es necesario hacer notar que es un arreglo similar capaz de analizar ambas facetas del captador a la vez y se puede modificar el algoritmo de manera sencilla para que tome en consideración la variación de los ejes al analizar ambas facetas.

Se buscaba evaluar una sola faceta a una distancia de 2F (F=1810 mm), por lo que se utilizó un sistema de doble proyector alineado, para generar una imagen más ancha y extendida sobre la pantalla y que abarcara toda la faceta.

El mapa de desviación de pendiente de la Figura 5.41 nos confirma distribución local de errores de forma y al promedio de desviación RMS relativamente de bajos, del orden de ± 4 mrad para el comportamiento general de la faceta. Se observan pequeñas zonas localizadas con valores mayores que es posible se deban exclusivamente al proceso de manufactura o al tratamiento reflectante de la faceta en su fabricación. Para el caso de la dirección de

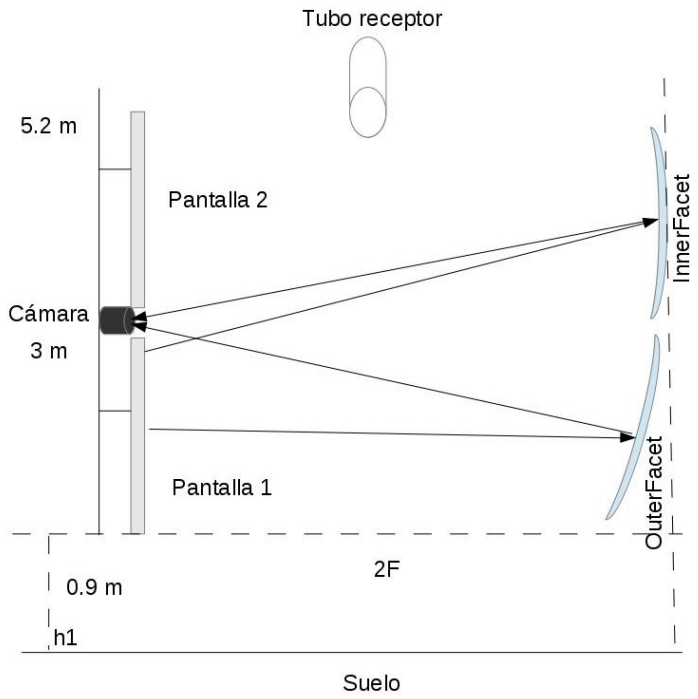

Figure 5.39: Arreglo experimental para el análisis de un lazo de captador de canal parabólico ENEA.

Tabla 5.11: Datos de entrada para el análisis de franjas del colector ENEA-SOLTERM.

Variable	Valor
Largo Interna (mm)	1549
Ancho Interna (mm)	1200
Largo Externa (mm)	1350
Ancho Externa (mm)	1200
gap1 (mm)	25
gap2 (mm)	9
Hcam (mm)	2440
Hfloor (mm)	40
R (mm)	3620
β (grad)	87
Distancia Focal (mm)	1810
Periodo Franjas (mm)	100

no-concentración, se comporta de acorde a lo estimado, presentando bordes con errores relativamente grandes en comparación con en comparación con el buen comportamiento general del resto de la faceta.

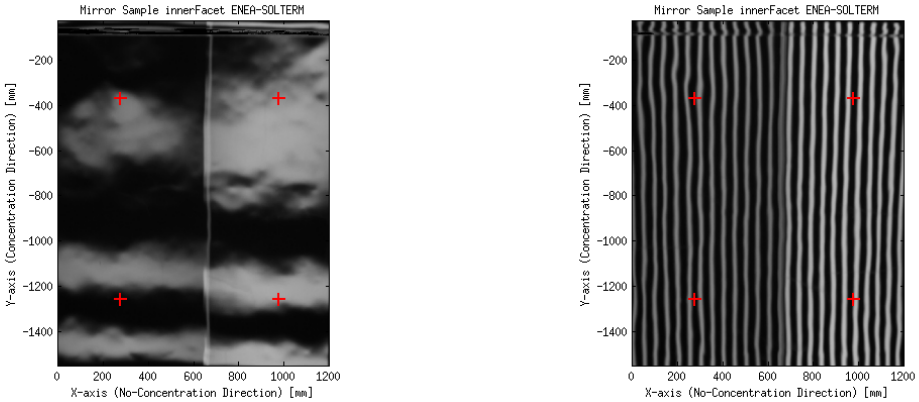

Figure 5.40: Faceta interna bajo el análisis de franjas. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha).

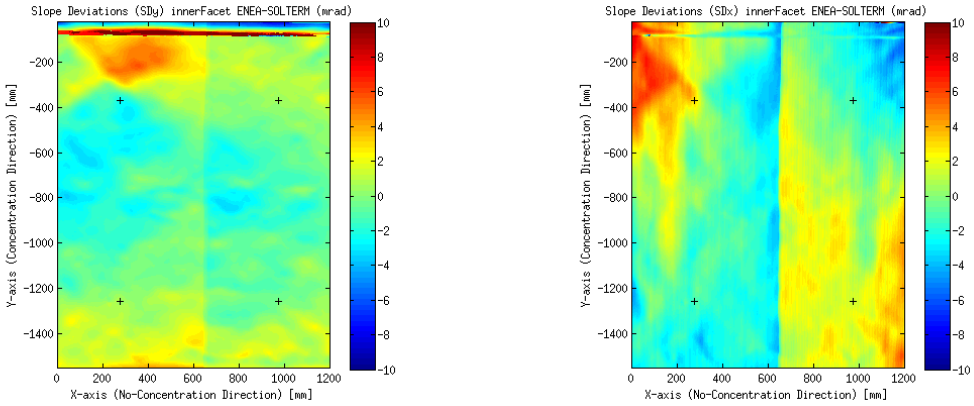

Figure 5.41: Mapa de desviación local de pendiente para la faceta interna ENEA (mrad). Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha).

El análisis de desviación focal 5.42 de la faceta interna de ENEA-SOLTERM nos otorga suficiente información para considerar que la faceta presenta un comportamiento muy cerca de su diseño teórico. Se puede observar que en general existe un error de desviación focal del orden de 7 mm para la dirección de concentración y, consistente con el análisis del mapa de desviación de pendiente de la Figura 5.41, un comportamiento muy cercano al diseño para la mayor parte de la faceta a excepción de los bordes.

En la Figura 5.43 se presenta el análisis de trazo de rayos con las características intrínsecas del colector ENEA-SOLTERM. Son consistentes aquellas regiones localizadas en donde los rayos se desvían de manera tan abrupta que no llegan a impactar al receptor. Se puede

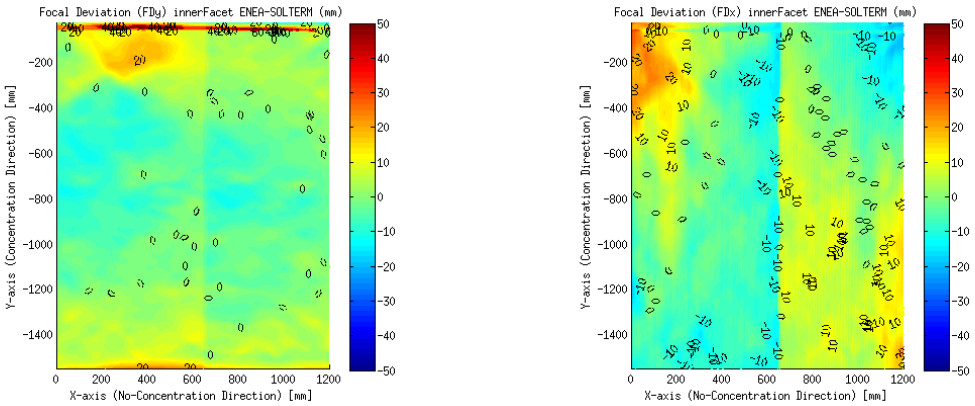

Figure 5.42: Mapa de desviación focal para la faceta interna ENEA. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha).

apreciar en el sombreado (zonas rojas y amarillas) las regiones que no alcanzan el cien por ciento de interceptación. Este comportamiento se debe principalmente a los grandes errores de desviación de la faceta, al cristal del receptor tubular que se alcanza a interponer en el análisis de franjas y a los posibles errores de interpolación del algoritmo.

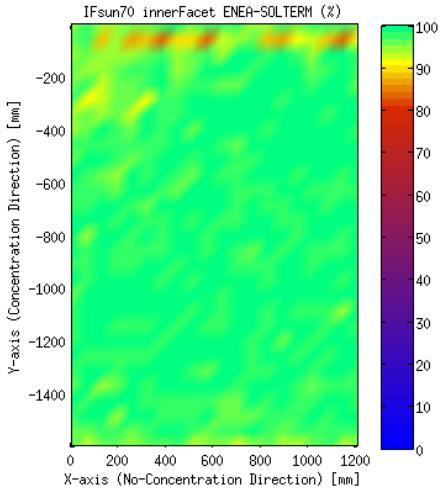

Figure 5.43: Factor de interceptación solar para la faceta interna de ENEA con respecto a un receptor tubular de 70mm de diámetro.

En la Tabla 5.12 de resultados de la faceta interna del colector ENEA-SOLTERM, se presentan los valores que nos proporcionan información estadística sobre el comportamiento general de la faceta. En ella se puede apreciar que las zonas localizadas con grandes errores de pendiente y la intromisión del receptor en la prueba impactan considerablemente en el factor de interceptación de la misma.

Para el caso de la faceta externa del colector de canal parabólico ENEA-SOLTERM, se

Tabla 5.12: Datos estadísticos sobre la faceta interna del colector ENEA-SOLTERM.

Variable	Medición	Descripción
SDy	2.1 mrad	Desviación de pendiente en dirección de concentración (rms)
SDx	2.3 mrad	Desviación de pendiente en dirección de no-concentración (rms)
FDy	7.72 mm	Desviación focal en dirección de concentración (rms)
FDx	8.22 mm	Desviación focal en dirección de no-concentración (rms)
$IF_{sun}70$	97.85%	Factor de interceptación solar en tubo de 70mm

puede apreciar cualitativamente del análisis de franjas de la Figura 5.44, que las franjas sufren pequeñas desviaciones en la parte cercana a los cojinetes de sujeción.

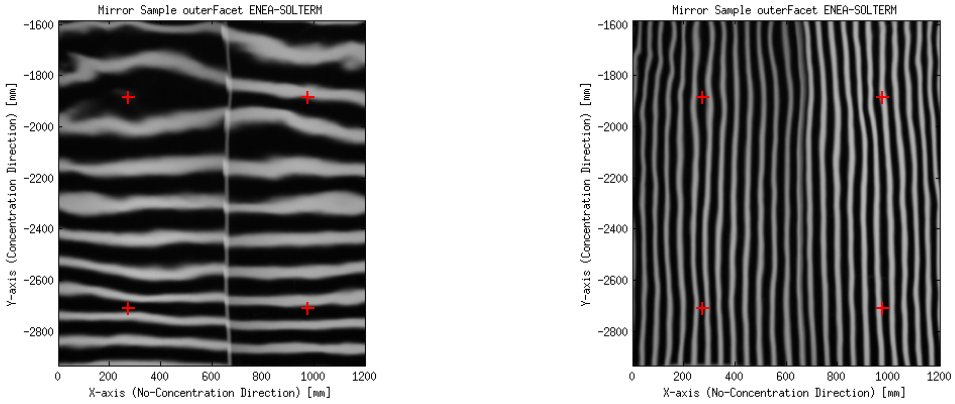

Figure 5.44: Faceta interna bajo el análisis de franjas. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha).

En el mapa de desviación de pendiente de la Figura 5.45 se confirman los errores en la desviación de pendiente de manera consistente con la deformación de las franjas. En particular, se observa un gran error de desviación en el cojinete de sujeción de la parte superior izquierda, debido posiblemente al estrés mecánico producido por el tornillo de fijación. Para el caso de la dirección de no-concentración, se comporta de acorde a lo estimado, presentando errores relativamente bajos en la zona de los bordes y esquinas.

Consistente con el mapa de desviación de pendiente, se observan grandes errores de desviación focal en la zona de sujeción superior izquierda (ver Figura 5.46). Errores de hasta 25 mm sobresalen de un comportamiento general cercano al diseño teórico.

En la Figura 5.47 se presenta el análisis de trazo de rayos de la faceta externa. A excepción de la esquina superior izquierda, se puede apreciar que el buen comportamiento obtenido produce factores de interceptación relativamente altos. Si bien se puede apreciar cierto sombreado de regiones que no alcanzan el cien por ciento de interceptación (sombreados amarillos en la región central), esto puede deberse principalmente al estrés mecánico del cojinete y en particular al algoritmo de interpolación utilizado para reconstruir los elementos de la faceta para las demás zonas.

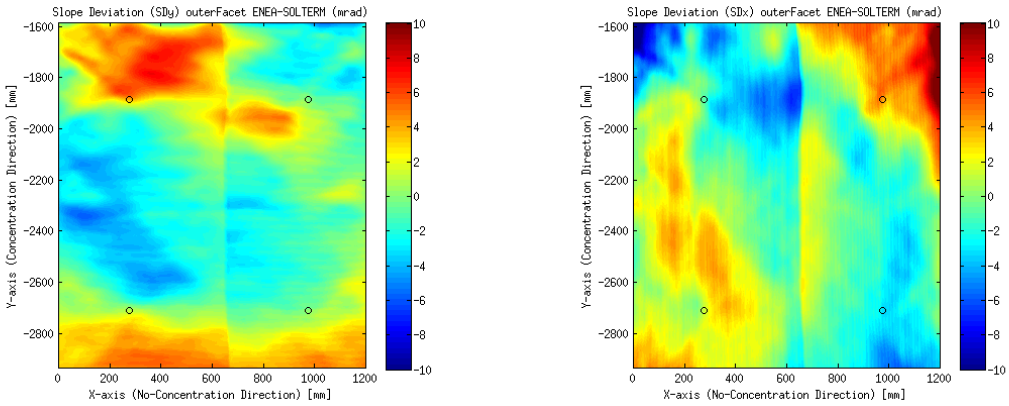

Figure 5.45: Mapa de desviación local de pendiente para la faceta interna ENEA (mrad). Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha).

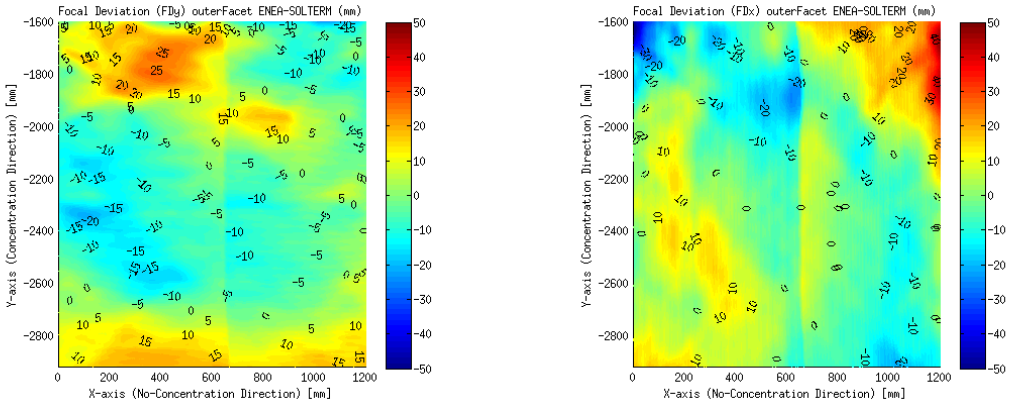

Figure 5.46: Mapa de desviación focal para la faceta interna ENEA. Dirección de concentración (izquierda). Dirección de no-concentración (derecha).

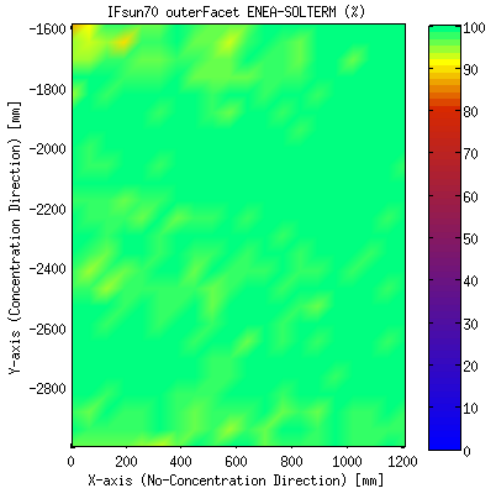

Figure 5.47: Factor de interceptación solar para la faceta interna de ENEA con respecto a un receptor tubular de 70mm de diámetro.

En la Tabla de resultados de la faceta externa 5.12 se presentan la información estadística sobre el comportamiento general de la faceta.

Tabla 5.13: Datos estadísticos sobre la faceta externa del colector ENEA-SOLTERM.

Variable	Medición	Descripción
SDy	2.8 mrad	Desviación de pendiente en dirección de concentración (rms)
SDx	2.9 mrad	Desviación de pendiente en dirección de no-concentración (rms)
FDy	10.09 mm	Desviación focal en dirección de concentración (rms)
FDx	10.61 mm	Desviación focal en dirección de no-concentración (rms)
$IF_{sun}70$	98.66%	Factor de interceptación solar en tubo de 70mm

5.2.2 Helióstatos

El CEToC (Campo Experimental de Torre Central) es el primer proyecto de CSP de torre central realizado en Latinoamérica. Inaugurado el día 28 de octubre de 2011, forma parte del proyecto nacional LACYQS (Laboratorio de Concentración Solar y Química Solar), el cual esta constituido por una red de grupos de investigación con el propósito de avanzar en el desarrollo de las tecnologías de concentración solar y química solar en México. El CEToC se encuentra ubicado en el kilómetro 21 de la carretera Hermosillo-Bahia de Kino y cuenta con 40 hectáreas de superficie. Su diseño permite albergar espacio hasta para 82 helióstatos (de 36 m^2 c/u), con una torre central de 32 m de altura y una variedad de diseños de receptor, además de un sistema de estación meteorológica y solarimétrica.

Figure 5.48: Plataforma Solar Hermosillo (PSH), Hermosillo, Sonora.

La torre tienes unas dimensiones de 8x8 m de base y 32 m de altura. Esta tiene instalada una superficie de pruebas (llamado blanco Lambertiano) y el espacio necesario (6 m x 7 m x 6 m) para la colocación de un receptor térmico. El blanco Lambertiano es una superficie de 6.7 m x 7.9 m a la cual se le aplico un polímero capaz de soportar altas temperaturas y a la vez reflejar los rayos directos del sol como una superficie Lambertiana.

La CEToC cuenta con la infraestructura necesaria para la evaluación, optimización y mejorar de los helióstatos, en las áreas de óptica (reflectividad, sombreado, bloqueo, desbordamiento óptico, distribución del flujo radiativo), diseño, fabricación y montaje, así como lo relacionado con instrumentación para su caracterización.

Helióstato UNAM-CC-36

Para realizar el análisis de un helióstato en campo, habría que partir de las consideraciones realizadas al esquema experimental de una faceta plana. Como se puede observar en la Figura 5.49, es posible representar el helióstato como una gran faceta concentradora y llevar a cabo un procedimiento experimental similar a los desarrollados en secciones anteriores. El proyector se sitúa a una distancia suficientemente grande para que la proyección de las franjas abarque lo más posible la pantalla. El blanco lambertiano montado sobre la torre central se

utilizado a modo de pantalla presenta enormes ventajas por su capacidad de utilizarse como una pantalla principal, la cual debido a su gran tamaño y a su posición elevada es capaz de mapear varios helióstatos a la vez, agilizando considerablemente el tiempo de operación de la prueba. La cámara se instala en la parte superior de la torre, de tal manera que pueda ser capaz de adquirir una imagen del helióstato entero.

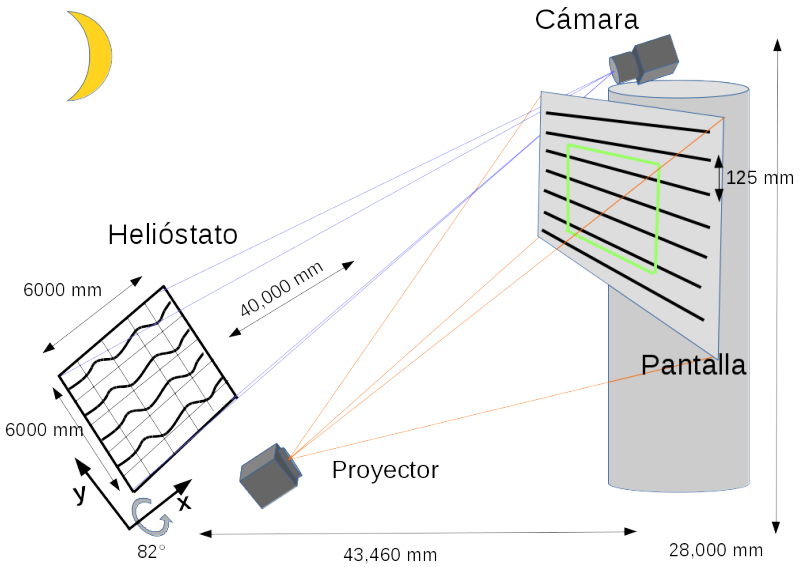

Figure 5.49: Arreglo experimental para la prueba de franjas aplicado a un helióstato.

Las dimensiones del arreglo experimental están basadas de acuerdo a los valores mostrados en la Tabla 5.14. El helióstato elegido para el análisis se encuentra alineado sobre el eje vertical de la torre, apuntando hacia el sur.

Tabla 5.14: Tabla de valores de entrada para el análisis de franjas del helióstato UNAM-CC-36A.

Variable	Valor
Largo (mm)	6000
Ancho (mm)	6000
Hcam (mm)	28000
Hfloor (mm)	2000
R (mm)	43460
β (grad)	82
Distancia Focal (mm)	40000
Periodo Franjas (mm)	125

El resultado de la adquisición de imágenes del helióstato se puede apreciar en la Figura 5.50. Las franjas reflejadas por el arreglo de facetas del helióstato en ambas direcciones presentan un grado de distorsión localizada, ya que se observan regiones (especialmente en

las esquinas de las facetas) con distorsiones considerables, posiblemente producto de estrés por los tornillos de ajuste o debido al marco deformado de las armaduras.

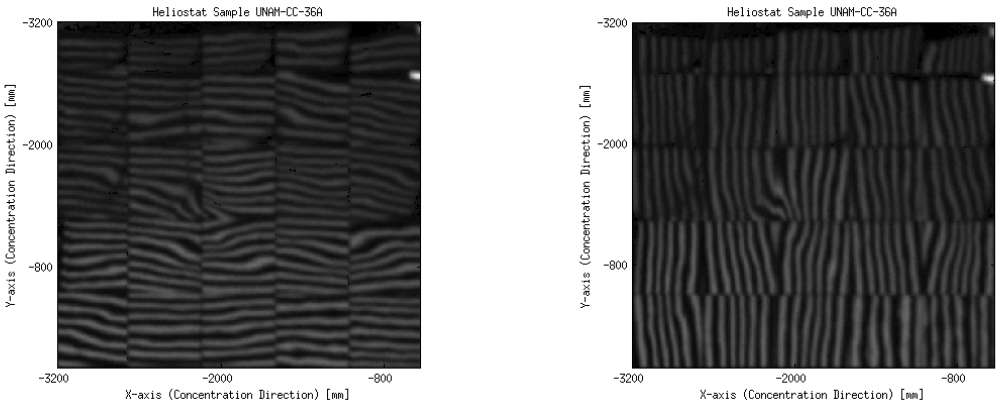

Figure 5.50: Faceta plana bajo el análisis de franjas. Dirección de concentración y (izquierda). Dirección de concentración x (derecha).

Si bien el arreglo experimental para el helióstato se puede tratar como un solo elemento de análisis, es necesario seccionar los elementos internos más pequeños (facetas) para poder realizar la caracterización de manera correcta. El helióstato presenta estos elementos individuales canteados y deformados por su propia estructura, es por ello que se diseño un algoritmo que secciona la faceta en los elementos que se indican (en este caso 25) a razón de las dimensiones iniciales, y los relaciona con distintas superficies (planos, cortes parabólicos, etc) y de esa manera observar sus desviaciones.

El caso particular de este helióstato se indica como canteado en ambos ejes. Lo que conlleva a relacionar la superficie reflectora como un corte parabólico en ambos ejes de concentración.

Como se puede observar en los mapas de resultado de desviación local de pendiente 5.51, las errores por deformación son pequeños para el grueso de las facetas, aunque se observan valores relativamente altos en zonas localizadas, principalmente las esquinas.

En la Tabla 5.15 se pueden apreciar las medias cuadráticas de cada faceta del helióstato. Consistente con el mapa, aquellas facetas que presentan grandes desviaciones (representadas por los colores rojo y azul) presentan un mayor valor cuantitativo. Desviaciones positivas en las direcciones x-y corresponden a inclinaciones del vector normal hacia la dirección negativa de los ejes correspondientes. La media cuadrática de la desviación de pendiente de la faceta se puede utilizar para caracterizar la deformación de la forma de la faceta en si misma y utilizarse como un valor de calidad. El promedio de la desviación de pendiente correspondería entonces a la desviación global en la geometría de la faceta. Esta información es de vital importancia a la hora de requerir el comportamiento de un campo completo, pues nos proporciona la identificación de aquellas facetas que requieren re-canteo o en casos extremos, una sustitución.

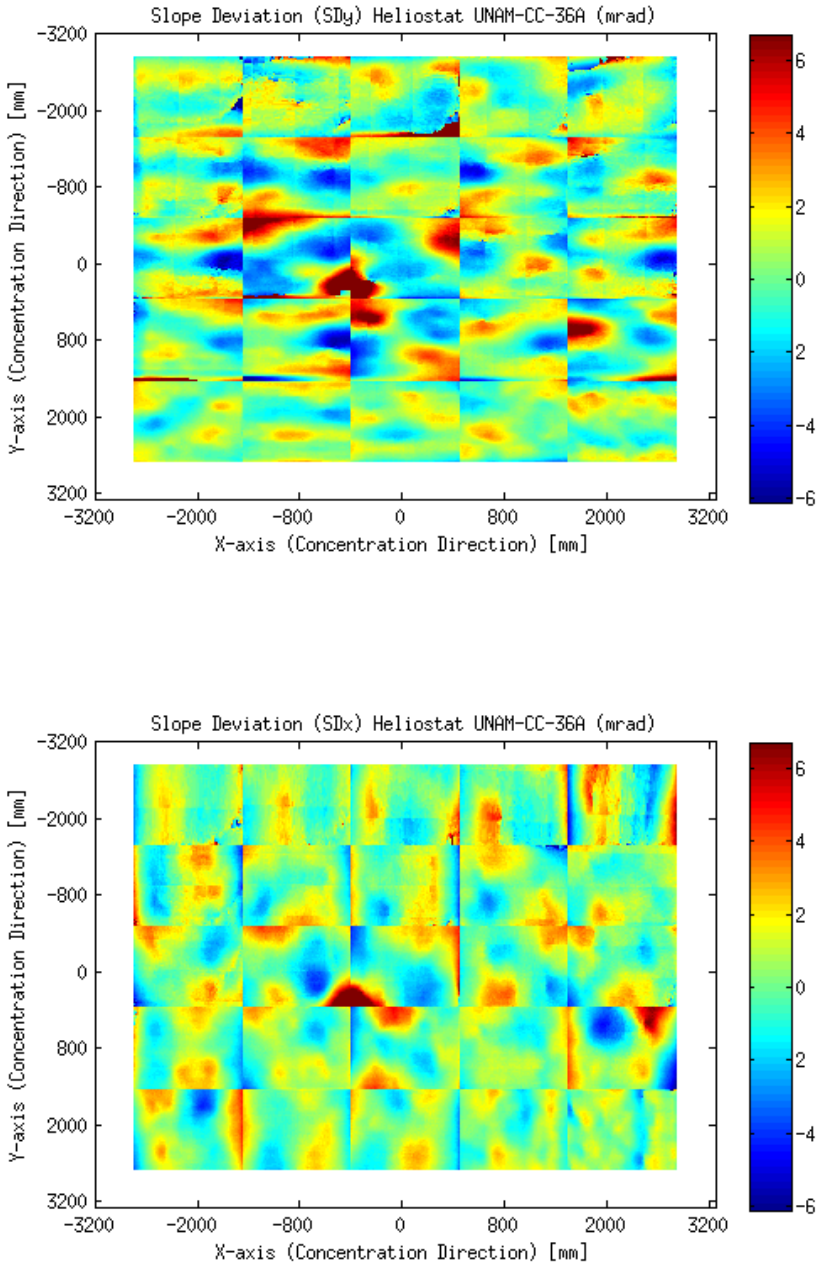

Figure 5.51: Mapa de desviación local de pendiente del helióstato (mrad). Dirección de concentración y (arriba). Dirección de concentración x (abajo).

Otro valor importante que se puede obtener a raíz de la desviación de pendiente se presenta en la Figura 5.52. El mapa de desviación focal nos indica la cantidad de error presente en el helióstato con respecto a su distancia focal ideal. Los resultados están presentados en milímetros, y cuantifican la razón del desbordamiento que llega a sufrir el helióstato sobre su target. En otras palabras, valores cercanos a cero significarían en una tendencia de los rayos a formar un spot bien definido y con forma compacta en la pantalla.

Los datos estadísticos se muestran en la Tabla 5.16, en ellos se cuantifica la cantidad media del error de desviación focal para un elemento de faceta en sus dos direcciones.

Tabla 5.15: Datos estadísticos Helióstato UNAM-CC-36A $SDy\|SDx$ (mrad).

	A	**B**	**C**	**D**	**E**
5	1.03‖0.90	1.21‖0.78	1.98‖1.11	0.93‖1.09	1.34‖1.60
4	1.06‖1.28	2.05‖0.99	0.79‖1.04	1.48‖1.18	1.38‖0.75
3	1.70‖1.15	3.02‖1.97	2.70‖2.15	1.25‖1.18	1.46‖1.03
2	1.57‖0.09	1.70‖0.89	2.05|1.18	1.25‖0.70	1.87‖1.83
1	0.82‖1.36	0.94‖0.90	0.78‖0.95	0.86‖0.79	0.94‖0.76

Tabla 5.16: Datos estadísticos Helióstato UNAM-CC-36A $FDy\|FDx$ (mm).

	A	**B**	**C**	**D**	**E**
5	82.59‖72.45	97.08‖62.83	158.78‖88.83	74.67‖87.63	107.91‖128.45
4	85.54‖102.75	164.79‖79.44	63.90‖83.25	118.93‖94.62	111.10‖60.39
3	136.21‖92.69	241.74‖157.69	216.78‖172.77	100.74‖94.60	116.84‖82.91
2	125.68‖87.52	136.40‖71.61	164.59|94.92	100.14‖56.72	150.26‖146.57
1	65.71‖109.30	75.75‖72.43	62.79‖76.29	69.38‖63.48	75.47‖61.12

Como resultado final, se muestra en la Figura 5.53 el análisis de trazado de rayos realizado para el helióstato evaluado en esta sección. En él, se puede apreciar tres mapas de contorno los cuales son representativos del spot ideal (rojo) para un día de octubre 13, el contorno de la imagen del spot real (verde), obtenido mediante una imagen tomada al blanco en el mismo día, y el spot simulado utilizando los valores promedio de desviación del mapa de desviación de pendiente. La metodología utilizada requiere calcular la proyección de las facetas concentradoras en el plano del target mediante el análisis del desplazamiento angular sufrido por cada faceta debido a sus coordenadas y a su error óptico.

Es observable que la metodología aplicada aquí no simula de manera perfecta las condiciones reales del spot, pues los contornos de ambos análisis no se simétricos en algunas regiones localizables. Si bien esto es una tarea por demás complicada, se puede explicar aquí debido a que para el trazado de rayos se utilizaron los valores promedio de cada una de las facetas, por lo que sus errores individuales son promediados con las zonas de la faceta que presentan menor distorsión, suavizado así su comportamiento en general. La razón de utilizar las desviaciones de pendiente promediada se puede justificar en este análisis debido

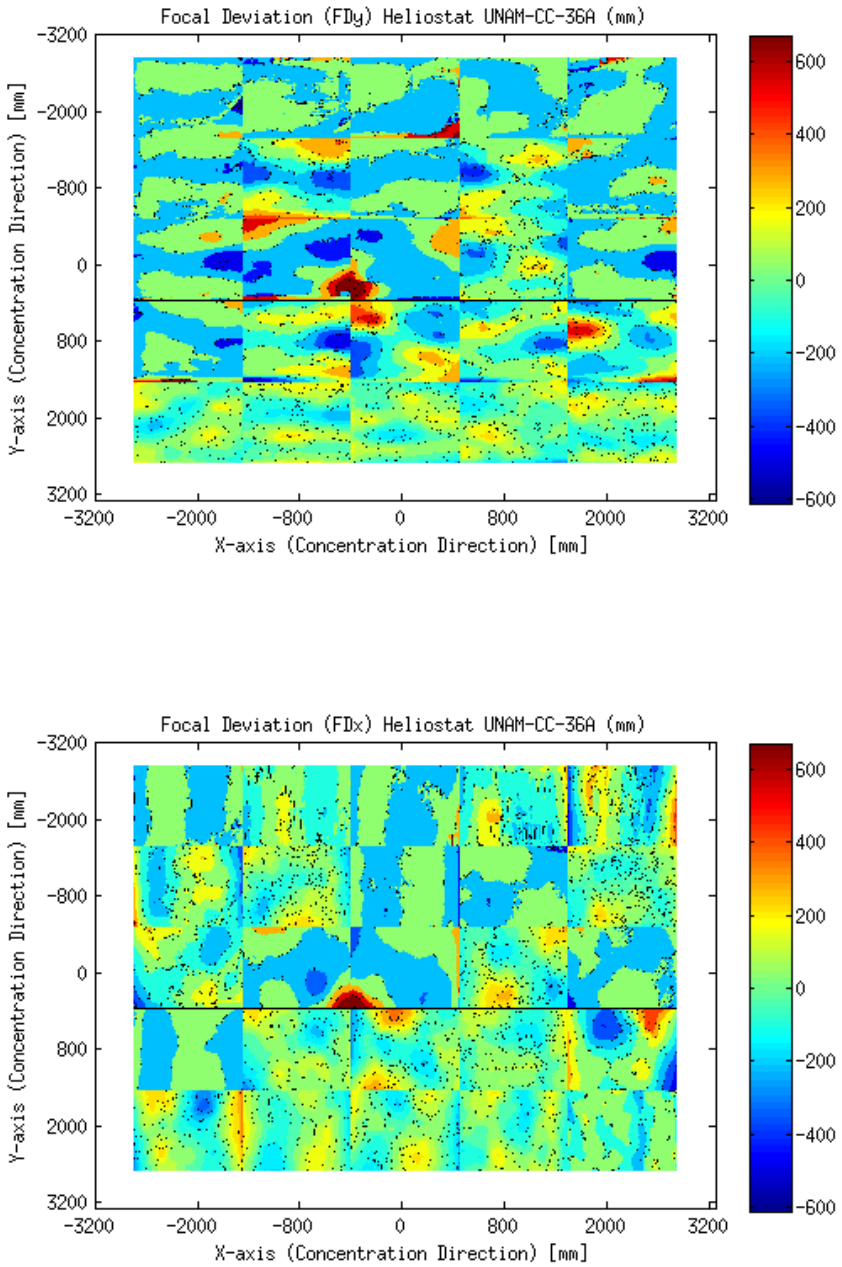

Figure 5.52: Mapa de desviación focal del helióstato. Dirección de concentración y (arriba). Dirección de concentración x (abajo).

a que seccionar un elemento geométrico tan grande, como es el caso del helióstato, de la misma manera que las facetas de canal parabólico en segmentos más pequeños, es computa-

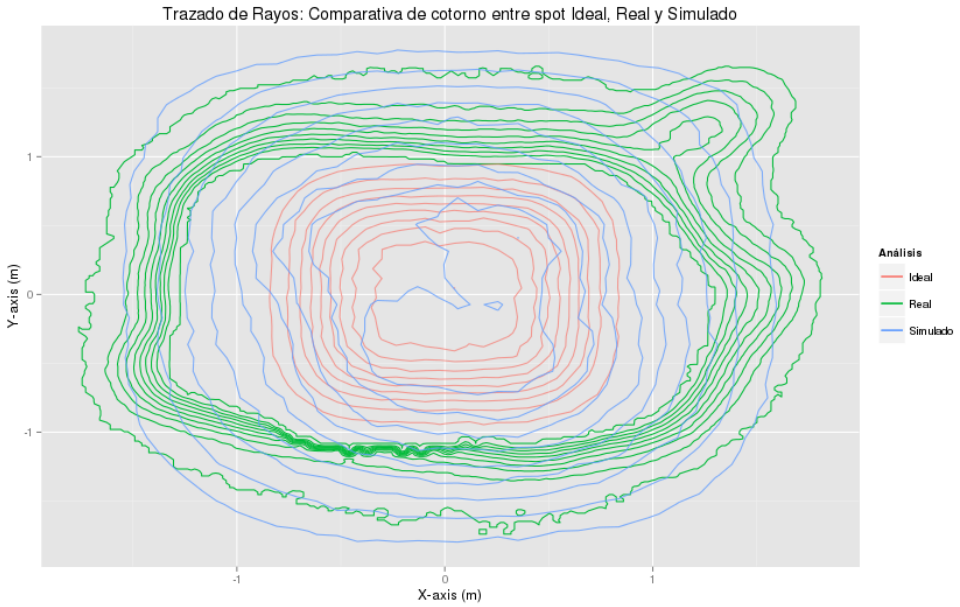

Figure 5.53: Trazado de rayos del helióstato UNAM-CC-36A para un 13 de octubre.

cionalmente desafiante. A pesar de ello se fue capaz de determinar su tamaño y su forma general.

Debido a que actualmente no existen software de trazado de rayos que sean capaces de implementar datos de desviación de pendiente como valor de entrada, se realizó este análisis por completitud y dejando como trabajo a futuro nuevas implementaciones sobre este tema.

5.3 Discusión: Dificultades, limitaciones y ventajas de la metodología

En ésta sección, se pretende identificar aquellas dificultades que se hicieron presentes a la hora de migrar los desarrollos logrados en el análisis de laboratorio (ver Sección 5.1) hacia el trabajo realizado al análisis en campo (Sección 5.2). Además, las afectaciones que se obtienen en cuestión de calidad y precisión de los datos finales por las modificaciones al ambiente controlado y una serie de propuestas como soluciones a estas limitaciones.

Como discusión final, se realiza un análisis detallado de las ventajas que la técnica aquí desarrollada presenta sobre otras técnicas desarrolladas por otros autores.

5.3.1 Dificultades y limitaciones presentes en la metodología desarrollada

La implementación de la metodología para el análisis de laboratorio presenta numerosas facilidades sobre el análisis en campo. Inicialmente permite controlar con gran precisión las

mediciones del arreglo geométrico necesario para llevar a cabo el cálculo de la desviación de pendiente. Además, el control de las condiciones ambientales es una pieza clave para obtener los resultados de manera correcta.

Un factor crucial a considerar a la hora de migrar el desarrollo hecho en laboratorio al análisis en campo, parte de el análisis de incertidumbre realizado con anterioridad en el capítulo de Metodología. La medición del valor de distancia entre el colector y la pantalla en el análisis en campo se torna más compleja por las dimensiones del arreglo, lo cual es una pieza clave para reducir la incertidumbre de la medición. Es deseable para este caso, el uso de herramientas de medición láser de tal manera que se obtengan valores más precisos y reducir de manera considerable el error de incertidumbre. Otros factores a destacar también se incluyen en la rugosidad del terreno, condiciones cambiantes de iluminación y de clima, viento fuerte que pudiese modificar la posición de la pantalla, temas de seguridad industrial, etc.

Si bien las dificultades son pocas y se pueden superar con una instrumentación más sofisticada, es necesario el diseño de una estructura de análisis robusta, que incluya todas estas consideraciones y que permita conjuntar la automatización llevada a cabo en el software, con una automatización mecánica para ofrecer un servicio de caracterización completo.

En lo que respecta a una comparativa entre las dificultades encontradas a la hora de implementar la metodología a distintas tecnologías de concentración solar, en particular de canal parabólico y de torre central, se ha encontrado que la limitación más grande corresponde a la resolución necesaria de la cámara para llevar a cabo el análisis. En el caso del colector de canal parabólico, y debido a su distancia de análisis, es posible adquirir imágenes con gran resolución de secciones individuales del lazo completo, para después recrear el sistema completo. A diferencia del sistema de torre central, un grupo grande de helióstatos se encuentran típicamente a una distancia de cientos de metros del arreglo cámara-pantalla, lo que requiere un sistema de adquisición más sofisticado que incluya lentes de acercamiento y un sistema automatizado para la localización de los mismos, y sobre todo, permita cubrir gran parte de la matriz de pixeles de la cámara para obtener la máxima resolución posible en el análisis.

5.3.2 Ventajas del desarrollo FOCuS con respecto a otras técnicas

La herramienta FOCuS desarrollada en este trabajo de tesis presenta numerosas ventajas con respecto a la implementación de otras técnicas para la caracterización de colectores solares. En primera instancia, el uso de la metodología de reflexión de franjas provee un detalle de información sobre la superficie sin precedente. Se puede hablar típicamente de más de un millón de puntos por faceta, lo que la coloca en la técnica con mayor resolución disponible en el mercado. Un segundo punto a destacar, es el hecho de que requiere de un arreglo experimental relativamente simple y de muy bajo costo. La necesidad de equipos de medición con baja sofisticación permiten implementar esta herramienta en las múltiples etapas de desarrollo de un proyecto termosolar sin aumentar considerablemente los costos de generación, garantizando incluso, su máximo rendimiento óptico. En particular, la herramienta FOCuS utiliza modificaciones matemáticas en su núcleo que la diferencian de otras metodologías

de reflexión de franjas desarrolladas por otros equipos de investigación. La implementación de la metodología de *Detección Directa de Fase* para recuperar la fase y el *Algoritmo de desempaquetado basado en la clasificación de confiabilidad* para resolver el problema del empaquetado, permite llevar a cabo el cálculo de la desviación de pendiente con una sola imagen por faceta. Esto reduce considerablemente los tiempos de cómputo, pues típicamente se reportan del orden de 16 a 24 imágenes de alta resolución por faceta, y considerando que un colector puede llegar tener decenas de facetas, el gran volumen de información que se requiere manejar se torna en un problema serio. La necesidad de requerir tantas imágenes para realizar el procesamiento no es un problema exclusivo de capacidad de cómputo, adquirir tantas imágenes sin modificar sus condiciones iniciales en un arreglo en campo es una tarea muy compleja, pues todos los elementos del sistema están expuestos a las condiciones ambientales. De tal manera que la herramienta desarrollada en este trabajo provee una valiosa oportunidad de superar estos inconvenientes.

Chapter 6
Conclusiones y perspectivas

El objetivo planteado para este trabajo de tesis consistía en desarrollar una metodología de caracterización óptica basada en la técnica de reflexión de franjas que permitiera la cualificación de diversos concentradores solares de manera eficiente, robusta y de bajo costo, y que fuese capaz de superar las limitaciones reportadas en técnicas previas. Para ello, fue necesario realizar una búsqueda exhaustiva de las distintas técnicas de caracterización óptica propuestas a lo largo de los años e identificar sus virtudes y debilidades, de tal manera que se pudieran determinar aquellos factores que intervienen de manera significativa en análisis.

Las pruebas ópticas de baja preción, a pesar de su rudimentaria aplicación, permitieron darle la importancia necesaria y poner sobre la mesa el tema de la necesidad de evaluar las superficies ópticas y de garantizar su correcta manufactura. Por su parte, los trazadores de rayos fueron las primeras herramientas sofisticadas que permitieron por primera vez estimar el comportamiento óptico de un sistema de concentración solar y con ello optimizar su funcionamiento. Este es un tema que ha continuado en desarrollo hasta nuestros días y que ha permitido obtener modelos cada vez más precisos. Las técnicas de caracterización basados en sistemas láser permitieron por primera vez obtener resoluciones sobresalientes y mediciones directas sobre la pendiente de la superficie bajo análisis, a pesar de tener arreglos muy complejos y ser difícil su implementación en campo, las convertía en tecnicas ideales para el desarrollo y cualificación de superficies reflejantes. Una de las técnicas que ganó mucha importancia debido a su robustez fue la fotogrametría. Debido a que las hojas de vinilo se podían adherir a cualquier superficie, fue capaz de adaptarse a casi cualquier tipo de concentrador. El hecho de la existencia de software comercial lo hacía una herramienta muy solicitada. Su mayor desventaja radica en que que es una técnica que consume mucho tiempo de implementar y de muy baja resolución. A raíz de las limitaciones en las técnicas anteriores, se empezaron a desarrollar nuevas metodologías para la caracterización óptica de superficies que de alguna manera sobrellevara las desventajas de métodos invasivos o de arreglos complejos. Uno de los primeros desarrollos consistió en el método del observador distante. Este método tiene la capacidad de obtener las desviaciones en la pendiente de manera rápida y con un arreglo bastante simple aunque solo funciona para sistemas de canal parabólico. Además, requiere de largas distancias para su aplicación, lo que en una planta comercial puede llegar a ser complicado de implementar. Es por ello que este método no resolvía por completo la problemática para las tecnologías de concentración solar.

La técnica de reflexión de franjas presentada en este trabajo, es un principio de medición

que ha probado ser una herramienta valiosa para la caracterización especular. Puede ser diseñada para caracterizar amplias superficies y ha sido probada en la mayoría de los desarrollos de la tecnología de concentradores solares. Su gran ventaja frente a las demás técnicas desarrolladas es su simplicidad en el arreglo, el bajo costo de sus componentes y el corto tiempo que se requiere para efectuar las mediciones. Además, su resolución depende prácticamente de la densidad del sensor de la cámara en uso, permitiendo tener un gran número de puntos de caracterización en un arreglo sencillo y con un costo relativamente bajo. Para desarrollar esta metodología, fue necesario comprender a detalle la teoría detrás del método y e implementar un modelo matemático general que permitiese ajustarse a un arreglo experimental similar al que se tiene en la etapa de producción de facetas y en condiciones de operación en planta.

Conclusiones sobre el desarrollo de la herramienta FOCuS

El desarrollo de la herramienta **FOCuS** (*Fringe Optical Characterization of Surfaces* por su acrónimo del inglés), se logró en base a una estrecha colaboración entre la Universidad Nacional Autónoma de México y el Centro Nacional de Energías Renovables de España. Esta herramienta, concebida como una aplicación individual o *stand-alone*, es capaz de instalarse en distintos sistemas operativos y funciona como una unidad independiente, la cual permite realizar el análisis de franjas y generar resultados de manera automatizada. La herramienta es capaz de expresar la precisión de la forma geométrica de la faceta en término de varios parámetros. En particular, la desviación local de pendiente (SD) y la desviación focal (FD) nos otorgan la desviación de la forma geométrica de una muestra con respecto a su forma ideal. Además, a través de un *script* especialmente diseñado en el trazador de rayos Tonatiuh, se introducían promedios de estos valores de tal manera que una superficie podía ser representada en un espacio simulado, analizando así la trayectoria de los rayos solares.

Los logros en el desarrollo de la herramienta FOCuS como metodología de caracterización de concentradores solares se puede resumir de la siguiente manera:

- Se logró desarrollar la herramienta de caracterización de concentradores solares FOCuS como una aplicación, capaz de instalarse en distintos sistemas operativos y funcionar de manera individual.

- La herramienta fue capaz de operar exitósamente tanto en un arreglo de laboratorio, como en pruebas de campo.

- El modelo geométrico desarrollado se pudo implementar efectivamente para analizar diversos tipos de concentradores solares.

- Las implementaciones realizadas al modelo matemático permitieron obtener resultados de una manera más robusta y eficiente, reduciendo las posibles fuentes de error y la disminución en el tiempo de medición requerido para la prueba.

- FOCuS es capaz de obtener resultados de desviación local de pendiente y desviación focal con una resolución sin precedentes y con altos valores de precisión en un arreglo de bajo costo, compacto y robusto.

- Se logró integral los resultados de desviación de pendiente generados por la herramienta con el software de trazo de rayos Tonatiuh, lo que permitía obtener no solo información sobre la desviación de la superficie, sino una simulación detallada del comportamiento óptico dela superficie en un entorno de operación.

Conclusiones particulares sobre el análisis de captadores

En lo que respecta al análisis de captadores de canal parabólico, se realizaron pruebas de caracterización para los distintos modos de operación de las facetas. Es importante destacar que si bien se tuvo acceso a dos muestras de facetas de las empresas más importantes de construcción del ramo, el análisis no se realizó con el fin de comparar la calidad de fabricación de una faceta con respecto a otra. Por el contrario, se buscaba destacar que a pesar de que ambas facetas se encuentran (tecnológicamente hablando) en el extremo del estado del arte, el modo de evaluación de la faceta puede sumarse a los errores presentes en la faceta por su proceso de manufactura y afectar de manera considerable a los parámetros de calidad propuestos, por lo que se requiere establecer una normativa que tome en cuenta estos factores.

La faceta interna RP3 de Rioglass muestra valores de RMS de su media cuadrática del orden de más de 3 mrad para ambas direcciones, mientras que su desviación focal supera los 11 milímetros en la posición vertical anclado. Para el caso de su faceta externa, estos valores suelen reducirse un poco debido a las dimensiones del espejo. A pesar de que la influencia de la posición es menor, se puede apreciar que los desviaciones de pendiente (particularmente en el eje vertical) son mayormente afectados por el anclaje de los tornillos sobre sus cojinetes, permitiendo así valores de SDy del orden de 2 mrads y SDx de 3.1 mrads.

El análisis comparativo de la influencia de gravedad viene a sumar al argumento de que la calidad de una faceta puede ser afectada por las condiciones de evaluación, pues ésta depende considerablemente del modo de análisis al que es sometido. En él se puede apreciar claramente la reducción de los errores tanto en su geometría, como a las tensiones generadas por los soportes. Variaciones obtenidas del orden de 0.6 mrads son considerables para una una faceta de este tipo, pues representa una variación del orden de 30% atribuido a la afectación de las deformaciones incurridas por acción de la gravedad sobre su propio peso. Estos nos plantea una disyuntiva interesante al diseñar dispositivos de este estilo, pues habría que considerar implementar estructuras de soporte más rígidas que compensen los errores causados por la naturaleza del sistema.

Conclusiones similares pueden obtenerse del análisis a la faceta RP3 de Flabeg, pues para realizar este análisis se requirió la construcción de una superficie de evaluación especializada, que soportara la faceta recostada sobre ella, sin incluir los tornillos de sujeción. Si bien este análisis nos ofreció resultados interesantes y una perspectiva de caracterización distinta, no representa las condiciones reales de operación y debe usarse únicamente como control de calidad para una faceta en etapa de diseño y construcción.

Para el caso de las facetas de captador parabólico se puede entonces resumir lo siguiente:

- Que es necesario contar con una metodología de caracterización robusta y eficiente para las líneas de producción y operación de plantas de colectores solares.
- Que la posición y orientación de la faceta es clave para su caracterización.
- Que el modo de montaje, ya sea vertical-horizontal / anclado-libre a una estructura, afecta considerablemente su forma y los valores de desviación.
- Que el proceso de conformado, platinado e instalación de cojinetes es un tema que requiere un proceso de mejora continua.

En lo que respecta al sistema de torre central, y en particular a los helióstatos, fue posible aprovechar las características intrínsecas del sistema para realizar una evaluación de un helióstato completo en un tiempo considerablemente corto. La ventaja que esta técnica presenta en este ámbito es destacable, ya que hasta la implementación de las metodologías de reflexión de franjas a estos sistemas, había sido una tarea compleja y muy demandante. Si bien aún se pueden realizar mejoras a la técnica, se puede apreciar de los resultados obtenidos que las desviaciones son del orden de los datos esperados. Valores promedio de 1 mrad son consistentes para facetas planas de este tipo de sistemas, pues el mecanismo de cuatro tornillos utilizado para el canteo crea tensiones transversales entre los mismos, lo que deforma considerablemente los bordes y en particular las esquinas. Un análisis de trazo de rayos nos ofrece una perspectiva general de la capacidad que tienen estos resultados calculados para proporcionar una caracterización detallada y sin precedentes de la superficie.

Áreas de oportunidad

Si bien se realizó un análisis exhaustivo de los modos de operación y se compararon facetas a distintos grados de inclinación, no fue posible realizar la caracterización de facetas en un modo completamente horizontal debido a las consideraciones de espacio en el laboratorio. Sería interesante determinar la afectación de la superficie recostada sobre una superficie plana y sobre una muestra de armazón de colector para realizar una comparación detallada de los casos extremos de operación. En la misma temática, realizar una campaña de medición más extensa para colectores de canal parabólico en campo, de tal manera que se pueda mapear distintas facetas y observar su comportamiento haciendo girar el colector sobre su eje.

Para el caso de helióstatos existe una gran área de oportunidad a la hora de incluir los resultados obtenidos en los mapas de desviación a un trazador de rayos. Sería deseable desarrollar una herramienta complementaria que facilitara la aplicación de estos valores para reconstruir la posición de las facetas y realizar con ello un trazado de rayos más efectivo.

Trabajo a futuro

Existen diversos temas que pueden destacarse como trabajo a futuro, y todos ellos están en función de complementar las pruebas aquí realizadas. Una primera propuesta se basa

en un estudio detallado de las afectaciones mecánicas y gravitatorias al diseño de facetas concentradoras. Un estudio como tal no ha sido desarrollado y presentado a la comunidad científica, lo que resulta en material interesante y que pudiese fungir como base para establecer una normativa de evaluación al diseñar y fabricar colectores solares. Otra propuesta interesante radica en el diseño de un sistema móvil de tipo plataforma que se va desplazando a lo largo del campo de colectores parabólicos, de tal manera que vaya mapeando facetas a lo largo de su recorrido. Durante la realización de este trabajo se realizaron bocetos y se plantearon prototipos. Aún más, se realizaron pruebas preliminares con una pantalla impresa con franjas, lo que eludía el uso de proyectores y simplificaba aún más el arreglo. Este sistema permitiría contar con un dispositivo integral que podría operar como un servicio a las plantas de colectores parabólicos. Si bien se vio que este diseño era factible, no se realizaron desarrollos posteriores por falta de presupuesto. En el caso de los sistemas de torre central, sería atractivo producir un sistema de caracterización con cámaras motorizadas que permitiera la adquisición de las imágenes de los helióstatos de manera automatizada para su posterior evaluación. De manera complementaria, el desarrollo de un trazador de rayos robusto y eficiente que se integre a la herramienta FOCuS y que permita introducir como datos de entrada los mapas de desviación generados, de tal manera que se pueda obtener un sistema integral de caracterización de colectores solares.

Artículos derivados de la ejecución de la tesis

A continuación, se presenta una lista de los artículos logrados y la participación en congresos derivados de la ejecución del trabajo de tesis:

Artículos

2014 IMPROVING PARABOLIC TROUGH MIRROR MODULE QUALIFICATION BY FOCUS TOOL ISSN: 1941-7012, Manuel I. Peña-Cruz, Camilo A. Arancibia-Bulnes, Ana Monreal Vidal Marcelino Sánchez González, Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol.6, Pag.0-0, Revistas Indizadas.

2014 IMPROVING OPTICAL QUALIFICATION OF SOLAR CONCENTRATOR BY FOCUS TOOL ISSN: 1876-6102, Manuel I. Peña-Cruz, Camilo A. Arancibia-Bulnes, Ana Monreal Vidal Marcelino Sánchez González, Energy Procedia ELSEVIER, Vol.57, Pag.427-436, Revistas Arbitradas.

2014 THE FOCUS TOOL - AN OPTICAL QUALIFICATION TOOL DEVELOPED FOR SOLAR REFLECTORS. A SENSITIVITY ANALYSIS., Manuel I. Peña-Cruz, Camilo A. Arancibia-Bulnes, Martín Gastón, Fabienne Sallaberry, Marcelino Sánchez González., Proceedings of the SolarPACES World Conference, Vol. , Pag.0-0, Memorias de congresos.

2012 FRINGE REFLECTION TECHNIQUE FOR HELIOSTATS - A COMPARISON BETWEEN TWO PHASE RETRIEVAL METHODS, Manuel I. Peña-Cruz Camilo A. Arancibia-Bulnes

Marcelino Sánchez González, Proceedings of the SolarPACES World Conference, Vol. , Pag.0-0, Memorias de congresos.

2012 ANALYSIS OF DRIFT PHENOMENA IN HELIOSTAT IMAGES ISBN: 978-0-7918-4482-3, Martha Escobar-Toledo, Camilo A Arancibia-Bulnes, Manuel I Peña-Cruz, David Riveros-Rosas, Rodolfo Peón-Anaya, Cuitlahuac Iriarte-Cornejo, Rafael E Cabanillas, Claudio A Estrada, American Society of Mechanical Engineers, Vol.10, Pag.358-392, Revistas Arbitradas.

Participación en congresos

2014 THE FOCUS TOOL - AN OPTICAL QUALIFICATION TOOL DEVELOPED FOR SOLAR REFLECTORS. A SENSITIVITY ANALYSIS., Extranjero, SolarPACES World Congress, CAMILO A. ARANCIBIA-BULNES, MARTÍN GASTÓN, FABIENNE SALLABERRY, MARCELINO SÁNCHEZ GONZÁLEZ, China.

2013 IMPROVING OPTICAL QUALIFICATION OF SOLAR CONCENTRATORS BY FRINGE REFLECTION TECHNIQUE, Extranjero, Solar World Congress International Solar Energy Society, CAMILO A. ARANCIBIA-BULNES MARCELINO SÁNCHEZ GONZÁLEZ , México.

2013 THE FOCUS TOOL - AN OPTICAL QUALIFICATION TOOL DEVELOPED FOR SOLAR REFLECTORS, Extranjero, InterSolar Europe, CAMILO A. ARANCIBIA-BULNES, MARTÍN GASTÓN, FABIENNE SALLABERRY, MARCELINO SÁNCHEZ GONZÁLEZ , Alemania.

2012 ANALYSIS OF DRIFT PHENOMENA IN HELIOSTAT IMAGES, Extranjero, ASME 2012 6th International Conference on Energy Sustainability collocated with the ASME 2012 10th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, MARTHA ESCOBAR-TOLEDO, CAMILO A ARANCIBIA-BULNES DAVID RIVEROS-ROSAS RODOLFO PEÓN-ANAYA CUITLAHUAC IRIARTE-CORNEJO RAFAEL E CABANILLAS CLAUDIO A ESTRADA , Estados Unidos.

2012 FRINGE REFLECTION TECHNIQUE FOR HELIOSTATS - A COMPARISON BETWEEN TWO PHASE RETRIEVAL METHODS, Extranjero, SolarPACES World Congress, CAMILO A. ARANCIBIA-BULNES MARCELINO SÁNCHEZ GONZÁLEZ , Marruecos.

Referencias

[1] Arqueros F. Jimenez A. A novel procedure for the optical characterization of solar concentrators. *Solar Energy*, 75(8), 2003.

[2] Jain A. Fundamentals of digital image processing. *Prentice Hall*, 1989.

[3] Lewandowski A. Gray A. Visual scanning hartmann optical tester (vshot) uncertainty analysis. *Milestone Report*, 1998.

[4] International Energy Agency. World energy outlook 2013. *IEA Anual Reports*, 1(12):700, November 2013.

[5] Charles E Andraka, Joshua Mark Christian, Cheryl M Ghanbari, David Dennis Gill, Clifford Kuofei Ho, William J Kolb, Timothy A Moss, Edward J Smith, and Julius Yellowhair. Sandia capabilities for the measurement, characterization, and analysis of heliostats for csp. Technical report, Sandia National Laboratories (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2013.

[6] Hansche B. Laser ray trace tester for parabolic trough solar collectors. *Isa Transactions*, 19(2):43–48, 1980.

[7] Hariharan P. Oreb B. and Eiju T. Digital phase-shifting interferometry: A simple error-compensating phase calculation algorihtm. *Applied Optics*, 26, 1987.

[8] Hibino K. Oreb B. and Farrant D. Phase shifting for non-sinusoidal waveforms wiht phase-shift errors. *Journal of Optical Society of America*, 12, 1995.

[9] Hung Y. Lin L. Shang H. Park B. Practical three-dimensional computer vision techniques for full-field surface measurement;. *Opt. Eng.*, 39:143–149, 2000.

[10] Lupfert E. Pottler K. Ulmer S. Neumman A. Schricke B. Parabolic trough optical performance analysis techniques. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2007.

[11] Ulmer S. Marz T. Prahl C. Reinalter W. Belhomme B. Automated high resolution measurement of heliostat slope errors. *Solar Energy*, 85(4):681–687, Apr 2011.

[12] Mohammedi K. Behar O., Khellar A. A review of studies on central receiver solar thermal power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23:12–39, 2013.

[13] A. Bendt, P. Rabl. Optical analysis of point focus parabolic radiation concentrators. *Appl. Opt. 20*, pages 674–83, 1981.

[14] M. Blanco. The tonatiuh software development project: An open source approach to the simulation of solar concentrating systems. *Proceedings of the IMEC2005, Orlando, FL*, 2005.

[15] Andraka C. Sadlon S. Myer B. Trapeznikov K. Liebner C. Rapid reflective facet characterization using fringe reflection techniques. *ASME Conference Proceedings*, 2009.

[16] Finch N. Andraka C. Uncertainty analysis and characterization of the sofast mirror facet characterization system. *ASME Proceedings of Energy Sustainability*, 2011.

[17] Li Z. Shi Y. Wang C. and Wang Y. Accurate calibration method for a structured light system. *Optical Engineering*, 47, 2008.

[18] Marz T. Prahl C. Ulmer S. Wilbert S. Weber C. Validation of two optical measurement methods for the qualification of the shape accuracy of mirror panels for concentrating solar systems. *Journal of Solar Energy Engineering 133*, 2011.

[19] Wyant C. and Creath K. Advances in interferometric optical profiling. *International Journal of Machine Tools Manufacturing*, 32, 1992.

[20] Florida Solar Energy Center. Solar resource map. *http://www.fsec.ucf.edu/en/*, 2014.

[21] Bone D. Fourier fringe analysis: the two dimensional phase unwrapping problem. *Applied Optics*, 30:3627?3632, 1991.

[22] Koehne R. Rach E. Microprocessor controlled optical measuring system for large mirror modules. *The Smithsonian/NASA Astrophysics Data System*, 1985.

[23] Ulmer S. Heinz B. Pottler K. Lu?pfert E. Slope error measurements of parabolic troughs using the reflected image of the absorber tube. *J. Sol. Energy Eng. 131*, 2009.

[24] Stynes K. Burkholder F. Feasibility study of the distant observer method for rapid optical characterization of parabolic trough solar fields. *SolarPACES Proceedings*, 2009.

[25] Knauer M. Kaminski J. Hausler G. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces. *Proceedings of SPIE*, 2004.

[26] Scott P. Burgess G. Measurement of mirror panels using coloured-pattern deflectometry. *SolarPACES Proceedings*, 2010.

[27] Shortis M. Johnston G. Photogrammetry: An available surface characterization tool for solar concentrators, part ii: Assessment of surfaces. *Journal of Solar Energy Engineering*, 119:286–291, 1997.

[28] Shortis M. Johnston G. Photogrammetric analysis of solar collectors. *ISPRS Congress Beijing Proceedings*, 2008.

[29] Bezian J. Garcia P., Ferriere A. Codes for solar flux calculation dedicated to central receiver system application: A comparative review. *Solar Energy*, 823:189–197, 2007.

[30] L. Ghiglia D. Mastin G. Romero. Cellular automata method for phase unwrapping. *Journal of Optical Society of America*, 4:267–280, 1987.

[31] Guo H. He H. and Chen M. Gamma correction for digital fringe projection profilometry. *Applied Optics*, 43, 2004.

[32] Alvin F. Hildebrandt et al. Power with heliostats. *Science*, 197:1139–1146, 1977.

[33] Bodenheimer J. Eisenber J. Testing the figure of parabolic reflectors for solar concentrators. *Applied Optics*, 21(24), 1982.

[34] Bruning J. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses. *Applied Optics*, 25, 1974.

[35] Burges G. Shortis M. Kearton A. Garzoli J. Photogrammetry for dish concen- trator construction. *Solar09, the 47th ANZSES Annual Conference Proceedings*, 2009.

[36] Creath K. Wyant J. Aspheric measurement using phase shifting interferometry. *Proceedings of SPIE*, 813:553–554, 1987.

[37] Su P. Parks R. Wang L. Angel R. Burge J. Software configurable optical test system: a computerized reverse hartmann test. *Applied Optics*, 49(23), 2010.

[38] Wheelwright B. Angel R. Weiser J. A line-scanning laser hartmann test for parabolic trough mirrors. *Renewable Energy and the Environment. Osa, Washington, D.C*, 2013.

[39] Creath K. Phase measurement interferometry: beware these errors. *Proceeding of SPIE*, 1553:213–220, 1991.

[40] Schwinder J. Burrow R. Ellsner K. Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources. *Appl. Opt, 22*, 1983.

[41] Ulmer S. Pottler K. Measurement techniques for the optical quality assessment of parabolic trough collector fields in commercial solar power plants. *ASME Conference Proceedings*, 2007(47977), 2007.

[42] Ghiglia D. Romero L. Robust two dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods. *Journal of Optical Society of America*, 11:107–117, 1994.

[43] Hankins J. Learly P. Users guide for mirval : A computer code for comparing designs of heliostat receiver optics for central receiver solar power plants. *Technical Report No. SAND77-8280*, 1979.

[44] Erminia Leonardi and Bruno D' Aguanno. Concentrating solar energy technologies. In Giacomo Cao and Roberto Orrù, editors, *Current Environmental Issues and Challenges*, pages 113–126. Springer Netherlands, 2014.

[45] Andreas Luzzi and Keith Lovegrove. Solar thermal power generation. In Cutler J. Cleveland, editor, *Encyclopedia of Energy*, pages 669 – 683. Elsevier, New York, 2004.

[46] Ghiglia D. Pritt M. Two-dimensional phase unwrapping: Theory, algorithms, and software. *Wiley, New York*, 1989.

[47] Herraez M. Burton D. Lalor M. Gdeisat M. Fast two- dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path. *Applied Optics*, 41:7437–7444, 2002.

[48] Ichioka Y. Inuiya M. Direct phase detection system. *Applied Optics*, 11:1507–1514, 1972.

[49] Malacara D. Servin M. Interferogram analysis for optical testing, chapter 3. 2nd edition. *Taylor Francis Group*, 2005.

[50] Pottler K. Lupfert E. Johnston G. Shortis M. Photogrammetry: A powerful tool for geometric analysis of solar concentrators and their components. *Journal of Solar Energy Engineering*, 127:94–101, 2005.

[51] Prahl C. Stanicki B. Hilgert C. Ulmer S. Roger M. Airborne shape measurements of parabolic trough collector fields. *Sol. Energy 91*, 2013.

[52] D. Malacara. Optical shop testing. *Wiley*, 1978.

[53] C. Marquez. An overview of csp in europe, north africa and the middle east. *CSP Today*, 2008.

[54] Camilo Arancibia-Bulnes. Manuel Pe na Cruz. David Marroquin. Rafael Cabanillas. Carlos Perez-Rabago. David Riveros-Rosas. Jesus Hinojosa. Claudio Estrada. Heliostat testing at a new facility in sonora. *SolarPaces Symposium, Granada, Spain.*, 2011.

[55] Moreno V. Campos M. Granados F. Arjona M. Diaz R. Avenda no M. Optical testing of a parabolic trough solar collector by a null screen with stitching. *Proceedings of SPIE*, 7390, 2009.

[56] NREL. Soltrace optical modeling software. *http://www.nrel.gov/csp/soltrace/background.html*, 2014.

[57] Fontani D. Francini F. Jafrancesco D. Mercatelli L. Sansoni P. Mirror shape detection by reflection grating moire method with optical design validation. *Proceedings of SPIE*, 2005.

[58] Gonzalez R. Wintz P. Digital image processing. *Addison-Wesley*, 1987.

[59] Kammel S. Leon P. Deflectometric measurement of specular surfaces. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 57(4):763–769, 2008.

[60] Ulmer S. Heller P. Slope measurements of parabolic dish concentrators using color codified targets. *SolarPACES Proceedings*, 2006.

[61] R. Pettit. Characterization of the reflected beam profile of solar mirror materials. *Sol. Energy 19*, pages 733–741, 1977.

[62] Beltran Madrigal J. Diaz Uribe R. Progress in the design of chromatic null screens to test cylindrical parabolic concentrators. *Proceedings of SPIE*, 8011 80111R-1, 2014.

[63] Burke J. Li W. Heimsath A. Von Kopylow C. Bergmann R. Qualifying parabolic mirrors with deflectometry. *J. Eur. Opt. Soc. Rapid Publ. 8*, 2013.

[64] Moss T. Diver R. Practical field alignment of parabolic trough solar concentrators. *Journal of Solar Energy Engineering*, 129, 2007.

[65] Tsai R. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses. *IEEE J. Robotics and Automation*, 4, 1987.

[66] Wendelin T. Jorgensen G. Wood R. Shot: a method for characterizing the surface figure and optical performance of point focus solar concentrators. *Solar engineering*, 1991.

[67] Wendelin T. May T. Gee R. Video scanning hartman optical testing of state-of-the-art parabolic trough concentrators. *Proceedings of ISEC2006, ISEC2006-99172*, 2006.

[68] R. Ritter and R. Hahn. Contribution to analysis of the reflection grating method. *Optics and Lasers in Engineering*, 1982.

[69] Jones S. Vshot: a tool for characterizing large, imprecise reflectors. *International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation*, 1996.

[70] Lupfert E. Neumann A. Riffelman K. Ulmer S. Comparative flux measurement and raytracing for the characterization of the focal region of solar parabolic trough collectors. *Proceedings ASME 2004*, 2004.

[71] Lupfert E. Ulmer S. Solar trough mirror shape specifications. *Proceedings of the 15th SolarPACES Conference, Berlin (Germany)*, 2009.

[72] Roger M. Prahl C. Ulmer S. Fast determination of heliostat shape and orientation by edge detection and photogrammetry. *Proceedings of the 14th Biennial CSP Solar PACES Symposium*, 2008.

[73] Takeda M. Ina H. Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *journal of the Optical Society of America*, 72(1):156–160, 1982.

[74] Paola Sansoni, Franco Francini, Daniela Fontani, Elisa Sani, Luca Mercatelli, and David Jafrancesco. Optical profile control on solar parabolic troughs. *Photonics Technologies, 2014 Fotonica AEIT Italian Conference*, 2014.

[75] E. Speyer. Testing low-precision optics. *Journal of the Optical Society of America*, 48(12), December 1958.

[76] L. The Core Writing Team. Pachauri, R. Meyer. Climate change: Synthesis report. *Independent*, 2014.

[77] Thorsten Bothe. Wansong Li. Christoph von Kopylow. Werner Juptner. High-resolution 3d shape measurement on specular surfaces by fringe reflection. *Optical Metrology in Production Engineering*, 5457, 2004.

[78] Bishop J. Rossow W. Spatial and temporal variability of global surface solar irradiance. *J. Geophys. Res. 96, 16839*, 1991.

[79] Heimsath A. Platzer W. Bothe T. Li W. Characterization of optical components for linear fresnel collectors by fringe reflection method. *Proceedings of SolarPACES Conference*, 2008.

[80] Macy W. Two-dimensional fringe pattern analysis. *Applied Optics*, 22:3898?3901, 1983.

[81] Pratt W. Digital image processing. *John Wiley and Sons*, 1978.

[82] Web. http://opencv.org/, 2015.

[83] Web. http://www.flabeg-fe.com/en/solar-mirrors.html, 2015.

[84] Web. http://www.mathworks.com/products/matlab/, 2015.

[85] Web. http://www.rioglass.com/, 2015.

[86] Web. www.vision.caltech.edu, 2015.

[87] Carl-Jochen Winter, Rudolf L Sizmann, and Lorin L Vant-Hull. *Solar power plants: fundamentals, technology, systems, economics*. Springer-Verlag, 1991.

[88] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22, 2000.

Chapter 7
Anexo

7.1 Calibración de la cámara

El proceso de calibración de la cámara nos genera un modelo de la geometría de la cámara y la distorsión de la lente. Esta información nos define los parámetros "intrínsecos" de la cámara.

7.1.1 Geometría de proyección

El modelo de proyección de la cámara (Pinhole Model) nos permite "proyectar" el plano de la imagen superficie sobre un plano virtual en la cámara con un único parámetro físico: la distancia focal.

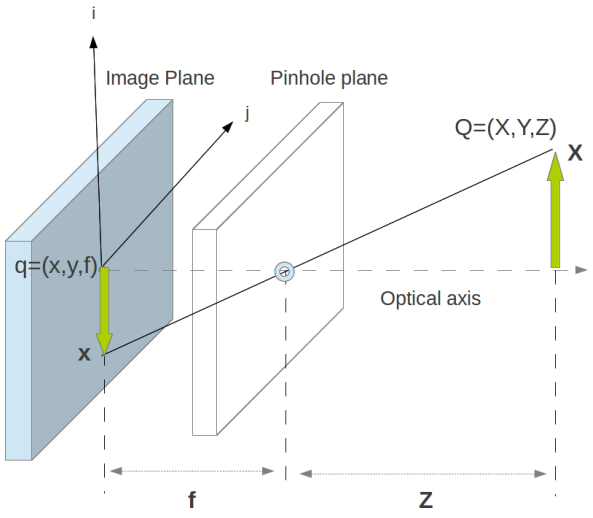

Figure 7.1: Modelo de proyección de la cámara (*Pinhole Model*).

Si recorremos virtualmente el plano de la imagen sobre el modelo *Pinhole* por donde pasan los rayos y calculamos la relación que este tiene sobre las coordenadas del objeto, obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$
\begin{aligned}
x_{screen} &= f_x \left(\frac{X}{Z}\right) + C_x \\
y_{screen} &= f_y \left(\frac{Y}{Z}\right) + C_y
\end{aligned}
\tag{7.1}
$$

Cabe destacar que se han introducido dos distancias focales en las ecuaciones. Esto es debido a que los generadores de imágenes son típicamente rectangulares en lugar de cuadrados. Además, se ha introducido un parámetro nuevo denotado por C_x y C_y. Esto es porque el CCD no se encuentra generalmente en el eje óptico de la cámara (lo que requeriría precisión micrométrica), por lo que es necesario tomar en cuenta posibles desplazamientos de frabricación a la hora de utilizar las cámaras.

7.1.2 Distorsión de la lente

En teoría, es posible definir una lente que no contenga distorsión. En la práctica, sin embargo, ninguna lente es perfecta. Esto se debe principalmente a que es mucho más sencillo fabricar lentes "esféricas" que "parabólicas", matemáticamente con menor errores. También es complicado alinear mecánicamente a la perfección la lente y el CCD. En esta sección desarrollamos las ecuaciones para describir los dos modelos que surgen de estas distorsiones. La distorsión Radial, resultado de la forma y construcción de la lente y la distorsión tangencial, producto del proceso de ensamblaje de la cámara.

Distorsión Radial: La distorsión radial se produce por el efecto de curvatura que tienden a tener los rayos al alejarse del centro. Esto da como resultado el fenómeno de la imagen "barril" o "fish-eye". La distorsión radial puede modelarse utilizando series de expansión de Taylor.

$$
\begin{aligned}
x_{corrected} &= x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\
y_{corrected} &= y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)
\end{aligned}
\tag{7.2}
$$

Cabe destacar que generalmente los dos primeros términos de distorsión radial k_1 y k_2 son suficientes para modelar la distorsión en una lente típica. El tercer término se usa generalmente cuando la lente está construida a propósito con efecto "fish-eye".

Distorsión Tangencial: Esta distorsión se produce debido a los defectos de manufactura resultado de que la lente no este exactamente paralelo al plano imagen. La distorsión tangencial puede modelarse utilizando dos parámetros adicionales p_1 y p_2:

$$
\begin{aligned}
x_{corrected} &= x + [2p_1 y + p_2(r^2 + 2x^2)] \\
y_{corrected} &= y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 x)]
\end{aligned}
\tag{7.3}
$$

Debido a que la implementación numérica involucrada en el cálculo de los coeficientes de distorsión y la transformación del plano imagen es laboriosa y compleja, se han venido

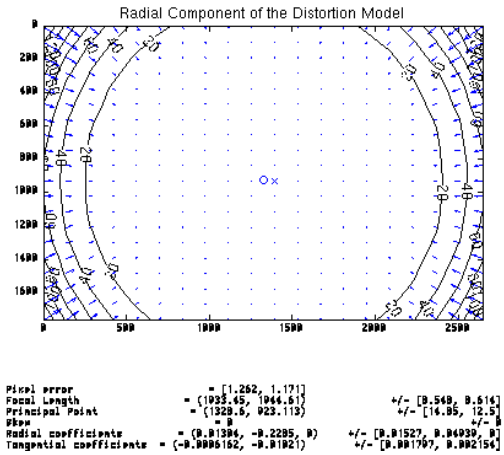

Figure 7.2: Modelo de distorsión radial de una cámara caracterizada.

desarrollado herramientas y algoritmos capaces de extraer los parámetros intrínsecos de las cámaras. Estas herramientas están disponibles en la red y son generalmente de uso libre. Ejemplos de ellos y más comunmente usados son: OpenCV; desarollado como un paquete de librerías en C++ [82], CalTech Calibration Camera Toolbox; desarrollado por el grupo de visión de CalTech y disponible en lenguaje de programación Matlab® [86]. Además, existen algunos otros softwares comerciales capaces de lograr lo anterior como lo son: Vision Assistant de LabVIEW® y FotoModeler®.

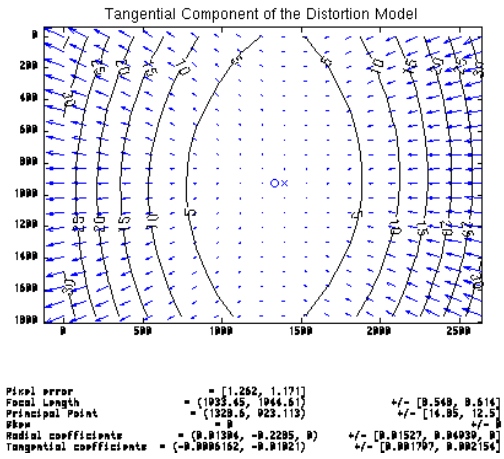

Figure 7.3: Modelo de distorsión tangencial de una cámara caracterizada.

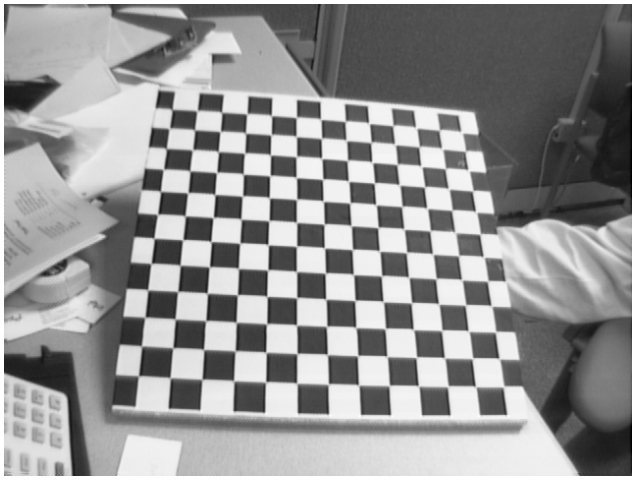

Figure 7.4: Patrón "checkboard" utilizado para la calibración de la cámara.

7.2 Calibración del proyector

Al igual que la cámara, el uso del proyector en el arreglo requiere de considerar diversos factores que afectan directamente la medición de la fase. En esta sección se enumeran algunos de los que se consideran más relevantes.

7.2.1 Efecto *Keystone*

El efecto "keystone" o de proyección trapezoidal se produce por la no perpendicularidad de la proyección del patrón de la imagen sobre la pantalla. Esto da como resultado franjas que las franjas se vean estiradas a lo largo de la dirección de proyección, produciendo un cambio en la frecuencia inicial de las franjas.

Generalmente la mayoría de los proyectores de nueva generación proveen un sistema de corrección de este efecto. Es posible además, instalar marcas de referencia en la pantalla para ubicar con precisión la verticalidad de las franjas y realizar un análisis de distanciamiento entre franjas, adquiriendo una imagen de referencia y utilizar procesamiento de imágenes para medir la separación entre sus valles o crestas. Es posible que al igual que la cámara, la lente utilizada para la proyección de las imágenes pueda introducir errores de distorsión, pero al momento se consideran despreciables en comparación con el efecto trapezoidal.

7.2.2 Correción Gamma

En la sección de Conceptos Fundamentales, se detallo que la ecuación que rige el patrón de franjas contiene información de la iluminación de fondo y el contraste de las franjas. Estos parámetros generalmente se eligen para que sean la mitad del nivel de intensidad del rango disponible en los bits de la imagen. Esto es generalmente para una cámara de 8 bits 0-255 niveles de intensidad.

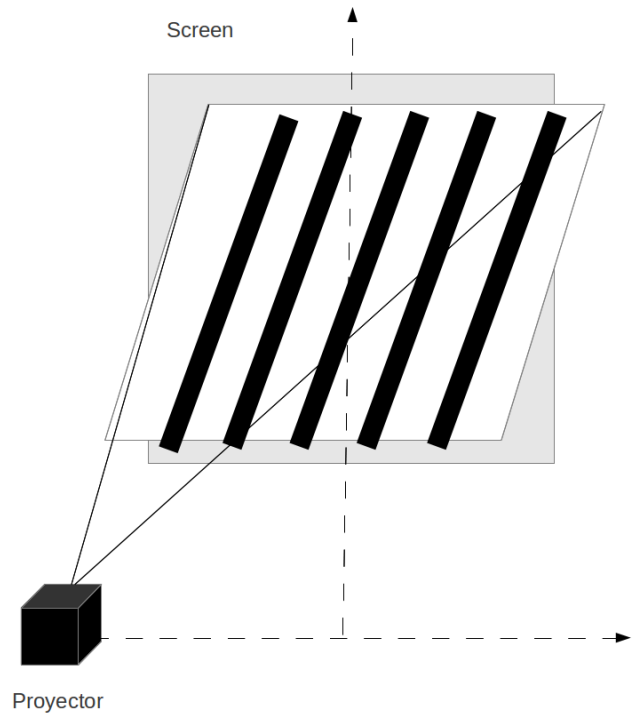

Figure 7.5: Proyección trapezoidal del proyector por la no orientación perpendicular.

En la realidad, un proyector digital aplica una corrección del tipo "gamma-decoding" a las imágenes y videos para realzar el efecto visual. La corrección gamma puede ser definida como:

$$I_{out} = I_{en}^{\gamma} \tag{7.4}$$

donde la intensidad de entrada I_{en} y la intensidad de salida I_{out} son valores no negativos. En el proceso de corrección gamma, el codificado gamma utiliza valores de $\gamma < 1$, mientras que el decodificado utiliza valores de $\gamma > 1$. Siendo que las imágenes y videos almacenados en las computadoras están gamma-codificados generalmente, los proyectores modernos usualmente aplican automáticamente un decodificado gamma no lineal con $\gamma = 2.2 - 2.6$. Esto produce cambios de intensidad no deseados en las franjas, evitando al proyector el proyectar distribuciones de intensidad sinusoidalmente ideales.

Para superar lo anterior, se han propuesto diversas maneras de corregir el problema de codificado gamma [31] [17], unas más complejas y con mejor resultado que otras. Una técnica simple pero robusta para solucionar este problema se basa en codificar inicialmente el patrón antes de su proyección. Similarmente que como lo haría una computadora, pero con el inverso del factor gamma:

$$I_{\gamma}(x, y) = [a(x, y) + b(x, y)\cos(2\pi f y + \Phi(x, y) + \alpha)]^{\frac{1}{\gamma}} \tag{7.5}$$

El único inconveniente de utilizar esta técnica se debe a que el valor de gamma no es un

valor constante (pues varia de 2.2 a 2.6) y debe ser ajustado de manera experimental para cada proyector en particular. Aunque mientras se asigne un valor dentro de este rango, la mayoría de los métodos de recuperación de fase serán generalmente poco sensibles a distorsiones pequeñas producidas por la distribución sinusoidal y es posible que otros errores, como el ruido electrónico, sean más significativos [65], [88].

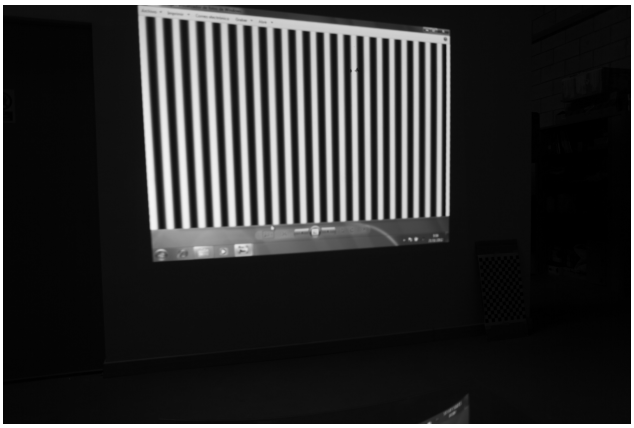

Figure 7.6: Proyección de un patrón de franjas con corrección Gamma.

7.3 Adquisición de imágenes y su procesamiento digital

El procesamiento digital de imágenes es un campo muy importante dentro de la teoría de franjas, aunque por sí mismo ha sido tratado en numerosos libros de texto [81], [58], [2]. Para digitalizar una imagen, es necesario separarla en arreglos de pequeños elementos llamados pixeles. Cada uno de estos pixeles tiene un color distinto así como un nivel de irradiancia propio (esto es si la imagen fue adquirida en modo RGB). Mientras mayor sea el número de pixeles en una imagen, mayor será la definición y su nitidez. En interferometría, así como en los métodos de proyección de franjas, el análisis utiliza técnicas de procesamiento digital donde la información proporcionada por el color suele no ser necesaria (es usual trabajar con escala de grises, lo que representa una escala de intensidad). La gran ventaja del procesamiento digital de imágenes es que la imagen puede ser analizada o mejorada utilizando distintas técnicas (las cuales se discutiran más adelante), y esas técnicas también se pueden aplicar al análisis de interferometría. Cuando se digitaliza una imagen, los niveles de gris (irradiancia) son transformados en números por una computadora. Estos números son representaciones internas de números binarios que tienen solo ceros y unos llamados "bits". Una cantidad escrita como una serie de 8 bits es un "byte". Una cantidad puede ser representada como 1, 2 o incluso 3 bytes; mientras que, el número total de bits usados para digitalizar una imagen representa el número de niveles grises posibles que pueden ser usados para representar el nivel de luminosidad de un pixel de la imagen, como se muestra en el Tabla 7.1.

Tabla 7.1: Niveles de grises correspondientes al número de bits

Número de bytes	Número de bits	Número de niveles de gris
1	8	256
2	16	65536

Si bien la técnica de proyección de franjas es relativamente poco sensible a las condiciones exteriores medio-ambientales, deben de considerarse ciertos factores en la adquisición de imágenes para garantizar la mínima afectación en la información a analizar.

- Reducir las condiciones cambiantes de iluminación en las pruebas.
- Utilizar fondos opacos sobre la superficie de prueba, a razón de disminuir reflejos indeseados con la pantalla.
- Cubrir la mayor cantidad de pixeles en la cámara con la superficie de análisis y lo más cercanas del eje óptico de la misma.

7.3.1 Algoritmo de enmascarado

El algoritmo de enmascarado es necesario para remover las características de fondo y la información inválida producida por bordes o franjas no reflejadas en la imagen bajo análisis.

La forma más utilizada para aplicar el enmascarado consiste en utilizar un fondo negro que no refleje la luz. De esta manera es posible determinar un valor de umbral o "Threshold" que separe el fondo de la superficie a medir. Cuando esto no es posible, podemos utilizar la propiedad del método de cuatro patrones para aplicar las diferencias entre las intensidades de los patrones escalonados en un punto en particular. Dado que el fondo no es capaz de reflejar las franjas de la misma manera que la superficie bajo análisis, las diferencias entonces serán cercanas a cero y mucho menores que μ.

$$m(x,y) = \mid I_1 - I_2 \mid + \mid I_2 - I_3 \mid + \mid I_3 - I_4 \mid + \mid I_4 - I_1 \mid \tag{7.6}$$

Entonces, la representación matemática del modelo de enmascarado es un arreglo binario de dos dimensiones donde los pixeles que son iguales a cero pertenecen a la región enmascarada y los pixeles iguales a uno contienen información válida del patrón de franjas:

$$M(x,y) = \begin{bmatrix} 0, & m(x,y) < \mu \\ 1, & m(x,y) \geq \mu \end{bmatrix} \tag{7.7}$$

7.3.2 Filtrado y reducción de ruido en la imagen

Es bien conocido, dentro de la ciencia del procesamiento de imágenes, que los circuitos electrónicos de las cámaras usualmente producen ruido de interferencia en las imágenes adquiridas, sobre todo cuando estas se exponen a constrastes muy altos o a baja intensidad de la imagen fuente. Este ruido suele ser llamado "Sal y Pimienta" por el parecido que tiene al dispersar por la fotografía original pixeles con altos valores de contraste (pequeños puntos blancos y negros). Dentro de las posibles causas de error en los métodos de la proyección de franjas, este en particular es uno de los más destacados, debido principalmente a que la matemática de la deflectometría trabaja con información de contraste de franjas y la comparación entre patrones (para el caso de 4PS) o la representación de la frecuencia de cada pixel (para el caso de DPD y Fourier), con lo que valores aleatorios de contraste en las franjas pueden producir datos corruptos al recuperar la fase.

Para superar lo anterior es necesario diseñar un algoritmo que sea capaz de identificar un pixel y compararlo con el de sus vecinos para evaluar posibles gradientes bruscos asignables a este ruido. En el mundo del tratamiento de imágenes lo anterior es conocido como un filtro promedio o "average filtering". En el cual es necesario asignar el tamaño de la matriz con la que se va a promediar el pixel (generalmente suele ser una matriz cuadrada de 3 x 3). Entonces, el pixel analizado toma el valor del promedio de la matriz de pixeles vecinos, suavizando de esta manera los pixeles con altos contrastes introducidos artificialmente.

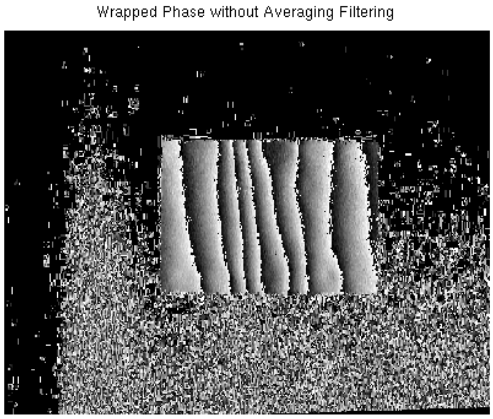

Figure 7.7: Extracción de la fase empaquetada sin el uso de procesamiento de imágenes.

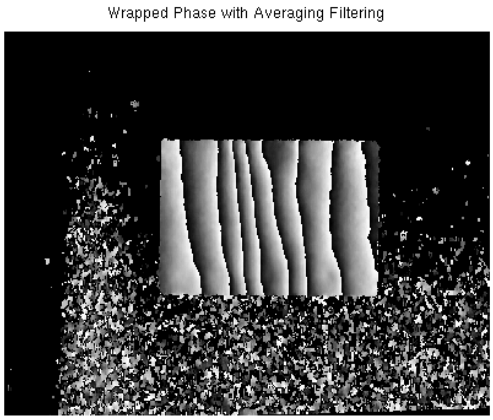

Figure 7.8: Extracción de la fase empaquetada usando técnicas de procesamiento de imágenes.