

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA



POSGRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
MEDICIÓN DE LOS NIVELES DE EXPOSICIÓN A RADIACIÓN
SOLAR CONCENTRADA EN UNA INSTALACIÓN DE
APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA SOLAR DE TIPO TORRE
CENTRAL PARA LA ESTIMACIÓN DE RIESGOS A LA SALUD
HUMANA.

T E S I S

PRESENTADA POR

DANYELA SAMANIEGO RASCÓN

Desarrollada para cumplir con uno de los
requerimientos parciales para obtener
el grado de Maestra en Ingeniería

DIRECTOR DE TESIS DR. JAIME LEÓN DUARTE
CODIRECTOR DE TESIS DR. CAMILO ARANCIBIA BULNES

HERMOSILLO, SONORA.

DICIEMBRE 2012

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

RESUMEN

Ante la creciente motivación de los países por utilizar energía renovable para la producción de energía eléctrica, hoy en día las plantas termosolares han aumentado en número. Toda planta termosolar cuenta con espejos que concentran la luz solar en un punto llamado blanco, por lo que la presencia de luz solar concentrada en grandes cantidades es usual en este tipo de instalación. A causa de esto, pueden surgir distintos riesgos, entre ellos de tipo cutáneo, quemaduras en la piel o bien de tipo ocular, ya sea de quemaduras en la retina, en un caso extremo, o de deslumbramiento momentáneo (post imagen), mismo que puede causar distracciones. Algunos estudios anteriores han proporcionado límites máximos permisibles de exposición a este tipo de radiación solar concentrada, así como también los posibles efectos ante dicha exposición. Cada vez aumenta la necesidad de la evaluación de riesgos en este tipo de plantas, con la intención que el ambiente laboral sea de seguridad evitando riesgos a la salud.

Debido a lo anterior, este trabajo tiene como objetivo brindar un análisis representativo que muestre la situación actual de una instalación de este tipo y posteriormente proponer medidas de seguridad para contrarrestar los riesgos potenciales, mediante una estimación de riesgos oculares por radiación solar concentrada en una instalación de tipo torre central destinada al aprovechamiento de energía solar.

La instalación en la cual se llevó a cabo el estudio es el Campo de Prueba de Helióstatos (CPH), operado conjuntamente por la Universidad Nacional Autónoma de México y la Universidad de Sonora, y recientemente inaugurado, en Hermosillo, México. La evaluación de riesgos potenciales del brillo y resplandor, originados por el receptor y las superficies de los helióstatos, fue realizada de acuerdo con la metodología propuesta en las investigaciones más recientes. Los niveles de radiación reflejada que se obtuvieron en el estudio se comparan con los límites

máximos permisibles expuestos en estudios anteriores, para posteriormente sugerir las zonas con clasificación de riesgo en base a la distancia.

Por último, existen diversas instituciones, asociaciones y normativas que se preocupan por la seguridad laboral ante la exposición de este tipo de INR, se retomarán los puntos clave y expresarán las recomendaciones necesarias en este tipo de industria.

ABSTRACT

Solar thermal plants have increased their number and power generation potential, because of the increasing motivation of countries to use renewable energy for electricity production, as well as the constant increase of fossil fuel and environmental consciousness.

Every solar plant has mirrors that concentrate sunlight at one point called receiver, so the presence of concentrated sunlight in huge amounts are usual in this kind of facilities. Due to this concentrated radiation, many risks may exist, like skin or retinal burns and glare or post image effect.

Some previous studies have provided Threshold Limit Values (TLV's) for exposure to this type of concentrated solar radiation, as well as discussed the potential impact of this exposure. The need for risk assessment in these plants increases every day, in order to guarantee a healthy and safe working environment.

This investigation aims to estimate ocular risks on an installation dedicated to solar energy and provide a representative analysis showing the current status of the system and subsequently, propose security measures to counter potential risks.

The facility in which the study took place, is called "Campo de Prueba de Helióstatos (CPH)", and it is operated by the Universidad Nacional Autónoma de México and the Universidad de Sonora, in Hermosillo, Mexico. Assessment of potential risks, brightness and glare caused by the heliostat surfaces, was performed according to the methodology proposed in recent research. Reflected radiation levels that were obtained in this study were compared with the maximum permissible limits set out in previous studies.

Various institutions, associations and regulations are dedicated to the development of security measures and TLV's. These regulations went analyzed and recommendations went elaborated about the needs of this kind of industries.

AGRADECIMIENTOS

Hoy tengo la oportunidad y el gran honor de agradecer a todas aquellas personas que intervinieron en logro de este proyecto, en un principio agradezco a mi familia y amigos por su incondicional apoyo y aportación de valores a mi formación.

A mis maestros el Dr. Camilo Arancibia Bulnes, el Dr. Jaime León Duarte y el Dr. Pedro Móndeolo, por su paciencia, conocimientos, ética y profesionalismo y sobre todo que fueron las mentes maestras detrás de esta investigación.

Al Centro de investigación CPH (Campo de Prueba de Helióstatos) por su disponibilidad y apoyo de todo su personal.

También quiero agradecer a la Universidad de Sonora, que es mi alma mater, sobre todo al Departamento de Ingeniería Industrial que confió en mí potencial profesional, y a su vez en conjunto con la Universidad Politécnica de Catalunya se pudo llegar a enriquecer con conocimientos y herramientas, el contenido de esta tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) y al Programa Integral de Fortalecimiento Institucional (PIFI 2011) por los medios económicos para la desarrollo, realización y culminación del proyecto de investigación para obtención de grado. Igualmente al proyecto CONACYT 123767 “Laboratorio de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar. Segunda etapa”.

Pero sobre todo agradezco a Dios que hizo todo esto posible.

ÍNDICE

RESUMEN	i
ABSTRACT	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FORMULAS	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Campo de Prueba de helióstatos (CPH).	3
1.2. Planteamiento del Problema	4
1.3. Objetivo General	5
1.4. Objetivos Específicos	5
1.5. Hipótesis	5
1.6. Alcances y Delimitaciones.....	6
1.7. Justificación.....	6
2. MARCO DE REFERENCIA.....	7
2.1. Energía Renovable y Tecnologías de Concentración Solar.	7
2.2. Radiación Electromagnética. Definiciones	12
2.3. Radiación Solar	19
2.4. RNI y sus Impactos en la Salud.	22

2.4.1. Radiación Ultravioleta	22
2.4.1.1. Fuentes de Radiación Ultravioleta.....	22
2.4.1.2. Efectos Biológicos	25
2.4.2. Radiación Infrarroja	27
2.4.2.1. Fuentes de Radiación Infrarroja	27
2.4.2.2. Efectos Biológicos	27
2.4.3. Luz Visible.....	29
2.4.3.1. Fuentes de Luz Visible	29
2.4.3.2. Efectos Biológicos	30
2.5. Métricas.....	32
2.6. Normativas.	36
2.6.1. Niveles de exposición.....	37
2.7. Evaluadores de Radiación	44
2.7.1. Pirheliómetro	45
2.7.1.1. Tipos de Pirheliómetros.....	45
2.7.1.2. Calibración de Pirheliómetros.....	48
2.7.2. Piranómetro.....	48
2.7.2.1. Tipos de Piranómetro	49
2.7.2.2. Calibración de Piranómetro.....	51
2.7.3. Radiómetro Tipo Gardon.....	52
2.8. Estudios Previos.....	53
3. METODOLOGÍA	57
3.1. Software de Trazo de Rayos SolTrace.....	58
3.2. Método	61

4.	RESULTADOS.....	67
4.1.	Reflexión Directa de las Superficies de los Helióstatos.....	67
4.2.	Reflexión de la Luz del Sol que Reside en Superficie del Receptor.....	75
5.	NORMATIVAS Y APORTACIONES	89
5.1.	Análisis de Normativas Relacionadas con los Límites de Exposición de INR.....	89
5.2.	Medidas de Prevención a Riesgos Oculares y de la Piel ante exposición a Radiación Solar Concentrada.	96
5.2.1.	Protección para la piel.....	96
5.2.2.	Protección para los ojos.	97
5.2.3.	Equipos de Protección Individual	99
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	100
6.1.	Conclusiones.....	100
6.2.	Recomendaciones.....	101
6.3.	Trabajos Futuros	103
	BIBLIOGRAFÍA	105
	ANEXOS	112
	Anexo 1. Boletín oficial del Estado, España.....	112
	Anexo 2. Metodología para uso del software SolTrace.....	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Tecnologías de captación solar. Tomado de Afinidad eléctrica, n.d.....	8
Figura 2.2. Tecnología de concentradores de torre central. Tomado de Afinidad eléctrica, n.d.....	11
Figura 2.3. Funcionamiento de la instalación de concentradores de tipo torre central. Tomado de Afinidad eléctrica, n.d.	11
Figura 2.4. Espectro electromagnético. Tomado de la Enciclopedia de salud y seguridad (2011)	13
Figura 2.5. Diagrama de radiación solar por unidad de área. Elaboración propia....	14
Figura 2.6. Irradiancia espectral en función de longitud de onda. Elaboración Propia.	15
Figura 2.7. Irradiancia de banda en función de longitud de onda. Tomado y modificado de Yunus Cengel (2002), ch 11.	15
Figura 2.8. Radiación difusa. Tomado y modificado de Yunus Cengel, 2002.	17
Figura 2.9. Radiación solar directa y difusa en una superficie horizontal. Tomado de Yunus Cengel, 2002, p.588.....	17
Figura 2.10. Irradiancia directa incidente en un colector. Elaboración propia.....	18
Figura 2.11. Radiaciones que conforman el espectro solar. Tomado de Pilkington, n.d.	20
Figura 2.12. Espectro solar ASTM G173-03. Elaboración propia	20
Figura 2.13. Profundidad de penetración en la piel a diferentes longitudes de onda. Tomado de la Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo, 2001.....	28
Figura 2.14. Impactos potenciales producidos por la irradiancia en la retina en función del ángulo subtendido. Adaptación a la grafica de Ho, Ghanbari y Diver, 2011.	34
Figura 2.15. Pirheliómetro.	45
Figura 3 .1. Distribución de los helióstatos en el CPH. Imagen tomada y modificada del plano de distribución eléctrica y de aire acondicionado del Campo de prueba de helióstatos, PC-01, 2010.	58

Figura 3.2. Intersecciones. Pantalla impresa desde la simulación con el software SolTrace.....	60
Figura 3.3. Mapas de flujo. Pantalla impresa desde la simulación con el software SolTrace.....	61
Figura 3.4. Observador con dirección al receptor.....	63
Figura 4.1. Irradiancia en función del ángulo subtendido cuando se ve directamente a la fuente de a los helióstatos.....	74
Figura 4.2. Zona de riesgo al ver directamente a la fuente de a los helióstatos.....	75
Figura 4.3. Irradiancia en función de la distancia al ver de cinco imágenes de helióstatos sobrepuestas en el blanco.....	79
Figura 4.4. Irradiancia en función de la distancia al ver cinco imágenes de los helióstatos en diferentes puntos en el blanco.....	83
Figura 4.5. Irradiancia en función de la distancia al ver 82 imágenes de helióstatos sobrepuestos en el receptor.....	87
Figura 4.6. Zona de riesgo al ver 82 imágenes de helióstatos sobrepuestos en el receptor.....	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Los niveles máximos de exposición a IR. Tomado de NOM-013-STPS, 1993.	38
Tabla 2.2. Límites de exposición – radiación visible. Tomado de NOM-013-STPS, 1993	38
Tabla 2.4. Límites de exposición – radiación ultravioleta 310-315, Tomado de NOM-013-STPS, 1993.....	39
Tabla 2.5. Efectividad espectral relativa, Tomado de NOM-013-STPS, 1993.	40
Tabla 2.6. Límites máximos permisibles de exposición, Tomado de NOM-013-STPS, 1993.	40
Tabla 2.7. Límites diarios (8 horas) de exposición para R-UV tipo B y C., Tomado de COVENIN 2238:2000.	42
Tabla 2.8. Límites diarios (8 horas) de exposición para R-UV, COVENIN 2238:2000.	42
Tabla 2.10. Duración de los límites de exposición a radiación UV. Tomado de ICRNIRP, 2004.....	43
Tabla 2.9. Límites de exposición a radiación UV y la ponderación de la función espectral. Tomado de IRPA 1989.	44
Tabla 4.1. Flujos máximos.	68
Tabla 4.2. ω_{spot} , E_r , burn y E_r , flash para el helióstato a 41m.	70
Tabla 4.3. ω_{spot} , E_r , burn y E_r , flash para el helióstato a 70m.....	71
Tabla 4.4. ω_{spot} , E_r , burn y E_r , flash para el helióstato a 150m.....	72
Tabla 4.5. ω_{spot} , E_r , burn y E_r , flash para el helióstato a 207m.....	73
Tabla 4.6. Área e Irradiancia equivalente para el caso 1.	75
Tabla 4.7. E_r , E_r , burn y E_r , flash para el caso 1.	78
Tabla 4.8. Área e Irradiancia equivalente para el caso 2.	79
Tabla 4.9. E_r , E_r , burn y E_r , flash para el caso 2.	82
Tabla 4.10. Área e Irradiancia equivalente para el caso 3.	83
Tabla 4.11. E_r , E_r , burn y E_r , flash para el caso 3.	86

Tabla 5.1. Valores Límite de Exposición.....	90
Tabla 5.2. Formulas para cálculo de límites de exposición.....	91
Tabla 5.3. Valores de la curva de ponderación S (λ).	94
Tabla 5.4. Valores de las curvas de ponderación, B (λ) y R (λ).	95

ÍNDICE DE FÓRMULAS

Ecuación 1. Irradiancia.....	14
Ecuación 2. Irradiancia espectral	14
Ecuación 3. Potencia emisiva	16
Ecuación 4. Energía solar total	17
Ecuación 5. Factor de concentración	18
Ecuación 6. Potencia de incidente en la fuente.....	19
Ecuación 7. Irradiancia directa.....	19
Ecuación 8. Irradiancia	19
Ecuación 9. Distancia Radial y Angulo subtendido de la fuente.....	32
Ecuación 10. Irradiancia incidente en la retina.....	33
Ecuación 11. Umbral de quemadura en la retina.	34
Ecuación 12. Umbral donde se produce un efecto post-imagen.....	35
Ecuación 13. Angulo subtendido de la imagen.	35
Ecuación 14. Irradiancia en la retina.	35
Ecuación 15. Irradiancia efectiva relativa a una fuente monocromática.....	39
Ecuación 16. Área efectiva vista por el observador.	63
Ecuación 17. Irradiancia Reflejada.....	63
Ecuación 18. Irradiancia fuera de la cornea.....	63
Ecuación 19. Irradiancia que entra por la pupila.	64
Ecuación 20. Área equivalente de 5 imágenes superpuestas en el blanco.	65
Ecuación 21. Irradiancia equivalente de 5 imágenes superpuestas en el blanco. ..	65
Ecuación 22. Área equivalente de 5 imágenes separadas en el blanco.	65
Ecuación 23. Irradiancia equivalente de 5 imágenes separadas en el blanco.	65
Ecuación 24. Área equivalente a 82 imágenes de helióstatos superpuestos en el receptor.	65
Ecuación 25. Irradiancia equivalente a 82 imágenes de helióstatos superpuestos en el receptor.	65

1. INTRODUCCIÓN

El trabajo de tesis actual se llevó a cabo en una institución dedicada al desarrollo de investigación científica y tiene como objetivo el diagnóstico de la situación actual y la aplicación de una metodología de análisis de riesgos, que permita la identificación de los posibles riesgos potenciales ante la exposición a ciertos agentes ambientales que puedan intervenir en el desarrollo de actividades o bien efectos en la salud humana.

En esta sección se definen también la problemática planteada, objetivos e hipótesis, así como su justificación.

1.1. Antecedentes

La tecnología termosolar aplicada a la generación de potencia eléctrica está basada en el concepto de la concentración de radiación solar para producir vapor o aire caliente, que posteriormente puede ser usado en turbinas de gas o vapor convencionales para producir electricidad (Abengoa Solar, 2010).

En particular, una de las tecnologías termosolares para generación de potencia es la de Torre Central. En los sistemas de torre central se utiliza un campo de helióstatos o espejos móviles que se orientan según la posición aparente del sol y que reflejan la radiación solar para concentrarla sobre un receptor que se sitúa en la parte superior de la torre. Este calor se transmite a un fluido con el objeto de generar vapor que se expande en una turbina acoplada a un generador para la producción de electricidad. El receptor solar consiste en una serie de paneles de tubos que operan a muy alta temperatura y por los que circula agua a presión u otro fluido térmico. El vapor que se produce en un intercambiador de calor y puede ser almacenado parcialmente en unos tanques acumuladores para ser utilizado cuando no se produce suficiente vapor, el resto, es enviado a una turbina para generar electricidad. (Abengoa Solar, 2010).

La planta de torre central recibe grandes cantidades de radiación solar concentrada y se encuentra expuesta a altas temperaturas, así como efectos de reflexión de luz visible. Este ambiente con altos niveles de intensidad de la radiación solar plantea posibles riesgos para la salud humana que es necesario analizar para garantizar una operación segura de las instalaciones.

Se ha notificado en estudios anteriores una gran variedad de síntomas y molestias, principalmente de la piel y el sistema nervioso. La mayoría de los pacientes tienen molestias cutáneas difusas en la cara, como enrojecimiento, rubefacción, calor, pinchazos, dolor y tirantez. También se describen síntomas asociados con el sistema nervioso, como cefalea, mareos, fatiga, debilidad, hormigueo y pinchazos en las extremidades, falta de aliento, palpitaciones, transpiración abundante, depresiones y fallos de memoria. (Knave, 2001)

Brumleve, T.D., en 1984 realizó algunos de los primeros análisis de los riesgos oculares asociados con las tecnologías solares de receptor central. Los modelos analíticos fueron desarrollados para evaluar la intensidad de la luz y los rangos de peligro de múltiples rayos de uno y varios helióstatos, a nivel del suelo y en el espacio aéreo por encima de una instalación de receptor central en los Laboratorios Nacionales Sandia en Albuquerque, Nuevo México. Los resultados mostraron que la irradiancia de un solo helióstato sobrepasa los límites seguros dentro de una distancia focal corta (hasta 40 m). Para helióstatos con distancias focales de más de 270 m, los límites seguros para la retina nunca fueron excedidos.

Ho, Ghanbari y Diver (2009) muestran un resumen de los análisis anteriores para evaluar los efectos de brillo y el resplandor de plantas de concentración de energía solar y su posible afectación visual. Además, de una revisión de la fisiología, óptica, y la preparación de mecanismos asociados con la radiación.

Franck, Walzer y Chernin (2010) exploraron la operación y los aspectos del diseño de planta de concentradores de torre central, asociados para garantizar la salud de

los trabajadores, así como la identificación de riesgos potenciales que comprometían la seguridad tanto del personal como a personas en los alrededores. Los peligros potenciales incluyeron el riesgo de la exposición a la luz intensa del sol reflejada por los helióstatos, o el resplandor del receptor solar.

Existen varias plantas del tipo de concentradores de torre central implementadas alrededor del mundo, algunas con fines comerciales como lo son la PS10 puesta en marcha en el 2007 en Sevilla y en el 2009 se puso en marcha su gemela, la PS20, Gemasolar y otras de tipo experimental como Campo de Pruebas de Helióstatos (CPH), instalación donde se llevó a cabo la investigación. Esta instalación, operada conjuntamente por la UNAM y la UNISON, es una plataforma de experimentación con energía solar concentrada y que cuenta con un área total de 20 Has y se está ubicada en el Km 21 de la Carretera Hermosillo- Bahía Kino, en el acceso de entrada del Departamento de Agronomía de la UNISON.

1.1.1. Campo de Prueba de helióstatos (CPH).

El CPH consiste de un conjunto de helióstatos desplegados sobre el terreno, una torre con cabina de experimentación y de una sala de control.

Los helióstatos instalados en el campo tienen un tamaño mediano (36 m^2) y permiten alcanzar un factor de concentración de la radiación solar de 25. La potencia térmica de diseño del campo se fijó en 2 MW. Esto determinó las características finales de la instalación, con una torre de 36 m de altura y un total de 82 helióstatos. En la primera etapa, finalizada en diciembre de 2010, se instalaron 15 helióstatos con variantes en el diseño y en la segunda etapa del CPH se llegará al total de helióstatos previstos.

En el CPH existen diferentes situaciones posiblemente riesgosas: una de las situaciones es durante el tiempo en que el personal da mantenimiento a este tipo de instalaciones, ya que el cuerpo humano se encuentra expuesto a radiación a

diferentes longitudes de onda en el campo de helióstatos, durante períodos de exposición que pueden ser prolongados. Otra situación riesgosa es cuando se trata de enfocar o dirigir los helióstatos hacia el receptor, ya que se podría enviar accidentalmente radiación concentrada hacia las rutas por donde transita el personal. Además de esto, el brillo proveniente del receptor cuando se enfocan un gran número de helióstatos sobre él debe tenerse en cuenta para evaluar riesgos visuales.

1.2. Planteamiento del Problema

En las instalaciones de concentradores de torre central, en este caso en el CPH, se emplea una tecnología que permite utilizar los rayos de sol concentrados para producir energía eléctrica limpia. Esto se hace mediante helióstatos dirigidos hacia un receptor que se encuentra en lo alto de la torre (donde el receptor puede llegar a alcanzar altas temperaturas de 750° C a 1000° C). Las personas que operan en la planta se encuentran en constante exposición a radiación solar concentrada.

En el CPH, no se tienen puntualmente identificados los posibles riesgos potenciales y los niveles de radiación solar concentrada, por lo que se desconoce si estas constantes exposiciones sin contar con las medidas de mitigación adecuadas pueden tener efectos negativos en la salud de una persona.

El CPH es una instalación experimental que puede servir como un caso modelo para evaluar riesgos que se presentarán en plantas industriales de generación de potencia eléctrica basadas en una instalación de torre central. Cabe mencionar que aun no existe alguna instalación de este tipo en operación en México y menos de una decena en otros lugares del mundo.

Por lo anterior, existe muy poca experiencia en cómo evaluar los riesgos de una instalación de este tipo y no existen normas específicas de seguridad que contemplen las características especiales de este tipo de instalaciones. Se pretende

identificar y evaluar las situaciones con riesgo potencial, para posteriormente sugerir medidas preventivas con base en una revisión de normativas.

1.3. Objetivo General

Llevar a cabo una evaluación de Radiación solar concentrada en el “Campo de Pruebas de Helióstatos” y la detección de Riesgos en dicha instalación por medio de la comparación de estos niveles con la normativa correspondiente.

1.4. Objetivos Específicos

Proponer una metodología de evaluación de riesgos por radiación solar en plantas de torre central.

Evaluar los impactos fisiológicos de las situaciones identificadas ante la exposición por radiación solar concentrada de acuerdo a la literatura anteriormente revisada.

Elaborar recomendaciones de operación o medidas de mitigación para la instalación solar.

Analizar si la norma mexicana NOM-013-STPS-1993 sobre radiaciones no ionizantes es suficiente para considerar las necesidades de una futura industria solar térmica.

1.5. Hipótesis

Existirán situaciones potencialmente riesgosas debidas a la radiación solar concentrada en el “Campo de Pruebas de Helióstatos”, donde la exposición a esta fuente no ionizante exceda los límites máximos permisibles especificados en la norma mexicana NOM-013-STPS-1993 y otras normativas a las que se pueda tener acceso.

1.6. Alcances y Delimitaciones

Este trabajo se realizará dentro de una institución dedicada a la investigación, y se trabajará específicamente con el área mencionada anteriormente. Este proyecto sólo estará enfocado a identificar y evaluar los riesgos potenciales a la salud humana, límites de exposición y medidas de mitigación aplicables a la investigación, de esta manera se pretende cubrir con las necesidades que demanda este tipo de instalación en cuanto a la seguridad laboral.

1.7. Justificación

Se pretende que con la identificación y la evaluación de los posibles riesgos potenciales por exposición a radiación solar concentrada en el campo de helióstatos, se desarrolle un sistema de control y prevención; ya que se deben de establecer medidas de mitigación que contrarresten y se anticipen a la aparición de impactos negativos en la salud en una persona. Este estudio servirá como una base en la identificación de riesgos en instalaciones de aprovechamiento de energía solar de concentradores de torre central.

2. MARCO DE REFERENCIA

En este capítulo se realiza el análisis del cuerpo de conocimientos que apoya al desarrollo de la investigación, donde el principal objetivo es recolectar aportaciones hechas en otras investigaciones o investigadores, que sirvan para respaldar el proyecto en desarrollo.

A continuación se muestra el desarrollo de cada una de estas secciones.

2.1. Energía Renovable y Tecnologías de Concentración Solar.

Las tecnologías de energía renovable se encargan de producir energía comercial mediante la conversión de los fenómenos naturales en formas útiles de energía.

Estas tecnologías utilizan la energía solar y sus efectos directos e indirectos sobre la Tierra (radiación solar, viento, agua, etcétera) las fuerzas gravitacionales (mareas), y el calor del núcleo de la Tierra (geotérmica).

Los beneficios derivados de la instalación y operación de sistemas de energía renovable se pueden dividir en tres categorías: ahorro de energía, la generación de nuevos puestos de trabajo, y la disminución de la contaminación ambiental; principalmente el beneficio de ahorro de energía se deriva de la reducción en el consumo de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural) que se utiliza convencionalmente para proporcionar energía, y este beneficio se puede traducir directamente en unidades monetarias de acuerdo a la producción correspondiente o evitando los gastos de capital para la compra de combustibles, pero sin lugar a duda el beneficio más importante de los sistemas de energía renovable es que disminuyen la contaminación del medio ambiente (Kalogirou, 2009).

Una vez que la humanidad detectó las fuentes de aprovechamiento y sus beneficios, se dedicó a obtener tecnologías que sustituyeran a las formas convencionales de proveer energía, una de éstas ha sido el aprovechamiento de energía solar.

Kalogirou en el 2009 en su libro *Solar Energy*, menciona que la energía solar es la fuente de energía más antigua que se ha usado; también el mismo autor describe como la concentración de esta energía solar se puede obtener por la reflexión de radiación solar por medio del uso de espejos.

Para lograr la concentración de energía solar para su posterior aprovechamiento, existen diferentes tecnologías como lo son los concentradores de foco puntual y los de foco lineal. Ver Figura 2.1.

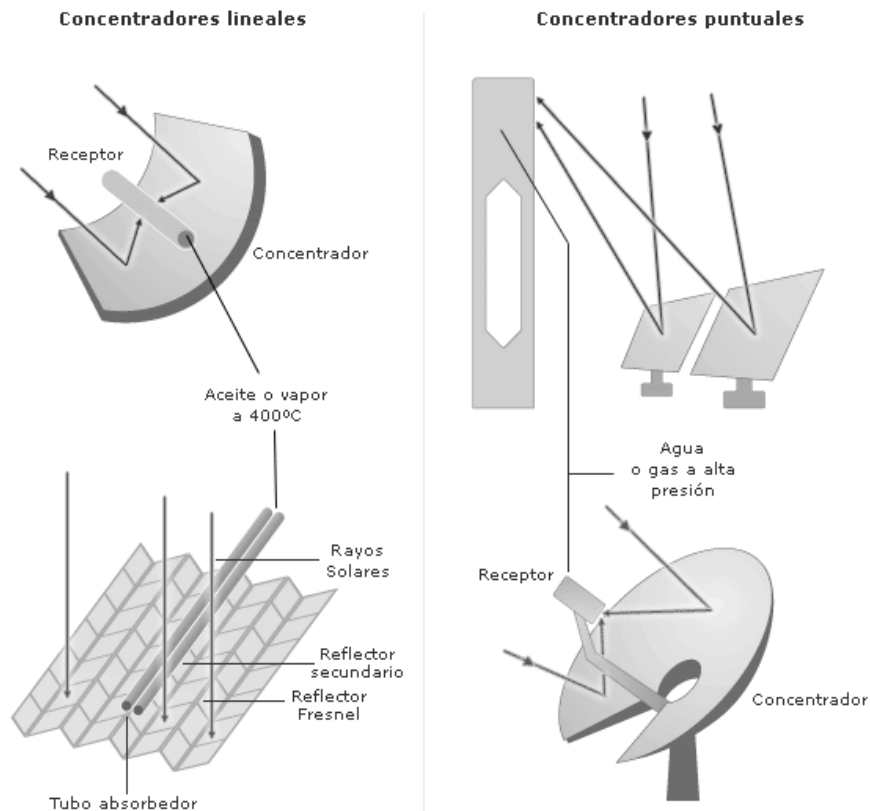


Figura 2.1. Tecnologías de captación solar. Tomado de *Afinidad eléctrica*, n.d.

La concentración de foco puntual y lineal puede aprovechar solamente la radiación solar directa y no la difusa, debido a que esta última no puede ser concentrada. La concentración lineal tiene como ventaja, que técnicamente es menos compleja, pero tiene un factor de concentración (C) menor y por lo tanto puede alcanzar menores temperaturas que la tecnología de concentración de foco puntual. Se llama factor de concentración al cociente entre la superficie útil sobre la cual se reflejan los rayos solares y el área de recepción.

En los concentradores de foco lineal (fig. 2.1, izquierda) los espejos o las superficies reflejantes tienen un perfil con simetría en una dirección longitudinal, por ejemplo, en forma de canaleta y enfocan la energía irradiada por el sol en un tubo o receptor alargado. Por otro lado, en los sistemas de foco puntual los concentradores enfocan sobre un receptor pequeño (que no se extiende mucho en ninguna dirección) (tal como un plato parabólico, (fig. 2.1, derecha) que enfoca sobre un área pequeña, donde se instala un receptor solar.

Las tecnologías de concentración lineal son:

Concentradores Fresnel lineal: La radiación solar incide sobre los espejos dispuestos en la parte inferior del concentrador. Los espejos deberán tener un ángulo adecuado para la reflexión, ésto en forma individual. Con la reflexión apuntando al foco o línea focal (un tubo lineal), ubicado en la parte superior del concentrador, se lleva el líquido contenido en el foco hasta una temperatura tal que lo transforme en vapor. Mediante una turbina se llevara a cabo la transformación en energía desde la mecánica a la eléctrica (CEDER, 2012).

Concentradores de canal parabólico: Esta tecnología (también llamada, cilindro-parabólica) basa su funcionamiento en concentradores alargados en forma de canaleta con perfil parabólico. Los rayos solares se concentran en unos tubos receptores de alta eficiencia térmica localizados en la línea focal de los cilindros. En estos tubos, un fluido transmisor de calor, tal como aceite sintético u otro fluido es

calentado a aproximadamente 400°C, por los rayos solares concentrados. Este aceite es bombeado a través de una serie de intercambiadores de calor para producir vapor sobrecalentado. El calor presente en este vapor, se convierte en energía eléctrica en una turbina de vapor convencional.

Dentro de la tecnología de concentración puntual podemos encontrar:

Disco parabólico: Un sistema de concentrador Stirling está compuesto por un concentrador solar en forma de plato parabólico, por un receptor solar de cavidad y por un motor Stirling o una micro-turbina que se acopla a un alternador. El funcionamiento consiste en el calentamiento de un fluido localizado en el receptor hasta una temperatura alrededor de los 750°C. Esta energía es utilizada para la generación de energía por el motor o micro-turbina. Para óptimo funcionamiento, el sistema debe estar provisto de los mecanismos necesarios para poder realizar un seguimiento preciso de la posición del sol en dos ejes.

Concentradores de Torre central: Aquí se usan un gran número de espejos independientes, llamados helióstatos, que tienen la función de reflejar la radiación solar hacia al receptor. Dichos helióstatos, están compuestos por una superficie reflejante, una estructura que le sirve de soporte y mecanismos que permiten orientarlo para ir siguiendo el movimiento del sol (lo que implica tanto los sistemas mecánicos necesarios para el movimiento del helióstato como los sistemas de control). Las superficies reflejantes más empleadas actualmente son de espejos de vidrio. Los helióstatos o espejos móviles se orientan según la posición del sol para reflejar la radiación solar y concentrarla entre 600 a 1000 veces sobre un receptor que se sitúa en la parte superior de una torre. El receptor solar consiste en una serie de paneles de tubos que operan a muy alta temperatura y por los que puede circular agua a presión, sales de nitratos fundidas, o gases como aire o CO₂ (Abengoa Solar, 2010). Ver Figura 2.2.

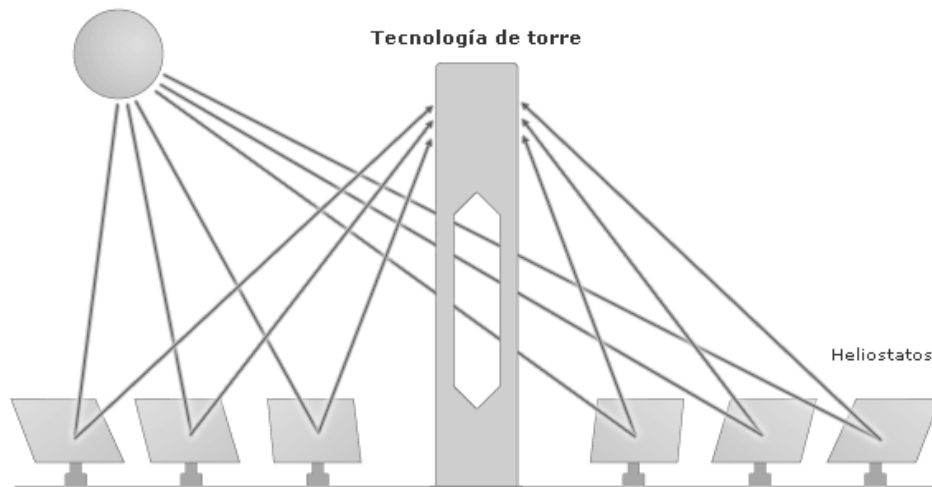


Figura 2.2. Tecnología de concentradores de torre central. Tomado de *Afinidad eléctrica, n.d.*

El calor transferido fluido es usado para generar vapor, es almacenado parcialmente en unos tanques acumuladores para ser utilizado cuando no hay suficiente calor solar, el resto, es enviado a una turbina acoplada a un generador de electricidad (Abengoa Solar, 2010). Ver Figura 2.3. En el caso de las instalaciones en que el fluido es gas, ya sea aire o CO₂, éste es inyectado directamente a turbinas de gas.

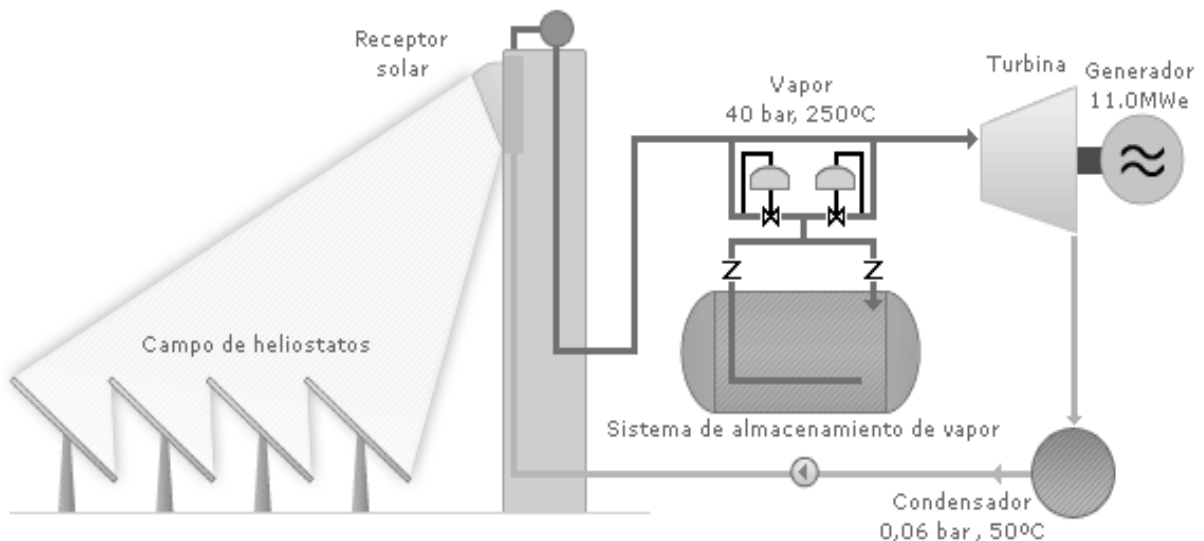


Figura 2.3. Funcionamiento de la instalación de concentradores de tipo torre central. Tomado de *Afinidad eléctrica, n.d.*

2.2. Radiación Electromagnética. Definiciones

La radiación electromagnética es la energía emitida como resultado de las oscilaciones de las cargas eléctricas en los átomos o moléculas (Yunus Cengel, 2002) y ésta se distribuye de tres formas: espacialmente, angularmente y por longitud de onda, dentro de un campo electromagnético.

La longitud de onda es la distancia entre dos crestas o dos valles consecutivos de la onda (medidos en nanómetros, nm) (Hansson, 2001). Donde el espectro electromagnético será la representación de la distribución de la energía de acuerdo a la longitud de onda (Figura 2.4).

El campo electromagnético se divide en dos regiones que comprenden las radiaciones no ionizantes y las ionizantes, es decir que éste engloba el espectro completo de radiación electromagnética (Hansson K., 2001).

Hansson en 2001, aclara que la radiación no ionizante (RNI) conforma toda la radiación o campos del espectro electromagnético que no tienen suficiente energía para ionizar la materia, es decir, las RNI no afectan la estructura molecular de la materia pero si puede producir problemas biológicos mediante los cambios de los niveles de energía (Brauer L. Roger, 2006). Por otra parte las radiaciones ionizantes (RI) son aquellas radiaciones capaces de producir iones cuando interactúan con átomos y moléculas.

Las Radiaciones que conforman la RIN son la radiación ultravioleta (tipo A, B y C), infrarroja, visible y microondas; y las RI son conformadas por rayos X, rayos gama y rayos UV (Brauer L. Roger, 2006).

Hansson en el 2001 define a la radiación solar como: conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol, que se distribuyen desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. Todas ellas son radiaciones que forman parte de la clasificación RNI.

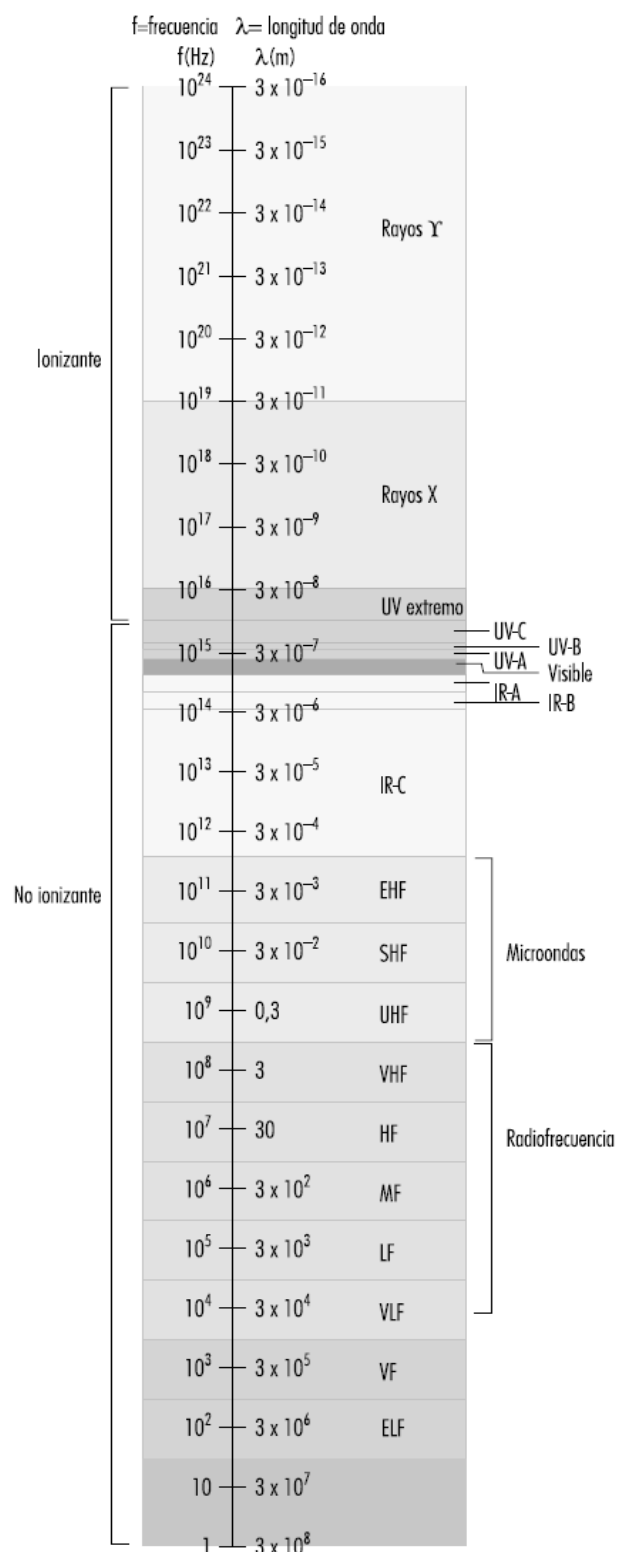


Figura 2.4. Espectro electromagnético. Tomado de la Enciclopedia de salud y seguridad (2011)

Este mismo autor aclara que, no toda la radiación emitida por el sol alcanza la superficie de la Tierra, porque las ondas ultravioletas más cortas son absorbidas por los gases de la atmósfera, fundamentalmente por el ozono. Por otra parte la radiación solar que si llega a la Tierra puede ser medida y la magnitud que es utilizada, es la irradiancia (I), esta mide la energía que por unidad de tiempo y área, W/m^2 (vatio o watt por metro cuadrado).

Definición 2.2.1 (Irradiancia).- Es la potencia por unidad de área que llega a una superficie real como se muestra en la Figura 2.5.

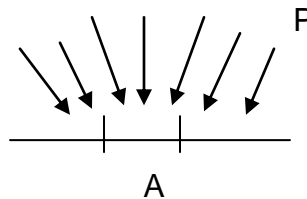


Figura 2.5. Diagrama de radiación solar por unidad de área. Elaboración propia

Donde “P” sería la potencia de incidencia en la fuente y “A” el área de recepción, entonces, la irradiancia (I) se calcula:

$$q = I = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Para una potencia espectral P_λ en $W/m^2 \text{ nm}$ que reside en un área (A), la irradiancia espectral (I_λ) se calcula de la siguiente forma:

$$I_\lambda = \frac{P_\lambda}{A} \quad (2)$$

Entonces la Irradiancia espectral se puede tener alguna distribución en función de su longitud de onda, como se ejemplifica en la Figura 2.6.

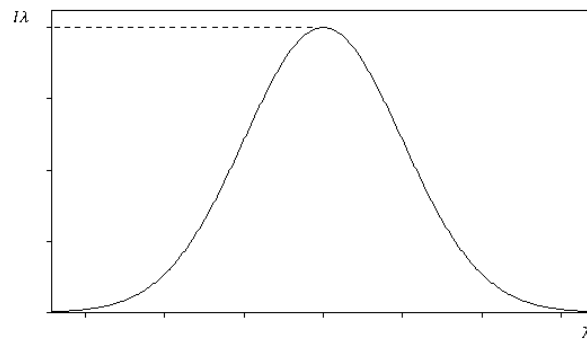


Figura 2.6. Irradiancia espectral en función de longitud de onda. *Elaboración Propia.*

La irradiancia de banda es la que se encuentra en rangos formados por las longitudes de onda y estaría definida como se observa en la Figura 2.7.

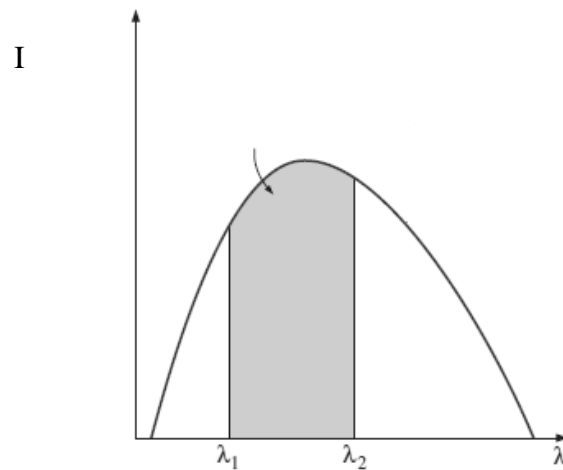


Figura 2.7. Irradiancia de banda en función de longitud de onda. *Tomado y modificado de Yunus Cengel (2002), ch 11.*

Donde la irradiación de banda (W/m^2) estaría determinada por rangos definidos de:

$$I_1 = [\lambda_0; \lambda_1]$$

$$I_2 = [\lambda_1; \lambda_2]$$

$$I_3 = [\lambda_2; \lambda_3]$$

$$I_n = [\lambda_{n-1}; \lambda_n]$$

La radiación emitida por un objeto por unidad de tiempo y unidad de superficie es expresada por la potencia emisiva (W/m^2), dada por:

$$E = \varepsilon\sigma T^4 \quad (3)$$

Dónde: ε = emisividad

T= temperatura de la superficie

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$ Constante de Stefan- Boltzmann

La energía solar que llega a la atmósfera de la Tierra es llamada Irradiancia solar total G_s , que también es llamada constante solar, cuyo valor es:

$$G_s = 1373 W/m^2$$

Esta constante representa la velocidad en la cual la energía solar incide en una superficie normal cuando la Tierra se encuentra a una distancia media al sol, como (Yunus Cengel, 2002).

La radiación solar que llega a la superficie se clasifica en directa y difusa:

Definición 2.2.2 (Radiación difusa).- Parte de la radiación que atraviesa la atmósfera es reflejada por las nubes (esparcida). Esta radiación, que se denomina “difusa”, va en todas direcciones, como consecuencia de las reflexiones múltiples, no sólo de las nubes sino de las partículas de polvo atmosférico, montañas, árboles, edificios, el propio suelo, etc. Este tipo de radiación se caracteriza por no producir sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos. Las superficies horizontales son las que más radiación difusa reciben, ya que ven toda la bóveda celeste, mientras que las verticales reciben menos porque sólo ven la mitad de ella (ver Figura 2.8).

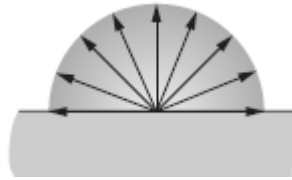


Figura 2.8. Radiación difusa. Tomado y modificado de Yunus Cengel, 2002.

Definición 2.2.3 (Radiación directa).- Es aquella que llega directamente del sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección. Este tipo de radiación se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan.

Según Yunus en el 2002, expone que la energía solar (G) que incide en una superficie de la Tierra se caracteriza como irradiancia directa y difusa (Figura 2.9.). La irradiancia directa (G_D) es aquella parte de la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra sin ser dispersa o absorbida por la atmósfera, mientras que la irradiancia difusa es aquella parte de la radiación solar dispersa que llega a la superficie de la Tierra uniformemente en todas las direcciones (G_d), como se muestra a continuación:

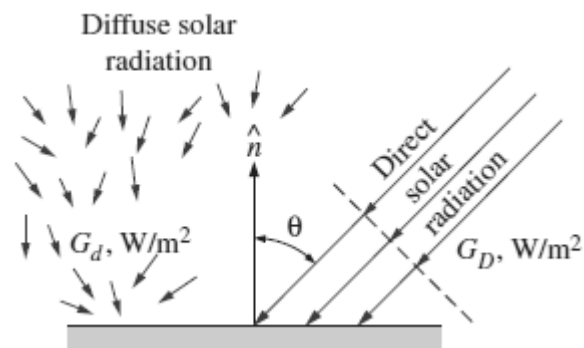


Figura 2.9. Radiación solar directa y difusa en una superficie horizontal. Tomado de Yunus Cengel, 2002, p.588.

Entonces la energía solar total (G) que incide en un área de una superficie horizontal del suelo, está determinada por:

$$G = G_D \cos \theta + G_d \quad (4)$$

En un cielo despejado $G_D > G_d$ y G_D se puede concentrar a valores altos. Donde θ es el ángulo de la radiación solar directa incidente en una superficie, Figura 2.10.

Por otra parte, en el proceso de concentración de la energía solar (energía solar directa), la irradiancia directa (G_D) que incide en un colector que concentra esta radiación solar en un área de recepción, Figura 2.10.

Medina en 2010, en su investigación acerca del “Análisis del flujo energético 3D en colectores concentradores solares de diversas geometrías”, plantea:

Definición 2.2.4 (factor de concentración).- Es el aumento en irradiancia que sufre el flujo de radiación que atraviesa el área de colección hasta que este flujo llega definitivamente a una área de recepción. Matemáticamente, el factor de concentración solar se define por:

$$C = \frac{A_c}{A_r} \quad (5)$$

Donde: A_c es el área del colector y A_r es el área receptora.

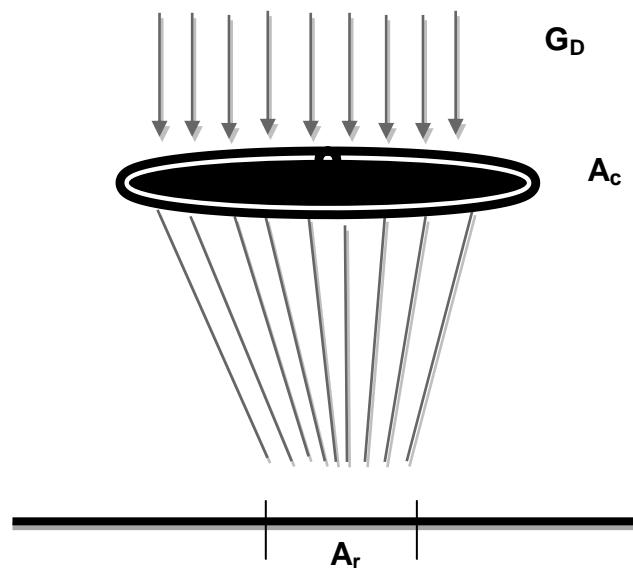


Figura 2.10. Irradiancia directa incidente en un colector. Elaboración propia.

La potencia incidente está dada por:

$$P = G_D A_C \quad (6)$$

Dónde A_C sería el área de colección y G_D la irradiancia directa.

Si sustituimos la ecuación (6) en la ecuación (1) tenemos:

$$q = I = \frac{P}{A_r} = G_D \frac{A_C}{A_r} \quad (7)$$

Donde:

I es la irradiancia

P es la potencia de incidencia en la fuente

G_D la irradiancia directa

A_r el área de recepción

A_C el área del colector

Obtenemos la ecuación (8) donde la irradiancia es expresada en W/m^2

$$I = G_D C \quad (8)$$

Puesto que C es el factor de concentración con la restricción de $A_C > A_r$, entonces el factor de concentración es >1 .

2.3. Radiación Solar

En un campo donde se aprovecha la energía solar, concentrándola para su posterior uso, el sol constituye la principal fuente emisora de radiación solar, y la energía proveniente de esta fuente se llama energía solar (Yunus Cengel, 2002).

La energía solar se encuentra conformada por el espectro solar, a su vez está formado por tres tipos de RNI dentro del espectro electromagnético, las cuales son luz visible (LV), Radiación infrarroja (RI) y la ultravioleta (UV) en su tipo A, como lo podemos ver en la Figura 2.11.

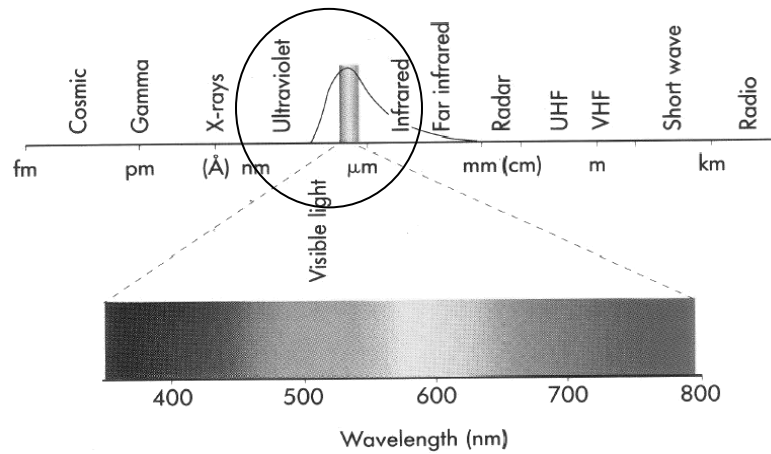


Figura 2.11. Radiaciones que conforman el espectro solar. Tomado de Pilkington, n.d.

Según Cengel (2002), casi la mitad de la radiación solar es luz visible (LV), y el resto es entre infrarroja y ultravioleta, como lo podemos observar en representación de la distribución del espectro solar de la radiación solar (Figura 2.12.).

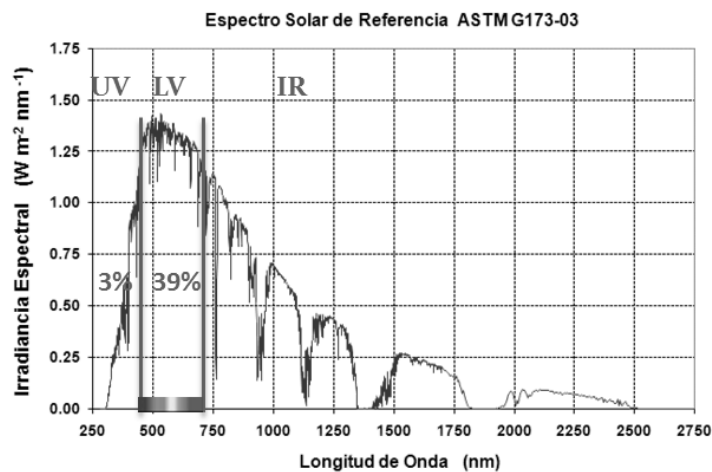


Figura 2.12. Espectro solar ASTM G173-03. Elaboración propia.

Hay muchas fuentes de luz visible (Brauer, 2006), incluida la luz natural del sol y fuentes de luz artificial y que la mayoría de los objetos que vemos son la luz reflejada. La luz visible recae en la región de las longitudes de onda que van de los 380 a 750 nanómetros (nm) aproximadamente; 1 nm es la milmillonésima parte (10^{-9}) del metro. (Sloney H. David, 2001).

La radiación ultravioleta (UV) es una forma de radiación óptica de longitudes de onda más cortas y fotones (partículas de radiación) más energéticos que los de la luz visible. La mayoría de las fuentes de luz emiten también algo de UV. Este tipo de radiación está presente en la luz del sol y también es emitida por un gran número de fuentes ultravioleta utilizadas en la industria, la ciencia y la medicina.

La UV se subdivide en componentes comúnmente denominados *UVA*, *UVB* y *UVC*., (Sloney H. David, 2001).

UV-A cercana a la UV incluye las longitudes de banda desde 315 hasta 400nm.

UV-B se extiende desde 280 hasta 315nm

UV-C se extiende desde 200 hasta 280nm.

La radiación ultravioleta que recae en la región entre los 200 y los 400nm es significativa para la salud, (Brauer, 2006).

La radiación infrarroja también denominada como radiación térmica (o calor radiante), la cual es emitida por todos los objetos calientes, conforma el resto de la radiación comprendida en el espectro solar y tiene una longitud de onda que va desde los 700nm a 1mm, esta banda se subdivide en IR-A cuya región espectral va de los 701 a los 1400 nm, IR-B incluye las longitudes de onda que van de 1.4 a 100 μ m y la IR-C de 0.1 a 1mm (Brauer, 2006).

Este tipo de radiación es parte natural del entorno humano y por lo tanto las personas están expuestas a ella en pequeñas cantidades en todas las situaciones de la vida diaria, por ejemplo en el hogar o durante las actividades recreativas realizadas al sol. No obstante, puede producirse una exposición muy intensa debido a ciertos procesos técnicos en el lugar de trabajo, (Matthes R., 2001)

2.4. RNI y sus Impactos en la Salud.

Las RNI pueden causar diferentes efectos biológicos, con una variedad de consecuencias para el ser humano (ICNIRP, 2009), estos efectos biológicos pueden no tener una consecuencia adversa o beneficiosa conocida, otros efectos pueden producir condiciones patológicas (enfermedades). Las molestias o incomodidades pueden no ser patológicas, pero si pueden afectar el bienestar físico y mental de una persona, y el efecto resultante debe ser considerado como un riesgo potencial para la salud.

Los efectos biológicos ante exposiciones a radiaciones que conforman el espectro solar (UV, LV, IR) se discutirán a continuación.

2.4.1. Radiación Ultravioleta

2.4.1.1. Fuentes de Radiación Ultravioleta

Luz solar

La mayor exposición en un ambiente laboral a la UV la experimentan quienes trabajan al aire libre, bajo la luz del sol. La energía de la radiación UV solar está muy atenuada por la capa de ozono de la Tierra, que limita la UV sobre la superficie terrestre a longitudes de onda superiores a 290-295 nm, (Sloney, 2001). La radiación ultravioleta que proviene del sol contiene los 3 tipos de UV: UVA, UVB y UVC, aunque debido a que la mayor parte de la radiación UVC y UVB son absorbidas por

la atmósfera, no llega prácticamente nada de éstas a la superficie de la Tierra, (Carrasco, 2003).

Fuentes artificiales

El autor Sliney (2001) expone las fuentes artificiales más importantes de exposición humana están las siguientes:

Soldadura al arco industrial. La principal fuente de exposición potencial a la UV es la energía radiante de los equipos de soldadura al arco. Los niveles de UV en torno al equipo de soldadura al arco son muy altos y pueden producirse lesiones oculares y cutáneas graves en un tiempo de tres a diez minutos de exposición a distancias visuales cortas, de unos pocos metros. La protección de los ojos y la piel es obligatoria.

Lámparas de UV industriales en el lugar de trabajo. Muchos procesos industriales y comerciales, tales como el curado fotoquímico de tintas, pinturas y plásticos, requieren la utilización de lámparas que emiten una radiación intensa en la región del UV. Aunque la probabilidad de exposición perjudicial es baja gracias al empleo de blindajes, en algunos casos puede producirse exposición accidental.

Lámparas de luz negra. Las lámparas de luz negra son lámparas especializadas que emiten predominantemente en la región del UV, y por lo general se utilizan para pruebas no destructivas con polvos fluorescentes, para la autenticación de billetes de banco y documentos, y para efectos especiales en publicidad y discotecas. No plantean ningún riesgo de exposición considerable para los humanos (excepto en ciertos casos para la piel fotosensibilizada).

Tratamiento médico. Las lámparas de radiación UV se utilizan en medicina para diversos fines de diagnóstico y terapéuticos. Normalmente, las fuentes de UVA se utilizan en aplicaciones de diagnóstico. Los niveles de exposición del paciente varían

considerablemente según el tipo de tratamiento, y las lámparas UV empleadas en dermatología requieren una utilización cuidadosa por parte del personal.

Lámparas radiación UV germicidas. La radiación UV con longitudes de onda en el intervalo de 250–265 nm es la más eficaz para esterilización y desinfección. Como fuente UV se utilizan con frecuencia tubos de descarga de mercurio de baja presión, ya que más del 90% de la energía radiada se emite en la línea de 254 nm. Estas fuentes suelen denominarse “lámparas germicidas”.

Lámparas bactericidas o lámparas UV clasificación C. Se utilizan en hospitales para combatir la infección por tuberculosis, y también en el interior de cabinas microbiológicas de seguridad para inactivar los microorganismos del aire y de las superficies. Es esencial una instalación adecuada de las mismas y el uso de protección ocular.

Bronceado cosmético. En ciertas empresas hay camas solares en las que los clientes pueden broncearse por medio de lámparas especiales que emiten principalmente en la región del UVA, aunque también algo en la del UVB. El uso habitual de una cama solar puede contribuir considerablemente a la exposición cutánea anual de una persona al UV; asimismo, el personal que trabaja en salones de bronceado puede resultar expuesto a bajos niveles. El uso de medios de protección ocular tales como gafas de seguridad o gafas de sol debería ser obligatorio para el cliente, y dependiendo de la disposición del establecimiento incluso el personal puede necesitar protectores oculares.

Alumbrado general. Las lámparas fluorescentes son de uso habitual en el lugar de trabajo y también hace tiempo que se utilizan en el entorno doméstico. Estas lámparas emiten pequeñas cantidades de Radiación UV y solo contribuyen en un pequeño porcentaje a la exposición anual de una persona a la radiación UV.

Las lámparas de tungsteno halógenas cada vez se utilizan más en el hogar y en el lugar de trabajo para diversos fines de alumbrado y exhibición. Las lámparas halógenas sin deslumbrar pueden emitir niveles de radiación UV suficientes para causar graves lesiones a cortas distancias, aunque si se coloca filtros de vidrio sobre ellas se eliminaría este riesgo.

2.4.1.2. Efectos Biológicos

Efectos en la Piel

El eritema, o “quemadura solar”, es un enrojecimiento de la piel que normalmente aparece de cuatro a ocho horas después de la exposición a la radiación UV y desaparece gradualmente al cabo de unos días (Slaney, 2001). La piel no absorbe todas las longitudes de onda UV de la misma forma, y los efectos del eritema varían en la absorción del espectro. Las longitudes de onda entre 280 y 320 nm, se absorben en las capas más profundas de la piel (dermis), y las longitudes de onda entre 320 y 380 nm se absorben en la capa externa de la piel (epidermis). De este modo, la exposición a longitudes de onda en o cerca de 300 nm, tienen un resultado más propenso a producir eritema (Brauer, 2006).

Slaney (2001) explica que el tratamiento con ciertos medicamentos puede producir un efecto sensibilizante en la exposición a la UVA, lo mismo que la aplicación tópica de determinados productos, como algunos perfumes, lociones corporales, etc. Las reacciones a los agentes sensibilizantes pueden implicar fotoalergia (reacción alérgica de la piel) y fototoxicidad (irritación de la piel) tras la exposición a la radiación UV de la luz solar o de fuentes industriales de RUV (también son frecuentes las reacciones de fotosensibilidad durante el empleo de aparatos de bronceado). Esta fotosensibilización cutánea puede estar producida por cremas o pomadas aplicadas a la piel, por medicamentos ingeridos por vía oral o inyectada, o por el uso de inhaladores bajo prescripción médica. El médico que prescribe un fármaco potencialmente fotosensibilizante debería advertir siempre al paciente que

adopte medidas apropiadas para protegerse de los efectos adversos, pero con frecuencia a éste se le dice únicamente que evite la luz.

Otro riesgo ante la exposición a la radiación UV es el cáncer de piel y envejecimiento de la piel (fotoenvejecimiento). El cáncer de piel es más frecuente entre las personas que pasan mucho tiempo en la luz solar y se produce más fácilmente entre aquellos que tienen poco pigmento de la piel.

Las personas con antecedentes de quemaduras graves UV, especialmente si fueron quemaduras graves en la infancia, las personas con ocupaciones que requieren una amplia labor en la luz del sol y los que viven en las regiones soleadas, tienen una mayor incidencia de cáncer de piel (Brauer, 2006).

Aún no se han establecido con exactitud las relaciones cuantitativas entre dosis y respuesta para la carcinogénesis de la piel humana, aunque los individuos de piel blanca, en particular los de origen celta, son mucho más propensos a contraer cáncer de piel (Sliney, 2001).

Efectos oculares

La fotoqueratitis y fotoconjuntivitis, son reacciones inflamatorias agudas como consecuencia de la exposición a radiación UVB y UVC, que aparecen pocas horas después de una exposición excesiva y normalmente remiten al cabo de uno o dos días (48 horas), (Sliney, 2001). Cuando la UVB y la UVC son absorbidas por la córnea y la conjuntiva del ojo, se provoca la sensación de un cuerpo extraño o arena en el ojo la cual provocará incapacidad visual durante un periodo de tiempo (Carrasco, 2003).

Lesión retiniana por luz brillante de la retina por fuentes de luz es improbable, pueden producirse daños fotoquímicos por exposición a fuentes con una fuerte componente de luz azul, con reducción temporal o permanente de la visión. No obstante, la respuesta normal de aversión a la luz intensa evitará este riesgo a

menos que se haga un esfuerzo consciente por mirar a las fuentes de luz brillante. La contribución de la radiación UV a la lesión de retina es generalmente muy pequeña, debido a que la absorción por el cristalino limita la exposición retiniana (Sliney, 2001).

Las longitudes mayores a 295 nm de radiaciones de tipo UVA y UVB pueden transmitirse a través de la córnea, y se absorberán por el cristalino, y dependiendo de los niveles de exposición podrían llegar a producirse opacidades transitorias o permanentes en el cristalino, en otras palabras llamadas cataratas (Carrasco 2003).

2.4.2. Radiación Infrarroja

2.4.2.1 Fuentes de Radiación Infrarroja

Todos los cuerpos a temperatura superior a cero absoluto emiten radiación IR, y la cantidad y la longitud de onda dependen de la temperatura y la composición del objeto. La principal fuente de radiación IR es el sol (59% de emisión solar), pero también ésta se puede obtener de fuentes artificiales no luminosas o luminosas (Carrasco R. José, 2003).

2.4.2.2 Efectos Biológicos

Efectos en la Piel (Brauer, 2006).

La radiación infrarroja no penetra en la piel a mucha profundidad, por lo que la exposición de la piel a una IR muy intensa puede producir efectos térmicos de distinta intensidad e incluso quemaduras graves. Los efectos sobre la piel dependen de las propiedades ópticas de ésta, tales como la profundidad de penetración en función de la longitud de onda (ver Figura 2.13).

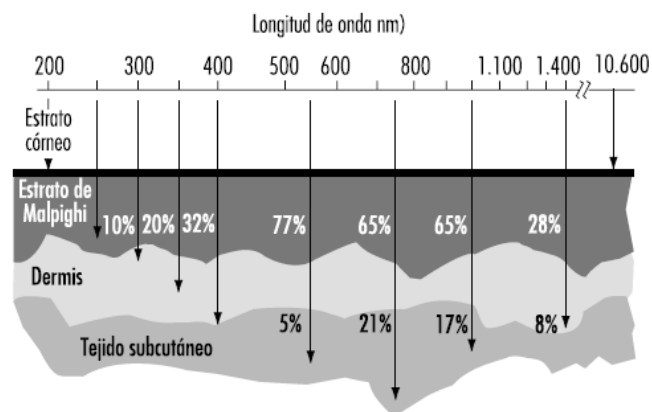


Figura 2.13. Profundidad de penetración en la piel a diferentes longitudes de onda. Tomado de la *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*, 2001.

Particularmente, a longitudes de onda más largas, una exposición extensa puede provocar un gran aumento de temperatura local y quemaduras. Debido a las propiedades físicas de los procesos de transporte térmico en la piel, los valores umbral para estos efectos dependen del tiempo. Por ejemplo, una irradiación de 10 kW/m^2 puede causar una sensación dolorosa al cabo de 5 segundos, mientras que una exposición de 2 kW/m^2 no producirá la misma reacción en períodos de duración inferior a 50 segundos aproximadamente. Si la exposición se prolonga durante períodos muy largos, incluso con valores muy inferiores al umbral de dolor, el cuerpo humano puede sufrir una elevada carga térmica, en especial si la exposición abarca la totalidad del cuerpo como por ejemplo delante de acero fundido. Esto puede provocar un desequilibrio del sistema de termorregulación, en otro caso fisiológicamente bien equilibrado.

El umbral de tolerancia de tales exposiciones depende de las diferentes condiciones individuales y ambientales, tales como la capacidad individual del sistema de termorregulación, el metabolismo del cuerpo durante la exposición o la temperatura ambiente, la humedad y el movimiento del aire (velocidad del viento). En ausencia de trabajo físico puede tolerarse una exposición de 300 W/m^2 como máximo durante ocho horas en determinadas condiciones ambientales, pero este valor disminuye a 140 W/m^2 aproximadamente durante el trabajo físico pesado.

Efectos oculares

Para altos niveles de energía, la radiación infrarroja de una longitud de onda entre 700-1400 nm, que pasa a través del lente del ojo a la retina o se refracta de otros tejidos, pueden causar una variedad de los trastornos oculares, entre los que se encuentra: escotoma, referente a la pérdida de la visión en una parte de la campo de visión debida a daños en la retina donde la radiación es absorbida. Otros trastornos van desde enrojecimiento de simples exposiciones de bajo nivel a la hinchazón del ojo, hemorragias y lesiones. Exposiciones prolongadas a la radiación infrarroja puede causar cataratas (Brauer, 2006).

La IRA afecta principalmente a la retina, debido a la transparencia de los medios oculares. Se considera que, con períodos de exposición cortos, el calentamiento del iris por absorción de radiación visible o IR próxima conduce a la formación de opacidades en el cristalino.

Al aumentar la longitud de onda, a partir de 1 μm aproximadamente, aumenta también la absorción por los medios oculares. Por lo tanto, se considera que la absorción de radiación IRA por el cristalino y el iris pigmentado influye en la formación de opacidades de cristalino. Las lesiones del cristalino se atribuyen a longitudes de onda inferiores a 3 μm (IRA e IRB). El humor acuoso y el cristalino presentan una absorción especialmente elevada de la radiación infrarroja de longitud de onda superior a 1,4 μm (Matthes, 2001).

2.4.3. Luz Visible

2.4.3.1 Fuentes de Luz Visible

La mayor exposición laboral a la radiación óptica se debe a la exposición a los rayos del sol por parte de los trabajadores que realizan su actividad al aire libre. El espectro solar abarca desde la región de corte de la capa de ozono estratosférica, alrededor de los 290-295 nm en la banda del ultravioleta, hasta unos 5.000 nm (5 μm) en la

banda del infrarrojo. La radiación solar puede alcanzar un nivel de hasta 1 kW/m² durante los meses de verano y puede provocar estrés por calor, dependiendo de la temperatura ambiente y de la humedad (Sloney, 2001).

2.4.3.2 Efectos Biológicos

Los riesgos profesionales que entrañan las formas de radiación visible e infrarroja para los ojos y la piel están limitados por la aversión de los ojos a la luz brillante y la sensación de dolor en la piel producida por un calentamiento radiante intenso. El ojo está bien adaptado para auto protegerse contra lesiones por radiación óptica intensa (debidas a energía radiante ultravioleta, visible o infrarroja) procedente de la luz solar ambiental. No obstante, las fuentes con fuerte emisión IR sin un estímulo visual intenso pueden ser peligrosas para el cristalino en caso de exposición crónica. Uno también puede obligarse a mirar al sol, a un arco de soldadura o a un campo nevado y sufrir por ello una pérdida temporal (y a veces permanente) de visión (Sloney, 2001).

Existen al menos cinco tipos distintos de riesgos para el ojo y la piel debidos a fuentes de luz intensa y radiación IR, y es preciso comprender cada uno de ellos para elegir las medidas protectoras. Además de los riesgos potenciales que presenta la radiación ultravioleta (RUV) de algunas fuentes de luz intensa, hay que tener en cuenta los siguientes: (Sloney y Wolbarsht 1980; OMS 1982, citado en Knave 2001, p. 49.15):

1. Lesión térmica de la retina, que puede producirse a longitudes de onda de 400 nm a 1400 nm. Normalmente el peligro de este tipo de lesión solo lo plantean los láseres, una fuente de arco de xenón muy intensa o un hongo nuclear. La quemadura local de la retina produce un punto ciego (escotoma).

2. Lesión fotoquímica de la retina por luz azul (riesgo asociado principalmente con la luz azul de 400 nm a 550 nm de longitud de onda) (Ham, 1989 citado en Knave,

2001, p. 49.15). Esta lesión se denomina comúnmente fotorretinitis por “luz azul” y una forma especial de ella recibe el nombre de *retinitis solar* debido a la fuente que la produce. La retinitis solar recibió en tiempos la denominación de “ceguera de los eclipses” con la correspondiente “quemadura retiniana”. Sólo en los últimos años se ha descubierto que la fotorretinitis obedece a un mecanismo de lesión fotoquímico consecutivo a la exposición de la retina a longitudes de onda cortas del espectro visible, concretamente la luz violeta y azul. Hasta el decenio de 1970 se creía que obedecía a un mecanismo de lesión térmico. En contraste con la luz azul, la radiación IRA es muy poco eficaz como productora de lesiones retinianas (Ham 1989; Sliney y Wolbarsht, 1980 citado en Knave, 2001, p. 49.15).

3. Riesgos térmicos para el cristalino en la región del infrarrojo próximo (asociados con longitudes de onda de 800 nm a 3.000 nm aproximadamente) con potencial formación de catarata por calor industrial. La exposición media de la córnea a la radiación infrarroja de la luz solar es del orden de 10 W/m². En comparación con ésto se ha notificado que trabajadores del vidrio y el acero expuestos a irradiancias infrarrojas del orden de 0,8 a 4 kW/m² diariamente durante 10 a 15 años han desarrollado opacidades lenticulares (Sliney y Wolbarsht, 1980 citado en Knave, 2001, p. 49.15). Estas bandas espectrales contienen IRA e IRB. La guía de la Conferencia Americana de Higienistas Industriales del Gobierno (ACGIH) sobre exposición a la IRA recomienda no superar una irradiancia total ponderada en función del tiempo de 100 W/m² para duraciones de exposición superiores a 1.000 s (16,7 min) (ACGIH,1992 y 1995 citado en Knave, 2001, p. 49.15).

4. Lesión térmica de la córnea y la conjuntiva (a longitudes de onda de 1.400 nm a 1 mm aproximadamente). Este tipo de lesión se limita casi exclusivamente a la exposición a radiación láser.

5. Lesión térmica de la piel. Aunque rara vez se debe a fuentes convencionales, puede producirse en todo el espectro óptico.

2.5. Métricas.

En la siguiente sección, se pretende usar los parámetros de seguridad ocular expuestos en el 2009 por Ho et al. Es importante destacar que en dichos parámetros, para exposiciones a corto plazo ante la luz brillante, existen dos variables que son necesarias para la evaluación del impacto de la radiación solar en los ojos: la irradiación de retina y el ángulo subtendido (tamaño) de la fuente de deslumbramiento.

La irradiación de retina, la cual es la potencia de la radiación solar que incide en una superficie, por unidad de área (Ho et al., 2009), se puede calcular mediante la potencia total que entra la pupila y el área de la imagen retiniana. El diámetro (d_r) de la imagen proyectada en la retina (suponiendo las imágenes como circulares) se puede determinar a partir del ángulo subtendido por la fuente (ω), el cual a su vez puede ser calculado a partir del tamaño de la fuente (d_s), la distancia radial (r) entre el ojo y la fuente, y la distancia focal del ojo (f) aproximadamente 0.017m (Ho, 2011), de la siguiente manera como se muestra en:

La Distancia Radial y Angulo subtendido de la fuente se define como:

$$d_r = f\omega, \text{ donde } \omega = d_s/r \quad (9)$$

Si se conoce la radiación en el plano frontal de la córnea, E_c (W/m^2), puede ser calculada la potencia por unidad de área que entra en la pupila, como el producto de la irradiación de córnea y, el área de la pupila (el diámetro de la pupila a luz del día (d_p), el cual es de 2 mm, y se divide por el área de imagen en la retina), por el coeficiente de transmisión ($\tau = 0.5$) (Ho, Ghanbari y Diver, 2011).

Según Delori, Webb y Sliney, en el 2007, en su revisión sobre las normas ANSI, en la propuesta de la metodología para el cálculo de parámetros de exposición, sugieren la siguiente ecuación:

La Irradiancia incidente en la retina se expresa como:

$$E_r = E_c \left(\frac{dp^2}{dr^2} \right) \tau \quad (10)$$

Nota: La irradiación de retina es significativamente más alta que la irradiación en la entrada de los ojos.

La irradiancia en la retina causada por mirar el sol directamente se puede calcular utilizando las ecuaciones (9) y (10), sujeta a las siguientes características $E_c = 0.1 \text{ W/cm}^2$, $d_p = 0.002\text{m}$, $f = 0.017\text{m}$, $\omega = 0.0094 \text{ rad}$ y $\tau = 0,5$, la cual produce una E_r de 8W/cm^2 .

Los valores calculados de la irradiancia y los umbrales utilizados para determinar los impactos oculares se basan en la distribución del espectro solar (ASTM G173-03), donde la mayoría de la energía y los efectos de exposición de corta duración se deben a la radiación dentro del espectro visible (380 a 800 nm). La exposición a largo plazo (por ejemplo, para seguridad de los trabajadores) implica la radiación en el espectro ultravioleta y la infrarroja.

La Figura 2.14., resume el impacto potencial en la retina de diferentes irradiaciones en función del ángulo subtendido de la fuente de exposición a corto plazo, donde se muestran tres regiones: (1) el riesgo de daños permanentes en los ojos (quemadura de la retina), (2) potencial para un efecto temporal post-imagen (ceguera de flash), y (3) bajo potencial para producir el efecto post-imagen.

Si la irradiancia retiniana es lo suficientemente grande para un determinado ángulo subtendido de la fuente, puede ocurrir un daño ocular permanente por quemadura en la retina (Sliney and Freasier, 1973; Sliney, D. H., 1980; Delori, F. C., Webb, R. H., and Sliney, D. H., 2007, citado en Ho, Ghanbari y Diver, 2011, p. 031021-2).

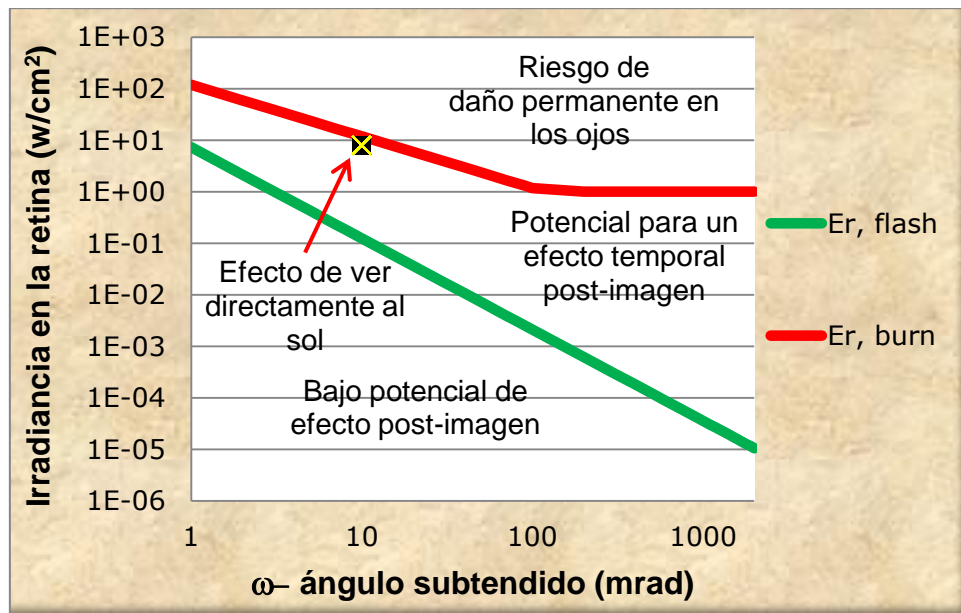


Figura 2.14. Impactos potenciales producidos por la irradiancia en la retina en función del ángulo subtendido. Adaptación a la grafica de Ho, Ghanbari y Diver, 2011.

Por lo tanto mientras el ángulo subtendido de la fuente aumenta, el umbral de seguridad para E_r disminuye, ya que entre mayor sea el ángulo subtendido de la imagen produce un área más grande de ésta, y genera una mayor potencia, en otras palabras la Irradiancia en la retina (E_r) aumenta.

$$E_{r,burn} = \frac{0.118}{\omega} \quad \text{para } \omega < 0.118 \text{ rad} \quad (11)$$

$$E_{r,burn} = 1 \quad \text{para } \omega \geq 0.118 \text{ rad}$$

Donde $E_{r,burn}$, es el umbral de quemadura de la retina (W/cm^2) y ω es el ángulo subtendido (rad).

Por debajo del umbral de quemadura de la retina, existe una región donde la radiación de la retina es lo suficientemente alta para causar un efecto “post-imagen” o ceguera temporal producida por un flash, que es causada por la sobresaturación de los pigmentos de la retina visual (Slincy and Freasier, 1973 citado en Ho, Ghanbari y Diver, 2011, p. 031021-2). Cuando esto ocurre, el post-imagen temporal aparece en el campo visual (por ejemplo, el efecto después de ver un flash de la cámara en una

habitación oscura). El tamaño y el impacto del post-imagen en el campo de visión, depende del tamaño del ángulo subtendido de la fuente. Para una radiación de la retina dada, entre más pequeños son los ángulos de la fuente, el tamaño del post-imagen, y el impacto potencial son menores.

La Figura 2.14., fue elaborada por Ho, Ghanbari y Diver en el 2011, para localizar el umbral más bajo donde pueden surgir situaciones con el potencial de generar efectos post-imagen, es decir encontrar límites máximos permisibles de exposición, el cual es definido por:

$$E_{r,flash} = \frac{3.59 \times 10^{-5}}{\omega^{1.77}} \quad (12)$$

Donde $E_{r,flash}$, es el umbral potencial del efecto post- imagen (W/cm^2) y ω es el ángulo subtendido de la fuente en rad. Los valores de irradiancia en la retina que se encuentren por debajo de $E_{r,flash}$ tienen un bajo potencial de impacto del post-imagen.

Por otra parte, los autores Ho, Ghanbari y Diver en su modelo propuesto en 2011, afirman que si observamos un espejo que contiene la imagen del sol reflejada en él, desde una distancia determinada, ésta dependerá del ángulo de la imagen proyectada en el espejo, al cual se le llama ángulo subtendido de la imagen ω_{spot} y el cual se calcula con la siguiente ecuación, donde E_{beam} (irradiancia del haz) es equivalente a la E_c (irradiancia en el plano frontal de la cornea):

$$\omega_{spot} = \beta \sqrt{\frac{E_{beam}}{\rho E_{DNI}}} \quad (13)$$

Usando la ecuación (13) en las ecuaciones (9) y (10) se obtiene la siguiente expresión para calcular la irradiancia de retina, donde la irradiación de córnea E_c es igual a la radiación del haz, E_{beam} :

$$E_r = \frac{\rho E_{DNI} d_p^2 \tau}{f^2 \beta^2} \quad (14)$$

La irradiación de la retina en la ecuación (14) no depende de la distancia de la fuente. A medida que aumenta la distancia, tanto la potencia que entra en la pupila y el área de la imagen de la retina (que es proporcional al cuadrado del ángulo subtendido de la fuente) disminuyen al mismo ritmo.

Por lo tanto, la irradiación de retina, que es igual a la energía que entra en la pupila, dividido por el área de la imagen retiniana, es independiente de la distancia (Ho, Ghanbari y Diver, 2011).

2.6. Normativas.

Debido a que las exposiciones prolongadas a las radiaciones tienen como consecuencia efectos biológicos en el ser humano, y puesto que hoy en día las situaciones que propician este tipo de exposiciones son más cotidianas, investigadores como Sliney se han preocupado por realizar una búsqueda de los límites de exposición (LE) a radiaciones que pueden producir riesgos oculares.

Este mismo autor en 1994, logra encontrar una institución enfocada a fijar los LE de radiación visible, es decir, radiaciones que recaen en la región del espectro solar entre 380 a 800 nm. Esta institución conocida en el campo de la salud como “The American Conference of Governmental Hygienists (ACGIH)”, se refiere a estos LE como Threshold Limit Values (TLV’s), los cuales se basan en datos obtenidos de estudios de lesiones oculares en personas por ver directamente al sol o bien por exposición a ambientes a energía radiante visible al aire libre, como desiertos.

En 1973, este mismo autor en conjunto con Freasier B.C., recopilaron información en un concentrado sobre la situación de estar viendo una superficie que emita radiación visible de manera difusa, donde se relaciona la longitud de onda, la duración de la exposición en tiempo y la dosis que se recibe por una persona.

Por otro lado Frecker, Eizenman y MacLean en 1989 en su trabajo “An evaluation of optical radiation hazards associated with infrared corneal”, sugieren en el rango de la Radiación infrarroja (IR-A) en la región espectral de 700 a 1400 nm, las radiaciones recibidas debajo de 0.96 W/cm², conforman un rango de exposición seguro dentro del promedio de 8 hr., de jornada laboral.

Existen también otras instituciones internacionales como nacionales dedicadas al tema de riesgos oculares por exposición a radiaciones contenidas en el espectro solar, como lo son la Comisión Internacional sobre Protección de Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP) y El Instituto Nacional Americano de Normativas (ANSI).

Dentro del país se encuentra la Norma Oficial Mexicana referente a las condiciones de Seguridad e Higiene en los centros de trabajo donde se generen radiaciones electromagnéticas no ionizantes, publicada en el Diario Oficial de la Federación en 1993, se indican los niveles máximos de exposición, así como los límites máximos permisibles expresados en tiempo ante la presencia de radiaciones no ionizantes (NOM-013-STPS, 1993).

A continuación se retoman ciertas secciones de la NOM-013-STPS, que hacen referencia a los límites de exposición ante los tipos de radiaciones discutidos anteriormente en este marco teórico.

2.6.1. Niveles de exposición

Normatividad Mexicana

El nivel máximo de exposición a la radiación infrarroja es el establecido en la Tabla 2.1., y no debe ser rebasado para el tiempo de exposición que se indica.

Longitud de onda en nanómetros (nm)	Tiempo de exposición en hora (h) por día	Nivel máximo en miliWatts por centímetros cuadrados (mW/cm ²)
700 a 1400	8	10

Tabla 2.1. Los niveles máximos de exposición a IR. Tomado de NOM-013-STPS, 1993.

El límite especificado en la Tabla 2.2, se refiere al valor de luminancia para la radiación blanca medido en los ojos del trabajador.

Longitud de onda en nanómetros (nm)	Nivel máximo	Tiempo de exposición
700 a 750	10 mW/cm ²	8 horas por día
380 a 400	1 mW/cm ²	Períodos mayores a 1 000 segundos
380 a 400	1 j/cm ²	Períodos menores a 1 000 segundos
400 a 700	1 cd/cm ²	8 horas por día*

Tabla 2.2. Límites de exposición – radiación visible. Tomado de NOM-013-STPS, 1993.

Los niveles máximos de exposición a la radiación ultravioleta son los establecidos en las Tablas 2.3 y 2.4, los cuales no deben ser rebasados para el tiempo de exposición que se indica.

Longitud de onda en nanómetros (nm).	Tiempo de exposición máximo por día	Nivel
200	8 horas	100 mJ/cm ²
210	8 horas	40 mJ/cm ²
220	8 horas	25 mJ/cm ²
230	8 horas	16 mJ/cm ²
240	8 horas	10 mJ/cm ²
250	8 horas	7.0 mJ/cm ²
254	8 horas	6.0 mJ/cm ²
260	8 horas	4.6 mJ/cm ²
270	8 horas	3.0 mJ/cm ²
290	8 horas	4.7 mJ/cm ²
300	8 horas	10.0 mJ/cm ²
305	8 horas	40.0 mJ/cm ²

Tabla 2.3. Límites de exposición – radiación ultravioleta 200-305, Tomado de NOM-013-STPS, 1993.

Longitud de onda en nanómetros (nm).	Tiempo de exposición máximo por día	Nivel
310	8 horas	200.0 mJ/cm ²
315	8 horas	1000.0 mJ/cm ²
315 a 400	Tiempos menores a 1000 segundos	1 J/cm ²
315	Tiempos mayores a 1000 segundos	1 mW/cm ²

Tabla 2.4. Límites de exposición – radiación ultravioleta 310-315, Tomado de NOM-013-STPS, 1993.

Cuando se tenga una fuente que trabaje con varias longitudes de onda debe determinarse la irradiancia efectiva con la siguiente fórmula:

La Irradiancia efectiva relativa a una fuente monocromática, se expresa como:

$$E_{ef} = \sum E_{\lambda} S_{\lambda} \Delta\lambda \quad (15)$$

Dónde:

E_{ef} = Irradiancia efectiva relativa a una fuente monocromática para 270 nm en W/cm² (J/s/cm²).

E_{λ} = Irradiancia espectral en W/cm²/nm.

S_{λ} = Efectividad espectral relativa, sin dimensiones.

$\Delta\lambda$ = Ancho de banda en nanómetros.

La efectividad espectral relativa se muestra en la Tabla 2.5., para cada longitud de onda.

En función del valor obtenido de la irradiancia efectiva no se deben de sobrepasar los tiempos de exposición por días anotados en la Tabla 2.6.

longitud de onda (nm)	efectividad espectral relativa ($s-\lambda$) adimensional
200	0.03
210	0.075
220	0.12
230	0.19
240	0.30
250	0.43
254	0.5
260	0.65
270	1.0
280	0.88
290	0.64
300	0.3
305	0.06
310	0.015
315	0.003

Tabla 2.5. Efectividad espectral relativa, Tomado de NOM-013-STPS, 1993.

2	Horas 0.4
1	Hora 0.8
30	Minutos 1.7
15	Minutos 3.3
10	Minutos 5
5	Minutos 10
1	Minuto 50
30	Segundos 100
10	Segundos 300
1	Segundo 3000
0.5	Segundos 6000

Tabla 2.6. Límites máximos permisibles de exposición, Tomado de NOM-013-STPS, 1993.

Normatividad Venezolana

En la Normativa venezolana que hace referencia a las radiaciones no ionizantes, límites de exposición y medidas de protección y control (COVENIN 2238:2000), se fijan los límites diarios de exposición a las radiaciones no ionizantes para personas ocupacionalmente expuestas y miembros individuales del público. Estos límites se discuten a continuación:

Radiación infrarroja (IR)

Los límites de exposición diarios, para la protección de la córnea y el cristalino de los ojos, para longitudes de onda mayores de 760 nm son:

- a) 10 mW/cm^2 , para períodos de exposición, iguales o mayores de 1.000 segundos.
- b) $1800 \text{ t}^{3/4} \text{ mW/cm}^2$ para períodos de exposición menores de 1.000 segundos.

Radiación visible (LV)

Los límites especificados a continuación sólo deben tomarse en cuenta cuando la luminancia de la fuente exceda de 1 cd/cm^2 .

Los límites de exposición diarios, a LV con una longitud de onda entre 400 y 760 nm son:

- a) 10 mJ/cm^2 para períodos de exposición menores o iguales de 10.000 segundos.
- b) $1 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$ para períodos de exposición mayores de 10.000 segundos.

Radiación ultravioleta (UV)

Los límites de exposición diarios de radiación UV con una longitud de onda entre 315 y 400 nm son:

- a) 1 mW/cm^2 para períodos de exposición iguales o mayores de 1.000 segundos.
- b) 1 J/cm^2 para períodos de exposición menores de 1.000 segundos.

En la Tabla. 2.7 se muestran los límites diarios (8 horas) de exposición para la radiación UV, con una longitud de onda entre 180 y 315 nm que incida sobre la piel u ojos desprotegidos.

Longitud de onda (nm)	Irradiancia (Exposición en mW/cm ²)	Longitud de onda (nm)	Irradiancia (Exposición en mW/cm ²)
180	250	265	3,7
190	160	270	3
200	100	275	3,1
205	59	280	3,4
210	40	285	3,9
215	32	290	4,7
220	25	295	5,6
225	20	297	6,5
230	16	300	10
235	13	303	25
240	10	305	50
245	8,3	308	120
250	7	310	200
254	6	313	500
255	5,8	315	1000
260	4,6		

Tabla 2.7. Límites diarios (8 horas) de exposición para R-UV tipo B y C., Tomado de COVENIN 2238:2000.

En el caso de otros valores diferentes a los contemplados se tomaría el valor inmediato de la longitud de orden superior.

Mientras tanto en la Tabla 2.8, se muestran los tiempos máximos de permanencia para una R-UV con una longitud de onda comprendida entre 270 y 300 nm (Región actínica).

Tiempo de permanencia	Exposición (mW/cm ²)
8 horas	0,0001
4 horas	0,0002
2 horas	0,0004
1 hora	0,0008
30 minutos	0,0017
15 minutos	0,0033
10 minutos	0,005
5 minutos	0,01

1 minuto	0,05
30 segundos	0,01
1 segundo	3

Tabla 2.8. Límites diarios (8 horas) de exposición para R-UV, COVENIN 2238:2000.

Otras asociaciones

Por otro lado las guías IRPA 1989 (International Radiation Protection Association) sobre límites de exposición a radiación UV presentan una modificación de las mismas guías publicadas en 1985, las cuales se definen en la Tabla 2.9. (Anon, 1989).

La ICNIRP, Comisión Internacional sobre la Protección ante Radiaciones no Ionizantes, apoyada por un estudio realizado por la National Radiological Protection Board (NRPB), reafirma que las guías de 1989 sobre límites de exposición a los rayos UV son válidas para su uso actual. Por otra parte esta comisión desarrolló normativas para la radiación no ionizante de tipo UV, en la guía sobre límites de exposición a radiación ultravioleta de longitudes de onda entre 180 nm y 400 nm (radiaciones ópticas incoherentes) en el 2004 donde se expone la duración de los límites de exposición a radiación UV, como se muestran en la Tabla 2.10 (ICRNIRP, 2004).

Duration of exposure per day	Effective irradiance	
	E_{eff} ($W\ m^{-2}$)	E_{eff} ($\mu W\ cm^{-2}$)
8 h	0.001	0.1
4 h	0.002	0.2
2 h	0.004	0.4
1 h	0.008	0.8
30 min	0.017	1.7
15 min	0.033	3.3
10 min	0.05	5
5 min	0.1	10
1 min	0.5	50
30 s	1.0	100
10 s	3.0	300
1 s	30	3,000
0.5 s	60	6,000
0.1 s	300	30,000

Tabla 2.10. Duración de los límites de exposición a radiación UV. Tomado de ICRNIRP, 2004.

λ^a (nm)	EL ^d (J m ⁻²)	EL ^d (mJ cm ⁻²)	S(λ) ^b	λ^a (nm)	EL ^d (J m ⁻²)	EL ^d (mJ cm ⁻²)	S(λ) ^b
180	2,500	250	0.012	310	2,000	200	0.015
190	1,600	160	0.019	313 ^c	5,000	500	0.006
200	1,000	100	0.030	315	1.0×10^4	1.0×10^3	0.003
205	590	59	0.051	316	1.3×10^4	1.3×10^3	0.0024
210	400	40	0.075	317	1.5×10^4	1.5×10^3	0.0020
215	320	32	0.095	318	1.9×10^4	1.9×10^3	0.0016
220	250	25	0.120	319	2.5×10^4	2.5×10^3	0.0012
225	200	20	0.150	320	2.9×10^4	2.9×10^3	0.0010
230	160	16	0.190	322	4.5×10^4	4.5×10^3	0.00067
235	130	13	0.240	323	5.6×10^4	5.6×10^3	0.00054
240	100	10	0.300	325	6.0×10^4	6.0×10^3	0.00050
245	83	8.3	0.360	328	6.8×10^4	6.8×10^3	0.00044
250	70	7	0.430	330	7.3×10^4	7.3×10^3	0.00041
254 ^c	60	6	0.500	333	8.1×10^4	8.1×10^3	0.00037
255	58	5.8	0.520	335	8.8×10^4	8.8×10^3	0.00034
260	46	4.6	0.650	340	1.1×10^5	1.1×10^4	0.00028
265	37	3.7	0.810	345	1.3×10^5	1.3×10^4	0.00024
270	30	3.0	1.000	350	1.5×10^5	1.5×10^4	0.00020
275	31	3.1	0.960	355	1.9×10^5	1.9×10^4	0.00016
280 ^c	34	3.4	0.880	360	2.3×10^5	2.3×10^4	0.00013
285	39	3.9	0.770	365 ^c	2.7×10^5	2.7×10^4	0.00011
290	47	4.7	0.640	370	3.2×10^5	3.2×10^4	0.000093
295	56	5.6	0.540	375	3.9×10^5	3.9×10^4	0.000077
297 ^c	65	6.5	0.460	380	4.7×10^5	4.7×10^4	0.000064
300	100	10	0.300	385	5.7×10^5	5.7×10^4	0.000053
303 ^c	250	25	0.120	390	6.8×10^5	6.8×10^4	0.000044
305	500	50	0.060	395	8.3×10^5	8.3×10^4	0.000036
308	1,200	120	0.026	400	1.0×10^6	1.0×10^5	0.000030

^a Wavelengths chosen are representative; other values should be interpolated (see Eqns. 2a–c).
^b Relative spectral effectiveness.
^c Emission lines of a mercury discharge spectrum.
^d EL for a monochromatic source, but also limited by a dose-rate of 10 kW m⁻² (1 W cm⁻²) for durations greater than 1 s as well in order to preclude thermal effects.

Tabla 2.9. Límites de exposición a radiación UV y la ponderación de la función espectral. Tomado de IRPA 1989.

2.7. Evaluadores de Radiación

En esta sección se desea exponer los medios con los que se desarrollarán mediciones o bien los evaluadores de niveles concentrados de radiación solar natural y radiación concentrada.

Básicamente hay dos tipos de instrumentos de medición para evaluar la radiación solar natural (sensores de flujo de calor): el piranómetro y el pirheliómetro. El primero se utiliza para medir el total de la radiación (haz y difusa) dentro de su campo hemisférico, mientras que el segundo es un instrumento utilizado para medir la radiación en la incidencia normal.

2.7.1. Pirheliómetro

El pirheliómetro es un instrumento que es utilizado para medir el flujo de la radiación solar directa en una incidencia normal. Este instrumento es un tipo de telescopio que sigue el movimiento solar (figura 2.15.)



Figura 2.15. Pirheliómetro.

En simples palabras, la escala de radiación de este instrumento es calculada por su desempeño sobre la radiación solar directa, tomando en cuenta todas las pérdidas térmicas (Iqbal, 1983). Este sensor consta de una termopila de cobre con superficie de 9 mm de diámetro, las lecturas pueden hacerse fácilmente con un voltímetro digital. Este instrumento consta de un seguidor de sol, es decir, un dispositivo que permite seguir al sol en su periodo de movimiento diurno.

2.7.1.1. Tipos de Pirheliómetros

De acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial (WMO), los pirheliómetros pueden clasificarse en “patrones primarios”, “patrones secundarios” y “pirheliómetros de campo”, (CEDECAP, 2003).

Un pirheliómetro patrón primario o pirheliómetro absoluto puede definir la escala de irradiancia total sin recurrir a fuentes o radiadores de referencia. Estos instrumentos son de una gran precisión y suelen ser bastante complicados y demasiado costosos para su uso frecuente, por lo que sólo pueden ser mantenidos y operados por laboratorios especializados.

Todos los pirheliómetros absolutos de diseño moderno usan receptores de cavidad y como sensores, medidores diferenciales de flujo calorífico calibrados eléctricamente. Esta combinación provee la más alta precisión para los niveles de radiación encontrados en las mediciones de irradiación solar (hasta 1 kW /m^2) (WMO, 1996 citado en CEDECAP, 2003 pp.13).

Un pirheliómetro patrón secundario es un pirheliómetro absoluto que no cumple todas las especificaciones o que no está plenamente caracterizado y puede usarse como patrón secundario si es calibrado por comparación con el Grupo de Normalización Mundial (World Standard Group). Pueden a su vez calibrar a otros en unidades absolutas, por ello son de gran fiabilidad por su precisión y recomendables por su portabilidad para los diferentes propósitos. Uno de los más conocidos es el "Pirheliómetro de compensación Ångström", usado para calibrar tanto pirheliómetros como piranómetros, y que consiste de dos láminas de manganina platinada, oscurecidas con una capa de negro de humo o con pintura negra mate óptica. Detrás de cada lámina se acopla un termopar de cobre-constantán para que la diferencia de temperatura entre las láminas pueda indicarse en un galvanómetro sensible o un micro voltímetro eléctrico (WMO, 1996 citado en CEDECAP, 2003 pp.13).

Los pirheliómetros de campo son usados para registro continuo de la irradiación solar y con frecuencia se montan sobre un sistema de seguimiento automático. Pueden ser también empleados para la calibración de los instrumentos de una red (OMM, 1990). Generalmente hacen uso de una termopila como detector y tienen un ángulo óptico que varía desde $2,5^\circ$ a $5,5^\circ$ de semiángulo de abertura y entre 1° a 2° de

ángulo de inclinación; éstas características de su diseño le permiten seguir el desplazamiento del sol.

El tipo de uso del pirheliómetro puede dictar la selección de un tipo particular de instrumento. Algunos modelos, como el Actinómetro Linke Fuessner, son usados principalmente para mediciones puntuales, mientras que otros como los de tipo Eppley, Kipp & Zonen o EKO son diseñados específicamente para monitoreo de largo plazo de la irradiancia directa (WMO, 1996 citado en CEDECAP, 2003 pp.13).

En el pirheliómetro Eppley el receptor está hecho de un metal cuya superficie está parcialmente ennegrecida y parcialmente blanca, aunque en algunos casos puede ser completamente negra. Las partes blancas y negras están aisladas una de la otra, y las termocuplas dispuestas bajo la superficie receptora tal que las uniones en contacto termal con la parte negra del receptor son las uniones calientes, mientras aquellas en contacto termal con la parte blanca de la superficie receptora son las uniones frías. Como las dos partes (negra y blanca) de la superficie receptora tienen diferentes absorptividades, se establecerá una diferencia de temperatura entre ellas cuando estén expuestas a la irradiación (Robinson, 1966 citado en CEDECAP, 2003 pp.13).

Otros de los pirheliómetros de uso bastante extendido es el Kipp & Zonen. Este instrumento cuenta con una termopila de 40 uniones de manganina-constantán en dos grupos circulares de 20 μm cada una.

Uno de esos grupos se encuentra protegido del sol en la intención de compensar las fluctuaciones térmicas en el interior del instrumento.

Debido a que no es compensado en las variaciones de la temperatura ambiente, posee un termómetro incorporado que permite a partir de su lectura aplicar un factor de corrección en la constante de calibración del pirheliómetro, el cual es función de dicha temperatura (Tiba *et al.*, 2000 citado en CEDECAP, 2003 pp.13).

2.7.1.2. Calibración de Pirheliómetros.

De acuerdo con el Atlas de Radiación Solar de Colombia cada tipo de pirheliómetro requiere de una distinta calibración, por ejemplo, los pirheliómetros absolutos pueden servir de referencia como patrón secundario. Aunque poseen un mecanismo de auto-calibración, necesitan un factor de comparación con el valor de la referencia mundial, que se obtiene cada cinco años con el grupo World Standard Group (WSG). Todos los demás pirheliómetros necesitan ser calibrados; el método más usado es comparando con un pirheliómetro patrón secundario usando como fuente de radiación el Sol.

Los instrumentos de medida de radiación de primera y segunda clase se calibran con un patrón secundario, y estos instrumentos se deben calibrar cada uno o dos años, durante días muy claros y estables, de preferencia en estaciones de gran altura (IDEAM, 2005).

La calibración del pirheliómetro se efectúa inter-comparando la potencia radiante (W/m^2) medida con el instrumento patrón nacional y la respuesta en milivoltios de la termopila del pirheliómetro por calibrar, teniendo el Sol como fuente de energía, en un día completamente despejado, efectuando lecturas simultáneas a intervalos de 90 segundos y en series agrupadas de 18 minutos, obteniéndose entre 6 y 12 valores de irradiancia según la clase de pirheliómetro. (IDEAM, 2005).

En México, el Laboratorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la UNAM, está reconocido por la Organización Meteorológica Mundial como un centro regional de calibración de sensores de radiación solar.

2.7.2. Piranómetro

Los piranómetros son instrumentos que miden la irradiación solar global (directa y difusa) en un plano horizontal. El elemento receptor debe estar horizontal y

libremente expuesto al hemisferio celeste, pero debe estar protegido de la irradiación que regresa del suelo y los alrededores (Robinson, 1966 citado en CEDECAP, 2003 pp.13).

Al encontrarse expuesto a todo tipo de condiciones ambientales, el piranómetro debe ser robusto en su estructura y resistir la corrosión del aire húmedo, además, su elemento receptor debe encontrarse debidamente aislado (herméticamente cerrado) por un domo de vidrio.

Los piranómetros normalmente usan sensores termoelectricos, fotoelectricos, piroelectricos o elementos bimetálicos; sus propiedades en relación a su grado de precisión y confiabilidad son: sensibilidad, estabilidad, tiempo de respuesta, respuesta cosenoidal, respuesta azimutal, linealidad, respuesta de temperatura y respuesta espectral (WMO, 1996 citado en CEDECAP, 2003 pp.12).

2.7.2.1. Tipos de Piranómetro

De acuerdo al Atlas de Energía Solar de Perú (ADESP), se definen varios tipos de piranómetros y uno de los primeros a definir es el piranómetro fotovoltaico que posee como elemento sensor una célula fotovoltaica, generalmente de silicio mono cristalino. Las fotocélulas tienen la propiedad de producir corriente eléctrica cuando son iluminadas, siendo esta corriente, en condiciones de corto circuito, proporcional a la intensidad de radiación incidente (CEDECAP, 2003).

Se recomienda que sean utilizados para integraciones diarias de irradiación solar total sobre un plano horizontal o para observar pequeñas fluctuaciones de irradiación debido a su gran sensibilidad y respuesta casi instantánea, cerca de 10 segundos.

Para valores diarios, el error en las mediciones de un piranómetro fotovoltaico está en el orden de 3%. Ciertos procedimientos, entre tanto, pueden mejorar algo más los resultados a fin de lograr diferencias menores de 1% en las mediciones de irradiación diaria, cuando son comparados con piranómetros de precisión (CEDECAP, 2003).

En el caso de los piranómetros termoeléctricos el elemento sensible es en esencia una pila termoeléctrica constituida por pares termoeléctricos (termopares) en serie. Tales termopares generan una tensión eléctrica proporcional a la diferencia de temperatura entre sus uniones, las cuales se encuentran en contacto térmico con placas metálicas que se calientan de forma distinta cuando están iluminadas. Por lo tanto, una diferencia de potencial medida en la salida del instrumento puede ser relacionada con el nivel de irradiación (CEDECAP, 2003).

Dentro de los piranómetros termoeléctricos existen esencialmente dos tipos en uso, siendo ellos (CEDECAP, 2003):

Piranómetros con un detector pintado de blanco y negro, esto es, el receptor presenta alternativamente superficies blancas y negras dispuestas en coronas circulares concéntricas o con otros formatos, tales como estrellas o cuadrículas. En estos instrumentos, las uniones calientes de termopilas están en contacto con superficies negras, altamente absorbentes, y las frías en contacto con superficies blancas, de gran reflectividad.

Piranómetros con superficie receptora totalmente ennegrecida en contacto térmico con las uniones calientes y las frías, asociadas a un bloque de metal de gran conductividad térmica, colocadas en el interior de un instrumento, resguardadas de la irradiación solar y teniendo aproximadamente la temperatura del aire.

Los piranómetros más difundidos dentro del tipo Blanco y Negro son:

Eppley 8-48 (Estados Unidos); Cimel CE-180 (Francia); Star o SHENK y el M-80M (Rusia). De éstos, el Eppley 8-48 y el CE-180 poseen compensación por temperatura. Y dentro de los piranómetros con superficie receptora totalmente negra, los más usados son el Eppley PSP (Estados Unidos) y el Kipp & Zonen, CM-5 y CM-10. El Eppley PSP es compensado por temperatura, siendo un instrumento de

precisión y considerado de primera clase. Todos los demás piranómetros considerados aquí son de segunda clase (CEDECAP, 2003).

El Piranómetro de Bellani, primer instrumento diseñado para la determinación de irradiación circun-global fue inventado por Bellani en 1836 y fue modificado por Henry en 1926. Este instrumento opera con el principio de destilación de un líquido como resultado de la absorción de la irradiación incidente (Robinson, 1966 citado en CEDECAP, 2003 pp.14).

La esfera externa es de vidrio y la interna de cobre pintado de color plomo. La bureta está unida con la esfera de cobre mediante un tubo capilar de forma tal que constituyen un reservorio interno para el elemento sensible, que en este caso es alcohol etílico puro. Al incidir la irradiación solar (directa, difusa y reflejada), la esfera de cobre aumenta su temperatura, parte del alcohol se evapora y vuelve a condensarse a lo largo de la bureta que se encuentra a menor temperatura. La cantidad de alcohol acumulada en un tiempo determinado es directamente relacionada con la irradiación total interceptada en onda corta por la esfera de cobre (CEDECAP, 2003).

2.7.2.2. Calibración de Piranómetro.

La calibración de un piranómetro consiste en la determinación de su factor de calibración y la dependencia de éste a las condiciones ambientales, tales como: temperatura, nivel de irradiancia, distribución espectral de irradiancia, variación temporal, distribución angular de irradiancia, inclinación del instrumento (WMO, 1996 citado en CEDECAP, 2003 pp.15).

La Organización Meteorológica Mundial refiere que existen varias metodologías para calibrar un piranómetro usando como fuente el sol o los recursos del laboratorio. Estos métodos son:

Por comparación con un pirheliómetro patrón para la irradiación solar directa y un piranómetro sombreado para la irradiación difusa.

Por comparación con un pirheliómetro patrón, utilizando el sol como fuente, con un disco de sombreado removible para el piranómetro.

Por comparación con un piranómetro patrón, utilizando el sol como fuente, o bajo otras condiciones naturales de exposición (por ejemplo, un cielo nublado uniforme).

En el laboratorio, sobre un banco óptico con una fuente artificial bien con incidencia normal o con cierto azimut y altura especificados, por comparación con un piranómetro similar previamente calibrado al aire libre.

En el laboratorio, con la ayuda de una cámara de integración que simule la irradiación difusa, por comparación con un tipo similar de piranómetro previamente calibrado al aire libre. Es necesario especificar bajo qué condiciones ambientales se ha efectuado la prueba de calibración y qué método se ha utilizado.

2.7.3. Radiómetro Tipo Gardon

Cuando se desea realizar mediciones de radiación solar concentrada (RSC) se usa un radiómetro tipo Gardon, se trata de un sensor que está diseñado para medir la densidad de flujo de radiación, w/m^2 (en vatios por metro cuadrado).

El transductor es un termopar diferencial que mide la diferencia de temperatura entre el centro y la circunferencia de un disco circular de aluminio muy delgado. El disco está unido a una abertura circular en un disipador de calor cilíndrico. Este disipador de calor esta hecho de cobre. Este material produce una salida que es directamente proporcional al flujo de calor. Los productos Thermogage miden la radiación y el flujo de calor por convección. La serie 9000 radiómetros miden solamente la transferencia de calor por radiación (Vatell Corporation, n.d.).

Este tipo de sensores debe de tener ciertas condiciones al realizar su montaje, por ejemplo, implementar un sistema de refrigeración por medio de agua ya que el agua elimina el calor absorbido de forma continua, proporcionando un buen disipador de calor. La disipación de calor de la unidad de conducción de refrigeración debe permitir que el calor se extraiga de la unidad durante de la duración de la prueba.

Cuando el transductor Thermogage esté expuesto a flujo de calor, la tensión se produce será proporcional al flujo de calor. Entonces cuando se lleve a cabo la medición, el flujo de calor incidente es la tensión de salida dividida por la sensibilidad de la unidad. Ésto supone la transferencia de calor por radiación. Para la convección se debe tener en cuenta la emisividad (Vatell Corporation, n.d.).

Hay tres cables relacionados con los productos Thermogage estándar. El cable rojo es (+) el flujo de calor, el negro es (-) flujo de calor y el alambre de plata es la tierra. El cable a tierra es flotante. Si las unidades se utilizan a 20 mV puede dañar el medidor (Vatell Corporation, n.d.).

2.8. Estudios Previos

Como estudios anteriores, Brumleve, T.D., en 1984 realizó algunos de los primeros análisis de los riesgos oculares asociados con las tecnologías solares de receptor central. Los modelos analíticos fueron desarrollados para evaluar la intensidad de la luz y los rangos peligrosos de múltiples rayos de un solo helióstato así como de varios, a nivel del suelo y en el espacio aéreo por encima de una instalación de receptor central. Este estudio se llevó a cabo en los Laboratorios Nacionales Sandia en Albuquerque, Nuevo México. Los resultados mostraron que la irradiancia de un solo helióstato sobrepasa los límites seguros dentro de una distancia focal corta (hasta 40 m), pero los límites seguros para la retina tomados de helióstatos con distancias focales de más de 270 m nunca fueron excedidos.

Este mismo autor varios años antes, en su investigación “Eye Hazard and Glint Evaluation for the 5 MWt Solar Thermal Test Facility”, realizó una discusión sobre varios haces provenientes de distintas fuentes que convergen en un mismo punto, los cuales pueden incrementar el tamaño de la imagen en la retina, por lo que se debe de tener ciertas medidas de precaución que contrarresten el efecto “post-imagen” dentro de rangos cortos.

Ho, Ghanbari y Diver (2009), muestran un resumen de los análisis anteriores para evaluar los efectos de brillo y el resplandor de plantas de concentración de energía solar y su posible afectación visual. Además, de una revisión de la fisiología, óptica, y la preparación mecanismos de daño ocular asociados con la radiación. El estudio consistió en hacer un resumen de parámetros de seguridad y normativas a partir de la literatura para definir los riesgos potenciales a partir de la irradiancia del brillo y deslumbramiento, para que posteriormente fueran planteadas una serie de métricas de seguridad para la prevención de este tipo de riesgos oculares.

Un año después (2010) el mismo grupo de autores proponen los métodos de análisis para evaluar la irradiancia directa y difusa reflejada en fuentes en función de la distancia y las características de la fuente.

Los modelos de la reflexión directa y difusa fueron evaluados a través de la prueba en los Laboratorios Nacionales Sandia. La irradiancia directa fue evaluada mediante el trazo de rayos del sol de un colector de disco parabólico, mientras que la difusa fue evaluada a partir de imágenes de los haces de los helióstatos generados en la pared frontal de la torre del receptor. Para las fotografías de imágenes reflejadas por el sol se utilizó una cámara digital Nikon D70 y fueron utilizadas para cuantificar la irradiancia por pixel, y por último se llevó a cabo simulaciones de trazo de rayos con el software ASAP (Ho C.K., C.M. Ghanbari, and R.B. Diver, 2010).

En el 2011, Ho realizó estudios en National Solarthermal Test Facility en Albuquerque y Nevada, estos estudios básicamente consistían en corroborar la

situación expuesta en su primer estudio. En ambos lugares se tomaron fotografías digitales del brillo de la torre para cuantificar la irradiancia y los impactos oculares en los dos campos, mediante la evaluación por la metodología expuesta en el estudio que realizó en colaboración con Ghanbari y Diver en el 2010.

El estudio llevado a cabo en Albuquerque reveló que cuando los helióstatos fueron colocados en un modo de espera con un punto objetivo a 30 m al este de la parte superior de la torre, se podía observar el fuerte brillo proveniente los espejos de los helióstatos a más de 1700 m (> 1 milla) de distancia.

El análisis de riesgos oculares mostró que la irradiancia en la retina y ángulo subtendido del brillo era suficiente para causar un impacto temporal después de ver la fuente emisora directamente al que se le dio el nombre de post-imagen

En el segundo estudio llevado a cabo en Nevada el autor describe que el mismo post-imagen fue notorio, pero sólo después de ver el brillo de la fuente emisora por períodos prolongados.

Franck, Walzer y Chernin (2010) exploraron la operación y los aspectos del diseño de una planta de concentradores de torre central en Israel puesta en marcha en el 2008 y la que contaba con alrededor de 1,600 helióstatos, este tipo de aspectos estaban vinculados con la salud de los trabajadores, así como con riesgos potenciales que ponían en juicio la seguridad tanto del personal que laboraba dentro de la instalación, como la gente en sus alrededores (personas que transitan por carretera cercana). Los peligros potenciales incluyeron el riesgo de la exposición la intensa luz del sol reflejada por los helióstatos, o el resplandor del receptor solar. Los agentes patológicos que fueron observados en el Centro de desarrollo de energía solar (SEDC), fueron básicamente daños en la piel y en los ojos.

En los siguientes capítulos de la presente investigación, se aplicará una parte del desarrollo de la metodología propuesta por Ho en el 2010, en su trabajo

“Methodology to Assess Potential Glint and Glare Hazards from Concentrating Solar Power Plants: Analytical Models and Experimental Validation”. También, tomando como base el trabajo de los autores que fueron nombrados en este capítulo, se brindará un panorama amplio sobre la evaluación de riesgos en un campo de prueba de helióstatos y su situación actual en relación con las normativas que proveen límites máximos permisibles de exposición.

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la aplicación del método analítico para el cálculo de la irradiación por reflexión de la luz solar en la superficie de los helióstatos y la del receptor, en función de la distancia.

El modelo de aplicación se realizó en el campo de prueba de helióstatos (CPH) en Sonora, México. Este campo es un proyecto llevado a cabo por las instituciones de educación superior UNIVERSIDAD DE SONORA y UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, ubicado en el Km 21 de la Carretera Hermosillo- Bahía Kino, en el acceso de entrada del Departamento de Agronomía de la UNISON.

El CPH consiste de un conjunto de helióstatos desplegados sobre el terreno, una torre con cabina de experimentación y de una sala de control. Los helióstatos instalados en el campo tienen un tamaño mediano (36 m^2) y permiten alcanzar un factor de concentración de la radiación solar de 25. La potencia térmica de diseño se fijó en 2 MWt. Esto determinó las características finales de la instalación, con torre en 36 m de altura y un total de 82 helióstatos. En la primera etapa, finalizada en diciembre de 2010, se instalaron 15 helióstatos con variantes en el diseño y en la segunda etapa del CPH se llegará al total de helióstatos previstos (Arancibia et al, 2011; Rivieros et al, 2009).

La selección de los helióstatos para el presente estudio fue llevada a cabo por decisión estratégica en función de la distancia en la que están ubicados del receptor, tratando de que fueran representativos de las diferentes zonas del campo. Dichos helióstatos se ubican a las siguientes distancias: 207m el más lejano, 150m, 121m, 70m y 41m el más cercano. La distribución del CPH y los helióstatos elegidos se puede ver en la Figura 3.1.

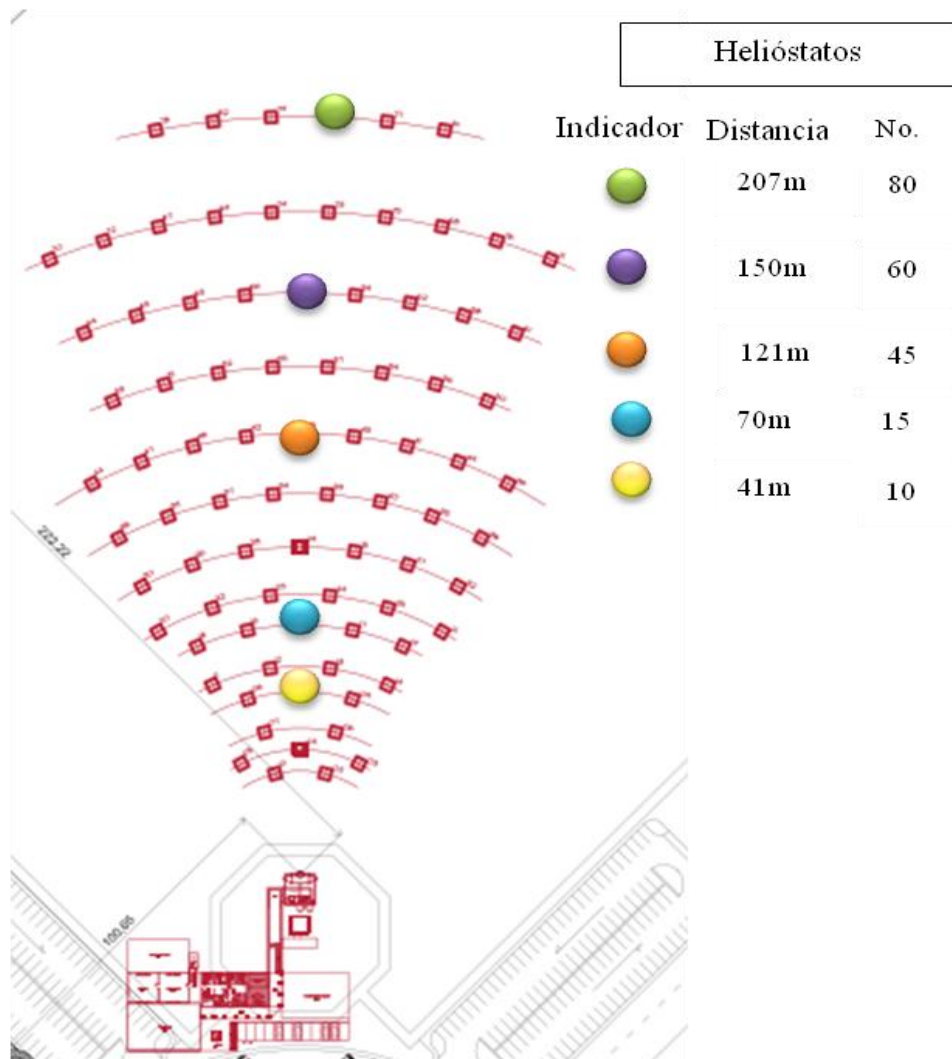


Figura 3.1. Distribución de los helióstatos en el CPH. Imagen tomada y modificada del plano de distribución eléctrica y de aire acondicionado del Campo de prueba de helióstatos, PC-01, 2010.

3.1. Software de Trazo de Rayos SolTrace.

Cuando se trata de radiación solar concentrada, existe una herramienta útil para modelar el flujo de radiación solar concentrada en el sistema; "SolTrace. Dicho software fue desarrollado por el laboratorio gubernamental National Renewable Energy Laboratory, NREL, de Estados Unidos y se ha puesto a disposición del público para uso no lucrativo mediante su página de internet.

Mediante esta herramienta se simuló la concentración solar en el sistema, para los helióstatos situados a diferentes distancias del receptor. Se pretende tener una visión general de los puntos de concentración de radiación elevados o que sobrepasen los límites máximos permisibles en el CPH. Dichas simulaciones nos permiten tener acceso a una gran cantidad de información que sería difícil medir.

La simulación se lleva a cabo con las características ópticas y dimensión ideales de los colectores, es decir se define un conjunto de propiedades ópticas que contiene un conjunto de parámetros diferentes para la parte delantera y trasera de la superficie, las cuales fueron 25 facetas de 1.20 x 1.20 m para cada superficie plana que conforma a un helióstato. Dichas propiedades de las superficies de los elementos están definidas por el vector del eje z, y es importante definir los valores de trasmisividad, refractividad y los errores en un principio.

En la simulación se toman en cuenta 2 etapas, las cuales son:

Etapas 1 (helióstatos): que consta de los helióstatos planos, definiendo una superficie rectangular que representa a cada espejo que conforma el helióstato, con medidas 1.20 m por 1.20m cada una de las 25 facetas.

Etapas 2 (Target): el cual es un escenario virtual que consiste simplemente en un objetivo plano de la distribución del flujo resultante generada en el foco del concentrador principal (helióstato), donde el tamaño del receptor (modificándolo directamente de la tabla de contenidos), varía dependiendo de la distancia, es decir, a más corta la distancia el receptor tendrá que ser más grande, con la finalidad de que el 90% de los rayos trazados residan dentro del receptor.

Los rayos de luz provenientes del sol residen en la Etapas 1 (helióstatos) y luego a la Etapas 2 (Destino).

Al efectuar una corrida de la simulación de un helióstato, deben de mostrarse en una gráfica todas las intersecciones de los haces de luz, ver Figura 3.2.

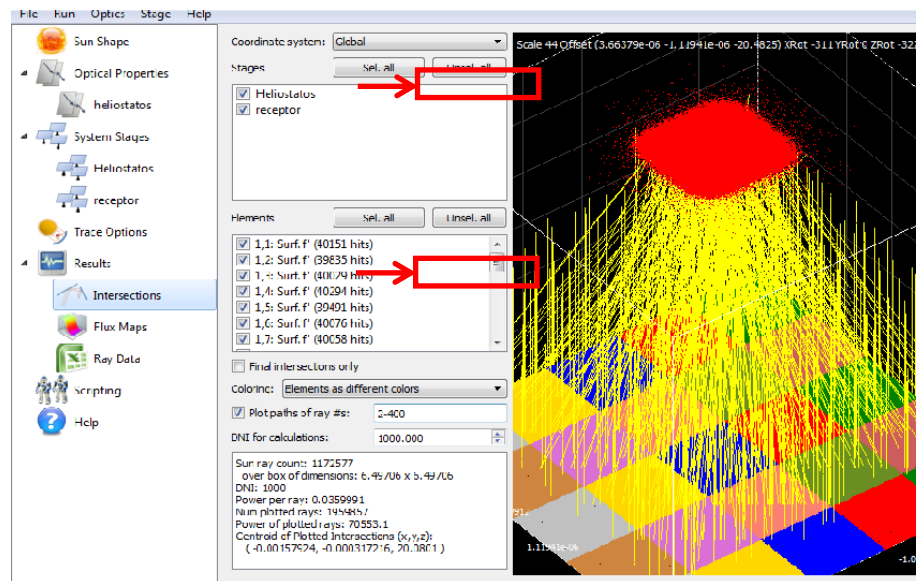


Figura 3.2. Intersecciones. Pantalla impresa desde la simulación con el software SolTrace.

Por último, al conocer la distribución de la intensidad del flujo en la superficie de nuestro receptor, por medio de los mapas de flujo (ver Figura 3.3) sabremos el flujo pico o flujo máximo. Esta cantidad será muy útil para el análisis, debido a que se desea saber los límites máximos de exposición, ya que lo que se busca es detectar la peor de las situaciones o bien la situación extrema a la que se enfrenta una persona.

Existen dos situaciones que serán evaluadas para el análisis, la primera, se simuló una persona ubicada a diferentes distancias, mirando directamente la radiación reflejada por un heliostato con concentración. En la segunda se analizó el efecto de observar el reflejo de la radiación que pega en el receptor de la torre, estas dos se describen en la siguiente sección de este capítulo.

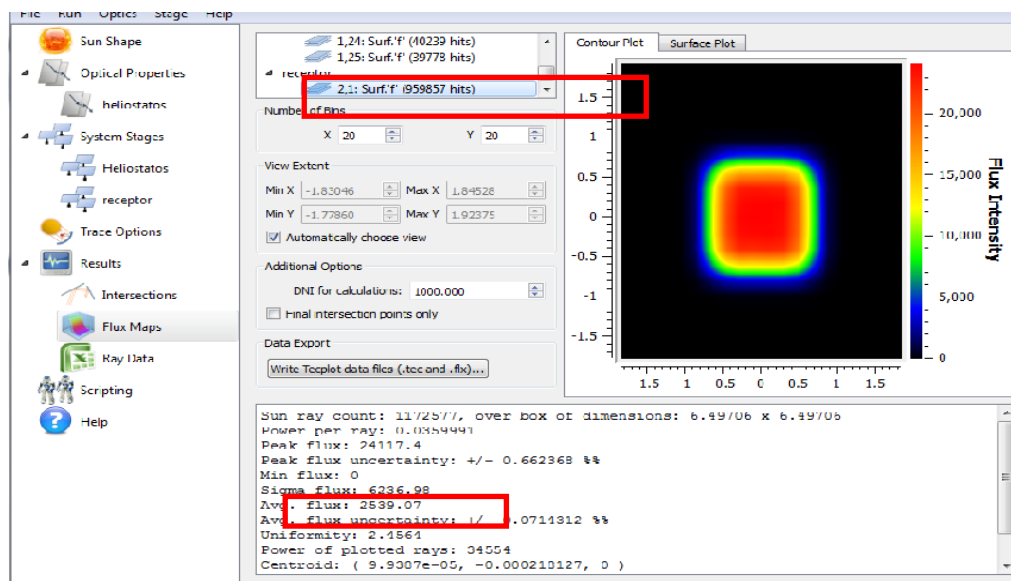


Figura 3.3. Mapas de flujo. Pantalla impresa desde la simulación con el software SolTrace.

3.2. Método

En la primera situación, la reflexión directa de las superficies de los helióstatos, son simulados 4 de ellos con diferentes distancias focales. Para cada uno de ellos se simula la irradiancia que concentran a diferentes distancias, pasando por su punto focal, es decir, el punto con mayor concentración de los haces de luz. El dato con más relevancia es el flujo pico de la irradiancia, ya que lo que se busca es detectar la situación extrema.

La irradiancia obtenida de las simulaciones hechas con SolTrace descritas arriba corresponde a la irradiancia fuera de la cornea (E_c en W/cm^2); es decir, la que llega al ojo. Por otro lado la irradiancia en el interior del ojo, en la retina (E_r en W/cm^2) causada por mirar directamente a los helióstatos, se puede calcular utilizando las ecuaciones (9) y (10) en la sección 2.5 de métricas, sujeta a las características, $d_p = 0.002m$, $f = 0.017m$ y $\tau = 0.5$. Una vez obtenida la irradiancia en la retina, se realiza una comparación con las métricas de seguridad establecidas por los autores de la literatura revisada.

En la segunda situación, nos interesa ver el posible efecto que tiene sobre una persona el observar el receptor del CPH cuando se encuentra en operación y los helióstatos se enfocan sobre él. La pregunta aquí es si la radiación reflejada por el receptor y que llega al ojo del observador alcanza niveles de riesgo. Para estudiar la reflexión de la luz del sol que reside en superficie del receptor, se simulan 5 helióstatos a un nivel de eficiencia del 90%. Con esto se quiere decir que el receptor tiene un tamaño suficiente para captar el 90% de los rayos solares concentrados por los helióstatos.

Se tomarán en cuenta 3 diferentes casos: el primer caso es cuando se encuentran las cinco imágenes de los helióstatos sobrepuestas en el blanco, el segundo caso es cuando las cinco imágenes de los helióstatos están apuntando a diferentes lugares del blanco y por último, cuando las imágenes de los 82 helióstatos se encuentran sobrepuestas sobre el receptor. Estos casos pretenden representar situaciones típicas que ocurren en el CPH: los dos primeros casos corresponden a situaciones donde se están probando helióstatos en el CPH, enfocándolos y desenfocándolos sobre la pantalla de observación. El tercer caso corresponde a pruebas futuras en las cuales el CPH estará operando con sus 82 helióstatos en pruebas para calentar fluidos térmicos.

Para calcular la irradiancia en la retina (E_r en W/cm^2) en cada uno de estos casos, el área efectiva vista por el observador y la de irradiancia vista por el observador se sustituyen por un área equivalente y una irradiancia equivalente, es decir, cuando no se observa el reflejo de un concentrador directamente, si no la radiación que este proyecta en una superficie (receptor); el tamaño angular de la fuente se determina a partir del área efectiva de la mancha reflejada en la superficie, vista por el observador (ver Figura 3.4.). El área efectiva A_{obs} vista por el observador depende del total de área iluminada real sobre el receptor y del ángulo del observador respecto al receptor, el cual a su vez depende de la altura de la torre y la distancia. El Área efectiva vista por el observador es expresada como:

$$A_{\text{obs}} = A' \cos \theta \quad (16)$$

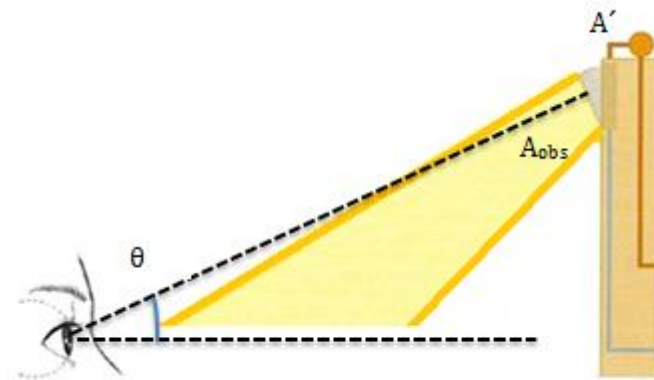


Figura 3.4. Observador con dirección al receptor.

Una vez que se obtiene el área real iluminada sobre el receptor se busca saber el total de irradiancia reflejada (E_{ref}) por el mismo, multiplicando por el coeficiente de reflexión, el cual varía de $\rho = 0.8$ para blanco Lambertiano o bien $\rho = 0.2$ si es el receptor térmico, por el total de irradiancia vista por el observador E' .

La irradiancia Reflejada se calcula de la siguiente forma:

$$E_{ref} = \rho E' \quad (17)$$

Sin embargo existe una diferencia entre el total de radiación reflejada que es vista por el observador y el total de radiación justo fuera de la cornea del ojo, debido a la distancia y el ángulo en el que se encuentre ubicado el observador, para ésto se utilizó la ecuación (10) la irradiancia fuera de la cornea como E_c en W/cm^2 .

La Irradiancia fuera de la cornea se expresa en este caso como:

$$E_c = I_{ref} A' \frac{X_{obs}}{(Z_{obs}^2 + X_{obs}^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (18)$$

Por otra parte, la irradiación de retina o bien la energía por cm^2 que entra por la pupila (E_r), es igual a la relación de la energía que se encuentra fuera de la cornea por el área de la pupila, por la distancia a la que se encuentra ubicado el observador, sobre el área vista por el observador, con un coeficiente de transmisión, $\tau=0.5$ y una distancia focal del ojo, $f = 0.017\text{m}$.

Es decir que Irradiancia que entra por la pupila está dada por:

$$E_r = \frac{E_c A_p \tau r_{obs}^2}{A_{obs} f^2} \quad (19)$$

En el tercer caso, la irradiancia equivalente se refiere a la irradiancia acumulada de las 82 imágenes de helióstatos sobrepuestos en el receptor, se definen grupos de helióstatos y se toma la irradiancia promedio de cada uno de los grupos.

H4, a 41 m, representa a 7 helióstatos (grupo 1)

H15, a 70 m, representa a 25 helióstatos (grupo 2)

H45, a 121 m, representa a 25 helióstatos (grupo 3)

H60, a 150 m, representa a 19 helióstatos (grupo 4)

H80, a 207 m, representa a 6 helióstatos (grupo 5)

Por lo tanto, si lo que queremos saber es la cantidad de radiación que llega a la retina por ver la pantalla del receptor a 5 helióstatos o más, se debe de determinar un área equivalente y una irradiancia equivalente como se muestra para los siguientes casos:

Caso de 5 imágenes de helióstatos superpuestas en el blanco:

Área equivalente de 5 imágenes superpuestas en el blanco.

$$A_{\text{equiv}} = \frac{A'_1 E'_{11} + A'_2 E'_{12} + A'_3 E'_{13} + A'_4 E'_{14} + A'_5 E'_{15}}{E'_{11} + E'_{12} + E'_{13} + E'_{14} + E'_{15}} \quad (20)$$

Irradiancia equivalente de 5 imágenes superpuestas en el blanco.

$$E_{\text{equiv}} = E'_{11} + E'_{12} + E'_{13} + E'_{14} + E'_{15} \quad (21)$$

Donde A_i y E_i son el área e irradiancia para el heliostato i -ésimo.

Caso de 5 imágenes de heliostatos separadas en el blanco:

Área equivalente de 5 imágenes separadas en el blanco.

$$A_{\text{equiv}} = A'_1 + A'_2 + A'_3 + A'_4 + A'_5 \quad (22)$$

Irradiancia equivalente de 5 imágenes separadas en el blanco.

$$E_{\text{equiv}} = \frac{A'_1 E'_{11} + A'_2 E'_{12} + A'_3 E'_{13} + A'_4 E'_{14} + A'_5 E'_{15}}{A'_1 + A'_2 + A'_3 + A'_4 + A'_5} \quad (23)$$

Caso de 82 imágenes de heliostatos superpuestos en el receptor:

Área equivalente a 82 imágenes de heliostatos superpuestos en el receptor.

$$A_{\text{equiv}} = \frac{n_1 A'_1 E'_{11} + n_2 A'_2 E'_{12} + n_3 A'_3 E'_{13} + n_4 A'_4 E'_{14} + n_5 A'_5 E'_{15}}{n_1 E'_{11} + n_2 E'_{12} + n_3 E'_{13} + n_4 E'_{14} + n_5 E'_{15}} \quad (24)$$

Irradiancia equivalente a 82 imágenes de heliostatos superpuestos en el receptor.

$$E_{\text{equiv}} = n_1 E'_{11} + n_2 E'_{12} + n_3 E'_{13} + n_4 E'_{14} + n_5 E'_{15} \quad (25)$$

Donde n_1 es el número de heliostatos representado por el grupo 1, etc.

Posteriormente se realizó una comparación con las métricas de seguridad establecidas por los autores de la literatura revisada y se definieron las zonas de riesgo en función de la distancia.

En el siguiente capítulo se plantean los resultados objeto de la aplicación de la metodología descrita en este capítulo.

4. RESULTADOS

Por medio de la aplicación del método proporcionado en la parte de metodología y las ecuaciones descritas en la parte de métricas del marco teórico, se obtienen resultados descritos durante este capítulo.

4.1. Reflexión Directa de las Superficies de los Helióstatos.

En la primera, se simuló una persona ubicada a diferentes distancias, mirando directamente la radiación reflejada por un helióstato con concentración. El objetivo es obtener la irradiancia reflejada directa de las superficies de 4 diferentes helióstatos con distancias focales de 41, 70, 150 y 207 m, para diferentes distancias de observación. Para esto se aplican las ecuaciones de la (9) a la (14) sujetas a las siguientes características: E_c (irradiancia en el plano frontal de la cornea) proveniente de las simulaciones (Tabla 4.1), dada en W/m^2 , $d_p = 0.002m$, $f = 0.017m$, $\beta = 0.0115$ y $\tau = 0,5$, y E_{DNI} de $1000 W/cm^2$. Los resultados se muestran en la Tabla 4.1.

Mediante los datos obtenidos de E_c en base a un nivel de distribución del espectro solar (ASTM G173-03), la estimación del ángulo subtendido está sujeta a las siguientes características: La irradiancia normal directa $EDNI = 1000 W/m^2$, el área de la imagen reflejada en un espejo vista por un observador a una cierta distancia, definidos por: $\Delta_{slope} = 0.95$, $\Delta_{spec} = 0.2mrad$ y $\Delta_s = 4.7 mrad$.

Tomando en cuenta que para definir β , que es el haz total del ángulo de divergencia, tenemos que: $\beta = 2\Delta_s + \Delta_{spec} + 2 \Delta_{slope} = 11.5$

Tabla de Flujo Máximo							
41m		70m		150m		207m	
Distancia	Flujo pico	Distancia	flujo pico	Distancia	flujo pico	Distancia	Flujo pico
1000	23.057	1000	21.5282	1000	39.5989	1000	73.4037
900	27.6713	500	78.4362	700	91.8439	900	93.4258
800	31.9032	250	256.437	500	197.337	800	126.124
700	45.3691	150	781.448	300	999.998	700	179.556
600	52.6532	120	1926.52	270	1495.01	600	262.567
500	74.2014	100	5253.11	260	1764.62	500	457.598
400	111.989	95	7321.81	250	2108.46	400	944.526
300	201.405	90	10311.3	240	2549.35	300	2846.72
200	361.787	85	14171.4	230	3085.54	200	8832.87
120	726.672	80	18569.6	220	3775.51	120	5815.1
100	830.73	75	22170.3	210	4687.98	100	3895.37
90	919.997	70	23415.4	200	5755.6	90	3246.66
80	1144.58	65	23014.6	190	7054.41	80	2728.14
70	2203.28	60	21147.1	180	8569.58	70	2534.03
60	4561.78	55	17082.6	170	10225.1	60	2447.47
50	16772.4	50	11658.3	160	11877.5	50	2403.73
41	23978.5	45	7598.14	150	13248.9	40	2277.69
30	13349	40	5605.97	140	13790.9	30	2065.2
25	7169.6	35	3897.05	130	13522.3	25	1896.45
20	3907.31	30	3720.03	120	12262.9	20	1760.33
15	3877.31	25	3610.03	110	10252.4	15	1618.88
10	3394.87	20	3344.02	100	8026.81	10	1390.65
5	2251.58	15	3084.55	90	5963.05	5	1188.06
1	1197.41	10	2329.6	80	4444.99	1	1019.73
		5	1638.81	70	3405.18		
		3	1354.54	60	2967.75		
		1	1123.33	50	2780.04		
				40	2699.68		
				30	2500.5		
				20	2017.67		
				10	1566.21		
				1	1066.74		

Tabla 4.1. Flujos máximos.

El ángulo subtendido ω_{spot} , fue calculado por la ecuación (15) revisada en la Metodología, donde la E_{beam} es equivalente a E_c , la cual se trató en este capítulo como flujo máximo de la irradiancia. Mientras que la irradiancia en la retina E_r dada en W/m^2 , calculada por la ecuación (16), está sujeta a la definición de los parámetros: $d_p = 0.002\text{m}$, $f = 0.017\text{m}$, $\tau = 0.5$.

Tanto el umbral de quemadura de la retina, $E_{r, \text{burn}} (\text{W}/\text{cm}^2)$ como el umbral potencial del efecto post- imagen, $E_{r, \text{flash}} (\text{W}/\text{cm}^2)$, deben de ser calculadas en base al ángulo subtendido de la fuente, como se muestra en las formulas (13) y (14) descritas anteriormente.

En las Tablas 4.2-4.5 se muestra los resultados de $E_{r, \text{burn}} (\text{W}/\text{cm}^2)$, $E_{r, \text{flash}} (\text{W}/\text{cm}^2)$ y ω_{spot} .

Distancia	E_c	E_{DNI}	β	ω_{spot} (mrad)	E_r (W/cm ²)	$E_{r, burn}$ (W/cm ²)	$E_{r, flash}$ (W/cm ²)
1000	73.4037	1000	0.0115	0.00318	5.023515	37.10742	9.458209
900	93.4258	1000	0.0115	0.003588	5.023515	32.8917	7.640225
800	126.124	1000	0.0115	0.004168	5.023515	28.30876	5.858188
700	179.556	1000	0.0115	0.004974	5.023515	23.72574	4.285509
600	262.567	1000	0.0115	0.006014	5.023515	19.62003	3.061553
500	457.598	1000	0.0115	0.00794	5.023515	14.86202	1.872582
400	944.526	1000	0.0115	0.011407	5.023515	10.34458	0.986064
300	2846.72	1000	0.0115	0.019803	5.023515	5.958644	0.371428
200	8832.87	1000	0.0115	0.034883	5.023515	3.382742	0.136354
120	5815.1	1000	0.0115	0.028304	5.023515	4.169089	0.197395
100	3895.37	1000	0.0115	0.023165	5.023515	5.093841	0.281406
90	3246.66	1000	0.0115	0.021149	5.023515	5.579578	0.330634
80	2728.14	1000	0.0115	0.019386	5.023515	6.086764	0.38568
70	2534.03	1000	0.0115	0.018684	5.023515	6.31559	0.411714
60	2447.47	1000	0.0115	0.018362	5.023515	6.426301	0.424575
50	2403.73	1000	0.0115	0.018197	5.023515	6.484507	0.431405
40	2277.69	1000	0.0115	0.017714	5.023515	6.661507	0.452467
30	2065.2	1000	0.0115	0.016867	5.023515	6.995822	0.493433
25	1896.45	1000	0.0115	0.016163	5.023515	7.300441	0.532097
20	1760.33	1000	0.0115	0.015573	5.023515	7.577444	0.568354
15	1618.88	1000	0.0115	0.014934	5.023515	7.901553	0.612089
10	1390.65	1000	0.0115	0.013841	5.023515	8.525323	0.700199
5	1188.06	1000	0.0115	0.012793	5.023515	9.223603	0.804892

Tabla 4.2. ω_{spot} , E_r , $E_{r, burn}$ y $E_{r, flash}$ para el helióstato a 41m.

Distancia	E_c	E_{DNI}	β	ω_{spot} (mrad)	E_r (W/cm ²)	$E_{r, burn}$ (W/cm ²)	$E_{r, flash}$ (W/cm ²)
150	781.448	1000	0.0115	0.010376	5.023515	11.37286	1.166145493
120	1926.52	1000	0.0115	0.016291	5.023515	7.243242	0.524740694
100	5253.11	1000	0.0115	0.026901	5.023515	4.386433	0.215973623
95	7321.81	1000	0.0115	0.031759	5.023515	3.715443	0.160983728
90	10311.3	1000	0.0115	0.037689	5.023515	3.130856	0.11890139
85	14171.4	1000	0.0115	0.044184	5.023515	2.670628	0.089736479
80	18569.6	1000	0.0115	0.050578	5.023515	2.33302	0.070644614
75	22170.3	1000	0.0115	0.055265	5.023515	2.135178	0.060389505
70	23415.4	1000	0.0115	0.056795	5.023515	2.077634	0.057538749
65	23014.6	1000	0.0115	0.056307	5.023515	2.095647	0.058424671
60	21147.1	1000	0.0115	0.053974	5.023515	2.186223	0.062968354
55	17082.6	1000	0.0115	0.048511	5.023515	2.432444	0.076060477
50	11658.3	1000	0.0115	0.040076	5.023515	2.944436	0.106658909
45	7598.14	1000	0.0115	0.032353	5.023515	3.647255	0.155791357
40	5605.97	1000	0.0115	0.02779	5.023515	4.246141	0.203898195
35	3897.05	1000	0.0115	0.02317	5.023515	5.092743	0.28129886
30	3720.03	1000	0.0115	0.022638	5.023515	5.212506	0.293113426
25	3610.03	1000	0.0115	0.022301	5.023515	5.291324	0.301003985
20	3344.02	1000	0.0115	0.021463	5.023515	5.497755	0.322100475
15	3084.55	1000	0.0115	0.020614	5.023515	5.72432	0.345966905
10	2329.6	1000	0.0115	0.017914	5.023515	6.58687	0.44353236
5	1638.81	1000	0.0115	0.015025	5.023515	7.85336	0.605496304
3	1354.54	1000	0.0115	0.01366	5.023515	8.638212	0.716693621
1	1123.33	1000	0.0115	0.01244	5.023515	9.485628	0.845805103

Tabla 4.3. ω_{spot} , E_r , $E_{r, burn}$ y $E_{r, flash}$ para el helióstato a 70m.

Distancia	E_c	E_{DNI}	β	ω_{spot} (mrad)	E_r (W/cm ²)	$E_{r, burn}$ (W/cm ²)	$E_{r, flash}$ (W/cm ²)
300	999.998	1000	0.0115	0.011737	5.023515	10.05357	0.937497
270	1495.01	1000	0.0115	0.014351	5.023515	8.222384	0.656764
260	1764.62	1000	0.0115	0.015591	5.023515	7.568228	0.56713
250	2108.46	1000	0.0115	0.017043	5.023515	6.923682	0.484462
240	2549.35	1000	0.0115	0.01874	5.023515	6.296585	0.409524
230	3085.54	1000	0.0115	0.020617	5.023515	5.723401	0.345869
220	3775.51	1000	0.0115	0.022806	5.023515	5.174066	0.289298
210	4687.98	1000	0.0115	0.025413	5.023515	4.643302	0.238862
200	5755.6	1000	0.0115	0.028158	5.023515	4.190583	0.1992
190	7054.41	1000	0.0115	0.031174	5.023515	3.785205	0.166373
180	8569.58	1000	0.0115	0.034359	5.023515	3.434314	0.140055
170	10225.1	1000	0.0115	0.037532	5.023515	3.144025	0.119788
160	11877.5	1000	0.0115	0.040451	5.023515	2.91714	0.104915
150	13248.9	1000	0.0115	0.042722	5.023515	2.762039	0.095245
140	13790.9	1000	0.0115	0.043587	5.023515	2.70722	0.091924
130	13522.3	1000	0.0115	0.043161	5.023515	2.733975	0.093538
120	12262.9	1000	0.0115	0.041102	5.023515	2.870934	0.101992
110	10252.4	1000	0.0115	0.037582	5.023515	3.139836	0.119506
100	8026.81	1000	0.0115	0.033253	5.023515	3.548528	0.148405
90	5963.05	1000	0.0115	0.028661	5.023515	4.117044	0.193054
80	4444.99	1000	0.0115	0.024746	5.023515	4.768529	0.250382
70	3405.18	1000	0.0115	0.021659	5.023515	5.448159	0.316975
60	2967.75	1000	0.0115	0.02022	5.023515	5.835877	0.35799
50	2780.04	1000	0.0115	0.01957	5.023515	6.02968	0.379301
40	2699.68	1000	0.0115	0.019285	5.023515	6.118763	0.389276
30	2500.5	1000	0.0115	0.01856	5.023515	6.357793	0.416596
20	2017.67	1000	0.0115	0.016672	5.023515	7.077742	0.503706
10	1566.21	1000	0.0115	0.014689	5.023515	8.033315	0.630271
1	1066.74	1000	0.0115	0.012122	5.023515	9.733981	0.885396

Tabla 4.4. ω_{spot} , E_r , $E_{r, burn}$ y $E_{r, flash}$ para el heliostato a 150m.

Distancia	E_c	E_{DNI}	β	ω_{spot} (mrad)	E_r (W/cm ²)	$E_{r, burn}$ (W/cm ²)	$E_{r, flash}$ (W/cm ²)
1000	73.4037	1000	0.0115	0.00318	5.023515	37.10742	9.458209
900	93.4258	1000	0.0115	0.003588	5.023515	32.8917	7.640225
800	126.124	1000	0.0115	0.004168	5.023515	28.30876	5.858188
700	179.556	1000	0.0115	0.004974	5.023515	23.72574	4.285509
600	262.567	1000	0.0115	0.006014	5.023515	19.62003	3.061553
500	457.598	1000	0.0115	0.00794	5.023515	14.86202	1.872582
400	944.526	1000	0.0115	0.011407	5.023515	10.34458	0.986064
300	2846.72	1000	0.0115	0.019803	5.023515	5.958644	0.371428
200	8832.87	1000	0.0115	0.034883	5.023515	3.382742	0.136354
120	5815.1	1000	0.0115	0.028304	5.023515	4.169089	0.197395
100	3895.37	1000	0.0115	0.023165	5.023515	5.093841	0.281406
90	3246.66	1000	0.0115	0.021149	5.023515	5.579578	0.330634
80	2728.14	1000	0.0115	0.019386	5.023515	6.086764	0.38568
70	2534.03	1000	0.0115	0.018684	5.023515	6.31559	0.411714
60	2447.47	1000	0.0115	0.018362	5.023515	6.426301	0.424575
50	2403.73	1000	0.0115	0.018197	5.023515	6.484507	0.431405
40	2277.69	1000	0.0115	0.017714	5.023515	6.661507	0.452467
30	2065.2	1000	0.0115	0.016867	5.023515	6.995822	0.493433
25	1896.45	1000	0.0115	0.016163	5.023515	7.300441	0.532097
20	1760.33	1000	0.0115	0.015573	5.023515	7.577444	0.568354
15	1618.88	1000	0.0115	0.014934	5.023515	7.901553	0.612089
10	1390.65	1000	0.0115	0.013841	5.023515	8.525323	0.700199
5	1188.06	1000	0.0115	0.012793	5.023515	9.223603	0.804892
1	1019.73	1000	0.0115	0.011852	5.023515	9.955823	0.921425

Tabla 4.5. ω_{spot} , E_r , $E_{r, burn}$ y $E_{r, flash}$ para el helióstato a 207m.

En la Figura 4.1, la irradiancia en la retina que representa a los helióstatos ubicados a distancias de 41, 70, 141 y 207 metros es comparada con los valores de las irradiancias representadas por E_r , flash y la E_r , burn, establecidas por los autores de la literatura revisada (Tabla 2.15.), donde la línea verde representa el límite del potencial para producir un efecto post- imagen y la línea roja define el límite del potencial para producir un daño permanente en el ojo. Se puede notar, en esta misma gráfica, que existe irradiancia lo suficientemente alta para causar un efecto de daño permanente en el ojo, por lo que se debe definir una zona de riesgo.

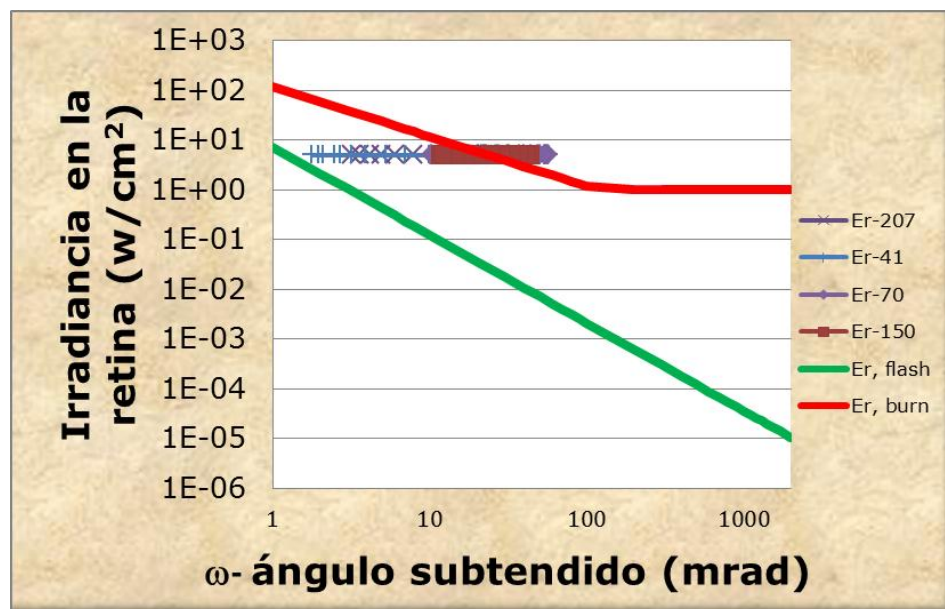


Figura 4.1. Irradiancia en función del ángulo subtendido cuando se ve directamente a la fuente de a los helióstatos.

En la Figura 4.2., se establecen las distancias en las cuales la irradiancia que se recibe en la retina del ojo es lo suficientemente potente como para cruzar el límite seguro de un daño permanente, delimitado por la $E_{r,burn}$.



Figura 4.2. Zona de riesgo al ver directamente a la fuente de a los helióstatos.

4.2. Reflexión de la Luz del Sol que Reside en Superficie del Receptor.

En el análisis de la segunda situación, cuando la reflexión de la luz del sol sobre la superficie del receptor o el blanco Lambertiano es vista por un observador, se consideraron 3 casos:

Para el primer caso, donde se suponen cinco imágenes de los helióstatos superpuestas en el blanco, en la metodología se describe que se utilizará un área y una irradiancia equivalente (Tabla 4.6), para representar a los 5 helióstatos tomados en cuenta para el análisis del caso 1, los resultados se encuentran representados en la Tabla 4.7.

E_{equiv}	$E_{ref.}$	$I_{ref.}$	A_{equiv}
43308.2843	34646.6275	11028.3383	3.45210124

Tabla 4.6. Área e Irradiancia equivalente para el caso 1.

A_{obs}	E_c	A_p	E_r	$X_{obs} =$ Distancia en m	r_{obs}^2	r_{obs}	W_{obs}		E_{rflash}	E_{rburn}
0.13607173	2.33156096	3.1416E-06	0.00599423	1	643.6225	25.3697162	0.01640678	16.406782	0.05182067	7.19214773
0.16323029	2.79500653		0.00599423	1.2	644.0625	25.3783865	0.01796352	17.9635197	0.04413891	6.56886858
0.19035851	3.25689585		0.00599423	1.4	644.5825	25.3886293	0.01939108	19.3910781	0.0385513	6.08527279
0.2174514	3.71697565		0.00599423	1.6	645.1825	25.4004429	0.02071547	20.7154741	0.03429671	5.69622492
0.24450401	4.17499541		0.00599423	1.8	645.8625	25.413825	0.02195473	21.954726	0.03094495	5.374697
0.27151143	4.63070781		0.00599423	2	646.6225	25.4287731	0.02312191	23.1219102	0.028234	5.10338459
0.29846877	5.08386901		0.00599423	2.2	647.4625	25.4452844	0.02422686	24.2268637	0.02599492	4.87062631
0.32537121	5.53423907		0.00599423	2.4	648.3825	25.463356	0.0252772	25.2772008	0.02411372	4.66823842
0.35221397	5.98158224		0.00599423	2.6	649.3825	25.4829845	0.02627895	26.2789531	0.02251066	4.49028543
0.37899233	6.42566732		0.00599423	2.8	650.4625	25.5041663	0.02723699	27.2369917	0.02112821	4.33234335
0.40570162	6.86626797		0.00599423	3	651.6225	25.5268976	0.02815532	28.1553153	0.01992382	4.19103814
0.53805322	9.00945972		0.00599423	4	658.6225	25.6636416	0.03225146	32.2514611	0.01566614	3.65874897
0.66801782	11.0348684		0.00599423	5	667.6225	25.838392	0.03569305	35.693045	0.01309247	3.30596619
0.79509797	12.9211887		0.00599423	6	678.6225	26.0503839	0.03862347	38.623467	0.01138591	3.05513744
0.91885505	14.6516984		0.00599423	7	691.6225	26.2987167	0.04112861	41.1286075	0.01018731	2.86904924
1.03891443	16.2144565		0.00599423	8	706.6225	26.582372	0.04326645	43.2664455	0.00931337	2.72728667
1.15496813	17.6022432		0.00599423	9	723.6225	26.9002323	0.04508001	45.0800126	0.0086605	2.61756803
1.26677496	18.8122805		0.00599423	10	742.6225	27.2511009	0.04660374	46.6037371	0.00816563	2.53198579
1.37415857	19.8457818		0.00599423	11	763.6225	27.6337203	0.04786677	47.8667704	0.00778815	2.46517572
1.47700371	20.707387		0.00599423	12	786.6225	28.0467913	0.0488948	48.8947996	0.00750066	2.41334459

1.57525126	21.4045369		0.00599423	13	811.6225	28.4889891	0.04971105	49.7110502	0.00728405	2.3737177
1.66889227	21.9468336		0.00599423	14	838.6225	28.9589796	0.05033684	50.3368409	0.00712453	2.3442075
1.75796158	22.3454267		0.00599423	15	867.6225	29.4554324	0.05079189	50.7918868	0.00701194	2.32320568
1.84253125	22.6124517		0.00599423	16	898.6225	29.9770329	0.05109446	51.0944638	0.00693861	2.30944786
1.92270414	22.7605404		0.00599423	17	931.6225	30.5224917	0.0512615	51.2614994	0.00689865	2.30192252
1.9986078	22.8024103		0.00599423	18	966.6225	31.0905532	0.05130863	51.3086276	0.00688743	2.29980815
2.0703889	22.7505352		0.00599423	19	1003.6225	31.6800016	0.05125023	51.2502313	0.00690133	2.30242863
2.13820811	22.6168937		0.00599423	20	1042.6225	32.2896655	0.05109948	51.0994822	0.00693741	2.30922105
2.42397738	21.0886462		0.00599423	25	1267.6225	35.6036866	0.04934287	49.342866	0.00738053	2.3914298
2.63678638	18.8506081		0.00599423	30	1542.6225	39.2762333	0.04665119	46.6511874	0.00815094	2.52941043
2.91585167	14.3390154		0.00599423	40	2242.6225	47.3563354	0.04068738	40.6873763	0.01038367	2.90016243
3.07898391	10.8050127		0.00599423	50	3142.6225	56.0590983	0.03531935	35.3193467	0.01333865	3.34094515
3.17993014	8.26595936		0.00599423	60	4242.6225	65.1354166	0.03089204	30.8920446	0.01690697	3.81975365
3.24581612	6.45830708		0.00599423	70	5542.6225	74.4487911	0.02730608	27.3060805	0.02103369	4.32138183
3.2908365	5.15325904		0.00599423	80	7042.6225	83.9203342	0.02439164	24.3916403	0.0256849	4.83772303
3.32280741	4.1915391		0.00599423	90	8742.6225	93.501992	0.02199818	21.9981815	0.03083684	5.36407975
3.34625624	3.46753309		0.00599423	100	10642.6225	103.163087	0.02000831	20.0083063	0.03647138	5.89755065
3.36392884	2.91137441		0.00599423	110	12742.6225	112.883225	0.01833365	18.3336548	0.04257392	6.43625077
3.37755936	2.47622163		0.00599423	120	15042.6225	122.648369	0.0169081	16.9080988	0.04913225	6.97890411
3.38828253	2.13007638		0.00599423	130	17542.6225	132.448565	0.01568186	15.6818613	0.0561359	7.52461698
3.39686409	1.85063799		0.00599423	140	20242.6225	142.27657	0.01461708	14.6170845	0.06357566	8.0727453
3.40383498	1.6220566		0.00599423	150	23142.6225	152.126995	0.01368463	13.6846288	0.07144338	8.62281334
3.42470097	0.92928946		0.00599423	200	40642.6225	201.600155	0.01035799	10.3579909	0.11696523	11.3921706
3.43448975	0.5998597		0.00599423	250	63142.6225	251.281958	0.00832195	8.32194543	0.17230443	14.1793768

3.43984241	0.41851995		0.00599423	300	90642.6225	301.069132	0.00695117	6.95117307	0.23694721	16.975552
3.44518956	0.23651703		0.00599423	400	160642.623	400.802473	0.00522554	5.22554062	0.3926469	22.5813956
3.44767298	0.15169848		0.00599423	500	250642.623	500.64221	0.00418495	4.18495342	0.58170398	28.1962517
3.44902425	0.10547008		0.00599423	600	360642.623	600.53528	0.00348951	3.48951168	0.80241863	33.8156197
3.44983979	0.0775432		0.00599423	700	490642.623	700.458866	0.00299207	2.99207094	1.05347494	39.4375676
3.45036942	0.05939636		0.00599423	800	640642.623	800.401538	0.00261866	2.61866499	1.33380687	45.0611286
3.45073267	0.04694528		0.00599423	900	810642.623	900.356942	0.00232807	2.32806981	1.64252326	50.6857652
3.45099257	0.03803427		0.00599423	1000	1000642.62	1000.32126	0.0020955	2.09549955	1.97886171	56.3111549
3.45118491	0.03143854		0.00599423	1100	1210642.62	1100.29206	0.00190516	1.90515886	2.34215825	61.9370924
3.45133122	0.02642047		0.00599423	1200	1440642.62	1200.26773	0.00174651	1.74650667	2.73182646	67.5634407
3.45144509	0.02251434		0.00599423	1300	1690642.62	1300.24714	0.00161224	1.6122398	3.14734239	73.190105
3.45153546	0.0194144		0.00599423	1400	1960642.62	1400.22949	0.00149714	1.49713861	3.58823347	78.8170177
3.45160837	0.01691317		0.00599423	1500	2250642.62	1500.21419	0.00139737	1.39737364	4.05406999	84.4441291
3.45182397	0.00951544		0.00599423	2000	4000642.62	2000.16065	0.00104813	1.04812843	6.74467119	112.581623
3.45192378	0.00609041		0.00599423	2500	6250642.62	2500.12852	0.00083854	0.83853911	10.0105552	140.720926
3.451978	0.00422965		0.00599423	3000	9000642.62	3000.1071	0.0006988	0.69879906	13.8226356	168.861132

Tabla 4.7. E_r , $E_{r, burn}$ y $E_{r, flash}$ para el caso 1.

Después se realizó una comparación entre E_r y los límites de $E_{r,burn}$ y $E_{r,flash}$, donde se puede notar que la irradiancia no es lo suficientemente alta como para producir un daño en la retina, pero si tiene el potencial suficiente para crear un efecto post-imagen (Figura 4.3).

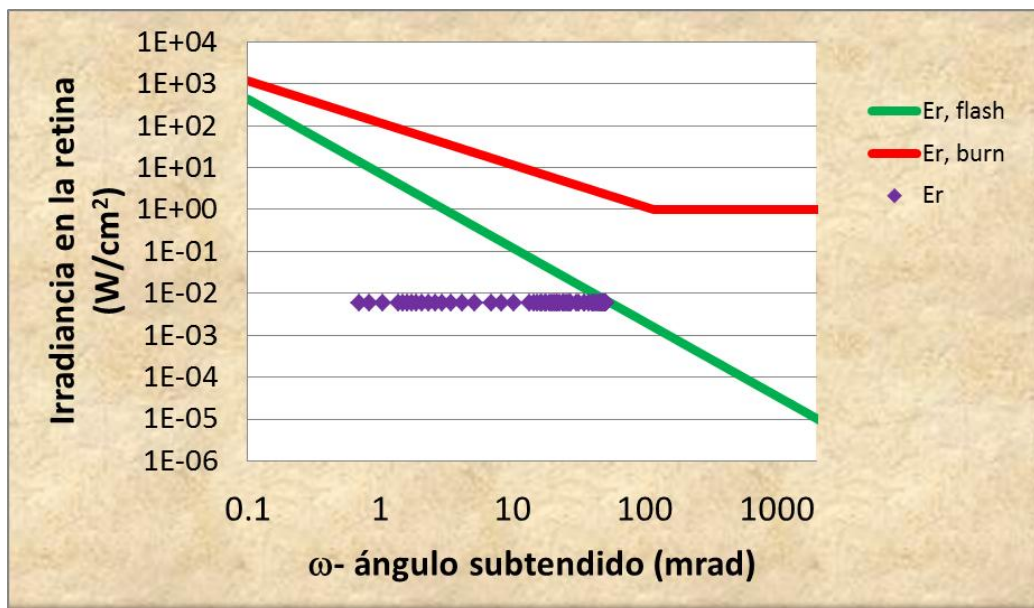


Figura 4.3. Irradiancia en función de la distancia al ver de cinco imágenes de helióstatos sobrepuestas en el blanco.

En el caso dos, donde se suponen cinco imágenes de los helióstatos en diferentes puntos del blanco, como se describió en la metodología, se utilizó un área equivalente y una irradiancia equivalente (Tabla 4.8), para representar a los 5 helióstatos tomados en cuenta y los resultados se encuentran representados en la Tabla 4.9.

E_{equiv}	$E_{ref.}$	$I_{ref.}$	A_{equiv}
6848.26556	5478.61245	1743.89243	21.8310141

Tabla 4.8. Área e Irradiancia equivalente para el caso 2.

A_{obs}	E_c	A_p	E_r	$X_{obs} =$ Distancia en m	r_{obs}^2	r_{obs}	W_{obs}		E_{rflash}	E_{rburn}
0.86051471	2.33156096	3.1416E-06	0.00094786	1	643.6225	25.3697162	0.04125899	41.2589908	0.0101304	2.8599827
1.03226487	2.79500653		0.00094786	1.2	644.0625	25.3783865	0.0451738	45.1738002	0.0086287	2.61213357
1.20382315	3.25689585		0.00094786	1.4	644.5825	25.3886293	0.04876376	48.7637559	0.00753637	2.41983001
1.37515801	3.71697565		0.00094786	1.6	645.1825	25.4004429	0.05209428	52.0942837	0.00670465	2.26512376
1.54623813	4.17499541		0.00094786	1.8	645.8625	25.413825	0.0552107	55.2106951	0.00604941	2.13726706
1.71703243	4.63070781		0.00094786	2	646.6225	25.4287731	0.05814587	58.145874	0.00551945	2.02937873
1.88751008	5.08386901		0.00094786	2.2	647.4625	25.4452844	0.06092456	60.9245583	0.00508173	1.93682159
2.05764054	5.53423907		0.00094786	2.4	648.3825	25.463356	0.0635659	63.5658958	0.00471398	1.85634134
2.2273936	5.98158224		0.00094786	2.6	649.3825	25.4829845	0.06608505	66.0850545	0.0044006	1.78557771
2.39673936	6.42566732		0.00094786	2.8	650.4625	25.5041663	0.06849428	68.4942842	0.00413034	1.72277149
2.56564833	6.86626797		0.00094786	3	651.6225	25.5268976	0.07080364	70.8036404	0.0038949	1.66658097
3.40263699	9.00945972		0.00094786	4	658.6225	25.6636416	0.08110443	81.104432	0.00306257	1.45491432
4.22453032	11.0348684		0.00094786	5	667.6225	25.838392	0.08975916	89.7591627	0.00255944	1.31462902
5.0281825	12.9211887		0.00094786	6	678.6225	26.0503839	0.09712845	97.1284478	0.00222583	1.21488609
5.8108196	14.6516984		0.00094786	7	691.6225	26.2987167	0.10342826	103.428255	0.00199151	1.14088746
6.57007255	16.2144565		0.00094786	8	706.6225	26.582372	0.10880439	108.804388	0.00182067	1.08451508
7.30399366	17.6022432		0.00094786	9	723.6225	26.9002323	0.11336506	113.36506	0.00169304	1.04088508
8.01105766	18.8122805		0.00094786	10	742.6225	27.2511009	0.11719685	117.196849	0.0015963	1.00685301
8.69014927	19.8457818		0.00094786	11	763.6225	27.6337203	0.12037307	120.373065	0.0015225	1
9.34053976	20.707387		0.00094786	12	786.6225	28.0467913	0.1229583	122.958304	0.0014663	1
9.96185515	21.4045369		0.00094786	13	811.6225	28.4889891	0.12501097	125.010972	0.00142395	1
10.5540389	21.9468336		0.00094786	14	838.6225	28.9589796	0.12658468	126.58468	0.00139277	1
11.1173113	22.3454267		0.00094786	15	867.6225	29.4554324	0.12772901	127.729008	0.00137076	1
11.652128	22.6124517		0.00094786	16	898.6225	29.9770329	0.12848991	128.489914	0.00135643	1

12.1591396	22.7605404		0.00094786	17	931.6225	30.5224917	0.12890997	128.909967	0.00134861	1
12.6391528	22.8024103		0.00094786	18	966.6225	31.0905532	0.12902848	129.028483	0.00134642	1
13.0930949	22.7505352		0.00094786	19	1003.6225	31.6800016	0.12888163	128.881631	0.00134914	1
13.5219822	22.6168937		0.00094786	20	1042.6225	32.2896655	0.12850253	128.502534	0.00135619	1
15.3291809	21.0886462		0.00094786	25	1267.6225	35.6036866	0.12408508	124.08508	0.00144282	1
16.6749805	18.8506081		0.00094786	30	1542.6225	39.2762333	0.11731618	117.316175	0.00159342	1.00582891
18.4397833	14.3390154		0.00094786	40	2242.6225	47.3563354	0.10231867	102.318668	0.0020299	1.15325973
19.4714281	10.8050127		0.00094786	50	3142.6225	56.0590983	0.0888194	88.819404	0.00260757	1.32853853
20.1098099	8.26595936		0.00094786	60	4242.6225	65.1354166	0.07768584	77.6858364	0.00330514	1.5189384
20.5264714	6.45830708		0.00094786	70	5542.6225	74.4487911	0.06866803	68.6680253	0.00411187	1.7184126
20.8111793	5.15325904		0.00094786	80	7042.6225	83.9203342	0.06133893	61.3389306	0.00502113	1.92373748
21.0133627	4.1915391		0.00094786	90	8742.6225	93.501992	0.05531997	55.3199749	0.00602828	2.13304508
21.1616526	3.46753309		0.00094786	100	10642.6225	103.163087	0.05031593	50.3159319	0.00712977	2.34518165
21.2734137	2.91137441		0.00094786	110	12742.6225	112.883225	0.0461046	46.1045984	0.00832276	2.55939763
21.3596129	2.47622163		0.00094786	120	15042.6225	122.648369	0.04251968	42.5196782	0.00960484	2.77518563
21.4274259	2.13007638		0.00094786	130	17542.6225	132.448565	0.03943599	39.4359949	0.01097398	2.99219026
21.4816955	1.85063799		0.00094786	140	20242.6225	142.27657	0.03675835	36.758345	0.01242838	3.21015541
21.5257793	1.6220566		0.00094786	150	23142.6225	152.126995	0.03441345	34.4134501	0.01396643	3.42889189
21.6577354	0.92928946		0.00094786	200	40642.6225	201.600155	0.02604778	26.0477802	0.02286548	4.5301365
21.7196394	0.5998597		0.00094786	250	63142.6225	251.281958	0.02092763	20.9276304	0.03368371	5.63847878
21.7534895	0.41851995		0.00094786	300	90642.6225	301.069132	0.01748048	17.4804776	0.0463207	6.75038764
21.7873047	0.23651703		0.00094786	400	160642.623	400.802473	0.01314094	13.1409396	0.07675836	8.97957096
21.8030098	0.15169848		0.00094786	500	250642.623	500.64221	0.01052412	10.5241207	0.11371704	11.2123381
21.8115553	0.10547008		0.00094786	600	360642.623	600.53528	0.00877526	8.77525711	0.15686444	13.4468994
21.8167127	0.0775432		0.00094786	700	490642.623	700.458866	0.00752432	7.52431692	0.20594332	15.6824867
21.8200621	0.05939636		0.00094786	800	640642.623	800.401538	0.00658529	6.5852935	0.26074528	17.9187154
21.8223593	0.04694528		0.00094786	900	810642.623	900.356942	0.00585452	5.85451864	0.3210961	20.1553718
21.8240029	0.03803427		0.00094786	1000	1000642.62	1000.32126	0.00526966	5.26966207	0.38684675	22.3923277

21.8252192	0.03143854		0.00094786	1100	1210642.62	1100.29206	0.004791	4.79100238	0.45786742	24.6295014
21.8261445	0.02642047		0.00094786	1200	1440642.62	1200.26773	0.00439203	4.39203146	0.53404348	26.8668385
21.8268646	0.02251434		0.00094786	1300	1690642.62	1300.24714	0.00405438	4.05438354	0.61527249	29.1043013
21.8274361	0.0194144		0.00094786	1400	1960642.62	1400.22949	0.00376493	3.76493257	0.70146208	31.3418628
21.8278972	0.01691317		0.00094786	1500	2250642.62	1500.21419	0.00351405	3.5140484	0.79252825	33.5795033
21.8292606	0.00951544		0.00094786	2000	4000642.62	2000.16065	0.00263578	2.63578325	1.31851262	44.7684763
21.8298918	0.00609041		0.00094786	2500	6250642.62	2500.12852	0.00210872	2.10871806	1.95695876	55.9581684
21.8302347	0.00422965		0.00094786	3000	9000642.62	3000.1071	0.00175731	1.75730645	2.70218058	67.14822

Tabla 4.9. E_r , $E_{r, burn}$ y $E_{r, flash}$ para el caso 2.

Después se realizó una comparación entre E_r y los límites de $E_{r,burn}$ y $E_{r,flash}$ proporcionados por los autores de la literatura revisada (Tabla 2.15.), donde se puede notar que la irradiancia está por debajo del límite de la $E_{r,flash}$, lo que quiere decir que no se cuenta con la irradiancia suficientemente alta como para crear un efecto post-imagen (Figura 4.4).

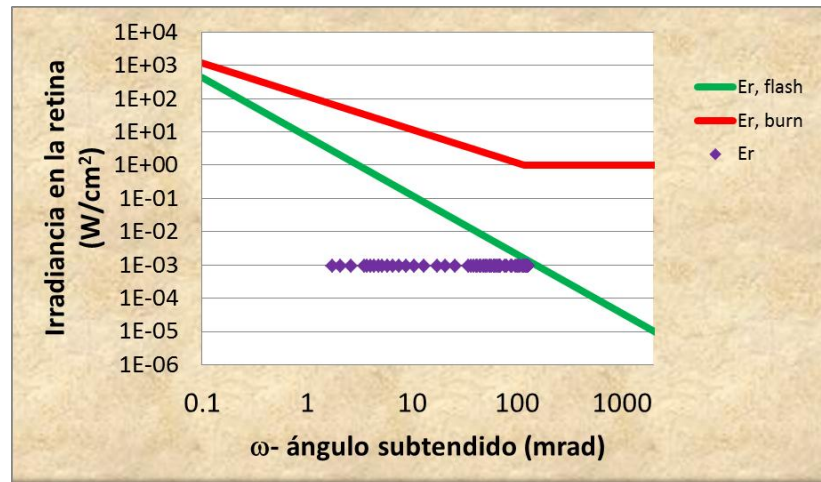


Figura 4.4. Irradiancia en función de la distancia al ver cinco imágenes de los helióstatos en diferentes puntos en el blanco.

En el caso tres, donde se suponen 82 imágenes de helióstatos superpuestos en el receptor, aunque se toma en cuenta el hecho de que la reflectancia del receptor (0.2) es menor que la del blanco Lambertiano, considerado anteriormente (0.8). Para esto se definen 5 grupos de helióstatos que se consideran representativos: El grupo 1 representa a 7 de los 82 helióstatos existentes, el grupo 2 representa a 25, el grupo 3 a 25, el grupo 4 a 19 y por último el grupo 5 representa a 6 helióstatos del conjunto de ellos, por lo que se utilizará un área y una irradiancia equivalente representativa de cada grupo (Tabla 4.10). Los resultados de E_r se encuentran representados en la Tabla 4.11.

Eequiv	Eref.	Iref.	Aequiv
716928.578	143385.716	45640.9841	3.41292081

Tabla 4.10. Área e Irradiancia equivalente para el caso 3.

A_{obs}	E_c	A_p	E_r	$X_{obs} =$ Distancia en m	r_{obs}^2	r_{obs}	W_{obs}		E_{rflash}	E_{rburn}
0.13452735	9.53969267	3.1416E-06	0.02480722	1	643.6225	25.3697162	0.01631341	16.31341	0.05234681	7.23331296
0.16137767	11.4359023		0.02480722	1.2	644.0625	25.3783865	0.01786129	17.8612882	0.04458706	6.60646639
0.18819799	13.3257445		0.02480722	1.4	644.5825	25.3886293	0.01928072	19.2807223	0.03894271	6.12010267
0.21498339	15.2081828		0.02480722	1.6	645.1825	25.4004429	0.02059758	20.5975811	0.03464493	5.72882803
0.24172896	17.0821925		0.02480722	1.8	645.8625	25.413825	0.02182978	21.8297803	0.03125914	5.4054598
0.26842984	18.9467615		0.02480722	2	646.6225	25.4287731	0.02299032	22.990322	0.02852067	5.1325945
0.29508123	20.8008921		0.02480722	2.2	647.4625	25.4452844	0.02408899	24.0889872	0.02625885	4.898504
0.32167833	22.6436027		0.02480722	2.4	648.3825	25.463356	0.02513335	25.1333467	0.02435855	4.69495771
0.34821644	24.4739285		0.02480722	2.6	649.3825	25.4829845	0.0261294	26.1293979	0.02273921	4.51598618
0.37469087	26.2909238		0.02480722	2.8	650.4625	25.5041663	0.02708198	27.0819843	0.02134273	4.3571401
0.40109701	28.0936623		0.02480722	3	651.6225	25.5268976	0.02799508	27.9950816	0.02012611	4.21502611
0.53194646	36.8626334		0.02480722	4	658.6225	25.6636416	0.03206792	32.0679161	0.0158252	3.67969031
0.66043599	45.1496895		0.02480722	5	667.6225	25.838392	0.03548991	35.4899137	0.0132254	3.32488833
0.78607382	52.8676589		0.02480722	6	678.6225	26.0503839	0.03840366	38.4036585	0.01150151	3.07262393
0.90842629	59.9481218		0.02480722	7	691.6225	26.2987167	0.04089454	40.8945421	0.01029074	2.88547063
1.02712303	66.3422207		0.02480722	8	706.6225	26.582372	0.04302021	43.0202135	0.00940793	2.74289666
1.14185955	72.0204162		0.02480722	9	723.6225	26.9002323	0.04482346	44.8234595	0.00874843	2.63255004
1.25239741	76.9713415		0.02480722	10	742.6225	27.2511009	0.04633851	46.3385124	0.00824854	2.54647795
1.35856223	81.1999611		0.02480722	11	763.6225	27.6337203	0.04759436	47.5943577	0.00786722	2.47928548
1.46024011	84.72526		0.02480722	12	786.6225	28.0467913	0.04861654	48.6165363	0.00757682	2.42715769
1.55737258	87.5776819		0.02480722	13	811.6225	28.4889891	0.04942814	49.4281416	0.007358	2.387304
1.64995079	89.7965148		0.02480722	14	838.6225	28.9589796	0.05005037	50.0503709	0.00719687	2.35762489
1.73800918	91.4273771		0.02480722	15	867.6225	29.4554324	0.05050283	50.5028271	0.00708314	2.33650286

1.82161901	92.5199226		0.02480722	16	898.6225	29.9770329	0.05080368	50.8036821	0.00700906	2.32266629
1.90088195	93.1258348		0.02480722	17	931.6225	30.5224917	0.05096977	50.9697671	0.00696869	2.31509789
1.97592414	93.2971476		0.02480722	18	966.6225	31.0905532	0.05101663	51.0166271	0.00695736	2.31297141
2.04689053	93.0848982		0.02480722	19	1003.6225	31.6800016	0.05095856	50.9585631	0.0069714	2.31560689
2.11394002	92.5380976		0.02480722	20	1042.6225	32.2896655	0.05080867	50.8086719	0.00700784	2.32243819
2.39646588	86.2852001		0.02480722	25	1267.6225	35.6036866	0.04906205	49.0620527	0.00745546	2.40511747
2.60685956	77.1281604		0.02480722	30	1542.6225	39.2762333	0.04638569	46.3856926	0.00823369	2.54388785
2.88275753	58.6687641		0.02480722	40	2242.6225	47.3563354	0.04045582	40.4558219	0.0104891	2.9167619
3.04403827	44.209224		0.02480722	50	3142.6225	56.0590983	0.03511834	35.1183421	0.01347408	3.3600675
3.14383877	33.8205663		0.02480722	60	4242.6225	65.1354166	0.03071624	30.7162361	0.01707863	3.84161652
3.20897697	26.4244709		0.02480722	70	5542.6225	74.4487911	0.02715068	27.1506799	0.02124724	4.34611584
3.25348638	21.0848047		0.02480722	80	7042.6225	83.9203342	0.02425283	24.252826	0.02594568	4.86541239
3.28509442	17.1498818		0.02480722	90	8742.6225	93.501992	0.02187299	21.8729885	0.03114993	5.39478179
3.30827713	14.1875768		0.02480722	100	10642.6225	103.163087	0.01989444	19.8944378	0.03684168	5.93130608
3.32574914	11.912027		0.02480722	110	12742.6225	112.883225	0.01822932	18.2293169	0.04300618	6.47308952
3.33922496	10.1315787		0.02480722	120	15042.6225	122.648369	0.01681187	16.8118738	0.0496311	7.0188488
3.34982643	8.71530893		0.02480722	130	17542.6225	132.448565	0.01559261	15.5926149	0.05670585	7.56768514
3.35831059	7.57197345		0.02480722	140	20242.6225	142.27657	0.0145339	14.5338978	0.06422116	8.11895075
3.36520236	6.6367218		0.02480722	150	23142.6225	152.126995	0.01360675	13.6067488	0.07216876	8.67216718
3.38583153	3.80223208		0.02480722	200	40642.6225	201.600155	0.01029904	10.299043	0.11815279	11.4573752
3.3955092	2.45435453		0.02480722	250	63142.6225	251.281958	0.00827458	8.27458473	0.17405386	14.2605344
3.40080112	1.71239429		0.02480722	300	90642.6225	301.069132	0.00691161	6.91161352	0.23935298	17.0727139
3.40608757	0.96772068		0.02480722	400	160642.623	400.802473	0.0051958	5.19580174	0.3966335	22.7106433
3.4085428	0.62068154		0.02480722	500	250642.623	500.64221	0.00416114	4.1611366	0.58761011	28.3576367
3.40987874	0.43153585		0.02480722	600	360642.623	600.53528	0.00346965	3.46965266	0.81056571	34.0091679
3.41068503	0.3172717		0.02480722	700	490642.623	700.458866	0.00297504	2.97504288	1.06417103	39.6632938
3.41120864	0.24302304		0.02480722	800	640642.623	800.401538	0.00260376	2.60376201	1.34734921	45.319042
3.41156777	0.19207886		0.02480722	900	810642.623	900.356942	0.00231482	2.31482063	1.65920004	50.975872

3.41182472	0.15561903		0.02480722	1000	1000642.62	1000.32126	0.00208357	2.08357394	1.99895338	56.6334594
3.41201488	0.12863228		0.02480722	1100	1210642.62	1100.29206	0.00189432	1.89431648	2.36593853	62.2915977
3.41215953	0.10810059		0.02480722	1200	1440642.62	1200.26773	0.00173657	1.7365672	2.7595631	67.9501491
3.41227211	0.0921185		0.02480722	1300	1690642.62	1300.24714	0.00160306	1.60306444	3.17929782	73.6090185
3.41236145	0.07943494		0.02480722	1400	1960642.62	1400.22949	0.00148862	1.4886183	3.62466533	79.2681376
3.41243353	0.06920105		0.02480722	1500	2250642.62	1500.21419	0.00138942	1.3894211	4.09523156	84.9274565
3.41264669	0.03893288		0.02480722	2000	4000642.62	2000.16065	0.00104216	1.04216347	6.81315084	113.225999
3.41274536	0.02491921		0.02480722	2500	6250642.62	2500.12852	0.00083377	0.83376693	10.1121939	141.526361
3.41279897	0.01730582		0.02480722	3000	9000642.62	3000.1071	0.00069482	0.69482215	13.9629789	169.827632

Tabla 4.11. E_r , $E_{r, burn}$ y $E_{r, flash}$ para el caso 3.

Una vez que la E_r es comparada con los límites $E_{r, \text{flash}}$ y $E_{r, \text{burn}}$, se puede notar en la Figura 4.5., que la irradiancia es lo suficiente para crear un efecto post-imagen, por lo que en la Figura 4.6 se define la zona de riesgo en base a la distancia.

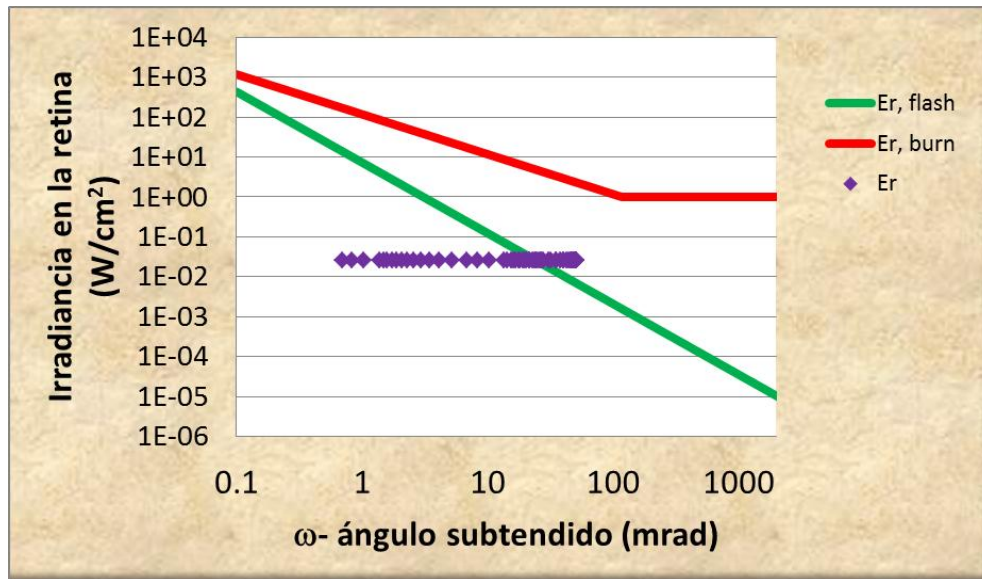


Figura 4.5. Irradiancia en función de la distancia al ver 82 imágenes de helióstatos superpuestos en el receptor.

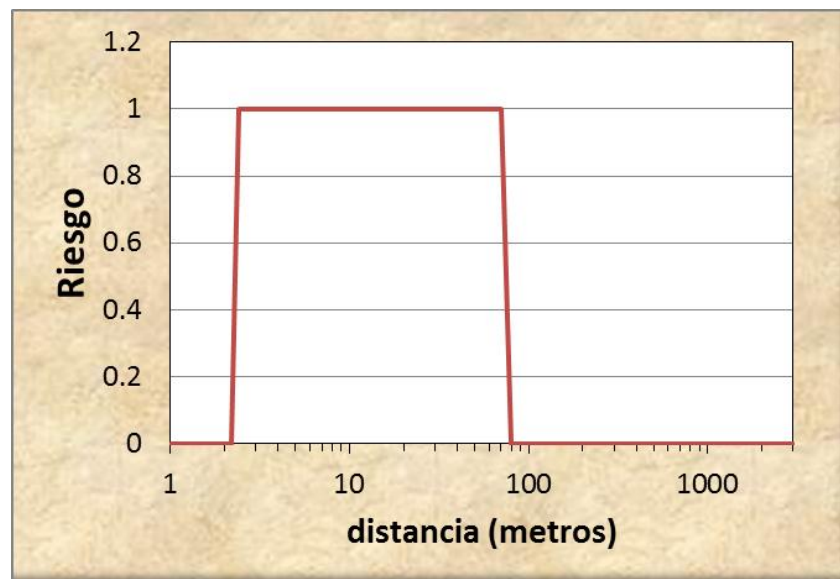


Figura 4.6. Zona de riesgo al ver 82 imágenes de helióstatos superpuestos en el receptor.

Con la ayuda de los indicadores de los límites máximos permisibles ante la irradiancia que tiene potencial para producir un daño permanente en el ojo y un efecto post-imagen, en función del tamaño de imagen que se produce en la retina, nos podemos percatar de que cuando se está en la situación 1 o bien cuando una persona ve directamente a un solo helióstato concentrador (25 soles), la irradiancia proveniente de la reflectancia de éste, tiene el suficiente potencial para causar daños en la retina en un rango de 300 mts.

Por otra parte para los 3 casos simulados, donde se incluye el impacto de diferentes haces de rayos sobrepuestos en el receptor, pueden producir el efecto post-imagen. El autor Brumleve en 1977 (pp. 16) en su investigación "Eye Hazard and Glint Evaluation for the 5 MWt Solar Thermal Test Facility", realizó una discusión sobre varios haces provenientes de distintas fuentes que convergen en un mismo punto, los cuales pueden incrementar el tamaño de la imagen en la retina, por lo que se debe de tener ciertas medidas de precaución que contrarresten el efecto "post-imagen" dentro de rangos cortos, como son la utilización de lentes oscuros de seguridad en las áreas de trabajo. Del mismo modo, se debe evitar la aproximación de personas ajenas a la instalación a distancias menores que éstas de la torre.

En el siguiente capítulo se efectuará un análisis de las normativas que fijan límites máximos permisibles ante este tipo de exposiciones, con el objetivo de indagar si este tipo de normativas cumplen con las necesidades de este tipo de instalaciones.

5. NORMATIVAS Y APORTACIONES

A continuación se presentan las principales normativas que son aplicables en cuestión del tipo de instalación en la que se opera.

5.1. Análisis de Normativas Relacionadas con los Límites de Exposición de INR

En este capítulo se pretende hacer una recopilación en un concentrado de límites de exposición fijados en la literatura revisada, con el objetivo de describir una relación entre la dosis- respuesta y tiempo de exposición.

Existen distintas organizaciones e instituciones que fijan límites máximos permisibles de exposición a radiaciones no ionizantes, como el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo en España, el cual propone un resumen de los TLV's fijados por la ACGIH (The American Conference of Governmental Hygienist), los cuales fueron publicados por el Boletín Oficial del Estado español (BOE) el 24 de abril del 2010, ver ANEXO A. En la Tabla 5.1., se presenta un resumen de los límites de exposición fijados por estas organizaciones en relación con el riesgo y la longitud de onda.

El desglose de las fórmulas que proveen los límites de exposición, son propuestas por ACGIH y también son fijados en el BOE en el 2010. El autor D.H. Sliney, en 1994 en su trabajo Ocular Hazards of Light, fija las ecuaciones que permitirán el cálculo de los límites de exposición mencionados en la Tabla 5.2.

Longitud de onda	Zona de afectación	Riesgo	Tiempo	Angulo subtendido de exposición	Valor límite máximo	Uds.
180-400 nm UVA-B-C	Ojos y piel	Eritemas/ cáncer en la piel, elastosis, Queratitis/ conjuntivitis Cataratas	8 hrs	-	$H_{\text{eff}}=30$	J/m^2
315-400 nm UVA	Ojos	Cataratas	8 hrs	-	$H_{\text{UVA}}=10^4$	J/m^2
300-700 nm UVA- Visible	Ojos	Retinitis/ fotoretinitis	$t \leq 10^4$ s	$\omega \geq 11$ mrad	$L_B = 10^6/t$	W/m^2
				$\omega < 11$ mrad	$L_B = 100$	sr
			$t > 10^4$ s	$\omega \geq 11$ mrad	$E_B = 100/t$	W/m^2
				$\omega < 11$ mrad	$E_B = 0.01$	
380-1400 nm UVA- Visible-IRA	Ojos	Quemadura a en la retina	$t > 10$ s	$C = 1.7$ si $\omega \leq 1.7$ mrad $C = \omega$ si $1.7 \leq \omega \leq 100$ mrad	$L_R = 2,8 \cdot 10^7/C$	W/m^2 sr
			$10^{-6} \leq t \leq 10$ s	$C = 100$ si $\omega > 100$ mrad	$L_R = 5 \cdot 10^7/C t^{0,25}$	
780-1400 nm IRA	Ojos	Quemadura a en la retina	$t > 10$ s	$C = 11$ si $\omega \leq 11$ mrad	$L_R = 6 \cdot 10^6/C$	W/m^2 sr
			$10^{-6} \leq t \leq 10$ s	$C = \omega$ si $11 \leq \omega \leq 100$ mrad $C = 100$ si $\omega > 100$ mrad	$L_R = 5 \cdot 10^7/C t^{0,25}$	
780-3000 nm IR	Ojos	Quemadura a en la cornea catarata	$t \leq 10^3$ s	-	$E_{\text{IR}} = 18 \cdot 10^3 t^{0,75}$	W/m^2
			$t > 10^3$ s		$E_{\text{IR}}=100$	
380-3000 nm UVA- Visible-IRA	Piel	Quemadura a de piel	$t < 10$ s	-	$H_{\text{Piel}} = 20 \cdot 10^3 t^{0,25}$	J/m^2

Tabla 5.1. Valores Límite de Exposición.

Longitud de onda	Ecuación
180-400 nm	$E_{\text{eff}} = \sum E_{\lambda} \cdot S_{\lambda} \cdot \Delta_{\lambda}$ $H_{\text{eff}} = E_{\text{eff}} \cdot \Delta_t$
315-400 nm	$E_{\text{UVA}} = \sum E_{\lambda} \cdot \Delta_{\lambda}$ $H_{\text{UVA}} = E_{\text{UVA}} \cdot \Delta_t$
300-700 nm	A) Si $t \leq 10^4$ s entonces $L_B = \sum L_{\lambda} \cdot B(\lambda) \cdot \Delta(\lambda)$
	B) Si $t > 10^4$ s entonces $E_B = \sum E_{\lambda} \cdot B(\lambda) \cdot \Delta(\lambda)$
380-1400 nm	$L_R = \sum E_{\lambda} \cdot B(\lambda) \cdot \Delta(\lambda) \text{ s.a.}$
780-1400nm	$L_R = \sum E_{\lambda} \cdot B(\lambda) \cdot \Delta(\lambda) \text{ s.a.}$
780-3000 nm	$E_{\text{IR}} = \sum E_{\lambda} \cdot \Delta_{\lambda}$
380-3000 nm (piel)	$E_{\text{piel}} = \sum E_{\lambda} \cdot \Delta_{\lambda}$ $H_{\text{piel}} = E_{\text{piel}} \cdot \Delta_t$

Tabla 5.2. Formulas para cálculo de límites de exposición

Donde:

E_{λ} es la irradiancia espectral dada en W/m^2nm

E_{eff} es la irradiancia efectiva expresada en W/m^2

H es la exposición radiante, la irradiancia integrada respecto al tiempo y es dada por J/m^2

H_{eff} es la exposición radiante efectiva ponderada por $S(\lambda)$, expresada en J/m^2

$S(\lambda)$, es la ponderación espectral que tiene en cuenta la relación entre la longitud de onda y los efectos para la salud de la radiación UV sobre los ojos y la piel, estos valores se encuentran publicados en el BOE y se describen en la Tabla 5.3.

λ : Longitud de onda, expresada en nanómetros (nm)

$\Delta\lambda$: Ancho de banda en nanómetros (nm).

Δt : Duración de la exposición en segundos (s)

E_{UVA} : Irradiancia total (UVA) expresada en W/m^2

H_{UVA} : Exposición radiante, la integral o la suma de la irradiancia con respecto al tiempo y a la longitud de onda calculada para el intervalo de las longitudes de onda UVA (315 y 400 nm), en J/m^2 .

L_{λ} : Radiancia espectral de la fuente en W/m^2

L_{B} : Radiancia efectiva (luz azul), calculada y ponderada espectralmente por $B(\lambda)$, en W/m^2

$B(\lambda)$: Ponderación espectral, tiene en cuenta la relación entre la longitud de onda y la lesión fotoquímica causada en los ojos por la radiación de luz azul, sus valores en la Tabla 5.4.

E_{B} : Irradiancia efectiva (luz azul), ponderada espectralmente por $B(\lambda)$, expresada en vatios por metro cuadrado (W/m^2)

L_{R} : Radiancia efectiva (efecto térmico), calculada y ponderada espectralmente por $R(\lambda)$, expresada en vatios por metro cuadrado por estereorradián ($\text{W}/\text{m}^2 \text{sr}$)

$R(\lambda)$: Ponderación espectral, tiene en cuenta la relación entre la longitud de onda y las lesiones en los ojos por efecto térmico provocado por la radiación visible y (Valores en la Tabla 5.4.).

E_{IR} : Irradiancia total (efecto térmico), expresada en vatios por metro cuadrado (W/m^2)

E_{piel} : Irradiancia total (visible, IRA e IRB), calculada para el intervalo de las longitudes de onda visibles e infrarrojos (380 a 3,000 nm), expresada en vatios por metro cuadrado (W/m^2)

H_{piel} : Exposición radiante total, la suma de la irradiancia con respecto al tiempo y a la longitud de onda calculada para el intervalo de longitudes de onda visibles e infrarrojos (380 a 3.000 nm), en J/m^2 .

ω : Ángulo subtendido por una fuente aparente, percibido en un punto del espacio, expresado en miliradianes (mrad). La fuente aparente es el objeto real o virtual que forma la imagen retiniana lo más pequeña posible.

Las instituciones IRPA (International Non-ionizing Radiation Committee) y la ICNIRP en la normativa sobre la exposición a radiación ultravioleta proponen las Curvas de Ponderación para el cálculo de la exposición radiante efectiva ponderada por $S(\lambda)$, para un rango de longitudes de onda de 180 a 400 nm (ver Tabla 5.3.).

La ICNIRP en la normativa sobre la exposición a radiación óptica incoherente se proponen los valores para las curvas de ponderación definidas por $B(\lambda)$ y $R(\lambda)$, para un rango de longitudes de onda de 300 a 1,400 nm (ver Tabla 5.4.).

λ en nm	S(λ)	λ en nm	S(λ)	λ en nm	S(λ)	λ en nm	S(λ)	λ en nm	S(λ)
180	0,0120	228	0,1 737	276	0,9434	324	0,000520	372	0,000086
181	0,0126	229	0,1 819	277	0,9272	325	0,000500	373	0,000083
182	0,0132	230	0,1 900	278	0,9112	326	0,000479	374	0,000080
183	0,0138	231	0,1 995	279	0,8954	327	0,000459	375	0,000077
184	0,0144	232	0,2089	280	0,8800	328	0,000440	376	0,0000 74
185	0,0151	233	0,2188	281	0,8568	329	0,000425	377	0,0000 72
186	0,0158	234	0,2292	282	0,8342	330	0,000410	378	0,000069
187	0,0166	235	0,2400	283	0,8122	331	0,000 396	37 9	0,000066
188	0,0173	236	0,2510	284	0,7908	332	0,000383	380	0,000064
189	0,0181	237	0,2624	285	0,7700	333	0,000370	381	0,0000 62
190	0,0190	238	0,2744	286	0,7420	334	0,000355	382	0,000059
191	0,0199	239	0,2869	287	0,7151	335	0,000340	383	0,000057
192	0,0208	240	0,3000	288	0,6891	336	0,000327	384	0,000055
193	0,0218	241	0,311 1	289	0,6641	337	0,000315	385	0,000053
194	0,0228	242	0,3227	290	0,6400	338	0,000303	386	0,000051
19 5	0,0239	243	0,334 7	291	0,6186	339	0,000291	387	0,000049
196	0,0250	244	0,3471	292	0,5980	340	0,000280	388	0,000047
197	0,0262	245	0,3600	293	0,5780	341	0,000271	389	0,000046
198	0,0274	246	0,3730	294	0,5587	342	0,000263	390	0,000044
199	0,028 7	247	0,3865	295	0,5400	343	0,000255	391	0,000042
200	0,0300	248	0,4005	296	0,4984	344	0,000248	392	0,000041
201	0,0334	249	0,4150	297	0,4600	345	0,000240	393	0,000039
202	0,0371	250	0,4300	298	0,3989	346	0,000231	394	0,000037
203	0,0412	251	0,4465	299	0,3459	347	0,000223	395	0,000036
204	0,0459	252	0,4637	300	0,3000	348	0,000215	396	0,000035
205	0,0510	253	0,4815	301	0,221 0	349	0,000207	397	0,000033
206	0,0551	254	0,5000	302	0,1 629	350	0,000200	398	0,000032
207	0,059 5	255	0,5 200	303	0,1200	351	0,000191	399	0,000031
208	0,064 3	256	0,54'37	304	0,0849	352	0,000183	400	0,000030
209	0,0694	257	0,5685	305	0,0600	353	0,0001 75		
210	0,0750	258	0,5945	306	0,0454	354	0,000167		
211	0,0 786	259	0,6216	307	0,0344	355	0,000160		
21 2	0,0824	260	0,6 500	308	0,0260	356	0,000153		
213	0,0864	261	0,6 792	309	0,019 7	357	0,000147		
21 4	0,0906	262	0,7098	310	0,0150	358	0,000141		
21 5	0,0950	263	0,741 7	311	0,0111	359	0,000136		
21 6	0,0995	264	0,77 51	312	0,0081	360	0,000130		
21 7	0,1043	265	0,8100	313	0,0060	361	0,000126		
21 8	0,1093	266	0,8449	314	0,0042	362	0,000122		
219	0,1145	267	0,8812	315	0,0030	363	0,000118		
220	0,1200	268	0,919 2	316	0,0024	364	0,000114		
221	0,1257	269	0,9587	317	0,0020	365	0,000110		
222	0,1316	270	1,0000	318	0,0016	366	0,000106		
223	0,1378	271	0,9919	319	0,0012	367	0,000103		
224	0,1444	272	0,9838	320	0,0010	368	0,000099		
225	0,1500	273	0,9758	321	0,000819	369	0,000096		
226	0,1583	274	0,967 9	322	0,000 670	370	0,000093		

Tabla 5.3. Valores de la curva de ponderación S (λ).

Longitud de onda (nm)	B(λ)	R(λ)
$300 \leq \lambda < 380$	0,01	-----
380	0,01	0,10
385	0,013	0,13
390	0,025	0,25
395	0,05	0,50
400	0,10	1,0
405	0,20	2,0
410	0,40	4,0
415	0,80	8,0
420	0,90	9,0
425	0,95	9,5
430	0,98	9,8
435	1,0	10,0
440	1,0	10,0
445	0,97	9,7
450	0,94	9,4
455	0,90	9,0
460	0,80	8,0
465	0,70	7,0
470	0,62	6,2
475	0,55	5,5
480	0,45	4,5
485	0,32	3,2
490	0,22	2,2
495	0,16	1,6
500	0,10	1,0
$500 < \lambda \leq 600$	0,05	1,0
$600 < \lambda \leq 700$	$10^{0,02 \cdot (450 - \lambda)}$	1,000
$700 < \lambda \leq 1050$	-----	$10^{0,002 \cdot (700 - \lambda)}$
$1050 < \lambda \leq 1150$	-----	0,2
$1150 < \lambda \leq 1200$	-----	$0,2 \cdot 10^{0,02 \cdot (1150 - \lambda)}$
$1200 < \lambda \leq 1400$	-----	0,02

Tabla 5.4. Valores de las curvas de ponderación, B (λ) y R (λ).

5.2. Medidas de Prevención a Riesgos Oculares y de la Piel ante exposición a Radiación Solar Concentrada.

Es importante para toda institución, ya sea de investigación o bien comercial, contar con las medidas de seguridad adecuadas en caso de exposiciones a agentes biológicos o bien a condiciones ambientales que puedan producir un riesgo potenciales en la salud, es por eso que en este capítulo se sugieren medidas que servirán para prevenir o disminuir la presencia de los riesgos potencialmente analizados en una instalación de concentración solar de torre central.

Básicamente las medidas se basan en cubrir las zonas vulnerables u órganos que pueden ser afectados o que pueden encontrarse bajo algún riesgo, en este caso los ojos y la piel.

5.2.1. Protección para la piel.

En el caso de la piel es importante que la prenda que servirá como protección contra el sol sea específicamente diseñada para este tipo de exposición a radiación solar, las características deberán de cubrir con las necesidades concretas de las actividades del puesto de trabajo.

En las notas técnicas de prevención: Ropa de protección: Requisitos generales, propuestas por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), se describen tres categorías sobre protección de ropa, donde la Categoría I, sobre “ropa contra los efectos atmosféricos que no sean excepcionales ni extremos, delantales de protección térmica para temperaturas inferiores a los 50°C y ropa de protección frente a soluciones diluidas de detergentes”, puede ser aplicada al proyecto.

La ropa de trabajo debe ser diseñada de acuerdo a las actividades que se realicen en el puesto de trabajo, donde se facilite la movilidad, flexibilidad y comodidad. También

es importante que los materiales proporcionen baja resistencia al vapor de agua, alta permeabilidad al aire para minimizar la falta de confort debida al estrés térmico.

Todo el personal que utilice este tipo de protección para trabajar bajo el sol en el campo, debe de saber la importancia de su uso durante el periodo de una jornada laboral, así como también las especificaciones del uso.

Además de utilizar ropa de protección para el sol, el personal debe utilizar crema protectora contra los rayos UV resistente al sudor, con un factor de protección de más de 50, en 2 períodos de aplicación, el primero 30 min., antes de realizar labores y el segundo entre las 11 y las 15 horas (periodo con máxima radiación ultravioleta).

Se debe de tomar en cuenta que el factor de protección solar (SPF) es clasificación ultra, donde se supone que una persona empieza a desarrollar un eritema a los 10 minutos de exposición al sol y utilizando la crema protectora, este período de tiempo se multiplica por el SPF, dando como resultado un rango más amplio de exposición al sol. Es necesario aplicar las cremas protectoras aun cuando se encuentre un día con cielo nublado.

Se debe de tomar en cuenta que existen sustancias que son fotosensibilizantes, como ciertos tipos de perfumes y medicamentos, por lo que se debe de revisar las fichas técnicas de los medicamentos y evitar los perfumes durante la jornada laboral.

Cabe mencionar que al no quemarse debido a los rayos solares no es equivalente a ausentar el riesgo de cáncer en la piel.

5.2.2. Protección para los ojos.

El objetivo de la designación de un filtro de solar es proteger el órgano que provee la visión contra la radiación solar excesiva, al fin de mejorar la percepción visual, así como también disminuir el efecto del deslumbramiento o el brillo de la reflexión de la

luz solar, para lo cual se tomarán en cuenta algunas normativas europeas que brindan las clasificaciones de filtros oculares.

La norma Europea UNE-EN 172 sobre protección individual del ojo, filtros de protección solar de uso laboral validada en el 95, propone el uso de filtros solares para puestos laborales con exposición a radiaciones no ionizantes como la UV, IR y Visible, y la norma Europea UNE-EN 166 sobre protección individual del ojo, en sus capítulos 4 y 5 propone la clasificación de los filtros solares según el área de trabajo.

Para este tipo de instalación la protección ocular debe ser de clasificación contra radiaciones ópticas, y si es de este tipo de clasificación, la normativa UNE-EN 166 especifica en su tabla número 12 acerca de la aplicación de los tipos de protección de los ojos según los distintos campos de uso, de ser así la montadura óptica debe cumplir con las especificaciones de uso general y de ser gafas integrales o pantallas faciales deben cumplir con la clasificación más alta para el tipo de filtro compatible con la instalación.

En la norma UNE-EN 165 se describe la clasificación de estos filtros como:

Gafas integrales: protector ocular de malla, que se ajusta sobre la cara, encierran de forma estanca la zona orbital y se sujetan con patillas.

Gafas universal de malla: protector de ojos con oculares de malla acoplados en una montura de tipo universal con o sin laterales y se sujetan con patillas.

Pantalla facial de malla: protector de los ojos con malla protegiendo la cara que puede usarse con un soporte directamente sobre la cabeza o acoplado a un casco de protección.

En el apartado 7.2.1 de la misma normativa, la especificación sugerida para contrarrestar la radiación óptica son los filtros solares para uso laboral (UNE-EN 172, 1995).

Se recomienda el uso de gafas con un filtro solar contra radiaciones ópticas, debe ser una clasificación código numérico 5-4,1 o 6-41, lo que quiere decir, que se necesita un filtro solar sin especificaciones para infrarrojo, utilizadas para radiaciones intensas, según el Anexo A utilización de filtros solares de la normativa europea UNE-EN -172 .

Además, para reducir el efecto de reflexión de la luz en las superficies de los espejos y del receptor en este tipo de instalación, se recomienda darles un efecto anti-reflexión a los filtros.

5.2.3. Equipos de Protección Individual

El equipo de protección individual (EPI) es un requisito en el área de trabajo y ninguna persona debe de transitar por el área donde se encuentran instalados los helióstatos y la torre.

Los EPI deben de permitir realizar con destreza las actividades del puesto de trabajo, para que estas sean una medida de prevención o disminución en lugar de propiciar el aumento de un riesgo.

En la instalación se debe de contar con el número suficiente de EPI para abarcar el total del personal que labore en la misma. Durante la entrega de cada equipo, el personal debe recibir información de la forma correcta en la que se debe de utilizar y la importancia en la prevención de riesgos, así mismo los EPI deben de cumplir con las normativa NOM-017-STPS-2001, Equipo de protección personal.

Estrictamente se deben de sustituir el equipo que se encuentre dañado o que ya se encuentre en el declive de su periodo de vida.

El EPI debe incluir protección para extremidades inferiores, como calzado y este debe cumplir con la NOM-113-STPS-1994, Calzado de protección y mientras tanto el trabajador, por su parte, debe utilizar a conciencia el equipo de protección.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Hoy en día el interés por reducir los impactos ambientales de la utilización de combustibles fósiles y la búsqueda de independencia energética motiva un creciente desarrollo de instalaciones que permitan sustituir un recurso por otro que es totalmente renovable y donde el costo de la obtención de combustible es nulo, esto propicia a la motivación por la utilización de la energía solar en diferentes países del mundo.

Las instalaciones encargadas de utilizar la energía solar para su aprovechamiento para la producción de energía eléctrica, utilizan grandes cantidades de espejos para concentrar la radiación solar, con el fin de alcanzar las altas temperaturas requeridas para su operación.

Por lo tanto una parte considerable de personas en esta nueva industria, desarrolla su jornada laboral en la intemperie estando expuesta a radiación solar, donde la presencia de luz solar concentrada puede implicar riesgos oculares, ya sea de quemaduras en la retina en un caso extremo, o de deslumbramiento momentáneo (post- imagen), las últimas pudiendo causar distracciones.

Con la ayuda de este análisis se pudo detectar las situaciones que sobrepasan los límites máximos permisibles ante la irradiancia o bien las situaciones que tiene potencial para producir un daño permanente en el ojo y un efecto post-imagen, en función del tamaño de imagen que se produce en la retina, así como las zonas de riesgo en base a la distancia en la cual se encuentra ubicado el ser humano que ve directamente la superficie de los helióstatos , tanto como ver directamente el resplandor del receptor.

Por lo que ante el aumento de la instalación de plantas solares de concentración, se vuelve necesaria la evaluación de riesgos potenciales debido a la exposición a radiación solar concentrada. Esto eventualmente debe permitir llegar a la elaboración de procedimientos estándar y normas para garantizar la seguridad laboral del personal que labora en las plantas termosolares.

Actualmente existe un aumento en los artículos publicados sobre estudios sobre los daños derivados de la exposición al sol en este tipo de instalaciones, con el objetivo de sacar estos datos a la luz y crear la conciencia de seguridad en este ambiente laboral de la nueva industria.

No es una cuestión alarmante, sino una cuestión que comience por hacer conciencia y trabajo en equipo, donde existe la motivación por cuidar al personal que conforma a la empresa y disminuir los riesgos de los factores ambientales en este tipo de instalaciones, se puede lograr disminuir el puente entre el riesgo y la consecuencia, con el seguimiento de un protocolo.

6.2. Recomendaciones

En base a los resultados y conclusiones presentadas, se puede notar que existen riesgos oculares y de piel dentro del ambiente laboral en este tipo de instalaciones de aprovechamiento de energía solar, por lo que se plantean algunas propuestas.

Propuestas de mejora

Emplear la metodología propuesta para identificar los posibles riesgos en el ambiente laboral dentro del sector de este tipo de industrias.

Antes de actuar con medidas correctivas se debe de conocer o tener un panorama claro de la situación actual en la que labora el personal en este tipo de instalaciones.

Cubrir las zonas vulnerables u órganos que pueden encontrarse bajo algún riesgo, en este caso los ojos y la piel.

- Emplear el uso de normativas que contrarresten los posibles impactos oculares a exposiciones a radiaciones solares, tales como: la norma Europea UNE-EN 172 (protección individual del ojo), la norma Europea UNE-EN 166, Norma Española UNE-EN 165 (tipos de filtros solares), la norma UNE-EN 165 (clasificación de filtros solares).
- El personal empleado en este tipo de instalaciones utilizar equipo de protección personal tal como se menciona en las normativas NOM-017-STPS-2001(Equipo de protección personal) y NOM-113-STPS-1994 (Calzado de protección y mientras tanto el trabajador).

Utilizar los TLV's como base de diagnóstico, ya que es una medida estándar máxima permisible de exposición, y de no ser sobrepasados estos límites, la situación se encuentra bajo control, pero de no ser así se recomienda tomar acciones o medidas correctivas y preventivas en situaciones futuras.

Capacitación al personal que labora en este tipo de industria, sobre los posibles efectos en la salud ante la exposición radiación solar, ya que todo individuo debe conocer el ambiente de trabajo en el que desempeña sus labores,

La evaluación de riesgos proporciona un diagnóstico de la situación actual en la que labora una organización, y expone un claro panorama en el cual se puede actuar mediante medidas de corrección (para eventos presentes) y de prevención (para la presencia de eventos futuros), lo cual es una herramienta que puede servir como estrategia para que la seguridad en el ambiente laboral sea permanente.

Recomendaciones para estudios similares

En base a la experiencia ganada durante el desarrollo de este estudio, se recomienda para futuros trabajos relacionados con esta temática, considerar algunos

aspectos importantes, esto con el fin de obtener mejores resultados en las diferentes fases de una investigación de esta naturaleza, así como también para enfatizar en información relevante que debe poseer dichos estudios.

Utilizar un lenguaje simple y claro, al momento de realizar el estudio, ya que no todas las personas utilizan los mismos términos, de ser posible de manera gráfica; también hay que conocer los términos que la empresa utiliza para referirse a la instalación.

Definir un plan de trabajo con la finalidad de exponer los tiempos de aplicación de la metodología y recursos disponibles.

Adaptar la metodología de estudio ya que no todas las instalaciones tienen las mismas características físicas.

Elaboración de reportes periódicos de actividades llevadas a cabo, de forma que se cree un expediente, que facilitará la redacción de la investigación.

Asegurarse de cumplir con los objetivos planteados en el estudio, en base a esto se evaluará el éxito de la investigación.

6.3. Trabajos Futuros

A continuación se sugieren posibles trabajos futuros aunque cabe mencionar que el área de oportunidad es bastante amplia.

Elaborar un programa de contingencias y mantenimiento preventivo. Este tipo de programa provee a la organización una respuesta inmediata en dos casos, antes de que suceda un evento y una vez que ocurre una emergencia, creando un ambiente de seguridad laboral. Las instituciones de este tipo deben de contar con un plan que brinde las herramientas necesarias para disminuir la exposición a factores ambientales de tipo ergonómico, que puedan atentar con la salud del personal.

Adaptación de la metodología en una empresa comercial con este tipo de instalación. La aplicación de la metodología empleada en esta investigación debe sufrir modificaciones al momento de utilizarla en instalaciones de aprovechamiento de energía solar, que físicamente tengan características diferentes o bien que sean más grandes, a su vez este estudio podría proporcionar datos significativos en un ambiente comercial.

Aplicar una metodología para la evaluación de posibles riesgos al sistema nervioso. Proponer una metodología de evaluación que tome en consideración los aspectos o condiciones ambientales que afectan el sistema nervioso y que por consecuencia se manifiesten físicamente en impactos en la salud, como por ejemplo el estrés, en este caso llamado estrés térmico.

Comprobación y comparación de resultados. Mediante la recolección de datos proveniente de lecturas reales de concentración solar, emplear la metodología de aplicación de métricas descrita en este documento y establecer una comparación con los resultados obtenidos en esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- Anon, 1989. Health physics: cambio propuesto para las guías IRPA 1985 para los límites de exposición a radiación ultravioleta, Vol.56, pergamon press plc, No.6, pp.971-972
- American conference of governmental Industrial hygienists (ACGIH), 1993. TLV's 1993. Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices for 1993-1994. American conference of governmental Industrial hygienists, Cincinnati, OH
- Arancibia-Bulnes, C. A., Peña-Cruz, M. I., Marroquín-García, D., Cabanillas, R. E., Pérez-Rábago, C. A., Riveros-Rosas, D., Hinojosa, J. F., Estrada, C. A., 2011. Heliostat Testing at a New Facility in Sonora, Mexico. *Proceedings of the SolarPACES Conference*, September 20-23th, Granada, Spain. Paper 23489.
- Boletín Oficial del Estado BOE, 2010. Real Decreto 486/2010, de 23 de abril, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a radiaciones ópticas artificiales. Sec. I. pag.36110 – 36114, Núm. 99, España: BOE
- Brauer I. Roger, 2006. "Safety and health for engineers", 2nd ed., Nonionizing radiation, A JOHN WILEY & SONS, INC.,. ch.21, pp.382.
- Brumleve, T. D., 1977. Eye Hazard and Glint Evaluation for the 5-MWt Solar Thermal Test Facility. Sandia National Laboratories, Report No. SAND76- 8022.
- Brumleve, T.D., 1984. 10 MWe Solar Thermal Central Receiver Pilot Plant: Beam Safety Tests and Analyses, SAND83-8035, Sandia National Laboratories, Livermore, CA.

-
- Delori F.C., Webb R. H. & Sliney D.H., 2007. Maximum permissible exposures for ocular safety (ANSI 2000) with emphasis on ophthalmic devices. *Journal of the Optical Society of America* 24, 5, 73925.
- Franck D., Walzer S. and Chernin O., 2010. Assessment and resolution of potential optical safety hazards from a power tower: SolarPACES, Perpignan, Francia, septiembre 2010.
- Frecker R.C., Eizenman M. & MacLean W. J., 1989. An evaluation of optical radiation hazards associated with infrared corneal, CMBEC-15-CCGB, Toronto, Ontario, Canada.
- Hansson K., 2001. La fuente de información: Knave B., ed. 2001 Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo: Radiaciones no ionizantes 3rd ed., tomo II, Ch 49, pp.49.1- 49.6
- Ho, C.K., C.M. Ghanbari, and R.B. Diver, 2009. Hazard analyses of glint and glare from concentrating solar power plants: SolarPACES, septiembre 2009, pp.15-18
- Ho, C.K., C.M. Ghanbari, and R.B. Diver., 2011. Methodology to Assess Potential Glint and Glare Hazards from Concentrating Solar Power Plants: Analytical Models and Experimental Validation, SAND2010-2581C, in proceedings of the 4th International Conference on Energy Sustainability, ES2010-90053, Phoenix, AZ, May 17-22, 2010.
- Ho, C.K., 2011. Observations and Assessments of Glare from Heliostats and Trough Collectors: Helicopter Flyover and Drive-By Sightings: SolarPACES, Cantabria, España, septiembre 2011
- ICRNIRP, (2006). BfS, ICNIRP statement on far infrared radiation exposure, Matthes, Ingolstaedter Landstr. 1, 85764 Oberschleissheim, Germany.

-
- ICRNIRP, 2004. BfS- R, Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation), Matthes, Ingolstaedter Landstr. 1, 85764 Oberschleissheim, Germany
- ICRNIRP, 1997. Guidelines on limits of exposure to broad-band incoherent optical radiation (0.38 to 3 μm), Matthes, Ingolstaedter Landstr. 1, 85764 Oberschleissheim, Germany.
- Instituto nacional de seguridad e hygiene en el trabajo (INSHT) (s.d.). Notas técnicas de prevención 755, Radiaciones ópticas: metodología de evaluación de la exposición laboral, pp. 4. España: INSTH.
- Iqbal M., 1983. An introduction to solar radiation: solar radiation measuring instruments, 1st ed., ACADEMIC PRESS: Canada, Ch.12. pp.335-362
- IRPA. International Non-Ionizing Radiation Committee, 1991. Guidelines for Limits of Human Expore to Non-Ionizing Radiation. MacMillan. New York.
- Kalogirou Soteris, 2009. Solar energy: Introduction, 1^{era} ed, Ch 1, pp. 23- 26, Elsevier, San Diego: USA.
- Knave B., 2001. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo: Radiaciones no ionizantes, 3rd ed., tomo II, Ch 49.
- Matthes R., 2001. La fuente de información: Knave B., ed.2001 Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo: Radiaciones no ionizantes, 3rd ed., tomo II, Ch 49, pp.49.10
- Medina R. E., 2010. "Análisis del flujo energético 3d en colectores concentradores solares de diversas geometrías". Tesis de Maestría, Universidad de Chile.

Norma Española, 1995. UNE-EN 172. Protección individual de los ojos, Filtros de protección solar para uso laboral: Asociación Española De Normalización Y Certificación (AENOR): Madrid, España.

Norma Española, 2002. UNE-EN 166. Protección individual de los ojos, Especificaciones: Asociación Española De Normalización Y Certificación (AENOR): Madrid, España.

Norma Española, 2006. UNE-EN 165. Protección individual de los ojos, Vocabulario: Asociación Española De Normalización Y Certificación (AENOR): Madrid, España.

Norma oficial mexicana, 1993. NOM-013-STPS-1993. Condiciones de seguridad e Higiene en los centros de trabajo donde se generen radiaciones electromagnéticas No ionizantes: Diario Oficial de la Federación: México.

Norma oficial mexicana, 2001. NOM-017-STPS-2001. Calzado de protección: Diario Oficial de la Federación: México.

Norma oficial mexicana, 1994. NOM-113-STPS-1994. Equipo de protección personal: Diario Oficial de la Federación: México.

Norma venezolana, 2000. COVENIN 2238:2000. Radiaciones no ionizantes, límites de exposición y medidas de protección y control: Venezuela.

Rivieros, D., Perez-Rábago, C. A., Arancibia-Bulnes, C. A., Romero, M., Regalado E., Cabanillas, R., Estrada C. A., 2009. Sizing and performance analysis of a 2 MWth experimental solar heliostat field in Sonora. *Proceedings of the Solar PACES symposium*, Berlin, Germany. Paper 16329.

Sliney H. David, 2001. La fuente de información: Knave B., ed. 2001 Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo: Radiaciones no ionizantes 3rd ed., tomo II, Ch 49, pp.49.6

Sliney D.H., 1994. Ocular hazards of light, p. 183-189. In: T.W.Tibbitts (ed.). International Lighting in Controlled Environments Workshop, NASA-CP-95-3309.

Sliney D.H., Freasier B.C., 1973. Evaluation of Optical Radiation Hazards. Applied Optics 12, 1, 1.

Yunus Cengel, 2002. Heat and Mass Transfer: A Practical Approach, 2nd ed., fundamentals of thermal radiation, McGraw-Hill Companies. Ch.11, pp.561.

Bibliografía virtual

Abengoa Solar NT, 2008. *PS10, la primera torre comercial del mundo* [Online]

Available at:

http://www.abengoasolar.com/corp/web/es/nuestros_proyectos/plataforma_solucar/ps10/index.html [Accessed 4th dic. 2010].

Afinidad eléctrica, n.d. Energías alternativas. [image online] Available at:

<http://www.afinidadelctrica.com.ar/articulo.php?IdArticulo=189> [Accessed 6 dic. 2011].

Carrasco R. José, 2003. *Radiaciones ionizantes y radiaciones no ionizantes aplicaciones y riesgos* [online]. Available at:

<http://www.marcoshurvitz.com.ar/Archivos/Docen/ISFT%20190/Radiaciones%20%20patologia.pdf> [Accessed 20th oct. 2011].

CEDECAP. Centro de Demostración y Capacitación en Tecnologías Apropriadas, 2003. Atlas de energía solar del Perú, [online] .Lima, Perú. Available at:

http://www.cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/80bib_arch.pdf [Accessed 23 rd oct. 2011].

CEDER. Centro de Energías Renovables, “Tecnología Fresnel”. Available at: <http://www.ceder.uta.cl/> . [Accessed March. 2012]

ICNIRP, Comisión internacional de protección contra radiaciones no ionizantes, 2009. *Radiaciones no ionizantes [online]. Alemania.* Available at: <http://www.icnirp.de/PubMost.htm> [Accessed 4th oct. 2011].

IDEAM. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2005. Atlas de Radiación solar de Colombia, Apendice C, *[online]*. Available at: http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/9-Apendice_C.pdf [Accessed 24th oct. 2011].

Medina Carrasco Rodrigo E., 2010. “Análisis del flujo energético 3D en colectores concentradores solares de diversas geometrías”, Universidad de Chile. *[Online]* Available at: http://www.cybertesis.uchile.cl/tesis/uchile/2010/cf-medina_rc/pdfAmont/cf-medina_rc.pdf [Accessed 15th. Oct. 2011]

National renewable energy laboratory, NREL, 2011. “SolTrace” optical modeling software *[Online]* Available at: <http://www.nrel.gov/csp/SolTrace/> [Accessed 3rd sep. 2011].

Pilkington, n.d. Imagen del espectro solar. [image online] Available at: <http://www.pilkington.com/south-america/argentina/spanish/building+products/pilkington4architects/about+glass/appearanceofglass/introduction.htm> , [Accessed 6 dicember 2011].

República de Colombia Ministerio de Minas y Energía, 2005. Atlas de Radiación Solar de Colombia: Available through:

http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/1-Atlas_Radiacion_Solar.pdf.
[Accessed 30 Agosto 2012].

Sliney D.H, 1994. "Ocular hazards of light". Available at:
http://www.controlledenvironments.org/Light1994Conf/4_2_Sliney/Sliney%20Text.htm. [Accessed March. 2012]

Solar Power and Chemical Energy Systems, 2010. *PS10, Solar Thermal Power Plant in Southern Spain* [Online] Available at
<http://www.solarpaces.org/Tasks/Task1/ps10.htm> [Accessed 4th dic. 2010].

Vatell corporation, n.d. Use of the Thermogage Circular Foil Heat Flux Gage [online]
Available at: <http://www.vatell.com/thermogage.htm> [Accessed 24th oct. 2011].

ANEXOS

Anexo 1. Boletín oficial del Estado, España.

ANEXO I. BOE

I. DISPOSICIONES GENERALES

MINISTERIO DE TRABAJO E INMIGRACIÓN

6485 Real Decreto 486/2010, de 23 de abril, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a radiaciones ópticas artificiales.

La Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, determina el cuerpo básico de garantías y responsabilidades preciso para establecer un adecuado nivel de protección de la salud de los trabajadores frente a los riesgos derivados de las condiciones de trabajo, en el marco de una política coherente, coordinada y eficaz.

Según el artículo 6 de la ley, son las normas reglamentarias las que deben ir concretando los aspectos más técnicos de las medidas preventivas, estableciendo las medidas mínimas que deben adoptarse para la adecuada protección de los trabajadores. Entre tales medidas se encuentran las destinadas a garantizar la protección de los trabajadores contra los riesgos derivados de la exposición a radiaciones ópticas artificiales durante el trabajo.

Asimismo, la seguridad y la salud de los trabajadores han sido objeto de diversos Convenios de la Organización Internacional del Trabajo ratificados por España y que, por tanto, forman parte de nuestro ordenamiento jurídico. Destaca, por su carácter general, el Convenio número 155, de 22 de junio de 1981, sobre seguridad y salud

de los trabajadores y medio ambiente de trabajo, ratificado por España el 26 de julio de 1985.

En el ámbito de la Unión Europea, el apartado 2 del artículo 137 del Tratado constitutivo de la Comunidad Europea establece como objetivo la mejora, en concreto, del entorno de trabajo, para proteger la salud y seguridad de los trabajadores. Con esa base jurídica, la Unión Europea se ha ido dotando en los últimos años de un cuerpo normativo altamente avanzado que se dirige a garantizar un mejor nivel de protección de la salud y de seguridad de los trabajadores.

Ese cuerpo normativo está integrado por diversas directivas específicas. En el ámbito de la protección de los trabajadores contra los riesgos derivados de la exposición a radiaciones ópticas artificiales ha sido adoptada la Directiva 2006/25/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de abril de 2006, sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a riesgos derivados de los agentes físicos (radiaciones ópticas artificiales). Mediante este real decreto se procede a la transposición al Derecho español del contenido de esta directiva.

El real decreto consta de once artículos, una disposición adicional, una disposición derogatoria, tres disposiciones finales y dos anexos. La norma establece una serie de disposiciones mínimas que tienen como objeto la protección de los trabajadores contra los riesgos para su seguridad y su salud derivados o que puedan derivarse de la exposición a las radiaciones ópticas artificiales durante su trabajo; regula las disposiciones encaminadas a evitar o a reducir la exposición, de manera que los riesgos derivados de la exposición a radiaciones ópticas artificiales se eliminen en su origen o se reduzcan al nivel más bajo posible, e incluye la obligación empresarial de establecer y aplicar un plan de acción que incluya las medidas técnicas y/o organizativas destinadas a impedir que la exposición supere los valores límite; determina los valores límite de exposición; prevé diversas especificaciones relativas a la evaluación de riesgos, estableciendo en primer lugar la obligación de que el

empresario efectúe una evaluación de los niveles de radiación a que estén expuestos los trabajadores, de manera que puedan definirse y ponerse en práctica las medidas necesarias para reducir la exposición, e incluyendo una relación de aquellos aspectos a los que el empresario deberá prestar especial atención al evaluar los riesgos; especifica que los trabajadores no deberán estar expuestos en ningún caso a valores superiores a los valores límite de exposición; recoge dos de los derechos básicos en materia preventiva, como son la necesidad de formación de los trabajadores y la información a estos, así como la forma de ejercer los trabajadores su derecho a ser consultados y a participar en los aspectos relacionados con la prevención; se establecen disposiciones relativas a la vigilancia de la salud de los trabajadores en relación con los riesgos por exposición a radiaciones ópticas artificiales. Se incluye, por último, el régimen sancionador por incumplimiento a lo dispuesto en el real decreto.

En la elaboración de este real decreto se ha concedido audiencia a las comunidades autónomas, han sido consultadas las organizaciones sindicales y empresariales más representativas y ha sido oída la Comisión Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo.

En su virtud, a propuesta del Ministro de Trabajo e Inmigración, de acuerdo con el Consejo de Estado y previa deliberación del Consejo de Ministros en su reunión del día 23 de abril de 2010,

DISPONGO:

Artículo 1. Objeto.

1. El presente real decreto tiene por objeto, en el marco de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, establecer las disposiciones mínimas para la protección de los trabajadores contra los riesgos para su salud y su seguridad derivados o que puedan derivarse de la exposición a las radiaciones ópticas artificiales durante su trabajo.

Artículo 2. Definiciones.

A efectos de este real decreto, se entenderá por:

a) Radiación óptica: Toda radiación electromagnética cuya longitud de onda esté comprendida entre 100 nm y 1 mm. El espectro de la radiación óptica se divide en radiación ultravioleta, radiación visible y radiación infrarroja:

1.º Radiación ultravioleta: La radiación óptica de longitud de onda comprendida entre 100 y 400 nm. La región ultravioleta se divide en UVA (315-400 nm), UVB (280-315 nm) y UVC (100-280 nm).

2.º Radiación visible: La radiación óptica de longitud de onda comprendida entre 380 nm y 780 nm.

3.º Radiación infrarroja: La radiación óptica de longitud de onda comprendida entre 780 nm y 1 mm. La región infrarroja se divide en IRA (780-1.400 nm), IRB (1.400-3.000 nm) e IRC (3.000 nm-1mm).

b) Láser (light amplification by stimulated emission of radiation; amplificación de luz por emisión estimulada de radiación): Todo dispositivo susceptible de producir o amplificar la radiación electromagnética en el intervalo de la longitud de onda de la radiación óptica, principalmente mediante el proceso de emisión estimulada controlada.

c) Radiación láser: La radiación óptica procedente de un láser.

d) Radiación incoherente: Toda radiación óptica distinta de una radiación láser.

e) Valores límite de exposición: Los límites de la exposición a la radiación óptica basados directamente en los efectos sobre la salud y en consideraciones biológicas. El cumplimiento de estos límites garantizará que los trabajadores expuestos a

fuentes artificiales de radiación óptica estén protegidos contra todos los efectos nocivos para la salud que se conocen.

f) Irradiancia (E) o densidad de potencia: La potencia radiante que incide, por unidad de área, sobre una superficie, expresada en vatios por metro cuadrado (W/m^2).

g) Exposición radiante (H): La irradiancia integrada con respecto al tiempo, expresada en julios por metro cuadrado (J/m^2).

h) Radiancia (L): El flujo radiante o la potencia radiante emitida por unidad de ángulo sólido y por unidad de área, expresada en vatios por metro cuadrado por estereorradián ($W/(m^2 \cdot sr)$).

i) Nivel: La combinación de irradiancia, exposición radiante y radiancia a la que esté expuesto un trabajador.

Artículo 3. Ámbito de aplicación.

1. Las disposiciones de este real decreto se aplicarán a las actividades en las que los trabajadores estén o puedan estar expuestos a los riesgos derivados de radiaciones ópticas artificiales durante su trabajo.

2. El presente real decreto se refiere al riesgo para la salud y la seguridad de los trabajadores debido a los efectos nocivos en los ojos y en la piel, causados por la exposición a radiaciones ópticas artificiales.

3. Las disposiciones del Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención, se aplicarán plenamente al conjunto del ámbito contemplado en el apartado 1 de este artículo, sin perjuicio de las disposiciones más rigurosas o específicas previstas en este real decreto.

Artículo 4. Disposiciones encaminadas a evitar o a reducir la exposición.

1. Los riesgos derivados de la exposición a radiaciones ópticas artificiales deberán eliminarse en su origen o reducirse al nivel más bajo posible, teniendo en cuenta los avances técnicos y la disponibilidad de medidas de control del riesgo en su origen.

La reducción de estos riesgos se basará en los principios generales de prevención establecidos en el artículo 15 de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre.

2. Sobre la base de la evaluación del riesgo mencionada en el artículo 6, si existe posibilidad de que se superen los valores límite de exposición, el empresario elaborará y aplicará un plan de acción, que se integrará en la planificación de la actividad preventiva, donde incluirá medidas técnicas y/u organizativas destinadas a impedir que la exposición supere dichos valores límite, prestando particular atención a los siguientes aspectos:

- a) Otros métodos de trabajo que reduzcan el riesgo derivado de la radiación óptica;
- b) la elección de equipos que generen menores niveles de radiación óptica, teniendo en cuenta el trabajo al que se destinan;
- c) medidas técnicas para reducir la emisión de radiación óptica, incluyendo, cuando fuera necesario, el uso de sistemas de cerramiento, blindajes o mecanismos similares de protección de la salud;
- d) programas apropiados de mantenimiento de los equipos de trabajo, del lugar de trabajo y de los puestos de trabajo;
- e) la concepción y disposición de los lugares y puestos de trabajo;
- f) la limitación de la duración y del nivel de la exposición;
- g) la disponibilidad del equipo adecuado de protección individual;

h) las instrucciones del fabricante del equipo, cuando esté cubierto por una directiva comunitaria pertinente.

3. Los lugares de trabajo en que los trabajadores puedan estar expuestos a niveles que superen los valores límite establecidos en los anexos A y B serán objeto de una señalización apropiada de conformidad con lo dispuesto en el Real Decreto 485/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo. Asimismo, cuando sea posible desde el punto de vista técnico y el riesgo de exposición lo justifique, se identificarán dichos lugares y se limitará el acceso a ellos.

4. De conformidad con lo dispuesto en el artículo 25 de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, el empresario adaptará las medidas mencionadas en este artículo a las necesidades de los trabajadores especialmente sensibles.

Artículo 5. Valores límite de exposición.

A efectos de este real decreto:

a) En el apartado A del anexo A se establecen los valores límite de exposición a la radiación incoherente emitida por las fuentes artificiales.

b) En el apartado A del anexo B se establecen los valores límite de exposición a la radiación láser.

Artículo 6. Evaluación de los riesgos.

1. En cumplimiento de las obligaciones establecidas en el artículo 16 de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, y del capítulo II, sección I, del Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, en el caso de que los trabajadores estén expuestos a fuentes artificiales de radiación óptica, el empresario deberá evaluar los niveles de radiación a que estén expuestos los trabajadores, de manera que puedan definirse y ponerse en

práctica las medidas necesarias para reducir la exposición a los límites aplicables. Para realizar la evaluación, la medición de los niveles de exposición no será necesaria en los casos en que la directa apreciación profesional acreditada permita llegar a una conclusión sin necesidad de la misma teniendo en cuenta, en su caso, para el cálculo de dichos niveles, los datos facilitados por los fabricantes de los equipos conforme a la normativa de seguridad en el producto que les sea de aplicación.

2. La metodología aplicada en la evaluación, la medición y/o los cálculos se ajustará a las normas de la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) para la radiación láser y a las recomendaciones de la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) y del Comité Europeo de Normalización (CEN) para la radiación incoherente y, cuando éstas no sean de aplicación, a los métodos o criterios a los que se refiere el artículo 5.3 del Real Decreto 39/1997, de 17 de enero.

3. Las evaluaciones mencionadas en el apartado 1 se programarán y efectuarán con la periodicidad adecuada de conformidad con el artículo 6 del Real Decreto 39/1997, de 17 de enero. Dichas evaluaciones serán realizadas por personal cualificado para el desempeño de funciones de nivel superior con la especialidad de higiene industrial, atendiendo a lo dispuesto en los artículos 36 y 37 y en el capítulo III del Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, en cuanto a la organización de recursos para el desarrollo de actividades preventivas.

Los datos obtenidos de la evaluación y/o de la medición del nivel de exposición a radiación óptica se conservarán de manera que permita su consulta posterior. La documentación de la evaluación se ajustará a lo dispuesto en el artículo 23 de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre y en el artículo 7 del Real Decreto 39/1997, de 17 de enero.

4. En el marco de lo dispuesto en los artículos 15 y 16 de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, el empresario, al evaluar los riesgos, prestará particular atención a los siguientes aspectos:

a) el nivel, el intervalo de longitudes de onda y la duración de la exposición a fuentes artificiales de radiación óptica;

b) los valores límite de exposición establecidos en el artículo 5 del presente real decreto;

c) los posibles efectos en la salud y la seguridad de los trabajadores pertenecientes a grupos de riesgo particularmente sensibles;

d) los posibles efectos en la salud y la seguridad de los trabajadores, resultantes de las interacciones, en el lugar de trabajo, entre la radiación óptica y las sustancias químicas fotosensibilizantes;

e) los posibles efectos indirectos, como el deslumbramiento temporal, la explosión o el incendio;

f) la existencia de equipos sustitutivos concebidos para reducir los niveles de exposición a radiaciones ópticas artificiales;

g) la información apropiada derivada de la vigilancia de la salud, incluida la información científico-técnica publicada, en la medida en que sea posible;

h) La exposición a múltiples fuentes de radiaciones ópticas artificiales;

i) La clasificación de un láser con arreglo a la norma UNE EN 60825-1/A2 «Seguridad de los productos láser. Parte 1: Clasificación del equipo, requisitos y guía de seguridad» y, en lo que respecta a cualquier otra fuente de radiación óptica artificial susceptible de ocasionar lesiones similares a las provocadas por un láser de clase 3B o 4, cualquier clasificación análoga;

j) la información facilitada por los fabricantes de fuentes de radiación óptica y equipos de trabajo de conformidad con las directivas comunitarias aplicables.

5. En función de los resultados de la evaluación, el empresario deberá determinar las medidas que deban adoptarse con arreglo a los artículos 4, 7, 8 y 9, planificando su ejecución de acuerdo con lo establecido en el capítulo II, sección 2.ª, del Real Decreto 39/1997, de 17 de enero.

Artículo 7. Limitación de exposición.

1. En ningún caso la exposición del trabajador deberá superar los valores establecidos en el artículo 5 de este real decreto.

2. Si, a pesar de las medidas adoptadas en aplicación de este real decreto, se comprobaran exposiciones por encima de los valores límite de exposición, el empresario deberá:

a) Tomar inmediatamente medidas para reducir la exposición por debajo de los valores límite;

b) determinar las causas de la sobreexposición;

c) corregir las medidas de prevención y protección, a fin de evitar que vuelva a producirse una reincidencia;

d) informar a los delegados de prevención de tales circunstancias.

Artículo 8. Información y formación de los trabajadores.

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 18.1 y 19 de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, el empresario velará porque los trabajadores que se vean expuestos en el lugar de trabajo a los riesgos derivados de las radiaciones ópticas artificiales y/o

sus representantes reciban la información y formación necesarias sobre el resultado de la evaluación de riesgos prevista en el artículo 6, en particular sobre:

- a) Las medidas tomadas en aplicación del presente real decreto.
- b) Los valores límite de exposición establecidos en el artículo 5 y los riesgos potenciales asociados.
- c) Los resultados de la evaluación y, en su caso, medición de los niveles de exposición a radiaciones ópticas artificiales efectuados en aplicación del artículo 6 del presente real decreto, junto con una explicación de su significado y riesgos potenciales.
- d) La forma de detectar los efectos nocivos para la salud debidos a la exposición y la forma de informar sobre ellos.
- e) Las circunstancias en las que los trabajadores tienen derecho a una vigilancia de la salud, y la finalidad de esta vigilancia de la salud, de conformidad con el artículo 10.
- f) Las prácticas de trabajo seguras, con el fin de reducir al mínimo los riesgos derivados de la exposición a radiaciones ópticas artificiales.
- g) El uso correcto de los equipos de protección individual.

Artículo 9. Consulta y participación de los trabajadores.

La consulta y la participación de los trabajadores y/o de sus representantes sobre las cuestiones a que se refiere este real decreto se realizarán de conformidad con lo dispuesto en el artículo 18.2 de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre.

Artículo 10. Vigilancia de la salud.

1. El empresario garantizará una adecuada vigilancia de la salud de los trabajadores en función de los riesgos inherentes al trabajo con exposición a radiaciones ópticas artificiales, tal y como se contempla en el artículo 22 de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, con el fin de la detección precoz de cualquier efecto nocivo así como de la prevención de cualquier riesgo, incluidos los a largo plazo o los riesgos de enfermedad crónica.

La vigilancia de la salud será realizada a través de la organización preventiva que haya adoptado la empresa y conforme al artículo 37.3 del Real Decreto 39/1997, de 17 de enero.

2. Cuando se detecte una exposición que supere los valores límite, el trabajador o los trabajadores afectados, tendrán derecho a un examen médico. También tendrán derecho aquellos trabajadores que, como resultado de la vigilancia de la salud, se establezca que padecen una enfermedad o efecto nocivo para la salud identificable, que a juicio de un médico o un especialista de medicina del trabajo sea consecuencia de la exposición a radiaciones ópticas artificiales en el trabajo. En ambos casos:

a) El médico u otro personal sanitario competente deberá:

1.º Proponer que los trabajadores expuestos se sometan a un examen médico.

2.º Comunicar al trabajador el resultado que le atañe personalmente. También deberá asesorar al trabajador sobre cualquier medida de vigilancia de la salud a la que sea conveniente someterse tras el cese de la exposición.

3.º Informar al empresario de cualquier resultado significativo de la vigilancia de la salud, conforme al artículo 22.4 de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre.

b) Por su parte, el empresario deberá:

- 1.º Revisar la evaluación de los riesgos efectuada con arreglo al artículo 6.
 - 2.º Revisar las medidas previstas para eliminar o reducir los riesgos con arreglo a lo dispuesto en el artículo 4.
 - 3.º Tener en cuenta las recomendaciones del médico responsable de la vigilancia de la salud al aplicar cualquiera otra medida que se considere necesario para eliminar o reducir riesgos de acuerdo con lo dispuesto en el artículo 4.
 - 4.º Disponer una vigilancia sistemática de la salud y el examen del estado de salud de los demás trabajadores que hayan sufrido una exposición similar.
3. La vigilancia de la salud incluirá la elaboración y actualización de la historia clínico-laboral de los trabajadores sujetos a la misma con arreglo a lo dispuesto en el apartado 1. El acceso, confidencialidad y contenido de dichas historias se ajustará a lo establecido en el artículo 22, apartados 2, 3 y 4, de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, y en el artículo 37.3.c) del Real Decreto 39/1997, de 17 de enero. El trabajador tendrá acceso, previa solicitud, al historial que le afecte personalmente.

Artículo 11. Infracciones y sanciones.

Los incumplimientos a lo dispuesto en este real decreto serán sancionados con arreglo a lo dispuesto en la Ley de Infracciones y Sanciones en el Orden Social, Texto Refundido aprobado por Real Decreto Legislativo 5/2000, de 4 de agosto.

Disposición adicional única. Elaboración y actualización de la Guía técnica.

El Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, de acuerdo con lo dispuesto en el artículo 5.3 del Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención, elaborará y mantendrá actualizada una Guía técnica de carácter no vinculante, para la evaluación y

prevención de los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ópticas artificiales en los lugares de trabajo.

Disposición derogatoria única. Alcance de la derogación normativa.

Quedan derogadas cuantas disposiciones de igual o inferior rango se opongan a lo previsto en este real decreto.

Disposición final primera. Título competencial.

Este real decreto se dicta al amparo del artículo 149.1.7.^a de la Constitución que atribuye al Estado la competencia en materia de legislación laboral sin perjuicio de su ejecución por los órganos de las comunidades autónomas.

Disposición final segunda. Incorporación de derecho de la Unión Europea.

Mediante este real decreto se incorpora al derecho español la Directiva 2006/25/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de abril de 2006, sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a riesgos derivados de los agentes físicos (radiaciones ópticas artificiales).

Disposición final tercera. Facultad de desarrollo.

Se autoriza al Ministro de Trabajo e Inmigración, previo informe de la Comisión Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, a dictar cuantas disposiciones sean necesarias para la aplicación y desarrollo de este real decreto, así como para las adaptaciones de carácter estrictamente técnico de sus anexos, en función del progreso técnico y de la evolución de las normativas o especificaciones internacionales o de los conocimientos en materia de protección frente a los riesgos relacionados con la exposición a las radiaciones ópticas artificiales.

Disposición final cuarta. Entrada en vigor.

El presente real decreto entrará en vigor el día 27 de abril de 2010.

Dado en Madrid, el 23 de abril de 2010.

JUAN CARLOS R.

El Ministro de Trabajo e Inmigración,

CELESTINO CORBACHO CHAVES

ANEXO A

Radiaciones ópticas incoherentes

Tabla A.1 Valores Límite para las Radiaciones ópticas incoherentes y sus efectos sobre la salud.

Nº orden	Longitud de onda λ (nm)	Valor límite (unidades)	Parte del cuerpo/Riesgo
1	180-400 (UV A-B-C)	$H_{ef}=30$ (J/m ²) valor referido a 8 horas	Ojos: Cornea----fotoqueratitis Oxjuntiva----conjuntivitis Cristalino----cataratas Piel: Eritema, elastosis, cáncer de piel
2	315-400 (UVA)	$H_{UVA}=10^4$ (J/m ²) valor referido a 8 horas	Ojos: Cristalino----cataractogénesis
3 a	$(\alpha \geq 11 \text{ mrad})$ 300-700 (luz azul) ⁽¹⁾	Para $t \leq 10.000$ s $L_{ef}=10^6/t$ (W/ m ² ·sr)	Ojos: Retina----fotorretinitis
		Para $t > 10.000$ s $L_{ef}=100$ (W/ m ² ·sr)	
3 b	$(\alpha < 11 \text{ mrad})^{(2)}$ 300-700 (luz azul) ⁽¹⁾	Para $t \leq 10.000$ s $E_{ef}=100/t$ (W/ m ²)	
		Para $t > 10.000$ s $E_{ef}=0,01$ (W/ m ²)	
4	380 – 1400 (visible e IRA)	Para $t > 10$ s $L_{ef}=(2,8 \cdot 10^9)/C_a$ (W/ m ² ·sr)	Ojos: Retina----quemaduras
		Para $10\mu s \leq t \leq 10$ s $L_{ef}=(5 \cdot 10^9)/(C_a \cdot t^{0,25})$ (W/ m ² ·sr)	
		Para $t < 10\mu s$ $L_{ef}=(8,89 \cdot 10^8)/C_a$ (W/ m ² ·sr)	
		Para:	
		$\alpha \leq 1,7 \text{ mrad}$	$C_a=1,7$
		$1,7 \leq \alpha \leq 100 \text{ mrad}$	$C_a=\alpha$
		$\alpha > 100 \text{ mrad}$	$C_a=100$
5	780 – 1400 (IRA)	Para $t > 10$ s $L_{ef}=(6 \cdot 10^8)/C_a$ (W/ m ² ·sr)	Ojos: Retina----quemaduras
		Para $10\mu s \leq t \leq 10$ s $L_{ef}=(5 \cdot 10^8)/(C_a \cdot t^{0,25})$ (W/ m ² ·sr)	
		Para $t < 10\mu s$ $L_{ef}=(8,89 \cdot 10^8)/C_a$ (W/ m ² ·sr)	
		Para:	
		$\alpha \leq 11 \text{ mrad}$	$C_a=11$
		$11 \leq \alpha \leq 100 \text{ mrad}$	$C_a=\alpha$
		$\alpha > 100 \text{ mrad}$	$C_a=100$
6	780-3000 (IRA e IRB)	Para $t \leq 1.000$ s $E_{ef}=18.000 \cdot t^{0,75}$ (W/ m ²)	Ojos: Cornea----Quemaduras Cristalino----cataratas
		Para $t > 1.000$ s $E_{ef}=100$ (W/ m ²)	
7	380-3000 (visible, IRA e IRB)	Para $t < 10$ s $H_{piel}=20.000 \cdot t^{0,25}$ (J/ m ²)	Piel----Quemaduras

¹ El intervalo de 300 a 700 nm comprende parte de los rayos UVB, todos los UVA y la mayor parte de las radiaciones visibles; denominándose riesgo «de luz azul». En sentido estricto, la luz azul corresponde únicamente al intervalo de 400 a 490 nm aproximadamente.

² Para fijar la mirada sobre fuentes muy pequeñas con un $\alpha < 11$ mrad, L_B puede convertirse a E_B . Esto es aplicable únicamente en el caso de instrumentos oftalmológicos o al ojo estabilizado durante la anestesia. El tiempo máximo de «mirada fija» se calcula mediante la fórmula: $t_{max} = 100/E_B$, este valor debido a los movimiento ocular no es superior a 100s.

Expresiones

Los valores de exposición a las radiaciones ópticas que son pertinentes desde un punto de vista biofísico pueden determinarse mediante las fórmulas recogidas a continuación. Las fórmulas que deben utilizarse dependen de las longitudes de onda (λ) de emisión de la fuente. A una determinada fuente de radiación óptica pueden corresponder varios valores de exposición con sus correspondientes límites de exposición.

1	$H_{\text{eff}} = \int_0^t \int_{\lambda=180 \text{ nm}}^{\lambda=400 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda \cdot dt$	(H_{eff} es pertinente únicamente en el intervalo de la longitud de onda entre 180 y 400 nm)
2	$H_{\text{UVA}} = \int_0^t \int_{\lambda=315 \text{ nm}}^{\lambda=400 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot d\lambda \cdot dt$	(H_{UVA} es pertinente únicamente en el intervalo de la longitud de onda entre 315 y 400 nm)
3a	$L_{\text{B}} = \int_{\lambda=300 \text{ nm}}^{\lambda=700 \text{ nm}} L_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda$	(L_{B} es pertinente únicamente en el intervalo de la longitud de onda entre 300 y 700 nm)
3b	$E_{\text{B}} = \int_{\lambda=300 \text{ nm}}^{\lambda=700 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda$	(E_{B} es pertinente únicamente en el intervalo de la longitud de onda entre 300 y 700 nm)
4 y 5	$L_{\text{R}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda}(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda$	(véase la tabla A.1 para los valores adecuados de λ_1 y λ_2)
6	$E_{\text{IR}} = \int_{\lambda=780 \text{ nm}}^{\lambda=3000 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda$	(E_{IR} es pertinente únicamente en el intervalo de la longitud de onda entre 780 y 3 000 nm)
7	$H_{\text{piel}} = \int_0^t \int_{\lambda=380 \text{ nm}}^{\lambda=3000 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot d\lambda \cdot dt$	(H_{piel} es pertinente únicamente en el intervalo de la longitud de onda entre 380 y 3 000 nm)

Las fórmulas mencionadas anteriormente pueden sustituirse por las siguientes expresiones y el uso de los valores discretos establecidos en las siguientes tablas. El número indicado en la columna 'Nº orden' corresponde al respectivo en la Tabla A.1. Los resultados deberán compararse con los correspondientes valores límite de exposición indicados en la Tabla A.1

Tabla A.2 Fórmulas

Nº orden	Expresión	Descripción
1	$E_{\text{eff}} = \sum_{\lambda=180 \text{ nm}}^{\lambda=400 \text{ nm}} E_{\lambda} \cdot S(\lambda) \cdot \Delta\lambda$ $H_{\text{eff}} = E_{\text{eff}} \cdot \Delta t$	<p>$E_{\lambda}(\lambda, t)$, E_{λ}: Irradiancia espectral o densidad de potencia espectral: la potencia radiante que incide, por unidad de área, sobre una superficie, expresada en vatios por metro cuadrado por nanómetro ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$).</p> <p>Los valores $E_{\lambda}(\lambda, t)$ y E_{λ} pueden proceder de mediciones o pueden ser facilitados por el fabricante del equipo.</p> <p>E_{eff}: Irradiancia efectiva calculada para el intervalo de las radiaciones UV (180 a 400 nm) ponderado espectralmente por $S(\lambda)$, expresada en vatios por metro cuadrado ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)</p>
2	$E_{\text{UVA}} = \sum_{\lambda=315 \text{ nm}}^{\lambda=400 \text{ nm}} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda$ $H_{\text{UVA}} = E_{\text{UVA}} \cdot \Delta t$	<p>H: Exposición radiante, la irradiancia integrada respecto al tiempo, expresada en julios por metro cuadrado ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)</p> <p>$H_{\text{eff}}$: Exposición radiante efectiva ponderado espectralmente por $S(\lambda)$, expresada en julios por metro cuadrado ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)</p>
3 a	$L_{\text{R}} = \sum_{\lambda=300 \text{ nm}}^{\lambda=700 \text{ nm}} L_{\lambda} \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$	<p>$S(\lambda)$: Ponderación espectral que tiene en cuenta la relación entre la longitud de onda y los efectos para la salud de la radiación UV sobre los ojos y la piel. (valores en la tabla A.3)</p> <p>λ: Longitud de onda, expresada en nanómetros (nm)</p>
3 b	$E_{\text{B}} = \sum_{\lambda=300 \text{ nm}}^{\lambda=700 \text{ nm}} E_{\lambda} \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$	<p>$\Delta\lambda$: Ancho de banda, expresada en nanómetros (nm). Intervalo de cálculo o de medida.</p> <p>Δt: Duración de la exposición, expresado en segundos (s)</p>
4 y 5	$L_{\text{R}} = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda$ <p>(véase la tabla A.1 para los valores adecuados de λ_1 y λ_2)</p>	<p>E_{UVA}: Irradiancia total (UVA), calculada para el intervalo de las longitudes de onda UVA (315 a 400 nm), expresada en vatios por metro cuadrado ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)</p> <p>$H_{\text{UVA}}$: Exposición radiante, a integral o la suma de la irradiancia con respecto al tiempo y a la longitud de onda calculada para el intervalo de las longitudes de onda UVA (315 y 400 nm), expresada en julios por metro cuadrado ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)</p>

Nº orden	Expresión	Descripción
6	$E_{IR} = \sum_{\lambda=760\text{ nm}}^{\lambda=3\,000\text{ nm}} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda$	<p>L_{λ} : Radiancia espectral de la fuente, expresada en vatios por metro cuadrado por estereorradián por nanómetro ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$).</p> <p>$L_B$: Radiancia efectiva (luz azul), calculada y ponderada espectralmente por B (λ), expresada en vatios por metro cuadrado por estereorradián ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)</p>
7	$E_{\text{poid}} = \sum_{\lambda=380\text{ nm}}^{\lambda=3\,000\text{ nm}} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda$ $H_{\text{poid}} = E_{\text{poid}} \cdot \Delta t$	<p>$B(\lambda)$: Ponderación espectral, tiene en cuenta la relación entre la longitud de onda y la lesión fotoquímica causada en los ojos por la radiación de luz azul. (valores en la tabla A.4)</p> <p>E_B : Irradiancia efectiva (luz azul), ponderada espectralmente por B (λ), expresada en vatios por metro cuadrado ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)</p> <p>$L_{\lambda}$: Radiancia efectiva (efecto térmico), calculada y ponderada espectralmente por R (λ), expresada en vatios por metro cuadrado por estereorradián ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)</p> <p>$R(\lambda)$: Ponderación espectral, tiene en cuenta la relación entre la longitud de onda y las lesiones en los ojos por efecto térmico provocado por la radiación visible y IRA. (valores en la tabla A.4)</p> <p>E_{IR} : Irradiancia total (efecto térmico), calculada para el intervalo de las longitudes de onda de infrarrojos (780 a 3.000 nm), expresada en vatios por metro cuadrado ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)</p> <p>$E_{\text{poid}}$: Irradiancia total (visible, IRA e IRB), calculada para el intervalo de las longitudes de onda visibles e infrarrojos (380 a 3.000 nm), expresada en vatios por metro cuadrado ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)</p> <p>$H_{\text{poid}}$: Exposición radiante total, la integral o la suma de la irradiancia con respecto al tiempo y a la longitud de onda calculada para el intervalo de longitudes de onda visibles e infrarrojos (380 a 3.000 nm), expresada en julios por metro cuadrado ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)</p> <p>$\alpha$: Ángulo subtendido por una fuente aparente, percibido en un punto del espacio, expresado en miliradianes (mrad). La fuente aparente es el objeto real o virtual que forma la imagen retiniana lo más pequeña posible.</p>

Curvas de Ponderación

Tabla A.3 Valores de la curva de ponderación $S(\lambda)$. (Valores para longitudes de onda de 180 a 400 nm.)

λ en nm	$S(\lambda)$	λ en nm	$S(\lambda)$	λ en nm	$S(\lambda)$	λ en nm	$S(\lambda)$	λ en nm	$S(\lambda)$
180	0.0120	228	0.1737	276	0.9434	324	0.000520	372	0.000086
181	0.0126	229	0.1819	277	0.9272	325	0.000500	373	0.000083
182	0.0132	230	0.1900	278	0.9112	326	0.000479	374	0.000080
183	0.0138	231	0.1995	279	0.8954	327	0.000459	375	0.000077
184	0.0144	232	0.2089	280	0.8800	328	0.000440	376	0.000074
185	0.0151	233	0.2188	281	0.8668	329	0.000425	377	0.000072
186	0.0158	234	0.2292	282	0.8542	330	0.000410	378	0.000069
187	0.0166	235	0.2400	283	0.8422	331	0.000396	379	0.000066
188	0.0173	236	0.2510	284	0.7908	332	0.000383	380	0.000064
189	0.0181	237	0.2624	285	0.7700	333	0.000370	381	0.000062
190	0.0190	238	0.2744	286	0.7420	334	0.000355	382	0.000059
191	0.0199	239	0.2869	287	0.7151	335	0.000340	383	0.000057
192	0.0208	240	0.3000	288	0.6891	336	0.000327	384	0.000055
193	0.0218	241	0.3111	289	0.6641	337	0.000315	385	0.000053
194	0.0228	242	0.3227	290	0.6400	338	0.000303	386	0.000051
195	0.0239	243	0.3347	291	0.6186	339	0.000291	387	0.000049
196	0.0250	244	0.3471	292	0.5980	340	0.000280	388	0.000047
197	0.0262	245	0.3600	293	0.5780	341	0.000271	389	0.000046
198	0.0274	246	0.3730	294	0.5587	342	0.000263	390	0.000044
199	0.0287	247	0.3865	295	0.5400	343	0.000255	391	0.000042
200	0.0300	248	0.4005	296	0.4984	344	0.000248	392	0.000041
201	0.0334	249	0.4150	297	0.4600	345	0.000240	393	0.000039
202	0.0371	250	0.4300	298	0.3989	346	0.000231	394	0.000037
203	0.0412	251	0.4465	299	0.3459	347	0.000223	395	0.000036
204	0.0459	252	0.4637	300	0.3000	348	0.000215	396	0.000035
205	0.0510	253	0.4815	301	0.2210	349	0.000207	397	0.000033
206	0.0551	254	0.5000	302	0.1629	350	0.000200	398	0.000032
207	0.0595	255	0.5200	303	0.1200	351	0.000191	399	0.000031
208	0.0643	256	0.5437	304	0.0849	352	0.000183	400	0.000030
209	0.0694	257	0.5685	305	0.0600	353	0.000175		
210	0.0750	258	0.5945	306	0.0454	354	0.000167		
211	0.0786	259	0.6216	307	0.0344	355	0.000160		
212	0.0824	260	0.6500	308	0.0260	356	0.000153		
213	0.0864	261	0.6792	309	0.0197	357	0.000147		
214	0.0906	262	0.7098	310	0.0150	358	0.000141		
215	0.0950	263	0.7417	311	0.0111	359	0.000136		
216	0.0995	264	0.7751	312	0.0081	360	0.000130		
217	0.1043	265	0.8100	313	0.0060	361	0.000126		
218	0.1093	266	0.8449	314	0.0042	362	0.000122		
219	0.1145	267	0.8812	315	0.0030	363	0.000118		
220	0.1200	268	0.9192	316	0.0024	364	0.000114		
221	0.1257	269	0.9587	317	0.0020	365	0.000110		
222	0.1316	270	1.0000	318	0.0016	366	0.000106		
223	0.1378	271	0.9919	319	0.0012	367	0.000103		
224	0.1444	272	0.9838	320	0.0010	368	0.000099		
225	0.1500	273	0.9758	321	0.000819	369	0.000096		
226	0.1583	274	0.9679	322	0.000670	370	0.000093		
227	0.1658	275	0.9600	323	0.000540	371	0.000090		

Tabla A.4 Valores de las curvas de ponderación, $B(\lambda)$, y $R(\lambda)$ (Valores para longitudes de onda de 300 a 1.400 nm)

Longitud de onda (nm)	$B(\lambda)$	$R(\lambda)$
$300 \leq \lambda < 380$	0,01	-----
380	0,01	0,10
385	0,013	0,13
390	0,025	0,25
395	0,05	0,50
400	0,10	1,0
405	0,20	2,0
410	0,40	4,0
415	0,80	8,0
420	0,90	9,0
425	0,95	9,5
430	0,98	9,8
435	1,0	10,0
440	1,0	10,0
445	0,97	9,7
450	0,94	9,4
455	0,90	9,0
460	0,80	8,0
465	0,70	7,0
470	0,62	6,2
475	0,55	5,5
480	0,45	4,5
485	0,32	3,2
490	0,22	2,2
495	0,16	1,6
500	0,10	1,0
$500 < \lambda \leq 600$	0,05	1,0
$600 < \lambda \leq 700$	$10^{0,02(450-\lambda)}$	1,000
$700 < \lambda \leq 1050$	-----	$10^{0,002(700-\lambda)}$
$1050 < \lambda \leq 1150$	-----	0,2
$1150 < \lambda \leq 1200$	-----	$0,2 \cdot 10^{0,02(1150-\lambda)}$
$1200 < \lambda \leq 1400$	-----	0,02

ANEXO B

Radiaciones ópticas láser

Tabla B.1 Valores límite de exposición de los ojos al láser (TExposición ≥ 10s)

Longitud de onda λ (nm)	(1)	Apertura	VALOR Límite			Efecto
			$10^1 \dots 10^2$	Duración $10^2 \dots 10^4$	$10^4 \dots 3 \cdot 10^4$	
UVC	180-280	3,5 mm	H=30 (J/m ²)			Lesiones fotoquímicas y térmicas
UVB	280-302	3,5 mm	H=30 (J/m ²)			Lesiones fotoquímicas y térmicas
	303		H=40 (J/m ²)			
	304		H=60 (J/m ²)			
	305		H=100 (J/m ²)			
	306		H=160 (J/m ²)			
	307		H=250 (J/m ²)			
	308		H=400 (J/m ²)			
	309		H=630 (J/m ²)			
	310		H=1·10 ³ (J/m ²)			
	311		H=1,6·10 ³ (J/m ²)			
	312		H=2,5·10 ³ (J/m ²)			
	313		H=4,0·10 ³ (J/m ²)			
314	H=6,3·10 ³ (J/m ²)					
UVA	315-400	3,5 mm	H=1·10 ⁴ (J/m ²)			Lesiones fotoquímicas y térmicas
Visible (2)	400-600	7mm	H=100·C _B (J/m ²) $\gamma = 11 \text{ mrad (3)}$	E=1·C _B (W/m ²) $\gamma = 1,1 \cdot t^{0,5} \text{ mrad (3)}$	E=1·C _B (W/m ²) $\gamma = 110 \text{ mrad (3)}$	Lesiones de la retina (fotoquímica)
	400-700		Entonces E=10 (W/m ²)	Lesiones de la retina (térmica)		
			Si $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ y $t \leq T_1$ Si $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ y $t > T_1$	Entonces H=18·C _E ·t ^{0,75} (J/m ²) Entonces E=18·C _E ·T ₁ ^{-0,25} (W/m ²)		
IRA	700-1400	7 mm	Entonces E=10·C _A ·C _C (W/m ²)	Lesiones térmicas		
			Si $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ y $t \leq T_1$ Entonces H=18·C _A ·C _C ·C _E ·t ^{0,75} (J/m ²)			
			Si $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ y $t > T_1$ Entonces E=18·C _A ·C _C ·C _E ·T ₁ ^{-0,25} (W/m ²)			
IRB e IRC	1400- 10 ⁶	Véase(4)	E=1000 (W/m ²)			Lesiones térmicas

(1) Si aparecen dos límites para la longitud de onda del láser, se aplicará el más restrictivo.

(2) En el caso de una fuente pequeña con un $\alpha \leq 1,5 \text{ mrad}$, los valores límite de E para la radiación visible (400 a 600nm) se reducen a los límites térmicos para $10 \leq t < T_1$ y a los límites fotoquímicos para exposiciones mayores. Los valores de T1 y T2 véase el apartado B de este anexo. Los valores límite para las lesiones de retina fotoquímica también pueden expresarse como $G=106 \cdot CB$ (J· m-2 ·sr -1) para $10 < t \leq 1000$ s y $L=100 \cdot CB$ para $1 < t > 10000$ s. Para medir G y L, γ m= debe emplearse como campo visual para el cálculo de los promedios. La frontera oficial entre la radiación visible y la infrarroja es de 780 nm según la CIE. (La notación G la utiliza CEN, Lp la utiliza CEI y CENELEC) (G, radiancia integrada, es la integral de la radiancia con respecto a un tiempo de exposición, expresada como energía radiante por unidad de área de la superficie radiante y por unidad de ángulo sólido de emisión, en julios por metro cuadrado por estereorradián (J· m-2 ·sr -1))

(3) γ : Ángulo del cono límite del campo visual de medición expresado en milirradiantes (mrad); γ m= campo visual de medición (mrad). Si $\alpha > \gamma$, entonces γ m = α (si se emplea un campo visual de medición mayor, el riesgo resulta sobrevalorado.) Si $\alpha < \gamma$, γ m debe ser lo suficientemente amplio para incluir la fuente en su totalidad, pero no está limitado de otro modo y podría ser mayor que γ α : ángulo subtendido de una fuente en milirradiantes (mrad). Apertura límite: la superficie circular sobre la que se calculan los promedios de la irradiancia y la exposición radiante.

(4) Para λ entre 1.400 y 10.000 nm el diámetro de apertura es 3,5mm. Para λ entre 105 a 106 el diámetro de apertura es 11 mm

Tabla B.2 Valores límite de exposición de los ojos al láser ($T_{\text{Exposición}} < 10\text{s}$)

Longitud de onda λ (nm) (1)		Aper- tura	VALOR Límite						Efecto		
			Duración								
			10^{-12} - 10^{-11}	10^{-11} - 10^{-9}	10^{-9} - 10^{-7}	10^{-7} - $1,8 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$ - $5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$ - 10^{-3}	$5 \cdot 10^{-3}$ - 10		
UVC	180-280	1 mm para $t \leq 0,3\text{s}$ $1,5 \cdot t^{0,75}$ para $0,3 < t < 10\text{s}$	$E=3 \cdot 10^{10}$ (W/m^2) (Véase nota 2)						H= 30 (J/m^2)		Lesiones fotoquímicas y térmicas
UVB	280-302								H= 30 (J/m^2)		
	303								H= 40 (J/m^2) Si $t < 2,6 \cdot 10^{-9}$ entonces $H= 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$ (3)		
	304								H= 60 (J/m^2) Si $t < 1,3 \cdot 10^{-8}$ entonces $H= 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$ (3)		
	305								H=100 (J/m^2) Si $t < 1,0 \cdot 10^{-7}$ entonces $H= 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$ (3)		
	306								H=160 (J/m^2) Si $t < 6,7 \cdot 10^{-7}$ entonces $H= 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$ (3)		
	307								H= 250 (J/m^2) Si $t < 4,0 \cdot 10^{-6}$ entonces $H= 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$ (3)		
	308								H= 400 (J/m^2) Si $t < 2,6 \cdot 10^{-5}$ entonces $H= 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$ (3)		
	309								H= 630 (J/m^2) Si $t < 1,6 \cdot 10^{-4}$ entonces $H= 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$ (3)		
	310								H=1- 10^3 (J/m^2) Si $t < 1,0 \cdot 10^{-3}$ entonces $H= 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$ (3)		
	311								H=1,6- 10^3 (J/m^2) Si $t < 6,7 \cdot 10^{-3}$ entonces $H= 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$ (3)		
312	H=2,5- 10^3 (J/m^2) Si $t < 4,0 \cdot 10^{-2}$ entonces $H= 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$ (3)										
313	H=4,0- 10^3 (J/m^2) Si $t < 2,6 \cdot 10^{-1}$ entonces $H= 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$ (3)										
314	H=6,3- 10^3 (J/m^2) Si $t < 1,6$ entonces $H= 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$ (3)										
UVA	315-400	H= $5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$ (J/m^2)						Lesiones fotoquímicas y térmicas			
Visible e IRA	400-700	7 mm	H=1,5- $10^4 \cdot C_E$ (J/m^2)	H=2,7- $10^4 \cdot t^{0,75} \cdot C_E$ (J/m^2)	H=5- $10^3 \cdot C_E$ (J/m^2)	H= $18 \cdot t^{0,75} \cdot C_E$ (J/m^2)			Lesiones térmicas		
	700-1050		H=1,5- $10^4 \cdot C_A \cdot C_E$ (J/m^2)	H=2,7- $10^4 \cdot t^{0,75} \cdot C_A \cdot C_E$ (J/m^2)	H=5- $10^3 \cdot C_A \cdot C_E$ (J/m^2)	H= $18 \cdot t^{0,75} \cdot C_A \cdot C_E$ (J/m^2)					
	1050-1400		H=1,5- $10^3 \cdot C_C \cdot C_E$ (J/m^2)	H=2,7- $10^3 \cdot t^{0,75} \cdot C_C \cdot C_E$ (J/m^2)	H=5- $10^2 \cdot C_C \cdot C_E$ (J/m^2)	H= $90 \cdot t^{0,75} \cdot C_C \cdot C_E$ (J/m^2)					
IRB e IRC	1400-1500	Véase (4)	E=1- 10^{12} (W/m^2) (2)		H=1- 10^4 (J/m^2)		H= $5,6 \cdot 10^4 \cdot t^{0,25}$ (J/m^2)			Lesiones térmicas	
	1500-1800		E=1- 10^{13} (W/m^2) (2)		H=1- 10^4 (J/m^2)						
	1800-2600		E=1- 10^{12} (W/m^2) (2)		H=1- 10^4 (J/m^2)		H= $5,6 \cdot 10^4 \cdot t^{0,25}$ (J/m^2)				
	2600-10 ⁶		E=1- 10^{11} (W/m^2) (2)		H=100 (J/m^2)	H= $5,6 \cdot 10^4 \cdot t^{0,25}$ (J/m^2)					

- (1) Si aparecen dos límites para la longitud de onda del láser, se aplicará el más restrictivo.
- (2) habida cuenta de la falta de datos para estas duraciones de los pulso, se recomienda la utilización de límites de irradiancia para 1ns establecidos por la ICNIRP
- (3) En caso de múltiples pulsos, las duraciones del pulso láser de los pulsos producidos en un intervalo T_{min} (Tabla B.7) deberán ser sumado y el valor del tiempo resultante sustituirse por t en $5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$
- (4) Cuando $1400 \leq \lambda < 10\text{s}$ el diámetro de apertura es 1mm para $t \leq 0,3$ y $1,5 \cdot t^{0,75}$ para $0,3 < t < 10$. Cuando $10 \leq \lambda < 10\text{s}$ el diámetro de apertura es 11mm.

Expresiones y factores de corrección

Los valores de exposición a las radiaciones ópticas que son pertinentes desde un punto de vista biofísico pueden determinarse mediante las fórmulas recogidas a continuación. Los resultados deben compararse con los correspondientes valores límite establecidos en las Tablas B.1, B.2 y B.3 A una determinada fuente de radiación óptica láser pueden corresponder varios valores de exposición con sus correspondientes límites de exposición. Para el cálculo de los coeficientes de las expresiones de las Tablas B.1, B.2 y B.3 deben consultarse las Tablas B.4, B.5, B.6 y B.7 (Parámetros utilizados por la ICNIRP).

Tabla B.3 Valores límite de exposición de la piel al láser

Longitud de onda λ (nm) (1)		Apertura	VALOR Límite					Efecto
			Duración					
			$<10^{-9}$	10^{-9} - 10^{-7}	10^{-7} - 10^{-3}	10^{-3} - 10^1	10^1 - 10^3	
UV (A,B,C)	180-400	3,5 mm	$E=3 \cdot 10^{10}$ (W/m ²)	Mismos valores que los límites de exposición para los ojos (tabla B.1 y B.2)				Eritema
Visible e IRA	400-700		$E=2 \cdot 10^{11}$ (W/m ²)	$H=200 \cdot C_A$ (J/m ²)	$H=1,1 \cdot 10^{-4} \cdot C_A \cdot t^{0,25}$ (J/m ²)	$E=2 \cdot 10^3 \cdot C_A$ (W/m ²)	Lesiones térmicas	
	700-1400		$E=2 \cdot 10^{11} \cdot C_A$ (W/m ²)					
IRB e IRC	1400-1500		$E=1 \cdot 10^{12}$ (W/m ²)	Mismos valores que los límites de exposición para los ojos (tabla B.1 y B.2)				Lesiones térmicas
	1500-1800	$E=1 \cdot 10^{13}$ (W/m ²)						
	1800-2600	$E=1 \cdot 10^{12}$ (W/m ²)						
	2600-10 ⁶	$E=1 \cdot 10^{11}$ (W/m ²)						

(1) Si aparecen dos límites para la longitud de onda del láser, se aplicará el más restrictivo.

Donde:

$$E = \frac{dP}{dA} \text{ [W m}^{-2}\text{]}$$

dP: Potencia, expresada en vatios (W) dA: Área o superficie, expresada en metros (m) E(t), E : Irradiancia o densidad de potencia espectral, la potencia radiante que incide, por unidad de área, sobre una superficie, expresada en vatios por metro cuadrado (W· m-2). Los valores E(t) y E pueden proceder de mediciones o pueden ser facilitados el fabricante.

$$H = \int_0^t E(t) \cdot dt \text{ [J m}^{-2}\text{]}$$

H: Exposición radiante, la integral con respecto al tiempo de la irradiancia, expresada en julios por metro cuadrado ($J \cdot m^{-2}$) t: Duración de la exposición, expresada en segundos (s). λ : Longitud de onda, expresada en nanómetros (nm)

Tabla B.4 Determinación del cálculo del C_A , C_B , C_C y T_1

Factor	Longitud de onda λ (nm)	Valor
C_A	$\lambda < 700$	$C_A = 1,0$
	700 --- 1050	$C_A = 10^{0,002 \cdot (\lambda - 700)}$
	1050 --- 1400	$C_A = 5,0$
C_B	400 --- 450	$C_B = 1,0$
	450 --- 700	$C_B = 10^{0,02 \cdot (\lambda - 450)}$
C_C	700 --- 1150	$C_C = 1,0$
	1150 --- 1200	$C_C = 10^{0,018 \cdot (\lambda - 1150)}$
	1200 --- 1400	$C_C = 8,0$
T_1	$\lambda < 450$	$T_1 = 10$ (s)
	450 --- 500	$T_1 = 10 \cdot 10^{0,02 \cdot (\lambda - 450)}$ (s)
	$\lambda > 500$	$T_1 = 100$ (s)

Tabla B.5 Determinación del cálculo del C_E

Factor	Intervalo de α (mrad) $\alpha_{\min} = 1,5$ mrad (efectos térmicos)	Valor
C_E	$\alpha < \alpha_{\min}$	$C_E = 1,0$
	$\alpha_{\min} < \alpha < 100$	$C_E = \alpha / \alpha_{\min}$
	$\alpha > 100$	$C_E = \alpha^2 / (\alpha_{\min} \cdot \alpha_{\max})$ con $\alpha_{\max} = 100$ mrad
T_2	$\alpha < 1,5$	$T_2 = 10$ (s)
	$1,5 < \alpha < 100$	$T_2 = 10 \cdot 10^{(\alpha - 1,5) / 98,5}$ (s)
	$\alpha > 100$	$T_2 = 100$ (s)

Tabla B.6 Determinación del cálculo del γ

Factor	Intervalo de t_{expo} (s)	Valor
γ	$t \leq 100$	$\gamma = 11$ (mrad)
	$100 < t < 10^4$	$\gamma = 1,1 \cdot t^{0,5}$ (mrad)
	$t > 10^4$	$\gamma = 110$ (mrad)

Tabla. B.7 Factores para exposiciones reiteradas

Factor	Intervalo de t_{expo} (s)	Valor
T_{min}	$315 < \lambda \leq 400$	$T_{\text{min}} = 1 \cdot 10^{-9}$ (s)
	$400 < \lambda \leq 1050$	$T_{\text{min}} = 18 \cdot 10^{-6}$ (s)
	$1050 < \lambda \leq 1400$	$T_{\text{min}} = 50 \cdot 10^{-6}$ (s)
	$1400 < \lambda \leq 1500$	$T_{\text{min}} = 1 \cdot 10^{-3}$ (s)
	$1500 < \lambda \leq 1800$	$T_{\text{min}} = 10$ (s)
	$1800 < \lambda \leq 2600$	$T_{\text{min}} = 1 \cdot 10^{-3}$ (s)
	$2600 < \lambda \leq 10^6$	$T_{\text{min}} = 1 \cdot 10^{-7}$ (s)

Nota: Cada una de las tres reglas siguientes debería aplicarse a todas las exposiciones reiteradas que se produzcan por una utilización repetitiva de sistemas de láser de pulsos o de barrido:

- 1) La exposición a cualquier pulso único de un tren de pulsos no deberá superar el valor límite de exposición para un pulso único de esa duración;
- 2) La exposición a cualquier grupo de pulsos (o subgrupo de pulsos de un tren) durante un tiempo t no deberá superar el valor límite de exposición para el tiempo t ;
- 3) La exposición de cualquier pulso único dentro de un grupo de pulsos no deberá superar el valor límite de exposición para un pulso único multiplicado por el factor de corrección térmico acumulativo $C_p = N^{-0,25}$, en el que N representa el número de pulsos.

Esta regla sólo se aplica a los límites de exposición con objeto de evitar las lesiones térmicas, cuando todos los pulsos producidos en menos de T_{min} se consideran como un pulso único.

Anexo 2. Metodología para uso del software SolTrace.

ANEXO II. METODOLOGÍA PARA USO DE SOFTWARE TRAZO DE RAYOS.

El software “SolTrace” es una herramienta de software desarrollada en el National Renewable Energy Laboratory (NREL) que es útil para modelar el flujo de radiación solar concentrada en el sistema.

Este software permite modelar la concentración de energía solar de sistemas y analizar su rendimiento óptico. Aunque el ideal es utilizarlo para aplicaciones de energía solar, también se puede utilizar para modelar y caracterizar los sistemas generales de óptica. La creación surgió de una necesidad de sistemas de energía solar más complejos, que no pueden ser modelados con herramientas ya existentes.

El software “SolTrace” puede modelar concentradores cilindro-parabólicos, así como platos, torres u otras geometrías (torre central, hornos solares, etc.) Además, se puede modelar un cierto número de etapas y las cuales contienen número de elementos diferentes. También cuenta con una extensa variedad de formas disponibles y contornos. El software muestra rápidamente y guarda los datos como gráficos de dispersión, los mapas de flujo y gráficos de rendimiento (NREL, 2011).

METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA UTILIZACIÓN DEL SOFTWARE

Para la simulación de cada uno de los helióstatos se sigue el mismo método descrito a continuación:

Una de las características de este software es que tiene distintas fases que deben de ser definir en secuencia y en la figura 1, se muestra la pantalla impresa en la que el software tiene inicio, en esta etapa se ve a la izquierda un círculo rojo que despliega cada una de las etapas que integraran el análisis, como primer paso en el inicio se definen las coordenadas y algunos parámetros.

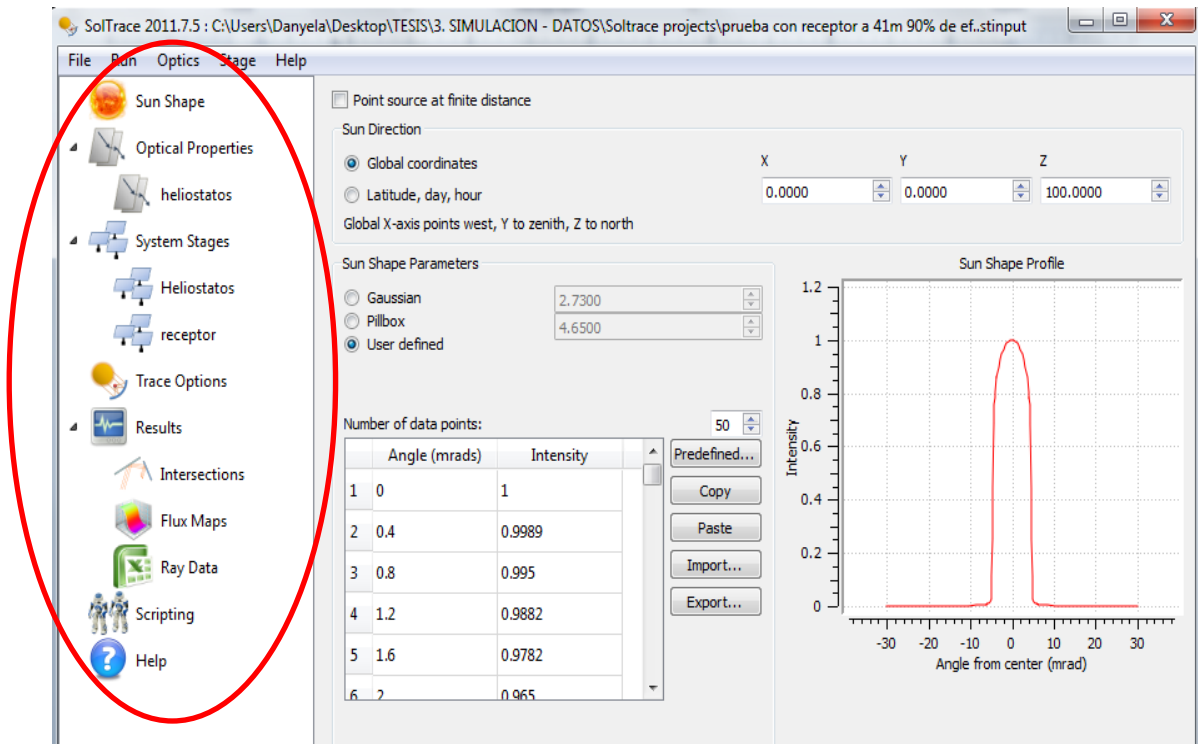


Figura 1. Software SolTrace.

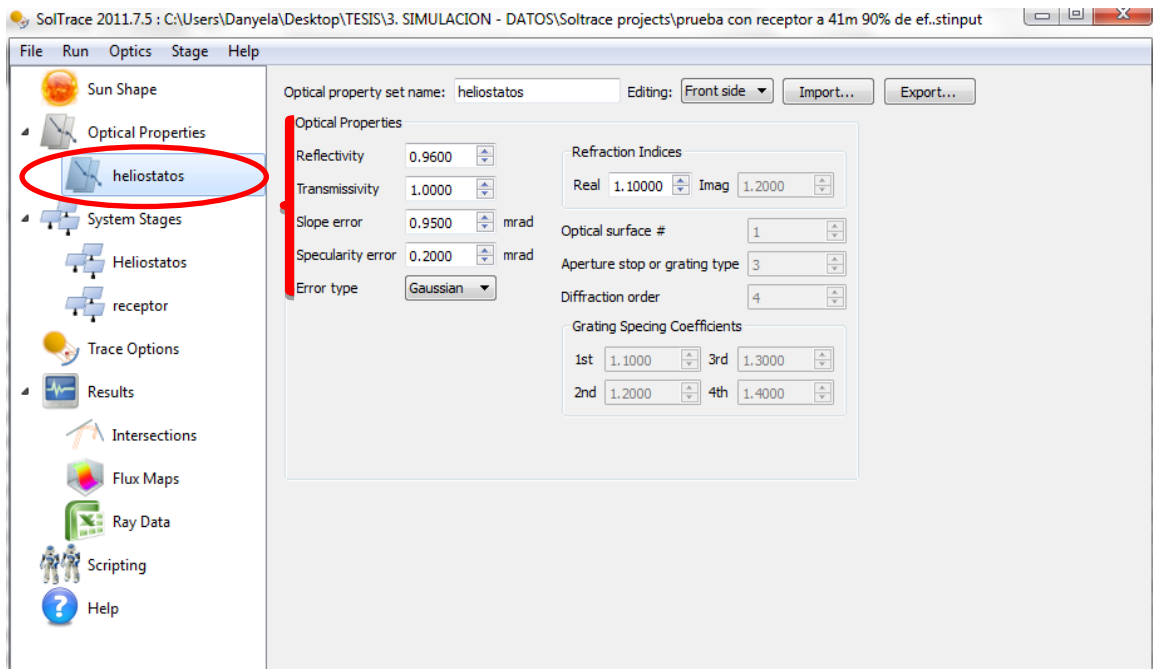


Figura 2. Software SolTrace- optical properties

En la Figura 2 se definen las “optical properties”. Cada grupo de propiedades ópticas contiene un conjunto de parámetros diferentes para la parte delantera y trasera de la superficie, desde las opciones de selección, en el marco de edición. Es decir que se debe de definir la parte delantera y trasera de las superficies de los elementos por el vector del eje z, así como también es importante definir los valores de transmisividad, reflectividad y los errores.

En la siguiente fase “system stages” (Figura 3), se procederá a describir 2 etapas, las cuales son:

Etapa 1 (helióstatos) que consta de los helióstatos con superficie plana y la Etapa 2 (Target) el cual es un escenario virtual que consiste simplemente en un objetivo plano donde se observara la distribución del flujo resultante generada en el foco del concentrador principal. Los rayos de luz se remontan desde el sol a la Etapa 1 (helióstatos) y luego a la Etapa 2 (Target). El procedimiento de cálculo secuencial dentro SolTrace no permitirá que un rayo que sale de una etapa vuelva a entrar en ese escenario. Los rayos siguen siendo emitidos en un solo escenario hasta que sean absorbidos o no se produce más intersecciones, es por eso que el usuario debe diseñar el sistema óptico de reconocimiento de este proceso en forma secuencial.

Antes de proceder a los detalles de la definición de cada elemento, las coordenadas de los elementos (espejos que conforman al concentrador) se describen como se muestra en la Figura 3.

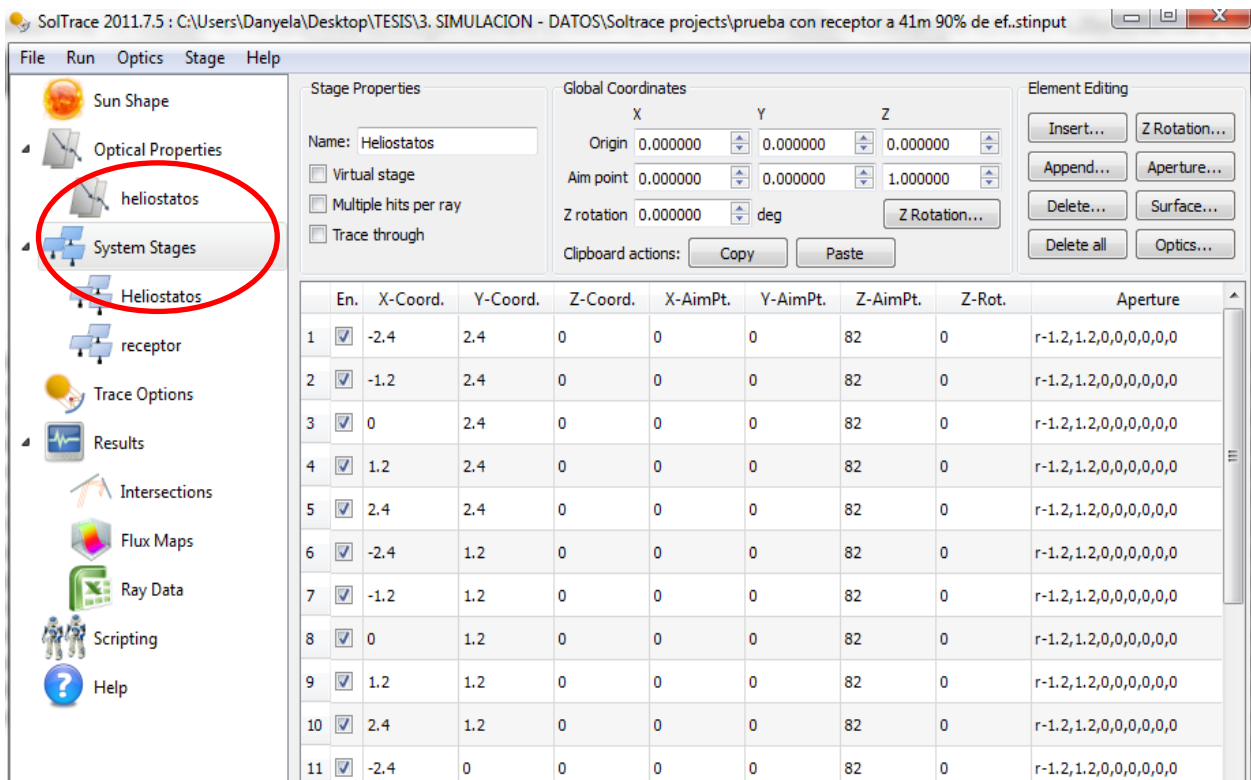


Figura 3. Software SolTrace- System stages.

Para definir la etapa1, primero en “Element editig” se edita “Aperture”, definiendo una superficie rectangular representando cada espejo que conforma al, con medidas 1.20 m por 1.20m cabe destacar que estas medidas dependen de las características de los elementos (espejos) que conforman a cada helióstato (ver figura 4). Mientras que el elemento “surface” se edita como flat, indicando que la superficie de cada espejo, que conforma a un helióstato, es plana (ver figura 5).

Por último se definen la ubicación de cada faceta en el plano en las X-coord., Y-coord., y Z- aimpoint. Este último se define como el doble de la distancia, que existe entre el helióstato y el receptor, del helióstato que se esté simulando.

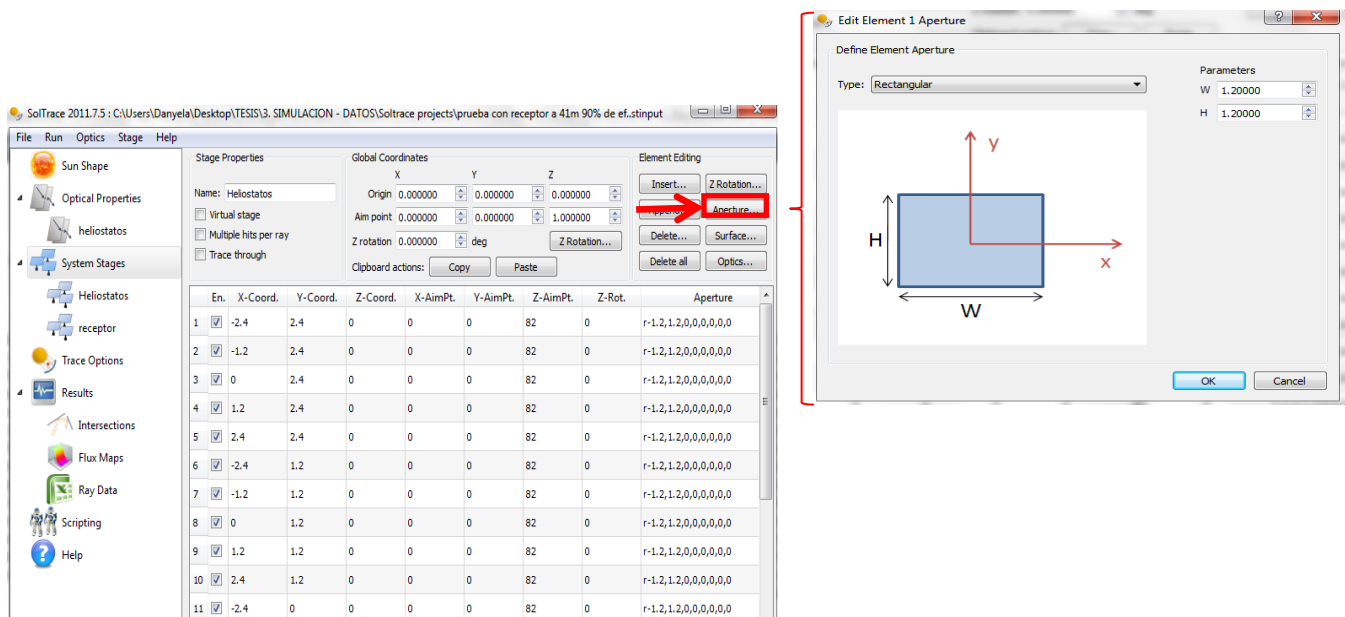


Figura 4. Aperture.

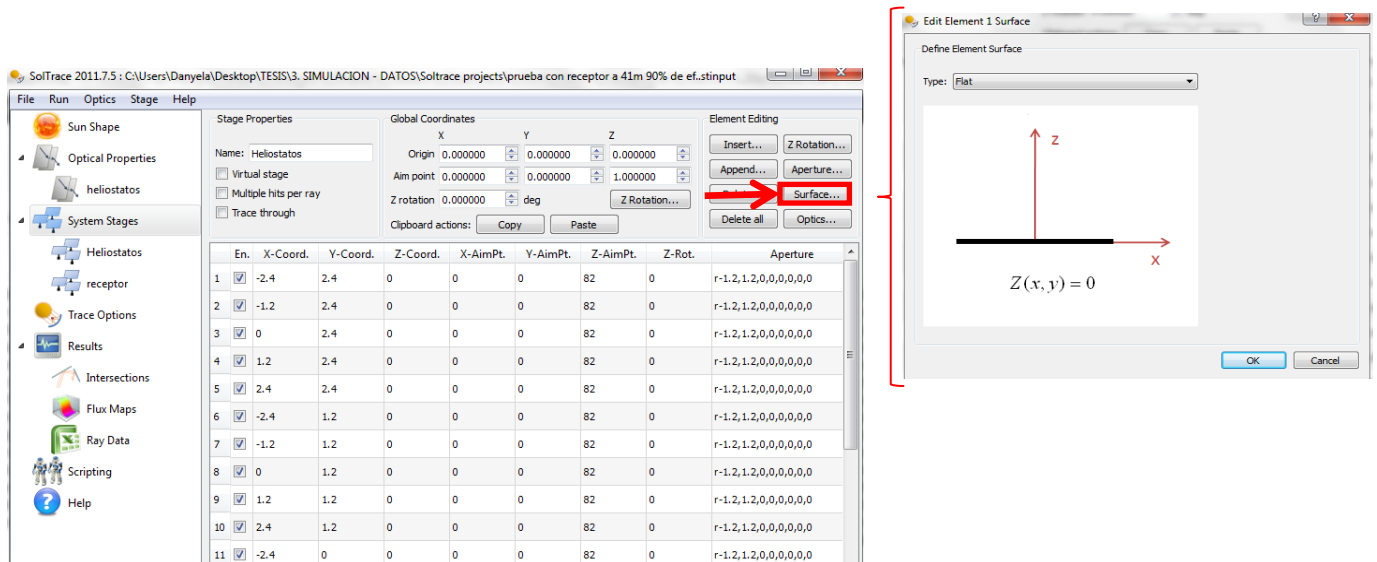


Figura 5. Surface.

Para definir la etapa 2, primero se define el tamaño del receptor en “Aperture” (modificándolo directamente de la tabla de contenidos), muchas veces este varía dependiendo de la distancia, a más corta sea la distancia, el receptor tendrá que ser mas grande, con el objetivo de que todos los rayos trazados terminen dentro del

receptor. La distancia del receptor se definirá en el origen Z, donde se podrá evaluar a diferentes distancias, el más cercano y el más lejano (ver figura 6).

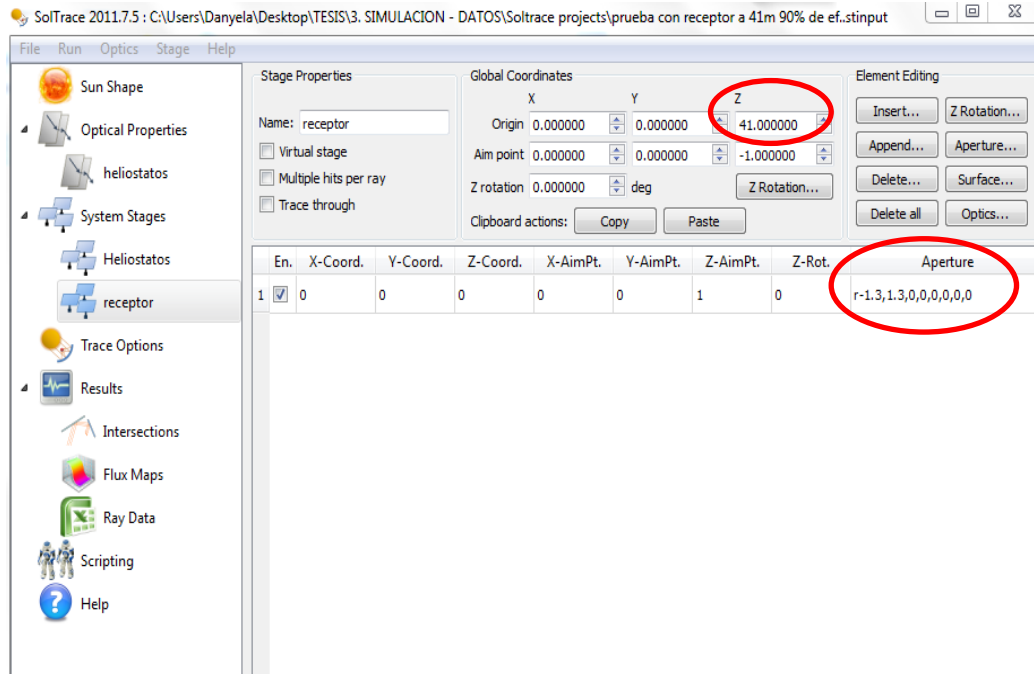


Figura 6. Stage properties- Receptor.

Una vez que estas etapas han sido concluidas, procedemos a la simulación de trazo de rayos y en la opción de “Trace options – parameters” donde se define el numero de rayos deseados para el trazo, se aumentara su terminación en 2 ceros, para que la simulación sea confiable y después se inicia la simulación en “start new trace” (ver figura 7).

Una vez que se ha llevado a cabo el trazo de los rayos, en la etapa de “intersections” se seleccionaran todos los elementos (elements) y todos los estados (stages), para obtener la información completa y la grafica de trazo de rayos (Figura 8).

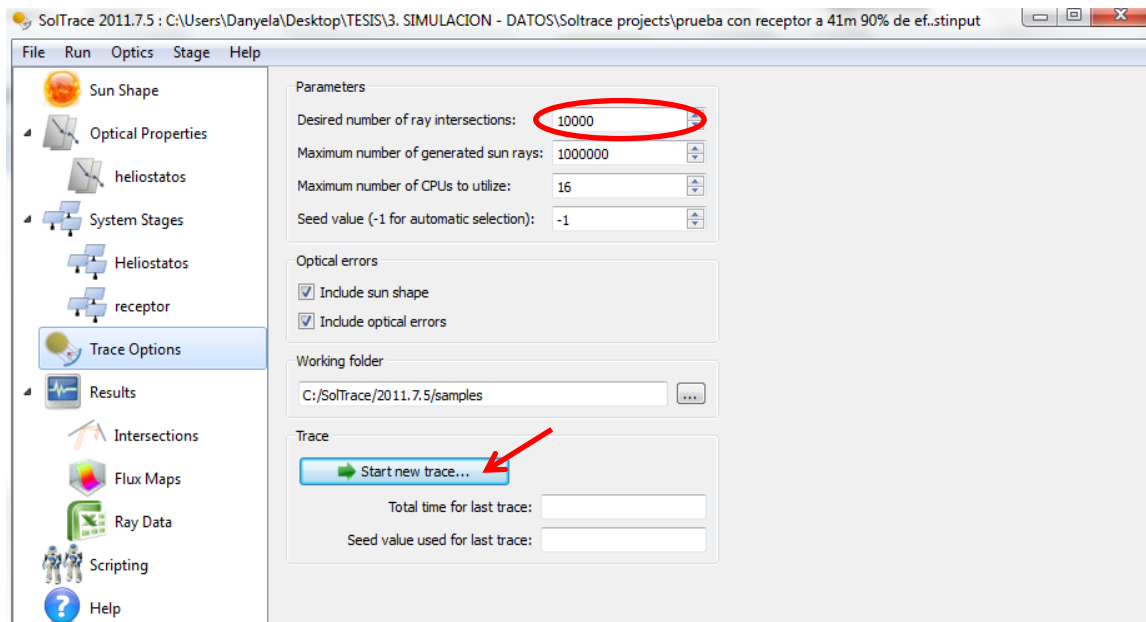


Figura 7. Trazo de rayos.

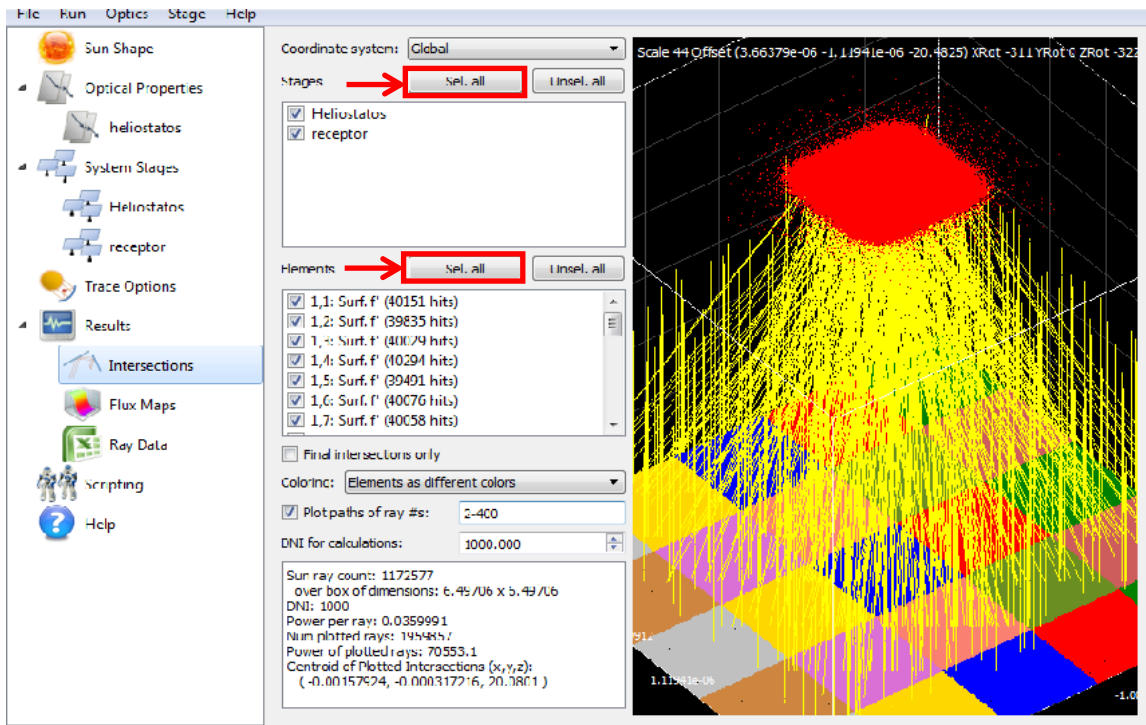


Figura 8. Intersecciones.

Por último en la etapa de mapas de flujo (Figura 9), “flux maps”, se selecciona la la superficie del receptor , con el objetivo de conocer la distribución de la intensidad del flujo en la superficie de nuestro receptor. Al final de esta pantalla aparecera un resumen con informacion importante para el analisis, como: El flujo pico o flujo maximo, el flujo promedio y el potencial de rayos trazados, entre otra informacion.

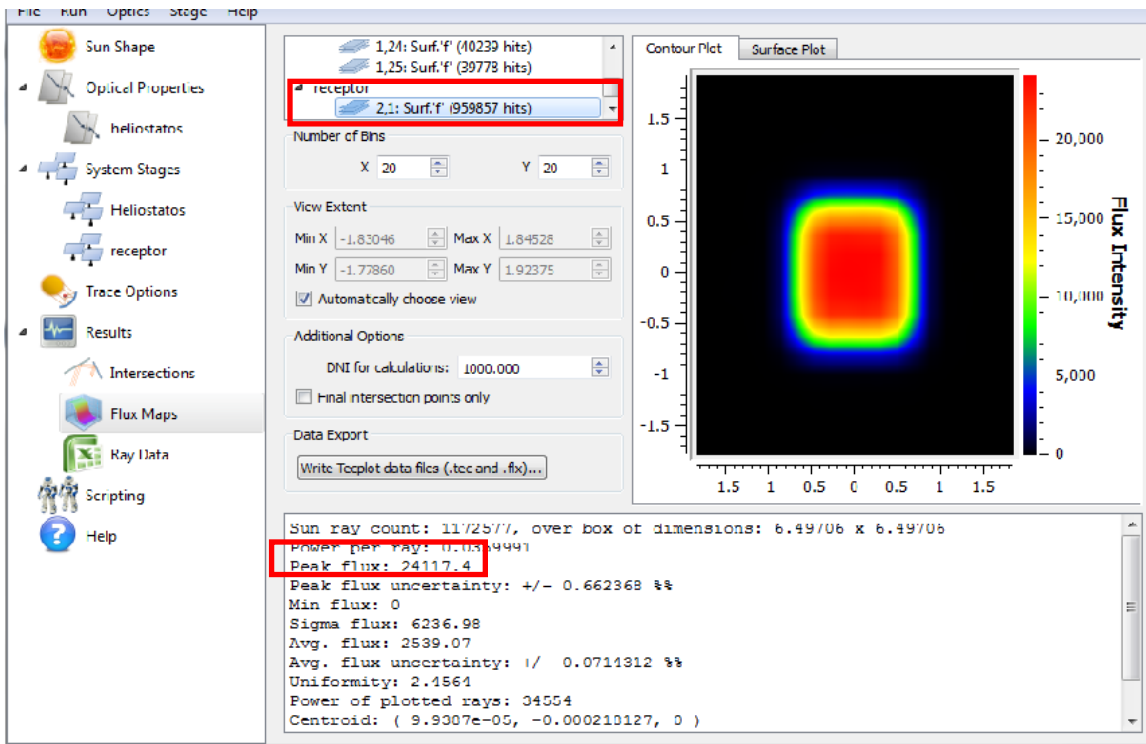


Figura 9. Mapas de flujo.

Una vez que se simulan corridas de cada heliostato con distancias representativas del receptor en cada una de las situaciones, se elabora una tabla de contenidos con los diferentes flujos pico de cada simulación o de otra información relevante para el analista.