

Trabajo Final de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales (GETI)

Definición de los componentes y del funcionamiento de un captador de luz solar

MEMORIA

Autor: Marta Cases Alcover, María Cervera Barrado
Director: Joaquín Fernández Sánchez
Convocatoria: Septiembre 2020



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Índice

1.	PREFACIO	9
2.	INTRODUCCIÓN.....	10
2.1.	Objetivos del proyecto.....	11
2.2.	Alcance y limitaciones del proyecto	11
3.	ESTADO DEL ARTE.....	13
3.1.	Tubos solares.....	13
3.1.1.	Cúpula	14
3.1.2.	Captador de luz solar	16
3.1.3.	Seguimiento del Sistema Solar	24
3.2.	Motores	27
3.2.1.	Motor de corriente continua	27
3.2.2.	Motor de corriente alterna	28
3.2.3.	Motor paso a paso	29
3.3.	Mecanismos de transmisión de movimiento.....	30
3.3.1.	Engranajes	31
3.3.2.	Sistema de poleas con correa.....	35
3.3.3.	Sistemas de ruedas de fricción	37
3.3.4.	Cadenas	39
3.4.	Eje del rotor.....	40
3.5.	Sistema Arduino	41
4.	ELECCIÓN DE LOS COMPONENTES.....	43
4.1.	Motores	43
4.2.	Sistemas de transmisión de movimiento.....	46
4.2.1.	Movimiento vertical del tubo intermedio	46
4.2.2.	Movimiento horizontal de la esfera	48

4.2.3. Movimiento del espejo de desvío	51
4.3. Seguimiento solar	52
4.4. Actuador.....	53
5. SOLUCIÓN DEL CAPTADOR	54
5.1. Requerimientos del diseño.....	54
5.2. Relación de diámetros entre la esfera y la lente de Fresnel	54
5.3. Apertura inferior de la esfera.....	57
5.4. Movimiento de la esfera sobre el eje vertical	61
5.4.1. Tubo intermedio.....	61
5.4.2. Unión entre el tubo intermedio y la esfera.....	62
5.4.3. Engranaje de ejes paralelos.....	63
5.4.4. Conjunto de dos ejes con correa.....	65
5.4.5. Motor paso a paso	66
5.4.6. Unión entre el tubo intermedio y el tubo reflectante	67
5.5. Movimiento de la esfera sobre el eje horizontal	67
5.5.1. Sistema piñón – cremallera.....	67
5.5.2. Conjunto de dos ejes con correa.....	69
5.5.3. Motor paso a paso	70
5.6. Movimiento del espejo de desvío	71
5.6.1. Espejo.....	72
5.6.2. Unión entre eje del espejo y esfera.....	72
5.6.3. Conjunto de dos poleas con correa.....	73
5.7. Ejes de los motores.....	74
6. PROVEEDORES Y PRESUPUESTO	75
7. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL	80
7.1. Plásticos.....	80
7.2. Vidrio.....	81
7.3. Aluminio	81

7.4. Acero inoxidable.....	81
CONCLUSIONES Y FUTUROS PROYECTOS	83
AGRADECIMIENTOS.....	84
BIBLIOGRAFÍA	85
Referencias bibliográficas	85

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Tubo solar.....	13
Ilustración 2. Claraboya de PMMA.....	15
Ilustración 3. Claraboya de PC.....	15
Ilustración 4. Claraboya de vidrio.....	16
Ilustración 5. Focalización de los rayos solares en una Lente de Fresnel.....	17
Ilustración 6. Lente Fresnel con Sílice.....	18
Ilustración 7. Lente Fresnel con Vidrio BK7.....	19
Ilustración 8. Lente Fresnel de PMMA.....	19
Ilustración 9. Lente Fresnel policarbonato.....	20
Ilustración 10. Lente Fresnel PVC.....	20
Ilustración 11. Espejo de aluminio.....	22
Ilustración 12. Espejo de metacrilato.....	22
Ilustración 13. Espejo de desvío de vidrio.....	23
Ilustración 14. Espejo de desvío plata.....	23
Ilustración 15. Sistemas de seguimiento de uno y dos ejes.....	25
Ilustración 16. 1. Piranómetro y 2. Pirheliómetro.....	26
Ilustración 17. Motor paso a paso.....	29
Ilustración 18. (a) Engranaje cilíndrico de dientes rectos externo. (b) Engranaje cilíndrico de dientes rectos interno.....	31
Ilustración 19. (a) Engranaje cilíndrico de dientes helicoidales simple. (b) Engranaje cilíndrico de dientes helicoidales doble.....	32
Ilustración 20. Engranaje cónico de dientes rectos.....	33
Ilustración 21. Engranaje cónico de dientes helicoidales.....	33
Ilustración 22. Engranaje cónico de dientes helicoidales cruzados.....	34
Ilustración 23. Engranaje cónico hipoide.....	34
Ilustración 24. Engranaje cónico de rueda y tornillo sin fin.....	35
Ilustración 25. Sistemas de poleas con correa.....	36
Ilustración 26. (a) Correa redonda. (b) Correa trapezoidal. (c) Correa plana. (d) Correa sincronizada.....	37
Ilustración 27. Ruedas de fricción.....	38
Ilustración 28. Ruedas de fricción exteriores.....	38
Ilustración 29. Ruedas de fricción interiores.....	39
Ilustración 30. Ruedas de fricción troncónicas.....	39
Ilustración 31. Transmisión por cadenas.....	40
Ilustración 32. Rotor de un motor.....	41

Ilustración 33. Placa de Arduino.....	41
Ilustración 34. Motor paso a paso.	45
Ilustración 35. Sistema de engranajes paralelos de dientes rectos externo.....	47
Ilustración 36. Sistema de transmisiones de la rotación de la esfera.....	48
Ilustración 37. Sistema de transmisión por correa abierta.....	49
Ilustración 38. Sistema de transmisión piñón-cremallera curva	51
Ilustración 39. Sistema de transmisión de poleas con correa.	52
Ilustración 40. Lente Fresnel incrustada en esfera.....	55
Ilustración 41. Relación distancia Lente Fresnel a centro de la esfera.....	55
Ilustración 42. Movimiento del espejo en función de lente Fresnel	59
Ilustración 43. Relación de reflexión.....	60
Ilustración 44. Esfera.....	61
Ilustración 45. Unión entre el tubo intermedio y la esfera.....	63
Ilustración 46. Engranaje de ejes paralelos.....	65
Ilustración 47. Conjunto de dos ejes con correa.	66
Ilustración 48. Conjunto de movimiento vertical.	66
Ilustración 49. Sistema de transmisión piñón-cremallera.	69
Ilustración 50. Conjunto de dos ejes con correa	70
Ilustración 51. Movimiento eje horizontal con motor paso a paso.	70
Ilustración 52. Orientación del espejo de desvío	71
Ilustración 53. Eje y espejo de desvío	72
Ilustración 54. Unión entre espejo y esfera	72
Ilustración 55. Sistema de transmisión poleas con correa.	73
Ilustración 56. Conjunto de dos poleas con correa.	74

Índice de tablas

Tabla 1. Tabla comparativa de los seguidores solares de uno y dos ejes.	25
Tabla 2. Ventajas e inconvenientes de motores paso a paso.	44
Tabla 3. Ventajas e inconvenientes de motores de corriente continua.	44
Tabla 4. Ventajas e inconvenientes de los engranajes cilíndricos de dientes rectos.	46
Tabla 5. Ventajas e inconvenientes de los engranajes cilíndricos de dientes helicoidales.	47
Tabla 6. Tabla comparativa tipos de correas.	49
Tabla 7. Relación de dimensiones entre (R) y (f).	56
Tabla 8. Ángulo de incidencia de la radiación solar en diferentes estaciones en diferentes ciudades.	58
Tabla 9. Tabla de ángulos límite	59
Tabla 10. Tabla coeficiente de seguridad para diferentes tipos de carga.	68
Tabla 11. Tabla componentes.....	78

1. Prefacio

Existe una estrecha relación entre la luz natural y la salud física y emocional de una persona. La luz procedente del sol contribuye al bienestar además de mejorar el rendimiento cognitivo y la productividad. Es un hecho probado que la luz influye en el estado de ánimo y por ello los espacios iluminados con luz natural tienen una mejor respuesta psicológica^[1].

En consecuencia, el ser humano históricamente ha buscado soluciones de iluminación natural para mejorar tanto su calidad de vida como su rendimiento profesional. Tal es así, que la disponibilidad de luz solar es una de las condiciones más valoradas a la hora de escoger un espacio en el cual vivir, estudiar o trabajar.

Este proyecto parte de la necesidad de iluminar espacios interiores aprovechando la luz solar. Para ello, existen sistemas capaces de captar la luz del Sol y transportarla a un espacio interior sin necesidad de transformarla en electricidad. Para poder diseñar un modelo de captación de luz solar definitivo, es necesario estudiar y optimizar estas tecnologías de iluminación natural.

Alejandro Mor, exalumno de la ETSEIB es el autor del proyecto “*Un estudio de un sistema de iluminación natural para edificios*”^[2], en el cual se plantea un estudio de las alternativas y de la viabilidad de un sistema de iluminación natural.

Partiendo de este estudio previo, se procede a definir los componentes y el funcionamiento de un captador de luz natural.

2. Introducción

El proyecto del cual se parte plantea el estudio de un sistema de iluminación natural para espacios interiores. El trabajo actual está enfocado como prediseño que aporte un nivel más de definición al captador del cual se parte. Sin embargo, aunque se pretende definir y relacionar cada uno de los componentes que forman el sistema, no se procederá a su optimización ni se llegará a un diseño final con dimensiones definitivas.

Este sistema se basa en el diseño de un tubo solar que capta, transporta y difunde la luz solar en lugares que no se pueden iluminar mediante luz natural directa. El diseño está compuesto de tres elementos principales:

- Captador de luz solar.
- Conducto reflejante.
- Difusor.

El captador es el responsable de captar la luz y el conducto de transportarla hasta el difusor a través del cual se ilumina el espacio. El captador a su vez está compuesto por los siguientes componentes principales:

- Lente Fresnel.
- Espejo desviador de luz solar.
- Tres motores.
- Sistema de transmisión del movimiento.
- Software de control.

La lente de Fresnel y el espejo desviador se encargan de captar, concentrar y redirigir los rayos solares. Los motores son necesarios para orientar la captación de luz a una dirección determinada, lo que incluye implementar un sistema de seguimiento solar. Además, se necesita de un sistema de transmisiones y de un software de control para dirigir en movimiento del captador.

En el proyecto actual se realiza un estudio técnico de los componentes y del funcionamiento de un captador de luz solar basado en el conjunto de Alejandro Mor. Para ello, se definirán cada uno de los componentes (incluyendo el sistema de transmisiones) y su funcionamiento.

2.1. Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar un estudio técnico sobre los componentes y el funcionamiento de un diseño existente de un captador de luz solar. Se plantea este proyecto como un prediseño que sienta las bases para poder optimizar el captador en un futuro proyecto. Se pretende que con este estudio queden definidos los siguientes aspectos:

- Diseño y funcionamiento de los componentes.
- Diseño y funcionamiento del sistema de transmisiones.
- Selección de los proveedores.

Con el propósito de aportar mayor valor al proyecto, se establecen los siguientes objetivos secundarios:

- Estudio y viabilidad de alternativas.
- Facilitar la implementación del concepto "*Do it yourself*".

2.2. Alcance y limitaciones del proyecto

Partiendo de un planteamiento de captador, el trabajo contempla la definición de los diferentes componentes, de los sistemas de transmisión de movimiento y del funcionamiento de un captador de luz solar.

A través de este proyecto, se pretende desarrollar un prediseño del cual se pueda partir para optimizar el captador y llegar a su diseño definitivo. En este trabajo se realizará lo siguiente:

- Se definirá el conjunto de componentes y la relación entre ellos, de la propuesta de captadora heredada.
- Se establecerá el funcionamiento y movimiento de los componentes.
- Se definirán los parámetros significativos que servirían para la optimización del conjunto en un futuro proyecto.

Este proyecto ofrece una solución para toda entidad, empresa o persona interesada en iluminar un espacio concreto haciendo uso de un captador de luz solar.

- Constructoras y despachos de arquitectura.
- Empresas especializadas en iluminación natural.
- Particulares.

Se considera que quedan fuera del alcance del proyecto los siguientes puntos.

- Optimización de las medidas del diseño.
- Desarrollo del modelo de negocio.
- Producción de un prototipo real.

3. Estado del arte

3.1. Tubos solares

La luz natural juega un papel fundamental en el bienestar físico y mental del hombre y, por ello, siempre se ha tratado de iluminar naturalmente los espacios. Con el paso de los años se han desarrollado diferentes tecnologías que permiten iluminar espacios interiores mediante el uso de la luz de día.

Un ejemplo son los tubos solares ^[3], diseñados para proveer de luz natural espacios interiores mediante la canalización de luz solar sin la necesidad de energía adicional.

Los tubos solares requieren únicamente de energía solar para su funcionamiento. Esto implica una reducción del consumo de energía eléctrica y un ahorro económico. Además, sus componentes son 100% sostenibles y, de esta manera, contribuyen al medio ambiente y ayudan en la lucha contra el cambio climático.

Esta alternativa de iluminación natural resulta muy atractiva dado que no provoca un gran impacto visual y necesita poco mantenimiento. Asimismo, su instalación es sencilla y rápida ya que no son necesarias reformas estructurales. Otra ventaja de los tubos solares es que impiden la entrada de ruido y calor en la estancia, así como filtran los rayos ultravioletas e infrarrojos del sol, evitando el deterioro del mobiliario.

El funcionamiento de un tubo solar se basa en la captación, conducción y difusión de la luz solar.

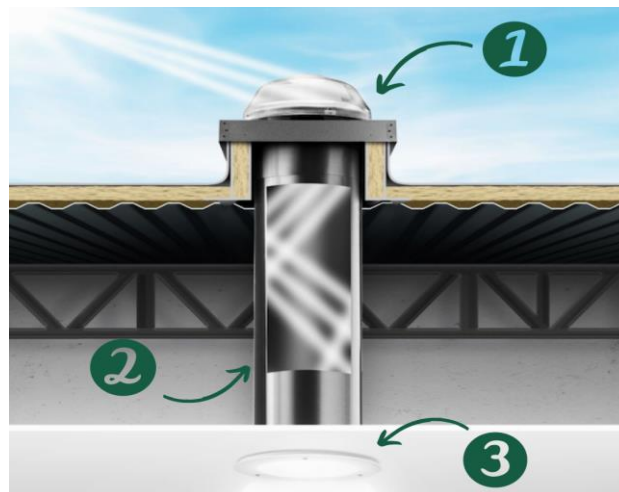


Ilustración 1. Tubo solarⁱ.

ⁱ Fuente: <https://www.solatube.es/>

1. **Captación:** a través de una cúpula transparente se capta y se redirige la luz del Sol. Se encuentra en el tejado o fachada del edificio, en las zonas donde hay más contacto con la luz solar y hay menos árboles y obstáculos para este objetivo final.
2. **Conducción:** a través de tubos fabricados a partir de material reflectante, se transporta la luz solar al espacio a iluminar. Estos tubos pueden tener giros y cambios de dirección lo que permite iluminar cualquier estancia de una edificación.
3. **Difusión:** a través de un plafón se proyecta la luz al interior del espacio. La luz natural llega tras superar múltiples rebotes dentro del tubo, por lo que entra de forma potente pero difuminada y tenue.

Un tubo solar se compone a grandes rasgos de tres componentes que garantizan la captación, conducción y difusión de la luz solar ^[4].

- Cúpula.
- Conducto reflejante.
- Difusor.

3.1.1. Cúpula

La cúpula o domo es el elemento encargado de capturar los rayos de luz solar ^[5]. Para garantizar esta función ha de cumplir las siguientes especificaciones:

- Estar fabricada a partir de un material translúcido o transparente.
- Ser resistente a la radiación ultravioleta. Esto garantiza que la luz caiga en un plano perpendicular a la bóveda a cualquier hora del día.
- Estar aislada de inclemencias meteorológicas, suciedad o todo aquello que pueda alterar la correcta recepción de la luz.
- Estar impermeabilizada y sellada para prevenir pérdidas de calor.
- Tener una geometría que facilite que el agua escurra en caso de precipitación.
- Evitar la aparición de condensaciones.

Las condensaciones se producen al haber una diferencia de temperaturas entre el interior y exterior. Para evitar que aparezcan se puede equipar el domo de una doble capa o incorporar canaletas que evacúan y recogen estas condensaciones.

Los rayos ultravioletas contribuyen al deterioro de los materiales que se utilizan en exteriores y están expuestos a la intemperie. Así pues, es conveniente añadir aditivos termoplásticos que protegen de la radiación UV para evitar que el material pierda resistencia, se vuelva amarillo o aumente su fragilidad.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se llega a la conclusión de que los siguientes materiales son los que presentan mejores propiedades.

- **Metacrilato:** es un material transparente y rígido de alta resistencia al impacto. Se utiliza como sustituto del vidrio en claraboyas y cúpulas ya que proporciona una buena difusión y transmisión de la luz y, es a la vez, fácil de reparar ^[6].



Ilustración 2. Claraboya de PMMAⁱⁱ.

- **Policarbonato compacto:** el PC es un plástico transparente de alta durabilidad y resistencia. Posee propiedades de protección frente a los rayos UV y es maleable. Además, es un material ligero y muy resistente a los ataques de los agentes meteorológicos ^[7].



Ilustración 3. Claraboya de PCⁱⁱⁱ.

ⁱⁱ Fuente: <http://www.zonaplastica.com/>

- **Vidrio:** esta alternativa de material presenta un gran aislamiento térmico y acústico. El vidrio es muy resistente a la ralladura y a la abrasión y no se ve afectado por los rayos ultravioletas ^[8].



Ilustración 4. Claraboya de vidrio^{iv}.

3.1.2. Captador de luz solar

Se parte de un diseño de captación de luz solar inspirado en la tecnología de los tubos solares pero que presenta modificaciones.

El componente encargado de la captación de los rayos del Sol deja de ser una cúpula para convertirse en un captador de luz solar constituido por dos componentes:

- Lente de Fresnel: incrustada en una cúpula esférica. Se encarga de captar, concentrar y dirigir la luz solar.
- Espejo de desvío: situado en el interior de la cúpula, se encarga de desviar la luz proveniente de la lente hacia el conducto reflejante.

ⁱⁱⁱ Fuente: <https://www.logismarket.es/>

^{iv} Fuente: <https://www.cristaluxglass.com/>

Lente de Fresnel

La lente de Fresnel es un diseño que permite la construcción de lentes de gran apertura y una corta distancia focal sin el peso y volumen de material que debería usarse en una lente de diseño convencional ^[9].

Es el componente del captador que se encarga de captar, concentrar y dirigir los rayos provenientes del Sol. Esto se debe a que tiene la capacidad de focalizar la luz proveniente de muchas direcciones diferentes en un punto localizado en el interior.

Una pequeña variación en el ángulo de incidencia de la luz modifica la distancia al foco donde se concentran los rayos solares. Por ello, es necesario que la luz del Sol incida perpendicularmente a la lente. Para mantener el área de la lente perpendicular a los rayos solares en todo momento, se requiere la implementación de un sistema de seguimiento solar, que será abordado en el siguiente punto.

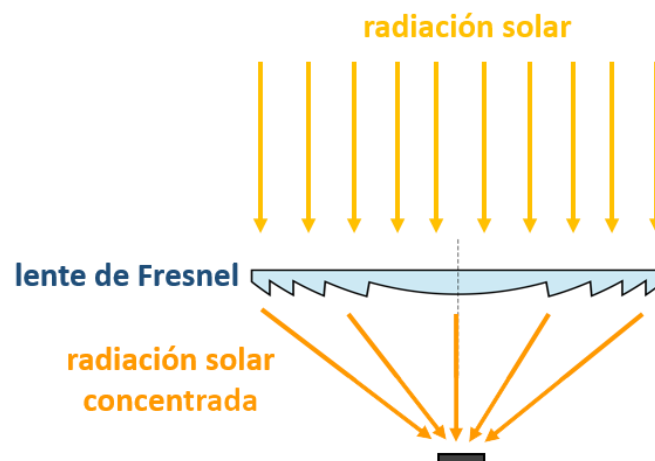


Ilustración 5. Focalización de los rayos solares en una Lente de Fresnel^v.

La lente de Fresnel tiene un diseño más ligero y fino y bastante menos absorción que las lentes convencionales, con una amplia variedad de tamaños. Además, requiere mantenimientos bajos y la instalación es sencilla y rápida. Esto la convierte en una opción ideal para capturar y focalizar los rayos solares.

Se realiza un análisis sobre los posibles materiales con los que se puede fabricar las lentes de Fresnel.

^v Fuente: <http://gmdsol.com/>

- **Vidrio:** este es el material más utilizado para la construcción de las lentes de Fresnel. Presenta un buen aislamiento térmico y acústico. Además, es muy resistente a la ralladura y a la abrasión y no se ve afectado por los rayos ultravioletas.

Se construye puliendo la superficie de la lente. Existen diversos tipos de vidrios con los que se fabrican las lentes. Estos son los de alta transmisividad ($\tau \approx 92-93\%$), con bajo contenido en hierro. Algunos de los cuales son los siguientes:

- **Sílice:** esta alternativa es una forma de silicio inorgánica, formada por oxígeno y silicio, concretamente dióxido de silicio (SiO_2). Las ventajas que presenta este material son la alta disponibilidad, ya que es muy abundante en la naturaleza y la elevada porosidad, lo que lo convierte en un excelente aditivo absorbente del agua. El sílice es uno de los componentes que forman la arena ^[10].



Ilustración 6. Lente Fresnel con Sílice^{vi}.

- **Vidrio BK7:** este es un tipo de vidrio crown óptico de alta calidad, utilizado con frecuencia para la producción de lentes, ventanas, espejos y otros componentes ópticos. Es claro e incoloro y es un material razonablemente duro y resistente ^[11].

^{vi} Fuente: <https://www.directindustry.es/>



Ilustración 7. Lente Fresnel con Vidrio BK7^{vii}.

- **Plástico:** esta opción está sustituyendo a los vidrios en la creación de lentes Fresnel, dado que es más económica y ligera. Además, el tamaño de estas lentes puede ser mayor que las de vidrio, por lo tanto, en lentes de medio y gran tamaño se utilizan principalmente plásticos transparentes. La construcción de las lentes de plástico está construida por moldeo. Dependiendo del rango de longitudes de onda de operación, los plásticos más utilizados son:
 - **Acrílico (PMMA):** este es el elemento más utilizado en la fabricación de las lentes Fresnel dada a su alta transmisividad ($\tau \approx 92\%$), siendo el tipo de plástico de mayor transmitancia en el rango visible y en ultravioleta. Además, el acrílico se destaca frente a otros plásticos transparentes por su resistencia a la intemperie y al rayado y por su transparencia ^[12].



Ilustración 8. Lente Fresnel de PMMA^{viii}.

^{vii} Fuente: <https://www.directindustry.es/>

^{viii} Fuente: <https://spanish.alibaba.com/>

- **Policarbonatos:** son materiales fáciles de trabajar, moldear y, dada a su alta resistencia al impacto y a las altas temperaturas, son usado en ambientes extremos y hostiles. Su transmisividad es de entre el 85% y el 89%.



Ilustración 9. Lente Fresnel policarbonato^{ix}.

- **Polímeros de vinilo (PVC):** presentan una transmisividad $\tau \approx 85-87\%$, es el derivado de plástico más versátil ya que puede producirse mediante cuatro procesos diferentes. También tiene una elevada resistencia a la abrasión, buena resistencia mecánica y de impacto y es utilizado normalmente en construcción y edificación ^[13].



Ilustración 10. Lente Fresnel PVC^x.

^{ix} Fuente: <https://spanish.alibaba.com/>

^x Fuente: <https://www.banggood.com/>

Sin embargo, hay casos en los que se forma una lente híbrida, utilizando vidrio y plástico. Se parte de una placa de vidrio flotado liso, que hace de placa de soporte y sobre el que se añade el perfil discontinuo de anillos concéntricos construidos con silicona que es la que actúa como material reflectante.

Por lo tanto, se puede confirmar que las lentes Fresnel híbridas combinan la rigidez del vidrio con propiedades del plástico como la ligereza, resistencia al rayado y al impacto; también su baja degradación y resistencia ante las condiciones climáticas. Además, otras ventajas son su bajo precio y la facilidad de moldeo y mecanizado durante el proceso de fabricación.

Espejo de desvío

Este elemento desvía la luz redirigida por la lente Fresnel hacia el interior del tubo, a lo largo del cual rebota hasta llegar al difusor. Se trata de un espejo que capta la luz proveniente de la lente Fresnel y la dirige hacia el conducto lo más verticalmente posible.

Para que el espejo pueda realizar su función se tienen que cumplir las siguientes especificaciones:

- Estar fabricado a partir de un material reflectante.
- Contar con un soporte que permita al espejo rotar en función del ángulo de incidencia de la luz.

En relación con los materiales, se realiza un estudio exhaustivo para así poder escoger más adelante el que mejor se ajuste a las características deseadas. Se precisa de un material que sea reflectante, para ello deberá ser un elemento liso y transparente. Los componentes que mejor reflejan la luz y de los que se observará la posibilidad de fabricar el espejo de desvío son:

- **Aluminio:** este es el elemento que se utiliza para sistemas basados en la reflexión especular. El aluminio es un material ligero, muy resistente a la corrosión y tiene una reflectividad alta (superior al 90%). Además, es completamente impermeable y totalmente reciclable ^[14].



Ilustración 11. Espejo de aluminio^{xi}.

- **Metacrilato:** es un material muy ligero, fácil de manipular, rayar y cortar. Y, sobre todo, es resistente a la rotura, hasta 10 veces superior al vidrio. Además, es el más transparente en comparación a los demás plásticos, lo que implica que posee una elevada reflectividad.



Ilustración 12. Espejo de metacrilato^{xii}.

- **Vidrio:** presenta un buen aislamiento térmico y acústico y tiene una alta reflectividad. Además, es muy resistente a la ralladura y a la abrasión y no se ve afectado por los rayos ultravioletas. Sin embargo, es un material frágil y posee una densidad algo más elevada que los materiales referidos anteriormente.

^{xi} Fuente: <https://www.ikea.com/>

^{xii} Fuente: <https://www.ikea.com/>



Ilustración 13. Espejo de desvío de vidrio^{xiii}.

- **Plata:** es un metal muy dúctil y maleable, así como con una reflectividad alta. Por otra parte, es un material con una densidad alta y un elevado precio ^[15].



Ilustración 14. Espejo de desvío plata^{xiv}.

^{xiii} Fuente: <https://www.sick.com/>

^{xiv} Fuente: <https://www.pinterest.es/>

3.1.3. Seguimiento del Sistema Solar

La lente ha de estar dirigida constantemente hacia el Sol, perpendicular a los rayos incidentes ^[16]. Cualquier desviación en el ángulo de incidencia puede “desenfocar” el sistema. Esto conlleva la necesidad de un mecanismo de seguimiento solar capaz de seguir con un bajo grado de error la trayectoria solar.

El sistema de seguimiento posiciona u orienta el captador de cara a la radiación solar incidente, con el objetivo de captar la mayor cantidad de rayos solares lo más eficientemente posible. Al modificar el ángulo de incidencia sobre la superficie se aumenta la energía solar que llega al sistema.

Este sistema permite monitorizar la posición del Sol, desde el momento que amanece hasta su puesta. Cuando sale el Sol, los registros de irradiación son muy bajos. A medida que va aumentando su altura, la irradiación crece hasta llegar a un registro mínimo aprovechable. Es entonces cuando el sistema se debería accionar y hacer girar el captador de tal manera que el área de la lente sea perpendicular a los rayos incidentes, manteniendo un seguimiento constante hasta el final del día.

Hay dos tipos de sistemas de seguimiento solar: de uno y de dos ejes ^[17].

- Los sistemas de seguimiento solar en **un eje**, mueven el elemento captador de este a oeste, dotando al sistema de un grado de libertad. Presentan un menor coste y una mayor simplicidad, pero realizan un seguimiento solar menos preciso captando menos energía.
- Los sistemas que utilizan **dos ejes**, están diseñados para maximizar la producción de energía durante todo el año. Permiten variar la orientación según la estación, además de seguir al Sol durante el día. Por lo tanto, cuentan con un seguimiento solar más preciso que los de un eje, con mayores rendimientos, pero con un mayor coste. Los dos ejes están alineados norte-sur y este-oeste.

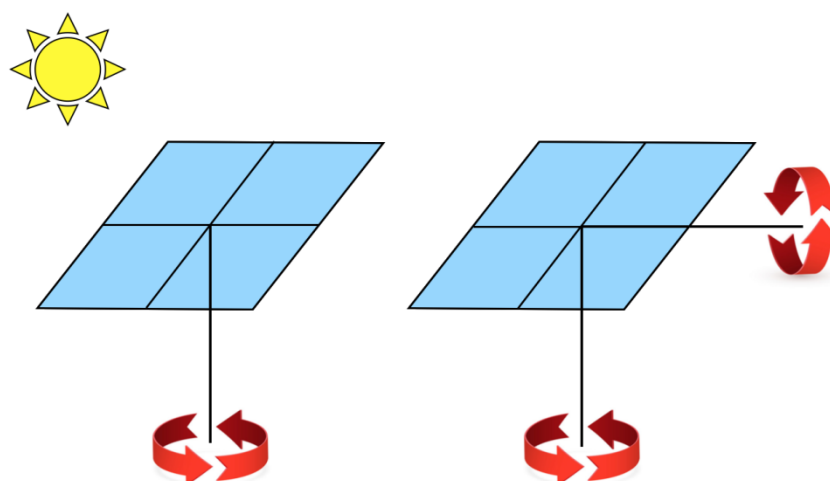


Ilustración 15. Sistemas de seguimiento de uno y dos ejes^{xv}.

	1 eje	2 ejes
Capacidad de giro	Menos de 180°	360°
Incremento de rendimiento	30 - 45 %	10 - 25 %

Tabla 1. Tabla comparativa de los seguidores solares de uno y dos ejes^{xvi}.

Existen dos maneras de monitorizar la dirección de los rayos solares: el seguimiento astronómico y los sensores de control.

a) Seguimiento por sensores solares

Mediante sensores solares se mide la radiación solar directa incidente. Esto permite detectar y medir la falta de direccionamiento entre el vector Sol y la normal a la superficie de captación. La desviación detectada por los fotosensores transmite una señal de actuación que controla el funcionamiento de los motores para conseguir el movimiento del módulo.

Su principal inconveniente es que cuando se tiene condiciones nubladas, el sistema se encuentra estático y deberá alcanzar la orientación correcta lo más rápido posible cuando el Sol vuelva a estar despejado. Esto implica tener una buena potencia de motor.

^{xv} Fuente: <http://www.tecnoligente.com/>

^{xvi} Fuente: Elaboración propia.

Diferenciamos entre dos tipos de sensores solares:

- Pirheliómetros: miden la radiación solar directa.
- Piranómetros: miden la radiación solar global.



Ilustración 16. 1. Piranómetro y 2. Pirheliómetro^{xvii}.

b) Seguimiento por coordenadas calculadas

Posiciona el módulo en base al cálculo de las coordenadas astronómicas de la posición solar en cada momento y no precisa de la presencia física de los rayos solares. Mediante un programa se conoce en qué punto debería estar el Sol a cada hora.

Presenta una total independencia de las condiciones climáticas ya que su algoritmo no requiere de fotosensores. El seguimiento en este caso depende únicamente de una serie de ecuaciones que predicen la ubicación del Sol en cualquier momento.

Si se comparan estos sistemas puede notarse que el seguimiento por sensores presenta una mayor facilidad para implementar el algoritmo de seguimiento, pero presentan poca fiabilidad; mientras que la programación astronómica es más difícil de implementar el algoritmo de seguimiento, pero es más fiable.

^{xvii} Fuente: <http://sensovant.com/>

3.2. Motores

Los motores de los seguidores solares pueden ser eléctricos, que son los más utilizados; hidráulicos, más apropiados para seguidores de gran tamaño; y accionados por gravedad, un sistema más original que no necesita electricidad pero que pierde control de la posición del seguidor.

Se distinguen tres tipos de motores eléctricos: motores de corriente continua, motores de corriente alterna y motores paso a paso.

3.2.1. Motor de corriente continua

Los motores de corriente continua convierten energía eléctrica en mecánica, girando gracias a la acción de un campo magnético ^[18]. Se compone principalmente de rotor, parte móvil y estator, parte fija; su mantenimiento tiene un coste muy elevado por el desgaste que sufren estas máquinas. Por otro lado, la limpieza, comodidad y seguridad en el funcionamiento son algunas de sus ventajas. Los diferentes motores de corriente continua que existen dependiendo de la forma de conexión de sus bobinas son:

- **Motor de excitación independiente:** obtienen la alimentación del rotor y del estator de dos fuentes de tensión independientes. El campo del estator y el par de fuerza son constantes. La disminución de la fuerza electromotriz por aumentar la caída de tensión en el rotor provoca variaciones de velocidad.
- **Motor de excitación en serie:** consiste en un motor en el cual el inducido y el devanador inductor están conectados en serie. La intensidad es la misma tanto para el estator como para el rotor. El voltaje es constante, mientras que la excitación aumenta con la carga.
- **Motor en derivación o Shunt:** el bobinado inductor principal está conectado en paralelo con el circuito que forman el bobinado inducido y el inductor auxiliar. En los motores Shunt la velocidad es prácticamente constante para cualquier carga.
- **Motor Compound:** la excitación de este motor es producida por dos bobinados inductores independientes; uno en serie con el bobinado inducido y el otro en paralelo con el circuito formado por los bobinados.

3.2.2. Motor de corriente alterna

Los motores de corriente alterna son los que convierten energía eléctrica en mecánica trabajando con corriente alterna, es decir, cambiando repetidamente de polaridad. Actualmente, el motor de corriente alterna es el más utilizado debido a su elevado rendimiento, bajo mantenimiento y sencillez en su construcción. La clasificación de estos motores viene dada por su velocidad de giro, el número de fases de su alimentación y el tipo de rotor ^[19]. Según su velocidad de giro pueden ser:

- **Síncronos:** la rotación del eje se sincroniza con la frecuencia de la corriente de alimentación, su velocidad de giro es directamente proporcional a la frecuencia. Es utilizado cuando se quiera obtener una velocidad constante.
- **Asíncronos:** el rotor nunca llega a girar en la misma frecuencia que el campo magnético del estator. Cuanto mayor sea el par motor mayor será la diferencia de frecuencias.

Según el número de fases de su alimentación:

- **Monofásicos:** el estator produce un campo estacionario pulsante y después se desarrolla un campo magnético rotatorio. Consta de un devanado principal y uno auxiliar o de arranque, desfasados 90° entre ellos.
- **Trifásicos:** es capaz de convertir la energía eléctrica trifásica en energía mecánica. Esta origina campos magnéticos rotativos en el bobinado del estator.

Según el tipo de rotor, pueden ser:

- **Motores con anillos rozantes:** se usan cuando se desee un elevado par, baja corriente en el arranque o para cargas de elevada inercia.
- **Motores con colector:** conecta las corrientes del campo o excitación con el bobinado del rotor. Se caracterizan por su alta potencia, peso reducido y soportan grandes cargas temporales.
- **Motores con jaula de ardilla:** tienen un núcleo de hierro laminado y son más compactos. Necesita de un campo rotatorio para realizar el arranque.

3.2.3. Motor paso a paso

Un motor paso a paso ^[20] es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de pulsos eléctricos en desplazamientos angulares, lo que significa que es capaz de girar una cantidad de grados dependiendo de sus entradas de control.

Algunas de sus características principales son las siguientes:

- Reduce el precio y aumenta la capacidad de carga o desplazamiento.
- Ideal para la construcción de mecanismos en donde se requieren movimientos muy precisos.
- Puede moverse a deseo del usuario según la secuencia que se les indique a través de un microcontrolador.
- Se mantiene firme en su posición cuando no está girando y, mientras está detenido, la fuerza de carga permanece aplicada a su eje. De esta manera, se elimina la necesidad de un mecanismo de freno.
- Permite realizar pequeños desplazamientos a poca velocidad y con elevado par.

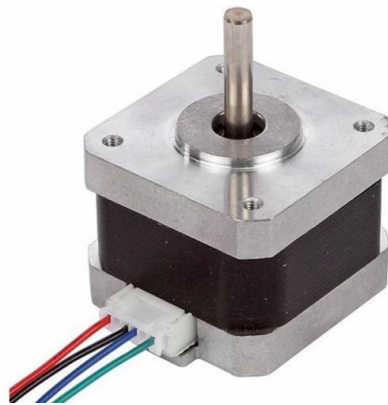


Ilustración 17. Motor paso a paso^{xviii}.

Se dividen en 3 subcategorías:

- **Motor paso a paso de reluctancia variable:** está constituido por un rotor y un estator, los cuales están formados de hierro dentado y de un bobinado de hierro respectivamente. Este motor rota cuando el rotor es atraído por las bobinas del estator, de tal manera que se minimice la reluctancia rotor-estator. Este puede funcionar con pasos pequeños, sin embargo, tiene un par motor pequeño ^[21].

^{xviii} Fuente: <https://afel.cl/>

- **Motor pasa a paso de rotor de imán permanente:** la característica principal de estos motores es el hecho de poderlos mover un paso a la vez por cada pulso aplicado. Estos poseen la capacidad de quedar fijos en una posición, si una o más bobinas están energizadas o totalmente libres, si no hay corriente en las bobinas. Los motores de imán permanente son ideales en los mecanismos que requieren movimientos muy precisos ^[22].
- **Motor paso a paso híbrido:** se caracteriza por combinar el motor de reluctancia variable y el de imán permanente. Presenta dientes en el estator y en el rotor, el cual tiene un imán concéntrico magnetizado alrededor del eje. Este es el tipo de motor paso a paso más utilizado.

Este motor es necesario para que el espejo de desvío pueda rotar en función del ángulo de incidencia de la luz y así poder desviar los rayos solares hacia el interior del conducto en todo momento. Orienta el espejo en función de la dirección en que la radiación solar incide en él, proveniente de la lente de Fresnel.

3.3. Mecanismos de transmisión de movimiento

Los mecanismos de transmisión permiten transferir energía mecánica de un punto a otro distinto, si cambiar la naturaleza del movimiento. Existen dos grupos de mecanismos de transmisión de movimiento:

- Mecanismos de transmisión lineal: en este caso, el elemento de entrada y de salida tienen movimiento lineal.
- Mecanismos de transmisión circular: en este caso, el elemento de entrada y el de salida tienen movimiento circular.

Se distinguen los siguientes tipos de mecanismos de transmisión circular:

- Engranajes.
- Sistema de poleas con correa.
- Sistema de ruedas de fricción.
- Cadenas.

3.3.1. Engranajes

Se denomina engranaje al mecanismo utilizado para transmitir potencia mecánica de un componente a otro. Los engranajes están formados por ruedas dentadas, las cuales sirven para transmitir movimientos circulares.

La principal distinción entre engranajes se realiza según la posición y forma de sus dientes. De este modo, se divide entre engranajes de ejes paralelos y ejes perpendiculares.

3.3.1.1. Engranajes de ejes paralelos

Son la tipología de engranajes más común y tiene la particularidad de que sus dientes están montados en ejes paralelos.

- **Engranajes cilíndricos de dientes rectos**

El engranaje cilíndrico recto es un tipo de engranaje formado por dos ruedas cilíndricas con dientes paralelos a los ejes de giro de las dos ruedas. Este tipo de engranaje es el más sencillo y suele emplearse para velocidades pequeñas y medias, ya que genera ruido cuando aumenta su velocidad. Su contorno es de forma circular y pueden ser externos (sentidos de giro opuestos) o internos (sentidos de giro iguales).

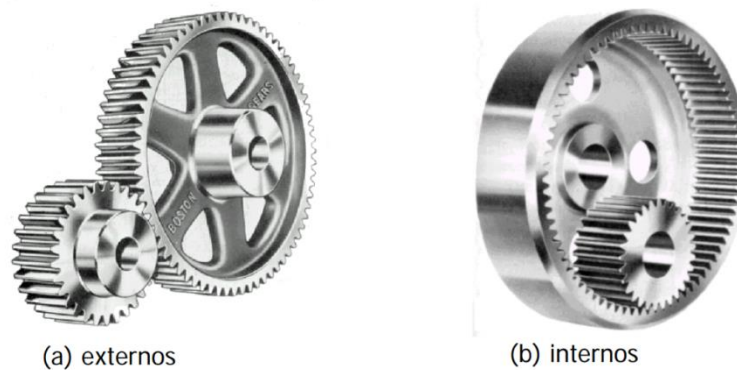


Ilustración 18. (a) Engranaje cilíndrico de dientes rectos externo. (b) Engranaje cilíndrico de dientes rectos interno^{xix}.

^{xix} Fuente: <http://ocw.uc3m.es/>

- **Engranajes cilíndricos de dientes helicoidales**

Su dentado es oblicuo al eje de rotación y trasladan mayor movimiento y velocidad que los engranajes cilíndricos rectos. Son más fluidos y silenciosos, pero a cambio requieren un mayor engrase y se desgastan más. Se distingue entre simples y dobles.

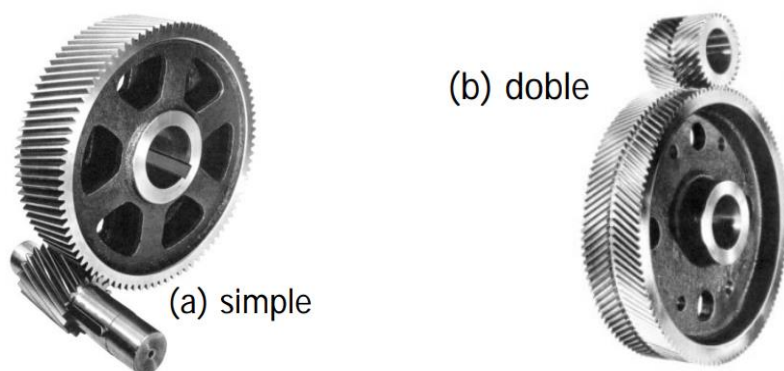


Ilustración 19. (a) Engranaje cilíndrico de dientes helicoidales simple. (b) Engranaje cilíndrico de dientes helicoidales doble^{xx}.

3.3.1.2. Engranajes de ejes perpendiculares

La transmisión entre ejes que se cortan permite transferir esfuerzos importantes, pero al mismo tiempo, se generan grandes fuerzas axiales. Tienen forma de tronco de cono y siguen la siguiente clasificación:

- **Engranajes cónicos de dientes rectos**

Transmiten el movimiento de ejes que se cortan en un mismo plano, habitualmente en ángulo recto, por medio de superficies cónicas dentadas. Los dientes convergen en la intersección de los ejes. Suelen usarse para aminorar la velocidad con ejes colocados en posición de 90 grados y son ruidosos.

^{xx} Fuente: <http://ocw.uc3m.es/>



Ilustración 20. Engranaje cónico de dientes rectos^{xxi}.

- **Engranajes cónicos de dientes helicoidales**

La principal diferencia en comparación con los engranajes rectos es que los bordes de los dientes no son paralelos al eje de rotación, sino que se encuentran posicionados en un ángulo. Su superficie de contacto es más grande en comparación con la de los engranajes cónicos de dientes rectos. Pueden transmitir el movimiento de ejes que se corten y se usan para rebajar la velocidad en ejes de 90 grados. Transmiten más potencia que los de dientes rectos y son más silenciosos y duraderos.



Ilustración 21. Engranaje cónico de dientes helicoidales^{xxii}.

^{xxi} Fuente: <https://www.directindustry.es/>

^{xxii} Fuente: <https://www.directindustry.es/>

- **Engranajes cónicos de dientes helicoidales cruzados**

Realizan un movimiento de tornillo, lo que da lugar a un alto grado de deslizamiento en los flancos del diente. De montaje sencillo, deben presentar los mismos pasos diametrales normales para que el engranaje sea el adecuado. Pueden ir en el mismo sentido o en el opuesto.



Ilustración 22. Engranaje cónico de dientes helicoidales cruzados^{xxiii}.

- **Engranajes cónicos hipoides**

Son un tipo de engranaje helicoidal formado por un piñón reductor de pocos dientes y una rueda de muchos dientes. Destacan por su larga vida útil y el escaso ruido que generan, aunque requieren aceites de extrema presión. Se emplean en embarcaciones y máquinas industriales.

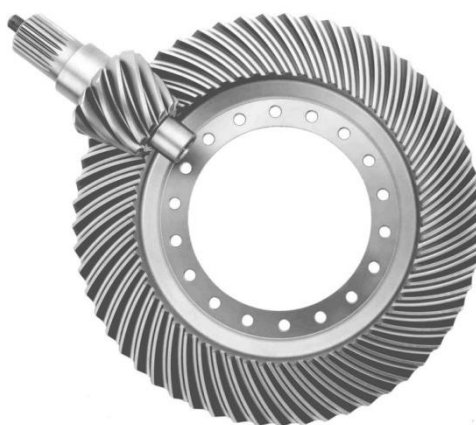


Ilustración 23. Engranaje cónico hipoides^{xxiv}.

^{xxiii} Fuente: <http://proyectostecnologica.weebly.com/>

^{xxiv} Fuente: <https://www.directindustry.es/>

- **Engranajes cónicos de dientes helicoidales de rueda y tornillo sin fin**

Es un mecanismo diseñado para transmitir grandes esfuerzos. Cuentan con un tornillo sinfín, que funciona como conductor, y una corona, conducida por este. El tornillo mueve la corona con su giro. Aunque su ángulo entre ejes más común es de 90 grados, puede ser diferente.



Ilustración 24. Engranaje cónico de rueda y tornillo sin fin^{xxv}.

3.3.2. Sistema de poleas con correa

Se trata de sistemas formados por pares de ruedas o poleas situadas a cierta distancia, que giran simultáneamente transmitiendo el movimiento desde el eje de entrada (motriz) hasta el eje de salida (conducido) mediante una correa.

Las poleas no son más que una rueda con una hendidura en su centro para acoplarla al eje en torno al cual giran. Para asegurar el contacto entre polea y correa se talla en la polea un canal que “soporta” la correa. Son necesarias dos poleas:

- Una conductora, o motora, que va solidaria a un eje que gira con un motor.
- Una conducida, o arrastrada, también acoplada a un eje donde se encuentra la resistencia que hay que vencer.

^{xxv} Fuente: <https://www.directindustry.es/>

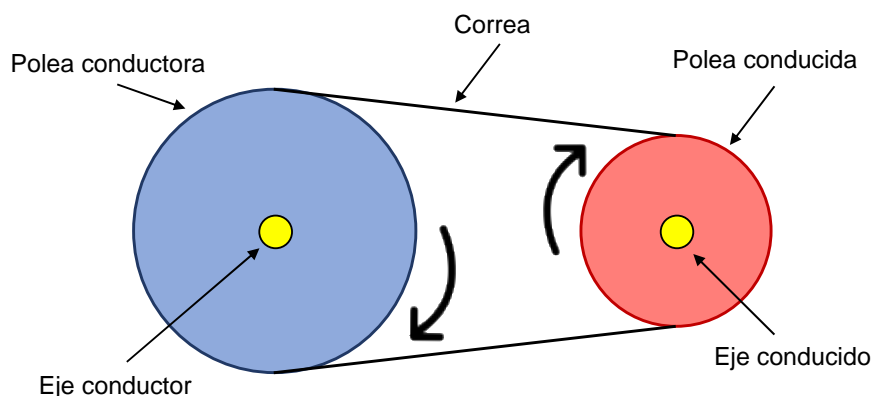


Ilustración 25. Sistemas de poleas con correa^{xxvi}.

La fuerza se transmite por efecto del rozamiento que ejerce la correa sobre la polea, por lo que la correa es un elemento decisivo en la transmisión del movimiento. Las correas pueden ser de distintos tipos:

a) Correa redonda

De sección circular, se utilizan para adaptarse a curvas cerradas cuando se necesitan fuerzas de pequeña magnitud.

b) Correa trapezoidal

La sección es de tipo trapezoidal. Son las más utilizadas ya que se adaptan firmemente al canal de la polea evitando el posible deslizamiento entre correa y polea.

c) Correa plana

La sección es generalmente de tipo rectangular. Cada vez de menor utilización, se utilizan para transmitir el esfuerzo de giro y el movimiento de los motores a las máquinas. Hoy en día se emplea muy poco debido a la existencia de las correas de sección trapezoidal, que permiten transmitir más par, y a las correas sincronizadas, que permiten un mejor sincronismo entre los ejes de entrada y salida.

^{xxvi} Fuente: <https://sites.google.com/site/gabrielmecanismos/>

d) Correa sincronizada

La correa sincronizada, también denominada correa dentada o reguladora, es un tipo de correa que se caracteriza por presentar dientes que engranan con los de las poleas correspondientes, basando la transmisión de potencia en el empuje de los dientes y no en el rozamiento polea-correa. En este sentido las transmisiones por correa dentada son similares a una transmisión por engranajes, salvo que en este caso se tiene mucha más flexibilidad en la transmisión gracias a la propia correa

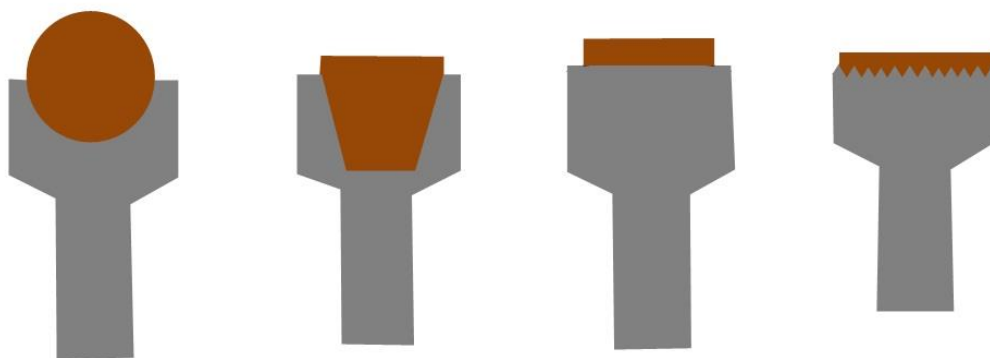


Ilustración 26. (a) Correa redonda. (b) Correa trapezoidal. (c) Correa plana. (d) Correa sincronizada^{xxvii}.

3.3.3. Sistemas de ruedas de fricción

Las ruedas de fricción son sistemas formados por dos o más ruedas situadas en contacto directo. Transmiten el movimiento de giro entre dos puntos gracias a la fuerza de rozamiento entre las superficies de contacto de las ruedas.

El sentido de giro de la rueda conducida es contrario al de la rueda motriz y, siempre, la rueda mayor gira a menor velocidad que la otra. No son muy utilizadas porque son incapaces de transmitir mucha potencia, pues se corre el riesgo de que patinen las ruedas. Además, sufren bastante desgaste debido al fuerte contacto que implica la transmisión por rozamiento o fricción.

En el caso más simple formado por dos ruedas, la rueda de entrada gira rozando con la rueda de salida provocando que esta gire también, aunque en sentido contrario.

^{xxvii} Fuente: <https://www.edu.xunta.gal/>

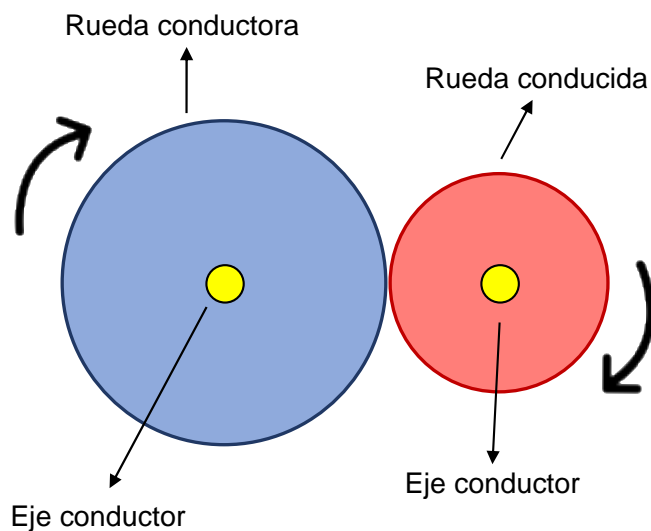


Ilustración 27. Ruedas de fricción^{xxviii}.

La transmisión por fricción se puede realizar de tres maneras dependiendo de la separación entre ejes entre los que se quiere transmitir movimiento.

- **Ruedas de fricción exteriores:** formadas por dos discos que se encuentran en contacto por sus periferias.

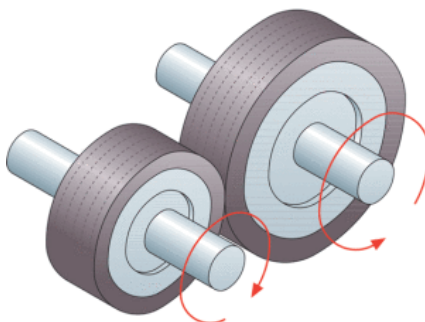


Ilustración 28. Ruedas de fricción exteriores^{xxix}.

^{xxviii} Fuente: <https://sites.google.com/site/gabrielmecanismos/>

^{xxix} Fuente: <https://tecnovehio.wordpress.com/>

- **Ruedas de fricción interiores:** la rueda interior y exterior giran en el mismo sentido.

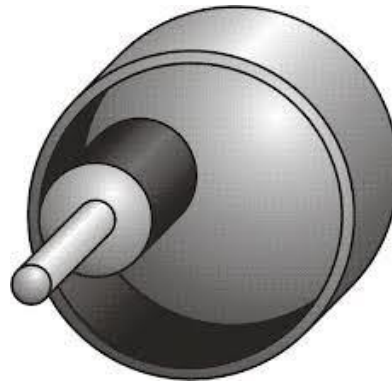


Ilustración 29. Ruedas de fricción interiores^{xxx}.

- **Ruedas de fricción troncónicas:** Tienen forma de cono. Se caracterizan porque sirven para transmitir el movimiento entre ejes cuyas prolongaciones se cortan.

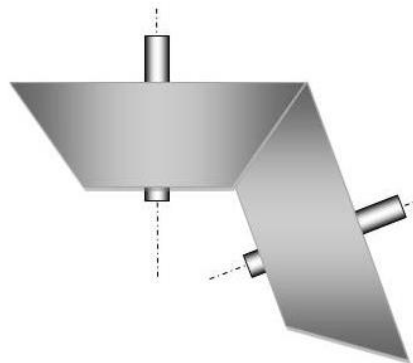


Ilustración 30. Ruedas de fricción troncónicas^{xxx}.

3.3.4. Cadenas

Las cadenas de transmisión son una buena opción para transmitir grandes pares de fuerza donde los ejes de transmisión se mueven a velocidades de giro medio-altas ^[23]. Permiten trabajar en condiciones ambientales adversas y con temperaturas elevadas, aunque requieren lubricación. Su aplicación principal se da en automoción y maquinaria dado que las cadenas proporcionan una relación de transmisión fija entre las velocidades y ángulo de giro de los ejes de entrada y salida.

^{xxx} Fuente: <https://tecnovehio.wordpress.com/>

^{xxx} Fuente: <https://www.edu.xunta.gal/>

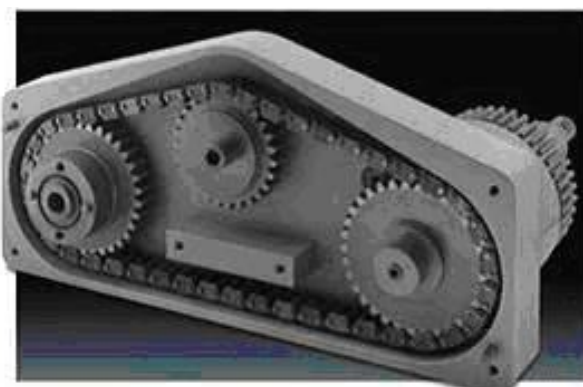


Ilustración 31. Transmisión por cadenas^{xxxii}.

Según la función que desarrollan las cadenas, estas se dividen en:

- **Cadenas de transmisión de potencia:** transmiten la potencia entre ejes que giran a unas determinadas velocidades.
- **Cadenas de manutención:** dada la geometría específica de sus eslabones o enlaces permiten desempeñar una función de transporte o arrastre del material.
- **Cadenas de carga:** son usadas para elevar grandes pesos y transmitir grandes cargas.

3.4. Eje del rotor

Un motor está constituido por un estator y un rotor, componente que gira en torno a una máquina. A su vez, el rotor está formado por un eje, el cual soporta un juego de bobinas enrolladas sobre un núcleo magnético y que giran dentro de un campo magnético ^[24].

Los rotores son principalmente ejes macizos de diámetro reducido cuando se trata de motores eléctricos. Estos componentes no son generalmente pesados, pero debido a su reducido diámetro necesitan un laminado voluminoso que hace que el conjunto del rotor resulte muy pesado.

Una opción para que el conjunto no sea tan pesado es fabricar un eje del rotor hueco. Este diseño permite reducir el peso, así como permite que la fabricación del eje del rotor se pueda dividir en subprocesos breves que reducen el tiempo de fabricación y se obtienen cantidades elevadas de unidades ^[25].

^{xxxii} Fuente: <https://ingemecanica.com/>



Ilustración 32. Rotor de un motor^{xxxiii}.

3.5. Sistema Arduino

El Arduino es una plataforma de hardware libre, la cual consta de una placa que utiliza un microcontrolador reprogramable que permite establecer conexiones entre las entradas y las salidas [26].



Ilustración 33. Placa de Arduino^{xxxiv}.

El concepto de hardware libre quiere decir que Arduino ofrece las bases para que cualquier persona o empresa pueda crear sus propias placas, pudiendo ser diferentes entre ellas, pero igualmente funcionales al partir de la misma base. Por lo tanto, Arduino ofrece la plataforma Arduino IDE (Entorno de Desarrollo Integrado), que es un entorno de programación en donde se pueden crear aplicaciones para las placas Arduino, lo que permite darles todo tipo de utilidades.

^{xxxiii} Fuente: <https://como-funciona.co/un-rotor/>

^{xxxiv} Fuente: <https://arduino.cl/>

Este sistema posee una interfaz de entrada, que es una conexión en la que podemos conectar en la placa diferentes tipos de periféricos. La información de estos periféricos se trasladará al microcontrolador, el cual se encargará de procesar los datos que le lleguen a través de ellos. El tipo de periféricos que se usan depende de la utilidad que se le quiera dar a la placa. Por ejemplo, los periféricos de entrada pueden ser cámaras, teclados o diferentes tipos de sensores.

Por su parte, el interfaz de salida es el que se encarga de llevar la información ya procesada a otros periféricos que pueden ser pantallas, altavoces, otras placas o controladores.

Además, las placas de Arduino también cuentan con otro tipo de componentes llamados Escudos (Shields) o mochilas. Se trata de unas placas que se conectan a la placa principal para añadirle funciones, como GPS o pantallas táctiles LCD.

La principal característica del software y del lenguaje de programación es su sencillez y facilidad de uso, dado que consiste en implementar un código a través de la plataforma IDE y realizar los cableados correspondientes con los periféricos. Además, Arduino es económico, ya que se basa únicamente en el coste de la placa y los periféricos.

4. Elección de los componentes

Desde este punto en adelante, se trabajará con el siguiente diseño de captador de luz solar.

El captador estará compuesto por una esfera hueca que contiene una lente de Fresnel incrustada y es capaz de girar en el eje horizontal y vertical a través de dos motores paso a paso.

La cúpula estará unida a un tubo intermedio, que servirá de unión entre la esfera y el conducto reflectante. Este tubo intermedio girará según el eje vertical.

Dentro de esta esfera, se ubicará un espejo. Este espejo contará con un soporte y un sistema de transmisiones que permitirán que gire en el eje horizontal.

Para monitorizar la posición y el ángulo de incidencia de los rayos del Sol, se hará uso de foto sensores y para controlar y dirigir el movimiento de los motores, se utilizará una placa de Arduino.

4.1. Motores

Para orientar el captador en la dirección deseada son necesarios dos motores: uno que gira sobre el eje vertical, que permite que el conjunto rote para seguir la dirección del sol de este a oeste y el otro gira sobre el eje horizontal, encargado de adaptar el sistema a la altura del sol.

Estos motores son los encargados de garantizar el seguimiento solar del captador. Van situando la estructura en la posición correcta para que reciba el impacto del Sol de la manera más conveniente.

Para seleccionar un sistema de motorización se deben de tener en cuenta las condiciones de trabajo y el tipo de movimiento que realizará cada motor.

- Configuración esférica: lo cual requiere actuadores con gran amplitud para orientar el conjunto según la posición del Sol.
- Precisión: para maximizar el rendimiento de la captación solar los motores deben orientar al conjunto perpendicularmente a los rayos solares de forma precisa.
- Mantenimiento de la posición: el captador ha de ser capaz de mantener la posición frente a esfuerzos externos como el viento.

Teniendo en cuenta estas consideraciones se valoran las opciones disponibles en el mercado y se descartan motores demasiado voluminosos, pesados, de coste elevado o de gran consumo eléctrico. Esto deja las siguientes dos opciones, como las únicas viables.

Motores paso a paso

Ventajas	Inconvenientes
Es capaz de asegurar un posicionamiento simple y preciso.	El funcionamiento a bajas velocidades no es suave, ya que existe el peligro de pérdida de una posición por trabajar en bucle abierto.
Ligero, fiable y fácil de controlar. El control se realiza en bucle abierto, sin la necesidad de sensores de realimentación.	Tienden a sobrecalentarse trabajando a velocidades elevadas.
Alta repetitividad del movimiento.	Presentan un límite en el tamaño que pueden alcanzar.

Tabla 2. Ventajas e inconvenientes de motores paso a paso^{xxxv}.

Motores de corriente continua

Ventajas	Inconvenientes
La regulación de la velocidad es sencilla y económica.	Si la energía proviene de la red estándar de corriente alterna, para funcionar necesitará una fuente de alimentación que pase de alterna a continua.
Pueden trabajar a bajas velocidades.	Construcción costosa.
Se pueden alimentar con energía almacenada en baterías o mediante energía fotovoltaica.	Puede causar problemas de interferencias.

Tabla 3. Ventajas e inconvenientes de motores de corriente continua^{xxxvi}.

^{xxxv} Fuente: Elaboración propia.

^{xxxvi} Fuente: Elaboración propia.

Se llega a la conclusión de que el motor paso a paso es la opción más adecuada para el sistema. La capacidad de mantener una posición, la precisión y su facilidad de control son factores determinantes para su elección. Además, su alta repetitividad evita errores acumulativos en el seguimiento solar.

De entre los distintos tipos de motores paso a paso, se utilizará un motor paso a paso híbrido ya que reúne las siguientes características:

- Permite obtener ángulos de paso pequeños sin la necesidad de utilizar un gran número de fases.
- Tiene un buen rango dinámico.
- Al incorporar imantación, presenta el par de retención residual en ausencia de alimentación.
- Tiene una buena relación rendimiento-precio.
- Produce un par elevado.



Ilustración 34. Motor paso a paso^{xxxvii}.

Cabe destacar que, para garantizar la función del espejo de desvío, este ha de estar incorporado en un soporte y así poder seguir el movimiento rotatorio del motor.

^{xxxvii} Fuente: <https://tienda.bricogeek.com/>

4. 2. Sistemas de transmisión de movimiento

4.2.1. Movimiento vertical del tubo intermedio

Para transmitir el movimiento circular del eje del motor al tubo intermedio, se utilizará un engranaje de ejes paralelos dado que el eje de rotación del tubo intermedio es paralelo al eje del motor.

A continuación, se presentan algunas ventajas e inconvenientes de los engranajes de ejes paralelos más utilizados.

- **Engranajes cilíndricos de dientes rectos**

Ventajas	Inconvenientes
Fáciles de diseñar y fabricar.	Muy ruidosos al no tener una buena lubricación o al ser operados en altas velocidades.
Pueden ser utilizados para transmitir gran cantidad de potencia. (Aproximadamente 50000 kW).	Pueden producir vibraciones.
Buena relación de velocidad constante y estable.	Baja velocidad.
No produce un empuje axial.	Su resistencia es menor si se compara con otros tipos de engranajes.

Tabla 4. Ventajas e inconvenientes de los engranajes cilíndricos de dientes rectos^{xxxviii}.

^{xxxviii} Fuente: Elaboración propia.

- **Engranajes cilíndricos de dientes helicoidales**

Ventajas	Inconvenientes
Permiten que el funcionamiento del engranaje se ejecute de forma más suave y silenciosa comparado con los engranajes rectos.	Mayor coste de fabricación que los engranajes rectos.
Son más duraderos y son ideales para aplicaciones de alta carga, ya que tienen más dientes en contacto.	Mayor desgaste al trabajar.
La carga en cualquier momento se distribuye sobre varios ejes, lo que genera menores desgastes.	La eficiencia del engranaje helicoidal es menor debido al contacto entre sus dientes que produce un empuje axial y genera calor. Una mayor pérdida de energía reduce la eficiencia.

Tabla 5. Ventajas e inconvenientes de los engranajes cilíndricos de dientes helicoidales^{xxxix}.

De entre ellos, se escoge un engranaje cilíndrico de dientes rectos ya que suelen emplearse para velocidades pequeñas y medias y son de gran aplicación cuando se requiere transmitir el movimiento de un eje a otro paralelo y cercano. Además, el engranaje será de tipo externo lo que supone que los sentidos de giro serán opuestos.

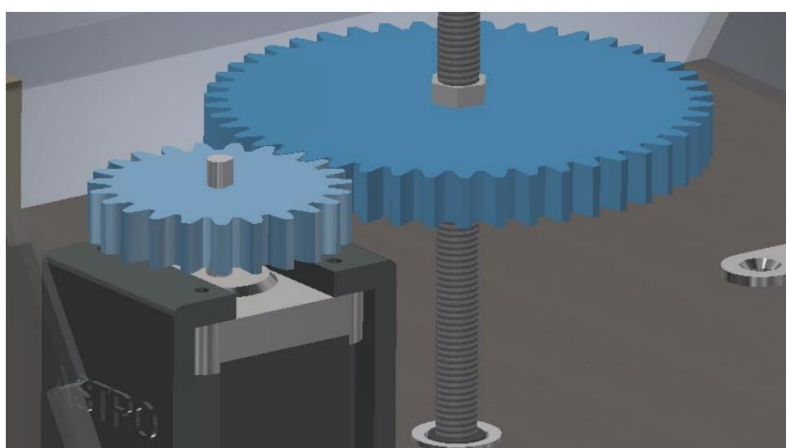


Ilustración 35. Sistema de engranajes paralelos de dientes rectos externo^{xl}.

^{xxxix} Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Movimiento horizontal de la esfera

Para que la esfera pueda rotar en su eje horizontal y así adaptarse a la altura del Sol, se utilizará un sistema de transmisiones basado en los siguientes componentes.

- Conjunto engranaje y correa dentada.
- Conjunto de dos ejes con correa.

En la siguiente imagen, se observa un esquema de este sistema de transmisiones.

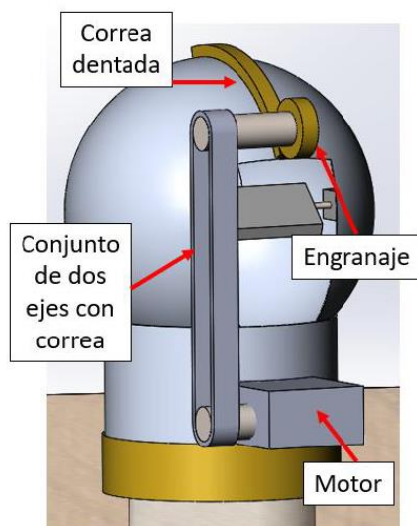


Ilustración 36. Sistema de transmisiones de la rotación de la esfera^{xii}.

Conjunto de dos ejes con correa

Se trata de un sistema de dos ejes, que actúan como dos poleas, y una correa. De esta manera se transmite el movimiento desde el eje motriz (rotor del motor) hasta un segundo eje conducido.

Se escoge este mecanismo de transmisión de movimiento fundamentalmente por la geometría del conjunto. No obstante, las siguientes características han influido en su elección:

- Bajo coste.
- Elevado rendimiento.
- Buena absorción de vibraciones, al ser elementos elásticos y flexibles.

^{xii} Fuente: Alejandro Mor, *Un sistema de iluminación natural para edificios*.

^{xii} Fuente: Alejandro Mor, *Un sistema de iluminación natural para edificios*

- Funcionamiento silencioso.
- No precisa lubricación.
- Gran fiabilidad.

Se define el sistema como una transmisión por correa abierta, donde se emplean árboles paralelos que giran en el mismo sentido. Este tipo de transmisión es la más difundida.

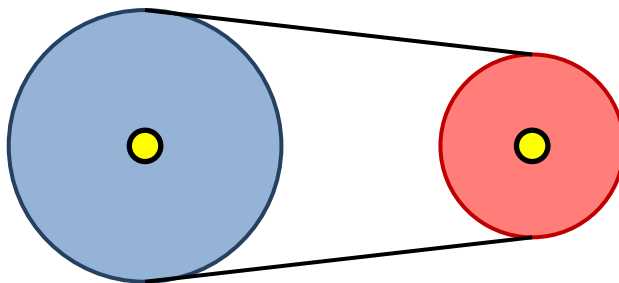


Ilustración 37. Sistema de transmisión por correa abierta^{xlii}.

A continuación, se comparan los diferentes tipos de correa existentes en el mercado mediante una serie de criterios.

Criterio	Plana	Trapezoidal	Dentada	Redonda
Trabajo a $v = 25\text{m/s}$	Aceptable	Aceptable	Bueno	Regular
Resistencia a los choques	Buena	Muy buena	Aceptable	Buena
Eficiencia %	97- 98	96 - 97	98 - 99	96 - 95
Longitud de correa	Libre	Normalizada	Dependiente	Libre
Nivel de ruido	Muy bajo	Muy bajo	Bajo	Bajo
Coste	Bajo	Bajo	Alto	Muy bajo
Facilidad de montaje entre apoyos	Bajo	Alto	Alto	Bajo

Tabla 6. Tabla comparativa tipos de correas^{xliii}.

^{xlii} Fuente: Elaboración propia.

^{xliii} Fuente: <https://ocw.ehu.eus/>

Se descartan las poleas redondas dado que proporcionan una menor eficiencia y se utilizan con muy poca frecuencia.

En referencia a las correas dentadas, se procede a descartarlas ya que suponen un coste más elevado que el resto de las alternativas. Además, deben comprarse con una longitud específica, es decir, no se pueden cortar ni unir ya que de ser así habría dientes de la correa que no engranarían correctamente con la polea dentada.

Dado que el peso de los elementos del sistema es bajo, el esfuerzo que debe realizar este es mínimo, por lo tanto, no se precisa de un par elevado y se escoge la correa plana frente a la trapezoidal porque esta es más sencilla y fácil de montar. Además, la correa plana tiene una eficiencia mayor que la correa trapezoidal.

Conjunto engranaje y correa dentada

Para transmitir el movimiento del eje horizontal de la esfera se ha escogido como correa dentada y engranaje un sistema llamado piñón-cremallera, el cual consiste en una rueda dentada cilíndrica y una cremallera.

Este sistema permite una transmisión suave y con precisión a la vez que es capaz de transmitir movimiento a potencias elevadas.

La rueda o piñón describe un movimiento de rotación alrededor de su eje y la cremallera está fija a la esfera. Cuando el piñón gira, la cremallera se desplaza en un sentido. El eje de la rueda es el mismo que el eje/polea conducido del conjunto de dos ejes con correa.

De este modo, para realizar el movimiento horizontal de la esfera se activará el motor, el cual moverá el eje conductor, este movimiento será transmitido a través de la correa al eje conducido que permitirá que el engranaje gire. El engranaje se moverá por la cremallera y así permitirá que la esfera se adapte a la altura del sol.



Ilustración 38. Sistema de transmisión piñón-cremallera curva^{xliv}

4.2.3. Movimiento del espejo de desvío

Se contempla utilizar un tercer motor que gire en el eje horizontal para rotar el espejo de desvío y, de esta manera, dirigir los rayos solares hacia el tubo intermedio. Sin embargo, se establece un sistema de transmisión de ejes paralelos para realizar el movimiento del espejo en el eje horizontal, por los siguientes motivos:

- Se pretende dar prioridad a las soluciones mecánicas que aprovechen de una manera razonable la fuente de luz solar.
- Se pretende simplificar el mecanismo lo máximo posible, prescindiendo de componentes eléctricos que pueden ser sustituidos por mecánicos. De esta manera, también se puede prescindir de un tope al movimiento del espejo que sería necesario si la rotación fuera accionada por un motor.

^{xliv} Fuente: <https://sites.google.com/site/tecnologiatic2011/>

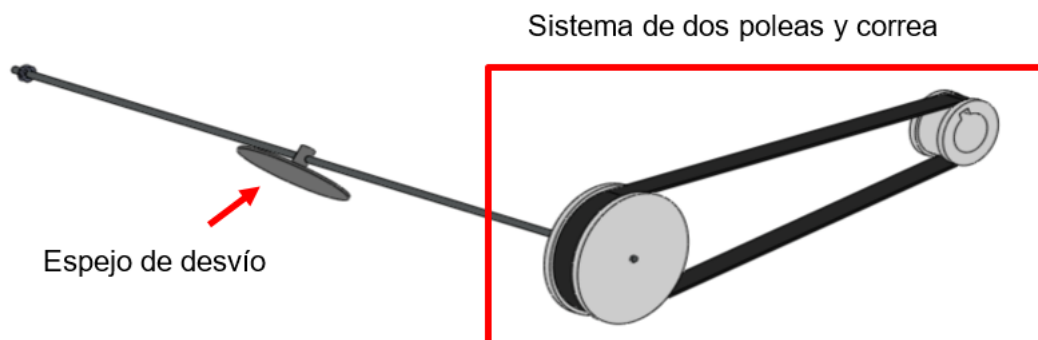


Ilustración 39. Sistema de transmisión de poleas con correa^{xlv}.

Se decide un sistema de poleas con correa, basado en una polea conductora más grande y una polea conducida más pequeña, unidas por una correa plana.

El sistema es escogido, ya que es simple y fácil de implementar y permite unir a la polea conductora un eje que atravesará la esfera y donde se podrá colocar el espejo de desvío. Además, la rueda conducida se unirá a través de un engranaje y un eje al sistema de movimiento del eje horizontal y, de esta manera, no se precisará de un tercer motor para mover el espejo. El motor paso a paso que adaptará la esfera a la altura del sol será también el que mueva el espejo de desvío.

4.3. Seguimiento solar

Para monitorizar la posición y el ángulo de incidencia de los rayos del Sol, se observan dos posibilidades: la de usar sensores de posición o el seguimiento por coordenadas calculadas.

Se escoge el sistema de seguimiento por sensores ya que, aunque presenta menos fiabilidad que la programación astronómica, es más fácil de implementar.

De entre los dos tipos de sensores que existen, se eligen los pirheliómetros debido a que el objetivo de la lente Fresnel es captar los rayos provenientes del sol.

^{xlv} Fuente: Elaboración propia.

4.4. Actuador

Para controlar y dirigir el movimiento del captador se utilizará una placa de Arduino, la cual constará de sensores en la entrada y controladores conectados a la salida. Mediante esta placa, se puede programar una trayectoria establecida que ejecutará el captador en función de las lecturas del sensor de radiación solar. De esta manera, se enviarán las órdenes a los motores paso a paso para que realice su recorrido en función del posicionamiento del Sol.

5. Solución del captador

Este proyecto es un prediseño que sienta las bases para poder optimizar el captador en un futuro proyecto. Para la optimización del captador sería necesario calcular y definir todas las medidas, en este apartado se plantearán estos cálculos y se indicará cómo resolverlos.

Además, se definirán los parámetros significativos y se establecerán los componentes que influyen y la manera en que lo hacen.

5.1. Requerimientos del diseño

- Se necesita que la esfera se mueva en dos ejes, es decir, que posea movimiento hacia dos direcciones de forma lineal, perpendicularmente opuestas.
- Se precisa un diámetro de la esfera considerablemente grande, ya que supone disponer de más espacio para el sistema de transmisión del espejo de desvío.
- Para que la luz pueda llegar al tubo reflectante, es necesario una apertura en la esfera en el punto de unión con el tubo intermedio.
- El diseño debe ser resistente a posibles fenómenos atmosféricos. Para ello, se cubrirá con una cúpula de plástico para que la lluvia no afecte al sistema.

5.2. Relación de diámetros entre la esfera y la lente de Fresnel

La lente de Fresnel está incrustada en la esfera. Para el diseño del captador, se utilizará una lente plana de sección circular. Para introducir la lente en la superficie de la esfera se ha de realizar un corte paralelo a uno de los ejes de esfera.

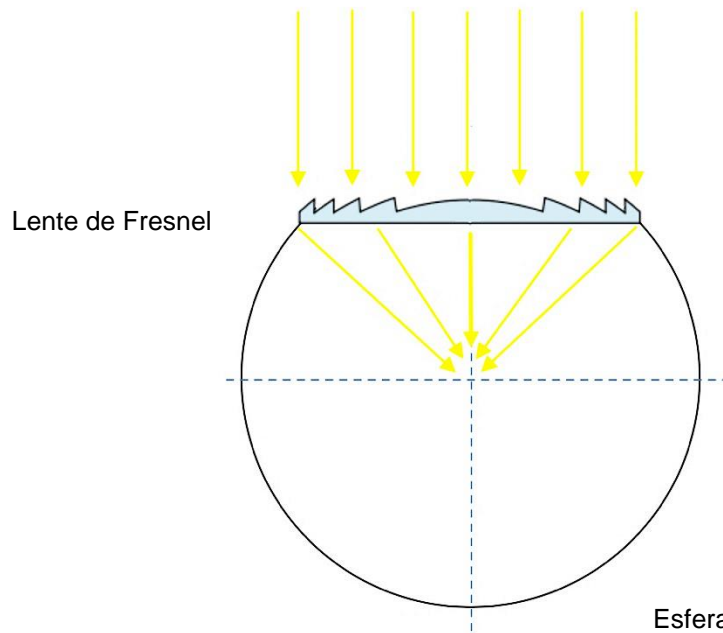


Ilustración 40. Lente Fresnel incrustada en esfera^{xlvi}.

La longitud del corte se convierte en el diámetro de la lente. La distancia al centro de la esfera es la distancia focal de la lente al punto donde se focalizan los rayos del Sol.

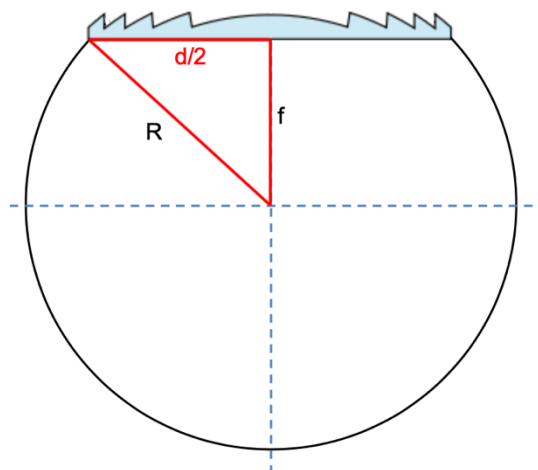
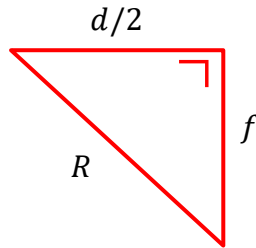


Ilustración 41. Relación distancia Lente Fresnel a centro de la esfera^{xlvii}.

^{xlvi} Fuente: Elaboración propia.

^{xlvii} Fuente: Alejandro Mor, *Un sistema de iluminación natural para edificios*.

Mediante la relación trigonométrica de Pitágoras se determina el diámetro de la lente (d) en función del radio de la esfera (R) y de la distancia focal de la lente (f).



$$H = \sqrt{c^2 + c^2}$$

$$R = \sqrt{\frac{d^2}{4} + f^2}$$

$$(1) d = 2\sqrt{R^2 - f^2}$$

Por facilitar la transmisión del movimiento al espejo reflectante, se ha decidido que este se sitúe en el centro de la esfera. En consecuencia, los rayos del sol se habrán de focalizar al centro de la esfera, lo que implica que la distancia focal (f) ha de ser inferior al radio de la esfera (R).

$$f < R$$

$$f = \frac{\%}{100} \times R$$

En la siguiente tabla se estudian diferentes relaciones de dimensiones entre (R) y (f).

#	%	R de la esfera, R (mm)	Distancia focal, f (mm)	Diámetro de la lente, d (mm)
1	75	100	75	132,29
2	77	100	77	127,61
3	80	100	80	120
4	85	100	85	105,36
5	90	100	90	87,18
6	92	100	92	78,38

Tabla 7. Relación de dimensiones entre (R) y (f)^{xlviii}.

^{xlviii} Fuente: Elaboración propia.

A la hora de escoger esta relación, se consideran los siguientes aspectos:

- Cuanto mayor es el diámetro de la lente, esta será capaz de captar una mayor cantidad de luz.
- Cuanto más alejada esté la lente del centro, el espejo de desvío dispondrá de más espacio de maniobra.

Se escoge la relación 2, ya que garantiza un tamaño de lente considerable sin estar muy cerca del centro de la esfera.

$$(2) \quad f = 0,77 \times R$$

Utilizando las ecuaciones (1) y (2), se podría calcular el diámetro de la lente (d) en función de las dimensiones de (D) y (f). Esto serviría para definir las medidas de un conjunto lente – esfera ideal, teniendo en cuenta todas las consideraciones anteriores.

Se decide partir de una esfera con un diámetro (D) de 500 milímetros y una lente de Fresnel con un diámetro (d) de 240 milímetros. Estas medidas se han escogido teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Cuanto mayor es el diámetro de la lente, esta será capaz de captar una mayor cantidad de luz.
- Cuanto menor es el tamaño de la esfera, el sistema será más fácil de manipular.

Haciendo uso de la relación trigonométrica (1) se determina la distancia focal (f) que es de 219,317 milímetros.

5.3. Apertura inferior de la esfera

Es necesaria una apertura en la parte de la esfera que está en contacto con el tubo intermedio, para que la luz pueda llegar al tubo reflectante.

Para determinar la disposición y dimensión de la apertura, se han de analizar los casos límite de la rotación de la esfera sobre el eje horizontal. De tal manera, se asegura que en todo momento la esfera esté abierta en la parte inferior que esté contacto con el tubo intermedio.

Los casos límite de la rotación en el eje horizontal se dan en las siguientes situaciones:

- Los rayos de Sol inciden a nivel del suelo.
- Los rayos de Sol inciden con la máxima inclinación.

El ángulo de incidencia de la radiación solar depende de la posición del sol en relación con una determinada posición de la superficie terrestre en un determinado momento del año.

Ciudad	Latitud	Ángulo de incidencia solar 21 de Diciembre	Ángulo de incidencia solar 21 de Junio
Madrid	40°,26	27°	73°
Monterrey	25°,44	42°	88°
Guadalajara (Mex)	20°,42	47°	87°
México DF	19°,24	48°	86°
Mérida (Mex)	20°,57	47°	87°
Antofagasta	-23°,38	90°	44°
Santiago (Chile)	-33°,26	80°	34°
Puerto Montt	-41°,28	72°	26°
Punta Arenas	-53°,10	60°	14°
Buenos Aires	-34°,36	79°	33°

Tabla 8. Ángulo de incidencia de la radiación solar en diferentes estaciones en diferentes ciudades^{xlix}.

En la siguiente tabla se pueden observar los ángulos de incidencia de la radiación solar en diferentes ciudades y en los solsticios de invierno y verano: dos momentos en los que el Sol alcanza su posición más alta en el cielo. Estas medias esta realizadas a las 12h del mediodía, hora en la que el Sol se sitúa más cerca del cénit.

Dado que este proyecto no contempla la instalación del captador en un espacio o momento del año en concreto, se utiliza esta tabla para establecer un valor de referencia máximo del ángulo de incidencia solar. Se toma como ángulo máximo solar 90°.

Así pues, se establecen los ángulos de posición límite de la rotación de la esfera en su eje horizontal en 0° y 90°. En la siguiente ilustración se puede observar la configuración del captador para un ángulo de incidencia solar de 0°, 89° y 60°. Al tratarse de una reflexión especular, el ángulo de incidencia de los rayos coincide con el ángulo de propagación ^[27].

^{xlix} Fuente: <http://www.sitiosolar.com/>

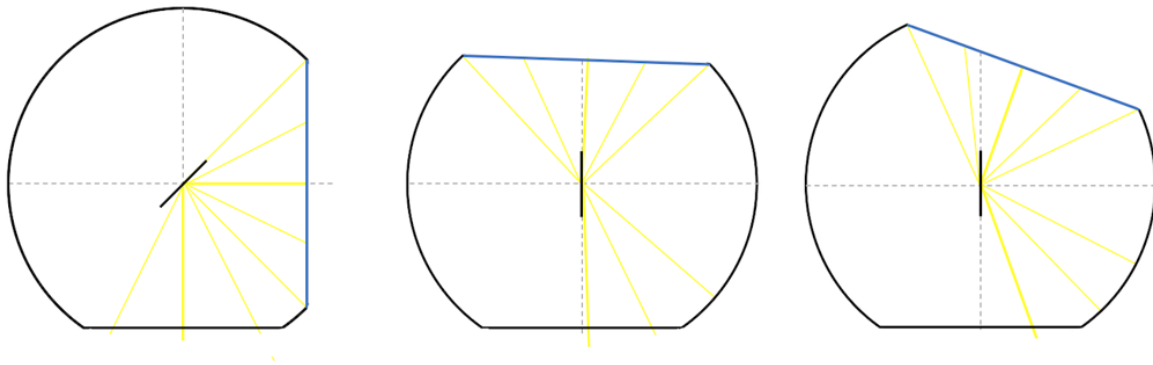


Ilustración 42. Movimiento del espejo en función de lente Fresnel¹.

Cabe destacar que hay un porcentaje de luz que incide en la lente y rebota en el espejo, pero nunca llega a incidir en la apertura inferior. El cálculo de este porcentaje dependerá de si la esfera está hecha de un material reflectante en su interior.

Observando estas configuraciones, se deducen los ángulos límite de la rotación del espejo en el eje horizontal.

Ángulo límite de incidencia solar	Ángulo límite de rotación de la esfera	Ángulo límite de rotación del espejo
0°	0°	45°
90°	90°	90°

Tabla 9. Tabla de ángulos límite^{li}

Haciendo uso de razones trigonométricas, se puede relacionar el ángulo de rotación del espejo (α) con la longitud de la apertura (L_A) y la distancia de la apertura al centro (d_A).

¹ Fuente: Elaboración propia.

^{li} Fuente: Elaboración propia.

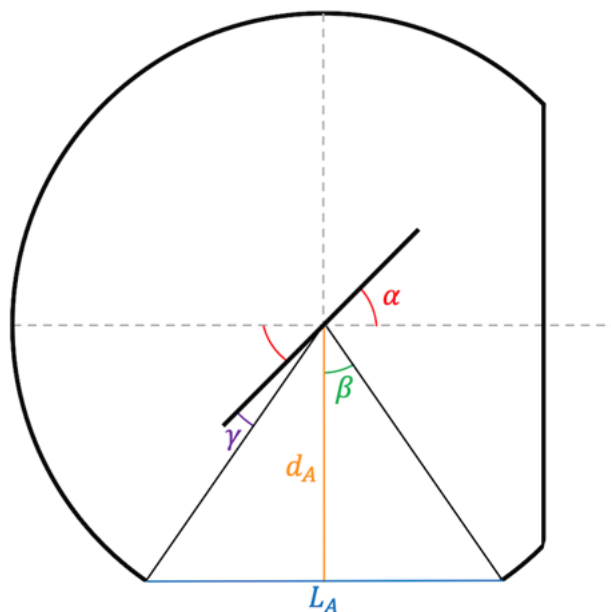


Ilustración 43. Relación de reflexión^{lii}.

$$90^\circ = \alpha + \beta + \gamma$$

$$\tan \beta = \frac{\sin \beta}{\cos \beta} = \frac{\frac{L_A}{2}}{d_A} = \frac{L_A}{2d_A} \rightarrow \beta = \tan^{-1} \left(\frac{L_A}{2d_A} \right)$$

Para que el rayo reflejado entre en la apertura este debe de situarse entre los ángulos $\pm\beta$ respecto a la vertical. Con esta consideración y con las relaciones trigonométricas planteadas, sería posible optimizar y calcular las medidas de longitud de la apertura (L_A) y la distancia de la apertura al centro (d_A).

En cuanto a la geometría de la apertura, se puede calcular teniendo en cuenta que debe estar diseñada para optimizar tanto los rayos verticales como los horizontales, que es más fácil que salgan.

Se ha decidido continuar la propuesta con una apertura en forma de elipse con una distancia entre focos de 100 milímetros, un semieje mayor de 150 milímetros y un semieje menor de 113,40 milímetros. Se ha escogido esta geometría y estas dimensiones priorizando la funcionalidad del conjunto.

^{lii} Fuente: Elaboración propia.

Tal y como se observa en la imagen, se hace uso de una junta de sección circular que envuelve la lente y facilita su unión con la esfera.

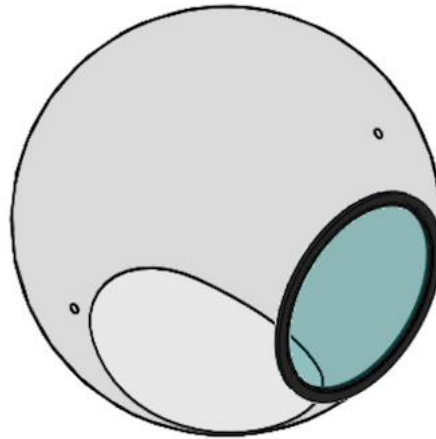


Ilustración 44. Esfera^{liii}

5.4. Movimiento de la esfera sobre el eje vertical

Consiste en el movimiento que hace la esfera para seguir al Sol de este a oeste. Los siguientes son los elementos que intervienen en este movimiento.

- Tubo intermedio.
- Unión entre tubo intermedio y esfera.
- Engranaje de ejes paralelos.
- Conjunto de dos ejes con correa.
- Motor paso a paso.
- Unión entre el tubo intermedio y el tubo reflectante.

5.4.1. Tubo intermedio

Es necesario un tubo intermedio entre la esfera y el tubo reflectante para llevar a cabo el movimiento vertical del captador. Esto se debe a que lo más probable es que el tubo reflectante vaya a estar unido y atravesando superficies fijas (tejados, suelos) por lo que se debe buscar una configuración en la cual el tubo reflectante sea un elemento fijo.

^{liii} Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, mediante la fuerza de un motor de eje vertical el tubo intermedio o cilindro cautivo girará solidariamente a la esfera en el plano horizontal.

El diámetro del tubo intermedio ha de ser obligatoriamente más grande que la sección de la apertura inferior. En caso contrario, los rayos solares podrían escaparse hacia el exterior de la esfera disminuyendo la cantidad de luz que llega al conducto reflectante. Además, se ha intentado optar por un diámetro de tubo estándar para no encarecer el presupuesto del conjunto. La decisión final es un tubo intermedio de 370 milímetros de diámetro.

5.4.2. Unión entre el tubo intermedio y la esfera

Para esta unión son necesarios dos mecanismos: uno que permita a la esfera rotar sobre el tubo en su eje horizontal, y otro que permita a la esfera y el tubo girar de forma solidaria.

Para que la esfera pueda girar en el eje horizontal, se ha optado por lo que se ha denominado un conector del eje vertical. El conector está constituido por un cilindro (que empieza donde acaba el tubo intermedio) y una corona de esferas de rodamiento situadas en la parte superior del conector que está en contacto directo con la esfera.

En cuanto al mecanismo encargado de hacer girar la esfera y el tubo intermedio solidariamente, se ha optado por una disposición de chavetas en el mismo encapsulado que permitirán que la esfera y el tubo giren de manera solidaria y que la esfera gire sobre su eje horizontal.

Estas chavetas estarán ubicadas a ambos lados de la apertura inferior y posicionadas concéntricamente a la esfera. Descansarán sobre el conector de eje vertical gracias a unas ranuras.

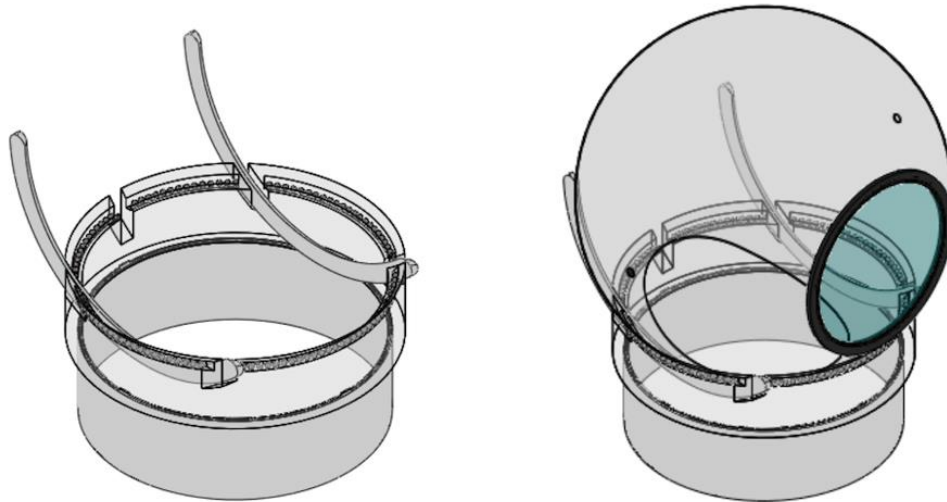


Ilustración 45. Unión entre el tubo intermedio y la esfera^{liv}.

5.4.3. Engranaje de ejes paralelos

Para transmitir el movimiento circular en el eje vertical del motor al cilindro cautivo, se utilizará un engranaje de ejes paralelos dado que el eje de rotación del cilindro cautivo es paralelo al eje del motor. No es posible unir directamente el rotor del motor y el tubo intermedio mediante un engranaje, ya que por limitaciones del prototipo el motor colisionaría con el tubo reflectante.

Así, el engranaje conductor será el que rodee un eje auxiliar y el engranaje conducido será el que envuelva el tubo intermedio. Para transmitir el movimiento del motor al eje auxiliar, se utilizará un sistema de poleas y correa.

A continuación, se detallan los parámetros y ecuaciones que servirían para calcular y optimizar las medidas del engranaje y, en consecuencia, el movimiento del captador en el eje vertical.

La velocidad lineal en el punto de contacto entre dos engranajes es igual en ambos:

$$v = r_1 \cdot \omega_1 = r_2 \cdot \omega_2 \Rightarrow \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

^{liv} Fuente: Elaboración propia.

v : velocidad lineal en el diámetro primitivo del engranaje.

r : radio del engranaje o mitad del diámetro primitivo.

ω : velocidad angular.

Z : número de dientes.

n : número de revoluciones realizadas por el engranaje.

El subíndice primero se considera como el engranaje conductor y el segundo, el conducido. Se considera una situación ideal donde no se producen pérdidas de potencia en la transmisión del movimiento:

$$P = \tau \cdot \omega \Rightarrow \tau_1 \cdot \omega_1 = \tau_2 \cdot \omega_2 \Rightarrow \tau_2 = \omega_1 \cdot \frac{\tau_1}{\omega_2}$$

P : potencia de rotación.

τ : torque o par motor del eje seleccionado.

La condición de engranaje establece que entre dos engranajes ambos deben tener el mismo módulo y, por tanto, el mismo paso:

$$m_i = \frac{d_i}{Z_i} = \frac{p_i}{\pi}$$

m : módulo.

d : diámetro primitivo.

p : paso del engranaje.

El siguiente paso consiste en buscar una relación de transmisión adecuada al movimiento que ha de realizar el engranaje. En este caso una buena opción sería una relación de transmisión 2, ya que cumple con los siguientes aspectos.

- Lentitud de la translación del Sol en la esfera celeste.
- Mayor aprovechamiento del torque de los motores.
- Limitaciones físicas del prototipo.

Se llega a los siguientes resultados numéricos:

$$\frac{Z_2}{Z_1} = 2$$

$$\tau_2 = \tau_1 \times 2$$
$$m_i = 2 = \frac{p_i}{\pi} \Rightarrow d_i = 2 \times Z_i$$

El engranaje escogido, que es de dientes rectos, se observa en la siguiente ilustración. El engranaje conducido tiene 72 dientes mientras que el conductor cuenta con 12 dientes, el módulo es 6.

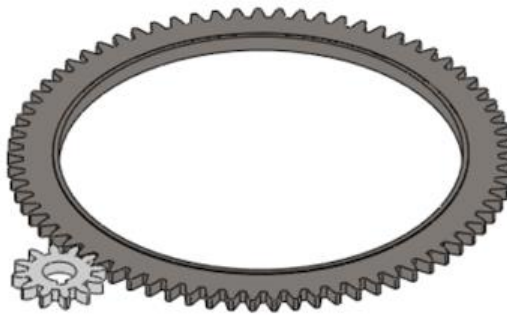


Ilustración 46. Engranaje de ejes paralelos^{lv}.

5.4.4. Conjunto de dos ejes con correa

Este conjunto servirá para transmitir el movimiento vertical del motor al eje auxiliar, que está envuelto por el engranaje conductor. La correa utilizada, tal y como se ha argumentado en el apartado 4, será plana.

Se ha procedido con un diámetro del eje auxiliar de 20 milímetros y un diámetro del rotor de 30 milímetros.

^{lv} Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 47. Conjunto de dos ejes con correa^{lvi}.

5.4.5. Motor paso a paso

El motor paso a paso que moverá el captador en el eje vertical estará situado a ras de suelo. Se ha de escoger un motor con par suficiente para poder realizar el movimiento requerido con suficiente fuerza y velocidad. Se estima que este motor podrá mover un peso de hasta 30kg, dependiendo de los materiales que se empleen.

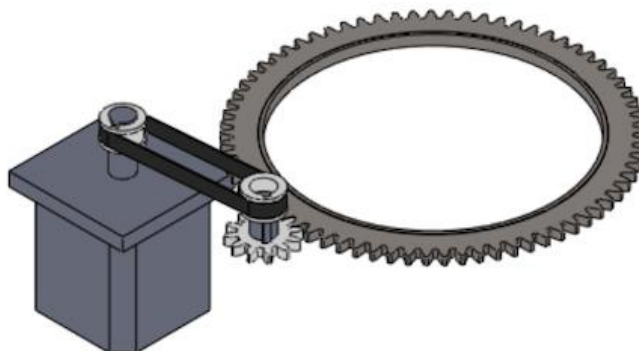


Ilustración 48. Conjunto de movimiento vertical^{lvii}.

^{lvi} Fuente: Elaboración propia.

^{lvii} Fuente: Elaboración propia.

5.4.6. Unión entre el tubo intermedio y el tubo reflectante

Finalmente, para que el tubo intermedio pueda girar sobre el tubo reflectante o tubo solar (elemento fijo) se debería dotar el sistema de un rodamiento cilíndrico.

No obstante, puesto que este proyecto solo abarca el diseño del captador, no se proseguirá a estudiar las opciones de este rodamiento.

5.5. Movimiento de la esfera sobre el eje horizontal

Consiste en el movimiento para adaptar la esfera a la altura del Sol. Los siguientes son los elementos que intervienen en este movimiento.

- Sistema piñón - cremallera.
- Conjunto de dos ejes con correa.
- Motor paso a paso.

5.5.1. Sistema piñón – cremallera

Este conjunto consiste en un engranaje que actúa como rueda y una correa dentada curva que actúa como cremallera y es tangente a la superficie exterior de la esfera.

La rueda o piñón describe un movimiento de rotación alrededor de su eje y la cremallera está fija a la esfera. Cuando el piñón gira, la cremallera se desplaza en el sentido contrario. Para realizar el movimiento horizontal, se transmitirá el movimiento del motor hasta esta rueda, la cual girará y se moverá por la cremallera, permitiendo que la esfera se adapte a la altura del sol.

Las siguientes ecuaciones permiten calcular los parámetros necesarios para poder optimizar el sistema piñón - cremallera si se quisiera.

Primeramente, se debe calcular la fuerza tangencial real a la que tendrá que estar sometida la cremallera.

Vertical: $F_{vt} = P \times (9,81 + a)$

Horizontal: $F_{ht} = P \times (9,81 \times \mu + a)$

F_{vt} : Fuerza tangencial vertical teórica. [N]

F_{ht} : Fuerza tangencial horizontal teórica. [N]

P : Masa a trasladar. [kg]

a : Aceleración lineal. [m/s²]

μ : Coeficiente rozamiento.

Se calcula la fuerza tangencial corregida en función del coeficiente de seguridad.

$$F_{VC} = F_{vt} \times K$$

$$F_{HC} = F_{ht} \times K$$

A continuación, se muestra una tabla orientativa para seleccionar el coeficiente de seguridad más adecuado para diferentes aplicaciones.

Tiempo de trabajo	Tipo de carga		
	Uniforme	Moderada	Pesada
Ocasional (1/2 hora)	1.5	1.8	2.3
Intermitente (3 horas)	1.8	2	2.5
8-10 horas	2	2.25	2.8
24 horas	2	2.5	3

Tabla 10. Tabla coeficiente de seguridad para diferentes tipos de carga^{lviii}.

Con el valor de la fuerza tangencial corregida, se puede seleccionar el módulo estándar y el número de dientes en función de la tipología y la dimensión de la cremallera necesaria. Con el módulo, se procede a calcular el diámetro primitivo del piñón.

$$d_p = m \times z$$

$$z = \frac{d_{max}}{m}$$

$$d_p = \frac{M \times 2000 \times \eta}{F_{HC}}$$

m : módulo del piñón.

z : número de dientes del piñón.

d_{max} : diámetro exterior del piñón [mm].

d_p : diámetro primitivo del piñón [mm].

M : par de giro [Nm].

η : rendimiento piñón cremallera.

Para calcular la longitud de la correa (L) necesaria se utilizará el ángulo de incidencia máxima (h_{c1}) y el radio de la esfera (R).

$$L = h_{c1} \cdot R$$

La siguiente ilustración muestra el diseño de piñón – cremallera utilizado en el captador. El piñón cuenta con 12 dientes mientras que la correa tiene una longitud de milímetros y está constituida por 25 dientes.

^{lviii} Fuente: <http://www.mecapedia.uji.es/>

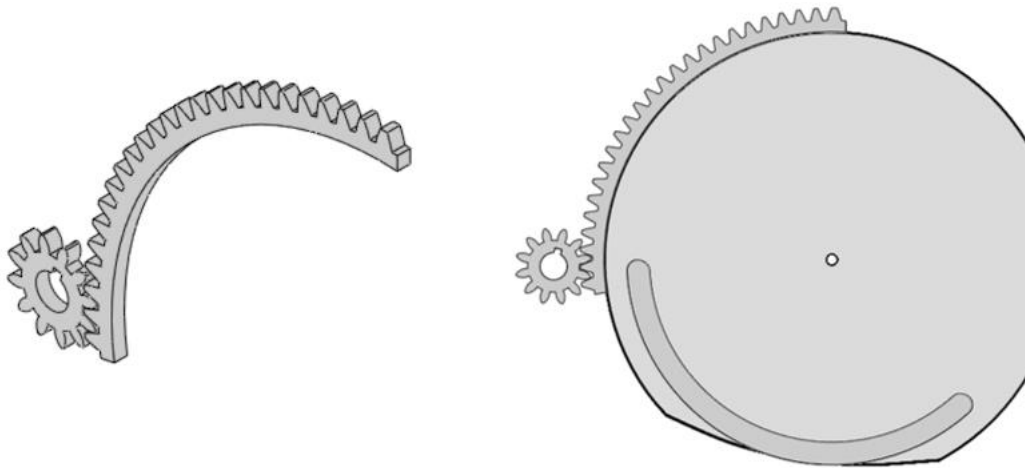


Ilustración 49. Sistema de transmisión piñón-cremallera^{lix}.

5.5.2. Conjunto de dos ejes con correa

Este sistema es necesario para transmitir el movimiento proporcionado por el motor en el eje horizontal a la esfera. Uno de los ejes corresponde al rotor del motor paso a paso, mientras que el otro se ve envuelto por el engranaje que actúa como rueda en el sistema piñón – cremallera.

De este modo, para realizar el movimiento horizontal de la esfera se activará el motor, el cual moverá el eje conductor, este movimiento será transmitido a través de la correa al eje conducido que permitirá que el engranaje gire. El engranaje se moverá por la cremallera y así permitirá que la esfera se adapte a la altura del sol.

La correa seleccionada, tal y como se ha argumentado en el apartado 4, es de tipo trapezoidal.

^{lix} Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 50. Conjunto de dos ejes con correa^{lx}

5.5.3. Motor paso a paso

Al igual que el motor del eje vertical, está ubicado a ras de suelo. Se estima que este motor deberá mover un peso de 10 kg aproximadamente por lo que se ha de escoger un motor con un par suficiente para cumplir con esta condición. La elección de los motores paso a paso, junto con su proveedor, se tomará en el siguiente apartado.



Ilustración 51. Movimiento eje horizontal con motor paso a paso^{lxi}.

^{lx} Fuente: Elaboración propia.

5.6. Movimiento del espejo de desvío

El espejo siempre deberá estar orientado de manera que el haz de luz proveniente de la lente Fresnel rebote en vertical hacia el tubo intermedio.

Se analizan las posiciones extremas del espejo de desvío. Dado que en este proyecto no contempla la instalación del captador en un espacio o momento del año en concreto, se establece como ángulo de incidencia máximo 90° .

- Cuando la lente está en la posición vertical, es decir, con un ángulo de incidencia de 90° , la función del espejo no será necesaria, ya que la luz proveniente del sol será dirigida directamente al tubo intermedio, sin necesidad del espejo de desvío.
- Cuando la esfera se encuentra a 90° en relación al conducto reflectante, es decir, en posición horizontal, el espejo deberá estar a 45° para que, de esta manera, la luz rebote en vertical hacia el tubo.

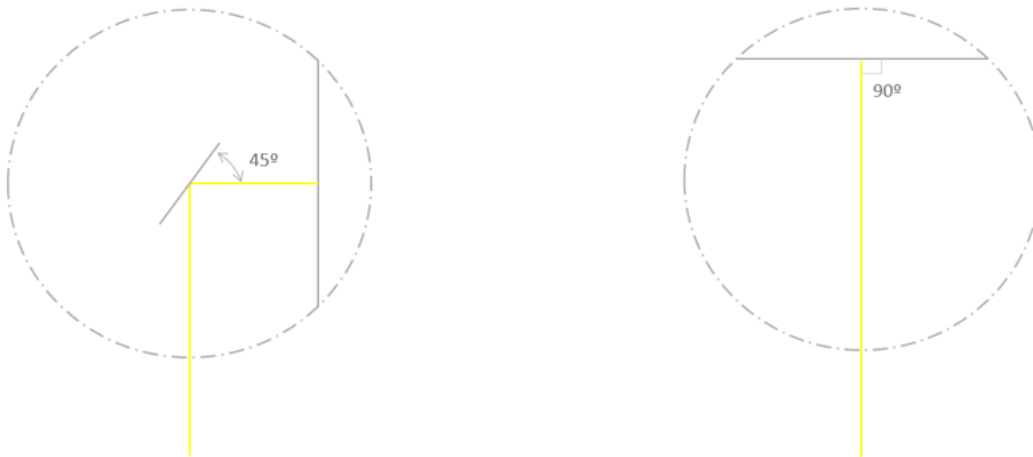


Ilustración 52. Orientación del espejo de desvío^{lxi}

Los siguientes son los elementos que intervienen en este movimiento.

- Espejo.
- Unión entre eje del espejo y esfera.
- Conjunto de dos ejes con correa.

^{lxi} Fuente: Elaboración propia.

^{lxii} Fuente: Elaboración propia.

5.6.1. Espejo

Se ha optado por un espejo recto de sección circular de 80 milímetros de diámetro. En la parte posterior del espejo, se encuentra un soporte atravesado por un eje sobre el cual el espejo girará horizontalmente. Este eje, tiene un diámetro de 5 milímetros y atraviesa la esfera en sus dos extremos.



Ilustración 53. Eje y espejo de desvío^{lxiii}

5.6.2. Unión entre eje del espejo y esfera

Tal y como se ha explicado, el eje del espejo atraviesa la esfera en sus dos direcciones. Por ello, la esfera cuenta con dos orificios enfrentados.

Para transmitir el movimiento del espejo en el eje horizontal a través de la esfera, se ha dotado de un rodamiento cilíndrico a estos dos agujeros. Este rodamiento es necesario pues se trata de un sistema con un elemento fijo (esfera) y un elemento móvil (eje del espejo). Además, entre el rodamiento y el orificio de la esfera hay una junta para facilitar el contacto entre ambas superficies.

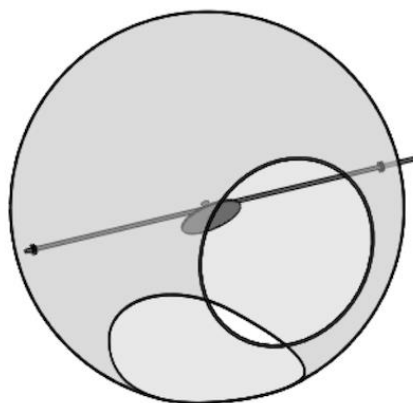


Ilustración 54. Unión entre espejo y esfera^{lxiv}

^{lxiii} Fuente: Elaboración propia.

5.6.3. Conjunto de dos poleas con correa

Para realizar este movimiento de 45-90° del espejo de desvío se utiliza el sistema de transmisión de poleas con correa, en el cual el eje conducido atraviesa la esfera y es donde está ubicado el espejo, mientras que la rueda conductora es la que unida al eje horizontal de la cremallera gira en el mismo sentido.



Ilustración 55. Sistema de transmisión poleas con correa^{lxv}.

La relación de transmisión del sistema es:

$$i = \frac{N_2}{N_1} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

N_1 : velocidad rueda conductora.

N_2 : velocidad rueda conducida.

Z_1 : número dientes rueda conductora.

Z_2 : número dientes rueda conducida.

Además, se relaciona el tamaño y la velocidad de la siguiente manera:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{D_1}{D_2}$$

Se ha realizado una relación de radios $D_2 = 2 \cdot D_1$.

^{lxiv} Fuente: Elaboración propia.

^{lxv} Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente ilustración se observa el sistema de poleas con correa necesario para garantizar el movimiento del espejo en su eje horizontal. La polea conductora, unida al eje de la cremallera tiene un diámetro exterior (D_1) de 50 milímetros y un diámetro interior de 30 milímetros. La polea conducida, tiene un diámetro exterior (D_2) de 100 milímetros y cuenta con un orificio concéntrico de diámetro 10 milímetros por donde pasa el eje de giro del espejo.

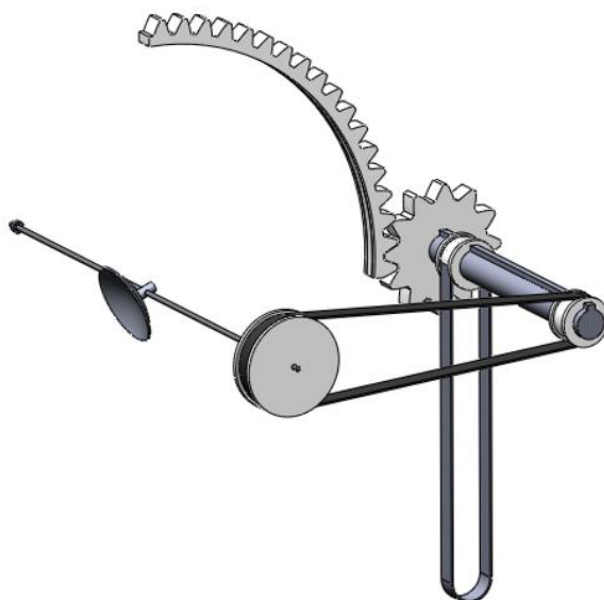


Ilustración 56. Conjunto de dos poleas con correa^{lxvi}.

5.7. Ejes de los motores

El diseño constará de un motor paso a paso híbrido, el cual está constituido de un rotor y un estator^[28]. La estructura del rotor es la formada por un disco cilíndrico imantado en posición longitudinal al eje, el cual está altamente magnetizado produciendo un flujo unipolar. El rotor contiene dos piezas de polos separados por un magneto permanente, con los dientes opuestos desplazados en una mitad de un salto de diente para permitir una alta resolución de pasos. Para que el eje del rotor sea más ligero, constará de un eje hueco.

^{lxvi} Fuente: Elaboración propia.

6. Proveedores y presupuesto

Para seleccionar los proveedores de los elementos del conjunto se ha llevado a cabo un estudio exhaustivo teniendo en cuenta las medidas de estos y realizando la mayoría de ellos a medida mediante proveedores industriales.

En cuanto al presupuesto, se realizará en base al estudio definitivo de los componentes, para el cual se tiene en cuenta el precio de cada uno de los elementos. A continuación, se expone un desglose de las diferentes partes del sistema y con este el precio, proveedor de cada uno de ellos.

Desde un principio se planteado un presupuesto con elementos mecanizados, pero también se ofrece la solución para modelos impresos. Por ello, en la última columna se observa la opción de auto-fabricación de cada elemento (DIY).

	Componente	Medidas	Proveedor	Material	Unidad (u)	Precio (€/u)	DIY
Conjunto esfera	Esfera	$d = 500 \text{ mm}$	Modulor	PVC	1	23,90	SÍ
	Chaveta	$R_{\text{ext}} = 225 \text{ mm}$ $R_{\text{int}} = 200 \text{ mm}$	Mbo Osswald	Acero inoxidable	2	18,88	SÍ
	Cremallera esfera	$R_{\text{ext}} = 275 \text{ mm}$ $R_{\text{int}} = 250 \text{ mm}$	Cross & morse	Acero inoxidable	1	5,12	SÍ
	Cremallera ISO	$R_{\text{ext}} = 276 \text{ mm}$ $R_{\text{int}} = 249,93 \text{ mm}$	Cross & morse	Acero inoxidable	1	5,12	SÍ
Conjunto Lente Fresnel	Lente Fresnel	$d = 240 \text{ mm}$ $f = 219,317 \text{ mm}$	Greenlight Solutions	PMMA Acrílico	1	115,50	NO
	Junta Lente	$d_{\text{ext}} = 266,53 \text{ mm}$ $d_{\text{int}} = 234,53 \text{ mm}$	Trelleborg	Plástico goma	1	12,32	NO

Conjunto espejo	Espejo	$d = 80 \text{ mm}$	Zygo	Vidrio reflectante	1	8,97	NO
	Eje espejo	$d = 5 \text{ mm}$ $L = 550,2 \text{ mm}$	Schaeffler	Acero inoxidable	1	15,40	SÍ
	Junta eje espejo esfera	$d_{\text{ext}} = 12 \text{ mm}$ $d_{\text{int}} = 6,5 \text{ mm}$	Trelleborg	Acero inoxidable	2	2,31	SÍ
	Rodamiento	$d_{\text{ext}} = 8 \text{ mm}$ $d_{\text{int}} = 5 \text{ mm}$ Esp. = 2,5 mm	ZEN	Acero inoxidable	2	2,27	SÍ
Conjunto movimiento vertical	Engranaje vertical	$d_{\text{ext}} = 552 \text{ mm}$ $d_{\text{int}} = 500 \text{ mm}$ $z = 72$	Cross & morse	Acero inoxidable	1	12,40	SÍ
	Piñón cremallera	$d_{\text{ext}} = 84 \text{ mm}$ $d_{\text{int}} = 30 \text{ mm}$ $z = 12$	Cross & morse	Acero inoxidable	1	11,17	SÍ
	Rueda grande transmisión espejo	$d_{\text{ext}} = 50 \text{ mm}$ $d_{\text{int}} = 30 \text{ mm}$ Esp. = 30 mm	ZEN	Acero inoxidable	2	16,88	SÍ
	Eje vertical motor	$d = 30 \text{ mm}$ $L = 200 \text{ mm}$	Schaeffler	Acero inoxidable	1	13,21	SÍ
	Motor	$S = 170 \times 170 \text{ mm}^2$	Kollmorgen	Acero inoxidable	1	91,32	NO
	Eje vertical motor 2	$d = 30 \text{ mm}$ $L = 57,42 \text{ mm}$	Schaeffler	Acero inoxidable	1	7,59	SÍ

	Correa motor corta 2	R = 24,5 mm L = 195,38 mm (entre centros)	Megadyne	Plástico goma	1	3,72	SÍ
Conjunto movimiento horizontal	Motor	S = 170x170 mm ²	Kollmorgen	Acero inoxidable	1	91,32	NO
	Eje vertical motor	d = 30 mm L = 200 mm	Schaeffler	Acero inoxidable	1	13,21	SÍ
	Rueda grande transmisión espejo	d _{ext} = 50 mm d _{int} = 30 mm Esp. = 30 mm	ZEN	Acero inoxidable	1	16,88	SÍ
	Correa motor corta	R = 24,5 mm L = 420 mm (entre centros)	Megadyne	Plástico goma	1	4,20	SÍ
Conjunto engranaje horizontal	Cremallera ISO	R _{ext} = 276 mm R _{int} = 249,93 mm	Cross & morse	Acero inoxidable	1	5,12	SÍ
	Eje horizontal cremallera	R = 30 mm L = 310 mm	Schaeffler	Acero inoxidable	1	13,75	SÍ
	Rueda grande transmisión espejo	d _{ext} = 50 mm d _{int} = 30 mm Esp. = 30 mm	ZEN	Plástico	2	16,88	SÍ
	Correa	R ₁ = 47 mm R ₂ = 24,5 mm L = 304,72 mm (entre centros)	Megadyne	Plástico goma	1	4,65	SÍ
	Piñón cremallera	d _{ext} = 84 mm d _{int} = 30 mm	Cross & morse	Acero inoxidable	1	11,17	SÍ

	Rueda transmisión espejo	d = 100 mm L = 30 mm	ZEN	Plástico	1	22,35	SÍ
	ISO Spurgear	d _{ext} = 552 mm d _{int} = 500 mm	Cross & morsE	Acero inoxidable	1	12,40	SÍ
Conjunto conector esfera cilindro	Conector eje vertical	d _{ext} = 500 mm d _{int} = 360 mm	Norelem	ISO plástico	1	46,31	SÍ
	Esfera rodamiento superior	R=3,60 mm	NSK	Acero	120	0,57	SÍ
Conexión con tubo solar	Cilindro cautivo / Tubo intermedio	d = 370 mm L = 116 mm	Grupo Hastinik	Acero inoxidable	1	6,39	NO
	Tubo solar	d = 300 mm L = 300 mm	Solarmat	Aluminio reflectante	1	122,51	NO
Cúpula		R= 400 mm L = 700 mm	Duradom	Plástico: PMMA	1	84,39	NO

Tabla 11. Tabla componentes^{lxvii}.

TOTAL= 963,23 €

Aunque el presupuesto indicado se ha dado con elementos mecanizados, varios de los elementos se pueden fabricar con el sistema de impresión 3D que permite ajustar el tamaño al deseado de una forma rápida y económica y que permitirá reducir el peso del conjunto. Estos elementos son:

- Engranajes (piñón-cremallera, engranaje vertical)
- Cremalleras
- Rodamientos

^{lxvii} Fuente: Elaboración propia.

- Juntas
- Ruedas de transmisión
- Correas

También, al gasto del captador se debería añadir un gasto de montaje del prototipo. Este constará de 100 horas, considerando el sueldo de 25€ por hora:

	Precio unitario (€/h)	Horas dedicadas (h)	Gasto bruto (€)
Montaje del prototipo	25	100	2.500

A esto se le debe añadir el precio relacionado con los gastos del trabajo de ingeniería para el cual se tendrán en cuenta el sueldo bruto de un ingeniero considerando 35€ por hora. Las horas dedicadas al trabajo corresponden a unas 360 horas:

	Precio unitario (€/h)	Número de técnicos	Horas dedicadas (h)	Gasto bruto (€)
Técnicos del proyecto	35	2	180	12.600

Por lo tanto, el total del proyecto sería un gasto aproximado de:

Captador	963,23€
Montaje prototipo	2.500€
Técnicos del proyecto	12.600€
TOTAL	16.063,23€

El gasto total del proyecto es de 16.063,23 €.

7. Impacto medioambiental

Se evalúa el impacto medioambiental de la solución propuesta para el captador definido en el proyecto. Se busca que el conjunto sea sostenible en términos medioambientales y así se minimice el impacto medioambiental.

Para ello, se analizará cada uno de los materiales empleados para elaborar los componentes del captador y se procederá a estudiar cómo afecta cada uno de ellos al medioambiente.

7.1. Plásticos

Los desechos plásticos no son materiales que sean susceptibles de asimilarse de nuevo en la naturaleza. Por ello, se ha establecido el reciclado de los productos de plástico, el cual se basa en recolectarlos, limpiarlos, seleccionarlos por tipo de material y fundirlos nuevamente para su uso como materia prima, alternativa o sustituta, para el moldeado de otros productos.

Algunos de los componentes del captador fabricados de plástico son los siguientes:

- Cúpula
- Lente Fresnel
- Esfera
- Conector esfera cilindro
- Rueda de transmisión
- Correas
- Juntas

El reciclado de estos elementos tiene gran variedad de aplicaciones y no se trata un proceso complejo. Existen las diferentes variables de reciclaje:

- **Reciclaje mecánico:** consiste en seleccionar residuos, moldearlos, añadirles los aditivos necesarios y transformarlos en nuevos productos.
- **Reciclaje energético:** trata sobre la incineración de los residuos y así la obtención de energía térmica.
- **Reciclaje por disolventes:** se basa en la disolución química del plástico mediante solventes específicos que separan el plástico de otros componentes para provocar su precipitación.

- **Reciclaje químico:** los residuos son sometidos a procesos químicos bajo altas temperaturas y presiones con la finalidad de descomponerlos en productos más básicos (aceites y gases) y así poder emplearlos.

7.2. Vidrio

El vidrio es un material duro, transparente y frágil que se encuentra en la naturaleza aunque también puede ser fabricado de forma artificial. Este se utiliza principalmente para hacer ventanas, lentes y otra gran cantidad de productos.

Para llevar a cabo el reciclaje de este material, el vidrio es separado y clasificado según su tipo dependiendo de su color. Después se tritura formando un polvo grueso llamado calcín, que sometido a altas temperaturas, se funde junto con arena, hidróxido de sodio y caliza para fabricar nuevos productos que tendrán las mismas propiedades al vidrio obtenido de los recursos naturales.

En esta clasificación incluimos el vidrio reflectante del espejo de desvío.

7.3. Aluminio

El aluminio es el tercer material más común en la Tierra, aunque es un material muy contaminante. De todas maneras, este puede ser reciclado y es por eso que el captador se plantea con aluminio en alguno de sus componentes.

El reciclaje del aluminio consiste en refundir el metal, proceso que reduce el consumo de energía y es relativamente económico. Además, únicamente se produce un 5% de dióxido de carbono durante el proceso del reciclado en comparación con la producción de aluminio desde la materia prima.

En esta sección se encuentra el tubo solar hecho de aluminio reflectante.

7.4. Acero inoxidable

El acero inoxidable consiste en una aleación de hierro que contiene níquel y cromo para protegerlo contra la corrosión y el óxido. Este material es particularmente fuerte y resistente a las altas temperaturas, obteniendo de esta manera un rendimiento elevado en condiciones ambientales extremas.

Debido a los diferentes tipos de aceros inoxidables, primero se clasifican mediante tecnología avanzada de identificación. Una vez separados, se compactan en grandes bloques para facilitar su manipulación y posteriormente se cortan con cizalla en pequeñas

piezas. Después se funden todos los materiales recuperados en un horno y, finalmente, se determina el nivel de pureza necesario para aplicaciones futuras de esta materia prima secundaria.

Como componentes de acero inoxidable del captador se encuentran:

- Engranajes
- Rodamientos
- Motores
- Ejes
- Chavetas
- Cremalleras

Conclusiones y futuros proyectos

Se ha cumplido satisfactoriamente los objetivos principales propuestos en el trabajo de fin de grado. Se ha detallado el funcionamiento y se ha establecido un prediseño de los componentes y del sistema de transmisiones. Además, se ha justificado debidamente la selección de estos componentes al igual que se ha presentado las posibles alternativas.

Por otro lado, se ha realizado un estudio de los proveedores disponibles y se ha decidido cuáles serían los más adecuados para el captador planteado.

Con relación a uno de los objetivos secundarios, se ha estudiado la posibilidad de realizar cambios en el conjunto de partida. En el caso del movimiento del espejo, se había planteado inicialmente utilizar un motor que hiciera girar al espejo en el eje horizontal. Sin embargo, después de estudiar otras alternativas se ha acabado decidiendo que utilizar un sistema de transmisiones para hacer rotar el espejo con uno de los motores de la esfera, es la opción más adecuada para el captador.

Relacionado con el segundo objetivo secundario, se ha orientado la propuesta para facilitar la implementación del concepto “Do it yourself” y así permitir el montaje o reparación del captador desde casa. Esto se puede llevar a cabo imprimiendo los componentes en una impresora 3D y redactando un manual para su uso y montaje. Los componentes deben de estar fabricados a partir de polímeros, por ello se ha considerado esta opción en el apartado de presupuesto y se ha diseñado los planos del conjunto con el material ABS.

Respecto a la posibilidad de mejorar el proyecto de cara a futuras revisiones, este podría ser mejorado de distintas maneras. Por ejemplo, se podría revestir la esfera en su interior de material reflectante. Así, los rayos que rebotan en el espejo y no se ven dirigidos hacia la apertura inferior, al impactar contra la esfera se podrían ver redirigidos hacia la apertura. De esta manera, se aumentaría la eficacia del captador.

El siguiente paso de cara a futuros proyectos, sería utilizar las aproximaciones hechas y las relaciones entre componentes establecidas, para optimizar las medidas del captador. Así se podría dar un diseño del captador que, con el análisis de proveedores realizado, podría estar listo para su producción. Cabe destacar que en este proyecto quedan indicados los cálculos que estarían implicados en esta optimización del diseño.

Agradecimientos

Nos gustaría agradecer a nuestro tutor, Joaquín Fernández, su implicación y dedicación, sin tu ayuda este trabajo no se hubiera llevado a cabo satisfactoriamente.

También queremos agradecer a cada uno de los profesores con los que hemos compartido aula durante nuestros estudios, cada uno de ellos nos ha aportado conocimientos que han resultado útiles en este trabajo.

En especial, queremos dar gracias a nuestras familias, vuestro apoyo ha sido fundamental durante todo el grado y, especialmente, durante la realización de este proyecto.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

[¹] ARQA, Comunidad de Arquitectura y Diseño, *Con todas las luces: los beneficios de la luz natural en los espacios de trabajo*, mayo 2014. [<https://arqa.com/actualidad/colaboraciones/con-todas-las-luces-los-beneficios-de-la-luz-natural-en-los-espacios-de-trabajo.html>, 13 abril 2020].

[²] Alejandro Mor, Un estudio de un sistema de iluminación natural para edificios, abril 2020. [<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/178092>].

[³] Inarquia; web sobre energías renovables, arquitectura sostenible y eficiencia energética. *Tubos solares para mejorar la iluminación natural de interiores*. Noviembre 2019. [<https://inarquia.es/tubos-solares-iluminacion-natural>, 20 de abril 2020].

[⁴] Manuel Otorri, *Partes de un tubo de luz solar*, junio 2017. [<https://tubosolar.com/TuboSolar/tubo-solar/page/2/>, 24 abril 2020].

[⁵] Espacio Solar, *Tubos de luz*, noviembre 2018. [<https://espaciosolar.com/tubos-de-luz/>, 23 abril 2020].

[⁶] Escayolas bedmar, *Claraboyas de metacrilato*, mayo 2015. [<https://escayolasbedmar.com/claraboyas-de-metacrilato/>, 25 de abril 2020].

[⁷] Labi, *Policarbonato*. [<https://www.alumlabi.es/panel-de-policarbonato.html>, 25 de abril 2020].

[⁸] Espacio Solar, *Lucernarios de cristal, el factor clave del éxito*. [<https://espaciosolar.com/lucernarios/>, 25 de abril 2020].

[⁹] Cursos teleformación, *Lentes de Fresnel*, [<http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/OptGeometrica/Instrumentos/fresnel/fresnel.htm>, 26 de abril 2020].

[¹⁰] EcuRed contributors, *Sílice*, Agosto 2019. [<https://www.ecured.cu/S%C3%ADlice>, 26 de abril 2020].

[¹¹] Good Fellow, Vidrio óptico BK7. [<https://www.goodfellow-ceramics.com/sp/productos/vidrio/vidrio-optico-bk7/>, 26 de abril 2020].

[¹²] Construmática, *Policloruro de vinilo*, [https://www.construmatica.com/construpedia/Policloruro_de_Vinilo, 26 de abril 2020].

- [13] Construmática, *Policloruro de vinilo*, [https://www.construmatica.com/construpedia/Policloruro_de_Vinilo, 26 de abril 2020].
- [14] AEA, Asociación Española del Aluminio y Tratamientos de Superficie, *Propiedades del Aluminio*, [<https://www.asoc-aluminio.es/el-aluminio/propiedades-del-aluminio>, 27 de abril 2020].
- [15] Elementos, Elementos de la tabla periódica y sus propiedades. [<https://elementos.org.es/plata>, 27 de abril 2020].
- [16] Sopelia, Solar Platform America Latina, *Sistemas de seguimiento solar*, marzo 2020. [<https://www.energiasolar.lat/sistemas-de-seguimiento-solar/>, 28 de abril 2020].
- [17] Lucía Arribas, SotySolar, *Placas Solares, seguidores solares*, junio 2018. [<https://sotysolar.es/placas-solares/seguidores-solares>, 28 de abril 2020].
- [18] Tercesa SL, *Motor de corriente continua; tipos y partes*, mayo 2019. [<https://tercesa.com/noticias/motor-de-corriente-continua-tipos-y-partes/>, 1 de junio 2020].
- [19] CLR, Compañía Levantina de Reductores, *Motores de corriente continua y alterna: estudio y selección*. [<https://clr.es/blog/es/motores-corriente-continua-alterna-seleccion/>, 1 de junio 2020].
- [20] Ingeniería Mecafenix, *Motor paso a paso. ¿Qué es y cómo funciona?* Abril 2017. [<https://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/motor-paso-a-paso/>, 30 de abril 2020].
- [21] Alciro Books, Science Engineering & Information Technology, *Motores paso a paso de reluctancia variable*, [http://www.alciro.org/alciro/Plotter-Router-Fresadora-CNC_1/Motores-reluctancia-variable_42.htm, 30 de abril 2020].
- [22] Gerard Moisés, *Motores con imán permanente*. [<https://www.monografias.com/trabajos100/motores-iman-permanentes/motores-iman-permanentes.shtml>, 29 de abril 2020].
- [23] Ingemecánica, Ingeniería, Consultoría y Formación. *Transmisión por cadenas. Cálculo y diseño*. [<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn127.html>, 6 de junio 2020].
- [24] José Luis R., *Como funciona un rotor*, [<https://como-funciona.co/un-rotor/>, 31 de mayo 2020].
- [25] EMAG, Fabricación de piezas, *Eje del rotor*. [<https://www.emag.com/es/piezas/eje-del-rotor-de-motor-electrico.html>, 31 de mayo 2020].
- [26] Arduino. CL. *¿Qué es Arduino?* [<https://arduino.cl/que-es-arduino/>, 6 junio 2020].
- [27] FisicaLab, Reflexión y refracción de la luz. [<https://www.fiscalab.com/apartado/reflexion-refraccion-luz>, 8 de septiembre 2020].

[28] Alciro, Poltter Router Fresadora CNC, *Motores paso a paso híbridos*. [http://www.alciro.org/alciro/Plotter-Router-Fresadora-CNC_1/Motores-hibridos_158.htm, 3 de junio 2020].