



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Sistema óptico portable de proyección de información
en tiempo real para entrenamiento deportivo.

Autor

Luis Soguero Pinilla

Director/es

Rafael Alonso Esteban

y

Enrique Carretero Chamarro

Año / 2016

Escuela / Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Unizar

Sistema óptico portable de proyección de información en tiempo real para entrenamiento deportivo

Resumen

El objetivo del presente trabajo fin de grado es analizar la viabilidad de un sistema de emisión lumínica. A través de una óptica determinada, se pretende conseguir una clara proyección de indicaciones visuales a los corredores que lleven puesto tal sistema en el torso (bien sea a la altura de la cintura o del pecho) a cualquier hora del día.

Para ello, ha sido necesario realizar una serie de estudios analíticos y experimentales, a partir de los cuales se ha podido realizar una primera aproximación teórica de la potencia necesaria para dicho sistema de emisión lumínica.

Finalmente, tras el diseño computacional y de laboratorio de la óptica, se ha seleccionado el mejor sistema emisor disponible en el mercado desde un punto de vista técnico y económico. Con este sistema óptico, se ha realizado un prototipo de fuente que se propone como propuesta final.

No se debe olvidar que esta óptica será añadida al producto desarrollado por una empresa incubada en la Agencia Espacial Europea, estando por tanto destinado al uso cotidiano de deportistas. Por este motivo, pese a no estar en los alcances de este trabajo fin de grado, se ha creído oportuno añadir en anexos una breve explicación para la empresa sobre las medidas de protección que se deberán colocar en función de los parámetros del sistema final seleccionado (potencia, longitud de onda, distancia focal...) según regula la norma UNE EN 60825-1/A2-2002.



(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. Luis Soguero Pinilla, con nº de DNI 77131824-J en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza, declara que el presente Trabajo de Fin de Grado de título "*Sistema óptico portable de proyección de información en tiempo real para entrenamiento deportivo*", que tiene como objetivo el desarrollo de un sistema de emisión lumínica para empresa incubada en la Agencia Espacial Europea que a través de una óptica determinada se consiga una clara proyección de indicaciones visuales a corredores que lleven puesto tal sistema a la altura de la cintura, es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, a 25 de Noviembre de 2016.

Fdo: Luis Soguero Pinilla

TABLA DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN.....	3
2.	ESTUDIO DE MERCADO SIMPLIFICADO.....	5
2.1.	Productos similares o sustitutivos.....	5
2.1.1.	Patentes.....	5
2.1.2.	Productos comercializados similares.....	6
2.2	Análisis de diferentes parámetros del entreno de los runners.....	7
2.2.1	Análisis a nivel internacional.....	7
2.2.2	Análisis a nivel nacional.....	8
3.	ESTUDIOS DE MODELADO.....	10
3.1.	Estudios previos.....	10
3.1.1.	Conceptos básicos y unidades elementales sobre la luz.....	10
3.1.2.	Introducción de la composición completa de la luz solar.....	12
3.1.3.	La luz visible.....	13
3.1.4.	Comportamiento de las superficies ante la luz solar.....	15
3.1.5.	Conclusiones iniciales.....	16
3.2.	Estudio experimental de la reflexión de las superficies.....	17
3.2.1.	Elementos que componen la situación.....	17
3.2.2.	Diseño de la herramienta.....	17
3.2.3.	Obtención de datos experimentales y diagramas polares.....	19
3.2.4.	Conclusiones experimentales.....	22
3.3.	Simulación en software informático.....	23
3.3.1.	OpticStudio2015.....	23
3.3.2.	Procedimiento de la simulación.....	23
3.4.	Estudio experimental de visibilidad mínima.....	25
4.	DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA LUMÍNICO.....	26
4.1.	Ángulos de enfoque.....	26
4.2.	Ángulos de salida.....	27
4.2.1.	Ángulo de salida eje Y (Plano XZ).....	27
4.2.2.	Ángulo de salida eje X (Plano YZ).....	27
4.3.	Dimensiones de las señales visuales.....	28
5.	SELECCIÓN DEL TIPO DE SISTEMA DE ILUMINACIÓN.....	29
6.	PROPUESTA DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN.....	30
6.1.	Selección del color de la fuente.....	30

6.2.	Propuesta del módulo láser.	30
6.3.	Dimensionamiento de la capacidad de la batería.	31
6.4.	Propuesta del prototipo final.	32
7.	CONCLUSIONES.	33
8.	NUEVAS VÍAS DE INVESTIGACIÓN.	35
9.	REFERENCIAS.	36
	ANEXO 1. Patentes similares adicionales.	37
	ANEXO 2. Productos comercializados similares adicionales.	39
	ANEXO 3. Factores que afectan a la cantidad de radiación/luz solar que llega a la superficie terrestre.	40
	42
	ANEXO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL COMPORTAMIENTO DE SUPERFICIES.	43
	ANEXO 4a. Resultados de las mediciones de la luz solar en diferentes superficies y a diferentes ángulos.	43
	ANEXO 4b. Diagramas polares de las diferentes superficies de estudio para cada franja horaria.	45
	ANEXO 5. Resultados finales obtenidos en OpticalStudio.	47
	ANEXO 6. Fundamentos básicos del láser.	48
	ANEXO 6a. Principios de funcionamiento básico y componentes del láser.	48
	ANEXO 6b. Cualidades de la luz láser.	49
	ANEXO 7. Temperaturas medias mensuales en las capitales de provincia de Aragón, La Rioja y Navarra.	50
	ANEXO 8. Verificación del cumplimiento de la normativa. Clasificación de láseres pulsados y requisitos de fabricación necesarios según norma: UNE EN 60825-1/A2-2002.	51

1. INTRODUCCIÓN.

El alcance del trabajo fin de grado es seleccionar un sistema de emisión lumínica viable que permita realizar una clara proyección de indicaciones visuales sobre superficies típicas de entrenamiento de los deportistas a cualquier hora del día.

Todos los estudios, tanto analíticos como experimentales, realizados en el Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Zaragoza, han girado en torno a la consecución de superar este objetivo fijado inicialmente por Aureel, empresa incubada en la Agencia Espacial Europea.

En el estudio realizado para dar solución al problema que compete a este proyecto se distinguen cuatro etapas principales, las cuales se detallarán más profundamente a lo largo de esta introducción.

1. Estudio de mercado simplificado.
2. Estudios de modelado del sistema.
3. Selección del sistema de iluminación.
4. Propuesta final del sistema lumínico.

Inicialmente, se ha realizado un estudio de mercado simplificado, en el que se analizan las amenazas y productos similares que podrían competir o incluso llegar a sustituir a este producto. Además, mediante distintas fuentes informativas a nivel internacional y encuestas propias realizadas a diferentes deportistas a nivel nacional, se ha recabado información sobre sus hábitos y preferencias de entrenamiento. El objeto de estas, ha sido aportar información para lograr el diseño de un sistema a su medida que sea factible para el mayor número de usuarios pudiendo así incrementar el canal de ventas del producto.

Aunque era conocida de antemano la enorme dificultad de prototipar una fuente que fuera visible a cualquier hora del día (ya que esta debería tener una potencia muy elevada) se observó, gracias a las encuestas realizadas a diferentes runners, que gran parte de las carreras a nivel nacional e internacional se hacen fuera del horario de iluminancia máxima. Este hecho ha permitido que los niveles de densidad de potencia necesarios para conseguir que la fuente fuera visible, se puedan reducir notablemente. Gracias a este motivo, se ha podido seguir adelante con el proyecto de investigación.

De este modo, se han realizado los estudios de modelado con los que se pretende realizar un estudio exhaustivo de todos los parámetros que afectan al proyecto. Para comenzar, se tuvieron que realizar unos estudios previos sobre conceptos básicos de iluminación y radiación solar necesarios para poder comprender los estudios que se realizaron a posteriori de manera exitosa.

A través de una herramienta fabricada en la Universidad de Zaragoza específicamente para este caso, se han llevado a cabo unas medidas experimentales de la luz solar visible. Se midió

tanto la luz que llega directa del sol como la reflejada por las superficies sobre las que los corredores realizan la actividad deportiva habitualmente, variando el ángulo del receptor. Con dichas mediciones, se realizaron los diagramas polares, adjuntados en la *Anexo 4b* de la memoria, que permiten observar cómo las superficies reflejan la luz.

Conociendo los rangos de iluminancia que el sol proporciona al ojo humano, se ha podido llevar a cabo una simulación real en el software OpticStudio2015 para realizar la estimación de la potencia teórica necesaria que el sistema de emisión lumínica debe tener para que sea visible. Los resultados de esta simulación se adjuntan en el *Anexo 5*.

Hay que tener en cuenta que los valores de radiación solar introducidos al programa son los máximos, de manera que el resultado obtenido se considera un valor teórico. En la práctica muy pocos son los deportistas que salen a correr cuando los valores de luz solar se encuentran a su máximo nivel.

Para poder seleccionar el tipo de iluminación más apropiado para el proyecto, se han tenido que establecer todos los parámetros geométricos que afectaban al problema como el ángulo de salida, el ángulo de enfoque y lo más importante, las dimensiones de las superficies proyectadas.

Tras hacer una delicada selección del tipo de tecnología se ha acudido al mercado para ver las diferentes opciones que hay en él. Así pues, el objetivo es proponer un sistema, económicamente viable, que cumpla con los objetivos iniciales que se habían fijado.

Pese a no encontrarse dentro del alcance de este proyecto, se ha verificado el cumplimiento de la normativa reguladora del sistema de iluminación escogido como trabajo adicional. Toda esta información es adjuntada en el *Anexo 8*, donde se informa brevemente a la empresa para la que se realiza dicho proyecto cuál deberá ser el etiquetado y los datos a colocar en el manual de seguridad según la norma UNE EN 60825-1/A2-2002.

Para concluir, con el desarrollo de este proyecto se ha conseguido determinar un sistema de iluminación que permitirá a los deportistas dar un salto de calidad en sus entrenamientos, mejorando así su eficiencia y confort.

Además, se inicia con este trabajo una nueva vía de investigación en la que este mismo sistema se puede adaptar para mejorar e innovar en otro tipo de aplicaciones y campos de la ingeniería.

2. ESTUDIO DE MERCADO SIMPLIFICADO.

El objetivo de este estudio de mercado básico consiste en conocer cuál es el alcance que el producto podría tener en el mercado, así como los hábitos de entrenamiento de los clientes y los productos que tiene actualmente la competencia en el mercado. Esta información permitirá desarrollar un producto acorde a las necesidades del cliente, que potencie y mejore las prestaciones de los productos de la competencia.

2.1. Productos similares o sustitutivos.

Se ha realizado una intensa búsqueda de sistemas similares a través de dos canales de información. El primero de ellos ha sido de las patentes similares a nivel internacional que están presentadas, aunque ese prototipo nunca se llegue a realizar. El segundo y último, los productos que ya han sido lanzados al mercado y que actualmente cualquier deportista puede adquirir.

2.1.1. Patentes.

- **Sistema para evaluar las prestaciones de un jugador de golf. (1)**

FUNCIÓN.

El sistema trata de evaluar, de una manera óptima, las prestaciones técnicas de un jugador de golf. Se pueden recopilar datos de todos los parámetros de interés para estudiar con eficacia las prestaciones del golfista. Además, es directamente utilizable por un usuario concreto sin necesidad de calibraciones ni de la intervención de personal especializado, y dado que los datos se tratan remotamente y que se puede disponer el seguidor activo en el interior del palo, es posible su utilización en campeonatos oficiales de golf.

DIFERENCIAS CON ESTE PROYECTO.

Sistema únicamente aplicable al golf, que no contiene ningún tipo de iluminación. Simplemente consta en captar datos con un sensor colocado en el palo y almacenarlos.

- Otro sistema muy similar al descrito anteriormente, pero con más aplicaciones es el que se encuentra en (2).

- **Método de preparación para atletas. (3)**

FUNCIÓN.

El sistema, colocado en la cabeza, define zonas prohibidas y permitidas a través de un sistema de iluminación dinámica durante el entrenamiento del deportista. Estas zonas, se mantienen fijas ante la traslación y rotación del usuario.

DIFERENCIAS CON ESTE PROYECTO.

Es un sistema muy parecido al que se está desarrollando. Es aplicable a todo tipo de deporte y la iluminación se proyecta en el terreno en cualquier momento del día, pero tiene varias diferencias: se coloca en la cabeza del deportista y no informa del ritmo de carrera que un corredor debe llevar.

En el *Anexo 1* se adjuntan más patentes interesantes que se deben conocer.

2.1.2. Productos comercializados similares.

- **Lentes de 4iiii.** (4)

FUNCIÓN.

La empresa 4iiii, ha desarrollado unas lentes llamadas Sportiiiis con tecnología ANT+ capaces de dar a conocer al atleta información básica, al mismo tiempo que el usuario hace ejercicio. Las *Sportiiiis* están constituidas por lentes sobre las que se proyecta información visual a través de su sistema de iluminación led en el área periférica de la visión (muestra una señal a través de una luz de un LED que puede ser verde, amarilla o roja, moviéndose conforme te vayas acercando a tu objetivo o límite de latidos por minuto). También cuenta con un sistema de audio que informa sobre los objetivos de rendimiento. Con este sistema no es necesario que el corredor quite la vista de la trayectoria.

DIFERENCIAS CON EL PROYECTO.

El fundamento básico de la mecánica del sistema son las pulsaciones del usuario. El objetivo del producto es mantener un ritmo cardiaco constante durante todo el entrenamiento. Además contiene dos maneras diferentes para informar al deportista por proyección y por audio. Por último, el producto son unas gafas, no una banda deportiva que se coloca en tórax como en el caso del presente proyecto.



Figura 2.1. Usuaria entrenando con lentes 4iiii. (8)

- **Gafas Solos.** (5)

FUNCIÓN.

Su aparición ha sido ligada al ciclismo profesional. Su objetivo es informar de la velocidad a la que corren sin mirar a otro lado ni perder de vista la pista gracias a una serie de sensores colocados en la bicicleta. Se comunican de manera inalámbrica con los sensores y almacena los datos en el servicio de la nube que IBM tiene para esta tecnología. Según recogió BBC, los componentes del equipo estadounidense ya han estado entrenando con gafas prototipo de realidad aumentada para los Juegos Olímpicos de Tokio en 2020.

DIFERENCIAS CON EL PROYECTO.

Su canal de información es la proyección en una lente, no se contempla una proyección en el terreno. Además, ha nacido para ser un complemento del ciclismo.



Figura 2.2. Prototipo Gafas Solos. (9)

En el *Anexo 2* se adjuntan más productos comercializados interesantes que se deben conocer.

2.2 Análisis de diferentes parámetros del entreno de los runners.

Para poder cuantificar y dimensionar el sistema de iluminación (potencia de la fuente, capacidad de la batería, refrigeración del mismo...) se debe conocer en qué condiciones va a ser utilizado. Por este motivo, se ha considerado esencial conocer tanto a nivel internacional como nacional las siguientes cuestiones.

1. Franja horaria habitual de entreno para corredores en días laborales.
2. Franja horaria habitual de entreno para corredores en días festivos.
3. Duración media de los entrenamientos.

2.2.1 Análisis a nivel internacional.

Runner's world con la colaboración de RunKeeper, según ha publicado en (6) ha estudiado 177 millones de carreras registradas por los usuarios de la famosa app en 30 países. Para el proyecto se ha simplificado cogiendo solo 6 países (4 europeos, China y USA). En la *Figura 2.3* cada línea representa el porcentaje de carreras que la gente de ese país realiza cualquier día de entresemana en un rango horario determinado.

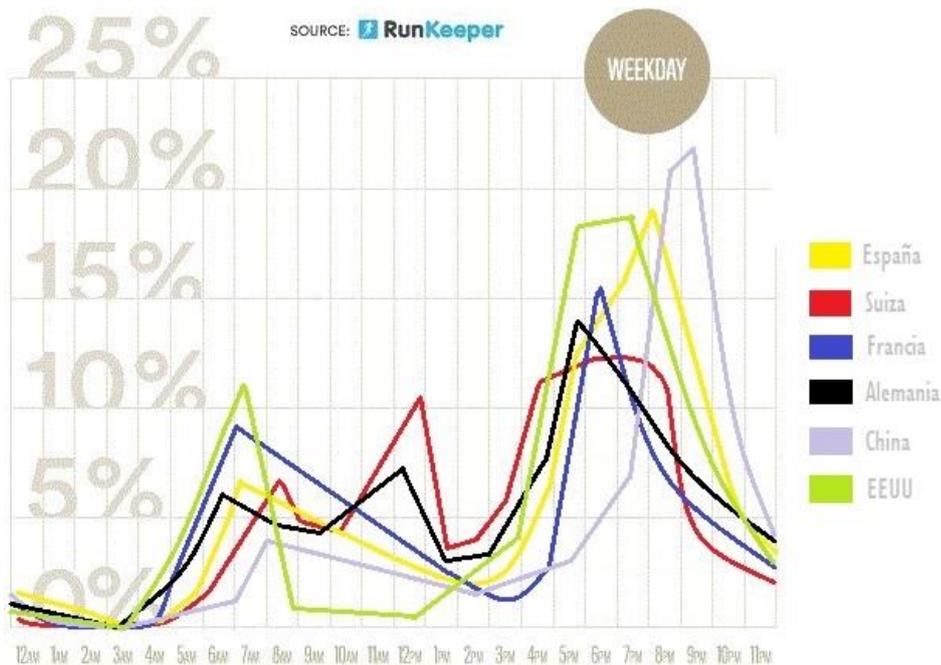


Figura 2.3. Estudio del rango horario de entrenamiento. (13)

No obstante hay ciertos países que se salen de la regla habitual por diferentes causas (geográficas, culturales, climatológicas...)

- Países del norte de Europa como Suiza, el 10% de las salidas a correr se llevan a cabo entre las 12:00 y las 13:00 (horario inviable para un corredor español que trabaje). Esto se debe a la oscuridad de los inviernos por la mañana y por la tarde. Pues los corredores suizos prefieren correr con luz natural.
- En países orientales como China el 22% de las carreras tienen lugar entre las 21:00 y las 22:00. El motivo es que la estresante y ocupada vida en la ciudad no les permite escoger otro horario para hacer su deporte preferido, running.

También se pueden comparar estos resultados (de lunes a viernes) con los obtenidos los fines de semana (sábado y domingo). En este caso, los fines de semana se demuestra que la gente suele tener una mayor predisposición para levantarse y conseguir lo que no ha conseguido durante el resto de la semana. Cerca del 32% de los corredores salen a correr entre las 8:00 y las 11:00, frente al 12% que lo hace entre las 18:00 y las 20:00.

Tras el estudio realizado a nivel internacional, se concluye que el 18% de las carreras fueron registradas entre las 6:00 y las 9:00, frente al 52% de las sincronizadas entre las 18:00 y las 20:00. *Esto supone que un total del 70% de las carreras se realizan fuera del rango horario con valores máximos radiación solar.*

2.2.2 Análisis a nivel nacional.

Se ha realizado una encuesta a 43 runners en las que se les han planteado diferentes cuestiones sobre sus hábitos de entrenamiento que pueden condicionar notablemente el diseño del producto. Se debe tener en cuenta que las personas encuestadas son personas que no se dedican profesionalmente a este deporte, pero sí que todos son fanáticos de él corriendo con bastante frecuencia carreras de 5 kilómetros o incluso 10 kilómetros. Pues este tipo de cliente es el que le interesa a la empresa incubada en la Agencia Espacial Europea para la que se gestiona este proyecto.

La primera cuestión planteada fue la franja horaria en la que salían más frecuentemente a correr. Los resultados obtenidos se pueden ver en el siguiente ciclograma.

Horario de entreno runners españoles (L a V).

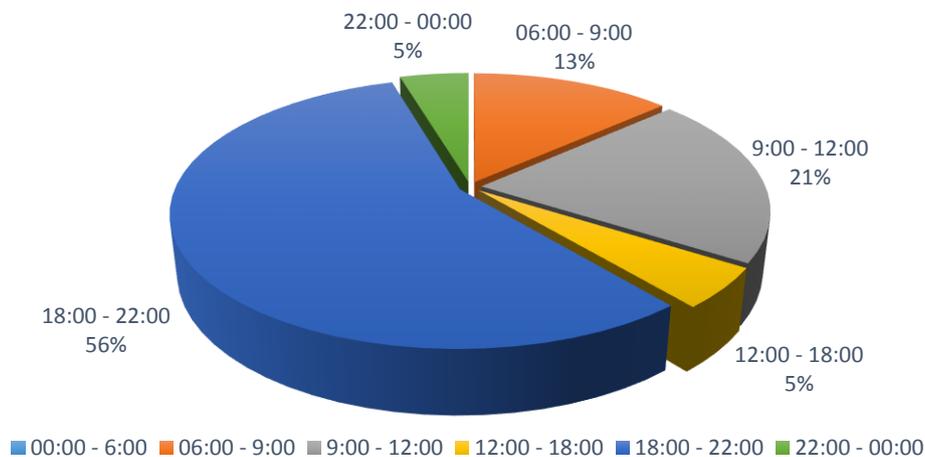


Figura 2.4. Estudio del rango horario de entrenamiento en días laborales.

Llama la atención en la Figura 2.4 que tan solo el 5% de las carreras se hacen en la franja horaria en la que la superficie terrestre recibe los mayores niveles de iluminación (12:00h -18:00h). Esta información tendrá una gran relevancia a lo largo del proyecto (concretamente en la asignación de potencia de nuestra fuente). Además, se observa que sin lugar a duda la favorita para ellos es de las 18:00h a 22:00h. Todos alegaban que esta elección se basaba puramente en motivos laborales, por lo que se decidió preguntarles también en qué franja horaria salían a correr los fines de semana y festivos (que no trabajan) obteniendo el siguiente resultado.

Horario de entreno runners españoles (Festivos)

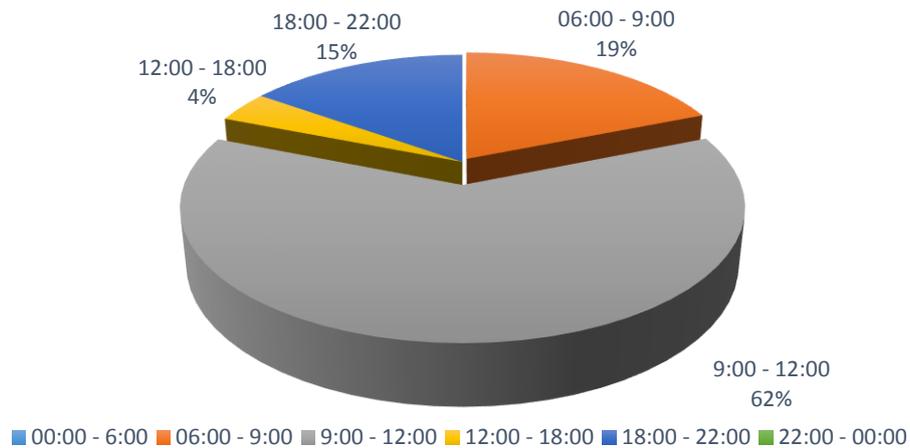


Figura 2.5. Estudio del rango horario de entrenamiento en días festivos.

Como se observa su elección cambió drásticamente y 27 corredores de 43 (el 62%) optan por salir a correr por la mañana temprano. Pese a esta modificación, el porcentaje de carreras que se realizan a la hora de iluminancia crítica cayó hasta el 4% de. Muchos de ellos justificaban su decisión alegando que al entrenar en este horario, podían disfrutar el resto del día de su tiempo libre.

Tras realizar estas encuestas, se puede concluir que el número de corredores que eligieron el tramo horario en el que mayor es la luz solar que llega a la Tierra (12:00h -18:00h) es minoritario. Por lo que no será completamente imprescindible trabajar con los valores máximos de radiación solar medidos con el luxómetro.

También se ha considerado oportuno preguntarles sobre la duración media de sus entrenos, ya que nos servirá de referencia para hacer una estimación de la autonomía del producto de modo que este sea viable.

Duración media de entreno runners españoles

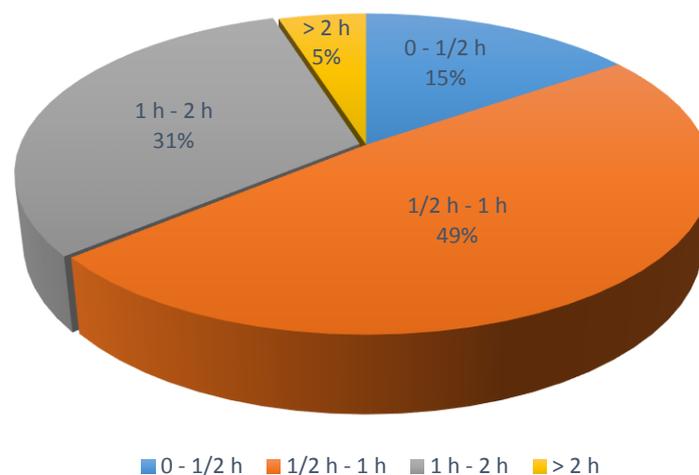


Figura 2.6. Estudio de la duración del entrenamiento.

El 80% de los encuestados realizan entrenamientos de una duración acotada entre 30 minutos y 2 horas. Esto nos permite de manera análoga acotar la capacidad de nuestra batería una vez que se determine la potencia que la fuente de iluminación debe contener.

3. ESTUDIOS DE MODELADO.

3.1. Estudios previos.

A continuación, se expone la teoría básica obtenida en (7) que se ha de conocer para poder comprender de manera exitosa los ensayos experimentales y la simulación que más adelante se explicará muy detalladamente.

3.1.1. Conceptos básicos y unidades elementales sobre la luz.

En la práctica, existen dos tipos de unidades:

1. Unidades radiométricas. Se basan en la potencia física, con todas las longitudes de onda medidas por igual (Ej: W, W/m²).
2. Unidades fotométricas. Se tiene en cuenta el hecho de que el ojo humano es más sensible a unas longitudes de onda que a otras, por lo que cada longitud de onda tiene un peso diferente en su cálculo (Ej: cd, lm o lux).

La Intensidad de la Luz. Energía luminosa emitida desde su fuente en una sola dirección del espacio. Se trata de un único vector (con su correspondiente módulo, dirección y sentido).

- Su unidad en el SI es la candela [cd].

Flujo Luminoso. Energía luminosa emitida desde su fuente en todas las direcciones del espacio. Se trataría de infinitos vectores, en infinitas direcciones pero con igual módulo si provienen de la misma fuente.

- Su unidad en el SI es el lumen [LM].

Los dos términos anteriores los podemos relacionar con el concepto de *ángulo sólido*.

$$\text{Intensidad luminosa [cd]} = \frac{\text{Flujo luminoso [lm]}}{\text{Ángulo sólido [sr]}}$$

El ángulo sólido es el ángulo espacial que abarca un objeto visto desde un punto dado, que se corresponde con la zona del espacio limitada por una superficie cónica. Mide el tamaño aparente de ese objeto.

- Su unidad en el SI es el estereorradián [sr].

Tal y como se representa en la *Figura 3.1*, es el área del casquete esférico, en una esfera de radio unidad, abarcado por un cono cuyo vértice está en el centro de la esfera.

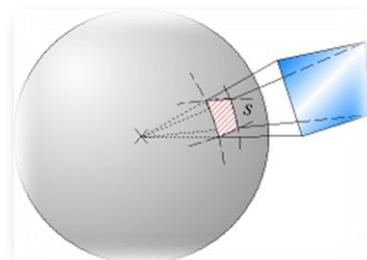


Figura 3.1. Definición gráfica de estereorradián.

Iluminancia o nivel de iluminación. Se define como el cociente entre la intensidad luminosa de una superficie y su área aparente para un observador alejado de ella.

- Su unidad en el SI es el Lux [$Lux \equiv LM/m^2$]

$$\text{Iluminancia [lux]} = \frac{\text{Flujo luminoso [lm]}}{\text{Superficie [m}^2\text{]}}, \text{ siendo } 1 [\text{lux}] \equiv 1 \left[\frac{\text{cd} \cdot \text{sr}}{\text{m}^2} \right]$$

Luminancia. Relación entre la intensidad luminosa y la superficie aparente vista por el ojo en una dirección determinada (Figura 3.2).

- Su unidad es la cd/m^2 [cd/m^2]

$$\text{Luminancia [lux]} = \frac{I [\text{cd}]}{S' [\text{m}^2]} = \frac{I [\text{cd}]}{S \cdot \cos(\alpha) [\text{m}^2]}$$

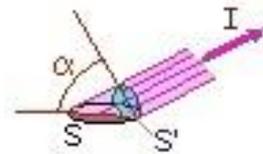


Figura 3.2. Superficie aparente.

Densidad de la luz (o claridad). Es el flujo por superficie y ángulo del espacio. La vista humana percibe diferencias en densidad de luz como diferencias en claridad.

- Su unidad en el SI es [Cd/m^2] $\text{Densidad de luz} = \frac{\text{Intensidad luminosa [cd]}}{\text{Superficie proyectada [m}^2\text{]}}$

Energía lumínica. Fracción de energía percibida transportada por la luz que se puede manifestar sobre la materia de diferentes maneras.

- Su unidad en el SI son lúmenes por segundo [LM/s].

Eficiencia lumínica. Es el cociente entre el flujo luminoso que está emitiendo una luminaria y la energía eléctrica que está consumiendo de la red o de la batería que alimente la luminaria. La eficacia luminosa puede variar dependiendo de la luminaria.

- Su unidad en el SI son lúmenes por vatio [LM/W_e].

Magnitud	Unidad	Observaciones
Intensidad luminosa [I_v]	Candela [cd]	Unidad básica dada por el Sistema Internacional.
Flujo luminoso [F]	Lumen [lm]	Media de la potencia total percibida en todas las direcciones del espacio.
Iluminancia [L_v]	Lux [lux] o [lx]	Informa de la cantidad de luz que incide en una superficie seleccionada en el ensayo.
Iluminancia [L_v]	Candela m^2 [cd/m^2]	Tiene en cuenta la superficie aparente del vista humana.
Densidad de luz [ρ_v]	Candela m^2 [cd/m^2]	Una luz muy densa puede causar daños al ser humano. (Vital para el proyecto).
Energía lumínica [Q_v]	Lumen segundo [lm/s]	Cantidad de luz que se requiere por unidad de tiempo. (Influirá en la batería necesaria).
Eficiencia luminosa [η_v]	Lumen watio e ⁻ [lm/W_e]	Capacidad de aprovechamiento de la energía eléctrica absorbida para generar luz.

Tabla 3.1. Resumen de magnitudes de la luz con sus unidades en el SI.

3.1.2. Introducción de la composición completa de la luz solar.

La luz solar es una radiación emitida por una fuente natural (Sol) que principalmente contiene radiaciones electromagnéticas de 10^2 a 10^6 nanómetros. Esta puede ser dividida en tres principales regiones en orden creciente de longitud de onda.

- Radiación ultravioleta. Supone un 6,4% de la radiación solar y abarca el intervalo de longitudes de onda de 100 a 400 nm. Está en una frecuencia mayor que la luz visible, por lo tanto es invisible al ojo humano.
- Rango visible o luz se extiende entre los 400 y 700 nm. Es el 48% de la radiación solar. Es el rango que es visible al ojo humano. Se divide en función de la longitud de onda representando así todos los colores que el ojo humano es capaz de percibir, desde la más larga o roja (menor energía) hasta la más corta o violeta (mayor energía).
- Radiación infrarroja. Compone el 45,6% restante y se encuentra en el intervalo de longitudes de onda de 700 nm y 10^6 nm.

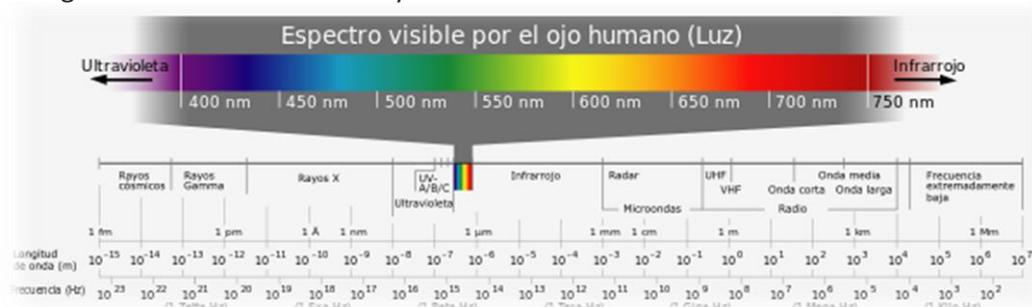


Figura 3.3. Espectro electromagnético de la radiación solar.

La siguiente figura muestra la irradiación o potencia solar incidente por unidad de superficie que se recibe al nivel del mar en función de la longitud de onda. Así pues, se observa que pese a que la luz visible comprende un menor rango de longitud de onda, la cantidad de vatios por metro cuadrado por nanómetro de onda que se reciben son mucho mayores que en el caso de infrarrojo. Esta es la razón por la que pese a que el infrarrojo abarque mayor intervalo de longitud de onda, su composición en la radiación total solar, sea muy similar a la de la luz solar.

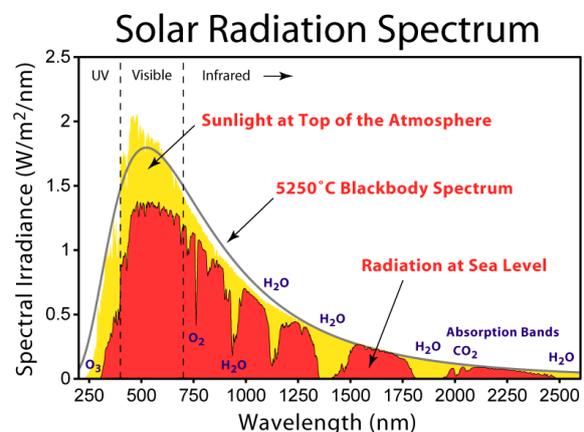


Figura 3.4. Espectro de irradiación solar.

A continuación, se adjunta una tabla realizada por Uwe Schnabl en 2008 que sirve de referencia para saber a cuantos luxes se está expuesto en diferentes situaciones muy habituales. A grosso modo, se puede ver lo que se conoce como la adaptación del ojo humano (Figura 3.5). Esto es la capacidad que tiene el ojo del ser humano para adaptarse a elevadas variaciones de luz solar, desde los 80 lux del pasillo de cualquier casa a los 100.000 luxes que provienen del Sol (1.250 veces más iluminancia que en el pasillo)

Situación	Iluminancia
Oficina bien iluminada	400 lux
Iluminación en estudio de TV	1.000 lux
Luz solar día media (mínima)	32.000 lux
Luz solar día media (máxima)	100.000 lux

Tabla 3.2. Tabla de iluminancia de la luz solar.
(Realizada por Uwe Schnabl, 2008)



Figura 3.5. Curva de adaptación del ojo humano.

3.1.3. La luz visible.

Es el conjunto de radiaciones de la luz que está comprendido en una zona del espectro electromagnético, cuyas longitudes de onda van desde 400 nm a 700 nm . Estos valores corresponden a los límites de la sensibilidad del ojo humano a la luz. Fuera de estos, el ojo es “ciego” y no percibe ningún tipo de radiación.

1. Si $\lambda < 400 \text{ nm}$. Entra en la franja de la radiación ultravioleta.
2. Si $\lambda > 700 \text{ nm}$. Entra en la región de ondas infrarrojas.

La radiación solar que llega a la superficie terrestre no es siempre la misma. En el Anexo 3 de la memoria se explican detalladamente los factores que afectan a la cantidad de radiación/luz solar que llega.

Además, el ojo humano no tiene la misma sensibilidad para todas las longitudes de onda que componen el espectro visible. Este efecto se conoce como *fotometría*. Este concepto introduce la ponderación de las diferentes magnitudes radiométricas medidas para cada longitud de onda por un factor que representa la sensibilidad del ojo a esa longitud.

Si se representa mediante un gráfico la sensibilidad relativa del ojo humano para las distintas longitudes de onda, suponiendo a todas las radiaciones a la misma energía, se obtiene una curva denominada *curva de sensibilidad del ojo a las radiaciones monocromáticas de longitud de onda* o *curva $V(\lambda)$* .

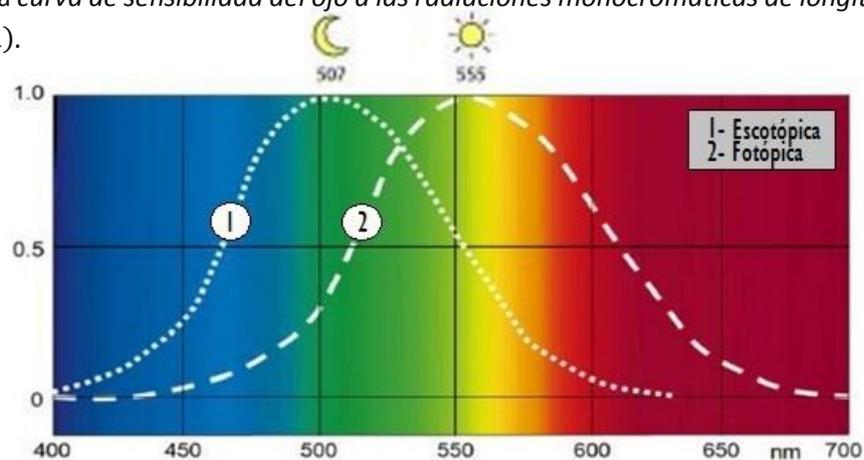


Figura 3.6. Curva $V(\lambda)$.

Se puede observar en la curva 2 de la *Figura 3.6*, que el ojo humano en condiciones fotópicas (o en niveles altos de iluminación) tiene la mayor sensibilidad para una longitud de onda de 555 nm (amarillo-verdoso) y la mínima a 400 nm (violeta) y 700 nm (rojo). Esto significa que los flujos luminosos que lleguen al ojo a 555 nm tendrán una mayor eficacia (en igualdad de energía).

En cambio, el máximo de la curva 1 de sensibilidad (bajo condiciones escotópicas o en niveles bajos de iluminación) se desplaza hacia longitudes de onda menores, concretamente a 500 nm . Este fenómeno se denomina *efecto Purkinje*. Este efecto se basa en que con déficit de luz el ojo humano pierde sensibilidad para largas longitudes de onda, a la par que la gana para cortas.

Luxómetro. Es un instrumento de medición que permite medir simple y eficazmente la intensidad la luminosidad que percibe el ojo humano (que no es la misma que la luz de energía real producida o reflejada). La unidad de medida en la que el luxómetro nos indica el resultado de la medición es el lux o la foot candle (unidad de medida americana).

Principio de funcionamiento. Este artefacto cuenta con una célula fotoeléctrica acoplada a un circuito integrado. De este modo, se consigue que la célula capte la luz real del entorno y el circuito integrado la convierta en impulsos eléctricos (señal analógica) que varían en función de la magnitud de la iluminancia. Esta señal se representa en un display para que el usuario disponga del resultado final de la medición en la unidad seleccionada por él mismo.

Además, el circuito integrado contiene un filtro de corrección de espectro que permite que se tenga en cuenta la sensibilidad del ojo humano. Así, se evita que las diferencias de espectro falseen la medida (la luz amarilla es más eficaz que la azul, por ejemplo, para producir un electrón a partir de la energía de un paquete de fotones).

Así pues, este filtro permite obtener una medida de la cantidad de luz que sería percibida por un ojo humano, independientemente de la cantidad de energía que lleve asociada. Para demostrarlo analíticamente, habría que conocer la energía radiante correspondiente a cada longitud de onda, multiplicar por los valores correspondientes de la función de luminosidad e integrar a todas las longitudes de onda como se muestra a continuación:

$$Q_T = K \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} Q_E(\lambda) * V(\lambda) d\lambda$$

Siendo Q_T la iluminancia sensibilizada leída por el luxómetro, K la constante de corrección comprendida en el intervalo de 0,8 y 1, $Q_E(\lambda)$ la iluminancia espectral real que recibe el luxómetro a cierta longitud de onda y $V(\lambda)$ la sensibilidad del ojo humano a dicha longitud de onda.



Figura 3.7. El luxómetro y sus partes.

3.1.4. *Comportamiento de las superficies ante la luz solar.*

Al incidir la luz sobre una superficie es devuelta al medio en mayor o menor proporción según sus características como se indica en (8). Este fenómeno se llama reflexión. Los dos principales tipos de reflexión ideales son:

Superficie especular: Superficie ideal que refleja los rayos incidentes con un ángulo igual al de incidencia (ambos tomados con respecto a la perpendicular al plano en ese punto)

Reflexión especular. La reflexión especular se produce cuando un rayo de luz incide sobre una superficie pulida (espejo) y cambia su dirección sin cambiar el medio por donde se propaga.

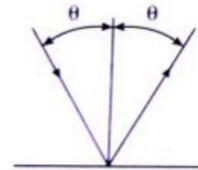
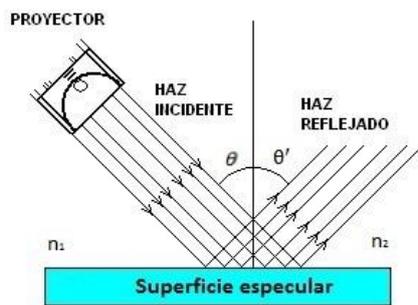


Figura 3.8.

El comportamiento de estas superficies se puede describir matemáticamente por la Ley de Snell para dos medios de igual o distinto índice de refracción. La ley de la reflexión es una fórmula utilizada para calcular el ángulo de refracción de la luz al atravesar la superficie de separación entre dos medios de propagación de la luz (o cualquier onda electromagnética) con índice de refracción distinto.



$$n_1 * \cos(\theta) = n_2 * \cos(\theta')$$

siendo, $n_1 = n_2$ y $\theta = \theta'$

Figura 3.9. Representación gráfica superficie especular.

Superficie Lambertiana: Superficie ideal que refleja el haz incidente desde una dirección igual en todas direcciones, por lo cual al variar el punto de vista, su luminancia no cambia. Es por tanto una superficie ideal de reflexión difusa.

Reflexión difusa. Cuando un rayo de luz incide sobre una superficie "no pulida", los rayos no se reflejan en ninguna dirección, es decir se difunden. Esto se puede producir por ejemplo en una pared blanca.

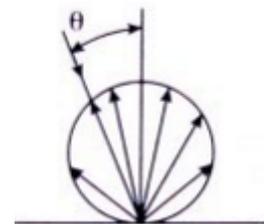


Figura 3.10.

La forma en que la luz se refleja desde una superficie depende del mismo acabado de la superficie. Así pues, la realidad es muy compleja y no solo hay dos tipos de superficies lambertiana y especular. Se producen comportamientos que sintetizan un intermedio sobre las teóricas.

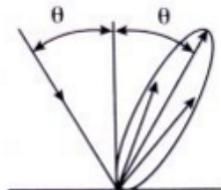


Figura 3.11. Superficie semi-especular.

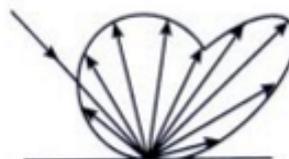


Figura 3.12. Superficie semi-difusora.

3.1.5. Conclusiones iniciales.

No se debe olvidar que el objetivo primordial de este trabajo fin de grado, consiste en proyectar un línea horizontal sobre una superficie (asfalto, hierba, tierra...) con un tipo de tecnología que sea visible por el ojo humano a plena luz del día.

Tras estos estudios previos, se conoce que para que la luz producida sea visible por el ojo humano debe cumplir las siguientes restricciones:

1. Que la longitud de onda se encuentre entre 400 y 700 nanómetros (dentro del espectro visible). Además este parámetro habrá que tenerlo en cuenta para seleccionar el color de la línea a proyectar (verde 497-570 ηm y rojo 618-700 ηm).
2. Una luminancia mínima de 50 lux a partir de la cual el ojo humano es capaz de detectarla (muy poco relevante, pues para que sea visible a la luz del día la luminancia deberá ser mucho más elevada).

Además, para conseguir que sea visible a la luz del día se trabajará siempre en las condiciones más adversas para asegurar el correcto funcionamiento del sistema en entornos más favorables.

1. Superar la iluminancia máxima que se produce de forma natural en la Tierra. Para cuantificarlo se recurre a la tabla de iluminancia realizada por Uwe Schnabl, 2008 (*Tabla 3.2.*) donde la luz solar día media (máxima) son 100.000 lux.
A lo largo de este estudio, habrá que contemplar si esta referencia es acorde a este proyecto, pues como se ha demostrado en el estudio de mercado básico solo el 5% de las carreras se realizan en el momento de iluminancia máxima.
2. Alcanzar el efecto estroboscópico para que sea un flujo luz uniforme para el ojo humano. Esto se consigue colocando una frecuencia mayor que la frecuencia máxima que el ojo humano llega a detectar (120 Hz).

En el siguiente paso del proyecto, se deberá hacer un análisis exhaustivo sobre como reflejan la luz solar las superficies sobre las que se ha proyectar el haz de luz en cuestión. Esto puede dificultar altamente la viabilidad del proyecto, debido a que si reflejan la superficie de manera especular factores como la altura del usuario, altura de colocación de la cinta o ángulo de enfoque cobrarían un grado de importancia muy relevante. Esto obligaría a tener que hacer la estimación de potencia con la mayor medida tomada experimentalmente, por lo que los niveles de potencia requeridos por la fuente se dispararían.

3.2. Estudio experimental de la reflexión de las superficies.

Para realizar cualquier tipo de selección sobre el tipo de tecnología, asignación de potencia, etc. se debe conocer el entorno en el que este producto se va a desenvolver. Para ello, se ha analizado la reflexión de la luz solar en función del ángulo en las cuatro principales superficies elegidas por los corredores para realizar sus entrenamientos: asfalto, tierra, cemento y césped.

3.2.1. Elementos que componen la situación.

Antes de comenzar la explicación hay que tener bien claro los componentes que afectan al problema y cómo interactúan entre ellas. Los principales componentes son cuatro representados en la *Figura 3.13*.

- 1- Fuente de luz solar. Radiación electromagnética que alcanza la Tierra proveniente del sol.
- 2- Emisor de luz artificial. Dispositivo electrónico que debe emitir una de iluminancia superior a la solar.
- 3- Superficie incidente. Se supondrá una superficie típica para hacer running que absorbe, refleja o transmite luz a través de sí misma.
- 4- Receptor. Ojo humano del usuario que utilice este producto.

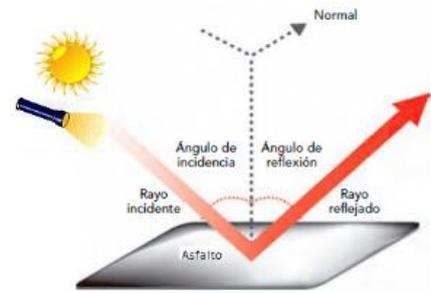


Figura 3.13. Elementos.

3.2.2. Diseño de la herramienta.

Por los motivos expuestos anteriormente, se ha procedido a realizar una herramienta móvil que permita medir en diferentes superficies tanto la iluminancia directa proveniente del sol, como la reflejada por la superficie sobre la que se va a proyectar el haz de luz y analizarla en función del ángulo.

En esta herramienta fabricada en el departamento de Física aplicada de la Universidad de Zaragoza, se pueden distinguir tres partes principales: parte fija, parte móvil y luxómetro.

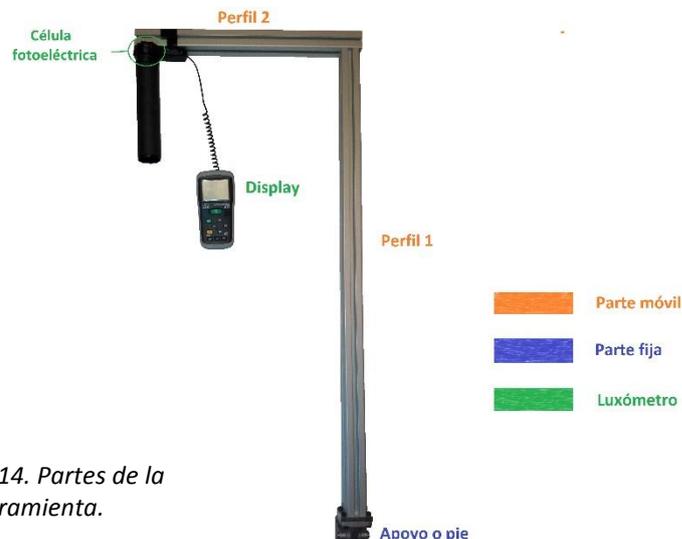


Figura 3.14. Partes de la herramienta.

La parte móvil consta de un brazo mecánico formado por dos perfiles de aluminio colocados ortogonalmente que le dan cuerpo formando una "L". Ambos se unen con una pieza de adaptación y tornillo pasante suministrados por el fabricante como indica la *Figura 3.15*. Tanto del perfil 1 (de longitud 1 metro), como el perfil 2 (de 0,5 metros) poseen una sección en estrella que le aporta una gran rigidez.



En la *Figura 3.16* se presentan las uniones realizadas en la base de la herramienta que permiten que se produzca el movimiento. La parte móvil está formada por el perfil 1 y por la pieza adaptación que están unidas de manera fija mediante cuatro tornillos pasantes (*Unión fija con perfil 1*). En la zona inferior, para hacer posible la unión de la parte fija y la parte móvil se ha colocado una unión por pasador. Esta se compone de una de un perno pasante. Así la parte móvil se podrá desplazar variando el ángulo (en el plano que contiene la sección del perno) para ver cómo afecta a la reflexión de la luz de la superficie que se está analizando.

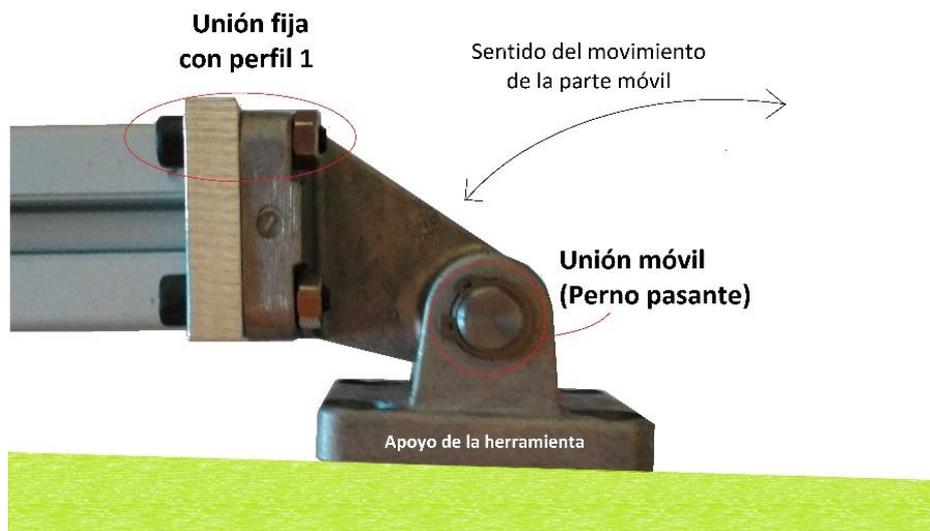


Figura 3.16. Uniones en la base de la herramienta.

Finalmente, en el extremo superior del perfil 2 se le ha dotado de un luxómetro que permite medir el nivel de iluminación. El luxómetro mide toda la intensidad luminosa que se encuentra en su semiesfera de actuación o flujo luminoso, razón por la cual se le ha añadido un tubo negro (que no refleje la luz solar, sino que la absorba) con el fin de que solo mida la luz reflejada del punto de incidencia, teóricamente denominada como intensidad luminosa.

Para ello, se ha tenido que realizar una pieza específica intermedia que haga posible el acople del tubo sobre la célula fotovoltaica. Esta consta de una abrazadera que hace de macho para albergar el tubo principal mediante una unión por fricción.

Para finalizar, se le ha colocado un medidor de ángulo como el de la *Figura 3.17* en la parte fija de la herramienta (pie) para así tener un mayor control sobre el ángulo durante la medición.

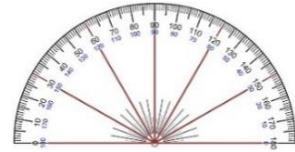


Figura 3.17. Angulómetro.

A continuación, se adjuntan dos imágenes de la herramienta en el momento exacto de medición sobre hierba.



a)

b)

Figura 3.18. Herramienta en posición de medición. a) +55° b) 0°

3.2.3. Obtención de datos experimentales y diagramas polares.

Antes de exponer los datos y diagramas obtenidos, es interesante explicar la posición de la herramienta con respecto al sol en la que se realizaron dichas mediciones en las diferentes franjas horarias.

En la medición se ha debido ser muy cuidadoso con tres detalles que pueden hacer que los datos recabados no se ajusten a la realidad:

1. Generación de sombras (con el cuerpo de la persona encargada de medir o con la propia herramienta) que incidan sobre la superficie de análisis.
2. Captación del luxómetro de parte de otra superficie que no se corresponde con la del estudio.
3. Realización de mediciones cuando una nube no permita el paso de la totalidad de la luz solar.

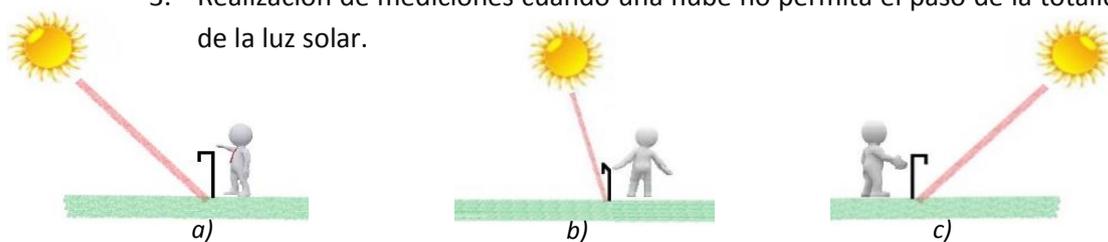


Figura 3.19. Variación de la posición de medición a diferentes horas del día.

a) 11:00 h

b) 15:00 h

c) 19:00 h

Como se puede observar en la *Figura 3.19*, el usuario que realiza la medición es el que varía su posición en función del sol. La medida siempre se realizará con el usuario mirando al sol. La finalidad de esta estrategia de medición es evitar que el usuario cause una sombra que incida sobre la superficie en la que nuestro luxómetro está midiendo la luz solar, pues si esto ocurriese, esa medida no sería real (medida errónea).

Como la zona de actuación del luxómetro debe ser solo de la superficie analizada, se debieron a hacer las mediciones en amplias zonas de las superficies en cuestión. Pues al tener que cambiar de posición para cada hora, si se realiza sobre un camino estrecho de cemento con hierba a los lados y se debe medir en dirección normal al camino para ángulos de 85°, 60°, -60° y -85° el luxómetro también medirá la luz que refleja la hierba (superficie que no forma parte del estudio en este caso) luego la medida no será válida.

Es este el motivo por el que para realizar dichas mediciones se recurrió al parque Grande de Zaragoza. La primera de ellas fue hecha 06/08/2016 y la segunda el 29/09/2016.

La referencia que se ha establecido es fija sobre la referencia relativa del usuario como se puede observar en la *Figura 3.20*. Siguiendo el criterio de ángulos positivos hacia su derecha (sentido horario) y negativos hacia su izquierda (sentido anti horario).

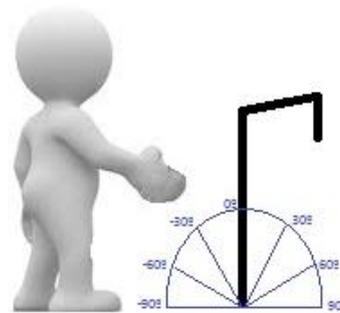


Figura 3.20. Sistema de referencia.

En cuanto al nivel máximo de luminosidad directa que proviene del sol se realizaron tres mediciones:

1. Primera medida experimental el 21/07/2016 a las 15:00 h en los alrededores del CPS.
2. Segunda medida experimental el 06/08/2016 a las 15:00 h en Parque Grande de Zaragoza.
3. Tercera medida experimental el 07/11/2016 a las 15:00 h en Parque Grande de Zaragoza.

160.000 luxes

145.000 luxes

132.000 luxes

También se ha realizado la medición de la luz solar en el mismo lugar a diferentes horas del día obteniendo los siguientes datos:

1. Primera medida experimental el 07/11/2016 a las 09:00 h en Parque Grande de Zaragoza.
2. Segunda medida experimental el 07/11/2016 a las 11:00 h en Parque Grande de Zaragoza.
3. Tercera medida experimental el 07/11/2016 a las 13:00 h en Parque Grande de Zaragoza.
4. Cuarta medida experimental el 07/11/2016 a las 15:00 h en Parque Grande de Zaragoza.

57.000 luxes

124.900 luxes

131.700 luxes

105.300 luxes

5. Quinta medida experimental el 07/11/2016 a las 17:00 h en Parque Grande de Zaragoza.
6. Sexta medida experimental el 07/11/2016 a las 19:00 h en Parque Grande de Zaragoza.

19.600 luxes

0 luxes

Lógicamente, los valores más elevados se obtienen a las 15:00h, pues es el momento del día en el que más perpendicularmente indican los rayos del sol en la superficie.

Con los datos recabados se puede representar gráficamente la variación de la intensidad solar a lo largo del día.

Variación de la luz solar a lo largo del día.

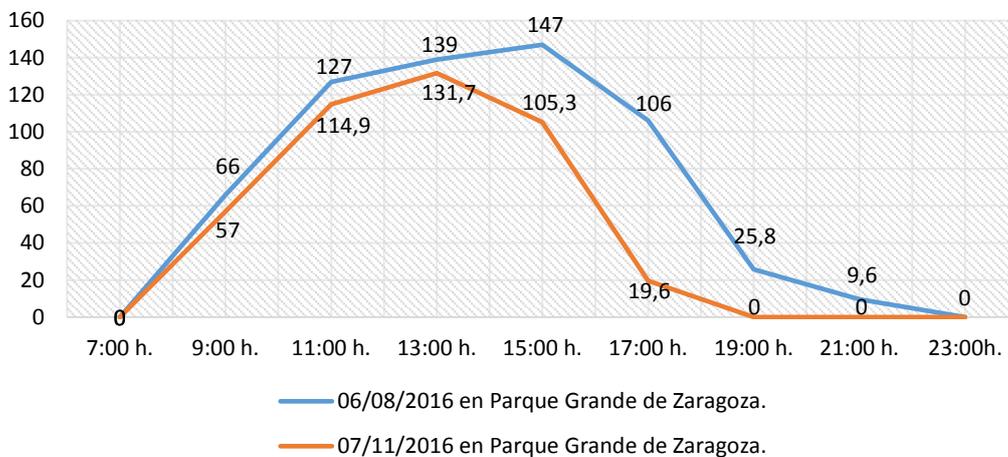


Figura 3.21. Variación de la luz solar a largo del día.

Como era de esperar, se aprecia notablemente como la curva presenta un máximo sobre las 15:00 horas y va disminuyendo hasta valores nulos por ambos extremos. Los valores máximos son más elevados en el mes de Agosto, ya que es una época del año en la que en Zaragoza (España) los rayos de luz solar inciden más perpendicularmente sobre la superficie. Además los días, en esta época del año, son más largos y por consiguiente la luz solar no da valores nulos hasta las 22:00 horas aproximadamente. En cambio, en Noviembre los valores nulos aparecen sobre las 19:00 horas.

En el *Anexo 4a* se adjuntan todas las mediciones realizadas durante el proyecto. Se han clasificado en una tabla en función de ángulo, tramo horario y superficie sobre la que se ha medido.

A raíz de estas tablas, ha sido posible determinar los gráficos polares de la intensidad luminosa que se adjuntan en el *Anexo 4b*.

A continuación, se expondrán las conclusiones aplicadas a este proyecto a las que se ha llegado tras los múltiples estudios experimentales de la reflexión de la luz en diferentes superficies.

3.2.4. Conclusiones experimentales.

Las conclusiones obtenidas con estos datos son varias. La primera, y muy importante, es que la reflectividad de las cuatro superficies de estudio es difusa, es decir, la radiación se refleja uniformemente en todos los ángulos. Así pues, se puede afirmar con certeza, que las superficies sobre las que han realizado las mediciones se comportan de manera *lambertiana*. Esto implica que al variar el punto de vista, su iluminancia se mantiene. Es por tanto una superficie ideal de reflexión difusa.

Análiticamente tiene una explicación muy clara. Partiendo de la expresión teórica de la iluminancia, se tiene:

$$I [\text{Lux}] = \frac{\Phi_v [\text{Lm}]}{S_{\text{Aparante}} [\text{m}^2]}$$

En el momento de medición, tanto el flujo luminoso (Φ_v) como la superficie aparente (S_{Aparante}) son dependientes del coseno del ángulo de manera idéntica. De manera que:

$$I [\text{Lux}] = \frac{\Phi_v * \cancel{\cos(\alpha)}}{S_{\text{Aparante}} * \cancel{\cos(\alpha')}} = \frac{\Phi_v}{S_{\text{Aparante}}} = \text{cte} \quad \text{para } \alpha = \alpha'$$

Siendo α es ángulo formado entre el rayo incidente y el reflejado y α' el ángulo formado por las dos siguientes rectas:

1. Recta que está contenida en la sección del tubo de medición, pasa por el centro de esta y es perpendicular al rayo reflejado.
2. Recta que está contenida en la sección de la superficie aparente, para por el centro de esta y es paralela al suelo.

Así pues, como las rectas que forman los ángulos α y α' son perpendiculares dos a dos, se puede concluir que se está hablando del mismo ángulo.

Al estar ante este tipo de superficies, los rayos reflejados serán proporcionales (en módulo) al haz de luz incidente en la superficie estudiada. Esto hace que sea innecesario analizar la cantidad de luz solar reflejada por la superficie. Pues la superficie se puede modelar matemáticamente como una constante $r \leq 1$ que refleja tanto la luz solar y como la del equipo lumínico de manera idéntica. Esto implica que el cociente entre la luz solar recibida y la emitida por el dispositivo electrónico será igual al cociente entre la reflejada por la superficie del sol y la reflejada por la superficie del dispositivo electrónico en toda la semiesfera que envuelve al punto de incidencia.

Debido a estas razones, para la estimación de la potencia mínima que deberá poseer la fuente **no será necesario tener en cuenta el ángulo de incidencia, pero sí la intensidad y densidad de luminosidad**, es decir, la potencia luminosa de las fuentes y el área de las superficies.

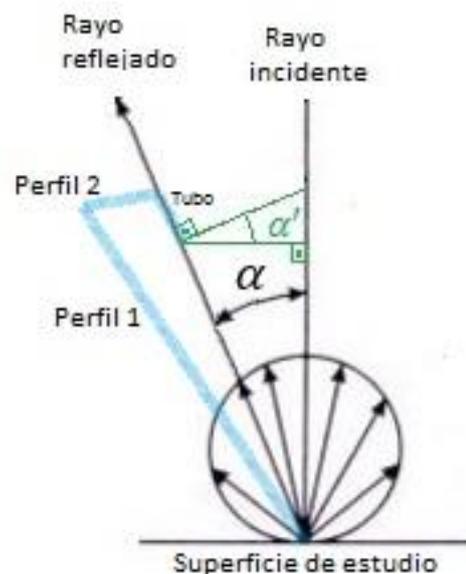


Figura 3.22. Representación sobre la medición.

3.3. Simulación en software informático.

3.3.1. OpticStudio2015.

Obtenidos estos datos se ha lanzado una simulación en el programa OpticStudio 2015. OpticStudio es una plataforma informática esencial para ingenieros ópticos, investigadores y científicos. Este contiene un software combina intuitivamente una interfaz con un conjunto de conocimientos físicos complejos e interactivos, que permiten llevar a cabo una innovación más rápida y así reducir los costes en el desarrollo experimental de los proyectos.



3.3.2. Procedimiento de la simulación.

A través de esta herramienta informática se ha conseguido *estimar la potencia mínima* necesaria que la fuente de lumínica debe tener para que sea visible a la luz solar. Para ello se ha seguido el siguiente procedimiento:

1- Introducción de los datos necesarios para llevar a cabo la simulación (Tabla 3.3).

- Fuente de energía solar. Se ha cogido una superficie cuadrada de 1x1 metros. Produce rayos paralelos (100,000.000 de unidades) simulando la fuente natural, cuya normal se encuentra a 0º. La longitud de onda de onda de estos es 480, 590 o 660 μm. Estas se dividen equitativamente para obtener luz blanca. La potencia seleccionada es de 700 W (aproximadamente equivale a los 160 kLuxes medidos experimentalmente) calculada como:

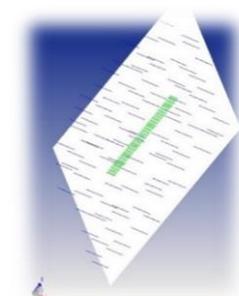


Figura 3.23. Simulación fuentes.

$$P_F = \sum_{\lambda=1}^3 Q_E(\lambda) * V(\lambda) = \underbrace{\frac{700}{3} * 683 * 0.1}_{\lambda = 480 \text{ nm}} + \underbrace{\frac{700}{3} * 683 * 0.8}_{\lambda = 590 \text{ nm}} + \underbrace{\frac{700}{3} * 683 * 0.1}_{\lambda = 660 \text{ nm}} = 159.300 \text{ [lux]}$$

- Emisor o fuente de energía artificial. Se ha aproximado con una superficie de rectangular de 500x2 milímetros, y cuya normal se encuentra a 0º. La potencia emitida va a ser el parámetro a variar durante la simulación para obtener el valor óptimo.
- Superficie receptora. Es la superficie sobre la que se realiza simulación. Sobre ella se podrá ver si la luz emitida del emisor o fuente de energía artificial es visible. Se ha cogido una superficie cuadrada de 1x1 metros dividida en un millón de píxeles y su normal se encuentra a 0º.

Object Type	Comment	Ref Object	Inside Of	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z	Material	# Layout Rays	# Analysis Rays	Power(Watts)	Wavenumber	Color #	X Half Width	Y Half Width
1 Source Rectangle	Luz solar	0	0	0,0	0,0	-100,0	0,0	0,0	0,0	-	100	100000000	700,0	0	0	500,0	500,0
2 Source Rectangle	Emisor	0	0	0,0	0,0	-50,0	0,0	0,0	0,0	-	100	100000000	2,0	3	0	250,0	1,0
3 Detector Color	Detector	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	500,0	500,0	1000	1000	0	0	0

Tabla 3.3. Introducción de los datos en OpticalStudio.

2- Lanzamiento de la simulación.

* Nota: Como ya se ha explicado anteriormente la superficie es lambertiana. Esto provoca que la posición y los ángulos de incidencia de la luz producida por los emisores sean indiferentes, pues son iguales en todas las direcciones. Es por esto, por lo que se ha decidido colocar todas las superficies con normal a 0º.

3. Análisis de los resultados (adjuntados en la Anexo 5).

- Como se puede en los resultados de la simulación:
 1. Para P = 0,5 [W], la fuente no es visible. **X**
 2. Para P = 1 [W], la fuente sí es visible. **✓**
 3. Para P = 2 [W], la fuente es visible, con bastante claridad. **✓ ✓**
- Tras la simulación, se concluye que para que la fuente de luz del producto sea visible frente a la luz del sol, debe tener una potencia mínima de 1 Vatio (de luz). Hay que tener en cuenta, que esta estimación de potencia se ha realizado para una superficie de luz artificial de 500x2 milímetros. Si se quisiera iluminar una superficie mayor, se necesitaría una mayor potencia del emisor artificial.
- La densidad de potencia teórica que necesita la fuente será:

$$\phi = \frac{\text{Potencia}}{\text{Superficie}} = \frac{1 \text{ [W]}}{10 \text{ [cm}^2\text{]}} ; \quad \phi = 100 \left[\frac{\text{mW}}{\text{cm}^2} \right]$$

Conociendo este dato, se puede obtener la potencia teórica necesaria para la superficie que se desee abarcar.

Llama la atención que incidiendo en la superficie receptora la misma potencia en toda su superficie, menos en el área que incide también el láser, el fondo tiene distinto tono en las tres simulaciones. Esto se debe a que OpticStudio realiza una normalización en el código de colores de la siguiente manera.

1. Coge los valores máximo y mínimo de potencia proyectados en la superficie.
2. A partir de ellos, realiza una división equitativa en 10 intervalos.
3. A cada intervalo le asigna un color.

En la simulación el valor mínimo nunca cambia, siempre es 0,000 [W/cm²]. En cambio, el máximo varía en función de la potencia con la que se simula la fuente que representa el láser. Con un láser de 0,50 [W] se tiene una potencia superficial de 0,102 [W/cm²], con 1 [W] se tiene 0,133 [W/cm²] y con 2 [W] se tiene 0,195 [W/cm²].

Este es el motivo por el que toman diferentes colores los 0,065 [W/cm²] a los que esta expuesta la superficie sobre la que no incide el láser. No cambia la potencia, lo que cambia es el código de colores.

3.4. Estudio experimental de visibilidad mínima.

Tras la simulación se conoce que el valor real estará en torno al valor teórico obtenido en la simulación de $100 \frac{mW}{cm^2}$. Para corroborarlo, en el laboratorio se ha fijado el umbral mínimo de visibilidad mediante el siguiente experimento. Como se muestra en la *Figura 3.24*, mientras se ha medido con un luxómetro la iluminancia del laboratorio (1), se ha ido variando la superficie de incidencia de un láser de 20 mW (2) modificando así la densidad de energía concentrada sobre ella.



Figura 3.24. Estudio umbral de visibilidad mínima.

El nivel mínimo de visibilidad se ha impuesto subjetivamente cuando la superficie iluminada tenía unas dimensiones de 80 cm x 0,6 cm. Así pues, la densidad de potencia del láser en ese instante era de $\phi = \frac{20 [mW]}{48 [cm^2]} = 0,42 \frac{mW}{cm^2}$.

Estos datos se han obtenido cuando había una iluminancia sobre la superficie de 762 luxes. De manera análoga, cuando la superficie esté expuesta a 160.000 luxes (mayor radiación solar posible según las mediciones realizadas anteriormente) la densidad de energía tendrá que ser:

$$\phi = 0,42 \frac{mW}{cm^2} * \frac{160.000 [luxes]}{762 [luxes]} ; \boxed{\phi = 90 \frac{mW}{cm^2}}$$

que como se observa es un valor muy parecido al valor teórico obtenido en la simulación con OpticStudio ($100 \frac{mW}{cm^2}$).

Así pues, estos $90 \frac{mW}{cm^2}$ representan el valor mínimo de densidad de potencia que se debe de proyectar en todo momento sobre la superficie para que el ojo humano sea capaz de diferenciar el contraste línea-superficie en condiciones de máxima luminosidad. Es decir, se garantiza que con este parámetro la línea será visible en cualquier momento del día.

4. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA LUMÍNICO.

Tras calcular las características técnicas que la fuente debe tener para que sea visible a cualquier hora del día, se va a proceder a definir los parámetros geométricos sobre los que la fuente tiene que iluminar, pues jugarán un papel determinante en la potencia de iluminación requerida por el sistema. Desde empresa incubada en el Agencia Espacial Europea se pretende que el intervalo de actuación del haz esté entre 1-3 metros del corredor. Además se estima que la altura media de colocación de la cinta sea de 1,10 metros como se muestra en la *Figura 4.1*

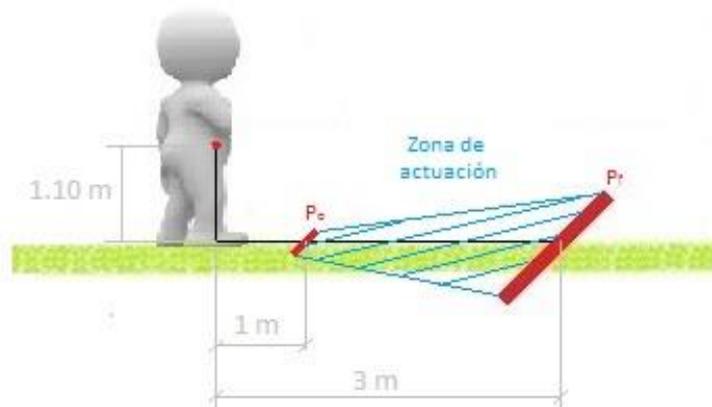


Figura 4.1. Representación de la actuación del sistema.

Además se han fijado las dimensiones de la superficie de P_f (proyección final) como 500x2 mm. A partir de estos datos se han calculado los diferentes parámetros geométricos que la fuente tiene que tener para cumplir dichas restricciones.

4.1. Ángulos de enfoque.

El ángulo de enfoque se define por la intersección de la línea normal a la superficie con la línea imaginaria que contiene el haz de la fuente. Así pues, en este proyecto este ángulo irá variando desde β_0 hasta β_f (*Figura 4.2*) para informar al corredor sobre si tiene que aumentar, disminuir o mantener el ritmo. Dichos ángulos se pueden calcular con geometría básica de la siguiente manera:

$$\beta_0 = \tan^{-1}\left(\frac{1}{1,10}\right) \approx 40^\circ$$

$$\beta_f = \tan^{-1}\left(\frac{3}{1,10}\right) \approx 70^\circ$$

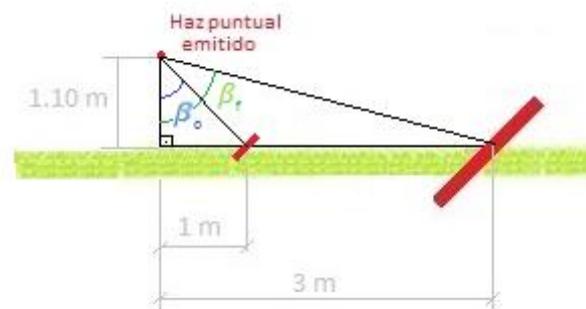


Figura 4.2. Ángulo de enfoque.

Así pues, la lente deberá moverse en el intervalo comprendido entre 40° y 70° para informar al corredor sobre la situación en la que se encuentra.

- Señalización a 1m (40°) —> Disminuye tu ritmo
- Señalización a 2m (55°) —> Mantén tu ritmo
- Señalización a 3m (70°) —> Incrementa tu ritmo

4.2. Ángulos de salida.

Para definir los ángulos de salida en los dos planos de movimiento, se ha establecido un sistema de coordenadas sobre la lente que emitiría el haz de luz (Figura 4.3).

Así pues, quedan perfectamente definidos los ángulos que se van a poder ajustar durante este apartado:

- Ángulo de salida eje Y (Plano XZ)
- Ángulo de salida eje X (Plano YZ)

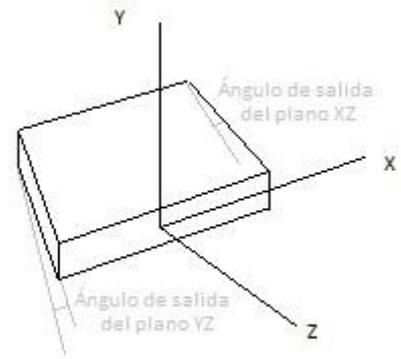
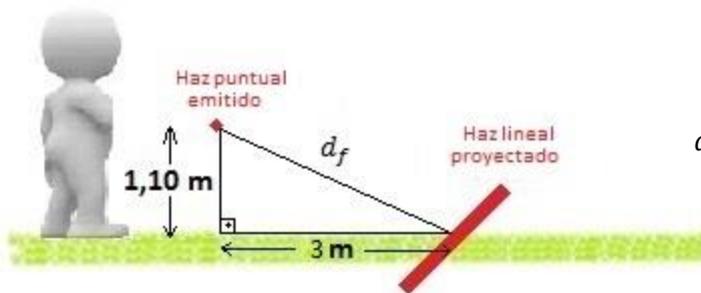


Figura 4.3. Sistema de referencia.

4.2.1. Ángulo de salida eje Y (Plano XZ).

El ángulo de salida en el eje Y se ha decidido que no sea regulable, pues tiene una trascendencia crítica en las dimensiones de las señales proyectadas y por consecuencia en la densidad de potencia de la fuente. Para fijarlo se ha trabajado con las dimensiones de P_f (proyección final) ya que son las fijadas inicialmente y se ha calculado su distancia focal como:



$$d_f = \sqrt{1,10^2 + 3^2} = 3,20 \text{ [m]}$$

Figura 4.4. Distancia focal de P_f .

Conociendo la distancia focal se ha cogido para trabajar, el plano que contiene a ambos haces. Manipulando geoméricamente la situación (Figura 4.5) se obtiene que el semi-ángulo de salida α se puede calcular como:

$$\alpha = \text{sen}^{-1}\left(\frac{0,25}{3,2}\right) = 4,5^\circ$$

Luego el ángulo de salida (2α) es de 9° .

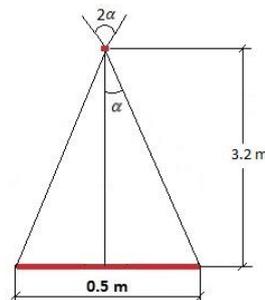


Figura 4.5. Esquema geométrico del ángulo de salida.

4.2.2. Ángulo de salida eje X (Plano YZ).

En cuanto al ángulo de salida en el eje X se coloca de 0° . Esto se debe a que al estar trabajando con un espesor de línea constante de 0,2 mm el haz deberá ser completamente colimado para que la luz no se disperse y se disipe la potencia luminosa.

Mantener el espesor de línea constante va a ser imposible ya que es dependiente del ángulo de enfoque pero como se demostrará en el siguiente apartado la variación máxima que presenta es muy pequeña.

4.3. Dimensiones de las señales visuales.

Con el ángulo de salida constante en el eje Y (10°) y el eje X (0°), las dimensiones de la superficie proyectada va a depender únicamente del ángulo de enfoque.

Para un ángulo de enfoque de 70° (P_f) y un emisor de luz puntual de 0,7 mm de diámetro, la señal proyectada será un rectángulo de las siguientes características:

1. *Anchura: 500 milímetros.* Condición inicial.
2. *Altura: 2 milímetros.* Dependerá del diámetro de la lente emisora (a) y del ángulo de enfoque (α) como se observa en la *Figura 4.6.*

$$a' = \frac{a}{\cos(\alpha)} ; a' = \frac{0,7 \text{ [mm]}}{\cos(70^\circ)} \approx 2 \text{ [mm]}$$

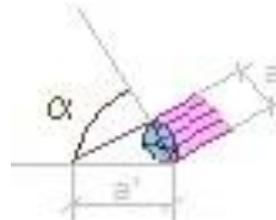


Figura 4.6. Proyección del haz.

Para un ángulo de enfoque de 40° (P_0) la señal será un rectángulo de las siguientes características:

1. *Anchura: 250 milímetros.* Para calcularla primero se debe conocer de la distancia focal que se tiene con este ángulo. Este se puede calcular como $d_o = \sqrt{1,10^2 + 1^2} = 1,50 \text{ [m]}$

Así pues, analizando el plano que contiene el haz emisor y el haz proyectado se realiza el siguiente cálculo geométrico para calcular la anchura de la proyección:

$$\frac{x}{2} = \tan(4,5) * 1,5 \approx 0,125 \text{ [m]}$$

$$\text{luego } x = 250 \text{ [mm]}$$

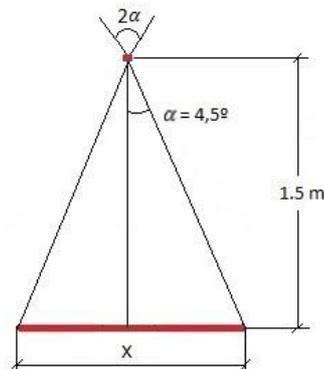


Figura 4.7. Esquema geométrico P_0 .

2. *Altura: 1 milímetro.* Se sigue el mismo procedimiento que para el cálculo de la altura de P_f cambiando únicamente el ángulo de enfoque α (*Figura 4.6.*).

$$a' = \frac{a}{\cos(\alpha)} ; a' = \frac{0,7 \text{ [mm]}}{\cos(40^\circ)} \approx 1 \text{ [mm]}$$

Lógicamente la mayor superficie se obtiene para el mayor ángulo de enfoque, es decir, en la proyección más lejana. En este momento, la densidad de potencia bajará y por tanto la visibilidad la línea también lo hará. Aun así, si la densidad de potencia no es inferior a los $90 \left[\frac{\text{mW}}{\text{cm}^2} \right]$ calculados en el apartado 3.4 de la memoria se garantiza que la línea será visible al ojo humano hasta en las condiciones más desfavorables de iluminancia (160 Kluxes).

5. SELECCIÓN DEL TIPO DE SISTEMA DE ILUMINACIÓN.

Hasta el momento se ha realizado un estudio exhaustivo sobre todos los elementos que componen el entorno de la fuente. También se han fijado todas las *características teóricas* requeridas para que se pueda garantizar una luz visible en rangos máximos de iluminancia, en cualquier superficie, con una superficie máxima de línea proyectada de 10 cm² (500 mm x 2 mm) y con una emisión de luz continua.

Tras conocer toda esta información, se debe seleccionar que tipo de sistema de iluminación disponible en el mercado se adapta mejor para las necesidades de este caso. Se han consensado múltiples alternativas pero las elevadas restricciones de potencia requeridas por la fuente para alcanzar el objetivo del proyecto, ha hecho que se desechen todas ellas menos el sistema de iluminación LED y el sistema láser, ya que se pueden encontrar artículos en el mercado de gran potencia.

El sistema de iluminación LED ofrecía valores de potencia muy atractivos, con consumo muy bajo y sobre todo a muy buen precio, pero con el inconveniente de que el haz emitido era disperso. Este es el motivo por el que se ha descartado esta tecnología, pues para colimar el haz emitido por el LED se debería de diseñar una óptica muy compleja.

Así pues, *la tecnología escogida ha sido el láser*. La elevada potencia y la colimación del haz han sido determinantes en la selección de esta tecnología. La luz emitida por el láser tiene la particular característica de que es colimada (*Figura 5.1*). Esto significa que los rayos son paralelos entre sí, es decir están enfocados al infinito. De esta manera, la sección del haz de luz nada más salir de la fuente, es idéntica a la sección que tendría en el infinito.

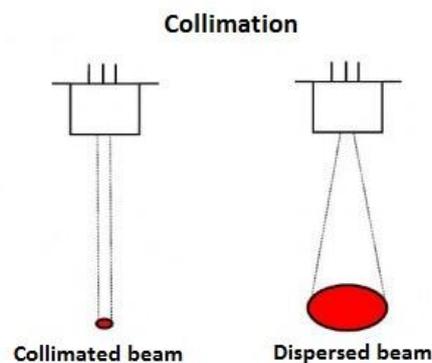


Figura 5.1. Haz colimado.

Esto permite tener un control mucho mayor sobre las dimensiones de la superficie a proyectar y por lo tanto de la densidad de energía que va a tener el haz. En cambio, con el sistema de emisión LED, el haz es disperso y sería más difícil enfocarlo al necesitar un colimador específico para el sistema.

En el *Anexo 6* se explica más detalladamente el principio de funcionamiento básico de este sistema de iluminación, así como las partes que lo componen y los parámetros más relevantes de la luz que genera.

6. PROPUESTA DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN

El siguiente paso después de haber seleccionado el tipo de tecnología que va a colocarse en la cinta deportiva, es acudir al mercado para ver los diferentes tipos de láser que hay en él. Después se deberá proponer un sistema, económicamente viable, que cumpla con los objetivos iniciales que se habían fijado.

6.1. Selección del color de la fuente.

Se ha optado por una longitud de onda entre 635 y 655 ηm (rojo) debido a los siguientes motivos:

- Bajo coste.
- Alta sensibilidad del ojo humano en condiciones fotópicas (o en niveles altos de iluminación).
- Ofrece un gran contraste con cualquier tipo de superficie. Esto facilitará la visibilidad del haz proyectado sobre el terreno.

6.2. Propuesta del módulo láser.

Se ha acudido al mercado para ver la variedad de láseres que había en él. Tras una larga búsqueda se ha optado por recomendar un módulo láser por piezas. Este estaría formado por:

1. Diodo láser rojo. (9)

Ref: RLT635-100G, 635 nm, 100 mW, mm, 9 mm.



2. Driver para diodo láser. (10)

Ref: EU-38-TTL, 35 x 14 mm², constant current, TTL modulable, LD current max. 1 A.



3. Tubo montante o alojamiento. (11)

Ref: LDMT-90-10-LT, 9.0 mm LD mountingtube, 10x18 mm, long thread M9 x 0.5.



4. Lente láser. (12)

Ref: LDA-90, 9.0 mm laser diode assembly with focussable acryl lens, f=6.5mm, 11x14 mm, brass.



5. Generador lineal. (13)

Ref: PL650-5-10, 10° line, beam \varnothing 5mm, wavelength 650nm, \varnothing 9 x 8 mm



Es conocido que la potencia que este láser aporta no es suficiente para que las señales visuales sean visibles cuando los valores de iluminancia solar sean máximos. Aun así, como se explicará en las conclusiones finales, un láser de 100 mW permitiría que este sistema se pudiera usar con garantías en un amplio intervalo horario en el que los deportistas salen a practicar deporte frecuentemente. Además, el generador lineal escogido solo colimará el haz en plano XZ, de manera que en el YZ será inevitable que salga algo disperso aunque debería venir colimado de la lente láser.

6.3. Dimensionamiento de la capacidad de la batería.

Por decisión propia del autor del trabajo fin de grado se ha creído oportuno que la autonomía del sistema sea 5 horas a máxima potencia. Pues los estudios previos corroboran que al 95% de los corredores les permitiría realizar dos entrenamientos sin tener que cargar la batería.

En primer lugar, se deben calcular los $W_{Eléctricos}$ a los que el sistema va a trabajar. Para calcularlos se debe acudir a la data sheet del driver (10) que va a alimentar a la fuente luminosa y ver las condiciones en las que opera. Con estos, calculamos la potencia.

$$P = V * I = 4 V * 1 mA = 4 W \quad \text{siendo} \quad \left\{ \begin{array}{l} V: \text{Tensión de alimentación del driver.} \\ I: \text{Corriente absorbida por el mismo.} \\ P: \text{Potencia eléctrica absorbida.} \end{array} \right.$$

En segundo lugar, se debe cuantificar la cantidad de horas de autonomía que se pretende conseguir para el dispositivo, en este caso 5 horas.

$$P = 4 W * 5 h = 20 Wh$$

En tercer lugar, se ha considerado la temperatura media de la batería, ya que la energía que entrega varía levemente T. En el Anexo 7, IASET estima que la temperatura media en Zaragoza en 2015 fue de 16,5°C (14). A esta, se le añade una desviación de 5°C provocada por las pérdidas de calor de la batería que generan un calentamiento de la misma.

40 °C	102% de la capacidad.	} Interpolación	$\frac{25 - 21,5}{25 - 0} = \frac{100 - X}{100 - 85} ; X \approx 98\%$
25 °C	100% de la capacidad.		
0 °C	85% de la capacidad.		
-15 °C	65% de la capacidad.		

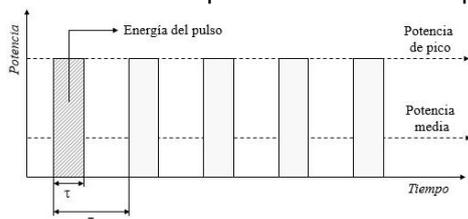
Por lo que a 21,5°C se deberá colocar una capacidad de un 2% superior y así compensar que el suministro eléctrico a esta temperatura no es del 100%

$$P = 20 Wh * 1,02 = 20,4 Wh$$

Finalmente, para obtener los A/h que el sistema necesita se divide la potencia entre la tensión a la que trabaja la batería

$$C_B = \frac{20,4 Wh}{4 V} = 5,1 [Ah] = 5.100 [mAh] \quad \text{siendo } C_B: \text{Capacidad mínima de la batería.}$$

Para poder reducir este valor, se propone colocar una fuente pulsada con un duty cycle del 50%. De esta manera, la potencia media suministrada sin variar los niveles máximos de potencia emitida se reduce a la mitad. A continuación, se adjunta la Figura 6.1 que representa la señal TTL del sistema que modula la fuente para $\tau = T/2$.



Así pues, la capacidad que debe tener batería final que alimente el driver será:

$$C_B = \frac{5.100 [mAh]}{2} ; \boxed{C_B = 2.550 [mAh]}$$

Figura 6.1. Salida pulsada.

6.4. Propuesta del prototipo final.

El circuito estaría formado por la fuente de alimentación, la lente láser y el driver encargado de controlar la corriente que se le suministra a dicha lente. El driver es controlado por tensión, de manera que para alimentarlo (U_b) se aplica un voltaje de 4V continuos (Figura 6.2 a) como indica la data sheet de este ítem (10).

Para alimentar la modulación, la hoja de características indica que para que la lente luzca debe trabajar entre 2V y U_b (de 4V en este caso). Así pues, se ha decidido alimentar con una tensión alterna de 3V, a una frecuencia de 0,5 Hz y con un duty cycle del 50% (Figura 6.2 b) para reducir el consumo a la mitad como se ha indicado en el apartado anterior. Así el usuario podrá observar la señal visual un segundo encendida y otro segundo apagada.

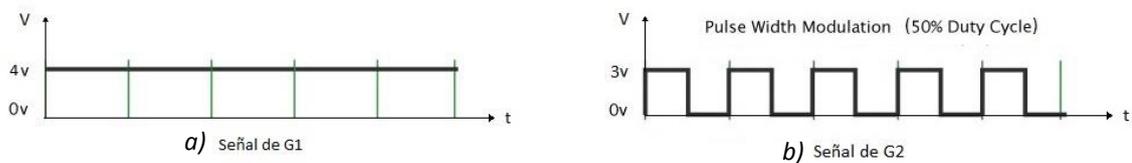


Figura 6.2. Alimentación del driver.

De esta manera, el montaje final quedaría representado en la Figura 6.3 donde además de conectar el driver a la alimentación, se muestra la conexión del diodo en la placa y el potenciómetro P1 que permite regular la corriente de entrada al diodo láser.

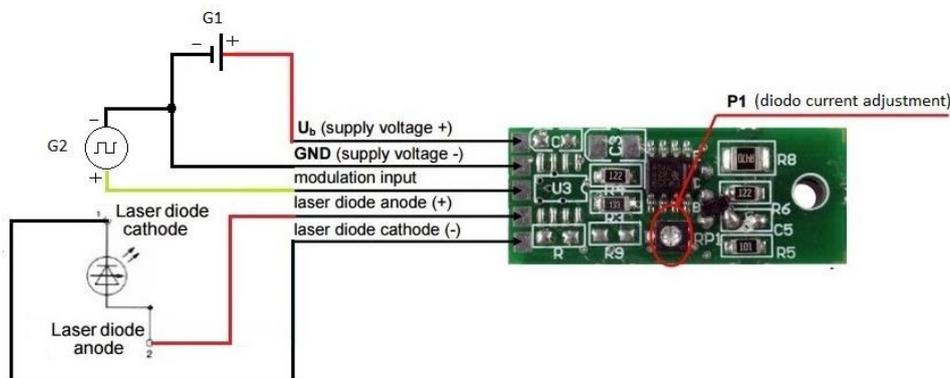


Figura 6.3. Montaje final.

Con este sistema electrónico se protege la fuente luminosa ante posibles fluctuaciones de la alimentación, consiguiendo que nunca se le suministre al diodo una corriente mayor que la corriente de operación con valor de 700 mA para la que se diseñó (9).

La corriente de la señal modulada es del valor de microamperios debido a la alta impedancia de entrada, por este motivo se considera despreciable en los cálculos de la batería frente a la corriente de alimentación al driver.

7. CONCLUSIONES.

La selección del prototipo final del sistema de iluminación que se propone desde este trabajo fin de grado se ha realizado con acuerdo a dos criterios.

El primero de ellos ha sido la minimización coste del sistema. Este criterio ha limitado principalmente el abanico de lentes diferentes potencias que en principio podían concordar con el proyecto, pero por su elevado coste no era viable. Aun con todo el sistema seleccionado con una potencia lumínica de 100 mW tendría un coste total de 271,99€ comprando una única unidad, suponiendo solo el diodo láser un 57% del coste total (154,00 € p.v.p.). En caso de adquirir un número mucho mayor de unidades, se podría negociar con el proveedor el precio de coste unitario.

El segundo ha sido maximizar los ingresos que puede generar el sistema. Para ello, el único camino posible es conseguir que el sistema sea válido para el mayor número de corredores y conseguir de este modo que el canal de ventas sea lo más voluminoso posible.

Con el láser seleccionado de 100 mW no se alcanzarían los valores mínimos de densidad de potencia en las condiciones más desfavorables de iluminancia para lograr una visibilidad clara de la línea, pues:

$$\phi_{Fuente} = \frac{P}{S_{M\acute{a}x}} = \frac{100}{10} \left[\frac{mW}{cm^2} \right] = 10 \left[\frac{mW}{cm^2} \right] < 90 \left[\frac{mW}{cm^2} \right] = \phi_{M\acute{i}nima} (160klux)$$

¡No es visible!

Este sistema solo sería válido pues cuando se cumpliera la condición de visibilidad:

$$\phi_{Fuente} = 10 \left[\frac{mW}{cm^2} \right] \geq \phi_{Solar}$$

Esta se daría cuando la iluminancia solar no superara los 18 klux. En este caso, la proyección sería visible y el sistema sería útil para los usuarios $\left(160 klux * \frac{10 \left[\frac{mW}{cm^2} \right]}{90 \left[\frac{mW}{cm^2} \right]} = 18 klux \right)$.

Así pues, con los datos recabados en el punto 3.2.3 de la memoria se puede establecer el intervalo horario de visibilidad del sistema. Este sería de 17:00 horas a 8:00 horas en una de las menos soleadas (Noviembre) y de 19:00 horas a 8:00 horas para el que este sistema sería útil en una de las épocas más soleadas del año (Agosto) como se ajunta en la *Figura 7.1*.



Figura 7.1. Intervalo horario de visibilidad del sistema.

Transformando los datos de intervalo horario de visibilidad en cantidad de corredores que podrían utilizar este sistema, se obtiene un hipotético canal de ventas tal que:

- El 69,2% de los corredores son captados en época de **alta radiación solar**. (Figura 7.2)

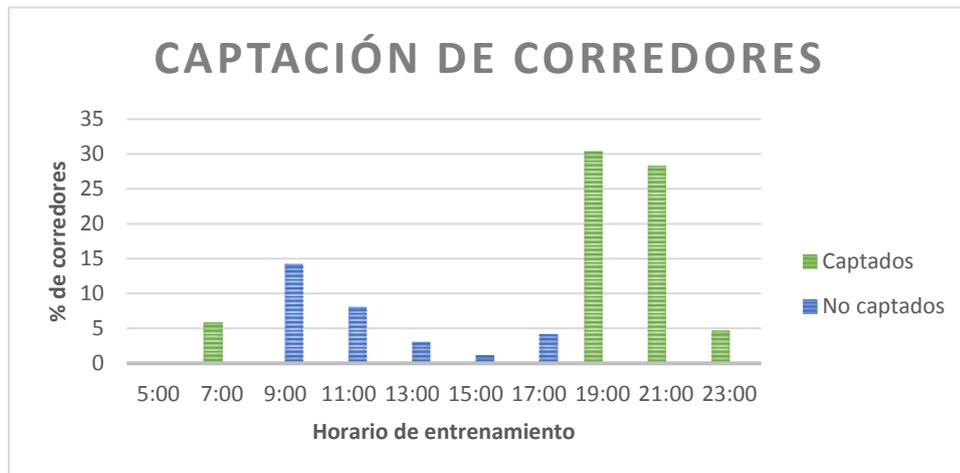


Figura 7.2. Canal de ventas con alta luz solar.

- El 76,6% de los corredores son captados en época de **baja radiación solar**. (Figura 7.3)

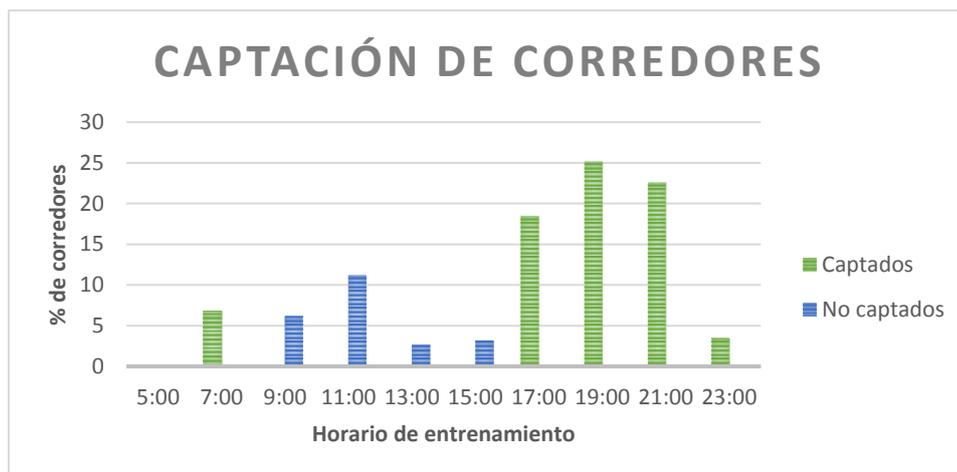


Figura 7.3. Canal de ventas con baja luz solar.

También se podrían haber seleccionado otros parámetros de potencia pero para notar un cambio sustancial en el volumen de ventas, y por tanto en los ingresos, se tendría que haber optado por 500 mW.

En estas condiciones, la proyección sería visible cuando la iluminancia solar no superara los 90 klux. Con esta nueva fuente se captaría el 77,8% de los corredores en época de alta radiación solar y el 88,3% de los corredores en época de baja radiación solar, pero el valor de coste de la lente casi se duplicaría pasando de 154,00 € a 275,00 € de p.v.p. Por este motivo y por el consumo que supondría colocar 500 mW, se ha considerado que la mejor opción es la lente de 100 mW.

8. *NUEVAS VÍAS DE INVESTIGACIÓN.*

Pese a que el principal objetivo de este proyecto ha sido colaborar con empresa incubada en Agencia Espacial Europea en la selección del sistema lumínico para un accesorio deportivo inteligente de alta calidad, quedan abiertos muchos caminos de investigación en los que seguir trabajando, así como en otras múltiples aplicaciones que este prototipo puede tener en un futuro.

Una línea imprescindible sería continuar mejorando el propio sistema de emisión lumínica. Esto se podría conseguir diseñando un emisor que permitiera colimar el haz en las dos direcciones, obtenido así un mayor control de la superficie proyectada. También se podría mejorar añadiendo nuevos parámetros que hagan más completo el sistema. Un ejemplo sería prototipar una fuente que permitiera cambiar de color, aparte del tamaño, en función de si el usuario va a mayor o a menor ritmo, aunque para ello habría que cambiar de fuente ya que la iluminación láser solo emite luz monocromática.

Además, este trabajo solo ha estado enfocado al mundo de los runners, pero el prototipo de iluminación diseñado podría tener una gran cantidad de aplicaciones fuera de él. En un campo en el que podría ser muy utilizado es en el del motor, ya que podría ser colocado sobre los automóviles para proyectar sobre la carretera la trayectoria correcta a seguir por el piloto. También se podría llevar a cabo la instauración de este sistema en los carteles informativos de autovías para proyectar sobre la carretera información útil al conductor como límite de velocidad o incluso sanciones económicas por infracciones viales.

9. REFERENCIAS

- [1] ROSA RUEDA, Andres. System and Method for Evaluating the Performance of a Golf Player. WO/2016/062903. 29 April 2016. PCT/ES2014/070804
- [2] STECHSCHULTE, Theodore. Dimmer for Sport Simulation Environment. 24 April 2015.
- [3] AFON SHIN VLADIMIR EVGEN EVICH. Method of preparation of athletes. 5 October 2015.
- [4] EMMANUEL, José. Lentes de 4iiii para monitorear el desempeño de deportistas. *Ideas de Negocio Rentables Por Internet*. 28 December 2015.
- [5] KOPIN CORPORATION. La tecnología en Río 2016: wearables, sensores y láser en deportistas y competiciones. *Mirtech*. 5 August 2016.
- [6] MOTORPRESS. Horario habitual de entreno de los runners. *Runners.es*. 22 February 2016.
- [7] *Física de la luz.pdf*.
- [8] *PMC.pdf* <http://www.preparadores.eu/temamuestra/Secundaria/PMC.pdf>
- [9] *rlt635_100g.pdf* http://www.roithner-laser.com/datasheets/ld_div/rlt635_100g.pdf
- [10] *eu-38-ttl.pdf* http://www.roithner-laser.com/datasheets/ld_driver/eu-38-ttl.pdf
- [11] *Mountig (ldmt-90-10-lt).pdf*.
- [12] *Lente colimadora (rgl-402-9c).pdf*.
- [13] *Lineal generator (pl650).pdf*.
- [14] Clima / Datos climatológicos - Medio Ambiente y Energía - Instituto Aragonés de Estadística - Departamentos y Organismos Públicos - Gobierno de Aragón. .
- [15] AFON SHIN VLADIMIR EVGEN EVICH. Method of training technical actions of athlete in playing sports. 4 October 2015.
- [16] NORRIS BRADLEY KENNETH. Sport board contact system. 22 September 2015.
- [17] GLEN J. ANDERSON. User interface based on wearable device interaction. 22 May 2007.
- [18] LO, Robin. Strip sport light. US5836673 A. 17 November 1998.
- [19] RUNNERING. Linterna Le Frontal MYO RXP Petzl. .
- [20] MSC. Nueva (y económica) gama de luces de seguridad para deportistas de MSC Bikes. *TodoMountainBike*. 1 April 2016.
- [21] ZONA TÁCTICA. Zona Táctica. Led lenser | Iluminacion. Frontal Head Fire revolution. *Zona Táctica*.
- [22] *El láser. M. Martínez Morillo y F. Sendra Portero.pdf*.

ANEXO 1. Patentes similares adicionales.

- **Método para la información y preparación de atletas. (15)**

FUNCIÓN.

Capta el movimiento de los atletas y forma una imagen visual que aporta información dinámica. Se sostiene delante de los atletas en un tamaño y perspectiva conveniente para la percepción visual y a una distancia óptima. El aporte de información al usuario se puede realizar: cambiando el texto, contenido simbólico y multimedia, los colores, el brillo, el contraste, el tamaño y la frecuencia de parpadeo de imagen visual de la información.

Se consigue un incremento en la técnica del atleta y la posibilidad de realizar cambios en las condiciones del proceso de formación, dependiendo del grado de preparación del deportista (pues mide las pulsaciones y transmite la información por radio).

DIFERENCIAS CON ESTE PROYECTO.

No matiza la colocación del producto y además, informar a los atletas durante el entrenamiento no es la intención de este sistema.

- **Sistema de iluminación inteligente para aparatos de deporte. (16)**

FUNCIÓN.

Sistema de iluminación para equipamiento deportivo que incluye una o más fuentes de color emisores de luz, por ejemplo, diodos emisores de rojo-verde-azul-luz que cuenta con un controlador que varía las emisiones de dichas fuentes de luz.

Un ejemplo de la técnica anterior en el campo de controlar el color de la luz basado en la aceleración. La aceleración en cada eje estará controlada por un led de color distinto a sus homólogos. El LED aumentará su intensidad luminosa si aumenta la aceleración en su eje correspondiente.



Figura A1.1. Sistema de iluminación inteligente para complementos deportivos. (16)

DIFERENCIAS CON ESTE PROYECTO.

El sistema de iluminación se coloca sobre material deportivo como puede ser tabla de surf o de snow, monopatines, motos de nieve, etc. Además la información no se proyecta sino que solo se varía la intensidad de un LED.

Por lo demás es un sistema muy parecido al nuestro, que informa al usuario durante la actividad deportiva a través de un sistema óptico que aporta una información de tipo dinámico.

- **Interfaz basada en la interacción usuario-dispositivo portátil. (17)**

FUNCIÓN.

Los dispositivos portátiles contienen sistemas y técnicas para lograr una interfaz que asegure la interacción del dispositivo portátil con el usuario, mediante intercambio de datos, escuchar música, ver vídeos... Toda esta información será almacenada de manera instantánea en la nube, creando así una base de datos inmediata. Estos dispositivos portátiles son objetos que están diseñados para ser usados en el cuerpo, interactuado durante la actividad (pues el tráfico de información se lleva a cabo mientras el sistema está en uso). Pues estarán ubicados generalmente en ropa o accesorios que incorporan la electrónica necesaria.

El contexto puede ser utilizado para aumentar (por ejemplo, adaptar, mejorar, etc.) las interacciones entre el usuario y otros. Por ejemplo, una pulsera puede sonar cuando un amigo viene a menos de diez pies del usuario. Pues, puede rastrear a las personas con un alto grado de precisión. Además, se puede silenciar para ser utilizados en lugares donde tal ruido puede ser perjudicial (lugar de culto).

DIFERENCIAS CON ESTE PROYECTO.

Es un sistema muy similar al nuestro, pero el tipo de datos que se quieren trasladar al usuario es completamente diferente. En nuestro proyecto, se aportará información del ritmo del corredor en la carrera, no se incluye nada sobre la proximidad espacial como en este caso.

Además, en principio nuestro producto no sale del ámbito deportivo. Sin embargo, la interfaz descrita también pretende llegar (a parte de al entorno deportivo) a la vida rutinaria del usuario.

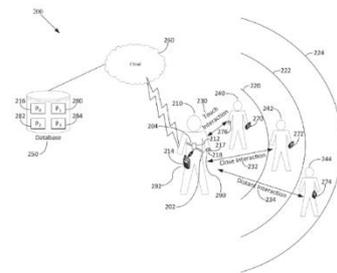


Figura A1.2. Modelado interacción usuario-dispositivo.

- **Strip sport light. (18)**

FUNCIÓN.

Cinta deportiva de iluminación parpadeante. La cinta es adaptable, se puede colocar en la cabeza o en el casco de la bicicleta.

DIFERENCIAS CON EL PROYECTO.

Diseñado desde el punto de vista de proporcionar seguridad al usuario. No aporta nada de información al cliente y además no es visible a la luz del día.

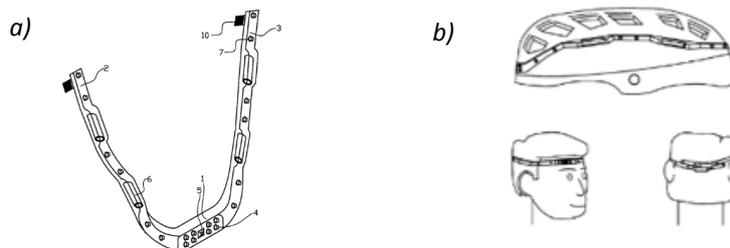


Figura A1.3. Strip sport light.
a) Prototipo b) Colocación

ANEXO 2. Productos comercializados similares adicionales.

- ***Linterna Frontal MYO RXP 3W LED 4,5V – PETZL. (19)***

FUNCIÓN.

La MYO RXP es el primer faro/linterna Petzl que está regulable y programable, que permite al usuario elegir el orden de los niveles de iluminación y adaptar con precisión la salida de luz.

La lámpara se puede programar para el tipo de actividad y la duración del uso. La máxima potencia de iluminación sería adecuada para una carrera corta por la noche, por ejemplo, una iluminación menos potente ayudaría a preservar la vida de la batería y por lo tanto sería ideal para una caminata de varios días.

DIFERENCIAS CON EL PROYECTO.

Su única aplicación es la iluminación para asegurar la seguridad del usuario en carreras nocturna. Esta luz no es proyectada en el terreno a plena luz del día.

ASPECTOS INTERESANTES DEL DISEÑO DE ESTE PRODUCTO.

Contiene ideas muy interesantes desde el punto de vista de del diseño de la iluminación para nuestro producto. Algunas de estas son:

1. Regulación de la potencia de la iluminación (tres modos de iluminación desde 8 hasta 140 lúmenes).
 2. Batería de refuerzo con dos pilas AAARL03, de autonomía en caso de emergencia.
 3. Lente que permite cambiar rápidamente de una iluminación de proximidad a la iluminación de un haz de luz enfocado a larga distancia en un solo movimiento.
- Otros productos similares a “8. Linterna Frontal MYO RXP 3W LED 4,5V – PETZL”.

4. MSC Light band. (20)

FUNCIÓN: Una banda de alta visibilidad que permite a cualquier deportista hacerse visible en la oscuridad. Diseñada para ser colocada en las extremidades izquierdas (brazo o pierna), está fabricada en silicona flexible y sellada ante los elementos externos más agresivos (lluvia, polvo, etc).

SEMEJENZAS Y DIFERENCIAS CON NUESTRO PRODUCTO: Se coloca en las extremidades y su única aplicación es la iluminación.

5. Frontal LED lenser head fire revolution. (21)

Muy similar a Linterna Frontal MYO RXP 3W LED 4,5V – PETZL pero con sistema de iluminación regulable a través de un potenciómetro.

ANEXO 3. Factores que afectan a la cantidad de radiación/luz solar que llega a la superficie terrestre.

El flujo de luz solar puede llegar a la superficie con diferente intensidad que la luz emitida inicialmente por el Sol. Esto se debe a que factores de diferente naturaleza como los que se exponen a continuación se interponen en su recorrido hasta la Tierra.

1. Factores geográficos.

Latitud. Inclinación del suelo.

Paralelos. Líneas imaginarias de Este-Oeste. La línea del ecuador se conoce como paralelo 0°, que divide a nuestro planeta en dos mitades iguales: El hemisferio Norte y el hemisferio Sur.

La Tierra circunda al Sol, en su órbita, una vez al año, dando lugar a las cuatro estaciones. Al estar el eje de rotación de la Tierra inclinado con respecto al plano de su órbita, el ángulo y la superficie de incidencia de los rayos solares varía, estacionalmente, de forma diferente para ambos hemisferios.

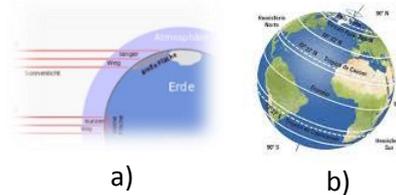


Figura A3.1.

En este caso se produce una distribución natural de la radiación sobre la esfera terrestre, debido a que el ángulo de incidencia de los rayos solares varía con la latitud geográfica. Es decir, el Hemisferio Norte los rayos incidirán más ortogonalmente que el Hemisferio Sur (entorno al paralelo 30°) durante los meses de Junio, Julio y Agosto, por lo que recibirá más energía solar. Recíprocamente, durante los meses de Diciembre, Enero y Febrero, el Hemisferio Sur recibe más energía solar que el similar del Norte, en torno al paralelo -30°.

La intensidad de la radiación sobre una superficie, sigue la ley del coseno. Esta dice que el modulo incidente decrece en forma proporcional al coseno del ángulo de incidencia en relación a la normal

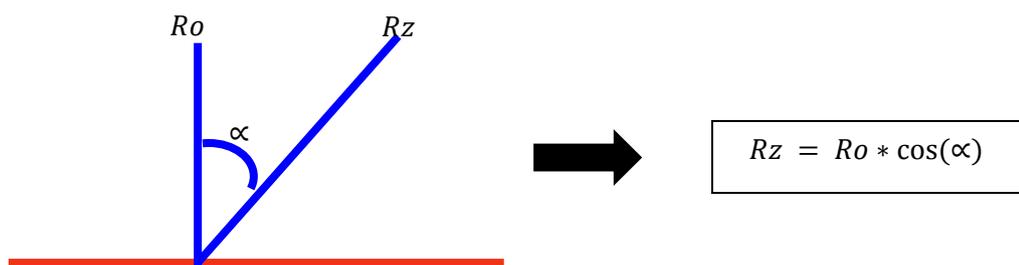


Figura A3.2.

Horas del día.

Meridianos. Líneas imaginarias de Norte a Sur. El meridiano de referencia es el meridiano 0°, o de Greenwich que divide a la Tierra en hemisferio occidental y hemisferio oriental.

En el caso de España la mayor radiación solar se da a las entre las 12.00 h. y las 15.00 h. Pues es en esta franja horaria, en la que su meridiano



Figura A3.3.

(con coordenadas - 9,10 / 3.25º) se encuentra en una posición más normal al sol.

Altitud.

La intensidad es más elevada cuanto mayor es la altitud a la que se encuentra el usuario. A mayor altura sobre el nivel del mar, la capa de aire es más delgada, evitando el cruce de la luz solar con airea, partículas en suspensión, nubes, FCCs... De esta manera, se pierde una menor parte de luz solar en su propagación hasta la superficie terrestre.

De acuerdo a los datos adjuntados al final de este anexo donde se exponen las irradiaciones solares directas y difusas de 4 ciudades españolas con diferente altitud, se considera que este factor afecta mínimamente a la luz solar y se podrá considerar despreciable. Pues en Ávila (la ciudad más alta de España) se tiene una irradiación directa de $5,77 \frac{kWh}{m^2 * día}$ y Barcelona (prácticamente a 0 msnm) $5,25 \frac{kWh}{m^2 * día}$ en el mes de Junio

2. Factores atmosféricos.

Nubosidad.

Las nubes también juegan un papel fundamental en la llegada de la radiación terrestre al planeta. Pues un 30% de esta energía es reflejada y devuelta al sistema solar antes de que sea utilizada. Nubes de gran extensión horizontal reflejan radiación solar limitando así la disponible de la Tierra.

Smog fotoquímico y partículas en suspensión (en grandes ciudades).

Una consecuencia, muy típica hoy en día, de la alta contaminación que sufren las ciudades es el smog fotoquímico. Se trata de una nube formada por pequeñas partículas que envuelve las ciudades. Estas reflejan una parte de la luz que proviene del Sol en una cantidad muy pequeña, prácticamente despreciable.

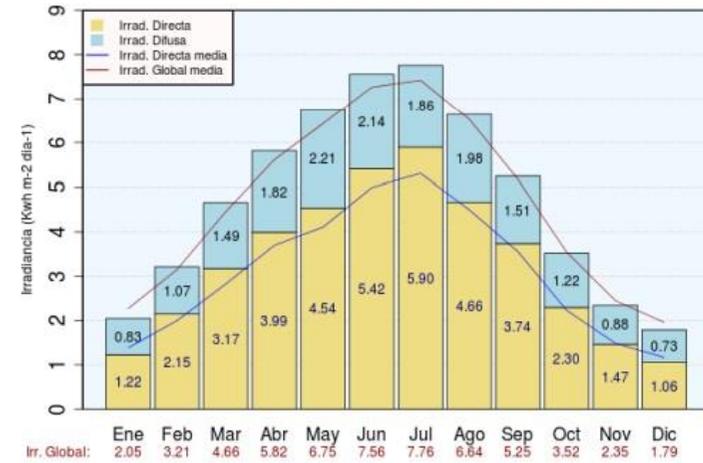
Barcelona

(4 metros de altitud media sobre el nivel del mar)



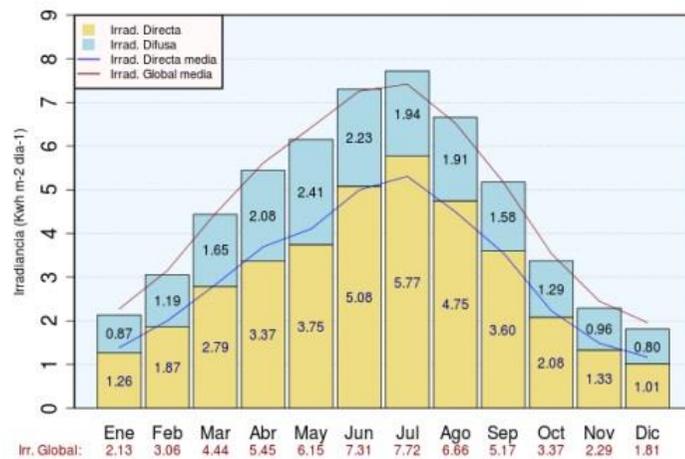
Zaragoza

(226 metros de altitud media sobre el nivel del mar)



Ávila

(1131 metros de altitud media sobre el nivel del mar)



Madrid

(667 metros de altitud media sobre el nivel del mar)



ANEXO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL COMPORTAMIENTO DE SUPERFICIES.

ANEXO 4a. Resultados de las mediciones de la luz solar en diferentes superficies y a diferentes ángulos.

	ASFALTO			CAMINO DE TIERRA O FANGO DURO			CEMENTO			HIERBA / CÉSPED		
	11:00	15:00	19:00	11:00	15:00	19:00	11:00	15:00	19:00	11:00	15:00	19:00
-85°	202	202,3	206,5	468	358,6	139,4	334	197,7	121,2	135	92,4	40,5
-60°	206	199,8	224,8	483	455	149	346	300,8	168,8	137	103,8	68,7
-30°	208	178,6	236,2	509	500	134,8	351	337,1	131,1	115	109,5	77,2
0°	191	213,2	213,2	466	510	121,7	326	352,3	124,9	102	133,6	63,1
30°	171	246,2	202,3	415	500,2	98,1	280	348,1	116,2	122	150,2	40,9
60°	169	206,5	199,8	403	471	93,5	257	340,7	109,3	99	137,5	43,2
85°	166	224,8	188,6	326	357,4	79,9	241	239,9	88,8	90	141,3	35,7
$\Delta I]_{MAX}$	42	67,6	47,6	183	152,6	69,1	110	154,6	80	47	57,8	41,5

Datos experimentales del nivel de luminosidad (06/08/2016 en Parque Grande, Zaragoza).

	ASFALTO			CAMINO DE TIERRA O FANGO DURO			CEMENTO			HIERBA / CÉSPED		
	11:00	15:00	19:00	11:00	15:00	19:00	11:00	15:00	19:00	11:00	15:00	19:00
-85°	151,2	199,9	8,5	332,4	371,9	13,8	131,8	203,8	14,6	84,6	84,2	13,4
-60°	148,3	208,1	6,1	336,1	381,1	11,1	137,5	229,3	11,4	83,4	95,6	9,4
-30°	139,6	182,8	5,8	276,9	357,1	9,2	152,7	250,2	8,9	55,5	64,8	6,2
0°	123,5	165,5	3	214,1	347,9	5,2	165,9	276,6	7,8	43,6	83,5	4,9
30°	115,9	163,4	4,3	208,5	336,8	7,2	186,2	289,7	14,8	97,5	91,7	6,5
60°	119,7	164,2	4,9	246,3	345,2	8,8	249,2	303,9	16,5	85,2	108,2	10,0
85°	128,5	168,1	6,2	302,2	330,2	10,1	207,3	238,2	23,2	102,3	116,4	14,2
$\Delta I]_{MAX}$	35,3	44,7	5,5	127,6	50,9	8,6	117,4	85,9	15,4	58,7	51,6	9,3

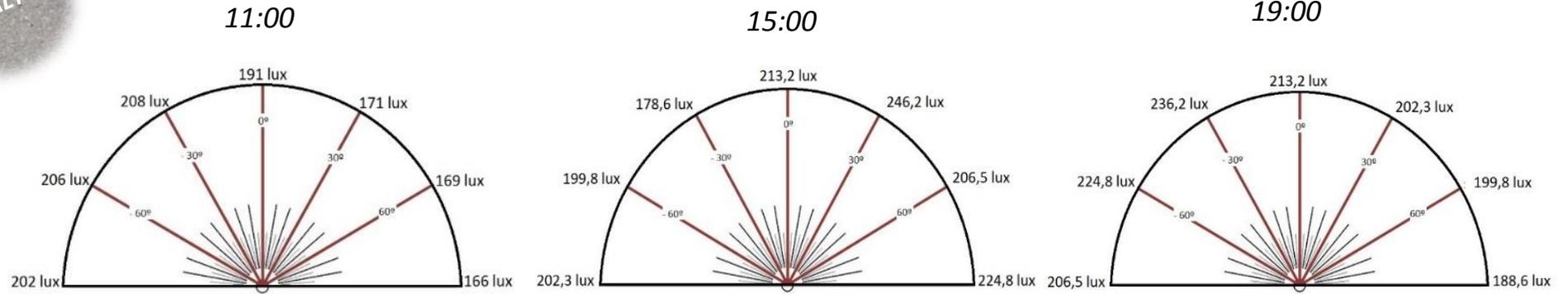
Datos experimentales del nivel de luminosidad (29/09/2016 en Parque Grande, Zaragoza).

* NOTA: Como se observa en las mediciones a las 19:00 h. los valores son muy pequeños en comparación con los tomados a primeros de Agosto. Esto se debe a que el sol a esta hora y en Octubre ya está muy bajo, por lo que se creaban grandes zonas a las que la radiación solar no llegaba correctamente (sombras).

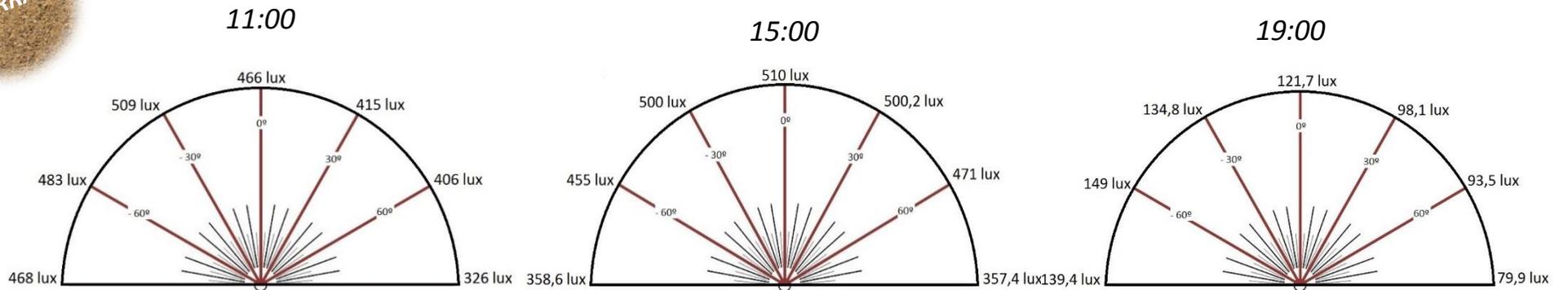
ANEXO 4b. Diagramas polares de las diferentes superficies de estudio para cada franja horaria.

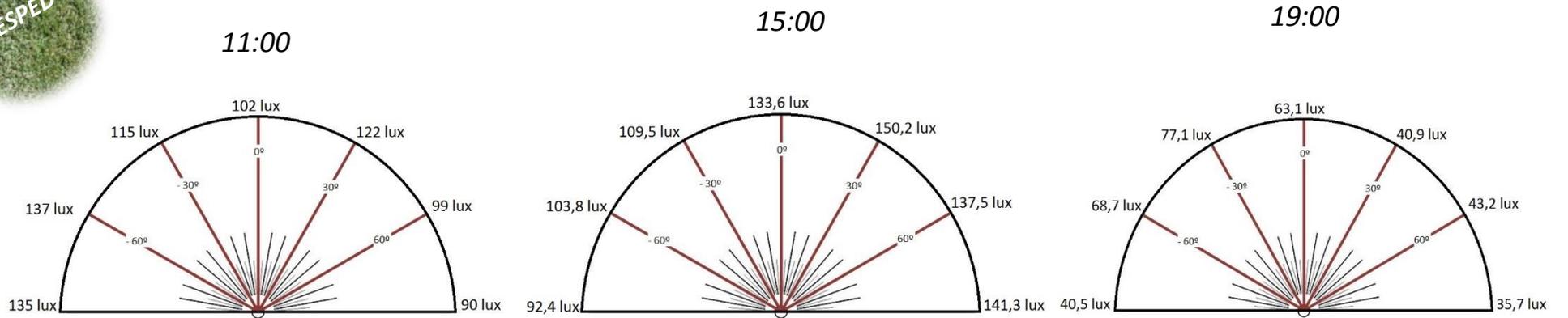
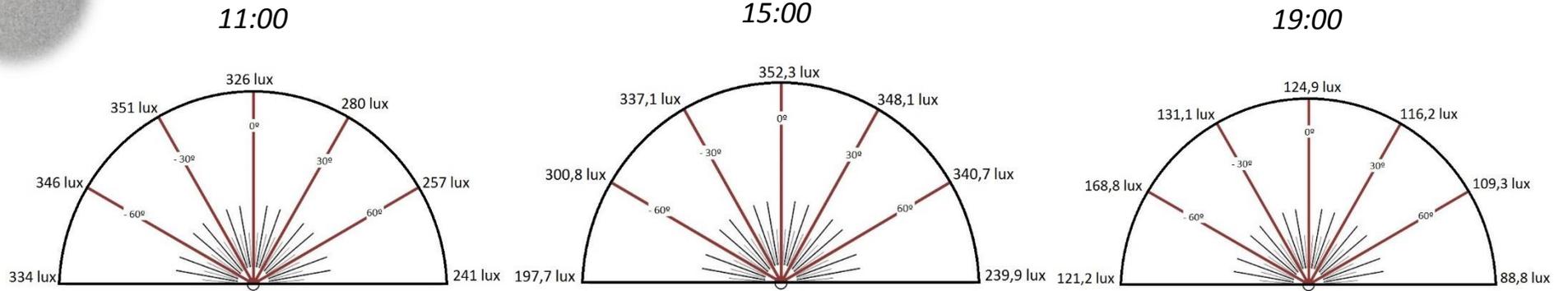


ASFALTO

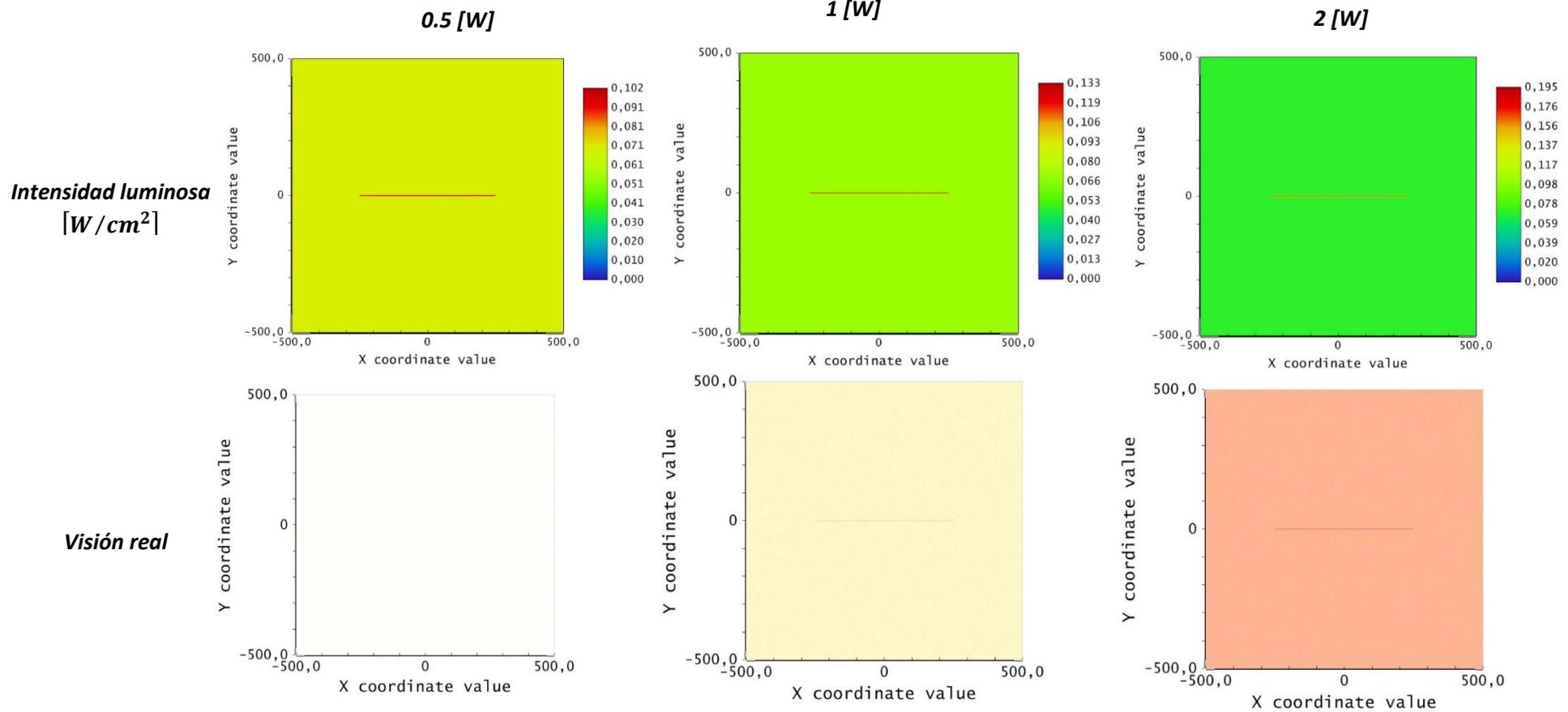


TIERRA





ANEXO 5. Resultados finales obtenidos en OpticalStudio.



ANEXO 6. Fundamentos básicos del láser.

A continuación, se exponen los fundamentos básicos de la tecnología láser, así como de las partes que lo componen. Para ello se ha recurrido a la fuente (22).

ANEXO 6a. Principios de funcionamiento básico y componentes del láser.

Los láseres son dispositivos que generan y amplifican señales electromagnéticas. Un sistema de emisión láser está formado por un medio activo, un sistema de bombeo y una cavidad resonante.

En el medio activo es el lugar físico donde tiene lugar la emisión estimulada. El resultado de la emisión estimulada será una serie de fotones, todos de idéntica frecuencia, que a su vez provocarán más emisión de radiación, de forma que se origina una especie de “reacción en cadena” de producción de fotones

El sistema de bombeo se encarga de elevar los electrones a niveles energéticos superiores aportando energía externa para aumentar el número de átomos excitados y así garantizar la inversión de población, es decir, que haya más miembros en un estado excitado que en estados de menor energía.

Finalmente, una vez creada y mantenida la inversión de población en el medio activo, el hecho que completa el proceso de producción láser es el empleo de una cavidad resonante, compuesta por dos espejos perfectamente paralelos, uno en cada extremo del material activo. El láser está construido de forma que el haz de radiación, al reflejarse, pase sucesivas veces por el medio activo; de este modo, el número de fotones emitidos se amplifica a cada paso. Uno de los dos espejos es parcialmente reflectante y permite que parte del haz salga fuera de la cavidad. La cavidad resonante permite alcanzar tres objetivos esenciales:

- Aprovechar al máximo la inversión de población.
- Realizar la amplificación en una única dirección.
- Lograr la predominante mono-cromaticidad de la emisión.

Cuando la inversión de población ha producido la caída espontánea de unos cuantos electrones al nivel estable origina los fotones, con la frecuencia adecuada para iniciar la reacción en cadena de emisión estimulada, en un medio que siempre mantiene un nivel de población invertida –gracias al sistema de bombeo- y en el que constantemente hay fotones de idéntica frecuencia pasando a su través, manteniendo la emisión estimulada hasta que cese el bombeo energético.

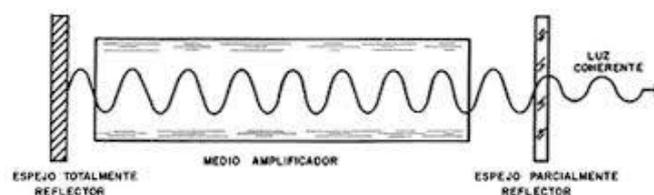


Figura A5.1. Partes del sistema de iluminación láser.

ANEXO 6b. Cualidades de la luz láser.

La radiación láser posee todas las propiedades de la luz. Sin embargo, se caracteriza por ser:

1. **Colimado.** Indica que el flujo de la energía es unidireccional, de modo que cada rayo del haz puede considerarse paralelo a cualquier otro. La radiación láser tiene una divergencia muy pequeña, es decir, puede ser proyectado a largas distancias sin que el haz se abra o disemine la misma cantidad de energía en un área mayor. Esto se consigue a través de una lente denominada colimador.

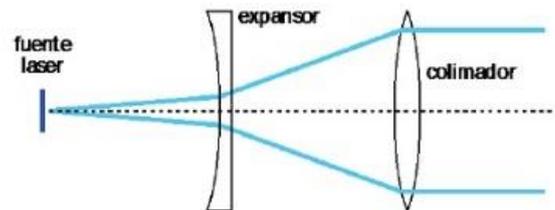


Figura A5.2. Colimación luz láser.

2. **Coherente.** Implica que todos los fotones están en fase. Al coincidir en una misma dirección de propagación, los estados vibracionales se suman, provocando un efecto de amplificación en la intensidad luminosa emitida.

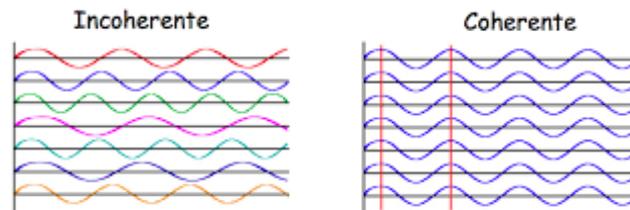


Figura A5.3. Coherencia luz láser.

3. **Cuasi-monocromático.** Se puede considerar que emite una radiación electromagnética de una sola longitud de onda, la cual se identifica por el color del haz. En cambio, la mayoría fuentes convencionales emiten en un rango más amplio, entre el visible y el infrarrojo y por eso desprenden calor.

ANEXO 7. Temperaturas medias mensuales en las capitales de provincia de Aragón, La Rioja y Navarra.

Instituto Aragonés de Estadística / Medio Ambiente y Energía / Clima / Datos climatológicos

Temperaturas.

Temperaturas medias mensuales en las capitales de provincia de Aragón, La Rioja y Navarra. Año 2015.

Unidad: grados centígrados (°C).

	Media anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Zaragoza (Aeropuerto)	16,5	7,1	7,2	12,0	15,7	20,2	24,8	28,2	25,6	20,8	16,8	12,3	7,8
Huesca (Monflorite)	15,5	5,8	6,3	11,4	14,4	18,9	23,4	27,3	24,2	19,0	15,8	10,9	8,6
Teruel (Observatorio)	13,5	4,0	4,0	8,6	12,2	16,7	19,9	25,8	22,7	17,5	13,3	9,9	7,3
Logroño (Aeropuerto)	14,4	6,3	5,5	10,9	13,6	17,4	21,6	25,0	22,8	18,0	14,4	11,2	6,5
Pamplona (Aeropuerto)	13,6	5,9	4,7	9,8	13,7	16,1	20,3	23,2	21,7	16,4	13,9	10,4	7,0

Publicación: © Instituto Aragonés de Estadística (IAEST), enero de 2016.

Fuente: Agencia Estatal de Meteorología AEMET (www.aemet.es)

ANEXO 8. Verificación del cumplimiento de la normativa. Clasificación de láseres pulsados y requisitos de fabricación necesarios según norma: UNE EN 60825-1/A2-2002.

Los láseres no forman un grupo homogéneo de riesgo ya que, dependiendo de sus características técnicas pueden emitir radiación en un amplio intervalo de longitudes de onda, con potencias o energías de salida muy variables y con una distribución temporal que puede ser continua o en impulsos. Además las distintas aplicaciones, condicionan el tiempo de exposición, que es un factor clave para determinar el riesgo.

La clasificación de un láser en categorías de riesgo, permite identificar la peligrosidad del mismo y está basada en el Límite de Emisión Accesible (LEA) para el usuario. Dependiendo del LEA el láser obtendrá una clasificación u otra.

Especificación completa de la LEA según UNE-EN 60825-4

1. Magnitud y variación en el tiempo de la irradiancia o exposición radiante en la superficie frontal del sistema frente a la radiación láser. $100 \left[\frac{W}{m^2} \right]$
2. Duración global de la exposición. 0.5 s
 - * *Nota: Como el deportista va a estar en continuo movimiento, se coge que el tiempo que va a incidir sobre la misma parte de la superficie el tiempo de pulsado. 0.5 s*
3. Longitud de onda. 635 nm
4. Ángulo de incidencia. 30°
5. Dimensiones mínimas de área irradiada. $2 * 10^{-4} [m^2]$
 - * *Nota: No tiene trascendencia en este proyecto ya que no se puede regular el área proyectada por lo que se ha cogido la mínima, es decir, el área de salida.*

La clasificación de la norma UNE EN 60825-1/A2 publicada en 2007 se adjunta en la *Tabla A8.1* al final de este Anexo. Esta agrupa los láseres en 4 clases generales (7 en total), especificando para cada uno de ellos los límites de emisión accesibles (LEAs) o niveles de emisión accesible máximos permitidos dentro de una clase determinada. Así pues, un láser como el seleccionado con las características anteriormente descritas pertenecería a la *clase 3R*.

Por este motivo, se deberá cumplir con los requisitos de fabricación que se adjuntan también en la *Tabla A8.2*. A continuación, se exponen los seleccionados para un láser de clase 3R:

- Cubierta protectora.
- Bloque de seguridad.
- Aviso de emisión.
- Barrido.
- Etiquetas de figuras normalizadas y texto.
- Manual con instrucciones de seguridad.
- Información de compra y o servicio técnico.

Las restricciones que son principalmente de etiquetado. En cada unidad de producto láser deberá incluirse:

1. Etiqueta de advertencia sobre la presencia de radiación láser.

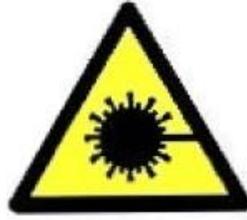


Figura 8.1. Etiqueta de advertencia.

2. Etiqueta explicativa sobre el tipo de radiación láser ante el que se está.



Figura 8.2. Etiqueta explicativa.

3. Etiqueta de abertura. Advierte al usuario de por donde se emite la radiación solar.



Figura 8.3. Etiqueta de abertura.

Además, la obligación de informar a los usuarios sobre los posibles riesgos del láser durante su uso, recae sobre el fabricante. Por este motivo, se aconseja que se realice un manual con instrucciones de seguridad que deberá contener:

1. Especificación completa y detallada de la LPE.
2. Nombre del fabricante. Fecha y lugar de fabricación acorde con lo expuesto en la Norma ISO 11553-1.
3. Descripción de las aplicaciones o usos permitidos del sistema.
4. Declaración de conformidad con la norma UNE EN 60825-1/A2.

Incluyendo en el producto todas las anteriores especificaciones, se considera más que suficiente para que el producto cumpla la normativa vigente.

Clase 1	Productos láser que son seguros en todas las condiciones de utilización razonablemente previsibles, incluyendo el uso de instrumentos ópticos en visión directa.
Clase 1M	Láseres que emitiendo en el intervalo de longitudes de onda (λ) entre 302,5 y 4000 nm son seguros en condiciones de utilización razonablemente previsibles, pero que pueden ser peligrosos si se emplean instrumentos ópticos para visión directa. (Ver 8.2 en la norma).
Clase 2	Láseres que emiten radiación visible en el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 400 y 700 nm. La protección ocular se consigue normalmente por las respuestas de aversión, incluido el reflejo parpebral. Esta reacción puede proporcionar la adecuada protección aunque se usen instrumentos ópticos.
Clase 2M	Láseres que emiten radiación visible (400 y 700 nm). La protección ocular se consigue normalmente por las respuestas de aversión, incluido el reflejo parpebral, pero la visión del haz puede ser peligrosa si se usan instrumentos ópticos. (Ver 8.2)
Clase 3R	Láseres que emiten entre 302,5 y 106 nm, cuya visión directa del haz es potencialmente peligrosa pero su riesgo es menor que para los láseres de Clase 3B. Necesitan menos requisitos de fabricación y medidas de control del usuario que los aplicables a láseres de Clase 3B. El límite de emisión accesible es menor que 5 veces el LEA de la Clase 2 en el rango 400-700 nm, y menor de 5 veces el LEA de la Clase 1 para otras longitudes de onda.
Clase 3B	Láseres cuya visión directa del haz es siempre peligrosa (por ej. dentro de la Distancia Nominal de Riesgo Ocular). La visión de reflexiones difusas es normalmente segura (véase también la nota 12.5.2c).
Clase 4	Láseres que también pueden producir reflexiones difusas peligrosas. Pueden causar daños sobre la piel y pueden también constituir un peligro de incendio. Su utilización precisa extrema precaución.

Tabla A8.1. Clasificación láseres pulsados

Requisitos	Clasificación						
	1	1M	2	2M	3R	3B	4
Cubierta protectora	--	O	O	O	O	O	O
Bloqueo de seguridad	X	X	X	X	+	+	+
Control remoto	--	--	--	--	--	O	O
Control de llave	--	--	--	--	--	O	O
Aviso de emisión	--	--	--	--	O	O	O
Atenuador del haz	--	--	--	--	--	O	O
Localización de controles	--	--	--	--	♣	♣	♣
Óptica de observación	--	▼	▼	▼	▼	▼	▼
Barrido	O	O	O	O	O	O	O
Etiqueta de Clase	T	T	F, T	F, T	F, T	F, T	F, T
Etiqueta de abertura	--	--	--	--	Te	Te	Te
Etiqueta de entrada en servicio	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
Etiqueta de neutralización del bloqueo	©	©	©	©	©	©	©
Etiqueta de intervalo de λ	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼
Etiqueta de LED	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Manual con instrucciones de seguridad	O	O	O	O	O	O	O
Información de compra y servicio técnico	O	O	O	O	O	O	O
Productos médicos	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣

- O Obligatorio
- No necesario
- X Necesario para impedir emisión > 3R
- ♣ Necesario para impedir emisión > LEA Clase 1 ó 2
- Te Texto especificado requerido
- ▲ Correcciones de texto necesarias para productos LED
- ♣ Se aplica la norma CEI 60601-2-22
- + Necesario para impedir emisión > 3B
- T Texto requerido
- ▼ La emisión debe ser < LEA de la Clase 1
- F Figuras normalizadas
- (*) Obligatoria y específica para cada Clase
- ▼ Obligatoria para ciertos intervalos de λ
- © Obligatoria en ocasiones según la Clase

Tabla A8.2. Requisitos de fabricación de los láseres.