UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior de Edificación

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO
MECATRÓNICO DE SEGUIDOR SOLAR
PARABÓLICO PARA LA EDIFICACIÓN**

TESIS DOCTORAL

JORGE PABLO DÍAZ VELILLA

(Ingeniero Industrial)

2018

Departamento de Tecnología de la Edificación

Escuela Técnica Superior de Edificación

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO MECATRÓNICO DE SEGUIDOR SOLAR PARABÓLICO PARA LA EDIFICACIÓN

AUTOR: JORGE PABLO DÍAZ VELILLA

(Ingeniero Industrial)

DIRECTOR: CARLOS MORÓN FERNÁNDEZ

(Doctor en CC Físicas)

2018

*Tribunal nombrado por el Magfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad
Politécnica de Madrid, el día de de 2018*

EL TRIBUNAL CALIFICADOR

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis.

En Madrid, el día de de 2018

Calificación:

El presidente

Los vocales

El secretario

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO MECATRÓNICO DE SEGUIDOR SOLAR PARABÓLICO PARA LA EDIFICACIÓN

Jorge Pablo Díaz Velilla

Universidad Politécnica de Madrid

Grupo de Investigación de Sensores y Actuadores de la

Universidad Politécnica de Madrid

Trabajo desarrollado para la obtención del Grado de Doctor de la

Universidad Politécnica de Madrid

Junio de 2018

A todos aquellos que creen en las energías
renovables y el desarrollo sostenible como
solución al problema energético y
medioambiental de nuestro planeta

RESUMEN

La producción de **energía** desde la Revolución Industrial se ha centrado en el empleo de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural). De otra parte, las potencias emergentes (China, India y Brasil), deseosas de incrementar sus economías y replicando el modelo de crecimiento de países industrializados, son igualmente intensivos en el consumo de las anteriores materias primas. Ello genera indefectiblemente dos graves problemas:

- El progresivo agotamiento de yacimientos petrolíferos y de gas natural (vida estimada en 50 años) y de carbón (150 años).
- Las desaforadas emisiones de gases de efecto invernadero (CO_2 y CH_4) que van emparejadas a la quema de combustibles (partículas presentes en la atmósfera en concentraciones de 413 ppm, responsables ya de un incremento de 1°C en la temperatura atmosférica). Es el tristemente conocido como cambio climático.

Son muchísimas las actividades que el ser humano desarrolla, que generan esta insostenible contaminación medioambiental: amén de la producción energética “clásica”, son también responsables el transporte, fabricación de bienes de consumo, minería, telecomunicaciones, industrias alimenticias... y **edificación**. En efecto, se estima que en España es responsable del 33% de consumo de la energía anual generada (imputando la necesaria para fabricar materiales de construcción precisos para el sector y energía térmica y eléctrica empleada por hogares y edificio). Y dicho sector es responsable, con el actual “mix” energético nacional, del 30% de emisiones nocivas. A results de lo anterior parece imprescindible que las sociedades avanzadas inicien una transición hacia un modelo económico de crecimiento basado en el **desarrollo sostenible**, donde los dos pilares sean la eficiencia energética y las energías renovables. En añadidura, están apareciendo nuevos actores que cambiarán en las próximas décadas el paradigma energético a escala mundial: generación distribuida, edificios inteligentes, viviendas de consumo casi nulo y procesado masivo de datos. Un apasionante desafío para el futuro.

De entre las tecnologías renovables, la **energía solar** en todas sus vertientes de aprovechamiento (térmica, fotovoltaica y de concentración), parte como una de las mejores candidatas para liderar el anterior desafío. Afortunadamente, las dos primeras ya son familiares en el sector edificación. La primera para producción de ACS, apoyo a calefacción, climatización de piscinas y frío solar por absorción. La segunda bien para generación de electricidad para autoconsumo, bien para inyección a red. Sin embargo, la solar de concentración hasta la fecha ha tenido una presencia poco significativa en viviendas y construcciones. Así, aun existiendo una base instalada de 50 plantas industriales termosolares ya operativas y elevada potencia (totalizando 2,3 GW en España) no hay casi dispositivos basados en energía solar de concentración adaptados a las necesidades energéticas de nuevas edificaciones. En añadidura, las actuales bases de datos de irradiancia solar se obtienen mediante radiómetros superficiales distribuidos por todo el país, junto a medidas indirectas de radiación reflejada sobre la superficie terrestre, integradas en algoritmos de interpolación de datos: aun siendo válidos, hay margen de mejora para confeccionar tablas de valores *ad hoc*.

Al igual que los proyectos de investigación en robótica medioambiental existentes y de la confluencia de lo anterior, la presente Tesis Doctoral pretende diseñar, simular, fabricar, validar y experimentar con un prototipo **mecatrónico** de seguidor termosolar paraboloïdal y cilindro-parabólico basado en *Arduino*, capaz de capturar y almacenar variables operativas y meteorológicas. En paralelo, se construirá una estación meteorológica *ex profeso* que servirá para establecer patrones de medida para las magnitudes que el primero mesure. Será necesario tener presente el estado actual de la tecnología en energía solar de concentración, el aprovechamiento de las propiedades ópticas de cónicas y cuádricas, la trigonometría esférica, los fundamentos de concentración solar y el seguimiento de trayectorias a uno y dos ejes. Todo ello con el **objetivo** específico de analizar la validez del prototipo como herramienta de adquisición de datos útiles para Técnicos e Ingenieros, tanto para mejorar las tablas de valores meteorológicos como para ser empleada como material formativo. Como objetivo general se puede fijar uno ambicioso: servir de modesta aportación a la comunidad científico-técnica de forma que se agilice la transferencia de conocimiento de la energía termosolar de concentración, desde las actuales plantas industriales al sector Edificación.

Palabras clave: *Producción de energía, agotamiento de recursos, gases de efecto invernadero, desarrollo sostenible, cambio climático, energía solar, prototipo mecatrónico, adquisición de datos, Arduino.*

ABSTRACT

Energy production since the Industrial Revolution has focused on the use of fossil fuels (coal, oil and natural gas). On the other hand, the emerging powers (China, India and Brazil), eager to increase their economies and replicating the growth model of industrialized countries, are equally intensive in the consumption of previous raw materials. This inevitably creates two serious problems:

- The progressive depletion of oil and natural gas fields (estimated life of 50 years) and coal (150 years).
- The unbridled emissions of greenhouse gases (CO₂ and CH₄) that go hand in hand with the burning of fuels (particles present in the atmosphere in concentrations of 413 ppm, already responsible for an increase of 1°C in atmospheric temperature). It is sadly known as climate change.

There are a great many activities that people carry out that generate this unsustainable environmental pollution: in addition to "classic" energy production, transport, the manufacture of consumer goods, mining, telecommunications, the food industry... and building are also responsible. In fact, it is estimated that in Spain it is responsible for 33% of the annual energy consumption generated (imputed to the energy needed to manufacture precise building materials for the sector and thermal and electrical energy used by households and buildings). And this sector is responsible, with the current national energy mix, for 30% of harmful emissions. As a result, it seems imperative that advanced societies begin a transition to an economic model of growth based on sustainable development, where the two pillars are energy efficiency and renewable energy. In addition, new players are emerging that will change the global energy paradigm in the coming decades: distributed generation, intelligent buildings, near-zero consumption housing and massive data processing. An exciting challenge for the future.

Among renewable technologies, solar energy in all its aspects (thermal, photovoltaic and concentration) is one of the best candidates to lead the previous challenge. Fortunately, the first two are already familiar in the building sector. The first one is for DHW production, heating support, swimming pool heating and solar absorption cooling. The second one is either for electricity generation for self-consumption or for injection into the grid. However, the concentration site to date has had a negligible presence in homes and buildings. Thus, even though there is an installed base of 50 solar thermal industrial plants already in operation and high power (totalling 2.3 GW in Spain), there are almost no devices based on concentrated solar energy adapted to the energy needs of new buildings. In addition, the current solar irradiance databases are obtained by means of surface radiometers distributed throughout the country, together with indirect measurements of reflected radiation on the earth's surface, integrated into data interpolation algorithms: although they are valid, there is room for improvement in order to draw up tables of ad hoc values.

As with the existing research projects in environmental robotics and the confluence of the above, this Doctoral Thesis aims to design, simulate, manufacture, validate and experiment with a mechatronic prototype of a paraboloidal and parabolic trough solar

thermal tracker based on Arduino, capable of capturing and storing operational and meteorological variables. At the same time, a meteorological station will be built specifically for the purpose of establishing measurement standards for the magnitudes measured on the first measurement. It will be necessary to take into account the current state of the art in concentrating solar energy technology, the use of conical and quadric optical properties, spherical trigonometry, the fundamentals of solar concentration and the tracking of single and dual-axis trajectories. All this with the specific objective of analysing the validity of the prototype as a tool for acquiring useful data for technicians and engineers, both to improve the meteorological value tables and to be used as training material. As a general objective, an ambitious one can be set: to serve as a modest contribution to the scientific-technical community in order to speed up the transfer of knowledge of concentrated solar thermal energy from current industrial plants to the Building sector.

Keywords: *Energy production, resource depletion, greenhouse gases, sustainable development, climate change, solar energy, mechatronic prototype, data acquisition, Arduino.*

INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 Dedicatoria y agradecimientos	2
1.2 Prolegómenos	3
1.3 Objetivos y alcance de la Tesis	5
1.4 Estructura de la Tesis	6
LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 1	8
2. FUNDAMENTOS DE ENERGÍA TERMOSOLAR.....	10
2.1 Generación de exergía y agotamiento de recursos	10
2.2 Problemática medioambiental: cambio climático y huella ecológica	15
2.3 Futuro de la producción energética	23
2.4 Reto tecnológico y potencial de las energías renovables	30
2.5 Aprovechamiento energético de la energía solar	36
2.6 Ciclos termodinámicos aplicados a energía termosolar	40
2.7 Tecnologías de baja, media y alta temperatura: factor de concentración	46
2.8 Geometría de la captación termosolar: cónicas y cuádricas	50
BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 2	59
LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 2.....	62
3. SEGUIMIENTO SOLAR, MONITORIZACIÓN ROBÓTICA Y EDIFICACIÓN SOSTENIBLE	64
3.1 Caracterización de la radiación solar	64
3.2 Geometría y seguimiento solar	75
3.3 Robótica de monitorización	84
3.4 Edificación sostenible	90
BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 3	100
LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 3.....	102
4. DISEÑO, MODELADO Y SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO	104
4.1 Fases del diseño mecatrónico: especificaciones del sistema.....	104
4.2 Diseño 3D de componentes mecánico-óptico-electrónicos	110
4.3 Mapeo de señales y diseño electrónico de circuitos	114
4.4 Modelizado de las tareas de control	118
4.5 Programación de las tareas de control	125
4.6 Simulación estática del prototipo frente a sollicitaciones físicas.....	138
4.6.1 Determinación de presión ejercida por el viento	141
4.6.2 Cálculo de fuerzas netas sobre la estructura	144
4.6.3 Pre-procesado	148
4.6.4 Mallado y distribución de esfuerzos	148
4.6.5 Resultados en tensiones: conclusiones.....	150
4.7 Simulación óptica de colectores	154
4.7.1 Definición de factor de forma solar	156
4.7.2 Definición de propiedades óptico-dimensionales de colectores.....	157
4.7.3 Trazado de haces de rayos y obtención de resultados	162

BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 4	168
LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 4.....	171
LISTA DE TABLAS CAPÍTULO 4.....	173
5. CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO Y ESTACIÓN DE VALIDACIÓN	175
5.1 Selección de componentes mecánicos del prototipo	175
5.1.1 Plancha metálica perforada	175
5.1.2 Estructura de sustentación.....	175
5.1.3 Sistema de transmisión	176
5.1.4 Perfilera de anclaje de colectores	176
5.1.5 Casquillos y tornillería varia	177
5.2 Selección de componentes ópticos del prototipo	178
5.2.1 Plancha metálica perforada	175
5.2.2 Colector paraboloïdal	178
5.2.3 Colector cilindro-parabólico	178
5.3 Selección de componentes electrónicos del prototipo	179
5.3.1 Núcleo central de procesamiento.....	180
5.3.2 Componentes motrices	185
5.3.3 Sensórica	187
5.3.4 Electrónica complementaria	203
5.4 Presupuesto por partidas y coste global del prototipo	210
5.5 Equipos de protección y herramientas de ensamblaje.....	215
5.6 Recepción de componentes del prototipo	217
5.7 Fases de construcción del prototipo termosolar.....	218
5.8 Estación de calibración: funciones, construcción y acabado final.....	223
BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 5	228
LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 5.....	231
6. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y CONCLUSIONES	234
6.1 Ubicación del prototipo y trazado de trayectorias	234
6.2 Calibración de componentes, captura y proceso de registro de datos	240
6.3 Registro e interpretación de seguimiento en elevación y azimut	248
6.4 Registro e interpretación de temperaturas de focos	253
6.5 Registro e interpretación de irradiancias en seguimiento oeste – este	256
6.6 Registro e interpretación de irradiancias en seguimiento norte – sur.....	259
6.7 Registro e interpretación de velocidades de viento	264
6.8 Registro e interpretación de temperaturas ambiente.....	268
6.9 Registro e interpretación de humedades relativas.....	272
6.10 Registro e interpretación de calidades de aire.....	276
6.11 Registro e interpretación de presiones barométricas	280
6.12 Análisis termográfico de colectores	284
6.13 Difusión de resultados conseguidos y transferencia de conocimiento	288
6.14 Dificultades encontradas	290
6.15 Indicadores de calidad de la Tesis.....	299
6.16 Herramientas y recursos informáticos empleados	301
BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 6	302
LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 6.....	304

ÍNDICE CAPÍTULO 1

1.	INTRODUCCIÓN	2
1.1	Dedicatoria y agradecimientos	2
1.2	Prolegómenos	3
1.3	Objetivos y alcance de la Tesis.....	5
1.4	Estructura de la Tesis.....	6
	LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 1	8

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Dedicatoria y agradecimientos

La presente Tesis Doctoral está especialmente dedicada a mi **familia**, como pequeña compensación por el tiempo que no he podido compartir con ellos por tener que invertirlo en el desarrollo y escritura de la Tesis. En segundo lugar, es imprescindible afirmar que este trabajo nunca habría visto la luz si no hubiese despertado el interés de **D. Daniel Ferrández**, que siempre tuvo fe en sus posibilidades. Igualmente crucial es el papel de **D. Carlos Morón** en calidad de Director de Tesis (líder de un formidable equipo de investigadores en el Dpto. de Tecnología de la Edificación): su acompañamiento e inestimable ayuda han sido claves para el desarrollo final del trabajo. Mi sincera gratitud también se hace extensivo al resto de doctores que conforman el **tribunal** de valoración, que van a invertir parte de su tiempo en escuchar mi lectura.

Igualmente, debo también agradecer su apoyo a **amigos** y compañeros de trabajo (no cito a nadie para evitar cometer la torpeza de olvidarme de alguno) que me han hecho llegar sus ánimos sinceros para perseverar en la consecución de este escrito: prefiero no citar nombres porque cometería la torpeza de olvidar a alguno de ellos. Circunstancia similar se presenta con varios de los **alumnos** a los cuales he tenido la fortuna de impartir clase en **Salesianos Carabanchel**, donde desempeño actualmente mi labor profesional como profesor-tutor del Ciclo formativo de grado superior de Eficiencia energética y energía solar térmica: sus aportaciones han enriquecido notablemente la calidad de los contenidos de este estudio, a la par que a ellos les han servido para conocer la energía termosolar. Obviamente, añado reconocimiento a la propia entidad Salesianos Carabanchel en la persona de **D. Marcelo Pérez** (Director Titular) y **D. Julio Acedo** (Director Pedagógico de FP), por apoyar en todo momento la realización de los experimentos precisos en su laboratorio de energías renovables.

En añadidura, dejo constancia del formidable trabajo de **D. Julián García de León**, Ingeniero Industrial de la Universidad Carlos III de Madrid recién titulado. Su aportación vinculada al cálculo de la resistencia de materiales por métodos numéricos del prototipo ha sido muy útil para el objetivo final de la Tesis y valedero para que él presentase su proyecto fin de grado. Finalmente, transmito mi reconocimiento a numerosas personas anónimas para mí, que tuvieron la generosidad de volcar en *internet* de forma altruista diseños 3D de componentes mecánicos y electrónicos que se han utilizado en esta Tesis, así como de desarrollar programas informáticos gratuitos que han sido empleados con éxito en este trabajo. Por último, debo dedicar este esfuerzo a todos aquellos que perseveran en la búsqueda del **desarrollo sostenible** como verdadero motor de futuro para el siglo XXI. El daño que el ser humano está provocando al medioambiente es imperdonable y solo una apuesta decidida por las energías renovables y eficiencia energética podrán evitar desastres climáticos irreversibles.

1.2 Prolegómenos

En el mes de octubre del año 2013, el alumno autor de esta Tesis tuvo la oportunidad de defender el ya extinto **DEA** (Diploma de Estudios Avanzados) en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid. En aquel entonces, los objetivos y alcance del proyecto DEA eran:

1. Diseñar y simular un primigenio prototipo de seguidor mecatrónico termosolar de dos ejes, plenamente operativo y funcional, que integrase conjuntamente tanto un colector parabólico como uno cilindro-parabólico, ambos de pequeñas dimensiones.
2. Construir el antedicho seguidor mediante la selección, mecanización, ensamblaje, conexionado, programación y puesta en marcha de los distintos componentes que lo conforman.
3. Concebir una serie de sencillos experimentos que permitiesen valorar la utilidad del seguidor en sí como herramienta de análisis real de la potencialidad de la energía solar termoeléctrica.
4. Servir como punto de partida para una segunda generación de simulador termosolar real más completo que el anterior, que pudiese ser modelizado, fabricado y puesto en escena en entornos híbridos reales, para la última fase de la Tesis Doctoral.

Esto es, el alcance del trabajo en aquel momento se vio circunscrito a objetivos modestos: ni pretendía quedarse meramente en el ensamblaje de un simple prototipo mecánico realizado con piezas de aluminio, pero tampoco persiguió un ingente esfuerzo de desarrollo físico-matemático, más propio de lo que ahora sí se pretende ser la presente Tesis. Se estimó entonces que el DEA fuera útil a modo de “lanzadera” para abordar el trabajo realizado con un prototipo mucho más avanzado técnicamente que permitiera analizar de forma teórica y empírica la idoneidad de implementar energía termosolar para la producción doméstica de electricidad y/o calor dentro del sector edificación.

Figura 1.1. Primigenio seguidor termosolar y partes de la Mecatrónica (fuente: autor)

De la lectura de las breves líneas esbozadas hasta ahora, seguramente se podrá inferir que las **motivaciones personales** que han conducido a realizar este trabajo son las que seguidamente se pormenorizan:

1. Firme deseo de proseguir estudios superiores conducentes a la realización de la Tesis Doctoral, todo ello con el convencimiento de abrir una nueva y apasionante etapa dotada de orientación docente e **investigadora**.
2. Firme convicción personal de la idoneidad del empleo de las energías renovables como parte importante de la solución al problema energético que la humanidad se plantea y como mecanismo imprescindible para el **desarrollo sostenible** de las naciones. Y no solo por el agotamiento de recursos naturales típicos (petróleo, carbón, gas natural, uranio...) acelerados por una voracidad consumidora de energía por parte de la civilización actual, sino también por el progresivo deterioro medioambiental que su uso está generando en el planeta. Las conocidas emisiones de gases de efecto invernadero que genera la combustión de hidrocarburos fósiles en plantas de producción de energía eléctrica; su utilización como combustibles en automóviles equipados con motores de combustión interna alternativos; su empleo como fuentes térmicas en instalaciones de climatización; así como el potencial peligro que representan los residuos radioactivos en plantas de energía nuclear de fisión, son exponentes de esta circunstancia.
3. Sólida convicción de que una **formación** más completa pueda desembocar en una mejor realización de las actividades laborales presentes y en la cuales he podido desarrollar mi carrera profesional en los últimos años: la enseñanza.
4. Especial motivación personal por aunar en una sola, las dos líneas tecnológicas que siempre me fueron más atractivas como ingeniero: la Robótica y la Energía Solar. Ambas han confluido en este trabajo y se han fundido en el dispositivo mecatrónico ya citado. Es necesario definir la **Mecatrónica** como aquella línea de conocimiento multidisciplinar que engloba ciencias como la Mecánica, Electrónica, Control y Computación.
5. El compendio de todas las antedichas circunstancias ha llevado a tratar de aportar, al menos modestamente, un análisis que permita estudiar en sentido amplio la forma de aprovechar la energía termosolar en el sector de la **edificación**, con el fin último de promover el desarrollo de edificios inteligentes, donde el autoconsumo y las redes distribuidas, sean los protagonistas de las viviendas del futuro. Y en añadidura, todo el conocimiento adquirido ha servido (y seguirá sirviendo) como herramienta docente para el alumnado al cual pueda impartir formación en el futuro, así como a todos aquellos profesores y/o investigadores a los cuales este trabajo les pueda servir de herramienta de estudio.

1.3 Objetivos y alcance de la Tesis

Es importante definir de forma inequívoca los objetivos que se plantean en esta Tesis, así como su alcance exacto, para evitar ambigüedades en cuanto a los resultados esperados. En este sentido, se puede afirmar que los objetivos tanto específicos como generales y el alcance de esta se circunscriben a:

Objetivos específicos de la Tesis:

1. **Diseñar**, modelizar y simular un prototipo mecatrónico de seguidor termosolar híbrido paraboloïdal y cilindro-parabólico a escala, que además sea capaz de adquirir y almacenar grandes cantidades de datos operativos y meteorológicos.
2. **Construir** y **validar** el antedicho prototipo (con la ayuda de la llamada estación de validación, segundo de los dispositivos concebidos y fabricados) y someterlo a una serie de **ensayos** en entornos reales, comparando los resultados obtenidos por el prototipo, con datos meteorológicos estadísticos.
3. Emplear el prototipo como herramienta **docente**, divulgativa e investigadora para los alumnos de estudios afines a esta tecnología (ingenieros de edificación, técnico de eficiencia energética y energía solar térmica, p.ej.).

Objetivos generales del trabajo:

4. Ayudar a la comunidad **científica**, dentro del modesto alcance de la Tesis, en la deseable implantación de la energía termosolar de concentración a pequeña escala en el sector de la edificación, de forma que los edificios no solo no sean consumidores de energía, sino que pasen a ser productores de la misma, para consumo propio o inyección a red en redes distribuidas.

Figura 1.2. Colectores cilindro-parabólicos para edificación (fuente: Ades Group)

1.4 Estructura de la Tesis

La presente Tesis Doctoral nace con un objetivo claro: diseñar, modelizar, construir, calibrar y experimentar con un prototipo mecatrónico de seguidor termosolar paraboloïdal y cilindro-parabólico que sea capaz de adquirir grandes cantidades de datos operativos y meteorológicos. Todo ello con el objetivo de concebir una herramienta que aporte información de utilidad para ingenieros de edificación y proyectistas en eficiencia energética, de forma que la energía solar de concentración pueda formar parte en un futuro no muy lejano de las instalaciones habituales de viviendas y edificios, tal y como ocurre con sus "hermanas pequeñas" (la energía solar térmica y la energía solar fotovoltaica). Seguidamente se desglosa el contenido más relevante de cada capítulo.

En el **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**, se hace una rápida retrospectiva hasta los orígenes del presente trabajo: un primigenio prototipo más sencillo, que sirvió para adquirir conocimiento sobre la tecnología que se estaba abordando y que sirvió de lanzadera para una 2ª generación de seguidor más completo y complejo como el actual. En este mismo epígrafe se establecen además el objetivo y alcance real del proyecto, sentando las bases del resto del contenido escrito.

En el **CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS DE LA ENERGÍA TERMOSOLAR**, se aborda con detalle el actual paradigma de generación de exergía a escala planetaria; la problemática geopolítica y económica que empieza a generar el agotamiento de recursos naturales; y el desastre medioambiental que la actividad del ser humano está provocando con la desaforada emisión de gases de efecto invernadero, culpables del ya tristemente célebre cambio climático. A resultas de las reflexiones anteriores, cabe preguntarse entonces por el futuro de la producción energética y cómo esto supone un reto tecnológico y social para las energías renovables cuyo potencial merece ser tenido muy en cuenta. Particularizando en la energía solar, y más en concreto en la solar de concentración, se analizan los ciclos de potencia termodinámicos que impelen estas formas de aprovechamiento energético, junto a elementos clave como son el factor de concentración. Este último indefectiblemente vinculado a la geometría de captación solar así como a la existencia de curvas y superficies matemáticas (cónicas y cuádricas) fundamentales para materializar esta fuente de energía renovable.

En el **CAPÍTULO 3: SEGUIMIENTO SOLAR, MONITORIZACIÓN ROBÓTICA Y EDIFICACIÓN SOSTENIBLE**, se engloban tres tecnologías *a priori* no habitualmente conectadas entre sí, pero que el esfuerzo innovador de esta Tesis pretende unir: seguimiento solar, robótica de monitorización y edificación sostenible. De una parte, se termina de analizar la energética solar en términos de la radiación incidente sobre la Tierra y la manera de medirla con el estado actual de la tecnología, así como las expresiones matemáticas que caracterizan la geometría del seguimiento de la trayectoria del Sol. En segunda instancia se hace una rápida prospección sobre lo que se ha dado en llamar robótica de monitorización, especialmente con objetivos medioambientales. El desarrollo de la

tecnología robótica para adquisición masiva de datos y el procesamiento estadístico de estos con programas informáticos al efecto, permite aportar información valiosísima para científicos, investigadores e ingenieros. Todo ello para confluir hacia el fin concreto en este trabajo: conseguir una edificación más sostenible, con viviendas inteligentes capaces de generar su propia energía o inyectarla a redes distribuidas descentralizadas, de forma renovable y respetuosa con el entorno.

En el **CAPÍTULO 4: DISEÑO, MODELADO Y SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO**, se entra sin más preámbulos en la concepción del prototipo mecatrónico de seguidor termosolar. En primer lugar y conforme las fases del desarrollo mecatrónico de cualquier equipo de esta índole, se procede al diseño tridimensional de sus componentes mecánicos, ópticos y electrónicos. A continuación, se hace el mapeo de señales analógicas y digitales a controlar, así como el diseño electrónico del cableado de circuitos. Seguidamente se realiza la modelización de maniobras de control y posterior programación en un entorno compatible con *Arduino*. Como penúltima tarea se confecciona un cálculo estático del prototipo frente a solicitaciones físicas. Y para terminar, se construye una simulación óptica de los colectores paraboloidal y cilindro-parabólico.

En el **CAPÍTULO 5: CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO Y ESTACIÓN DE VALIDACIÓN**, se ensamblan por separado ambos dispositivos. Con especial hincapié en el prototipo de seguidor termosolar, se muestra la selección de componentes mecánicos, ópticos y electrónicos adquiridos, presupuestados por partidas para evaluar su coste global de cara a un futuro desarrollo industrial del prototipo. El capítulo prosigue desglosando los equipos de protección individual empleados para su manipulación, las herramientas de ensamblaje, el proceso de recepción de componentes y las fases de construcción hasta el acabado final. Por último, se enumeran y describen de forma resumida las tareas homónimas para el desarrollo de la estación de validación, cuyo fin último es servir de patrón de comparación con respecto a los valores medidos por los sensores del prototipo.

En el **CAPÍTULO 6: PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y CONCLUSIONES**, refleja todo el conjunto de probaturas realizadas con el prototipo ya funcional; la ubicación para la realización de ensayos (laboratorio de energías renovables del centro de formación Salesianos Carabanchel) así como el trazado de trayectorias; la validación de componentes y la explicación del proceso de captura y registro de datos. Acto seguido, se procede a un trazado gráfico de todas las magnitudes medidas y registradas, a saber: seguimiento en azimuth y elevación, temperaturas de los focos, irradiancias en seguimientos este-oeste y norte-sur, velocidades de viento, temperatura ambiente, humedades relativas, calidades del aire y presiones barométricas. Se termina el análisis empírico con un estudio de termografía infrarroja de ambos colectores, difusión de resultados conseguidos y ámbito de transferencia de conocimiento, dificultades encontradas, futuras líneas de investigación, indicadores de calidad de la Tesis y herramientas informáticas empleadas para todo el trabajo.

LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 1

Figura 1.1. Primigenio seguidor termosolar y partes de la Mecatrónica (fuente: autor).....	3
Figura 1.2. Colectores cilindro-parabólicos para edificación (fuente: Ades Group)	5

ÍNDICE CAPÍTULO 2

2.	FUNDAMENTOS DE ENERGÍA TERMOSOLAR	10
2.1	Generación de exergía y agotamiento de recursos	10
2.2	Problemática medioambiental: cambio climático y huella ecológica	15
2.3	Futuro de la producción energética.....	23
2.4	Reto tecnológico y potencial de las energías renovables.....	30
2.5	Aprovechamiento energético de la energía solar	36
2.6	Ciclos termodinámicos aplicados a energía termosolar	40
2.7	Tecnologías de baja, media y alta temperatura: factor de concentración	46
2.8	Geometría de la captación termosolar: cónicas y cuádricas	50
	BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 2	59
	LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 2	62

2. FUNDAMENTOS DE ENERGÍA TERMOSOLAR

2.1 Generación de exergía y agotamiento de recursos

Etimológicamente, el término **energía** proviene del griego *ενεργεια* (*energeia*) que se podría traducir por actividad, operación, fuerza de acción o trabajo. Actualmente, tiene diversas acepciones o definiciones, todas ellas relacionadas con el concepto de capacidad de transformar, obrar o poner en movimiento un cuerpo. Desde un punto de vista estrictamente físico, aunque es difícil dar una definición concluyente, la energía se define como la capacidad de un sistema para realizar un trabajo. Por último, económica y socialmente hablando, por energía se entiende cualquier recurso natural, biológico o tecnológico susceptible de ser explotado y convertido en fuente de riqueza siendo el verdadero motor de la industria, el transporte y el desarrollo humano ¿Es necesaria la energía? La respuesta parece tan obvia y evidente, que prácticamente se responde sola y constituye en sí misma un tópico en ámbitos sociales, económicos, geopolíticos y militares. El empleo de la energía es indispensable para el modo de vida actual de todo el conjunto de la humanidad y está generalizado su uso tanto en actividades productivas como tareas finales: en agricultura (abonos, secaderos, plaguicidas, sistemas productivos...); procesos industriales (altos hornos, fabricación de conservas, obtención de metales, papel, cemento...); transportes terrestres, marítimos y aéreos (automóviles, trenes, camiones, barcos, aviones...); en los hogares (iluminación, calefacción, cocina de alimentos, ocio, electrodomésticos...) y así un interminable etcétera de necesidades y aplicaciones en las cuales la energía está presente. Toda vez que las sociedades actuales no pueden funcionar sin abastecimiento energético (desde el fuego del hombre prehistórico hasta las centrales de producción eléctrica del siglo XXI), un apartado muy importante de cualquier economía mundial se dedica al estudio, obtención, procesado y suministro de energía.

La gran importancia de la generación de energía (en rigor habría que hablar de producción de **exergía**) en la sociedad actual ([Bayrak F. et al., 2017](#)), no debe inducir a pensar que su empleo sea algo circunscrito a las economías industrializadas, pues como se acaba de comentar, desde tiempos remotos el hombre ha sabido emplear, además de su propia fuerza física, la de animales domésticos para obtener energía mecánica. Inventos como la rueda pudieron multiplicar los resultados obtenidos, de forma tal que la fuerza del viento y las corrientes de agua, permitieron mejorar los fines para los cuales se diseñaban. Posteriormente, el calor obtenido por la quema de la madera, empleada en hogares y en las incipientes actividades fabriles para fundir metales, permitió obtener todo tipo de herramientas y útiles para el trabajo diario. Con el inicio de la conocida como Revolución Industrial en Inglaterra en el siglo XVIII (invención de la máquina de vapor), extendida posteriormente a toda Europa y Norteamérica, se produjeron transformaciones cualitativas y cuantitativas importantísimas. Desde el punto de vista social, desaparece paulatinamente de las sociedades avanzadas el modelo de producción y consumo hasta aquel entonces imperante; y se sustituyen las fuentes de energía empleadas durante miles de años por otras nuevas cuyo uso se incrementa de forma prácticamente exponencial.

Obviamente, la coincidencia no es casual: el salto que supone ese proceso de transformaciones económicas, sociales y técnicas, no hubiese sido factible sin la sustitución de primitivas fuentes de energía por el carbón (de aquel entonces); los hidrocarburos, la hidroelectricidad y la energía nuclear (actuales), así como la valiosa aportación de las energías renovables (de indudable futuro y cada vez mayor presente). Inequívocamente, si la historia de la **humanidad** evoluciona por las transformaciones sociales, técnicas y económicas, las revoluciones energéticas se insertan dentro de estos dos últimos ámbitos. El consumo de energía *per capita*, es uno de los indicadores más fidedignos del grado de desarrollo económico de una sociedad, lo cual está íntimamente ligado con el bienestar material. En este sentido, la demanda de energía se asocia directamente con el PIB (Producto Interior Bruto) de un país, con su capacidad industrial y nivel de vida logrado por sus habitantes, tal y como se puede apreciar en la figura anexa válida para 2016.

Figura 2.1. Consumo de energía a escala mundial en MJ/año (fuente: Wolfram)

A día de hoy, existe una inequívoca **correlación** entre consumo energético y magnitudes socio-económicas vinculadas al nivel de vida de un ciudadano ([Brady L. y Abdellatif M, 2017](#)). A mayor consumo, mayor confort. Sin embargo, esta falsa creencia está afortunadamente cambiando: la eficiencia y el ahorro energético son buenos ejemplos de ello. No tiene por qué ser cierto que un mejor nivel de vida deba llevar acarreado un mayor consumo de energía. Y tampoco se trata de mermar el nivel de confort conforme a nuestro *modus operandi*, sino de ser inteligentes en las formas de utilizar la energía de la que se disfruta. La mayor eficiencia técnica de las máquinas permite minorar gradualmente el uso de energía para iguales niveles de satisfacción material y personal. Ciertamente, eso sí, que un elevado porcentaje de la energía producida a escala planetaria es utilizado por los llamados países desarrollados. Además, la correspondencia entre nivel de vida y consumo energético se aprecia incluso desde la historia, existiendo una clara relación causa-efecto entre crecimiento económico e incremento de demanda de energía.

La explicación a esta circunstancia se fundamenta en los cambios **estructurales** que se suceden a lo largo de la historia de cualquier país, y en paralelo, considerando que dentro de las distintas actividades económicas existen enormes diferencias de consumo energético por unidad de producción. De esta forma, cuando una nación empieza a industrializarse y avanza por el camino del desarrollo, su estructura económica se caracteriza por un predominio inicial de las actividades primarias y artesanales: ello implica un consumo energético bajo. Una vez iniciado el proceso de crecimiento, la industria y el transporte aumentan en importancia, sectores ambos muy intensivos en energía. A este hecho se le agrega una creciente mecanización de actividades productivas e incremento del uso de energía en economías domésticas.

Ahora bien, el modelo de **crecimiento** de la sociedad basado en combustibles fósiles no es sostenible ([Muhammad S. et al., 2017](#)): no solo por las implicaciones medioambientales (que se estudiarán seguidamente) sino porque los recursos naturales usados hasta ahora para producir energía (carbón, petróleo, gas natural y uranio) se agotan o se agotarán en pocas décadas. Tal es la importancia de este hecho, que incluso su control estratégico provoca conflictos políticos y sociales en el mundo, como se plasmó tristemente en la guerra de Irak o en los reiterados cortes de suministro de gas ruso. Y todo hace pensar que la adicción al petróleo y al gas natural que padecen tanto los países industrializados (demasiado acostumbrados a ellos) como las potencias emergentes (China e India, que quieren imitar el insostenible modelo de crecimiento occidental) tenderá a agravar estos problemas. Así por ejemplo, el último informe anual de la petrolera *British Petroleum* sobre la energía en el mundo (*BP Statistical Review of World Energy*) fechada en junio de 2007, cifra en 40 años las reservas mundiales de petróleo y en 60 años las de gas natural, partiendo de la hipótesis de que la extracción, producción y consumo de estos combustibles fósiles se mantenga constante hasta su total agotamiento, circunstancia que no parece realista conforme a lo comentado sobre las economías emergentes.

Cierto es también que estas **previsiones** permanecen más o menos estables en los últimos años debido a que la subida del precio del crudo alienta su búsqueda en yacimientos de más difícil acceso, como ha pasado recientemente con los descubiertos en la costa de Brasil, a más de 2.000 m de profundidad; o incluso en regiones del planeta “vírgenes” hasta ahora (afortunadamente) de la destructiva acción del hombre. En cuanto a las reservas de carbón, se estiman mayores, para 150 años. En el caso concreto del petróleo, verdadero motor de la economía del siglo XX, se calcula que quedan unos 143.000 millones de toneladas.

La ratio medio de producción oscila entre 6,8 y 7,2 barriles de petróleo por tonelada, dependiendo de la densidad del petróleo. Por tanto, las reservas de crudo se calculan entre 0,97 y 1,003 billones de barriles. Sin embargo, el límite real de las reservas podría estar más cercano aún si se consideran modelos de previsión de la demanda con un consumo creciente, como de hecho ha venido ocurriendo a lo largo de todo el siglo pasado. Adicionalmente, los descubrimientos de nuevos yacimientos se han minorado abruptamente en las últimas décadas haciendo prácticamente **insostenible** por largo tiempo, los altísimos niveles de extracción actuales, máxime sin incluir la ya mentada demanda de los consumidores asiáticos.

Por otra parte, la mayoría de las principales reservas mundiales conocidas han entrado en **declive** y únicamente las de Oriente Medio mantienen un crecimiento sostenido. De hecho, estos yacimientos iniciaron su decadencia ya en el año 2010, lo que provocó que toda la producción mundial disminuyera significativamente, arrancando la mayor crisis energética que haya sufrido el mundo industrializado. Se estima que cuando esta circunstancia se agrave, el nivel de precios será tal que el petróleo se auto-descarte como combustible energético.

Desde el punto de vista económico-estadístico, uno de los estudios más serios y fidedignos sobre la futura evolución de los yacimientos de combustibles fósiles, lo constituye la llamada teoría del pico de **Hubbert** también conocida como cénit del petróleo, petróleo pico o agotamiento del petróleo ([Luz-Sant'Ana I. et al., 2017](#)). La teoría debe su nombre al geofísico *M. King Hubbert*, quien predijo correctamente el pico de la producción petrolífera estadounidense con quince años de antelación. Es una importante teoría acerca de la tasa de agotamiento a largo plazo del petróleo, así como de otros combustibles; y predice que la producción mundial de los mismos llegará a un cénit y después descenderá tan aceleradamente como creció, resaltando el curioso hecho de que el factor limitador de la extracción de petróleo, será la energía requerida para dicha extracción y no su coste económico. Aún no exenta de controversia, esta teoría es ampliamente aceptada entre la comunidad científica y la industria petrolera. El debate no se centra en si existirá un pico del petróleo (hecho en el cual todos parecen estar de acuerdo) sino en cuándo ocurrirá, ya que es evidente que el petróleo es un recurso finito y no renovable en escalas cortas de tiempo. Esto es, es seguro que se llegará al límite de extracción, lo cual depende de posibles nuevos yacimientos, aumento de eficiencia de las reservas actuales, extracción profunda y explotación de nuevas formas de petróleo no convencionales.

Figura 2.2. Pico de Hubbert (fuente: Wikipedia)

El año **exacto** del pico no podrá determinarse hasta que ya haya sucedido y se tenga un horizonte temporal suficientemente amplio para validar la hipótesis, es decir, se sabrá a *posteriori*. De hecho, basándose en datos actuales de producción, la Asociación para el Estudio del Pico del Petróleo y el Gas (ASPO en sus siglas inglesas), estimó que el pico del petróleo ocurrió ya en el año 2010, siendo el del gas natural algunos años posterior. Este hecho implicaría importantísimas consecuencias para los países desarrollados, que dependen en gran medida (en exceso en nuestra modesta opinión) de petróleo barato y abundante, especialmente para el sector del transporte, agricultura, industria química y la calefacción doméstica. No en vano, un cada vez mayor número de expertos no solo estima sino que afirma sin ambages que el pico de producción, de hecho, ya llegó. Después de los devastadores efectos del huracán Katrina, Arabia Saudí reconoció su imposibilidad para incrementar su producción y así atenuar la crisis por las pérdidas en la producción y el refino sufridas en la zona del Golfo de Méjico. Por eso, son muchos los que piensan que estamos inmersos en el inicio de la crisis definitiva del petróleo. Y se puede afirmar que es irreversible porque será la última y la que obligará a efectuar mayores ajustes y recortes en su consumo como nunca antes se ha hecho.

En contrapartida, una parte de la industria petrolera y del sector automoción, afirman que la teoría de *Hubbert* es literalmente falsa o, como poco, la omiten y ocultan. Algunos economistas también críticos con la misma, afirman que la escasez motivará la búsqueda de nuevos descubrimientos y que las reservas se incrementarán por encima de lo predicho por *Hubbert*. Pero incluso en la versión más optimista de esta crítica que se pueda encontrar, la limitación de los recursos petrolíferos pone una fecha **límite** a la extracción barata de ese recurso. Nadie en el mercado parece negar la existencia de un techo de producción, aunque pocos gobiernos y empresas hasta ahora lo han mencionado abierta y explícitamente. De entre estos, cabe destacar el digno ejemplo de la multinacional americana *Chevron Texaco* la cual lanzó hace escasos años una campaña publicitaria para concienciar al público estadounidense de la necesidad de actuar con sentido común ante el inminente agotamiento del petróleo. En nuestro propio país, también la multinacional española Repsol habló públicamente en una conferencia sobre la cuestión, haciendo uso de los mismos gráficos del ASPO. La llegada de ese pico de extracción haría pensar en un sombrío futuro, en el cual la humanidad tendría que sobrevivir sin la principal fuente de energía que la ha hecho crecer y prosperar durante todo el siglo XX. Afortunadamente para todos nosotros, para el medio ambiente y para las generaciones futuras, las energías renovables ya están listas para retomar el pulso del progreso, además, de forma sostenible, inagotable y respetuosa con el medio ambiente. Y la crisis no se limita sólo al petróleo: el gas natural también empieza a estar cercano a su agotamiento en muchos lugares y su pico de producción no sucederá mucho después que el del petróleo. Aun así, cabe esperar que a falta de esos recursos se inicie la explotación de los depósitos de metano en vetas de carbón o se intenten nuevas técnicas para “exprimir” al máximo los yacimientos hasta agotarlos definitivamente.

2.2 Problemática medioambiental: cambio climático y huella ecológica

Desgraciadamente, se puede afirmar sin temor a equivocación, que nunca antes el ser humano se ha enfrentado a una crisis ambiental de la magnitud del denominado **cambio climático** ([Enríquez-de-Salamanca A. et al., 2017](#)). Si no se actúa con premura, las nefastas consecuencias para los ecosistemas y sus seres vivos, como para toda la humanidad en su conjunto, serán irreversibles y afectarán a futuras generaciones durante centenares de años. La temperatura media de la superficie terrestre ya se ha incrementado en más de 0,74°C en los últimos 100 años; en el continente europeo este aumento ha sido de 0,95°C y en concreto en España, ha aumentado en 1,5°C en las tres últimas décadas. En algunas zonas concretas, como la sudoriental (Murcia) subió nada menos que 2°C. Las previsiones no son halagüeñas: se prevé que aumente entre 1,1°C y 6,4°C para el año 2095. Este demoledor incremento de temperatura es el mayor de los últimos 10.000 años, al igual que la celeridad con la que se ha producido, alterando el clima de forma tal que ya se empiezan a sentir los impactos asociados. Ver figura anexa para apreciar la indudable serie de datos creciente que atestigua dicho incremento progresivo.

Figura 2.3. Países con mayores emisiones totales de CO₂ (fuente: WRI/CAIT, CDIAC)

En añadidura, debido al paulatino **deshielo** de los casquetes polares, el nivel del mar subió por término medio entre 10 y 20 cm durante el siglo XX, y para el año 2100 se prevé una subida adicional comprendida entre 19 a 58 cm. En la costa atlántica española, por tomar un ejemplo, Cantabria incrementa el nivel de sus aguas costeras a un ritmo de 3,5 mm/año, mientras que en la década de los sesenta llegaba escasamente a los 2 mm/año. Las consecuencias de estos impactos no van a ser uniformes en todo el planeta, puesto que afectará principalmente a países costeros (como el nuestro) y a esta circunstancia se suma el hecho de que tendrá lugar en un contexto económico desequilibrado. En efecto, los países en vías de desarrollo sufrirán más que los ya industrializados, ya que su falta de recursos los hace más vulnerables a la adversidad y a las emergencias de escala planetaria. Las asociaciones conservacionistas, tras múltiples y serios estudios realizados en colaboración con universidades y prestigiosos centros de investigación, consideran que en la tesitura actual, mantener la subida de la temperatura media global por debajo de 2°C debe ser la máxima meta política relacionada con el cambio climático.

Si se sobrepasa el antedicho umbral, millones de personas y seres vivos sufrirán los devastadores y peligrosos efectos de un súbito cambio climático a escala planetaria. Como colofón, se puede afirmar que los impactos del mismo oscilarán según distintas regiones geográficas, pero lo que desgraciadamente parece claro, que los efectos negativos golpearán (injustamente, puesto que son los que menos responsabilidad tienen) de forma más severa a los países subdesarrollados por sus condiciones geográficas y climáticas, su elevada dependencia de recursos naturales y su limitada capacidad para adaptarse a cambios. Todo ello a resultas de tener en cuenta que la naturaleza tiene su propia capacidad de autodepuración y reciclaje y que por tanto todas las emisiones de productos contaminantes resultado de la actividad del ser humano pueden variar de un lugar a otro del planeta, afectando al bienestar de forma distinta. Dicho lo cual, se podría definir el concepto **contaminación ambiental** como aquella alteración de las condiciones del medio ambiente por la presencia de agentes físicos o químicos, ajenos al mismo, en grado tal que pueda resultar perjudicial para personas, animales, plantas u objetos, y producir un deterioro en la calidad de vida. Muchas asociaciones ecologistas, hacen un balance muy negativo de los últimos años, consecuencia del impacto materializado en: pérdida de bosque tropical, derretimiento paulatino de los polos, crisis mundial de la pesca, incremento de emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial y guerra por el agua.

De la misma forma y centrando el enfoque en el tema energético, podría surgir la duda acerca de la contaminación que generan las **centrales térmicas** de producción de energía. Al hablar de centrales térmicas clásicas, hay que referirse a aquellas que emplean carbón y petróleo principalmente como combustible. Desde un planteamiento amplio, habrá que considerar en primer lugar la contaminación que se origina en la obtención del combustible en sí (minería y extracción) y en segundo lugar, los efectos ambientales producidos al quemar éste en la propia central. Para la producción “convencional” de electricidad, los combustibles comentados emiten en su combustión una serie de productos químicos contaminantes que de forma resumida, son: partículas en suspensión, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido y dióxido de carbono e hidrocarburos no quemados. Para evitar la contaminación local o próxima a la propia central, las centrales térmicas “clásicas” disponen de chimeneas de muy considerable altura, para inyectar en capas atmosféricas más elevadas dicha contaminación. Como parece obvio, lo único que esto consigue es transportar la polución a largas distancias, lo que frecuentemente afecta a otras zonas e incluso a otros países. Además, para eliminar las partículas sólidas, estas centrales térmicas usan ciclones y “separadores de mangas” así como otros mecanismos de extracción de polvo, rebajando su evacuación exterior en cierta medida, pero no impidiéndolo.

Otro nefasto efecto sobre el medioambiente: la **lluvia ácida** ([Bakhshipour Z. et al., 2016](#)). Al precipitar en forma de lluvia, puede devastar la vida animal y vegetal en bosques, lagos y en definitiva, en ecosistemas enteros, consiguiendo desertificar inmensas áreas terrestres. Científicos y expertos de varias organizaciones internacionales preocupados por el medioambiente (entre ellos la Organización Mundial de la Salud) coinciden inequívocamente en la necesidad de aplicar estrictas y rigurosas medidas de control ambiental en la fuente de consumo de tales combustibles. Igualmente, se plantea establecer una coordinación internacional

para evitar que a través del transporte que suponen las corrientes atmosféricas, se perjudique a países limítrofes (contaminación transfronteriza) que nada han tenido que ver en la producción de tales contaminantes. La tendencia en este sentido, será la de quemar únicamente combustibles fósiles de bajo nivel de acidez, aunque lo más sensato es abogar por un abandono progresivo de cualquier combustible fósil en beneficio de energías renovables respetuosas con el medio ambiente.

Y en esta misma línea de pensamiento, una de las expresiones que desde un punto de vista científico y social se maneja con preocupante asiduidad, es el llamado **efecto invernadero** ([Akitt J.W., 2017](#)). Esto es, siguiendo la analogía del fenómeno físico que se da en los invernaderos de los cuales toma nombre, resulta que el aumento de la temperatura ambiental es consecuencia de una mayor concentración en la atmósfera de gases -dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4) principalmente. La radiación solar puede penetrar la atmósfera y llegar a la Tierra, pero parte de la misma no puede retornar al espacio al verse reflejada en tales partículas presentes en el aire. La razón física por la cual se da este fenómeno estriba en que la radiación procedente del sol “agita” fácilmente aquellas moléculas de gases que presentan cierta simetría (como es el caso del mentado dióxido de carbono y metano) de forma que se quedan “vibrando” y reteniendo de esta forma la energía de la radiación solar en forma de agitación o calor: esta retención de calor es la causa de un recalentamiento paulatino de la temperatura atmosférica. Desde el inicio de la Revolución Industrial, esta concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera se ha incrementado hasta casi las **413 ppm** (partes por millón) en el momento de redacción de estas líneas. Y lo que es peor, según estudios realizados por prestigiosos investigadores equipados con los mejores superordenadores del mundo para realizar simulaciones numéricas basadas en previsiones futuras, aun cuando se diese la hipotética situación en la cual cesase súbitamente la emisión de gases de dióxido de carbono por parte del ser humano, tal concentración de gases perduraría en la atmósfera (y con ellos su nocivo efecto) en hasta 200 años más.

Figura 2.4. Molécula 3D del CO_2 y del CH_4 (fuente: Wikipedia)

Igualmente, otro efecto nocivo es el derivado del **calor de refrigeración** que precisan las centrales térmicas. En efecto, en toda central térmica (como ya se ha indicado, de carbón, petróleo, nuclear o gas natural) existe una parte de la energía primaria que, conforme a la 2ª Ley de la Termodinámica, no se puede transformar en energía eléctrica (trabajo) sino que se elimina en forma de calor residual cediéndoselo a un foco frío. Este calor, si no se emplea para otro fin útil, se suele disipar en el agua de refrigeración de un dispositivo llamado condensador, de forma tal que el agua se introduce fría y sale caliente. Ahora bien, cuando dicho agua calentada vuelve a su cauce original (río, lago, mar) provoca un importante incremento térmico, que según la circunstancia podría provocar alteraciones del ecosistema importantes (muerte de peces por excesiva temperatura, eutrofización de embalses por proliferación de algas...). Aunque la normativa actual prohíbe que el aumento de temperatura exceda de una determinada cantidad por debajo de la cual no hay alteración ecológica, esta limitación del aumento de temperatura del agua se consigue recurriendo a torres de refrigeración o diluyendo el agua de salida del condensador en suficiente líquido del último sumidero de calor. Ciertamente es que en algunos casos (afortunadamente), ese calor residual puede utilizarse con fines productivos, tal y como ocurre con piscifactorías o invernaderos, con lo cual además de evitarse el perjuicio ecológico se aprovecha la energía sobrante de la central en un objetivo útil buscado.

En penúltimo lugar, se desea mostrar de forma breve qué problemas ambientales pueden generar las **centrales nucleares**: mientras las plantas térmicas clásicas queman combustibles fósiles para generar electricidad, una central nuclear obtiene su energía, como ya se ha visto, mediante la fisión del combustible. Lo que esto significa es que una central de este tipo de tecnología no envía a la atmósfera todos los contaminantes que las plantas térmicas convencionales sí emiten y que ya se han mencionado. De forma adicional, antes de que las administraciones públicas autoricen la puesta en marcha de una central nuclear nueva, se deberá tener la certeza suficiente de que la población que habita en la zona de influencia reciba como máximo una dosis de radiación que sea únicamente una pequeña fracción del máximo permitido. En añadidura, desde el punto de vista de la protección del medio ambiente, las plantas atómicas siempre deberán estar sujetas a un riguroso y estricto control institucional que en muchos casos es difícil de igualar en otras actividades industriales. Tal marco reglamentario debe contemplar todas y cada una de las fases que componen el ciclo del mal llamado combustible nuclear; la protección de trabajadores de la central y habitantes de las cercanías en general; y por último, el desmantelamiento de la misma al final de su vida útil. Dicho todo esto, ¿qué impacto ambiental pueden representar para el entorno natural y el ser humano la energía nuclear? Desgraciadamente, los tiempos de vida de los residuos radiactivos son del orden de miles de años; y aunque se pretenda demostrar desde el sector nuclear los altos niveles de seguridad de una planta de este tipo, accidentes como los de *Three Mile Island* (EE.UU.); *Chernobil* (Ucrania); *Saint Laurent des Eaux* (Francia) o *Vandellós I* (España) constatan empíricamente que escapes masivos de material radiactivo son factibles. Y sus consecuencias sobre personas, animales, plantas y el medio ambiente en general es, a falta de una palabra que lo defina mejor, ciertamente demoledor.

El último impacto sobre la Tierra es el derivado de las tareas de **extracción** y **transporte** de todos los combustibles utilizados por el hombre: carbón, petróleo, gas natural, uranio... La minería del carbón presenta una importante incidencia ambiental que no obstante puede variar según se realice a cielo abierto o a través de pozos y galerías. En cualquiera de los casos, ambas modalidades presentan un problema común (que es el de las escombreras) cuyo control ambiental, necesidad de construir depósitos estables y recubrimientos de los mismos para evitar su disgregación, implica un aumento adicional importante de los costes de explotación. De esta forma, cuando la prospección y extracción de carbón se realiza a través de pozos, es ya conocida la peligrosidad y riesgo para la vida y salud de los mineros que realizan las anteriores tareas. Inequívocamente, tanto la extracción, el transporte y el refinado de combustibles procedentes de sus minerales, tienen efectos negativos sobre el medio ambiente: destrucción de bosques, erosión de ecosistemas, hundimiento de petroleros y mareas negras... La extracción del uranio para la industria nuclear no presenta en principio, características ambientales diferentes respecto a otras tareas de extracción de negativos efectos. En lo que se refiere a la radiactividad, ésta no aparece en niveles muy superiores a los existentes en zonas naturales. No obstante, los residuos que se generan para la formación de la llamada “torta amarilla” tienen que ser protegidos del viento para así evitar emanaciones de radón que se producen.

En términos físico-químicos, el **clima** de nuestro planeta es consecuencia de las distintas interacciones que se establecen entre las componentes del sistema climático: la atmósfera, los océanos, la biosfera terrestre, la biosfera marina, la criosfera (esto es, agua en estado sólido) y la propia superficie de la Tierra. El resultado de las anteriores interacciones provoca que el clima no sea algo estático, antes bien al contrario, está cambiando constantemente tal y como viene ocurriendo en la escala geológica del planeta. En efecto, el clima está sometido a múltiples variaciones en todas las escalas temporales desde hace millones de años, debido a causas naturales. Ahora bien, como consecuencia de las alteraciones en el balance energético provocadas por el hombre se está originando un cambio climático, como ya se ha comentado, de catastróficas consecuencias.

En este sentido precisamente, en los últimos años se ha venido acuñando un concepto asociado intrínsecamente al cambio climático y al impacto ambiental que el hombre ejerce sobre el planeta: se habla entonces de la **huella ecológica** ([Zhang L. et al., 2017](#)). Se puede definir como un indicador agregado que mide el área de territorio ecológicamente productivo (cultivos, pastos, bosques o ecosistemas acuáticos) necesario para producir los recursos utilizados y asimilar los residuos generados por una población dada con un modo de vida específico de forma indefinida.

Su objetivo fundamental es evaluar el impacto ambiental sobre el planeta de una determinada forma de vida y comparado con la capacidad de La Tierra de regenerarse: es por tanto, un indicador clave para la sostenibilidad. La gran ventaja que aporta este concepto es que permite entender, comparar y medir convenientemente la apropiación humana que el hombre está realizando del planeta y sus recursos. Así, es posible comparar emisiones por fabricar o transportar un bien en concreto con el impacto correspondiente (en unidad de superficie) como atestigua la figura siguiente.

Figura 2.5. Huella ecológica provocada por los distintos países (fuente: Wikipedia)

El análisis de la huella ecológica se puede aplicar a varios niveles, desde la escala planetaria global, hasta el nivel más local posible. Es más, este concepto puede ser empleado como una herramienta para explorar la toma de decisiones para empresas y gobiernos. En añadidura, en los últimos años han surgido conceptos evolucionados y asociados a la huella ecológica. Así, en vez de considerar el consumo de materias primas, es factible considerar el efecto de transporte, energía, agua y desecho. Este hecho puede representar una simplificación que dota de mayor valor pedagógico y versatilidad al estudio a nivel regional, ya que está construido en torno a actividades que las personas pueden razonar y recordar más fácilmente y en las cuales ellas participan directa y activamente (tal como ocurre con la producción de desechos y consumo de electricidad).

No en vano, en 1998 se desarrolló la primera serie de **algoritmos** matemáticos capaces de convertir conceptos tales como “Uso de Recursos” a “Área de Tierra Equivalente”, en un trabajo titulado “Metodología Eco–índice”. Su utilidad fue tal que el Instituto del Medioambiente de Estocolmo adoptó este acercamiento pionero como herramienta para sus estudios. Así, en el llamado modelo Componente Base, el valor de la huella ecológica para ciertas actividades es precalculado usando datos de la región estudiada.

Con el Acercamiento *Wackernagel's*, conocido como Acercamiento Compuesto o **Huella Ecológica Compuesta**, se han usado seis principales tipos de tierra de espacio productivo: tierra de energía fósil, tierra arable, tierra de pastoreo, forestal, tierra urbanizable y espacio de mar. El Acercamiento Compuesto considera la demanda humana sobre cada uno de esos tipos de tierra, para una población dada, donde quiera que esta tierra pueda estar. Aunque la herramienta Huella ecológica aspira a ser sobre todo un indicador cuantitativo y fiable, sus principales logros los ha entregado como marco conceptual que permite hacer comparaciones entre sociedades completamente diferentes y evaluar su impacto ambiental sobre el medio ambiente a escala planetaria.

Así por ejemplo, bajo el prisma de un tipo de vida básicamente agraria, bien organizada y sin monocultivos extensivos, se estima que entre 1 y 2 hectáreas es aproximadamente el terreno preciso para atender a las necesidades de una familia autosuficiente. Por contra, teniendo en cuenta el desarrollo industrial físicamente fundamentado en la disponibilidad de combustibles fósiles y partiendo de necesidades típicas de un ciudadano urbano medio se llega a la siguiente conclusión: serían necesarios otros 2,5 planetas como el nuestro para que los 7.000 millones de seres humanos actuales pudieran vivir todos bajo ese tipo de vida. Estas contundentes conclusiones, hacen necesario distinguir dos elementos clave:

- En la sociedad industrial actual, los impactos se producen a nivel global (triste consecuencia de la globalización).
- La huella ecológica poco tiene que ver con el espacio físico ocupado por un grupo humano.

Figura 2.6. Huella ecológica promedio por países (fuente: State of Ontario's Biodiversity)

De esta forma, la huella ecológica de la mayoría de los países desarrollados supera ampliamente su propia superficie, ya que extraen recursos y vierten residuos en lugares muy alejados del planeta. El valor didáctico del vocablo huella ecológica reside en que hace evidentes dos **realidades** vinculadas que quedan fuera del alcance de la intuición. Primero: el modo de vida característico de los países ricos no puede extenderse al conjunto de sus habitantes. Segundo: una economía basada en el desarrollo sostenible exige de esa misma minoría acomodada y privilegiada, una reducción de sus consumos y de su nivel de vida, si es que no pueden compensarse con un aumento equivalente en la eficiencia de los procesos productivos.

El **cálculo** riguroso de la huella ecológica es complicado de realizar, y en algunos casos es casi imposible, lo que constituye su principal limitación como indicador; no obstante, existen variados métodos de estimación, tal y como se ha indicado, a partir del análisis de recursos que un ser humano consume y de los residuos que genera. Básicamente sus resultados están basados en la observación de los siguientes aspectos:

- Hectáreas para urbanizar, generar infraestructuras y centros de trabajo.
- Hectáreas precisas para proporcionar alimento vegetal necesario.
- Superficie necesaria para pastos que alimenten al ganado.
- Superficie marina necesaria para producir pescado.
- Hectáreas de zonas boscosas necesarias para absorber el CO₂ que causa nuestro consumo energético. En este sentido no sólo incidiría el nivel de eficiencia energética logrado sino también las fuentes empleadas para su obtención: así, a mayor uso de energías renovables, menor huella ecológica.

Desde un punto de vista medio, se estima que la **biocapacidad** del planeta por habitante es de 1,8 Ha, esto es, si hubiese que repartir el terreno productivo de la Tierra en partes iguales a cada uno de los más de 7.000 millones de habitantes, lo que significa que la humanidad está consumiendo más recursos y generando más residuos de los que el planeta admite. Ésta es la triste conclusión.

Analizando los consumos energéticos y efectos contaminantes del sector de la **Edificación** (destinatario inicial de esta Tesis al fin y al cabo) y siempre según los datos del IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) las conclusiones son demoledoras: en España, este sector representa en torno a 25% del consumo total de energía producida a nivel nacional; y si se tuviese en cuenta la energía precisa para la fabricación de materiales de construcción precisos (que habitualmente se imputa al sector industrial), la edificación representaría un **33%** del total del gasto energético, cifra nada desdeñable en modo alguno. De forma análoga, en lo referente a las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) como principal responsable del efecto invernadero, un **30%** de las emisiones se deben a la industria de la construcción y al propio consumo energético del edificio. No en vano, 1 m² de construcción puede suponer en torno a 2,5 toneladas de CO₂ a lo largo de toda su vida útil. Cualquier esfuerzo innovador que se haga en este sentido, no puede sino redundar de forma muy positiva en mejorar estos resultados.

2.3 Futuro de la producción energética

La inquietud en la comunidad internacional con respecto al inexorable agotamiento de recursos energéticos fósiles y las consecuencias de la actividad industrial y social del ser humano sobre el cambio climático, dio lugar en 1987 al concepto “desarrollo sostenible” en la Comisión Mundial sobre Desarrollo y Medio Ambiente. En síntesis, pretende establecer las bases para “satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas y para ello es necesaria una gestión de todos los niveles de la sociedad y de sus economías, que preserve la riqueza presente y mantenga el entorno natural para las generaciones futuras”. En la japonesa ciudad de Kioto, los 160 países presentes alcanzaron un acuerdo final plasmado en un protocolo -llamado precisamente **protocolo de Kioto** ([Almer C. y Winkler R, 2017](#)) por el cual se estableció como objetivo la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para 38 países industrializados en diferentes proporciones y para el período comprendido entre 2008-2012, con una reducción conjunta de las mismas de un 5,2% sobre el conjunto de contaminantes del año 1990, tomado como referencia.

Los antedichos objetivos pueden ser alcanzados de forma individual o conjunta, lo cual origina el llamado comercio de emisiones, mecanismo por el cual a través de acuerdos de mercado, se pueden compensar entre distintos países excesos y déficits de emisiones de manera que el sumatorio final cumpla el protocolo en cuestión. El desafío para el sector energético en el cumplimiento de este conjunto de objetivos, es suministrar como mínimo el doble de la energía que se produce en la actualidad, al mismo tiempo que se prioriza el ahorro y la eficiencia energética y se cumplen las restricciones sobre emisión de gases. En el año 2002 el Parlamento Español lo ratificó con total unanimidad de todos los partidos políticos. En añadidura, a finales de dicho año, los Ministros de Medio Ambiente de la UE alcanzaron un acuerdo para establecer la Directiva de Comercio de Emisiones y regular la **compra-venta** de emisiones de CO₂.

En 2005 comenzó la asignación y se establecieron las condiciones de tal mercado. Con la posterior incorporación de Rusia, el Protocolo de Kioto incrementó ciertamente su importancia al superar el 55% de las emisiones mundiales de los países participantes. España, en la actualidad, ha superado desgraciadamente el 40% de incremento en las emisiones, lo que posiciona a nuestro país en una situación de clara **alarma** y en la previsión de tener que pagar fuertes cantidades de dinero por el compromiso no cumplido, tal y como establece el Protocolo. Nuestro país ha planteado acciones correctivas basadas en ciclos combinados de gas natural (el combustible menos contaminante) y en energías renovables, asumiendo aun así que finalmente habrá que admitir un déficit en nuestra balanza neta, toda vez que las medidas tomadas no cubren la necesidad de reducir las emisiones que nuestro país vierte a la atmósfera. A modo de ejemplo, téngase presente que una central de carbón emite, por término medio, unos 950 g de CO₂/kW·h mientras que una de ciclo combinado, emite 350 g de CO₂/kW·h, esto es, unas tres veces menos, pero una contribución a tener en cuenta no obstante. Además, hay que considerar el alto coste del gas natural y la inestabilidad política reinante en los países productores.

En contrapartida, las diferentes posibilidades de generación de energía mediante fuentes y recursos renovables, entre otras muchas virtudes, disfrutan de la bondad de **no emitir** CO₂, aunque aún a día de hoy, su contribución a la generación de energía eléctrica (habría que considerar aparte la consideración de energía térmica), está limitada todavía por sus altos costes de producción, (exceptuando el caso de la energía hidráulica y la eólica). Afortunadamente, las líneas de I+D en el desarrollo de nuevas tecnologías renovables, las economías de escala productivas y la optimización de las fuentes ya existentes, están minorando el coste unitario del kW·h generado. En contrapartida y desgraciadamente, hay un condicionante común en prácticamente todas estas nuevas fuentes de energía: su operatividad depende de las condiciones climatológicas (radiación solar, viento, lluvia...) lo que exige un sobredimensionamiento de potencia disponible a modo de reserva, de forma que si alguno de los recursos renovables no estuviese disponible, otro retomase su aportación energética.

La actual **energía nuclear de fisión** (ruptura del átomo y aprovechamiento del calor generado) es una de las más competitivas desde el punto de vista de costes y no emite gases de efecto invernadero. *A priori*, su funcionamiento es estable y se está trabajando para mejorar las condiciones de almacenamiento de residuos radioactivos. Sin embargo, el peligro inherente a este tipo de tecnología, el prolongadísimo período de vida de los antedichos residuos y la dependencia de países extranjeros productores de combustible nuclear (uranio) han originado una muy mala imagen en la sociedad española (y en parte, también a escala mundial). Ello llevó, hace más de tres décadas, a la no proliferación de centrales nucleares en España, de forma tal que siguen en funcionamiento únicamente las existentes, a excepción del desmantelamiento de alguna de las más veteranas. Parece ser que el futuro de la energía nuclear pasará por la llamada energía nuclear de fusión (unión de átomos) con proyecto como el *Stellarator* tecnología todavía en fase de investigación según todos los especialistas y que aún necesita de unos 35-40 años para ser comercialmente rentable.

Figura 2.7. Idealización 3D de proyecto Stellarator (fuente: ONRL)

Aun así, conforme parecen aseverar los expertos en la materia, el futuro de la energía no pasará por una única fuente de energía, sino por un **mix** de recursos energéticos: con importancia creciente de las energías renovables, con el fomento de ahorro y eficiencia energética, con un peso cada vez menor de las tecnologías de combustión “sucias” y si se llega a tiempo, con la aportación de la energía nuclear de fusión. Todo ello para hacer de nuestro modelo de desarrollo económico y social, ahora totalmente insostenible, en un modelo de crecimiento respetuoso con el medio ambiente, ético con los países pobres y respetuoso para con nuestro planeta: el único que tenemos.

A nivel de toda la Unión Europea en su conjunto, los resultados parecen ser optimistas, toda vez que según los últimos datos y previsiones, la UE puede cumplir su objetivo colectivo de recortar las emisiones de gases de efecto invernadero, gracias a una política conjunta de promoción de las energías renovables y desarrollo de estrategias de ahorro y eficiencia energética. Según la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), tales reducciones se pueden cifrar en un 20% durante el período 2012-2020 (se hace mención al **objetivo 20-20-20** ([Böhringer C y Rutherford T.F., 2009](#)) consistente en lograr para el año 2020 un aporte de un 20% de energías renovables, reducción de emisiones del 20% y reducción del consumo en un 20%). Parte de esta disminución vendría de proyectos de disminución de emisiones que los estados miembros financiarán en otros países. En efecto, el informe “Tendencias y proyecciones de las emisiones de gases de efecto invernadero en Europa 2008” analizó la evolución de las emisiones durante el período 1990-2006, a la vez que examinó las proyecciones de emisiones futuras para el período de compromiso del Protocolo de Kioto (como ya es sabido, 2008-2012).

De forma genérica, las proyecciones de resultados de los estados miembros durante el período comprendido, indican que los quince miembros implicados en el protocolo (UE-15) podrían recortar las emisiones en más de un 11% en comparación con las del año de referencia. Tal minoración de emisiones se puede lograr mediante una combinación de **medidas** nacionales y políticas generales, capturas de carbono en sumideros y créditos para la reducción de emisiones fuera de las fronteras de la Unión Europea. Ahora bien, en materia de emisiones la UE sigue mostrando resultados dispares según cada país comprometido. Varios estados siguen aún muy lejos de sus objetivos de Kioto (desgraciadamente nuestro país es uno de ellos, tal y como se ha comentado), si bien es cierto que teniendo en cuenta los resultados de otros estados miembros, que se confirman como más satisfactorios, en su conjunto debería cumplir su compromiso global. Es más, los resultados serían aún mejores si las proyecciones de algunos países tuvieran en consideración de forma completa las restricciones impuestas a sus industrias incluidas en el régimen comunitario de comercio de derechos de emisión.

En añadidura, el informe contiene una estimación de las emisiones europeas a largo plazo, donde se puede cuantificar que la Unión Europea continuará **disminuyendo** sus emisiones hasta el 2020 (como ya se ha comentado) a pesar de posibles ampliaciones con nuevos países miembros. Aun así, el antedicho objetivo de reducción respecto a 1990 acordado por los dirigentes europeos en el año 2007, seguirá siendo inalcanzable si no se aplican medidas adicionales como las contempladas en el paquete de soluciones comunitarias para el ámbito de la

energía y cambio climático propuesto por la Comisión Europea en enero de 2008. Los datos arrojan las siguientes conclusiones: los 15 estados miembros que comparten un objetivo común conforme al Protocolo de Kioto, consiguieron minorar en un 2,7% las emisiones de sus gases de efecto invernadero entre el año tomado como referencia y 2006. Pero las medidas y políticas aplicadas no serán suficientes para que la UE cumpla sus objetivo, ya que entre 2006 y 2010 únicamente se disminuyeron las emisiones en un 3,6%. Si tales medidas adicionales previstas se aplicaran íntegramente y a tiempo, se podría obtener una reducción adicional del 3,3%. Sin embargo, el efecto total del régimen comunitario del comercio de derechos de emisión no se refleja en las proyecciones de todos los estados miembros. La mayoría de los países de la UE tienen la intención de recurrir a la llamada captura de carbono para cumplir.

En efecto, por parte de gobiernos e industrias asociadas, se está discutiendo y promoviendo activamente varias soluciones para mitigar el cambio climático, entre las cuales está la “**captura y secuestro de carbono**” (CCS en sus siglas inglesas) cuya idealización puede resumirse ([Kaliyavaradhan S.K. y Ling T-C., 2017](#)) en la imagen que se adjunta. Ahora bien, a pesar de la importante presión ejercida por parte de la mayoría de países contaminantes para el desarrollo de esta tecnología, hay bastantes reservas al respecto por parte de diversos especialistas, incluyendo el PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente), quienes cuestionan la cantidad real de CO₂ que se podría almacenar. El principal inconveniente radica en que parece que se demuestra que las instalaciones que utilizan la CCS necesitan a su vez un consumo adicional de combustibles fósiles para poder funcionar en virtud del incremento de energía extra que se precisa, cuantificado hasta en un 30% en el caso de centrales térmicas.

Figura 2.8. Representación 3D de técnica secuestro de CO₂ (fuente: Ministerio Industria)

Además, si se repercute **económicamente** la captura y secuestro de carbono sobre el coste de producción de la energía, se constata que se eleva notablemente dicho coste económico y ambiental, ya que supone un incremento comprendido entre 40-80% de los gastos de producción de energía respecto de los gastos de las centrales eléctricas convencionales. En añadidura, minora la eficiencia de las centrales térmicas (se tiene que quemar hasta un 30% más de combustible para lograr la misma cantidad de energía). Y genera gastos adicionales a largo plazo, debido a la imperiosa necesidad de garantizar la supervisión y verificación durante cientos de años para evitar que haya escapes del CO₂ almacenado una vez que el depósito es sellado.

Por tanto, parece que únicamente puede ser una solución adicional para mitigar la emisión de CO₂ pero en modo alguno es la panacea o respuesta a todos los problemas medioambientales. En este sentido, una de las técnicas más desarrolladas hasta ahora en materia de CCS es el llamado almacenamiento subterráneo en capas acuíferas salinas profundas; en yacimientos de petróleo y/o gas natural ya agotados; en minas de carbón y en otras formaciones geológicas. Algunas asociaciones conservacionistas advierten del peligro y error que supondría apostar únicamente por la captura y secuestro de carbono en detrimento de las energías renovables, ya que es una tecnología que no conduce a una reducción real de emisiones de CO₂ ni a un cambio del modelo energético basado en combustibles fósiles. Además, utilizar la CCS significa trasladar inexorablemente a las **generaciones futuras** el problema de qué hacer con el CO₂ que hoy almacenaríamos en cuevas subterráneas, de forma similar a como ocurre con los residuos radiactivos. Desgraciadamente, nunca se podrá eliminar la posibilidad de fugas a la atmósfera, ya sean lentas filtraciones a largo plazo como escapes catastróficos a corto plazo, que podrían poner en peligro vidas humanas, echar a perder depósitos de agua dulce, restringir usos agrícolas de los suelos, contaminar capas acuíferas y superficiales y actuar brusca y catastróficamente sobre el clima.

En definitiva, esta captura de CO₂ solo debería considerarse un posible “parche” para la contabilidad de emisiones netas, pero sin perder de vista el verdadero objetivo de avanzar en energías renovables. En este mismo sentido, los datos parecen confirmar estas últimas líneas de pensamiento: haciendo un estudio sobre su viabilidad, se demostró que la cantidad total de CO₂ que pudo eliminarse anualmente entre 2008 y 2012, habría sido relativamente escasa (1,4%) aunque ligeramente superior a las proyecciones efectuadas en 2007. Sí que es interesante una alternativa adicional denominada **sumideros naturales** de CO₂ consistentes en la plantación de bosques que absorban grandes cantidades de este gas. De una parte, se procede a reforestar zonas boscosas que posiblemente fueron deforestadas por el hombre siglos atrás; y de otra se consigue el fin buscado de minorar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Eso sí, debe tratar de respetarse la plantación de árbol autóctono para evitar la acidificación de subsuelos, propagación rápida de incendios forestales y destrucción de ecosistemas naturales.

La más reciente de las convenciones a escala mundial vinculadas al cambio climático, es la llamada **Convención de París** o COP21 (*Conference Of the Parties*, en su 21º período de sesiones), celebrada en la capital francesa en diciembre de 2015 ([Lacal-Arantequi R. y Jäger-Waldau A., 2017](#)). Fue organizada por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y tras la misma se logró alcanzar el conocido como Acuerdo de París, nuevo referente de objetivos y compromisos de los países industrializados para con el planeta en términos de emisiones de CO₂. El objetivo de esta conferencia fue implicar a los países participantes en un acuerdo a escala mundial para minorar sus emisiones netas de gases de efecto invernadero. Previamente a esta conferencia, se celebró una reunión para discutir los problemas climáticos durante la llamada MedCOP21, en junio de 2015. Sin temor a equivocarnos, se puede afirmar que la Convención de París alcanzó su objetivo: conseguir por primera vez en la historia de la humanidad, un acuerdo universal por **aclamación** de prácticamente todos los estados, sobre las estrategias para parar el cambio climático y con implicaciones jurídicamente vinculantes en términos de ratificación, aceptación, aprobación y adhesión.

El acuerdo entrará en vigor a partir de 2020 y de conformidad con las directrices del comité organizador, el resultado esperado era clave para acotar el calentamiento global por debajo de 2°C para el año 2100, tomando como referencia de temperaturas la era preindustrial. Los investigadores de la ONU (en concreto, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) acordaron en 2009 que este límite era crítico para evitar catástrofes climáticas de mayor envergadura, hecho que se traducía a su vez en disminuciones porcentuales de las emisiones de gases de efecto invernadero entre un 40% a un 70% en 2050 en comparación con el año 2010, alcanzando un balance neto de **cero emisiones** en 2100. Pero es más, este objetivo fue incluso afortunadamente superado por el proyecto definitivo formalmente aceptado en el Acuerdo de París que pretende proseguir los esfuerzos para acotar el aumento de temperatura a 1,5°C. Un objetivo más ambicioso habría requerido un nivel cero de emisiones entre 2030 y 2050.

Figura 2.9. Presidentes de países participantes en COP21 (fuente: Wordpress)

A priori y salvo los recientes devaneos de la administración de Donald Trump como presidente de los EE.UU. o las dudas razonables sobre la determinación que China tome para seguir creciendo pero de forma sostenible, multitud de personalidades influyentes del mundo de la política, de la religión, del deporte, del espectáculo, de la industria, etc. han abogado por la imperiosa necesidad de reaccionar. A modo de ejemplo, el mismísimo **Papa Francisco** publicó recientemente una encíclica llamada *Laudato si* destinada en parte a influir en la conferencia a favor de este acuerdo. De hecho, la encíclica llama imperiosamente a la acción contra el cambio climático ([Landrum A.R. et al., 2017](#)).

De la misma forma, la Confederación Sindical Internacional hizo un llamamiento al objeto de conseguir "cero carbono, cero pobreza". La razón por la cual la convención se celebró en París, estriba en que es uno de los pocos países desarrollados que fija como objetivo descarbonizar totalmente la producción de electricidad (cierto es que desde su postura como potencia energética nuclear, hidroeléctrica y eólica) y minorar el uso de combustibles fósiles sin dejar de ofrecer un elevado nivel de vida a sus ciudadanos. El propio ministro de Relaciones Exteriores de Francia, Laurent Fabius afirmó a la terminación de la Conferencia, que había supuesto un plan "ambicioso y equilibrado" que resultaba ser un "punto de inflexión histórico" con respecto al objetivo de reducir el calentamiento global.

¿Qué **compromisos** finales se lograron? El Acuerdo no será vinculante para los estados miembros hasta que al menos 55 países generadores de más del 55% de las emisiones de gases de efecto invernadero, hayan ratificado el mismo. Esto es, la aparente falta de compromiso y de mecanismos de aplicación que de la anterior afirmación se puede inferir, significa que cada país que ratifique el acuerdo deberá establecer imperiosamente un objetivo tangible de reducción de emisiones, pero la cuantía será voluntaria. Ciertamente habrá un mecanismo que forzará a cada nación a cumplir los objetivos marcados, mediante medidas coercitivas consistentes en "señalar y alentar" a aquellos estados rezagados que no cumplan los objetivos marcados en los plazos establecidos. La conferencia se celebró escasamente dos semanas después de una serie de ataques terroristas que tuvieron lugar en el mismo centro de París. A resultas de ello, la seguridad fue reforzada antes del evento con nada menos que 30.000 agentes de policía y 285 controles de seguridad desplegados en todo el país hasta después de que terminara la conferencia.

2.4 Reto tecnológico y potencial de las energías renovables

Ya se han analizado las consecuencias de no abandonar el actual modelo de crecimiento para las llamadas sociedades industrializadas. Aunque desde el punto de vista de divulgación de esta circunstancia cualquier esfuerzo que se realice es poco (valga desde aquí nuestra humilde aportación), no se desea profundizar aún más en los resultados sobre el medio ambiente de nuestro modo de vida. Ahora bien, ¿qué ocurriría si la humanidad no hiciese nada y tras el paso de las décadas se sufriesen las consecuencias? ¿Podríamos mirar a generaciones venideras y confesarles que tuvimos la oportunidad pero nos faltó el coraje? ¿O podríamos reconocerles que tuvimos la tecnología pero nos faltó visión de futuro? Desde la perspectiva del ciudadano convencional, quizá no seamos culpables ni de los grandes males de la humanidad, ni tampoco artífices de los grandes remedios. Pero está claro que muchas cosas pequeñas hacen cosas grandes ([Zou C. et al., 2016](#)). Se impone por tanto un plan de acción con el objetivo de lograr un futuro energético sostenible para el conjunto de la humanidad, de forma tal que en la lucha mundial contra el cambio climático, las emisiones a escala global de gases que causan el efecto invernadero, hayan alcanzado su máximo en el año 2015, para posteriormente retornar a los valores de 2005 para el año 2020 (y *a priori*, reducirse en más de un 50% para el año 2050). Este hipotético y deseable escenario de revolución energética para el planeta desarrollado por científicos de prestigiosas universidades, ofrece un modelo práctico para un futuro energético renovable. Los **pilares** entre los cuales dicha revolución se cimentan son:

- **Eficiencia energética** ([Bukarica V. y Tomšić Ž., 2017](#)): explotar el potencial técnico para lograr la máxima eficiencia (medida de los recursos destinados para lograr un objetivo) mediante estándares técnicos de probada fiabilidad.
- **Cambios estructurales**: cambiar la manera de producir energía de forma centralizada en grandes megacentrales, por sistemas energéticos descentralizados, empleando recursos renovables a gran escala que utilicen fuentes de energía disponibles a nivel local. Adicionalmente, se puede recurrir a conceptos tales como cogeneración o trigeneración: aprovechar distintas maneras de generar de forma conjunta varios tipos de energías (electricidad-calor o electricidad-calor-refrigeración, respectivamente).
- **Transporte y distribución** energética eficiente: desarrollo de transporte público e implantación de vehículos más eficientes.

El escenario propuesto de revolución energética genera una mayor igualdad en el uso de recursos, ofreciendo a la vez un suministro energético seguro y asequible, manteniendo un desarrollo económico continuado en el mundo. Bajo esta hipótesis se tienen en cuenta zonas de acelerado crecimiento económico (potencias emergentes) como China, India, Brasil y varios países de África.

En este sentido, la implantación de estándares de eficiencia es un ejemplo de cómo se pueden lograr los objetivos: minorando el uso de energía *per capita* en países industrializados y ralentizando el aumento de la demanda energética en los países en vías de desarrollo, se puede compartir el consumo energético a escala planetaria de una manera mucho más equilibrada. Sin embargo, para el año 2020

se estima que el uso de dicha energía *per capita* en EE.UU., Europa o Australia sea dos a tres veces mayor que el de China o India, por lo que los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) deberán reducir sus emisiones de dióxido de carbono antes que las economías en vías de industrialización. Ya es sabido qué reducciones se esperan para los países desarrollados. Para los llamados países en **vías de desarrollo**, como China e India, se deben estabilizar sus emisiones de CO₂ para 2020 y comenzar a reducirlas a partir de 2030, creando a la vez un suministro energético asequible y seguro. Y algo muy importante, manteniendo un desarrollo económico constante y renovable. Parece por tanto, que se impone un uso y producción inteligente de la energía.

Como ya se ha constatado, el seguir como hasta ahora en la manera de generar y consumir energía ha dejado ya de ser una opción. Además de la catástrofe que causará un más que probable cambio climático provocado por el aumento de las emisiones de CO₂, se debe recordar también que los recursos son limitados. El precio de los combustibles fósiles está aumentando inexorablemente y los consumidores de todo el mundo se están enfrentando a facturas energéticas cada vez más altas. Para lograr una disminución de esos costes energéticos, se deben implantar tecnologías tales como energías renovables y eficiencia energética. En una hipotética **ciudad del futuro**, los centros de los núcleos urbanos estarán interconectados para producir electricidad y calor a la vez que lo consumen. Adicionalmente, el bajo consumo será el estándar para todos los edificios, una vez que los gobiernos se comprometan a cumplir los objetivos climáticos a través de condiciones estrictas, a la par que ofrecer incentivos para renovar tales edificios.

En este sentido, prestigiosos centros como el Instituto de Investigaciones Tecnológicas de la Universidad Pontificia Comillas junto al instituto alemán DLR y a petición de Greenpeace, han realizado análisis técnicos sobre la viabilidad de un sistema de generación eléctrica en la España peninsular, con la máxima contribución de energías renovables. El análisis considera los principales condicionantes sobre disponibilidad de recursos, restricciones ambientales o de otros tipos sobre usos del suelo, acoplamiento entre demanda y oferta de generación y capacidad de transporte y distribución de la red eléctrica. Los resultados se presentan en sucesivos informes bajo la denominación genérica de revolución energética. En dicho documento se muestran los resultados del informe **Renovables 2050** ([García X. et al., 2005](#)). Un informe sobre el potencial de las energías renovables en la España peninsular”, el primero de esta índole que realiza un análisis pormenorizado publicado hasta la fecha en nuestro país, bajo un escenario de desarrollo de las tecnologías renovables. El informe entrega unos techos de potencia y generación de estas tecnologías, reflejando de forma explícita las diversas restricciones relativas tanto a disponibilidad de recurso energético como a la de usos del suelo. La metodología consiste, en primer lugar, en elaborar escenarios de evolución de la población española y demanda energética para el año 2050 en la España peninsular, fundamentándose en los ya publicados por otras instituciones.

A partir de este punto de inicio y en comparación con el desarrollo actual previsto de cada tecnología renovable, se analiza cuál podría ser su situación y actuaciones para dicho año 2050 tal y como anteriormente se comentaba. Finalmente, se infiere cuál podría ser la máxima contribución posible de cada una

de ellas en términos de potencia instalada y de producción de energía eléctrica, imponiendo criterios ambientales, sociales y tecnológicos sobre el tipo de suelos disponibles. En este ámbito, el trabajo recibe como título el de *Energy Revolution: a sustainable pathway to a clean energy future for Europe* que demuestra que es factible la reestructuración del sistema energético comunitario para cumplir los ambiciosos objetivos ambientales plasmados en el Protocolo de Kioto (y los recientes Acuerdos de París), y marca una transición progresiva para la sustitución de energías convencionales por renovables, de forma que éstas últimas podrían aportar la **mitad** de energía necesaria incluso para mediados de siglo.

Por tanto, parecer quedar resuelta la consulta sobre la suficiencia de las energías renovables para cubrir toda la demanda energética de la sociedad actual y futura: sí son capaces, sin atisbo de duda. Por tanto ¿se necesita desarrollar otras fuentes de energía que cubran las supuestas limitaciones que se creía tenían las renovables? La respuesta a estas preguntas va a condicionar toda una serie de importantes decisiones políticas y económicas cruciales que se van a tomar en los próximos años en nuestro país y en el ámbito de toda la Unión Europea, y que van a influir decisivamente en la capacidad de la humanidad de evitar un cambio peligroso climático. Entre esas **decisiones** están:

- Las próximas directivas de energías renovables, que deberán fijar objetivos sobre la aportación de tales energías al “mix” energético de cada uno de los países de la UE en el horizonte 2020.
- El Plan Nacional de Asignación de emisiones para los próximos cuatrienios que determinará la voluntad real de nuestro país en cumplir el compromiso del Protocolo de Kioto.
- La negociación internacional, que se inició en la primera reunión de países firmantes del Protocolo de Kioto que se celebró en Montreal desde finales de noviembre de 2005, para establecer nuevos objetivos de reducción de emisiones para más allá de 2012, los cuales deberán ser más profundos que los actuales.
- La revisión de la planificación energética prometida por el presidente del Gobierno español, que debe establecer qué demanda energética se prevé abastecer en los próximos años y, para ello, qué infraestructuras energéticas serán necesarias. Y sobre todo, si éstas se seguirán basando en construcción masiva de centrales térmicas o en la inversión en renovables.
- El debate nuclear, que debería concretar cómo va el Gobierno a cumplir su promesa de abandono de la energía nuclear y hacer frente a presiones de grandes compañías que pretenden alargar la vida útil de las viejas centrales españolas.
- La reforma del sector eléctrico, teniendo en cuenta las propuestas del Libro Blanco para orientarlo hacia la sostenibilidad y la renovabilidad.
- El papel que puedan desempeñar los consumidores para poder elegir electricidad limpia.

El mentado estudio se cimenta en las siguientes **hipótesis** de partida:

- Población peninsular española en 2050: 38,32 millones de habitantes, repartidos geográficamente en la misma proporción que en el año 2003.
- Demanda de energía eléctrica: 20 kW·h/habitante·día, lo que implica una demanda eléctrica peninsular de 280 TW·h/año en 2050. Esta cantidad resulta de extrapolar escenarios conservadores de la UE, descontando de la demanda final el empleo de cierta cantidad de energías renovables en origen (80% de demanda eléctrica para ACS gracias al uso de solar térmica y calderas de biomasa; 80% de demanda de calefacción eléctrica gracias al uso de arquitectura bioclimática, solar térmica, calderas de biomasa y mejor aislamiento de edificios; 60% de demanda de refrigeración eléctrica debido al uso de solar térmica con máquinas de absorción y técnicas bioclimáticas), pero sin incorporar ahorro debidos a gestión de demanda.
- Mismo reparto en 2050 que en 2003 de la proporción de demanda eléctrica *per capita* de cada comunidad autónoma respecto a la media española.
- Misma demanda eléctrica *per capita* en todas las provincias de una misma comunidad autónoma.
- Modulación horaria de demanda eléctrica peninsular en 2050 igual a la de 2003, sin considerar mejoras que se podrían conseguir mediante gestión de demanda para facilitar la penetración de tecnologías renovables.
- Demanda de energía final: 109 kW·h/habitante·día, lo que suponen 1.525 TW·h/año.

En cuanto a la **metodología** seguida, se trata de determinar techos de potencia y generación para cada tecnología, entendiendo por tales el potencial técnicamente desarrollable en cada tecnología considerada según los recursos disponibles e imponiendo limitaciones técnicas pertinentes al desarrollo del recurso. Las unidades empleadas para expresar los techos de potencia han sido los gigavatios GW (equivalentes a mil megavatios (MW) o mil millones de vatios (W)), mientras los límites superiores de generación de energía se expresan en teravatios-hora (TW·h, equivalentes a mil millones de kilovatios-hora). La razón de emplear estas unidades en términos de múltiplos y no habituales, es que facilitan la expresión de las cantidades tan elevadas. Para calcularlos, se han desarrollado diseños completos de las diferentes tecnologías, se han evaluado sus potencialidades en distintas regiones geográficas, e impuesto restricciones tecnológicas y de disponibilidad de terreno, mediante una herramienta informática tipo SIG (Sistema de Información Geográfica).

La estimación de umbrales **máximos** de generación se ha obtenido a partir de los límites superiores de potencia, empleando factores de capacidad evaluados para distintos emplazamientos considerados. Para valorar la disponibilidad de terreno para cada tecnología renovable según los usos del terreno, se ha empleado una base de datos del Ministerio de Fomento que clasifica el suelo según corresponda a: zonas urbanas; zonas industriales, comerciales y de transportes; zonas de extracción minera, vertederos y de construcción; zonas verdes artificiales, no agrícolas; tierras de labor; cultivos permanentes; praderas; zonas agrícolas heterogéneas; bosques; espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea; espacios abiertos con poca o sin vegetación; zonas húmedas continentales; zonas húmedas litorales; aguas continentales; y por último, aguas marinas.

Para cada grupo y sus subgrupos asociados, se ha asignado su **viabilidad** para la instalación de cada una de las tecnologías renovables consideradas, o el porcentaje que podría utilizarse en su caso. Se han incluido también restricciones ambientales, que suponen excluir el uso del 28% del territorio peninsular (en algunas CC.AA. llega a suponer el 40% de su territorio). De forma genérica, las áreas excluidas son las siguientes:

- Red Natura 2000: Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA) + Lugares de Interés para la Conservación (LIC).
- Zonas asociadas a Espacios Naturales Protegidos, declarados y en proceso formal de declaración por el Estado y las Comunidades Autónomas.

Pues bien, los principales resultados del estudio para cada una de las tecnologías consideradas en comparación con la demanda eléctrica proyectada para 2050, adoptando un enfoque conservador (es decir, considerando la mejor tecnología actualmente existente para la transformación de cada uno de los recursos renovables en electricidad, incluyendo mejoras tecnológicas sólo cuando parezca obvio que estarán disponibles para el año 2050) arrojan resultados muy esperanzadores. En global, se puede afirmar que existen multitud opciones de configurar un “mix” de generación de electricidad **100% renovable** incluso con exceso de producción renovable.

Figura 2.10. Demanda energética satisfecha con renovables (fuente: Greenpeace)

Se puede avanzar un posible parque de generación que, con un sobredimensionamiento del 178% y 180.000 MW de potencia instalada combinando las distintas tecnologías renovables, tuviese capacidad de generar la totalidad de la demanda eléctrica proyectada en 2050, con una ocupación del 5,3% del territorio. Esto es, sería técnicamente viable abastecer el 100% de demanda energética total con fuentes renovables y **sobrepasar** esa necesidad. La combinación más apropiada de tecnologías y su ubicación geográfica dependerán del sistema de distribución energética, de las necesidades de regulación de la generación (vinculadas con la gestión de la demanda) y de la evolución de costes de cada tecnología. Los recursos renovables están tan ampliamente distribuidos en el territorio peninsular, que todas las comunidades autónomas disponen de suficiente capacidad como para autoabastecer completamente su propia demanda de energía eléctrica y total.

Figura 2.11. Techo de potencia y cobertura por Termosolar (fuente: Greenpeace)

2.5 Aprovechamiento energético de la energía solar

Incluso ya desde las primeras civilizaciones (persas, chinos, griegos y romanos), eran conocidas las ventajas de diseñar viviendas orientadas hacia el sur para ganar el máximo de aporte térmico solar: eran los primigenios orígenes de la energía solar pasiva. Entonces, se conseguía climatizar mínimamente las viviendas en épocas en la cuales se desconocían la mayoría de las fuentes de energía actuales. Hoy en día, la búsqueda de criterios de sostenibilidad y ahorro energético, han provocado un retorno a criterios constructivos ecoeficientes y al auge de la denominada arquitectura bioclimática. Cuenta la leyenda (y decimos bien, pues no termina de estar suficientemente comprobada la veracidad de la historia), que en el 213 A.C. el gran sabio griego **Arquímedes** ([Ceccarelli M., 2014](#)), fue capaz de defender la ciudad de Siracusa del ataque de navíos romanos. Para ello, consiguió quemar sus velas, concentrando rayos solares mediante espejos cóncavos.

Figura 2.12. Defensa de Siracusa por Arquímedes con energía solar (fuente: Wikipedia)

En el año 1515 el polifacético **Leonardo da Vinci** ([Lieb J.W., 1921](#)) utilizó un concentrador solar para conseguir mediante alta temperatura, transformar agua líquida en estado gaseoso. Lo realmente asombroso de esta circunstancia no es el proceso en sí, sino el hecho de que da Vinci buscó la producción de vapor como fin último de su experimento. No fue hasta 1.850 (¡300 años más tarde!) cuando con el nacimiento de la Revolución Industrial, se empezó a utilizar el vapor de agua como “fuente de energía” para mover máquinas.

En el año 1839 el científico francés **Becquerel** ([Anderson W.W. y Chai Y.G., 1976](#)) descubre el llamado efecto fotovoltaico: fenómeno físico por el cual la energía incidente procedente del Sol en forma de radiación es transformada en movimiento de electrones (electricidad, en definitiva) en el interior de un material semiconductor. Este efecto, que pasó desapercibido durante varios lustros, es el fundamento del funcionamiento de los paneles fotovoltaicos en la actualidad.

En 1900 surge en los EE.UU. la primera compañía de energía solar térmica, la **Solar Heater Corporation**. Durante años, fabricó y distribuyó con éxito los primeros captadores solares térmicos para calentar agua en viviendas unifamiliares en California. Desgraciadamente, el descubrimiento del petróleo y su bajo precio como combustible provocaron que estos captadores empezasen a ser poco competitivos hasta el punto de hacer desaparecer la línea de negocio solar.

En el 1921, el científico de origen judío **Albert Einstein** ([Manor A. y Katz E.A, 2012](#)) nacionalizado estadounidense tras la II Guerra Mundial, recibe el Premio Nobel de Física. Lo curioso fue que no se le otorgó tan prestigioso galardón por su mayor logro, enunciar la Teoría de la Relatividad, la cual revolucionó la forma de comprender la Física conocida hasta entonces (Física newtoniana). Sino por la modelización matemática del efecto fotovoltaico que Becquerel había descubierto años atrás.

A partir del año 1950 con el desarrollo de la llamada “**carrera espacial**” entre la antigua Unión Soviética y los Estados Unidos, los ingenieros de la época se percatan de que tienen que dotar a los satélites geoestacionarios de una fuente de energía autónoma y fiable. Retoman entonces el antedicho efecto fotovoltaico, dando vida a la primera aplicación industrial de la energía fotovoltaica: la incorporación de paneles solares en tales satélites para dotarles de electricidad y así habilitar el funcionamiento de sus componentes electrónicos.

Centrándonos en la energía termosolar, los primeros esfuerzos por aprovechar esta tecnología, aparecen mucho antes de la crisis del petróleo. En efecto, en 1866 **Augustin Mouchot** concibió un ingenio consistente en un reflector paraboloïdal más una caldera cilíndrica que alimentaba un pequeño motor a vapor. El prototipo fue presentado al emperador Napoleón III, y llegó a ganar una medalla en la Exposición Universal de 1878 de París. Pocos años más tarde, en 1900 **Aubrey Eneas** construyó el primer motor directamente solar y en 1945 **Frank Shuman** diseñó e instaló la primera planta solar de producción eléctrica de 45 kW con receptores cilindro-parabólicos en Egipto.

Figura 2.13. Motor solar de Mouchot (fuente: Sitiosolar)

El estado actual de la tecnología ha originado la denominada energía solar activa que permite aprovechar la energía del Sol mediante tres formas diferentes:

- Energía solar **térmica**: transforma radiación solar en calor a baja temperatura (150 °C), lo transfiere a un fluido caloportador y obtiene agua calentada para producción de ACS (agua caliente sanitaria), apoyo a calefacción, climatizar piscinas, refrigeración y aplicaciones industriales.

Figura 2.14. Gran instalación de colectores de energía solar térmica (fuente: autor)

- Energía solar **fotovoltaica**: convierte la radiación solar en electricidad debido al efecto fotovoltaico, para posteriormente ser utilizada en consumo propio (aislada) o para ser inyectada y vendida (conexión a red).

Figura 2.15. Planta fotovoltaica de inyección a red (fuente: autor)

- Energía solar **termoeléctrica**: también conocida como energía termosolar o energía solar de concentración, se basa principalmente en transformar la radiación solar en calor a media-alta temperatura (desde 400°C y hasta 2.000°C), transferirlo a un fluido caloportador, producir vapor de agua tras un intercambio térmico, expandirlo en turbinas conectadas a alternadores y así generar electricidad para inyección a red de distribución. Otra de las alternativas industriales ya desarrolladas, es describir ciclos termodinámicos de calentamiento y enfriamiento de aire mediante colectores paraboloïdales.

Figura 2.16. Campo de colectores cilindro-parabólicos (fuente: Abengoa)

2.6 Ciclos termodinámicos aplicados a energía termosolar

De entre las tres posibles tecnologías solares desarrolladas por el ser humano recién vistas, la energía solar termoeléctrica o energía termosolar es una de la que ha tenido mayor éxito, tanto técnica como comercialmente hablando, como atestigua la gran cantidad de plantas construidas y a la espera de ser proyectadas para los próximos años, tanto a nivel nacional como internacional. Esta tecnología se fundamenta en la producción de energía eléctrica mediante el uso de un motor térmico (dispositivo que transforma calor en energía mecánica) capaz de arrastrar un alternador eléctrico. Dado que esta transformación tiene lugar a través de un proceso termodinámico, este tipo de aprovechamiento energético viene limitado por la llamada **Segunda Ley de la Termodinámica** ([S.E. Wright, 2017](#)) cuya representación matemática se indica seguidamente:

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_c} \quad (1)$$

donde:

η : rendimiento de un ciclo termodinámico, adimensional

T_f : temperatura del foco frío, en K

T_c : temperatura del foco caliente, en K

La Termodinámica es la parte de la Física que estudia las transformaciones de la energía y su conversión en calor; y sus leyes describen los límites físicos dentro de los cuales ocurren esas transformaciones. El Primer Principio expresa que en cualquier proceso la energía se conserva, y no impone restricción alguna respecto a la dirección del proceso. Además, define a la energía interna U como una función de estado, y niega la posibilidad de que tengan lugar procesos en los que no se cumpla el Principio de Conservación de la Energía. Sin embargo, la experiencia indica que sí existe cierta restricción dada por el Segundo Principio. Las diferencias entre las formas de energía calor y trabajo, arrojan luz sobre el antedicho. En un balance de energía, tanto el trabajo como el calor participan como simples términos aditivos, midiéndose con el mismo tipo de unidad (el julio, J, en el S.I.), y aunque esto es válido para el balance de energía, la experiencia muestra que hay diferencia de calidad entre calor y trabajo. El trabajo se transforma en otras formas de energía con rendimientos de conversión cercanos al 100%, tales como energía potencial (elevación de masa), energía cinética (velocidad de un cuerpo), energía eléctrica (generador eléctrico), rozamiento (proceso disipativo que transforma trabajo en calor). De hecho, el trabajo se transforma por completo en calor, como demostró Joule, pero no a la inversa: el calor no se transforma íntegramente en trabajo. Todos los esfuerzos realizados para diseñar un proceso de conversión completa de calor en trabajo o energía, han fallado pese a mejoras que se han hecho en los dispositivos empleados, por lo que el rendimiento de conversión no suele ser mayor del **40%**; estos valores tan bajos conducen a la conclusión de que el calor es una forma de energía menos útil (degradada) y menos valiosa que una cantidad equivalente de trabajo, energía mecánica o eléctrica.

Una definición del Segundo Principio sería la siguiente: es imposible, mediante un proceso **cíclico** transformar completamente en trabajo, el calor absorbido por un sistema. Según el postulado de Clausius, se sabe que el flujo de calor entre dos cuerpos siempre tiene lugar del cuerpo más caliente al más frío y nunca al contrario; este hecho tiene tanta importancia que su concepto puede servir como manifestación plausible del Segundo Principio de la Termodinámica, como resultado de la restricción impuesta a la dirección de los procesos reales. Dicho lo cual, es factible establecer enunciados generales que describan tal restricción y que, por consiguiente, sirvan para expresar el Segundo Principio. Así, se podría afirmar que ningún proceso puede consistir únicamente en transferir calor de un nivel de temperatura dado a otro superior. Nada se opone, desde el punto de vista del Primer Principio, a que el cuerpo frío ceda energía al caliente, ya que lo único que el Primer Principio exige es que la energía absorbida por el cuerpo caliente sea igual a la cedida por el cuerpo frío. Para subsanar esta anomalía, el Segundo Principio define un sentido a la transformación, siendo ésta sólo posible en el sentido de máxima probabilidad, definiendo una función termodinámica de estado bajo el nombre de **entropía** ([Canturk B. et al., 2017](#)) que va a proporcionar una idea cuantitativa de estas irreversibilidades. Una tercera definición del Segundo Principio diría que ninguna máquina puede operar en forma tal que su único efecto (en el sistema y en los alrededores) sea la conversión completa del calor absorbido por el sistema en trabajo. El Segundo no impide la generación de trabajo a partir del calor, pero limita la fracción de calor que puede convertirse en trabajo en un proceso cíclico. Esta es la base de la generación comercial de energía.

Pues bien, retomando la expresión que identifica el rendimiento de un ciclo termodinámico, se puede afirmar que la conversión termoeléctrica mantiene el récord de conversión de energía térmica solar en energía eléctrica en centrales de vocación comercial. Buena prueba de ello es que las únicas centrales de capital privado que se están construyendo actualmente en España son centrales termoeléctricas: esto es, es una línea de negocio rentable, que además aporta conocimiento a la industria española, inversión en I+D, exportación de tecnología, aprovechamiento de recursos autóctonos y no contaminantes. En este sentido, aunque analizar de forma pormenorizada los ciclos termodinámicos sobrepasa con creces el objetivo de este escrito, sí merece la pena contemplar al menos los fundamentos de la **Termodinámica Técnica**. Todo ello, porque la mayoría de las plantas termosolares existentes actualmente en el mercado y las que están en fase de proyecto o ejecución, básicamente trabajan bajo tres ciclos termodinámicos: *Rankine*, *Brayton* y *Stirling*. Se puede definir un **ciclo termodinámico**, como una serie de transformaciones físico-químicas a las cuales se ve sometido un determinado fluido con el objetivo de obtener un fin preciso (producir o extraer calor, generar energía eléctrica...) de manera que al final de las mismas, dicho fluido vuelve a encontrarse en las mismas condiciones termodinámicas que al principio. Para visualizar tales operaciones, se suele recurrir a diagramas termodinámicos que reflejan la evolución de funciones de estado frente a variables de proceso: así por ejemplo, se suele representar la entropía específica (s) o la entalpía específica (h) frente a la temperatura (T). En función de la anterior definición, un ciclo termodinámico debe describir un diagrama o circuito cerrado; sin embargo, existen determinados procesos industriales mal llamados ciclos abiertos, en los cuales el fluido no retorna a su situación termodinámica inicial.

1. Ciclo **Rankine**: típicamente, la forma más habitual de generar energía eléctrica a partir de procesos térmicos, ha sido el empleo de la turbina de vapor de agua en las llamadas plantas de potencia de vapor ([Helvaci H.U. y Khan Z.A., 2017](#)). Básicamente, el proceso consiste en producir vapor de agua en una caldera a alta presión donde una fuente térmica de calor aporta la energía precisa para transformar en agua en estado líquido en agua en estado gaseoso a alta presión y temperatura. Seguidamente se pasa a la expansión adiabática del vapor sobrecalentado hasta baja presión, menor incluso que la atmosférica, mediante una turbina que emplea el trabajo mecánico de rotación conseguido gracias al vapor, en producir energía eléctrica gracias a un alternador solidario a la turbina mediante un eje que los une. Precisamente el campo solar sustituye a la caldera en este tipo de ciclo. El origen del nombre de este ciclo, proviene en honor del físico e ingeniero británico *William Rankine* (1820-1872) y su representación en un diagrama $\ln P$ - h queda trazado en la figura siguiente.

Figura 2.17. Descriptiva y trazado del ciclo Rankine (fuente: Wiley)

El fluido, tras salir de la turbina, pasa al condensador, dispositivo que recibe este nombre porque genera la condensación del vapor en agua líquida mediante el enfriamiento del fluido por una corriente de agua externa. Procedente de este condensador, el fluido pasa a la fuente térmica (que será caldera o energía termosolar en nuestro caso) debido a la acción de una bomba que incrementa su presión hasta la de trabajo. Las cuatro etapas son:

- i. Compresión isentrópica: el líquido saturado proveniente del condensador es bombeado a la fuente térmica.
- ii. Calentamiento isóbarico: el fluido es calentado en la fuente térmica a presión constante y su temperatura va aumentando hasta llegar a la línea de líquido saturado.
- iii. Expansión isentrópica: el vapor se expande a entropía constante en la turbina.
- iv. Condensación isóbara e isoterma: a la salida de la turbina el fluido es condensado a presión constante.

Realmente, ninguna de estas cuatro etapas es ideal pero donde más irreversibilidades se presentan son paradójicamente en los procesos teóricamente isentrópicos. Aunque posteriormente se estudiará con más detalle, las tecnologías termosolares que funcionan bajo estos ciclos son las centrales **cilindro-parabólicas** y las de reflector lineal **Fresnel**.

Una de las formas de **incrementar** el rendimiento de un ciclo de *Rankine* se denomina sobrecalentamiento y consiste en aumentar la temperatura con la que entra el vapor en la turbina (mayor a la del vapor a la presión de saturación). Este proceso aumenta la eficiencia del ciclo puesto que incrementa la temperatura promedio a la cual el ciclo recibe energía térmica. Otra forma de conseguir el mismo resultado es aumentar la presión de trabajo, circunstancia que sin embargo repercute negativamente en forma de costes iniciales del montaje y que disminuye la calidad del vapor de agua saliente de la turbina, con lo cual se tiende a precipitar gotas de agua en estado sólido en los álabes de la turbina y a producir una importante erosión en las mismas (cavitación). Para evitar este inconveniente pero seguir aprovechando las ventajas de conseguir una temperatura promedio de intercambio térmico elevada, se ha conseguido desarrollar el llamado ciclo de recalentamiento. Mediante esta técnica, el vapor no se expande por completo en una única etapa hasta la presión del condensador, sino que tras expandirse parcialmente, el vapor se extrae de la turbina y se recalienta a presión constante, devolviéndose a la turbina para su posterior expansión hasta la presión final de salida. Una tercera forma de incrementar el rendimiento del ciclo de *Rankine* y así mejorar la potencia eléctrica producida, es el denominado ciclo regenerativo el cual consiste básicamente en la extracción de vapor de distintos puntos de la turbina para así precalentar el agua a la salida del condensador tras un primer bombeo.

2. Ciclo **Stirling**: a principios del año 1800, el reverendo británico Robert Stirling estudiaba una máquina térmica que tratase de evitar los habituales accidentes producidos por la máquina de vapor, de forma que en 1816 “se encontró” con un hallazgo inédito y consiguió patentar el denominado motor de aire caliente. Con ello no sólo consiguió mejorar las condiciones de seguridad de los motores de la época, sino que concibió otro más eficiente hasta el punto de que fue incrementando comercialmente su cuota de mercado y originó un estándar para describir todos los motores de gas de ciclo cerrado y regenerativos: el motor Stirling ([Hafez A.Z. et al., 2016](#)).

Dicho motor es propulsado por el proceso de expansión del gas cuando éste se calienta, seguido de una compresión del mismo cuando se enfría. El motor contiene una cantidad de gas fija que trasiega constantemente entre la parte fría y la caliente, gracias a una fuente térmica exterior. Desde el punto de vista termodinámico, el ciclo Stirling es un ciclo cerrado formado por dos procesos isotermos (a temperatura constante) y dos isócoros (a volumen constante).

- i. Compresión isoterma: el gas de trabajo se comprime a temperatura constante, expulsándose el calor hacia la fuente fría.
- ii. Compresión isócara: el gas se calienta a volumen constante sufriendo de esta forma un aumento de presión, con pérdida adicional de calor.
- iii. Expansión isoterma: el gas de trabajo experimenta una expansión a temperatura constante a través de una ganancia térmica de la fuente a alta temperatura.
- iv. Expansión isócara: enfriamiento del gas desde temperatura de alta a temperatura de baja a volumen constante, a pesar de recibir calor, con bajada de presión.

Figura 2.18. Descriptiva y trazado del ciclo Stirling (fuente: Wiley)

La primera aplicación solar de este ciclo fue realizada por el ingeniero sueco **John Ericsson**, el cual comercializó 2.000 motores en 1.850; desgraciadamente, los mejores rendimientos de motores de combustión interna alternativos bajo ciclo de Otto (gasolina) y Diesel (gasóleo) provocaron que el motor Stirling perdiese protagonismo durante el siglo XX, el cual empieza a recuperar hoy día con los llamados discos solares Stirling. Las ventajas de este ciclo con respecto a otros son:

- La eficiencia teórica del ciclo es la misma que la del ciclo de *Carnot*, máxima eficiencia teórica termodinámicamente hablando, entre dos fuentes térmicas.
- El ciclo constituye un motor de combustión externa y por lo tanto, puede emplear cualquier fuente térmica, incluida, por supuesto, la energía solar.
- Describe un ciclo cerrado, con lo cual utiliza la misma sustancia tras cada ciclo, pudiendo utilizarse un regenerador para intercambio térmico.
- No requiere válvulas de admisión o escape, a diferencia de los ciclos Otto y Diesel. Es un motor de combustión continua, lo cual reporta importantes ventajas en el diseño de sistemas industriales de combustión.

3. Ciclo **Brayton**: la llamada turbina de gas, está íntimamente ligada a la mejora de las tecnologías solares de captación en concentración, las cuales permiten una mayor temperatura de trabajo del receptor y por ende, de todo el sistema ([Malali P.D. et al., 2017](#)). En esta turbina comparten protagonismo varios dispositivos en todos los procesos del ciclo termodinámico, de forma que el proceso completo implica las siguientes fases:
- Inicialmente el aire se comprime de forma adiabática (con transmisión de calor nulo) en un compresor centrífugo o axial.
 - Posteriormente se hace pasar a la cámara (llamada cámara de combustión en las centrales de ciclo combinado) donde se realiza un calentamiento isóbaro.
 - Finalmente, se expande el gas caliente en una turbina, la cual se enlaza a un alternador, para así producir energía eléctrica.

Figura 2.19. Descriptiva y trazado del ciclo Brayton (fuente: Wiley)

El pionero en desarrollar este ciclo, fue el ingeniero estadounidense George *Brayton*, quien construyó y comercializó turbinas de gas. En la inmensa mayoría de las mismas existentes actualmente, este calentamiento tiene lugar a través de la combustión de algún tipo de combustible (queroseno, gas natural...) dentro de la propia cámara, de manera que en el proceso final se expanden en la turbina de gas los gases resultantes del proceso de combustión, describiendo de esta forma un ciclo abierto. Sin embargo, tal y como se ha comentado, en las aplicaciones solares que funcionan bajo este ciclo, el calentamiento tras la compresión tiene lugar en el receptor presurizado de la central y dado que no hay producto de combustión alguno, se puede desarrollar un ciclo cerrado mediante una etapa de regeneración. Dicho lo cual, a modo de resumen, se puede concluir que las cuatro etapas internamente reversibles que conforman el ciclo mejorado del ciclo originario de Brayton son: compresión adiabática isentrópica, ganancia de calor isóbaro, expansión adiabática isentrópica y cesión de calor isóbaro. Las instalaciones termosolares de torre **central** con helióstatos, describen un ciclo Brayton.

2.7 Tecnologías de baja, media y alta temperatura: factor de concentración

Las tecnologías termosolares de producción de energía eléctrica, se han revelado como una de las formas renovables de producción energética más eficientes y **rentables** económicamente; esto es, tanto la magnitud de la energía producida (del orden de varias decenas o centenares de MW), la eficiencia termodinámica conseguida, así como los contenidos costes de producción, las convierten en alternativas reales para producir energía eléctrica para el futuro. Tal y como se ha anticipado ya, las centrales de energía solar termoeléctrica producen electricidad de la misma manera que las centrales de potencia “convencional”, a excepción de que en las primeras una parte muy importante de la energía térmica se obtiene de la concentración de la radiación solar, la cual se transforma en vapor o gas a alta presión y temperatura. Básicamente, las plantas de energía solar termoeléctrica, llamadas también sistemas termosolares de concentración o STC, constan de cuatro componentes clave: el sistema de concentración, el sistema receptor, el subconjunto almacenamiento-transporte y por último, el convertidor de potencia térmica en electricidad. Combinando de diferentes formas estos componentes anteriores, así como hibridando en algunos casos con otros tipos de tecnologías, renovables o no, se obtienen todos los sistemas termosolares existentes hasta ahora. De forma breve, el objetivo de cada uno de estos subsistemas es el que se explica seguidamente:

- **Concentrador:** es el sistema óptico que recibe, concentra y dirige la radiación solar sobre el receptor. Según lo visto hasta ahora, se hablará de colectores cilindro-parabólicos, de disco, de torre central y lineales de Fresnel.
- **Receptor:** es el elemento del sistema en el cual la radiación redirigida del concentrador, se absorbe y se convierte en otro tipo de energía.
- **Almacenamiento-transporte:** componentes que permite almacenar la energía captada y transformada por el STC, en formato de energía térmica, y distribuirla a otras partes de la instalación donde serán posteriormente transformadas
- **Conversión de potencia:** conjunto de dispositivos que permiten transformar la energía térmica en energía eléctrica (habitualmente).

En función de lo visto, todos los procesos de transformación de la energía térmica del Sol en energía calorífica, conducen a tres **tipos** de tecnologías termosolares, en función de la temperatura de obtención del fluido caloportador justo tras ser concentrado y enviado al receptor:

1. Energía solar de **baja temperatura** (35-150°C): realmente se incluirían en este bloque todas aquellas aplicaciones ya maduras y propias de la energía solar térmica (producción de ACS, apoyo a calefacción, climatización de piscinas y refrigeración por absorción) generada con captadores sin concentración tales como colectores sin cubierta o de placa plana; o de pequeño nivel de concentración, como captadores de tubos de vacío o incluso a pequeños colectores cilindro-parabólicos, que se podrían

considerar “hermanos pequeños” de los grandes colectores empleados en grandes instalaciones termosolares. Estos dos últimos, empleados en ocasiones para aplicaciones industriales de la energía solar térmica un poco más exigentes en términos de la temperatura final conseguida o incluso del estado de agregación del fluido caloportador (vapor de agua).

2. Energía solar de **media temperatura** (150-400°C): en este escalón de temperatura final, se busca un fin netamente industrial (producción de energía eléctrica) y requiere un nivel de concentración bajo-medio. Este rango de temperaturas se consigue básicamente con los captadores cilindro-parabólicos y reflectores lineales de Fresnel, tecnologías relativamente maduras y con plantas de producción comercial ya existentes en el mundo.
3. Energía solar de **alta temperatura** (400-2.000°C): llegados a este elevado nivel de temperatura, se entiende que las aplicaciones son muy exigentes. Se trata de producción de energía eléctrica y construcción de hornos solares, y requiere de un altísimo nivel de concentración. Precisa de las tecnologías de disco Stirling y de torre central, técnicas ambas en fase comercial de I+D+i en sus primeras etapas, pero con prometedor presente y futuro.

Se habrá constatado que se ha hablado ya en varias ocasiones del concepto concentración de la radiación solar. Aunque parece intuitiva la razón por la cual es interesante focalizar la irradiación que se recibe del Sol en un punto lo más pequeño posible, es interesante explicar brevemente la razón de la búsqueda de la concentración de la radiación solar. Para ello, primeramente es necesario definir el concepto **temperatura de equilibrio radiante** ([Duffie y Beckman, 1991](#)) : es la máxima temperatura que puede alcanzar una placa absorbente de un captador solar (en general de cualquier superficie), una vez que se llega a un equilibrio entre la energía que llega a la placa absorbente por radiación ($\alpha \cdot G \cdot \cos\theta$) y la que emite al ambiente que le rodea como consecuencia de su temperatura y en ausencia de convección ($\varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$). Matemáticamente dicha temperatura de equilibrio radiante se consigue simplemente despejando de la igualdad que equipara las expresiones matemáticas anexas, hasta desembocar en la ecuación que se muestra seguidamente.

$$T = \left(\frac{\alpha}{\varepsilon} \cdot \frac{G \cdot \cos\theta}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

donde:

T: temperatura de equilibrio radiante, en K

α : absortancia de la superficie, adimensional

ε : emitancia de la superficie, adimensional

G: irradiancia, en W/m²

θ : ángulo de incidencia respecto horizontal, en rad

σ : constante de Stefan-Boltzmann = $5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m²·K⁴

Conforme la anterior expresión, para aumentar el valor de la temperatura de equilibrio radiante y lograr condiciones de aprovechamiento térmico de alta calidad (alta **exergía**) se actúa sobre la irradiación recibida del Sol mediante la técnica de concentrar la radiación solar directa. Para lograrlo se emplean determinadas superficies de reflexión a modo de espejos, que concentran toda la radiación sobre un punto focal, que con la tecnología actual se resumen en tres tipos básicos:

- Helióstatos o superficies cuasi-planas de reflexión.
- Superficies cilindro-parabólicas.
- Superficies paraboloideas.

De esta forma se define matemáticamente la conocida como relación de concentración superficial o **factor de concentración solar** ([Li Q. et al., 2016](#)) como el cociente entre el área de apertura del concentrador (superficie plana proyectada sobre la perpendicular al flujo de radiación) respecto al área del propio receptor (superficie desarrollada de la figura geométrica espacial que describe dicho receptor) como refleja la ecuación anexa y se aprecia gráficamente en la figura auxiliar.

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (3)$$

donde:

C: factor de concentración solar, adimensional

A_a : área de apertura del concentrador, en m^2

A_r : área del receptor, en m^2

Figura 2.20. Parámetros relevantes del factor de concentración (fuente: ETSII UPM)

Siguiendo un razonamiento análogo al seguido para el captador de placa plana, la temperatura máxima de equilibrio radiante para una superficie captadora con concentración, viene dada por la ecuación que se muestra:

$$T = \left(\frac{\alpha_{ef}}{\varepsilon_{ef}} \cdot \frac{G \cdot C}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

donde:

α_{ef} : absorptancia efectiva de la superficie, adimensional

ε_{ef} : emitancia efectiva de la superficie, adimensional

Este factor de concentración C se ve limitado por dos condicionantes físicos insoslayables, como son los que seguidamente se indican:

- Limitación termodinámica: el Sol se comporta como cuerpo negro a 5.780 K en su superficie, con lo cual no es factible superar dicha temperatura.
- Limitación geométrica: el Sol no es una fuente luminosa puntual, sino que puede modelizarse como un disco de ángulo sólido que subtiende un ángulo $\theta = 32'$, lo cual también restringe las condiciones del punto focal.

Pues bien, para concentradores **bidimensionales** (colectores cilindro-parabólicos) con un foco lineal, el factor de concentración máximo vendrá dado geoméricamente por la ecuación que sigue:

$$C_{max}^{2D} = \left(\frac{A_a}{A_r} \right)^{2D} = \frac{1}{\sin \theta_s} \approx 212 \quad (5)$$

Y de la misma forma, para concentradores **tridimensionales** (colectores de disco paraboloidal, campo de helióstatos) con un foco puntual, el factor de concentración máximo vendrá dado por la expresión que se muestra a continuación.

$$C_{max}^{3D} = \left(\frac{A_a}{A_r} \right)^{3D} = \frac{1}{\sin \theta_s} \approx 45.000 \quad (6)$$

2.8 Geometría de la captación termosolar: cónicas y cuádricas

De entre toda la inmensa gama de curvas notables que la Geometría muestra, existe una familia que tienen especial interés desde el punto de vista de la energía termosolar: las **cónicas** ([Criado C. y Alamo N, 1999](#)). En efecto, se denomina sección cónica a la curva intersección de un cono de revolución con un plano que no pasa por su vértice. La primera definición de sección cónica aparece en Grecia en el año 350, donde el matemático Apolonio de Perge da como nombres para estas secciones, los de hipérbola, parábola y elipse, a las cuales bastaría añadir la circunferencia para obtener todos los miembros de la familia de cónicas. Hoy día, la moderna Geometría Analítica y Proyectiva Plana puede dar determinadas definiciones y asignar ecuaciones matemáticas para cada una de ellas. Existen infinidad de manifestaciones de las cónicas en la naturaleza y en los dispositivos y utensilios fabricados por el hombre desde sus orígenes: las trayectorias seguidas por los cuerpos celestes son siempre cónicas (sin ir más lejos, el movimiento de rotación de la Tierra en torno al Sol es una elipse, mientras que el de cometas y asteroides son hipérbolas o parábolas); la rueda y los volantes son circunferencias...

A su vez, de entre estas cuatro curvas, existe una que es especialmente interesante para el objeto de esta Tesis: la **parábola** (*παράβολα* en griego clásico). Se define como el lugar geométrico de los puntos de plano que equidistan de un punto fijo llamado foco y una recta llamada directriz. Más interesante que su mera definición geométrico-matemática, cabe destacar una propiedad importantísima de la misma, que el propio Apolonio precisamente menciona: un espejo parabólico refleja de forma paralela los rayos emitidos desde su foco. Es decir, cualquier rayo que discurra paralelo al eje de simetría de la parábola e intersecte con la misma, debe pasar por su foco. Esta formidable propiedad es consecuencia del hecho de que la tangente refleja los rayos paralelos al eje de la parábola en dirección al foco.

Figura 2.21. Propiedad notable de la parábola (fuente: Wikipedia)

Supóngase ahora que se elige una parábola cualquiera y se la hace girar respecto a su eje de simetría Y: se obtiene entonces una superficie tridimensional perteneciente a la familia de las cuádricas, que en Geometría Analítica se denomina **paraboloide de revolución** ([Kim D-S. y Kim Y.H, 2012](#)) como caso particular del paraboloide elíptico del espacio tridimensional. De entre sus propiedades, la más característica de nuevo es que conserva la misma propiedad de la parábola en cuanto a la reflectividad sobre el foco de cualquier rayo paralelo a su eje de simetría (no podía ser de otra forma, el paraboloide “nace” tras hacer girar una parábola).

Figura 2.22. Paraboloide de revolución (fuente: Wikipedia)

¿Por qué se presta tanta atención a este tipo de curvas y superficies? La respuesta es muy sencilla: las aplicaciones **prácticas** que emanan de esta característica matemática son muchas, ya sea el foco el emisor o el receptor de la señal. Así por ejemplo, una fuente de luz emisora situada en el foco, enviará un haz de rayos paralelos al eje tal y como ocurre con infinitud de lámparas, focos y faros que poseen espejos con superficies parabólicas reflectantes para poder enviar haces de luz paralelos emanados de una fuente en posición focal. Los rayos convergen o divergen si el emisor se desplaza de la posición focal. Y por contra, las antenas parabólicas de señal de televisión; los radiotelescopios de seguimiento de satélites geoestacionarios; las llamadas vulgarmente cocinas solares y por supuesto los captadores cilindro-parabólicos y los de disco tipo paraboloide, fundamentan su principio de funcionamiento en este hecho.

Aunque *de facto* el conocimiento de cada una de estas **tecnologías** termosolares de concentración ya se ha ido anticipando en parte durante el presente capítulo de la Tesis, ahora ya se está en disposición de detallar las características de las mismas sobre todo tras haber estudiado con más detalle los ciclos termodinámicos bajo los que trabajan; sus coeficientes de concentración; y las características geométricas de las curvas y superficies reflectoras que implementa. A continuación, se pormenorizan cada una de ellas:

1. Captadores **cilindro-parabólicos** (CCP): de las cuatro tecnologías termoeléctricas disponibles actualmente, las plantas que disponen de este tipo de colector son las que actualmente tienen mayor experiencia desde el punto de vista de su explotación comercial ([Rostamzadeh H. et al., 2017](#)). En este sentido, en nuestro país la llamada planta DCS (*Distributed Collector System*) que el CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas) tiene en la Plataforma Solar de Almería, es pionera en el empleo de los CCP en instalaciones de energía solar termoeléctrica. A nivel mundial, la instalación de aprendizaje de conocimiento de esta tecnología inequívocamente se encuentra en las nueve plantas termosolares tipo SEGS (*Solar Electricity Generation System*) ubicadas en el desierto de Mojave ([Mahoney A.R. y Price H., 2002](#)), California (EE.UU.). Cuenta con una superficie instalada que supera los 2,5 millones de m² de captadores cilindro-parabólicos, con potencias crecientes comprendidas entre 14 y 80 MW y cuyo sumatorio de potencias asciende a 354 MW (para que el alumno comprenda el orden de magnitud que se maneja en estas cifras, se podría decir que esta cuantía supera 1/3 de la potencia total de una central nuclear de última generación).

Figura 2.23. Diseño 3D y colector cilindro-parabólico (fuente: GrabCAD y CIEMAT)

La construcción de las primeras plantas termosolares basadas en esta tecnología tuvo lugar entre 1984 a 1991, años tras los cuales se fue consiguiendo paulatinamente reducciones muy importantes del coste de producción de la energía eléctrica generada, desde los 24 c\$/kW·h hasta los 8 c\$/kW·h. Este formidable empeño industrial de capital privado, fue incentivado mediante determinadas políticas de ayudas públicas y aunque fue un éxito rotundo desde el punto de vista comercial y de adquisición de conocimiento técnico (*know-how*), desgraciada e injustamente la empresa explotadora quebró en 1991 debido a una drástica bajada del precio del barril de petróleo y por la retirada de subvenciones estatales. Afortunadamente, hoy en día estas plantas están de nuevo operativas y generando electricidad limpia. Como ya es sabido, en la tecnología CCP, el campo solar está compuesto por filas paralelas de colectores cilindro-parabólicos en serie que captan, concentran y transforman la radiación solar directa en energía térmica que entregan a un **fluido** que discurre por el interior del tubo ubicado en el foco de la parábola que describe el captador.

Dicho fluido caloportador es un aceite sintético específico que es enviado a un intercambiador de calor aceite/agua, donde ésta última se transforma en vapor sobrecalentado preciso para hacer girar una turbina. Esta turbina lleva solidario un alternador que genera corriente eléctrica, todo este proceso mediante el conocido ciclo de *Rankine*. Las plantas SEGS no disponen de sistema de almacenamiento alguno, puesto que fueron diseñadas y construidas para trabajar híbridadas con otra fuente energética, en este caso, calderas auxiliares de gas natural, para aportar energía en momentos en los cuales el Sol no fuese capaz de hacerlo (períodos nublados o de noche). Entre las indiscutibles **ventajas** de los captadores CCP, se pueden enumeran:

- Se dispone de un conocimiento de esta tecnología equivalente a varios miles de GW·h de energía eléctrica producida durante los últimos años en las plantas ya disponibles.
- El proceso de hibridación con otras fuentes de energía es sencillo (gas natural, biomasa, biogás) y probado, pudiendo incluso ser combinado con cogeneración o trigeneración.
- La disponibilidad de potencia entregada se cifra en torno al 95%.
- Sus componentes son modulares y fácilmente fabricables en serie.
- Las maniobras de control y regulación son sencillas de implementar.

Sin embargo, entre los **inconvenientes** también existentes, se pueden citar:

- La máxima temperatura de operación está restringida a 400°C.
- Su eficiencia de conversión termodinámica es relativamente baja.
- La perfilera de anclaje de los captadores debe ser muy estable.
- El lazo primario térmico tiene una excesiva inercia térmica.
- El seguimiento en un eje conlleva elevadas pérdidas geométricas.
- Son precisas habituales tareas de mantenimiento y limpieza de los reflectores, para garantizar el ángulo de reflexión buscado hacia el foco de la parábola.

De forma resumida, se concluye que en los captadores cilindro-parabólicos el concentrador es un espejo cilíndrico cuya sección transversal es una parábola. El receptor es lineal, a lo largo del eje del antedicho cilindro. Las razones de concentración se cifran entre 30-90. Los flujos de radiación sobre el absorbente oscilan entre 40-60 kW/m². Y por último, las temperaturas máximas obtenidas alcanzan los 400 °C.

2. Reflectores lineales de **Fresnel** (CLFR): en Australia (en concreto, en Queensland) surgió el primer desarrollo de un nuevo tipo de concentrador lineal basado en lentes de *Fresnel* ([Beltagy H. et al., 2017](#)), a imagen y semejanza de desarrollos parecidos para energía solar fotovoltaica de concentración. Este tipo de solución consta de varias hileras de reflectores planos lineales que reciben y reflejan la radiación solar hacia receptores de forma lineal y dotados de lentes de *Fresnel*, ubicados sobre estructuras metálicas a una altura estudiada geométricamente. Esta tecnología, conocida en lengua inglesa como CLFR (*Compact Linear Fresnel Reflector*) basa su principio de funcionamiento precisamente en las ya estudiadas lentes de *Fresnel*. En efecto, este tipo de lente se han revelado como la solución más adecuada por la concentración fotovoltaica (CPV) y ahora también como solución alternativa adicional a la concentración solar térmica (CST). Augustin-Jean *Fresnel* (1788-1827) fue un ingeniero francés especializado en Óptica. Recibió diversos premios a lo largo de su vida, amén de entrar a formar parte como miembro en la *Académie des Sciences* de París y en la *Royal Society of London*. El gobierno francés le encargó el Departamento de Faros marítimos y él sustituyó los espejos del faro por la lente que lleva su nombre. Básicamente, consiste en una serie de anillos concéntricos de lentes segmentadas y de una distancia focal corta. Esta lente está constituida por unos prismas, distintos unos de otros, que refractan la luz recibida. Además, es factible construir la lente con menos masa y volumen, pero a expensas de la calidad de la imagen obtenida.

Figura 2.24. Diseño 3D y colector Fresnel (fuente: GrabCAD y CIEMAT)

En su día, el hecho de aplicar la lente al faro marítimo fue todo un éxito, ya que el mismo necesitaba una lente de 1 m de diámetro lo cual suponía un peso y coste prohibitivos. Sin embargo, la lente de *Fresnel* se pudo moldear cómodamente con plástico transparente y hoy día se pueden obtener incluso de policarbonato. La aplicación actual de este dispositivo no sólo radica en reflectores y refractores tipo *Fresnel* para energía termosolar, sino también en proyectores de cine y TV, retroproyectores de diapositivas, señales de tráfico, faros de automóviles, etc. Actualmente ya diseñadas e instaladas a nivel mundial plantas de 25 MW de potencia eléctrica en una turbina centralizada, que funcionan bajo esta tecnología. Ejemplo de ello es la instalación en Nueva Gales del Sur (produce vapor a unos 265°C y 50 bar de presión) o Puerto Errado en España.

3. Discos parabólicos ([Mendoza L.S. et al., 2017](#)), discos **Stirling** o discos paraboloidales: tuvieron un importante auge a principios de los años 70 gracias a los esfuerzos de las compañías estadounidenses *Avanco Corporation* y *McDonnell Aerospace Corporation*. Este trabajo fructificó a principios de los 90 donde la empresa *Cummins Engine Company* trató de diseñar, fabricar y comercializar un disco basado en motor Stirling de pistón libre: desgraciadamente, el proyecto no cristalizó por problemas de índole técnica. Sin embargo, en los últimos años ha habido un importante renacer de esta tecnología, como lo demuestran varios de los proyectos que se reseñan, con rendimientos más altos obtenidos en centrales termosolares:

Figura 2.25. Diseño 3D y colector paraboloidal (fuente: GrabCAD y CIEMAT)

- Seis discos de 10kW de potencia eléctrica ubicados en la Plataforma Solar de Almería (PSA) basados en tecnología de membrana. Han sido promovidos por *Schaich Bertgmann* y acumulan varias decenas de miles de horas de funcionamiento, atesorando de esta forma un valiosísimo bagaje para estimar sus posibilidades reales de funcionamiento y explotación a nivel comercial.
- Instalación de varios discos a finales de los 90 en el desierto de Mojave (EE.UU.) por parte de la Compañía de Servicios Públicos de Arizona. Actualmente se están realizando estudios con el objetivo de producir discos de potencia unitaria de 1 MW.
- Hoy en día nuevamente el gobierno australiano está apoyando económicamente una central de potencia total de 2,6 MW, usando 18 concentradores llamados *big dish* de potencia unitaria 50 kW y que llega a presentar máximos de eficiencia de hasta el 37%.

A modo de resumen, se concluye que en este tipo de tecnología el concentrador es una paraboloide de revolución y siendo la razón de concentración superior a 3.000, los flujos de radiación ($300\text{--}1.000\text{ kW/m}^2$) y las temperatura alcanzadas ($650\text{--}800^\circ\text{C}$) son altísimas.

4. Torre **central** de helióstatos ([Thalange V.C. et al., 2017](#)): las plantas llamadas central de torre constan principalmente de un gran campo de espejos con seguimiento solar bidimensional (llamados helióstatos) capaces de proyectar luz solar sobre un único receptor central situado sobre una torre sobre-elevada. A día de hoy, se han probado distintos conceptos de absorbente funcionando bajo este principio, que en función del tipo de fluido a emplear se pueden resumir en: receptor tubular que genere directamente vapor de agua o de sales fundidas y receptor volumétrico de aire. Análogamente, en lo referente a las direcciones espaciales en las cuales los rayos solares reflejados inciden sobre la torre central, se han probado diferentes tecnologías tales como torre hemidireccional (los helióstatos sólo se ubican barriendo un ángulo aproximado de 180°) u omnidireccional (tales helióstatos se colocan dispuestos en un ángulo de barrido de 360°).

Figura 2.26. Diseño 3D y planta de torre central (fuente: GrabCAD y CIEMAT)

Aquellos sistemas que emplean aire como fluido caloportador de trabajo, consiguen temperaturas de hasta 800°C , incrementando de esta forma el ciclo termodinámico descrito. Adicionalmente, de una parte, se pueden incorporar sistemas de **almacenamiento** térmico ([Prieto C. et al., 2016](#)) mediante sales fundidas para minorar las fluctuaciones de la radiación solar (debido a nubosidad) y poder mantener así un ritmo de producción eléctrico eficiente. De otra parte, se plantea también la posibilidad de hibridar la planta solar con otro tipo de aporte energético, como por ejemplo, la combustión de gas natural, biomasa u otro combustible. De esta forma, se consiguen potencias eléctricas en este tipo de plantas entre 30-160 MW. A finales de los 70 se construyeron hasta ocho centrales solares de tipo torre, con potencias comprendidas entre 0,5-10 MW y con fines únicamente experimentales. Tras los ensayos obtenidos, se pudieron obtener determinadas conclusiones.

Si bien es cierto que se demostró la **viabilidad técnica** del proceso para la producción de energía eléctrica, los órdenes de magnitud conseguidos fueron tal vez demasiado pequeños. Esto es, los rendimientos obtenidos fueron menores de los previstos y los costes mayores de los presupuestados. Por esta circunstancia, todas las centrales existentes fueron desmanteladas excepto la SSPS-CRS, la CESA-1 y MSEE que siguen operando como centros de ensayo; así como la SOLAR ONE que tras un proceso de conversión con empleo de sales fundidas en lugar de vapor, ha pasado a llamarse SOLAR TWO. Sin embargo, a pesar del hecho de que las centrales de torre pueden representar mayor riesgos que las centrales de colectores cilindro-parabólicos, debido entre otros factores a las mayores temperaturas alcanzadas (que ascienden hasta 2.000°C en algunos casos), actualmente existen varios proyectos de esta índole que ya son *de facto* plantas comerciales. De entre todos ellos, especial relevancia cobra el denominado proyecto *Solgate* que incorpora una planta de ciclo combinado solar, de forma tal que la captación se realiza a través de un receptor volumétrico de aire a presión que se emplea para alimentar una turbina *Brayton* como parte del ciclo termodinámico superior. A su vez, la salida de la turbina de gas a media temperatura se emplea como fuente de entrada de calor para un segundo ciclo térmico correspondiente a una turbina de vapor. Y por terminar esta rápida enumeración, es menester añadir la española planta Gemasolar del consorcio *Torresol Energy*, sita en la sevillana ciudad de Fuentes de Andalucía ([Relloso S. y García E., 2015](#)).

Por último, y teniendo en cuenta precisamente las plantas de torre central de I+D existentes precisamente y también en nuestro país, es menester tener en cuenta los desarrollos llevados a cabo en la Plataforma Solar de Almería (PSA), entre los cuales se podrían destacar los siguientes:

- Receptores cerámicos para ciclos de aire cerrado y presurizado a alta temperatura.
- Receptores de generación directa de vapor de agua, o bien mediante el empleo de ciclos supercríticos (cambios de fase muy suaves) o a través del estudio de flujos bifásicos en calderas.

Por último, a modo de resumen, se pueden citar las siguientes **ventajas** de las plantas de torre central con heliostatos:

- Elevadas eficiencias energéticas.
- Altas temperaturas de trabajo.
- Posibilidad de hibridar las instalaciones solares con otros combustibles.
- Modularidad de todos los heliostatos con alto potencial de producción en serie.
- Técnicas y estrategias de regulación y control muy sencillas.

Y análogamente, entre las ineludibles **desventajas**, se pueden citar:

- Altas pérdidas energéticas.
- Bajos rendimientos de producción eléctrica.
- Necesidad de soportes y mecanismos de seguimiento robustos y estables.
- Necesidad de operaciones de mantenimiento periódicas habituales, tales como limpieza exhaustiva y concienzuda.

BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 2

- [1]. Bayrak F.; Abu-Hamdeh N.; A. Alnefaie K.; F. Öztop H. A review on exergy analysis of solar electricity production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 74, July 2017, pp. 755-770.
- [2]. Brady L.; Abdellatif M.; Assessment of energy consumption in existing buildings. *Energy and Buildings*, Volume 149, 15 August 2017, pp. 142-150.
- [3]. Shahbaz M.; Sarwar S.; Chen W.; Nasir M. M. Dynamics of electricity consumption, oil price and economic growth: Global perspective. *Energy Policy*, Volume 108, September 2017, pp. 256-270.
- [4]. Luz-Sant'Ana I.; Román-Román P.; Torres-Ruiz F.; Modeling oil production and its peak by means of a stochastic diffusion process based on the Hubbert curve. *Energy*, Volume 133, 15 August 2017, pp. 455-470.
- [5]. Enríquez-de-Salamanca A.; Díaz-Sierra R.; Martín-Aranda R.M.; Santos M.J. Environmental impacts of climate change adaptation. *Environmental Impact Assessment Review*, Volume 64, May 2017, pp. 87-96.
- [6]. Bakhshipour Z.; Asadi A.; B.K. Huat B.B.K.; Sridharan A.; Kawasaki S. Effect of acid rain on geotechnical properties of residual soils. *Soils and Foundations*, Volume 56, Issue 6, December 2016, pp. 1008-1020.
- [7]. Akitt J.W. Some observations on the greenhouse effect at the Earth's surface: Reflection of energy near the earth's surface: A bounded random walk approach. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, In press, accepted manuscript, Available online 5 July 2017.
- [8]. Zhang L.; Dzakpasu M.; Chen R.; Wang X.C. Validity and utility of ecological footprint accounting: A state-of-the-art review. *Sustainable Cities and Society*, Volume 32, July 2017, pp. 411-416.
- [9]. Almer C.; Winkler R. Analyzing the effectiveness of international environmental policies: The case of the Kyoto Protocol. *Journal of Environmental Economics and Management*, Volume 82, March 2017, pp. 125-151.
- [10]. Böhringer C; Rutherford T.F.; Tol R.S.J. The EU 20/20/2020 targets: An overview of the EMF22 assessment. *Energy Economics*, Volume 31, Supplement 2, December 2009, pp. s268-s273.
- [11]. Kaliyavaradhan S.K.; Ling T-C. Potential of CO₂ sequestration through construction and demolition (C&D) waste—An overview. *Journal of CO₂ Utilization*, Volume 20, July 2017, pp. 234-242.
- [12]. Lacal-Arantequi R.; Jäger-Waldau A. Photovoltaics and wind status in the European Union after the Paris Agreement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, In press, corrected proof, Available online 30 June 2017.

-
- [13]. Landrum A.R.; Lull R.B.; Akin H.; Hasell A.; Jamieson K.H. Processing the papal encyclical through perceptual filters: Pope Francis, identity-protective cognition, and climate change concern. *Cognition*, Volume 166, September 2017, pp. 1-12.
- [14]. Zou C.; Zhao Q.; Zhang G.; Xiong B. Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era. *Natural Gas Industry B*, Volume 3, Issue 1, January 2016, pp. 1-11.
- [15]. García X.; Domínguez J.; Linares P.; López O. Renovables 2050. Un informe sobre el potencial de las energías renovables en la España peninsular. Instituto de Investigaciones Tecnológicas, Universidad Pontificia Comillas. Madrid. España. Julio 2005.
- [16]. Bukarica V.; Tomšić Ž. Energy efficiency policy evaluation by moving from techno-economic towards whole society perspective on energy efficiency market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 70, April 2017, pp. 968-975.
- [17]. Ceccarelli M. Contributions of Archimedes on mechanics and design of mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*, Volume 72, February 2014, pp. 86-93.
- [18]. Lieb J.W. Leonardo da Vinci—Natural philosopher and engineer. *Journal of the Franklin Institute*, Volume 191, Issue 6, June 1921, pp. 767-806.
- [19]. Anderson W.W.; Chai Y.G. Becquerel effect solar cell. *Energy Conversion*, Volume 15, Issues 3–4, 1976, pp. 85-94.
- [20]. Manor A.; Katz E.A. Open-circuit voltage of organic photovoltaics: Implications of the generalized Einstein relation for disordered semiconductors. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 97, February 2012, pp. 132-138.
- [21]. S.E. Wright. A generalized and explicit conceptual statement of the principle of the second law of thermodynamics. *International Journal of Engineering Science*, Volume 111, February 2017, pp. 12-18.
- [22]. Canturk B.; Oikonomou T.; Bagci B.G. Group theory, entropy and the third law of thermodynamics. *Annals of Physics*, Volume 377, February 2017, pp. 62-70.
- [23]. Helvacı H.U.; Khan Z.A. Thermodynamic modelling and analysis of a solar organic Rankine cycle employing thermofluids. *Energy Conversion and Management*, Volume 138, 15 April 2017, pp. 493-510.
- [24]. Hafez A.Z.; Soliman A.; El-Metwally K.A.; Ismail I.M. Solar parabolic dish Stirling engine system design, simulation, and thermal analysis. *Energy Conversion and Management*, Volume 126, 15 October 2016, pp. 60-75.
-

-
- [25]. Malali P.D.; Chaturvedi S.K.; Abdel-Salam T. Performance optimization of a regenerative Brayton heat engine coupled with a parabolic dish solar collector. *Energy Conversion and Management*, Volume 143, 1 July 2017, pp. 85-95.
- [26]. Duffie, J.; Beckman, W. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2ª edición. Ed. John Wiley & Sons. New York. EEUU. 1991. ISBN: 0-471-22371-9.
- [27]. Li Q.; Shirazi A.; Zheng C.; Rosengarten G.; Taylor R.A. Energy concentration limits in solar thermal heating applications. *Energy*, Volume 96, 1 February 2016, pp. 253-267.
- [28]. Criado C.; Alamo N. Optical properties of conics: a method for obtaining reflecting and focusing profiles. *Optics Communications*, Volume 167, Issues 1-6, 15 August 1999, pp. 83-88.
- [29]. Kim D-S.; Kim Y.H. Some characterizations of spheres and elliptic paraboloids. *Linear Algebra and its Applications*, Volume 437, Issue 1, 1 July 2012, pp. 113-120.
- [30]. Rostamzadeh H.; Ebadollahi M.; Ghaebi H.; Amidpour M.; Kheiri R. Energy and exergy analysis of novel combined cooling and power (CCP) cycles. *Applied Thermal Engineering*, Volume 124, September 2017, pp. 152-169.
- [31]. Mahoney A.R.; Price H. Solar Field Performance of New UVAC Receivers at SEGS VI. KJC Operation Co. 2002. *ASME Journal of Solar Energy Engineering*.
- [32]. Beltagy H.; Semmar D.; Lehaut C.; Said N. Theoretical and experimental performance analysis of a Fresnel type solar concentrator. *Renewable Energy*, Volume 101, February 2017, pp. 782-793.
- [33]. Mendoza L.S.; Carrillo G.E.; Melian V.R.; Silva E.E.; Martinez A.M. Mathematical modeling of the geometrical sizing and thermal performance of a Dish/Stirling system for power generation. *Renewable Energy*, Volume 107, July 2017, pp. 23-35.
- [34]. Thalange V.C.; Dalvi V.H.; Mahajani S.M.; Panse S.V.; Patil R.N. Design, optimization and optical performance study of tripod heliostat for solar power tower plant. *Energy*, Volume 135, 15 September 2017, pp. 610-624.
- [35]. Prieto C.; Miró L.; Peiró G.; Oró E.; Cabeza L.F. Temperature distribution and heat losses in molten salts tanks for CSP plants. *Solar Energy*, Volume 135, October 2016, pp. 518-526.
- [36]. Relloso S.; García E. Tower Technology Cost Reduction Approach after Gemasolar Experience. *Energy Procedia*, Volume 69, May 2015, pp. 1660-1666.
-

LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 2

Figura 2.1. Consumo de energía a escala mundial en MJ/año (fuente: Wolfram)	11
Figura 2.2. Pico de Hubbert (fuente: Wikipedia)	13
Figura 2.3. Países con mayores emisiones totales de CO ₂ (fuente: WRI/CAIT, CDIAC).....	15
Figura 2.4. Molécula 3D del CO ₂ y del CH ₄ (fuente: Wikipedia)	17
Figura 2.5. Huella ecológica provocada por los distintos países (fuente: Wikipedia).....	20
Figura 2.6. Huella ecológica promedio por países (fuente: State of Ontario's Biodiversity).....	21
Figura 2.7. Idealización 3D de proyecto Stellarator (fuente: ONRL)	24
Figura 2.8. Representación 3D de técnica secuestro de CO ₂ (fuente: Ministerio Industria)	26
Figura 2.9. Presidentes de países participantes en COP21 (fuente: Wordpress).....	28
Figura 2.10. Demanda energética satisfecha con renovables (fuente: Greenpeace)	34
Figura 2.11. Techo de potencia y cobertura por Termosolar (fuente: Greenpeace)	35
Figura 2.12. Defensa de Siracusa por Arquímedes con energía solar (fuente: Wikipedia).....	36
Figura 2.13. Motor solar de Mouchot (fuente: Sitiosolar).....	37
Figura 2.14. Gran instalación de colectores de energía solar térmica (fuente: autor).....	38
Figura 2.15. Planta fotovoltaica de inyección a red (fuente: autor)	38
Figura 2.16. Campo de colectores cilindro-parabólicos (fuente: Abengoa).....	39
Figura 2.17. Descriptiva y trazado del ciclo Rankine (fuente: Wiley).....	42
Figura 2.18. Descriptiva y trazado del ciclo Stirling (fuente: Wiley)	44
Figura 2.19. Descriptiva y trazado del ciclo Brayton (fuente: Wiley)	45
Figura 2.20. Parámetros relevantes del factor de concentración (fuente: ETSII UPM).....	48
Figura 2.21. Propiedad notable de la parábola (fuente: Wikipedia).....	50
Figura 2.22. Paraboloide de revolución (fuente: Wikipedia)	51
Figura 2.23. Diseño 3D y colector cilindro-parabólico (fuente: GrabCAD y CIEMAT).....	52
Figura 2.24. Diseño 3D y colector Fresnel (fuente: GrabCAD y CIEMAT)	54
Figura 2.25. Diseño 3D y colector parabolooidal (fuente: GrabCAD y CIEMAT)	55
Figura 2.26. Diseño 3D y planta de torre central (fuente: GrabCAD y CIEMAT).....	56

ÍNDICE CAPÍTULO 3

3.	SEGUIMIENTO SOLAR, MONITORIZACIÓN ROBÓTICA Y EDIFICACIÓN SOSTENIBLE..	64
3.1	Caracterización de la radiación solar	64
3.2	Geometría y seguimiento solar	75
3.3	Robótica de monitorización	84
3.4	Edificación sostenible	90
	BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 3	100
	LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 3	102

3. SEGUIMIENTO SOLAR, MONITORIZACIÓN ROBÓTICA Y EDIFICACIÓN SOSTENIBLE

3.1 Caracterización de la radiación solar

El Sol es la **estrella** más cercana a nuestro planeta, siendo el origen de la vida así como del resto de formas de energía que el hombre ha utilizado desde los albores de la Historia. Ha brillado en el firmamento desde hace unos 5.000 millones de años y se calcula que todavía no ha llegado ni a la mitad de su existencia. Cada día, este astro nos regala entre 975 y 1.275 kWh/m² de energía solar, cantidad de energía que es unas 11.000 veces las necesidades totales que la humanidad en su conjunto va a consumir en dicho día. Ciertamente es que el desarrollo actual de la ciencia y la técnica no permiten aprovechar toda esa energía. Sin embargo, la pregunta que es factible realizar es obvia: ¿por qué no aprovechar dicha energía?

Figura 3.1. Sistema solar (fuente: Space.com)

Se define la **constante solar** ([Li H. et al., 2011](#)) como la energía procedente del Sol, recibida por unidad de tiempo y unidad de área de una superficie perpendicular a la radiación extraterrestre (que no ha sufrido ninguna atenuación atmosférica) en una distancia media anual Tierra-Sol. Dicho valor teórico es de **1.353 W/m²** si bien es cierto que el mismo oscila (como se aprecia, realmente no es una constante) conforme la expresión matemática que seguidamente se expone:

$$G = G_{cte} \cdot \left[1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right] \quad (1)$$

donde:

G: irradiancia solar variable recibida por la Tierra, en W/m²

G_{cte}: constante solar, en W/m²

n: ordinal del día del año, adimensional

Figura 3.2. Datos notables en distancia Tierra-Sol (fuente: autor)

Entre los datos más relevantes del Sol, se estiman que los más relevantes son los que se indican seguidamente: edad ($4,5 \cdot 10^9$ años); masa (10^{30} kg); radio ($696 \cdot 10^3$ km); densidad ($1,4 \cdot 10^3$ kg/m³); distancia promedio Sol-Tierra ($150 \cdot 10^6$ km); pérdida de masa (0^9 kg/s); radiación emitida ($3,86 \cdot 10^{26}$ W). Ahora bien, de esa energía incidente sobre la Tierra antes de atravesar la atmósfera, realmente a la superficie de esta llega una cuantía menor, aproximadamente 1.000 W/m² dependiendo de las latitudes. Dicha merma energética es debida a varios factores:

- Dispersión de la radiación debido a choques con moléculas de agua (H₂O), vapor y polvo en suspensión en la atmósfera.
- Absorción de dicha radiación por moléculas de ozono (O₃), agua (H₂O) y dióxido de carbono (CO₂).
- Atenuación debida a la propia masa de aire atmosférico.

En añadidura, el anterior dato se fundamenta en otro igualmente relevante: la **irradiación extraterrestre** (radiación solar recibida en el exterior de la atmósfera de la Tierra). En una primera aproximación (se verán cálculos más detallados en epígrafes posteriores), la misma solo posee componente directa y se puede estimar mediante cálculos analíticos a partir de la constante solar y su corrección por la distancia Tierra-Sol ([Vindel J.M. et al., 2015](#)). Su expresión matemática tras integrar para un 24h la ecuación de irradiancia solar extraterrestre en la que el ángulo cenital es sustituido por irradiancia solar incidente sobre plano horizontal, es:

$$H_b = \frac{24 \cdot 3600}{\pi} \cdot G_{cte} \cdot \left[1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right) \right] \cdot \left[\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_s + \frac{\pi \cdot W_s}{180} \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta \right] \quad (2)$$

donde:

H_b : radiación extraterrestre, en J/m²

G_{cte} : constante solar, igual a 1.353 W/m²

n : ordinal del día del año, adimensional

φ : declinación, en grados sexagesimales

δ : declinación, en grados sexagesimales

ω_s : ángulo horario del ocaso, en grados sexagesimales

Dependiendo de latitud de cada zona geográfica terrestre, los cambios meteorológicos durante el año pueden ser pequeños, como en zonas tropicales bajas, o grandes, como en las zonas de latitudes medias. En tales posiciones geográficas, se pueden diferenciar determinados periodos, que se llaman estaciones meteorológicas, con características más o menos similares, que influyen notablemente en los seres vivos. De forma genérica, se habla de cuatro **estaciones**: primavera, verano, otoño e invierno, aunque hay zonas de la Tierra donde sólo existen dos, la húmeda y la seca (por ejemplo, en las zonas monzónicas). Debido a tales variaciones climáticas que sufre la Tierra, el año se divide en los cuatro períodos. Estas variaciones en el clima son más perceptibles en zonas frías y templadas, y más suaves o menos apreciables entre los trópicos. Las dos primeras componen el medio año en que la luz diurna dura más que las noches, mientras que en las otras dos, las noches son más largas que los días.

En efecto, tal y como se ha anticipado, las variaciones térmicas derivadas son debidas a la **inclinación** del eje terrestre. Por tanto, no tienen lugar al mismo tiempo en el hemisferio Norte (Boreal) que en el hemisferio Sur (Austral), sino que están invertidos el uno con relación al otro. Mientras la Tierra se mueve con el eje del Polo Norte orientado y más cercano al Sol, el del Polo Sur lo está en sentido contrario: así, las regiones del primero reciben más radiación solar que las del segundo. Posteriormente se invierte este proceso y son las zonas del hemisferio boreal las que reciben menos calor. Las cuatro estaciones vienen determinadas por cuatro posiciones principales en la órbita terrestre, opuestas dos a dos, que se llaman solsticios y equinoccios: solsticio de invierno, equinoccio de primavera, solsticio de verano y equinoccio de otoño.

Figura 3.3. Inclinación de plano de eclíptica (fuente: Censolar)

En los equinoccios, el eje de rotación terrestre es normal a los rayos solares, que inciden verticalmente sobre el ecuador. En los solsticios, el eje tiene una inclinación de **23,45°**, por lo que los rayos solares caen de forma ortogonal sobre el trópico de Cáncer (verano en el hemisferio norte) o de Capricornio (verano en el hemisferio sur). A causa de esa excentricidad de la órbita terrestre (motivada según se cree por el impacto de un meteorito hace millones de años), las estaciones no tienen idéntica duración, puesto que la Tierra recorre su trayectoria con velocidad variable. Acelera cuanto más cerca está del Sol y decelera cuanto más alejada.

Figura 3.4. Consideraciones geométricas terrestres (fuente: Univ. Cantabria)

Por esta circunstancia, el rigor **térmico** de cada estación no es el mismo para ambos hemisferios. Nuestro planeta está más cercano al Sol a principios de enero (perihelio) que a principios de julio (afelio), lo que provoca que reciba un 7% más de calor en el primer mes del año que a la mitad de este (paradójicamente, se podría pensar). Por esta circunstancia, además de otros factores, el invierno boreal es menos frío que el austral, y el verano austral es más caluroso que el boreal. A causa de perturbaciones que sufre la Tierra mientras gira en torno al Sol, no pasa por los solsticios y equinoccios con exactitud, lo que motiva que las diferentes estaciones no comiencen siempre en el mismo preciso momento.

Se ha hablado de la radiación solar como el formato en el cual la energía proveniente del Sol llega hasta la Tierra (y por supuesto a cualquier otro planeta o cuerpo celeste que intercepte en el ángulo sólido de influencia de esta estrella). Ahora bien, ¿qué es el realmente la **radiación**? El Sol no es más que un inmenso reactor nuclear de fusión, en el cual núcleos del elemento químico hidrógeno se fusionan para originar núcleos de otro elemento distinto: helio. Este proceso requiere temperaturas de 15 millones de grados centígrados y genera como “subproducto” radiación electromagnética emitida por los electrones al saltar de una capa a otra del átomo. Dicha radiación sale del núcleo solar, atraviesa el resto de capas que conforman la estrella y salen despedidas al espacio exterior en todas las direcciones.

Esto es, ocurre como si el Sol fuese una gigantesca fuente de radiación electromagnética cuyo poder emisor fuese el de un cuerpo negro a una temperatura aproximada de 5.777 K (concepto denominado en la Ciencia como cuerpo negro). Una ínfima porción de esa energía es la recibida por la Tierra. En este sentido, se conoce como **espectro electromagnético** ([Norgard J., 2007](#)) de la radiación como la distribución energética de ondas electromagnéticas en su conjunto. Si se refiere a un cuerpo concreto se denomina simplemente espectro a la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) la sustancia de la cual está constituida dicho cuerpo.

Figura 3.5. Espectro electromagnético de radiación solar (fuente: Solarpraxis)

La utilidad más relevante de este espectro de radiación es lograr la identificación inequívoca de cualquier sustancia. Los espectros se pueden "mapear" mediante dispositivos denominados espectroscopios que permiten no solo visualizar dicho espectro, sino también realizar mediciones sobre el mismo (longitud de onda, frecuencia e intensidad de la radiación). Dicho espectro electromagnético completo se extiende para cada cuerpo, desde la radiación de menor longitud de onda (rayos cósmicos, rayos gamma y rayos X), pasando por la radiación ultravioleta, el espectro de luz visible por el ser humano y la radiación infrarroja, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda (ondas de radio). Los científicos estiman que el límite inferior para la longitud de onda más pequeña factible es la longitud de Planck, mientras que el límite superior teórico sería el tamaño del propio Universo toda vez que el espectro electromagnético es continuo.

Se indican a continuación definiciones importantes relacionadas con el concepto de radiación solar.

- Radiación **directa**: radiación solar recibida en la superficie terrestre en un plano horizontal sin que haya sufrido ningún cambio de dirección en su trayectoria (procedente por tanto del disco solar). Se suele conocer por su denominación inglesa como **DNI** (*Direct Normal Irradiance*).
- Radiación **difusa**: componente de la radiación solar recibida en la superficie terrestre en horizontal después de que los procesos de dispersión (reflexión y difusión) debidos a la atmósfera, hayan modificado su trayectoria.
- Radiación de **albedo**: componente de la radiación solar procedente de la reflexión del suelo.
- Radiación **total**: radiación global que reciba la superficie terrestre, suma de todas las componentes de la radiación solar (directa + difusa + albedo).

- **Irradiancia** ($\text{kW}/\text{m}^2\cdot\text{día}$): potencia energética recibida por la superficie terrestre horizontal por unidad de área y día.
- **Irradiación** ($\text{kJ}/\text{m}^2\cdot\text{día}$ o incluso más típicamente $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2\cdot\text{día}$): energía recibida por la superficie terrestre por unidad de área y día.
- **Masa de aire**: relación entre la masa de atmósfera que atraviesa la radiación solar directa con respecto a la que atravesaría si el Sol estuviera en el cénit. Desde el punto de vista matemático, se puede expresar mediante:

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (3)$$

donde:

m : masa de aire, adimensional

θ_z : ángulo cenital solar, en grados sexagesimales

Figura 3.6. Balance neto de radiación recibida (fuente: Universidad Cantabria)

Los dispositivos más utilizados para medir la radiación solar en todos sus formatos así como otras variables asociadas, son los que a continuación se detallan:

- **Pirheliómetro**: mide la radiación solar directa.
- **Piranómetro**: mide la radiación total, y si está protegido de la radiación directa, también permite calcular la radiación difusa.
- **Heliógrafo**: mide la duración de la luz solar diaria, cuando la radiación supera un umbral mínimo que suele ser de $120 \text{ W}/\text{m}^2$.

Figura 3.7. Pirheliómetro, heliógrafo y piranómetro (fuente: Direct Industry)

Por terminar de fijar los antecedentes precisos que permitan continuar el estudio de la radiación solar, se puede inferir que la atmósfera terrestre es como una gran **máquina térmica** cuya fuente energética es la radiación electromagnética procedente del Sol, teniendo su origen en las reacciones nucleares que se generan en su núcleo a resultas de la incesante transformación de hidrógeno (H_2) en helio (He). Siguiendo el modelo termodinámico explicitado en temas anteriores, estamos hablando de una inmensa máquina térmica: en la cual el foco caliente es el Sol (cuya radiación penetra en la atmósfera) mientras que el foco frío es el Universo (hacia donde la radiación terrestre reflejada de onda larga es emitida hacia el espacio en la alta troposfera).

No existen obviamente engranajes y/o mecanismos fijos, pero sí una poderosísima **autorregulación** de los flujos energéticos terrestres en las cuales el tiempo meteorológico no representa más que una serie de incidentes impelidos por la energía solar. Y a su vez, la potencia de la Termodinámica estriba en que siendo la complejidad del motor atmosférico infinitamente mayor que la de cualquier máquina diseñada por la ingeniería, sus principios físicos básicos permiten dibujar su comportamiento de forma suficientemente predecible.

Pues bien, todos los proyectos llevados a cabo hasta la fecha en nuestro país para caracterizar la radiación solar, se centran en cuantificar y representar gráficamente, con suficiente **resolución espacial**, el promedio tanto mensual como anual de la radiación que llega a la superficie terrestre española. Así, el primigenio Atlas de Radiación Solar del ya extinto Instituto Nacional de Meteorología, databa del año 1984 y fue construido mediante una red de radiómetros en superficie, que aunque intentaba “mapear” todo el territorio nacional, no eran suficientes para hacerlo con suficiente precisión amén de que se elaboró con tecnologías muy precarias comparadas con las disponibles hoy en día.

Desde entonces hasta nuestros días, han surgido en **España** varios atlas monográficos sobre radiación solar, especialmente desde el advenimiento político de las comunidades autónomas: como referencia, cabe destacar el atlas basado en imágenes de satélite Meteosat 6 para Galicia, confeccionado con datos del período 2002-2004 junto con el método de estimación de irradiancias Heliosat-2.

Existen otras aportaciones relevantes, tales como el atlas confeccionado en 2005 y basado en modelos estadísticos nutridos a través del instrumental denominado AVHRR con el cual se dotaba a los **satélites** ([Polo J., 2015](#)) operados por la organización estadounidense NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

El histórico de datos comprendía conjuntamente referencias de irradiación solar de datos superficiales obtenidos durante cinco años con resolución a nivel de hora, día, mes, estación y año; y con una precisión espacial limitada al satélite utilizado, en este caso aproximada a unos **3 km²** en el punto nadir (punto de esfera celeste diametralmente opuesto al cenit).

Figura 3.8. Resolución espacial de niveles de irradiancia (fuente: CIEMAT)

En este sentido, gran parte de la información disponible actualmente sobre radiación solar horizontal tiene como origen de datos tres fuentes complementarias: redes de estaciones situadas a nivel de superficie; mediciones satelitales de cobertura global (EUMETSAT gestiona la red *Satellite Application Facilities* o SAF de la cual se destaca el satélite Climate Monitoring-SAF o CM-SAF) y más recientemente modelos matemáticos que corrigen o ponderan mediante programas informáticos los dos anteriores para depurar los posibles errores cometidos.

Figura 3.9. Mapa de radiación: España y Portugal (fuente: Institute for European Studies)

De la observación de los datos de radiación incidente en España y Portugal, se pueden obtener toda una serie de **conclusiones** de relevancia:

1. Existe un indudable gradiente latitudinal (función de la latitud) de irradiancia global y directa en la península Ibérica, con valores máximos en Andalucía y Algarve; mínimos en la costa norte de Galicia, Cantabria, País Vasco y Rioja; y valores promedio en el centro peninsular.
2. El antedicho gradiente de radiación en dirección sur se incrementa en cadenas montañosas con orientación secundaria predominante este-oeste.
3. A resultados de lo anterior, la meseta norte recibe menor cuantía de radiación que la meseta sur con un remarcado gradiente en el Sistema Central a excepción de las honrosas situaciones de la irradiancia al norte de Ávila, nordeste de Salamanca y Valle del Ebro.
4. La cuantía de radiación recibida se ve minorada por los sistemas montañosos en función de la existencia de nubes persistentes según la orografía, a excepción de zonas altas en La Palma y Tenerife cuya altitud es superior a la altura de la inversión del alisio y del conocido “mar de nubes”.
5. En la costa mediterránea existe una vez más un claro contraste norte-sur especialmente acusado en la Comunidad Valenciana y norte de Cataluña.
6. En las Islas Baleares el incremento de la radiación sigue el trazado nordeste-suroeste con valores de irradiancia promedio mayores en Ibiza y menores en Menorca y Mallorca (especialmente en la Sierra de Tramontana).

7. En las Islas Canarias se presentan los valores de irradiancia más elevados, con contrastes marcados imputables a la nubosidad orográfica enclavada al norte-este (relacionada con los vientos alisios del nordeste) y con un gradiente de radiación alineado con la dirección nordeste-suroeste. Es destacable un incremento de la fracción de radiación difusa en la irradiancia global de las islas respecto a la Península Ibérica, motivado por la abundancia en las primeras, de nubosidad provocada por la inversión del alisio y por la presencia de aerosoles en suspensión de origen sahariano.

Desde el punto de vista físico-matemático, el **algoritmo** ya mencionado de ponderación de valores de irradiancia empleado para la obtención de irradiancia solar partiendo de datos transmitidos vía satélite, recibe el nombre de MAGIC SOL y es resultado de la unión de los modelos gnu-MAGIC (*Mesoscale Atmospheric Global Irradiance*) válido para cuantificar la irradiancia en cielo despejado; y del Heliosat-CAL para medir el albedo efectivo. El fin último del algoritmo es poder conjuntar los datos (*datasets*) sobre superficie horizontal y correspondientes con parámetros en parte ya conocidos: SIS (*Surface Incoming Solar radiation*) o irradiancia total que incide sobre la superficie horizontal dentro de la banda espectral 0,2 - 4 μm ; y SID (*Surface Incoming Direct radiation*) definida como la irradiancia que incide sobre la superficie horizontal dentro de la misma banda espectral anterior pero procedente directamente del disco solar. Estos *datasets* son idóneos para estudios en los que se precisan evaluaciones de tendencias o variabilidad interanual, toda vez que son series de datos de errores corregidos debido a cambios en el instrumental de medición de los sucesivos satélites, así como debido a otros efectos más difusos (derivas en las respuestas espectrales motivadas por la degradación de los sensores; leves oscilaciones en las medidas causadas por ligeros cambios orbitales de los satélites...).

El primero de los parámetros a calcular es el ya mentado **CAL** (*Effective Cloud Albedo*) como medida adimensional que conceptualmente representa la cantidad de radiancia reflejada por el cielo relativa a la radiancia reflejada para condiciones de cielo despejado y normalizada al máximo de radiancia reflejada por las nubes, y su representación matemática (sesgo menor a 0,1) es como sigue:

$$CAL = \frac{R - R_{sfc}}{R_{max} - R_{sfc}} \quad (4)$$

donde:

CAL: albedo efectivo de las nubes o *Effective Cloud Albedo*, adimensional

R: irradiancia observada, en W/m^2

R_{sfc} : irradiancia reflejada en condiciones de cielo despejado, en W/m^2

R_{max} : irradiancia máxima reflejada por las nubes, en W/m^2

El segundo de los parámetros a obtener es el índice de cielo reflejado **k**, calculable por la expresión que sigue con un valor absoluto del sesgo de 10 W/m²:

$$k = \frac{SIS}{SIS_{cls}} \quad (5)$$

donde:

k: índice de cielo reflejado, adimensional

SIS: irradiancia incidente en superficie para unas condiciones de nubosidad determinadas o *Surface Incoming Solar radiation*, en W/m²

SIS_{cls}: irradiancia incidente en superficie con cielo despejado, en W/m²

Ambos parámetros (CAL y k) vienen relacionados por la ecuación que sigue, resultado de la aplicación de la Ley de Conservación de la Energía:

$$k = \begin{cases} 1,2 & \text{si } CAL < -0,2 \\ 1 - CAL & \text{si } CAL \in [-0,2; 0,8] \\ 2,067 - 3,667 \cdot CAL + 1,667 \cdot CAL^2 & \text{si } \in [0,8; 1,1] \\ 0,05 & \text{si } CAL > 1,1 \end{cases} \quad (6)$$

El tercero de los parámetros objeto de estudio es el **SID** cuya definición ya ha sido lanzada, se modeliza con valor del sesgo de 15 W/m² mediante:

$$SID = SID_{cls}[(1 - CAL) - 0,38 \cdot CAL]^{2,5} \quad (7)$$

donde:

SID: irradiancia que incide sobre la superficie horizontal dentro de la banda espectral 0,2 - 4 μm pero procedente directamente del disco solar, en W/m²

SID_{cls}: irradiancia directa en superficie en condiciones de cielo despejado o *Surface Incoming Direct radiation*, en W/m²

Como seguramente se podrá intuir, el cuarto y último parámetro relevante es el **SIS**, ya conocido de líneas precedentes, calculable mediante la expresión:

$$SIS = E_0 \cdot T \cdot \cos(\theta) \quad (8)$$

donde:

SIS: irradiancia total que incide sobre la superficie horizontal dentro de la banda espectral 0,2 - 4 μm o *Surface Incoming Solar radiation*, en W/m²

E₀: irradiancia solar en la cima de la atmósfera (constante solar), en W/m²

θ: ángulo zenital, en rad

T: transmisividad atmosférica adimensional

3.2 Geometría y seguimiento solar

Desde el punto de vista geométrico, la posición del Sol se puede construir mediante un conjunto de ecuaciones tal y como la **trigonometría esférica** establece ([Fraser C., 2017](#)). En efecto, la trigonometría esférica es la aplicación matemática de los procedimientos de la trigonometría plana al análisis de ángulos, lados y áreas de triángulos esféricos, donde el concepto triángulo esférico hace mención a aquel polígono de tres lados construido sobre una esfera donde sus tres vértices y tres lados son arcos de círculo máximo. Los ángulos de un triángulo esférico no suman 180° como en geometría plana, sino la suma puede computar entre 180 - 540° . Durante siglos, esta disciplina fue un pilar básico de la formación básica de matemáticos, físicos, arquitectos e ingenieros. No en vano, fue profusamente estudiado en la Grecia clásica, el Islam de la Edad Media y la propia cultura occidental moderna, llegando a ser materia clave en la enseñanza superior hasta los años '50 del siglo XX. Y durante todos estos siglos se pudo utilizar la trigonometría esférica para cartografiar tanto nuestro planeta como el firmamento y se reveló como herramienta tremendamente útil en la práctica naval y militar (balística). Y si bien es cierto que parece que su enseñanza quedó condenada al ostracismo tras la II Guerra Mundial, no menos cierto es que su potencia y la aparición de nuevas necesidades técnicas (posicionamiento GPS y seguimiento solar) ha provocado un renacimiento de esta bella parte de la Matemática.

Figura 3.10. Fundamentos de trigonometría esférica (fuente: Wikipedia)

Respecto al recientemente mentado posicionamiento solar (que el lector intuirá de suma utilidad para este trabajo), la historia ya recoge uno de los primigenios métodos para medir las dimensiones de nuestro planeta con medidas indirectas relacionadas con el Sol: Eratóstenes de Cirene, astrónomo griego del siglo III a.C. observó la penetración de la luz solar en pozos de distintas localidades para medir, con bastante precisión el diámetro terrestre. E **Hiparco de Rodas**, del siglo II a.C. llegó a matematizar los movimientos terrestres con una asombrosa precisión: examinando el movimiento de la Tierra a lo largo de la eclíptica en la cual se desplaza en su movimiento respecto al Sol, *Hiparco* concibió la función cuerda (que más tarde fue cambiada por matemáticos indios por la función seno). Y tras convertir la longitud del día estacional en grados y fijar dos longitudes de cuerda, pudo establecer la excentricidad de la órbita solar, en lo seguramente fue el primer problema trigonométrico en la historia de la humanidad.

A results de un análisis pormenorizado de aplicabilidad de la trigonometría esférica hacia el seguimiento solar, se puede modelizar de forma detallada la **posición y orientación del Sol** ([Brownson J.R.S, 2014](#)) con respecto al observador, mediante una serie de interesantes parámetros clave para la evolución del resto del presente trabajo:

- **Declinación δ** : posición del Sol en el mediodía solar (momento en que el Sol pasa por el meridiano local) con relación al ecuador.

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right) \quad (9)$$

donde:

δ : declinación, en grados sexagesimales

n : ordinal del día del año, adimensional

Figura 3.11. Declinación (fuente: ETSII UPM)

- **Azimet solar β o γ_s** : ángulo formado por la recta que une al observador con el sur geográfico (S), con la recta que le une a la proyección ortogonal del Sol sobre la horizontal. Está comprendido entre $[-180^\circ, +180^\circ]$.

Figura 3.12. Azimet solar (fuente: ETSII UPM)

- **Ángulo horario ω :** desplazamiento angular del Sol (a este u oeste) respecto del meridiano local, debido a la rotación terrestre. El ángulo horario es negativo por la mañana y positivo por la tarde, con intervalos de crecimiento de $15^\circ/\text{hora}$. Este dato es especialmente relevante de cara a medir la precisión del seguimiento solar.

Figura 3.13. Ángulo horario (fuente: ETSII UPM)

- **Elevación solar α :** ángulo formado por la recta que une al observador con la posición del Sol, con la recta que le une a la proyección ortogonal del Sol sobre la horizontal.

Figura 3.14. Elevación (fuente: ETSII UPM)

- **Latitud ϕ :** distancia angular expresada en grados, medida sobre un meridiano, entre la línea del ecuador y el paralelo de una localización terrestre. Varía entre 0° y 90° (hemisferio norte) y entre 0° y -90° (hemisferio sur). Según el ángulo de incidencia de rayos solares en la superficie terrestre, las zonas climáticas varían según la latitud en que se encuentra el lugar, localizándose zonas frías en los extremos, que se van transformando en templadas, hasta llegar a cálidas en la zona media del planeta.
- **Longitud:** expresa la distancia angular entre un punto dado de la superficie terrestre y el meridiano que se toma como 0° (es decir, el meridiano de base)

medida a lo largo del paralelo en el que se encuentra dicho punto, una circunferencia cuyo centro es la intersección del eje de la Tierra con el plano del citado paralelo. Habitualmente en la actualidad el meridiano base es el meridiano de Greenwich.

Figura 3.15. Latitud y longitud (fuente: Censolar)

- **Azimut superficial γ** : ángulo entre la proyección sobre la horizontal de la normal a la superficie y la dirección sur del meridiano local.
- **Inclinación de una superficie β** : ángulo formado entre la superficie en cuestión y la horizontal.
- **Ángulo de incidencia θ** : ángulo formado entre la radiación directa sobre una superficie y la recta perpendicular a dicha superficie. Se obtiene mediante:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \beta - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \\ & \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \\ & \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \end{aligned} \quad (10)$$

donde:

θ : ángulo de incidencia, en grados sexagesimales

δ : declinación, en grados sexagesimales

φ : latitud, en grados sexagesimales

β : inclinación de una superficie, en grados sexagesimales

γ : azimut superficial, en grados sexagesimales

ω : ángulo horario, en grados sexagesimales

Su particularización para superficie horizontal ($\beta=0$) genera el ángulo cenital solar (θ_z).

En añadidura y al objeto de simplificar el cálculo de trayectorias solares en forma de ábaco, se recurre con frecuencia a **graficar** la proyección bidimensional

(bien en coordenadas cartesianas, bien en coordenadas polares) del movimiento de Sol durante los 365 días del año ([Kittler R. y Darula S., 2013](#)). En añadidura, este gráfico de posicionamiento solar (que seguidamente se muestra en su versión tridimensional para entender su significado, valedero para una latitud como la de **Madrid**, esto es, $40,4^\circ$), permite entre otras cosas, posicionar de forma sencilla la presencia de posibles sombras sobre el colector solar (causada por vegetación, colinas, edificios contiguos, otros colectores colindantes, elementos arquitectónicos, chimeneas, parasoles, antenas...) así como realizar un seguimiento detallado del Sol.

Figura 3.16. Gráfico 3D del posicionamiento solar para latitud $40,4^\circ$ (fuente: Sunpath3D)

Figura 3.17. Gráfico 2D del posicionamiento solar para latitud $40,4^\circ$ (fuente: Solarpraxis)

Siguiendo la idea de realizar un **seguimiento** continuo del Sol para garantizar perpendicularidad entre el colector receptor y los rayos incidentes

durante la máxima cantidad de tiempo posible, buscando así la mayor radiación solar directa incidente y por ende, el mejor aprovechamiento energético, la tecnología actual ha desarrollado dos sistemas de seguimiento ([Fernández-Ahumada L.M. et al., 2017](#)):

1. Seguimiento solo de **un eje**, clasificación dentro de la cual podremos ubicar principalmente plantas solares fotovoltaicas de paneles planos y centrales termosolares de colectores cilindro-parabólicos, ambas para generación e inyección de energía a red. A su vez se puede realizar mediante:

- Seguimiento horizontal este-oeste, conforme las ecuaciones:

$$\begin{aligned}\cos \theta &= \sin^2 \delta + \cos^2 \delta \cdot \cos \omega \\ \beta &= |\varphi - \delta|\end{aligned}\quad (11)$$

- Seguimiento horizontal norte-sur, conforme las ecuaciones:

$$\begin{aligned}\cos \theta &= \sqrt{\cos^2 \theta_z + \cos^2 \delta \cdot \sin^2 \omega} \\ \tan \beta &= \tan \theta_z \cdot |\cos(\gamma - \gamma_s)|\end{aligned}\quad (12)$$

- Seguimiento vertical respecto eje terrestre norte-sur, según ecuación:

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cdot \cos \beta + \sin \theta_z \cdot \sin \beta \quad (13)$$

- Seguimiento paralelo al eje terrestre, según las ecuaciones:

$$\begin{aligned}\cos \theta &= \cos \delta \\ \tan \beta &= \frac{\tan \varphi}{\cos \gamma}\end{aligned}\quad (14)$$

Figura 3.18. Seguimientos E-O y N-S (fuente: Solarpraxis)

2. Seguimiento de **dos ejes**, que es típico de plantas termosolares de disco Stirling y/o helióstatos en torre central. A su vez se puede modelizar mediante:

$$\begin{aligned}\cos \theta &= 1 \\ \beta &= \frac{\pi}{2} - \theta_z\end{aligned}\quad (15)$$

En cuanto a las tecnologías de seguimiento **algorítmico** solar, básicamente las dos tendencias actuales son la que se indican seguidamente:

- **Efemérides astronómicas** o de lazo abierto ([Wang Y. et al., 2013](#)): el sistema de control “lee” una ingente base de datos con coordenadas solares para cada día del año, en función de la latitud o coordenadas GPS de la instalación, y da la orden al sistema motorizado de que varíe la orientación cada cierto tiempo. Dicho espaciado temporal suele ser coincidente con un tiempo prudencial tras el cual hayan cambiado las condiciones de radiación debido al movimiento del Sol ¿Cada cuánto ocurre dicho cambio en altura y azimut solar? Realmente el cambio se produce en cada instante de tiempo, pero para plantear un transitorio razonable, se suele discretizar el tiempo tomando un intervalo comprendido entre **6-10 minutos** tras los cuales se supone que habrán cambiado las condiciones de radiación solar y el seguidor adoptará otra posición. Suele requerir recalibrar cada cierto tiempo al autómatas de control.
- **Seguimiento directo** o lazo cerrado P&O (iniciales de perturbar y observar). Básicamente, el autómatas hace un seguimiento del punto más claro (conforme a los datos que le suministre el sensor de radiación) y ordena el giro del seguidor hacia esa posición ([Kwan T.H. y Wu X., 2017](#)). El flujograma de toma de decisiones del autómatas se basa, en resumen, en comparar el resultado de una perturbación en la radiación (debida al movimiento natural del Sol) con respecto a la situación inmediatamente anterior. Si dicha modificación implica una ganancia en la radiación, será interesante movilizar todos los seguidores en la dirección espacial en la cual se haya producido, para así incrementar la ganancia energética. Esta técnica es más costosa que la primera, pero a priori, se podría decir que es más fidedigna a las condiciones climatológicas que se presenten en la realidad (ante nubes, por ejemplo).

Tras analizar los aspectos físico-matemáticos del seguimiento solar, es menester terminar introduciendo las **soluciones** tecnológicas que la ingeniería ha desarrollado para materializar dicho seguimiento, desde todas las vertientes de la técnica posibles: mecánica, electrónica, sensórica, informática y control.

- Seguimiento solo de **un eje**: es la solución adoptada principalmente por plantas de paneles solares fotovoltaicos; centrales termoeléctricas de colectores cilindro-parabólicos y en pequeña proporción, instalaciones de energía solar térmica de baja temperatura.
- Seguimiento de **dos ejes**: tecnología aplicada con mayor profusión también en plantas de paneles solares fotovoltaicos; y centrales termoeléctricas de colectores por disco Stirling y helióstatos en plantas de torre central.

Figura 3.19. Colectores cilindro-parabólicos con seguidor a un eje (fuente: Solar-energy)

Figura 3.20. Discos Stirling con seguidor a dos ejes (fuente: Solar-energy)

Sea como fuere e independientemente de la tecnología solar susceptible de ser complementada con el seguimiento solar, es obvio que se precisan todo un conjunto de dispositivos y equipos imprescindibles para el éxito del objeto buscado.

- **Estructuras soporte** de captadores, torres de anclaje y lastres: son las encargadas de la sujeción de estos al propio sistema que constituye el seguidor solar con el objetivo de que todos giren solidariamente al mismo. La torre de anclaje, es la sustentación del helióstato a la zapata de lastrado o terreno al cual vaya empotrada. Deben resistir los poderosos esfuerzos cortante y flector (“efecto vela”) que generan los altos vientos sobre la superficie de los colectores expuesta.
- **Sistemas de regulación y control:** dispositivos electrónicos programables (ordenadores, autómatas programables, tarjetas electrónicas dedicadas) que reciben las señales que los sensores le envían, procesan tales señales

conforme a los algoritmos de seguimiento solar implementados, ordenan realizar la rotación correspondiente al motor o motores del seguidor y habilitan las alarmas y maniobras de protección si fuesen necesarias. Esto es, son el “cerebro” del seguidor, quienes ordena qué ángulo y en qué sentido debe girar cada motor y bajo qué circunstancias sea preciso aplicar algún mecanismo de seguridad (adopción de posición horizontal del seguidor en caso de excesivo viento, por ejemplo). Para evitar su deterioro por ñas condiciones atmosféricas, suele ir encapsulado en una caja al efecto con una determinada protección IP (frente salpicaduras, polvo, lluvia...).

- **Sensores de radiación:** detectan en qué dirección espacial se recibe la máxima radiación solar, para de esta forma dirigir el movimiento de todo el seguidor en esa dirección mediante el giro apropiado del motor correspondiente. Así la cantidad de energía captada será la mayor posible y por consiguiente (y tras las inexorables pérdidas) también lo será la energía producida. Los modelos primigenios constaban de una sola superficie expuestas a la captación de la radiación solar, con lo cual era precisa ubicar varios sensores (al menos dos) en el rectángulo definido por los seguidores. Los actuales sensores suelen estar encapsulados en un tetraedro transparente, ofreciendo tres caras a las posibles orientaciones del espacio en las cuales se recibe la radiación. Aquel sensor ubicado en la cara en la cual la radiación sea mayor, será obviamente la que marque la directriz del movimiento del seguidor.
- **Anemómetros y veletas:** típicos sensores de estaciones meteorológicas que miden la velocidad y sentido del viento. Aunque no son equipos imprescindibles relacionados directamente con la producción energética, tienen una indudable importancia toda vez que una excesiva velocidad de viento (ciclones, huracanes) podría poner en peligro la integridad de la propia instalación por el ya conocido “efecto vela” sobre cada seguidor.
- **Motores** de giro, coronas dentadas, cajas multiplicadoras y rodamientos o cojinetes antifricción: los motores de giro son los dispositivos eléctricos (monofásicos o trifásicos según la potencia requerida) que aplican el par de giro suficiente para que el seguidor se incline el ángulo que sea preciso y así buscar la máxima perpendicularidad respecto al Sol (colector cilindro-parabólico y de disco *Stirling*) o el ángulo preciso para una adecuada reflexión conforme a las leyes de la óptica hacia el foco (helióstatos de plantas de torre central). Los movimientos del seguidor requieren de un mecanismo de accionamiento, eléctrico electroneumático o hidráulico según el peso a desplazar, que mueva a los colectores de acuerdo al objetivo buscado. Habitualmente, los seguidores disponen de unos *encoders* o pequeños dispositivos que permiten conocer a los sistemas de control qué ángulo ha girado realmente una vez que éste da la orden. Esta solución permite saber si el motor realmente ha conseguido girar el ángulo buscado o por el contrario, ha habido algún posible error en el posicionamiento.

3.3 Robótica de monitorización

Es indudable que una de las tecnologías más excitantes y prometedoras para la humanidad, es el desarrollo presente y futuro de la robótica. La robótica se puede definir como la vertiente de la ingeniería **mecatrónica** ([Barbieri G. et al., 2015](#)) que focaliza su esfuerzo en el diseño, simulación, construcción, programación y aplicación de los robots en multitud de tareas útiles para el hombre. Tal y como sucede con la propia definición de mecatrónica recién puesta en escena, la robótica combina múltiples disciplinas tales como mecánica, electrónica, regulación e informática; y de ella se heredan a su vez otras tecnologías igualmente llamativas: animatrónica y automática de control. El término robot es una traducción al inglés del checo *robota* (que a su vez significa trabajos forzados en español) y fue acuñado por el checo *Karel Čapek* en 1920 cuando lo hace aparecer en su exitosa obra teatral R.U.R. (*Rossumovi univerzální roboti*). Ahora bien, el origen de la robótica se remonta al siglo III a.C., época de la cual data una de las primeras descripciones de autómatas existentes, en concreto en uno de los textos de *Lie Zi*. En él, se hace mención a una conversación entre el *Rey Mu de Zhou* y un ingeniero mecánico (*Yan Shi*), creador de una figura a escala 1:1 de un ser humano.

Según la evolución **cronológica** de la robótica, es factible hacer la siguiente división de las generaciones que han ido jalonando los avances logrados:

- **1ª Generación:** meros manipuladores mecánicos multifuncionales con sencillos sistema de control principalmente manuales o de secuencia fija.
- **2ª Generación:** robots de aprendizaje que repiten de forma secuencial ciertos movimientos que tienen memorizados y que a su vez, han sido ejecutados previamente por un operario humano.
- **3ª Generación:** robots con control sensorizado, donde el controlador es un ordenador que ejecuta las órdenes de un programa informático y las transmite al manipulador para que realice las acciones programadas.
- **4ª Generación:** robots inteligentes similares a los de la 3ª generación, pero poseedores además de sensórica que transmite información a sistema de control central (ordenador, tarjeta electrónica, autómata programable) sobre el estado del proceso a automatizar.

Figura 3.21. Robot industrial de 4ª generación (fuente: Kuka Robotics)

Atendiendo a la **estructura** del robot, ésta queda definida por el tipo de configuración general del mismo, esto es, en función de su condición metamórfica. El concepto de metamorfismo es de reciente aparición y ha sido introducido para aumentar la flexibilidad funcional del robot a través de modificaciones en su estructuración mecánica. El metamorfismo permite varios niveles: desde los más simples (cambio de una herramienta, por ejemplo) hasta los más complejos que abarcan modificación de subsistemas estructurales (modificación de un brazo articulado, por ejemplo). A tenor de lo anterior ([Cardoso da Silva N. et al., 2000](#)), se infiere que es difícil establecer una clasificación sencilla de los robots en función de su estructura, pero aun así, es factible dividirlos en los siguientes grupos:

- **Poliarticulados:** robots de diversa forma y configuración, cuyo patrón común es el de ser principalmente estático, aun siendo factible que puedan ser guiados para realizar desplazamientos limitados. En añadidura, están estructurados para mover elementos terminales dentro de un determinado espacio de trabajo conforme a uno o más sistemas de coordenadas (cartesianas, polares, cilíndricas y/o esféricas) dentro de un limitado número de grados de libertad. En esta clasificación se podrían ubicar los manipuladores y robots industriales. Se emplean cuando es necesario abarcar una zona de trabajo bastante amplia (en longitud o en superficie), actuar sobre objetos que poseen un plano de simetría vertical o minorar el espacio ocupado en la posición de anclaje del robot.
- **Móviles:** robots con elevada capacidad de desplazamiento, basados en plataformas y equipados con sistemas de locomoción rodante. Avanzan en sus trayectorias por control remoto o en función de la información recibida del entorno que le rodea gracias a sensores de posicionamiento, pudiendo llegar a sortear obstáculos y están dotados de un nivel relativamente elevado de inteligencia. Así por ejemplo, permiten el transporte de piezas o productos intermedios entre puntos de una cadena de fabricación.
- **Antropomórficos:** tratar de reproducir totalmente o al menos en parte, tanto la morfología como el comportamiento cinemático del hombre. En el momento actual de la tecnología, los robots antropomórficos son todavía equipos poco evolucionados y con escasa utilidad práctica, si bien es cierto que no solo se destinan ya al estudio y experimentación, sino que han encontrado acomodo en tareas militares. El mayor reto al cual se enfrentan es el desplazamiento bípedo estable y mantenimiento del equilibrio.
- **Zoomórficos:** clase caracterizada básicamente por poseer sistemas de locomoción basados en otros seres vivos. Se entiende que bajo esta denominación, la casuística es inmensa. Sin embargo, a pesar de la vasta variedad morfológica de los posibles sistemas de locomoción es factible agrupar a los robots zoomórficos en solo dos categorías principales: caminadores y no caminadores. Los primeros, especialmente los pertenecientes a la categoría de múltipedos, son ciertamente numerosos y están siendo objeto de experimentación en variados laboratorios de Robótica del mundo, al fin de terminar su desarrollo como vehículos perfectamente robustos y capaces de desplazarse en todo tipo de superficie.

El grupo de los robots no caminadores, está por el contrario menos evolucionado. Se podría decir que hasta la fecha, los desarrollos finales han cristalizado en segmentos cilíndricos biselados acoplados entre sí de forma axial y capacitados para cierto movimiento de rotación.

Figura 3.22. Robots antropomórfico y zoomórfico (fuente: Boston Dynamics)

- **Híbridos:** son de difícil clasificación ya que su estructura se posiciona en combinación con alguna de las antedichas, bien por conjunción o por yuxtaposición.

Desde la perspectiva de los **campos de aplicación** de la robótica, se podría decir que éstos son virtualmente inagotables: se podría afirmar sin riesgo a equivocarnos, que prácticamente cualquier tarea o actividad puede o podrá ser desarrollada por un robot, bien en la actualidad, bien en el futuro. Supera con creces el objetivo de este escrito, el analizar de forma pormenorizada dichos campos de aplicación. Pero sí merece la pena realizar un rápido bosquejo de estos:

- **Automatización industrial:** producción estandarizada de automóviles, fabricación de aceros, aplicación de pintura, manipulación de forja y estampación, soldadura...
- **Salud:** realización de delicadas operaciones quirúrgicas, cuidado de enfermos y personas de la 3ª edad...
- **Acceso** a entornos difíciles de llegar e investigación: incursión en otros planetas como Marte ([Hayati S. et al., 2007](#)), profundidades abisales, análisis de actividad de volcanes, inspección de interior de conducciones industriales...

Figura 3.23. Diseño 3D de Rover Curiosity para el análisis de Marte (fuente: NASA)

- Trabajos **peligrosos**: tratamiento de residuos de plantas nucleares, desactivación de bombas, salvamento y socorrismo tras accidentes naturales o de medios de transporte...
- **Manutención en almacenes**: paletización y expendeduría de productos, carga y descarga de maquinaria, verificación de *stocks*...
- Actividades **militares**: transporte de víveres, apoyo logístico a tropa de infantería, identificación de enemigos...
- **Entretenimiento y educación**: retomando el concepto animatrónica, se trataría de simular el movimiento de seres imaginarios para su aparición en películas de ciencia ficción; tareas formativas para futuros técnicos e ingenieros en robótica, mecatrónica o automatización industrial...

De entre todo este conjunto de aplicaciones de la robótica y toda vez que este trabajo está enfocado hacia el sector de la **edificación** ([Bock T, 2015](#)), parece obvio profundizar un poco más en esta línea de trabajo, que además presenta un ingente potencial de aplicación. Indudablemente, las ventajas de la aplicación de la robotización hacia el sector de edificación se traducen en un preciso dimensionamiento del edificio en términos de funcionalidad y coste; fomento de la innovación y creatividad; incremento de la eficiencia energética al disminuir las necesidades de energía y recursos humanos y por ende, los costes finales de producción; incremento de la precisión en términos técnicos (espacios, materiales, equipos precisos...); mayoración de la calidad del producto final a ojos del cliente y aumento de su ciclo de vida útil; apertura hacia nuevas técnicas de construcción basadas en la modularidad, prefabricación e impresión 3D; mejora de la competitividad, especialmente a nivel internacional, y disminución de residuos tras su demolición; brutal incremento de la disponibilidad de “mano de obra” para reducir los tiempos de construcción; disminución de riesgos laborales, etcétera.

Entre las tareas más inmediatas en las que la robótica implementa mejoras en la construcción, se pueden enumerar un sinnúmero de ellas: automatización del proceso constructivo; movimiento de tierras; colocación de ladrillos y paneles aislantes; proyección y pulverización de aislamiento térmico y mortero; pintado de grandes techos y superficies; instalación de vidrios; soldadura de estructuras metálicas; fabricación de encofrados; control de calidad de producto terminado; demolición de construcciones avejentadas y así un largo etcétera.

Figura 3.24. Aplicación de robótica en edificación (fuente: Construction Robotics)

Por último, y vinculado también de forma directa con la edificación, se puede ahondar en la denominada robótica de **monitorización** ([Kurkin A.A. et al., 2017](#)): es aquella vertiente de la robótica en la cual los robots (ya sean de análisis aéreo, marítimo o terrestre) están dotados de equipos de medición y captura masiva de datos; sensores de temperatura, presión, humedad relativa del aire, velocidad de viento, cantidad de lluvia recibida, irradiancia, campos electromagnéticos, redes inalámbricas, calidad del aire, presencia de nubes y aerosoles, radiación nuclear, termografía infrarroja, posicionamiento GPS, aceleración en las tres direcciones del espacio, nivel de presión sonora, niveles de acidez, conductividad eléctrica y térmica... Todo ello con el objetivo de evaluar de forma sistemática y/o periódica uno o varios elementos tecnológicos, biológicos o ambientales, al fin de conocer su evolución en el tiempo y así anticipar la aparición de comportamientos atípicos; construir modelos físicos basados en innovaciones tecnológicas; crear series de datos temporales y niveles básicos de referencia que se almacenan en bases de datos; inferir resultados y comparar fuentes de datos; validar y complementar prototipos teóricos; gestionar y conservar ecosistemas; contrastar el cumplimiento de objetivos propuestos inicialmente.

Entre los desarrollos tecnológicos más avanzados hasta la fecha, destacan los alcanzados por robots tales como los focalizados hacia la supervisión del estado de cosechas; inspección de infraestructuras (líneas de alta tensión, plantas fotovoltaicas y termosolares); predicción de fenómenos meteorológicos; análisis de la calidad de aguas marinas y fluviales...

Figura 3.25. Monitorización robotizada: agua, tuberías y paneles (fuente: ETSII UPM)

3.4 Edificación sostenible

La generación **distribuida**, que también presenta como sinónimos las acepciones de generación *in situ*, descentralizada, embebida o dispersa, es principalmente la producción de energía eléctrica a través de múltiples y poco potentes (entre 3 kW y 10 MW) fuentes energéticas en ubicaciones cercanas a los puntos de consumo ([Soheyli S. et al., 2017](#)). Entre las características de la misma, es factible destacar que se logra una importante reducción de pérdidas en la red (se reducen tanto las distancias como los flujos eléctricos); la energía inyectada no provoca reversión de flujos hacia la red de transporte; y suele estar conformada por una elevada multiplicidad de fuentes energéticas distintas, principalmente de origen renovable. En la actualidad, los denominados países industrializados producen la mayor parte de su energía eléctrica en potentes instalaciones centralizadas (de combustible fósil, hidroeléctricas o nucleares). Estas grandes centrales ofrecen rendimientos económicos excelentes por economías de escala productiva, pero distribuyen la energía eléctrica típicamente a muy grandes distancias, de manera que ahí el rendimiento energético-medioambiental es pobre. Así, las plantas de producción eléctrica se posicionan en ubicaciones función de factores económicos, seguridad ante sabotajes o atentados, derivados de aspectos medioambientales y vinculados con logística o suministro de combustibles, cursos de agua, recurso solar o eólico...: la energía se produce lejos de donde es consumida.

Figura 3.26. Principio topológico de generación distribuida (fuente: Smart grids info)

Por contra, la generación distribuida ofrece otro **paradigma** realmente novedoso: minora la cuantía de energía perdida en las redes de transporte de electricidad al ser generada cerca topológicamente hablando de los puntos donde es consumida (quizá incluso en el mismo punto de producción). En añadidura, esto provoca que disminuya el tamaño y número de líneas de alta tensión que deben ser enclavadas en el terreno, así como los costes asociados a dicho montaje y mantenimiento. Y en esta misma línea de pensamiento, cabe añadir que las fuentes de energía con planes de tarifa regulada (FIT) poseen bajo mantenimiento, poca contaminación y muy elevada eficiencia energética, inalcanzables para grandes plantas de producción de electricidad.

En efecto, los actuales sistemas embebidos de energía distribuida pueden entregar estas prestaciones mediante operaciones automatizadas y sistemas de energía renovable (solar en sus dos variantes fotovoltaica y termosolar, eólica, geotérmica, maremotriz o undimotriz...). Esto robustece el comportamiento de la red eléctrica, evita la importación de recursos energéticos no autóctonos, minora la emisión de gases de efecto invernadero, genera empleo y conocimiento local.

Afortunadamente parece que cobra cada vez más fuerza la generación distribuida y las redes de distribución, razón por la cual cada vez se están dedicando más esfuerzos tecnológicos y económicos al análisis del impacto que genera la generación distribuida en redes de distribución convencionales a las cuales se conecta. Dicha diagnosis se centra en el estudio de incentivos a las tecnologías de generación descentralizada para su desarrollo en términos de mecanismos regulatorios (tarifas, primas, incentivos...); cuantificación de inversiones; planificación de la distribución; dimensionamiento de potencias de cortocircuito en red; programación de servicios complementarios (regulación frecuencia-potencia, control tensión-potencia reactiva); estimación de pérdidas en la red; planificación de tareas de operación y explotación; establecimiento de protocolos de seguridad del personal de mantenimiento. Como toda tecnología, la generación distribuida presenta ventajas e inconvenientes.

Entre las **ventajas** explícitas se citan la que siguen:

1. Ayuda en la preservación del medio ambiente al emplear principalmente fuentes de energía renovable y respetuosa.
2. Descongestión en los sistemas de distribución energética.
3. Aplazamiento en la necesidad técnica de readecuación de las infraestructuras de transmisión.
4. Robustecimiento del suministro energético en períodos de alta demanda, mejorando con ello la fiabilidad de la red eléctrica.
5. Mejora de la calidad del servicio eléctrico ofertado al cliente.
6. Brusca caída de los costes de inversión en transmisión y distribución eléctrica.

Entre los principales **inconvenientes**, es también preciso citar:

1. Posibles fluctuaciones del voltaje que puede afectar negativamente a consumidores cercanos a las pequeñas plantas de generación.
2. Ineludible necesidad de complejos sistemas de telemetría y adquisición de datos para medir energía inyectada y facturación de la producción.

3. Elevado coste económico inicial para el inversor.
4. Falta de estándares y normativa para la conexión de los pequeños generadores. A modo de muestra, es interesante citar que entre los requerimientos legales para la generación distribuida, el estado de Colorado en EE.UU. fue pionero en 2010 en la promulgación de legislación de obligado cumplimiento para lograr que en 2020 al menos un 3% del total de energía consumida proviniese de generación distribuida.

En el estado actual de la tecnología, las **soluciones** adoptadas como fuentes de energía distribuida (FED) son, como ya se ha anticipado, plantas de producción energética a pequeña escala concebidas inicialmente como alternativas o ayuda a las clásicas centrales de generación. De entre todas ellas, se destacan las siguientes alternativas, bien para inyección a red y/o para autoconsumo:

- **Solar fotovoltaica:** energía generada por paneles solares fotovoltaicos ubicados en tejados o integrados en cubiertas de edificaciones o en mitad de terrenos rurales, bien estáticos o con seguimiento a uno o dos ejes ([Sampaio P.G.V. y González M.O.A., 2017](#)). Es una tecnología ya madura con un decrecimiento sostenido en los precios del vatio-pico instalado y que prácticamente duplica su capacidad instalada cada dos años. La tecnología predominante es el silicio (monocristalino, policristalino y amorfo, en sentido decreciente de precio) si bien es cierto que la llamada película fina avanza con paso firme en su despliegue comercial. En los últimos lustros, la solar fotovoltaica ha demostrado notables incrementos en la eficiencia de conversión energética (irradiancia solar en electricidad en continua), que unido a la ya mentada reducción progresiva de precios, permite muy significativas tasas de retorno de inversión, hasta el punto de haber ya alcanzado la ansiada paridad de red o *grid parity* en hasta diecinueve países: esto es, la generación eléctrica de electricidad a un coste igual e incluso inferior al precio generalista de la electricidad de la red producida con combustibles fósiles. Como punto débil, cabría citar el mismo que el de la mayoría de las energías renovables: su alta variabilidad (función de la meteorología) y difícil gestionabilidad, que no debe hacer desmerecer sus grandes ventajas: nulo coste de combustible (la radiación solar es el artífice de la generación eléctrica), la inexistente contaminación que provoca en operación, su fiabilidad y seguridad.

Figura 3.27. Diseño 3D de panel solar fotovoltaico (fuente: GrabCAD)

- **Minieólica:** constituida por pequeños pero versátiles y fiables generadores eólicos ([Tummala A. et al., 2016](#)), de bajo coste de mantenimiento y también nula emisión de gases de efecto invernadero, en combinación con baterías o acumuladores eléctricos para los momentos de baja o nula aportación de viento. En el momento actual presentan aún un coste de instalación y mantenimiento levemente mayor por unidad de potencia que las centrales clásicas, a excepción de zonas geográficas con abundante recurso eólico en los cuales los *ratios* de generación aumentan notablemente.

Figura 3.28. Diseño 3D de mini-aerogenerador eólico (fuente: GrabCAD)

Se presenta además la ventajosa circunstancia de que la energía eólica suele complementarse muy bien con la solar fotovoltaica: en días no soleados suele aparecer viento y viceversa, con lo cual la posibilidad de hibridación de sistemas eólico-fotovoltaicos, supone un intangible muy valioso para ambas tecnologías renovables.

- **Microcogeneración:** tecnología que se podría considerar “hermana pequeña” de las grandes plantas de cogeneración, la micro-cogeneración emplea microturbinas de combustible o motores de combustión interna alternativos para la activación de los generadores eléctricos. El calor residual generado es empleado para calentar aire, agua, o activar un ciclo de refrigeración (típicamente por absorción) para aire acondicionado. Y de esta forma toma verdadero sentido la palabra cogeneración al obtener dos efectos energéticos útiles: electricidad y calor. Ciertamente es que presentan las desventajas de la emisión de gases procedentes del combustible fósil (gas natural, fuelóleo), ofrecen una irregular fiabilidad, y el coste unitario por unidad de potencia es mayor que el de las centrales comerciales productoras; hechos que no deben minorar los excelentes costes de mantenimiento.
-

- **Minihidráulica:** nuevamente a imagen y semejanza de las grandes centrales hidroeléctricas, desde hace ya años ha madurado la tecnología de minicentrales tipo Pelton ([Židonis A. y Aggidis G.A., 2015](#)) situadas en cursos de ríos incluso no especialmente caudalosos y que no precisan grandes saltos de agua. Parecen estar erigiéndose como alternativa a zonas rurales con abundancia de riachuelos y alejadas de líneas de distribución eléctrica.

Figura 3.29. Diseño 3D de turbina Pelton (fuente: GrabCAD)

- **Pila de hidrógeno:** una de las mejores apuestas que la humanidad debería afrontar es la llamada transición a la economía del hidrógeno ([An L. y Chen R., 2017](#)). Este elemento químico (el más abundante del universo, virtualmente inagotable) es el elemento clave de cierre para lograr la completitud de las energías renovables en toda la cadena de valor energética (al menos, podría serlo así hasta que tecnológicamente se desarrollen sistemas de almacenamiento energético de alta capacidad). Bien como combustible libre de CO₂ en su combustión, bien como elemento indispensable para la generación eléctrica en pilas de combustible con membranas selectivas.

Figura 3.30. Pila de hidrógeno (fuente: GrabCAD)

Vinculado de forma inequívoca a las redes distribuidas, es necesario hablar de otro concepto: las denominadas **redes inteligentes** o *smart grids* ([Bayindir R. et al., 2016](#)) retomando nuevamente el vocablo en inglés. Se puede definir como la integración dinámica de los actuales desarrollos tecnológicos en ingeniería electrotécnica (en materia de producción, transporte, distribución y comercialización), junto con los avances en las tecnologías de la información y comunicación (TICs). El fin último es aunar tareas tales como coordinación de protecciones, regulación, control, instrumentación, medición y calidad de la energía, para de esta forma disponer de un sistema de gestión centralizado que realice un uso eficiente de la electricidad. Adicionalmente, la actual situación de deterioro del planeta debido a la acción del ser humano, hace que sea imprescindible la intervención de las energías renovables, como único camino hacia un verdadero desarrollo sostenible.

Pero es más, amén de la generación y distribución eléctricas, dentro de las redes inteligentes hay cabida de otras fuentes y soluciones energéticas (gas natural y sistemas de *district heating* o calefacción distribuida, por ejemplo) e incluso de suministros habituales en nuestras viviendas (agua, telefonía, internet...) para formar parte de un concepto más global conducente a lo que ya empieza a conocer como **ciudades inteligentes** o *smart cities*, todo ello bajo el modelo distribuido de la tecnología informática. La repetida denominación del vocablo inteligente viene asociada a la existencia de medidores de consumo avanzados, suficientemente versátiles como para ofrecer medición en tiempo real, facturación pormenorizada por franjas horarias, históricos de consumo... herramientas todas ellas de tremenda utilidad para el consumidor, que dispone de información fidedigna para tomar decisiones en cuanto a empresa suministradora de preferencia, horas prioritarias de consumo y origen de dicha energía en cuanto a su renovabilidad. Para una óptima gestión de la red, toda esta información no es sino otra gran ventaja, pudiendo mapear de forma precisa la demanda energética para acoplar pertinentemente la oferta anticipándose así a las necesidades reales, ahorrado energía superflua, minorando costes, aumentando el nivel de usabilidad y transparencia energética. Máxime en un entorno cambiante como el actual, en el que ciudadanos y empresas no solo pueden ser consumidores, sino también productores energéticos, presentándose una bidireccionalidad en la generación-consumo que se podría catalogar como de inédita hasta la fecha.

Una vertiente vinculada a la generación y distribución eléctrica del futuro, lo constituye el denominado **autoconsumo**: esto es, la producción individual de energía eléctrica para el propio consumo a través de fuentes de generación propias. Esta actividad puede ser materializada tanto por individuos y familias como compañías y entidades públicas, si y solo si la electricidad generada solo la empleen para su propio consumo. Gracias a los actuales desarrollos tecnológicos y la economía de escala, el coste de la energía generada por autoconsumo se ha reducido notablemente: solar fotovoltaica, solar termoeléctrica de pequeño tamaño, minieólica, cogeneración y trigeneración y minihidráulica, son las soluciones tecnológicas que mayor aplicación tienen en el momento actual. La situación es tal, que el coste de la electricidad por autoconsumo ha disminuido lo suficiente como para lograr que sea atractiva económicamente hablando incluso sin subvenciones.

Entre las **ventajas** del autoconsumo respecto al consumo típico de la red se encuentran las que seguidamente se enumeran:

- Con el progresivo abaratamiento de la generación eléctrica por autoconsumo y el encarecimiento de las tarifas eléctricas de las grandes compañías productoras, ya es más barato que uno mismo genere su propia electricidad habiéndose reducido además los tiempos de recuperación de capital.
- Se minora la dependencia de las compañías eléctricas, que a su vez suelen generar su electricidad de materias primas contaminantes y no sostenibles (petróleo, carbón, uranio) y que generan dependencia del exterior.
- Por el contrario, los sistemas de autoconsumo emplean fuentes gratuitas, inagotables, limpias y respetuosas con el medioambiente, tales como la solar, eólica, geotérmica e hidráulica.
- Se construye un sistema distribuido de generación eléctrica que minora la necesidad de invertir en costosas infraestructuras; y se reducen las pérdidas por el transporte de la electricidad a través de la red de distribución.
- Se evitan los riesgos de abastecer toda la demanda energética en hora punta, que suelen traducirse en caídas de tensión y cortes de electricidad.
- Se minimiza el impacto visual y medioambiental de las instalaciones eléctricas en el entorno en el cual se ubican.

Hasta hace escasos años, uno de los principales **obstáculos** para la implantación del autoconsumo era el elevado coste de inversión en los sistemas necesarios, hecho que afortunadamente ha dejado de serlo tal y como antes se anticipaba. Otro obstáculo habitual, era la intermitencia de la generación de electricidad a partir de energías renovables (no se generará electricidad solar por la noche, ni energía eólica los días sin viento, por ejemplo), siendo necesario un sistema de almacenamiento en caso de instalaciones aisladas. Decimos que era un obstáculo, en pasado, porque los avances técnicos en baterías han soslayado este inconveniente; y en el caso de sistemas de autoconsumo conectados a red con normas que regulen un suministro eléctrico de balance neto (producción o inyección según la necesidad), no debe suponer un problema.

En nuestro país esta última circunstancia sí podría suponer un inconveniente, toda vez que está pendiente de aprobación la regulación que autorice el autoconsumo con balance neto. La Disposición Adicional Segunda del Real Decreto 1699/2011 de 18 de noviembre, por la cual se regula la conexión a red de instalaciones de pequeña potencia, no establece las condiciones administrativas, técnicas y económicas del consumo de la energía eléctrica generada por un consumidor para su propio uso, si éste a su vez dispone de enganche a la red eléctrica con proveedores externos.

Figura 3.31. Instalación fotovoltaica de autoconsumo (fuente: Extendaplus)

Todos los conceptos anteriores confluyen en uno relativamente novedoso pero de extrema importancia: **edificio de consumo de energía casi nulo (EECN)**. En efecto, en los últimos años y tras el advenimiento de conceptos tales como eficiencia energética y residencial, aparece el anterior término, ya ampliamente adoptado por los profesionales del sector, pero de implicaciones desconocidas por el ciudadano de a pie. No en vano, ya la directiva europea 2010/31 relativa a la eficiencia energética de los edificios, se introduce una definición de EECN: aquel edificio con un rendimiento muy alto de energía, donde la casi nula o muy baja cantidad de energía requerida debe ser ampliamente cubierta por fuentes renovables en el lugar o cerca del mismo. Ahora bien, la propia Unión Europea fija que cada Estado Miembro puede y debe establecer una definición propia nacional de EECN conforme a las características de su propio parque inmobiliario. Y en nuestro país aún no se ha hecho esta trasposición, algo que empieza a preocupar al sector de la construcción: a partir del 31 de diciembre de 2020 todos los nuevos edificios privados que se construyan serán de consumo de energía casi nulo, fecha que se adelanta en dos años para los de titularidad pública.

En este sentido, un reciente informe del organismo europeo sin ánimo de lucro e independiente BPIE (*Buildings Performance Institute Europe*), resume la situación actual de los diferentes Estados Miembros para confeccionar su propia **definición** EECN, resaltando cuán importante es el vínculo existente entre la aplicación gradual y promoción en el ámbito inmobiliario de EECN. Hasta el momento actual, la definición de EECN está disponible en 15 países... pero desafortunadamente, en nueve de ellos (entre ellos España) el concepto aún es objeto de debate y no se ha terminado de fijar de forma sólida su definición e implicaciones. Es fundamental que esto suceda para que las empresas constructoras de nuestro país puedan trabajar en la construcción de un modelo de edificio energético para los países del entorno mediterráneo.

El informe del BPIE señala en añadidura, una importante diferencia entre las estrategias de los Estados Miembros en cuanto a los edificios de nueva construcción y los ya existentes que precisan una **rehabilitación**. Así, solo ocho naciones tienen establecidos requisitos EECN para edificios que sean objeto de reforma integral. Y si bien es cierto es que aunque todavía no existe una definición completa de EECN en España, no es correcto afirmar que no se están implantando estrategias hacia este objetivo ya que la Administración está realizando una progresiva aproximación al concepto, como demuestra una primera modificación que tuvo lugar en 2013 del Documento Básico de Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación (CTE) que modificó completamente la manera de plantear criterios energéticos respecto al año 2006 en que fue promulgado dicho CTE. Así, se ha fijado indicadores válidos para proseguir hacia la anhelada definición de EECN, incluyendo un nuevo indicador de energía primaria no renovable, así como un enfoque más prestacional en el cual los técnicos tienen mayor flexibilidad para implantar soluciones tecnológicas que cumplan los requisitos precisos.

¿En qué se traduce un EECN desde el punto de vista arquitectónico? Las exigencias de demanda energética apuntan claramente hacia el futuro en cuanto a **reducción de consumos de energía primaria** ([Copiello S. y Gabrielli L., 2017](#)). Así, en el caso de nueva construcción, los requisitos de consumo energético en edificación residencial respecto al CTE de 2006 (en el cual no existía este requerimiento) implica una minoración media del consumo para vivienda plurifamiliar comprendido entre un 18% y un 44% según la zona climática. Siendo conscientes además, de que es más fácil construir un EECN nuevo conocidas su ubicación y orientación, por la facilidad en emplear materiales nuevos y tecnologías integradas en la fase de diseño, que llevar este concepto al ámbito de la rehabilitación, toda vez que hay menos margen de maniobra para realizar modificaciones sustanciales en el edificio.

Desde el punto de vista de los **indicadores técnicos** que atestiguan que un edificio entra en la categoría de EECN, en España disponemos de tres tipos, si bien es cierto que los expertos del sector opinan que el óptimo será emplearlos de forma complementaria:

- Emisiones de CO₂ con desglose de emisiones totales y desagregadas por usos: calefacción, acondicionamiento de aire, producción de ACS e iluminación.
- Consumo de energía respecto energía primaria total y la energía primaria procedente de fuentes renovables, también desglosada por usos.
- Demanda energética relativa a calefacción y acondicionamiento de aire.

El método a seguir para calcular la **eficiencia energética** de cada edificio es también objeto de profundo análisis por parte del informe del BPIE, destacando los usos finales más relevantes que deben incluirse para edificios residenciales y que ya se han mencionado: calefacción, ACS, acondicionamiento de aire, ventilación e iluminación. Solo unos pocos países incluyen el consumo eléctrico de electrodomésticos (Austria, por ejemplo), el consumo de energía de ascensores y el de grupos hidráulicos de impulsión.

Obviamente, la circunstancia ideal se presentaría cuando fuese factible poder incluir todo tipo de consumos en la valoración de necesidades energéticas del edificio, pues no en vano, el consumo de los electrodomésticos no es baladí: puede representar hasta un 19% del consumo eléctrico del hogar. Recuérdese que el sector de la construcción es clave en el contexto energético tanto nacional como comunitario y en términos de consumo total y específicamente eléctrico, representa respectivamente un 17% y 25% a nivel nacional.

En **conclusión**: la terna generación distribuida, autoconsumo y redes inteligentes, junto al aporte de indudable valor de las energías renovables y la cercana legislación de edificio de consumo casi nulo, no representa sino una inmejorable oportunidad para modernizar la tecnología de generación y distribución energética para todo el siglo XXI, tomando como modelo la explosión de las comunicaciones electrónicas que se ha vivido en los últimos años. El desafío se centra en la integración de pequeños productores energéticamente renovables en la red eléctrica nacional, siendo capaces de regular su variabilidad de producción. Y la esperada bajada de costes de fabricación de las tecnologías presentes y futuras, podrá representar un notable cambio en la topología de red (desde la actual centralización hasta una importante generación distribuida) y en los modelos de negocio de las actuales empresas eléctricas, que podrán focalizar su esfuerzo en rediseñar las redes eléctricas del futuro de forma inteligente (automatización de la distribución, telemetría avanzada, diagnosis remota de averías, lectura en tiempo real y facturación de consumo gracias a contadores avanzados, I+D vinculada al banda ancha sobre líneas eléctricas, transmisión inalámbrica de electricidad, mejora de la calidad de suministro en redes de área extensa, etc.).

BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 3

- [1]. Li H.; Lian Y.; Wang X.; Weibin Ma W.; Zhao L. Solar constant values for estimating solar radiation. *Energy*, Volume 36, Issue 3, March 2011, pp. 1785-1789.
 - [2]. Vindel J.M.; Polo J.; Zarzalejo L.F. Modeling monthly mean variation of the solar global irradiation. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 122, January 2015, pp. 108-118.
 - [3]. Norgard J. The Electromagnetic Spectrum. National Association of Broadcasters Engineering Handbook (Tenth Edition), 2007, pp. 3-10.
 - [4]. Polo J. Solar global horizontal and direct normal irradiation maps in Spain derived from geostationary satellites. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volumes 130–131, August 2015, pp. 81-88.
 - [5]. Fraser C. Heavenly Mathematics: The Forgotten Art of Spherical Trigonometry. *Historia Mathematica*, Volume 44, Issue 1, February 2017, pp. 71-73.
 - [6]. Brownson J.R.S. Sun-Earth Geometry. *Solar Energy Conversion Systems*, 2014, pp. 135-178.
 - [7]. Kittler R.; Darula S. Determination of time and sun position system. *Solar Energy*, Volume 93, July 2013, pp. 72-79.
 - [8]. Fernández-Ahumada L.M.; Casares F.J.; Ramírez-Faz J.; López-Luque R. Mathematical study of the movement of solar tracking systems based on rational models. *Solar Energy*, Volume 150, 1 July 2017, pp. 20-29.
 - [9]. Wang Y.; Zheng W.; Sun S.; Li L. X-ray pulsar-based navigation system with the errors in the planetary ephemerides for Earth-orbiting satellite. *Advances in Space Research*, Volume 51, Issue 12, 15 June 2013, pp. 2394-2404.
 - [10]. Kwan T.H.; Wu X. High performance P&O based lock-on mechanism MPPT algorithm with smooth tracking. *Solar Energy*, Volume 155, October 2017, pp. 816-828.
 - [11]. Barbieri G.; Goldoni G.; Borsari R.; Fantuzzi C. Modelling and Simulation for the Integrated Design of Mechatronic Systems. *IFAC-PapersOnLine*, Volume 48, Issue 10, 2015, pp. 75-80.
 - [12]. Cardoso da Silva N.; Maurício Rosário J.; Lima C.R.E. Computer Aided Choice for DC Motors of Antropomorphics Robots. *IFAC Proceedings Volumes*, Volume 33, Issue 26, September 2000, pp. 493-497.
 - [13]. Hayati S.; Rankin A.; Kim W.; Leger P.; Ali K. Advanced robotics technology infusion to the NASA Mars exploration Rover (MER) project. *IFAC Proceedings Volumes*, Volume 40, Issue 15, 2007, pp. 180-185.
-

- [14]. Bock T. The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics. *Automation in Construction*, Volume 59, November 2015, pp. 113-121.
- [15]. Kurkin A.A.; Tyugin D.Y.; Kuzin V.D.; Chernov A.G.; Zeziulin D.V. Autonomous Mobile Robotic System for Environment Monitoring in a Coastal Zone. *Procedia Computer Science*, Volume 103, 2017, pp. 459-465.
- [16]. Soheyli S.; Mehrjoo M.; Mayam M.H.S. Modeling and optimal resources allocation of a novel tri-distributed generation system based on sustainable energy resources. *Energy Conversion and Management*, Volume 143, 1 July 2017, pp. 1-22.
- [17]. Sampaio P.G.V.; González M.O.A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 74, July 2017, pp. 590-601.
- [18]. Tummala A.; Velamati R.K.; Sinha D.K.; Indrāja V.; Krishna V.H. A review on small scale wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 56, April 2016, pp. 1351-1371.
- [19]. Židonis A.; Aggidis G.A. State of the art in numerical modelling of Pelton turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 45, May 2015, pp. 135-144.
- [20]. An L.; Chen R. Mathematical modeling of direct formate fuel cells. *Applied Thermal Engineering*, Volume 124, September 2017, pp. 232-240.
- [21]. Bayindir R.; Colak I.; Fulli G.; Demirtas K. Smart grid technologies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 66, December 2016, pp. 499-516.
- [22]. Copiello S.; Gabrielli L. Analysis of building energy consumption through panel data: The role played by the economic drivers. *Energy and Buildings*, Volume 145, 15 June 2017, pp. 130-143.

LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 3

Figura 3.1. Sistema solar (fuente: Space.com).....	64
Figura 3.2. Datos notables en distancia Tierra-Sol (fuente: autor)	65
Figura 3.3. Inclinación de plano de eclíptica (fuente: Censolar)	66
Figura 3.4. Consideraciones geométricas terrestres (fuente: Univ. Cantabria).....	67
Figura 3.5. Espectro electromagnético de radiación solar (fuente: Solarpraxis)	68
Figura 3.6. Balance neto de radiación recibida (fuente: Universidad Cantabria)	69
Figura 3.7. Pirheliómetro, heliógrafo y piranómetro (fuente: Direct Industry).....	70
Figura 3.8. Resolución espacial de niveles de irradiancia (fuente: CIEMAT)	71
Figura 3.9. Mapa de radiación: España y Portugal (fuente: Institute for European Studies).....	72
Figura 3.10. Fundamentos de trigonometría esférica (fuente: Wikipedia)	75
Figura 3.11. Declinación (fuente: ETSII UPM).....	76
Figura 3.12. Azimut solar (fuente: ETSII UPM).....	76
Figura 3.13. Ángulo horario (fuente: ETSII UPM)	77
Figura 3.14. Elevación (fuente: ETSII UPM).....	77
Figura 3.15. Latitud y longitud (fuente: Censolar)	78
Figura 3.16. Gráfico 3D del posicionamiento solar para latitud 40,4° (fuente: Sunpath3D)	79
Figura 3.17. Gráfico 2D del posicionamiento solar para latitud 40,4° (fuente: Solarpraxis)	79
Figura 3.18. Seguimientos E-O y N-S (fuente: Solarpraxis)	80
Figura 3.19. Colectores cilindro-parabólicos con seguidor a un eje (fuente: Solar-energy).....	82
Figura 3.20. Discos Stirling con seguidor a dos ejes (fuente: Solar-energy).....	82
Figura 3.21. Robot industrial de 4ª generación (fuente: Kuka Robotics)	84
Figura 3.22. Robots antropomórfico y zoomórfico (fuente: Boston Dynamics)	86
Figura 3.23. Diseño 3D de Rover Curiosity para el análisis de Marte (fuente: NASA).....	87
Figura 3.24. Aplicación de robótica en edificación (fuente: Construction Robotics).....	88
Figura 3.25. Monitorización robotizada: agua, tuberías y paneles (fuente: ETSII UPM).....	89
Figura 3.26. Principio topológico de generación distribuida (fuente: Smart grids info)	90
Figura 3.27. Diseño 3D de panel solar fotovoltaico (fuente: GrabCAD)	92
Figura 3.28. Diseño 3D de mini-aerogenerador eólico (fuente: GrabCAD)	93
Figura 3.29. Diseño 3D de turbina Pelton (fuente: GrabCAD).....	94
Figura 3.30. Pila de hidrógeno (fuente: GrabCAD).....	94
Figura 3.31. Instalación fotovoltaica de autoconsumo (fuente: Extendaplus)	97

ÍNDICE CAPÍTULO 4

4.	DISEÑO, MODELADO Y SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO.....	104
4.1	Fases del diseño mecatrónico: especificaciones del sistema.....	104
4.2	Diseño 3D de componentes mecánico-óptico-electrónicos	110
4.3	Mapeo de señales y diseño electrónico de circuitos.....	114
4.4	Modelizado de las tareas de control	118
4.5	Programación de las tareas de control	125
4.6	Simulación estática del prototipo frente a solicitaciones físicas	138
4.5.1	Determinación de presión ejercida por el viento	141
4.5.2	Cálculo de fuerzas netas sobre la estructura	144
4.5.3	Pre-procesado	148
4.5.4	Mallado y distribución de esfuerzos	148
4.5.5	Resultados en tensiones: conclusiones	150
4.7	Simulación óptica de colectores.....	154
4.7.1	Definición de factor de forma solar	156
4.7.2	Definición de propiedades óptico-dimensionales de colectores	157
4.7.3	Trazado de haces de rayos y obtención de resultados	162
	BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 4	168
	LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 4	171
	LISTA DE TABLAS CAPÍTULO 4	173

4. DISEÑO, MODELADO Y SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO

4.1 Fases del diseño mecatrónico: especificaciones del sistema

La conocida como **ingeniería mecatrónica** no es tanto una disciplina de reciente creación como ya estudió en el capítulo anterior de este trabajo, como un concepto que integra sinérgica e interactivamente tareas de la ingeniería mecánica de precisión, ingeniería electrónica (la “fusión” de ambos vocablos es quien da origen al nombre), ingeniería de control automático y por último, ingeniería informática. Su objetivo último es el diseño conceptual y desarrollo práctico de dispositivos, sistemas y/o procesos inteligentes que vinculen las anteriores líneas de conocimiento, revelándose por tanto como una materia caracterizada principalmente por la versatilidad y multidisciplinariedad.

Surge para dar respuesta a tres **necesidades** de la industria moderna: automatización creciente de la maquinaria; creación de productos inteligentes y autónomos; y armonización de componentes mecánicos y electrónicos en multitud de dispositivos actuales (por ejemplo, la robótica) en un entorno que demanda como retos añadidos el desarrollo sostenible; la economía de recursos; y la aportación de valores añadidos (amigabilidad del proceso de parametrización, calidad en su desempeño, funcionalidad, innovación en el diseño así como adaptabilidad a necesidades emergentes). Si en efecto se consiguen aunar todos los objetivos anteriores, ello no puede sino redundar de manera muy positiva en objetivos tales como mejora continua de la sociedad, adquisición de compromisos éticos con el impacto ambiental de las actividades humanas, generación de nuevas soluciones basadas en la creatividad, promoción de la innovación y mejora continua de resultados, apoyo a la competitividad de las empresas e incremento de la fiabilidad de los bienes de equipo puestos a disposición de la industria.

Dicho lo anterior, es fundamental definir las **fases** ([Schuh G. et al., 2016](#)) del diseño mecatrónico del prototipo de seguidor termosolar híbrido paraboloide y cilindro-parabólico de esta Tesis, etapas que de forma pormenorizada se describen a continuación y sobre las cuales gravitan el resto de capítulos del escrito:

1. Especificaciones del sistema: es decir, definir todo el conjunto de requisitos que debe cumplir el dispositivo mecatrónico objeto de definición.
2. Diseño en paralelo y de forma coordinada de los componentes mecánicos, eléctrico-electrónicos, soporte físico y lógico (*hardware* y *software*) y estrategias de control.
3. Modelización del prototipo virtual, generalmente mediante el auxilio de diseño asistido por ordenador o *Computer Aided Design* (CAD) en su denominación inglesa ([González-Lluch C. et al., 2017](#)) entendido en sentido amplio y al objeto de realizar el mayor número posible de análisis del dispositivo antes de que siquiera exista. Dicho diseño se complementa con el auxilio de programas de simulación mecánica, dinámica y electrónica y la programación de maniobras de regulación y control.

4. Fabricación de prototipo real y sometimiento al mismo a una serie de ensayos que garanticen su funcionamiento conforme a requisitos de diseño preestablecidos.
5. Producción real, analizando tareas propias de la Organización de la Producción: disposición en planta de los bienes de equipo y establecimiento de las rutas de producción; previsión de la demanda; gestión del stock; optimización de recursos...
6. Prestación de soporte posventa, diseño de actividades de mantenimiento, diagnóstico de averías, identificación de fallos de fabricación, propuesta de mejoras...
7. Desarrollo de ingeniería en materia de uso sostenible de recursos, reciclaje de los mismos terminada su vida útil, minoración del uso de la energía precisa, análisis de nuevos materiales reciclables...

Figura 4.1. Fases del diseño mecánico (fuente: National Instruments)

Mediante esta secuencia de trabajo, se alcanzan los criterios más relevantes a considerar en todo proceso de diseño mecánico. El punto de inicio siempre será el planteamiento de la necesidad a través de ideas abstractas, que se plasmarán posteriormente en bocetos a modo de base para optar por la opción más factible. Es crítico ser consciente que desde el mismo instante de trazar los antedichos bocetos se debe ser consciente de las dificultades y retos a los cuales se va a enfrentar el diseñador del producto mecánico: es crucial poseer una formación **multidisciplinar** para acometer con probabilidades de éxito ese desafío. Y buena parte del éxito posterior estriba en la confección previa de prototipos virtuales como en la propia Tesis se desea hacer: conseguir simular el comportamiento físico del sistema en el espacio tridimensional es una fase fundamental en la detección de posibles errores previos de diseño (distancias, tolerancias, materiales, colisiones, incongruencias...). Y sin atisbo de duda, igualmente importante es tener un control sincronizado de los desplazamientos, aceleraciones y sobreaceleraciones de las partes móviles del mismo, integrados tanto mecánica como electrónicamente gracias a unos algoritmos de control adecuados, soportados bajo hardware y software idóneos para la tarea en cuestión. Todo ello incrementa notablemente las probabilidades de éxito.

Llevando ya a la **práctica** todos estos conceptos, desde la fase conceptual hasta la realización de un protocolo de ensayos reales al prototipo de seguidor termosolar y cuyas características ya han sido definidos con anterioridad en epígrafes previos de la presente Tesis (CAPÍTULO 1. Introducción, epígrafe 2. Prolegómenos) es prudente hacer un pequeño alto en el camino y resumir los conceptos que ya se han transmitido:

- Se parte de un primigenio seguidor termosolar (paraboloidal y cilindro-parabólico) desarrollado por el autor hace varios años y dotado de cierta capacidad mecánica para seguir el movimiento del Sol y capturar determinadas variables meteorológicas.
- Se ha reseñado la problemática generada por el cercano agotamiento de recursos energéticos clásicos, así como el indudable impacto medioambiental que su uso continuado ha generado sobre nuestro planeta.
- Se ha reflexionado sobre el futuro de la producción energética y el consiguiente desafío que esto representa para las energías renovables, como indudables protagonistas de este nuevo paradigma.
- Se ha profundizado en el análisis del potencial de la energía solar como verdadera alternativa energética no solo de un futuro cada vez más cercano, sino de un presente real y factible.
- Se ha realizado un completo análisis de las soluciones tecnológicas de la industria solar termoeléctrica desde el punto de geometría de captación, ciclos termodinámicos de potencia y seguimiento solar.
- Se ha esbozado el desarrollo actual de la técnica en cuanto a robótica de monitorización medioambiental, generación distribuida, redes inteligentes, autoconsumo y edificios de consumo casi nulo.

A resultas de todo ello e intentando integrar todas las ideas anteriores, se vuelve al punto de partida de la Tesis en uno de sus **objetivos**: se pretende en este capítulo diseñar, modelizar y simular un prototipo mecatrónico de seguidor termosolar híbrido paraboloidal y cilindro-parabólico a escala, que pueda servir de herramienta para analizar la viabilidad de aplicación de la energía termosolar al sector de la edificación. El mismo debe ser capaz de reproducir los movimientos de seguimiento solar a dos ejes de forma autónoma, así como capturar toda una serie de datos meteorológicos útiles para adquirir conocimiento sobre las futuras instalaciones termosolares. Si se consigue este objetivo, estamos convencidos de que los arquitectos e ingenieros de las próximas décadas, podrán contar con una ayuda adicional de cara a concebir edificaciones más sostenibles energéticamente hablando gracias a los datos y resultados que se puedan inferir.

Desde el punto de vista **funcional**, los sistemas que conforman el prototipo son los que seguidamente se explicitan gráficamente (anticipando su diseño):

- Módulo de **seguimiento**, conformado por sustentaciones, crucetas y perfiles mecánicos de anclaje; engranajes y poleas; servomotor y actuador lineal; colectores paraboloidal y cilindro-parabólico; sensores de inclinación, aceleración e irradiancia en cuatro posiciones diferentes
- Módulo de **control**, constituido por autómata de regulación; cámara de video; sensores (calidad de aire; humedad-temperatura; granizo; velocidad de viento y lluvia; *joystick* de posicionamiento forzado; conmutador de uso y tornillería varia.

Figura 4.2. Planta del prototipo mecatrónico (fuente: autor)

Figura 4.3. Alzado del prototipo mecatrónico (fuente: autor)

Figura 4.4. Vista lateral del prototipo mecatrónico (fuente: autor)

Hablando de su aspecto funcional, cabe preguntarse en este instante qué es lo que hace realmente el prototipo mecatrónico y cómo lo hace. Parte importante de este trabajo trata de dar respuesta a esta pregunta, pero parece interesante esbozar la respuesta para poner en situación al lector, para lo cual se anticipa un bosquejo de lo que es el propio prototipo mecatrónico completo en las siguientes imágenes, si bien posteriormente se pormenorizará un poco más en su diseño.

Así, el **módulo de seguimiento** ([Kuriakose J. y Tharamuttam, 2017](#)) tal y como su propio nombre indica, persigue seguir el movimiento del Sol en dos ejes de actuación (azimut y elevación), bajo la necesidad ya conocida de buscar la máxima perpendicularidad a la incidencia de rayos solares. Tanto el colector paraboloïdal como el cilindro-parabólico, proyectarán los rayos incidentes sobre sus respectivos focos (una pequeña esfera de latón y cilindro) cuyas temperaturas serán posteriormente medidas y almacenadas con los sensores de temperaturas correspondientes.

Dicho seguimiento tiene lugar mediante la medición constante de cuatro sensores de irradiancia posicionados en los extremos de la cruceta de sustentación, de forma que según el algoritmo de seguimiento programado, el autómatá dará la orden al motor paso a paso y/o al actuador lineal para buscar la posición de perpendicularidad deseada (o la de reposo o seguridad ante adversidades meteorológicas). Y se completa su funcionalidad con un acelerómetro y un receptor GPS para conocer en todo momento la ubicación del seguidor.

Figura 4.5. Modelización de tareas: concentración y seguimiento solar (fuente: autor)

Y de manera análoga, el **módulo de control** permite monitorizar y capturar toda una serie de datos meteorológicos ([Burleyson C.D. et al., 2018](#)) útiles para generar, en definitiva, conocimiento válido para la arquitectura e ingeniería. Así, se puede detectar la presencia de granizo, humedad relativa del aire, polución ambiental, viento y lluvia; y se dispone de un conmutador de posición (automática vs forzada) y un mando de posicionamiento de azimut y elevación del seguidor (para aquellas maniobras de mantenimiento o ubicación deseada del investigador).

Figura 4.6. Variables meteorológicas capturables por el prototipo (fuente: autor)

4.2 Diseño 3D de componentes mecánico-óptico-electrónicos

En primer lugar y al objeto de construir una idea general del prototipo global ya diseñado, se incluye una imagen **3D completa** de todos los componentes ensamblados (a excepción del cableado para facilitar la percepción visual del conjunto). Y progresivamente se aborda el trazado de componentes mecánicos, ópticos y electrónicos, respectivamente.

Figura 4.7. Diseño 3D completo del prototipo de seguidor termosolar (fuente: autor)

El diseño de los componentes netamente mecánicos (e incluso electrónicos en su representación tridimensional) del prototipo, ha sido realizado en su inmensa mayoría con el programa informático gratuito y de libre distribución denominado **FreeCAD**, en su última compilación estable a fecha de escritura de estas líneas y lanzada el 18 de abril de 2016 (versión 0.16). La potencia de diseño gráfico 2D/3D; su gratuidad y legalidad de uso; escaso uso de recursos de computación que precisa; posibilidad de emplearlo como herramienta docente y educativa para la

adquisición de la competencia digital; versatilidad de trazados que permite en función de su carácter de programa de diseño paramétrico y la gran comunidad de desarrolladores y usuarios existente en torno a este programa... son razones de peso como para haber optado por esta herramienta de diseño y modelado. En añadidura, se suman otras muchas virtudes que fortalecen la decisión: compatibilidad de conversión con otros formatos estándar de diseño (DXF, SVG, STEP, IGES, STL, OBJ, DAE, SCAD, IV e IFC); **librería** de elementos normalizados existentes y desarrollados de forma nativa con este programa; existencia de bancos de trabajo específicos para distintas líneas de conocimiento; su adaptabilidad a nuevas necesidades a través del lenguaje de programación C++ y *Python*...

Figura 4.8. Interfaz de trabajo de FreeCAD 0.16 (fuente: autor)

En efecto, *FreeCAD* es un programa informático basado en *Open CASCADE* y desarrollado inicialmente por *Juergen Riegel* y *Werner Mayer* compatible con sistemas operativos *Microsoft Windows*, *GNU/Linux* y *Mac OS X*, con licencia *GNU (General Public License)* y disponible en los idiomas inglés, alemán, francés, italiano, español, húngaro, polaco, noruego, neerlandés, eslovaco, croata, afrikaans, ruso, chino simplificado, portugués y sueco. El entorno de trabajo es muy similar al de otros programas informáticos comerciales de diseño 2D/3D (*CATIA*, *SolidWorks*, *SolidEdge*, *MicroStation*, *ArchiCAD* o *Autodesk AutoCAD* e *Inventor* entre otros). Emplea técnicas de modelado paramétrico para definir sus límites y acciones, y está concebido para una arquitectura de software modular, permitiendo añadir de forma rápida funcionalidades adicionales (arquitectura, robótica, elementos finitos...) sin necesidad de modificar el núcleo del sistema. Merece la pena detenerse brevemente en el concepto **diseño paramétrico** ([Camba J.D. et al., 2016](#)), que es sin lugar a dudas uno de los puntos fuertes de esta aplicación: cada elemento del dibujo es tratado como un objeto en sí mismo, estando definido no solo por sus coordenadas espaciales (x, y, z), sino también por sus parámetros característicos (ya sean gráficos o funcionales). Esta característica hace que el programa esté especialmente relacionado con conceptos como **BIM** (*Building*

Information Modeling), en el cual un modelo de este tipo contiene, por así decirlo, el ciclo de vida completo de cualquier construcción arquitectónica, desde el concepto inicial hasta la edificación en sí misma. *FreeCAD*, como otros muchos modernos modeladores CAD tridimensionales, tiene también un banco de trabajo para el dibujo bidimensional, muy útil tanto para el dibujo 2D *per se*, como para su posterior extrusión hasta lograr sólidos en 3D ([Beale R. y Bowers P., 2018](#)).

- **Diseño 3D mecánico:** los componentes que se ha dado en llamar mecánicos lo constituyen las planchas metálicas perforadas a modo de bases; estructuras de sustentación; sistema de transmisión; perfilería de anclaje de colectores paraboloidal y cilindro-parabólico; casquillos y tornillería varia. Alguno de los componentes (especialmente los normalizados) se ha descargado de librerías de piezas 3D obtenidas en internet y otros han sido diseñados con *FreeCAD* a medida para este trabajo. En este sentido, es menester indicar que el trazado de estas piezas se ha hecho en consonancia con materiales y equipos reales que el autor del trabajo ha ido localizando en el mercado de equipamiento científico.

Figura 4.9. Diseño 3D de varios dispositivos mecánicos (fuente: autor)

- **Diseño 3D óptico:** los componentes ópticos son únicamente dos, ambas cuádricas matemáticamente hablando. De una parte, el colector paraboloidal con el posicionamiento de su foco (materializado en una esfera de color negro para un mayor nivel de absorción de irradiancia) y la obvia distancia focal correspondiente. Y, de otra parte, el colector cilindro-parabólico cuyo foco a su vez, es un tramo de cilindro de vidrio hueco y también color negro por las mismas razones esgrimidas anteriormente. Todo ello sustentado a su vez con sencillas placas metálicas y tornillos de fijación.

Figura 4.10. Diseño 3D de dispositivos ópticos (fuente: autor)

- **Diseño 3D electrónico:** es seguramente la parte más compleja del conjunto, no solo por el trazado en sí mismo, sino por la gran cantidad de dispositivos de esta categoría ([Bieker U. y Neumann A., 1996](#)). En primer lugar es menester destacar el diseño del autómata programable, en concreto del fabricante *Arduino*, modelo *Mega*. El mismo se verá interconectado a todo un equipo de sensores ya mencionados con anterioridad al hablar de los sistemas funcionales que conforman el módulo funcional (CAPÍTULO 4. Diseño, modelado y simulación del prototipo mecatrónico, epígrafe 1. Fases del diseño mecatrónico: especificaciones del sistema). Se debe incluir en este subapartado, además, los sistemas motrices (motor paso a paso, actuador lineal); actuadores de movimiento (*joystick*); conmutador (botón) y potenciómetro.

Figura 4.11. Diseño 3D de varios dispositivos electrónicos (fuente: autor)

4.3 Mapeo de señales y diseño electrónico de circuitos

Y es menester complementar el diseño del prototipo con otro programa informático, también de distribución gratuita y legal, denominado **Fritzing**, en concreto en su última versión en el momento de redacción de estas líneas, la 0.9.3b lanzada a la comunidad de usuarios con fecha 2 de junio de 2016. **Fritzing** es *freeware* libre y legal, de ayuda en la automatización conceptual de diseño electrónico de equipos, y que permite migrar de forma sencilla prototipos teóricos (como el de esta Tesis) a productos finales fabricables más fácilmente. Este versátil programa fue concebido bajo los auspicios de *Arduino* y su lenguaje natural de programación *Wiring*, heredero de *Processing* y permite a diseñadores, profesores, investigadores, estudiantes y aficionados a la Electrónica concebir y documentar sus prototipos, así como crear esquemas de circuitos impresos que pueden ser procesados para su ulterior fabricación real.

Figura 4.12. Interfaz de trabajo de Fritzing 0.9.3 (fuente: autor)

como toda buena aplicación informática y en función del desarrollo que *internet* ha tomado en nuestra vida, cuenta con un sitio *web* complementario para compartir bosquejos y/o proyectos electrónicos completos, comentar experiencias personales, prospectar diseños similares a los buscados, descargar nuevos componentes actualizados y en definitiva, crear una comunidad activa de diseñadores electrónicos ([Sun X. y Robaldo L., 2017](#)).

Figura 4.13. Esquema Fritzing conceptual del prototipo (fuente: autor)

Se adjuntan por tanto una **tabla** resumen que “traduce” los anteriores símbolos con los dispositivos reales que el prototipo incorpora, la mayoría de ellos del fabricante *Seeedstudio*; las entradas y salidas del *Arduino Mega* ocupadas; la variable asignada posteriormente en programación; y el sumatorio de entradas y salidas analógicas y digitales. De otra parte, se incorpora una imagen con el esquema **electrónico 2D** completo de los componentes que conforman el prototipo (sensores y actuadores) con la nomenclatura gráfica propia de la base de datos de *Fritzing*. Merece la pena recalcar que en función de la complejidad en el trazado de todas las conexiones y al objeto de simplificar las mismas, se ha recurrido a adquirir dispositivos muy similares a los diseñados pero del fabricante ya mentado *Seeedstudio*, familia de dispositivos *Grove*, que mediante unos ingeniosos conectores rápidos, permite agilizar notablemente el montaje de los mismos. En el momento de redacción de estas líneas, no existe en *Fritzing* una base de datos de estos dispositivos lo suficientemente completa como para haber recurrido a ella. Y de otra parte, sigue pareciendo más interesante representar de forma más “purista” los componentes que el prototipo debe implementar, de cara a una trazabilidad más clara para un futuro lector de la misma que desee reproducir el experimento. También se incluye en tercer lugar un mapa **electrónico** ([Alghazzawi T.F., 2016](#)) de diseño con la simbología estándar para esta línea de conocimiento, para una rápida interpretación por especialistas en la materia. En último lugar, se incluye un ágil **conteo** de las entradas y salidas analógicas y digitales junto con los puertos que el prototipo precisará para su correcto gobierno.

Figura 4.14. Esquema Fritzing electrónico del prototipo (fuente: autor)

Figura 4.15. Contabilización de entradas y salidas en el autómata (fuente: autor)

	E/S	Variable	Función	Símbolo Fritzing	Dispositivo Seedstudio	SUMA
ENTRADAS ANALÓGICAS	A15	SE	Sensor ESTE de radiación (W/m2)			16
	A14	SN	Sensor NORTE de radiación (W/m2)
	A13	SS	Sensor SUR de radiación (W/m2)
	A12	SO	Sensor OESTE de radiación (W/m2)
	A2	V	Velocidad viento (km/h)
	A10 A11	B	Brújula digital 3 ejes
	A0 A1	J	Joystick
	A3	P	Potenciómetro auxiliar
	A4	Tp	Sensor temperatura foco paraboloideal (°C)
	A5	Tcp	Sensor temperatura foco cilindro-parabólico (°C)
	A6	Ta-Hr	Sensor temperatura ambiente-humedad aire (°C - %)
	A7	A	Sensor calidad de aire (ppm)
	A8 A9	Pa	Sensor presión atmosférica (barométrica)
ENTRADAS DIGITALES	D23	E	Estado autómatas (E=0 apagado, E=1 encendido)			5
	D31	CO	Conmutación (CO=0 automático, CO=1 manual)
	D39	S	Reposo-seguridad (S=0 desactivada, S=1 activada)
	D43	C	Sensor lluvia (C=0 no caída, S=1 caída)
	D47	I	Sensor granizo (I=0 no caída, I=1 caída)
SALIDAS ANALÓGICAS	PWM7	BETA	Servo ángulo azimut (°)			3
	PWM11	ALFA	Actuador lineal ángulo elevación (°)
	PWM13	J	Joystick
PUERTOS	TX RX	CA	Cámara digital de visión			4
	SDA SDC	RTC	Reloj en tiempo real

Tabla 1. Mapeo de señales del prototipo termosolar (fuente: autor)

4.4 Modelizado de las tareas de control

Todo buen programador que se precie de serlo, coincidirá seguramente con la siguiente aseveración: más importante que el propio lenguaje de programación empleado, es modelizar las maniobras de control de forma robusta y fidedigna. Las herramientas que la tecnología ha desarrollado para ello son variadas: **flujogramas** ([Yokoyama T. et al., 2016](#)), **GRAF CET** ([Julius R. et al., 2017](#)), diagrama de funciones lógicas, diagramas de contactos o *Ladder* ([Tan A. y Changjiang J., 2011](#)), gráficos de *Nassi-Shneiderman* ([Woodward M.R., 1987](#)). Pues bien, se va a optar por el primero de ellos en este trabajo. Aun siendo especialmente procelosos en su concepción, son muy completos en la definición de maniobras, permiten generar estructuras mentales idóneas para el programador y ayudan a anticipar errores comunes en el ulterior proceso de programación.

Y de entre las aplicaciones informáticas que ayudan en esta concepción de flujogramas, se ha recurrido a **PSelnt** en su última versión actualizada con fecha 23 de mayo de 2017. **PSelnt** es una herramienta legal y gratuita para asistir a profesores, estudiantes e investigadores en sus proyectos que involucren tareas de programación. Gracias a un simple e intuitivo pseudolenguaje en español asemejable al lenguaje C y complementado con un editor de diagramas de flujo, permite centrar la atención en conceptos fundamentales de algoritmia computacional, minimizando las dificultades propias de un entorno de programación y proporcionando un entorno de trabajo con numerosas ayudas y recursos didácticos. El pseudocódigo se suele emplear como primer contacto para introducir conceptos básicos como el uso de estructuras de control, expresiones, variables, condicionales, etc., sin tener que enfrentarse con las particularidades de la sintaxis de un lenguaje real. Este *software* pretende facilitar al programador la tarea de escribir algoritmos mediante flujogramas o mediante este pseudolenguaje presentando un conjunto de ayudas y asistencias, y ofrecerle además algunas herramientas adicionales que le ayuden a encontrar errores y comprender el pensamiento algorítmico. Entre las funciones más destacadas que esta aplicación presenta, se pueden citar las siguientes:

- Herramientas de edición para escribir algoritmos en pseudocódigo en español con autocompletado de palabras clave y plantillas de comandos.
- Ayudas emergentes, coloreado de sintaxis y resaltado de bloques lógicos y listados de funciones, operadores y variables disponibles.
- Generación del diagrama de flujo del (los) algoritmos así como alternancia entre flujogramas clásicos o de *Nassi-Shneiderman*.
- Posibilidad de configurar el pseudo-lenguaje utilizado y perfiles predefinidos para varias instituciones educativas hispanoamericanas y simulación e interpretación (ejecución) de los algoritmos escritos.
- Modificabilidad del algoritmo y ejecución en tiempo real y Análisis de sensibilidad de datos de una ejecución para observar resultados.
- Ejecución con acceso aleatorio o secuencial del algoritmo paso a paso controlando su velocidad con descripción de las acciones realizadas.

- Confección automática de una tabla de prueba de escritorio; identificación de errores de sintaxis en según se genera el código, con descripciones detalladas de sus causas y soluciones frecuentes.
- Conversión del algoritmo de pseudocódigo a código real en numerosos lenguajes de programación: C, C++, C#, Java, JavaScript, MatLab, Pascal, PHP, Python 2, Python 3, QBasic y Visual Basic.
- Sistema de ayuda integrado acerca del pseudocódigo y uso del programa e incorporación de ejemplos educativos con diferentes niveles de dificultad.
- Multiplataforma: probado en Microsoft Windows, GNU/Linux y Mac OS X, siendo totalmente libre y gratuito: licencia GPLv2.

Figura 4.16. Interfaz de trabajo de PSeInt (fuente: autor)

Una vez situados en los objetivos de este epígrafe y la herramienta a emplear y tras construir de forma completa el flujograma de control de todas las maniobras a realizar por el prototipo, el resultado logrado alcanza unas dimensiones que impiden que el mismo se pueda representar de forma visible en una sola imagen. Es por ello que en aras de poder ver de manera coherente las maniobras programas, se decide **fraccionar** las mismas según la función conceptual a desarrollar, esto es: inserción de texto auxiliar de ayuda de interpretación de variables; definición e inicialización de variables; seguimiento en elevación; seguimiento en azimut; comprobación de velocidad de viento; comprobación de caída de lluvia; comprobación caída de granizo; comprobación de máximos de radiación; comprobación de mínimos de radiación; comprobación de alta temperatura en foco del colector paraboloïdal; comprobación de alta temperatura en foco de colector cilindro-parabólico y captura de datos meteorológicos.

Figura 4.17. Flujograma completo (fuente: autor)

Algoritmo Seguimiento COMPLETO

E: estado automática (E=0 apagado, E=1 encendido)
 S: posición reposo-seguridad (S=0 desactivada, S=1 activada)
 Jx: pulsación joystick azimuth (Jx=1 ESTE, Jx=-1 OESTE)
 Jy: pulsación joystick elevación (Jy=1 NORTE, Jy=-1 SUR)
 SN: sensor norte de radiación (W/m2)
 SS: sensor sur de radiación (W/m2)
 SE: sensor este de radiación (W/m2)
 SO: sensor oeste de radiación (W/m2)
 Sm: medio aritmética valores sensores radiación (SN+SS+SE+SO)/4 (W/m2)
 alfa: ángulo elevación (°)
 delta_alfa: incremento ángulo elevación (°)
 alfa_reposeg=120°
 beta: ángulo azimuthal (°)
 delta_beta: incremento ángulo azimuthal (°)
 beta_reposeg=0

Tp: temperatura sensor colector paraboloideal (°C)
 Tcp: temperatura sensor colector cilindro-parabólico (°C)
 Tmax: temperatura colectores=300°C
 V: velocidad viento en anemómetro (km/h)
 Vmax: velocidad viento máxima admisible=100 km/h
 1. Anemómetro: si velocidad V=Vmax => S activada
 2. Sensor lluvia: si caída C=1 => S activada
 3. Sensor granizo: si impacto I=1 => S activada
 4. Promedio alto sensores radiación: si Sm=Smax => S activada
 5. Promedio bajo sensores radiación: si Smin=Sm => S activada
 6. Temperatura de colectores paraboloideal excesiva: si Tp=Tmax => S activada
 7. Temperatura de colector cilindro-parabólico excesiva: si Tcp=Tmax => S activada
 Ta: temperatura ambiente (°C)
 Hr: humedad relativa aire (%)
 A: polución aire (1-4)
 Pa: presión atmosférica (hPa)

Figura 4.18. Texto auxiliar de ayuda para interpretación de variables (fuente: autor)

Figura 4.19. Definición e inicialización de variables (fuente: autor)

Figura 4.20. Posicionamiento manual con joystick (fuente: autor)

Figura 4.21. Seguimiento en elevación (fuente: autor)

Figura 4.22. Seguimiento en azimut (fuente: autor)

Figura 4.23. Comprobación velocidad de viento (fuente: autor)

Figura 4.24. Comprobación caída de lluvia (fuente: autor)

Figura 4.25. Comprobación caída de granizo (fuente: autor)

Figura 4.26. Comprobación máximos de radiación (fuente: autor)

Figura 4.27. Comprobación mínimos de radiación (fuente: autor)

Figura 4.28. Comprobación alta temperatura colector paraboloïdal (fuente: autor)

Figura 4.29. Comprobación alta temperatura colector cilindro-parabólico (fuente: autor)

Figura 4.30. Captura de datos meteorológicos (fuente: autor)

Figura 4.31. Muestra de datos y condición de salida (fuente: autor)

4.5 Programación de las tareas de control

Una vez modelizadas todas las maniobras, es necesario **programar** el Arduino Mega. Una de las opciones es recurrir al propio IDE Arduino, que permite escribir código en el lenguaje de programación *Wiring*, sucesor del *Processing* y a su vez heredero de C, tal y como ya se ha escrito en parte del estudio. Ahora bien, programar en C presenta un inconveniente: precisa conocer la gramática de este lenguaje con la dificultad que ello conlleva. Aunque el compilador avisa de fallos en la escritura del código, se puede perder mucho tiempo en esta tarea, en lugar de enfocar el esfuerzo en concebir o mejorar las maniobras de programación ¿Existe alguna solución gratuita y fácil de emplear para agilizar esta tarea? Afortunadamente hay muchas: *Scratch for Arduino*, *Blockly*, *Ardublock*, *Bitblock*, *Minibloq*, *Modkit*, *mBlock...* y por supuesto, **Visualino** versión 0.7.1 ([Barišić A. et al., 2018](#)). Se trata de una herramienta de programación visual que permite generar código como si fuera un puzzle, dejando caer los bloques de programación e interconexionándolos entre ellos. Pero, además, permite programar directamente la placa de Arduino haciendo por tanto innecesaria la conexión permanente al PC. En añadidura, los bloques generan el código de C perfectamente legible por el *IDE Arduino* en tiempo real en una ventana anexa al entorno de programación, poseyendo las mismas opciones principales: verificar, subir, guardar, cargar y monitor. Es libre, multi-plataforma (*Ubuntu*, *Mac* y *Windows*) y multi-idioma.

Figura 4.32. Interfaz de programación de Visualino (fuente: autor)

La estrategia seguida para programar todas las maniobras que el autómata debe realizar y que acaban de ser construidas gracias al flujograma, es hacer una “**traducción**” *PSeInt* a *Visualino* todo lo directa que ha sido posible, teniendo presente obviamente el mapeo de señales del autómata. De una parte, por aprovechar el trabajo ya realizado en el primero; y de otra, por tratar de garantizar la máxima trazabilidad posible en las maniobras planteadas.

Y anticipando que el tamaño del programa completo es muy difícil de visualizar, se procede a fraccionar el mismo conforme las mismas maniobras que en *PSeInt* ([Ishikawa M. y Maruta I., 2010](#)). Y antes de iniciar la programación, es necesario indicar las hipótesis de partida que hasta ahora no se habían materializado de forma numérica. Obviamente, pueden actualizarse o modificarse si fuese menester:

- La elevación de partida del seguidor se posicionará de forma manual (mediante el *joystick* del prototipo) siguiendo orientativamente datos de efemérides astronómicas de tablas (CAPÍTULO 6, epígrafe 6.1 Ubicación del prototipo y trazado de trayectorias) y los incrementos/decrementos de elevación se harán en pasos de precisión estimada $\Delta\alpha = \pm 0,1^\circ$. De manera análoga, el azimut de partida se obtendrá de las antedichas tablas y los incrementos/decrementos de azimut se harán en pasos de $\Delta\beta = \pm 0,1^\circ$.
- La posición de reposo-seguridad (máxima extensión del actuador lineal y posicionamiento hacia el sur del servomotor) será: $\alpha_{\text{repseg}} = 120^\circ$, $\beta_{\text{repseg}} = 0^\circ$.
- El tiempo de espera mínimo para que el servomotor y actuador lineal tengan una acción fluida y coherente, sería de $t_{\text{servo_pausa}} = 10$ ms si bien es cierto que el anterior tiempo es irrelevante, pues los intervalos de tiempo entre mediciones serán realmente de **10 minutos**.
- La temperatura máxima admisible en cualquiera de los focos (será *a priori* más probable alcanzarlo en el paraboloïdal) será $t_{\text{máx}} = 300^\circ\text{C}$.
- La velocidad de viento máxima admisible será $V_{\text{máx}} = 29$ m/s = 104,4 km/h (que se redondea a **100 km/h**) correspondiente a zona C de mapa de viento en España (ver epígrafe siguiente para profundizar más en este sentido).
- La máxima irradiancia admisible para la media aritmética de las mediciones de todos los sensores de irradiancia) será $S_{\text{máx}} = 1.200$ W/m², valor *a priori* altamente improbable de ser alcanzado salvo error o emisión de masa solar por efecto *Carrington* ([Townsend L.W. et al., 2011](#)). En cualquier caso, alcanzarla implicaría la adopción de la posición de reposo-seguridad. Y la mínima irradiancia aprovechable será $S_{\text{mín}} = 200$ W/m² por debajo de la cual el seguidor también adoptará la posición de reposo-seguridad.
- El algoritmo de seguimiento solar **comparará** dos mediciones de irradiancia contiguas en el tiempo y pareadas entre sí (SN vs SS y SE vs SO). Y se moverá en la dirección espacial de mayor valor de irradiancia (en elevación y/o azimut, respectivamente) durante un tiempo suficiente hasta que se igualen dichos valores pareados (SN=SS y SE=SO).

Figura 4.33. Definición e inicialización de variables (fuente: autor)

Figura 4.34. Movimiento manual en azimuth y elevación con joystick (fuente: autor)

Figura 4.35. Seguimiento en elevación (fuente: autor)

Figura 4.36. Seguimiento en azimut (fuente: autor)

Figura 4.37. Comprobación velocidad de viento (fuente: autor)

Figura 4.38. Comprobación caída de lluvia (fuente: autor)

Figura 4.39. Comprobación caída de granizo (fuente: autor)

Figura 4.40. Comprobación máximos de radiación (fuente: autor)

Figura 4.41. Comprobación mínimos de radiación (fuente: autor)

Figura 4.42. Comprobación alta temperatura colector paraboloïdal (fuente: autor)

Figura 4.43. Comprobación alta temperatura colector cilindro-parabólico (fuente: autor)

Figura 4.44. Captura de datos meteorológicos (fuente: autor)

Figura 4.45. Muestra global de datos operativos y meteorológicos (fuente: autor)

Una vez terminada la programación en formato *Visualino*, ya es factible volcar el código directamente al *Arduino Mega ADK* y hacer funcionar el seguidor termosolar ([Abdelghani-Idrissi M.A. et al., 2018](#)). Pero no menos cierto es que es recomendable traspasarlo al *IDE Arduino*, compilar el resultado y depurar posibles errores de programación. Es por esto que se procede por tanto a incluir todo el código en C resultante, por si fuese de utilidad para el lector o está ya familiarizado con este entorno de programación.

```
#include <Servo.h>
```

```

Servo servos[13];

/** Global variables */
int E;
int S;
int Jx;
int Jy;
float SN;
float SS;
float SE;
float SO;
float Sm;
int Smax;
int Smin;
int alfa;
int delta_alfa;
int alfa_repseg;
int beta;
int delta_beta;
int beta_repseg;
int servo_pausa;
float Tp;
float Tcp;
float Tmax;
float V;
float Vmax;
int C;
int I;
float Ta;
float Hr;
float A;
float Pa;
int pin_SN=14;
int pin_SS=13;
int pin_SE=15;
int pin_SO=12;
int pin_Jx=0;
int pin_Jy=1;
int pin_V=2;
int pin_Tp=4;
int pin_Tcp=5;
int pin-Ta=6;
int pin_Hr=6;
int pin_A=7;
int pin_Pa=9;
int pin_E;
int pin_C;
int pin_I;
int pin_servo_ALFA;
int pin_servo_BETA;
int _internal_readJoystick_array_pin_pin[3];

/** Function declaration */
int * readJoystick_pin_pin();

void setup()
{
    E=1;

    S=0;

```

```
Jx=0;
Jy=0;
SN=0;
SS=0;
SE=0;
SO=0;
Sm=(SN + SS + SE + SO) / 4;
Smax=1200;
Smin=200;
alfa=0;
delta_alfa=1;
alfa_repseg=120;
beta=0;
delta_beta=1;
beta_repseg=0;
servo_pausa=10;
Tp=0;
Tcp=0;
Tmax=300;
V=0;
Vmax=100;
C=0;
I=0;
Ta=0;
Hr=0;
A=0;
Pa=0;

pinMode(23,INPUT);

pin_E=digitalRead(23);
pinMode(31,INPUT);
```

```

pin_C=digitalRead(31);

pinMode(47,INPUT);

pin_I=digitalRead(47);

pinMode(11,INPUT);

pin_servo_ALFA=digitalRead(11);

pinMode(7,INPUT);

pin_servo_BETA=digitalRead(7);


Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  Serial.println("Posicionamiento en AZIMUT con joystick");
  int *J=(int*)malloc(3*sizeof(int));
  J[0]=0;
  J[1]=0;
  J[2]=0;
  pinMode(,INPUT_PULLUP);
  J=readJoystick_pin_pin();
  if (J[0] >= 512) {
    Serial.println("Movimiento del seguidor hacia el E");
    servos[pin_servo_BETA].attach(pin_servo_BETA);
    servos[pin_servo_BETA].write(beta + delta_beta);
    delay(servo_pausa);
  }else if (J[0] < 512) {
    Serial.println("Movimiento del seguidor hacia el O");
    servos[pin_servo_BETA].attach(pin_servo_BETA);
    servos[pin_servo_BETA].write(beta - delta_beta);
    delay(servo_pausa);
  }
  Serial.println("Posicionamiento en ELEVACIÓN con joystick");
  if (J[1] >= 512) {
    Serial.println("Movimiento del seguidor hacia el N");
    servos[pin_servo_ALFA].attach(pin_servo_ALFA);
    servos[pin_servo_ALFA].write(alfa + delta_alfa);
    delay(servo_pausa);
  }else if (J[1] < 512) {
    Serial.println("Movimiento del seguidor hacia el S");
    servos[pin_servo_ALFA].attach(pin_servo_ALFA);
    servos[pin_servo_ALFA].write(alfa - delta_alfa);
    delay(servo_pausa);
  }
  Serial.println("Autómata ENCENDIDO: nueva iteración cada 10 minutos");
  Serial.println("Seguimiento en ELEVACIÓN");
  Serial.println("Captura radiaciones");
  SN=analogRead(pin_SN);
  SS=analogRead(pin_SS);
  if (SN > SS) {
    Serial.println("Movimiento del seguidor hacia el N");
  }
}

```

```

servos[pin_servo_ALFA].attach(pin_servo_ALFA);
servos[pin_servo_ALFA].write(alfa + delta_alfa);
delay(servo_pausa);
}else {
  if (SN < SS) {
    Serial.println("Movimiento del seguidor hacia el S");
    servos[pin_servo_ALFA].attach(pin_servo_ALFA);
    servos[pin_servo_ALFA].write(alfa - delta_alfa);
    delay(servo_pausa);
  }else {
    Serial.println("El seguidor permanece con misma elevación");
  }
}
}
while (pin_E == HIGH) {
}
Serial.println("Seguimiento en AZIMUT");
Serial.println("Captura radiaciones");
SE=analogRead(pin_SE);
SO=analogRead(pin_SO);
if (SE > SO) {
  Serial.println("Movimiento del seguidor hacia el E");
  servos[pin_servo_BETA].attach(pin_servo_BETA);
  servos[pin_servo_BETA].write(beta + delta_beta);
  delay(servo_pausa);
}else {
  if (SE < SO) {
    Serial.println("Movimiento del seguidor hacia el O");
    servos[pin_servo_BETA].attach(pin_servo_BETA);
    servos[pin_servo_BETA].write(beta - delta_beta);
    delay(servo_pausa);
  }else {
    Serial.println("El seguidor permanece con mismo azimuth");
  }
}
}
Serial.println("Verificación condiciones REPOSO-SEGURIDAD");
Serial.println("1. Comprobación VELOCIDAD VIENTO");
pinMode(pin_V,INPUT);
V=analogRead(pin_V);
if (V >= Vmax) {
  Serial.println("Posición reposo-seguridad ACTIVADA por alta velocidad VIENTO");
  S=1;
  servos[pin_servo_ALFA].attach(pin_servo_ALFA);
  servos[pin_servo_ALFA].write(alfa_repseg);
  delay(servo_pausa);
  servos[pin_servo_BETA].attach(pin_servo_BETA);
  servos[pin_servo_BETA].write(beta_repseg);
  delay(servo_pausa);
}else {
  Serial.println("No hay peligro por velocidad VIENTO");
  S=0;
  Serial.println("2. Comprobación caída LLUVIA");
  if (pin_C == HIGH) {
    Serial.println("Posición reposo-seguridad ACTIVADA por caída LLUVIA");
    S=1;
    alfa=alfa_repseg;
    beta=beta_repseg;
    servos[pin_servo_ALFA].attach(pin_servo_ALFA);
    servos[pin_servo_ALFA].write(alfa_repseg);
    delay(servo_pausa);
    servos[pin_servo_BETA].attach(pin_servo_BETA);
    servos[pin_servo_BETA].write(beta_repseg);
    delay(servo_pausa);
  }
}

```

```

}else {
  Serial.println("No hay peligro por caída LLUVIA");
  S=0;
  Serial.println("3. Comprobación impacto GRANIZO");
  if (pin_I == HIGH) {
    Serial.println("Posición reposo-seguridad ACTIVADA por impacto GRANIZO");
    S=1;
    alfa=alfa_repseg;
    beta=beta_repseg;
    servos[pin_servo_ALFA].attach(pin_servo_ALFA);
    servos[pin_servo_ALFA].write(alfa_repseg);
    delay(servo_pausa);
    servos[pin_servo_BETA].attach(pin_servo_BETA);
    servos[pin_servo_BETA].write(beta_repseg);
    delay(servo_pausa);
  }else {
    Serial.println("No hay peligro por impacto GRANIZO");
    S=0;
    Serial.println("4. Comprobación niveles MÁXIMOS RADIACIÓN");
    if (Sm >= Smax) {
      Serial.println("Posición reposo-seguridad ACTIVADA por alta RADIACIÓN");
      S=1;
      alfa=alfa_repseg;
      beta=beta_repseg;
      servos[pin_servo_ALFA].attach(pin_servo_ALFA);
      servos[pin_servo_ALFA].write(alfa_repseg);
      delay(servo_pausa);
      servos[pin_servo_BETA].attach(pin_servo_BETA);
      servos[pin_servo_BETA].write(beta_repseg);
      delay(servo_pausa);
    }else {
      Serial.println("No hay peligro por alta RADIACIÓN");
      S=0;
      Serial.println("5. Comprobación niveles MINIMOS RADIACIÓN");
      if (Sm <= Smin) {
        Serial.println("Posición reposo-seguridad ACTIVADA por baja RADIACIÓN");
        S=1;
        alfa=alfa_repseg;
        beta=beta_repseg;
        servos[pin_servo_ALFA].attach(pin_servo_ALFA);
        servos[pin_servo_ALFA].write(alfa_repseg);
        delay(servo_pausa);
        servos[pin_servo_BETA].attach(pin_servo_BETA);
        servos[pin_servo_BETA].write(beta_repseg);
        delay(servo_pausa);
      }else {
        Serial.println("La radiación AÚN es aprovechable");
        S=0;
        Serial.println("6. Comprobación ALTA TEMPERATURA en colector PARABOLOIDAL");
        if (pin_Tp >= Tmax) {
          Serial.println("Posición reposo-seguridad ACTIVADA por alta TEMPERATURA colector PARABOLOIDAL");
          S=1;
          alfa=alfa_repseg;
          beta=beta_repseg;
          servos[pin_servo_ALFA].attach(pin_servo_ALFA);
          servos[pin_servo_ALFA].write(alfa_repseg);
          delay(servo_pausa);
          servos[pin_servo_BETA].attach(pin_servo_BETA);
          servos[pin_servo_BETA].write(beta_repseg);
          delay(servo_pausa);
        }else {

```

```

Serial.println("NO hay peligro por alta TEMPERATURA colector PARABOLOIDAL");
S=0;
Serial.println("7. Comprobación ALTA TEMPERATURA en colector CILINDRO-
PARABÓLICO");
if (Tcp >= Tmax) {
    Serial.println("Posición reposo-seguridad ACTIVADA por alta TEMPERATURA colector
CILINDRO-PARABÓLICO");
    S=1;
    alfa=alfa_repseg;
    beta=beta_repseg;
    servos[pin_servo_ALFA].attach(pin_servo_ALFA);
    servos[pin_servo_ALFA].write(alfa_repseg);
    delay(servo_pausa);
    servos[pin_servo_BETA].attach(pin_servo_BETA);
    servos[pin_servo_BETA].write(beta_repseg);
    delay(servo_pausa);
} else {
    Serial.println("NO hay peligro por alta TEMPERATURA colector CILINDRO-PARABÓLICO");
}
}
}
}
}
}
}
}
Serial.println("Captura DATOS METEOROLÓGICOS ADICIONALES");
pinMode(pin_Ta,INPUT);
Ta=analogRead(pin_Ta);
pinMode(pin_Hr,INPUT);
Hr=analogRead(pin_Hr);
pinMode(pin_A,INPUT);
A=analogRead(pin_A);
pinMode(pin_Pa,INPUT);
Pa=analogRead(pin_Pa);
Serial.println("MUESTRA datos operativos y meteorológicos");
Serial.println(String("E=") + String(E));
Serial.println(String("S=") + String(S));
Serial.println(String("alfa=") + String(alfa) + String("°"));
Serial.println(String("beta=") + String(beta) + String("°"));
Serial.println(String("SN=") + String(SN) + String("W/m2"));
Serial.println(String("SS=") + String(SS) + String("W/m2"));
Serial.println(String("SE=") + String(SE) + String("W/m2"));
Serial.println(String("SO=") + String(SO) + String("W/m2"));
Serial.println(String("Tp=") + String(Tp) + String("°C"));
Serial.println(String("Tcp=") + String(Tcp) + String("°C"));
Serial.println(String("V=") + String(V) + String("km/h"));
Serial.println(String("C=") + String(C) + String());
Serial.println(String("I=") + String(I) + String());
Serial.println(String("Ta=") + String(Ta) + String("°C"));
Serial.println(String("Hr=") + String(Hr) + String("%"));
Serial.println(String("A=") + String(A) + String());
Serial.println(String("Pa=") + String(Pa) + String("hPa"));
}

/**/ Function definition /**/
int * readJoystick_pin_pin(){
    _internal_readJoystick_array_pin_pin[0]=analogRead(pin_Jx);
    _internal_readJoystick_array_pin_pin[1]=analogRead(pin_Jy);
    _internal_readJoystick_array_pin_pin[2]=digitalRead();
    return _internal_readJoystick_array_pin_pin;
}

```

4.6 Simulación estática del prototipo frente a solicitaciones físicas

El conocido como método de los **elementos finitos** (MEF en español o FEM en inglés) no es más que un método numérico genérico para la aproximación de soluciones en ecuaciones diferenciales parciales ciertamente complejas, empleado en multitud de problemas de ingeniería ([Kater A. et al., 2017](#)). En efecto, el MEF permite obtener una solución numérica muy aproximada sobre un sólido, estructura o dominio (medio continuo, como los fluidos) sobre el que se definen ciertas ecuaciones diferenciales en forma integro-diferencial y que caracterizan el comportamiento físico del problema, dividiéndolo en un número muy elevado de subdominios no-intersecantes entre sí, llamados elementos finitos. El conjunto de los mismos forma una partición del dominio que también se puede denominar discretización y dentro de cada elemento se vislumbran una serie de puntos representativos llamados nodos, de forma que dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito. Un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos y el conjunto total de nodos considerándolos adyacentes se llama malla. Los cálculos se realizan por tanto sobre una **malla** tal que la generación de la misma se realiza típicamente con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa anterior a los cálculos que se denomina preprocesado. En función de estas relaciones de adyacencia se vincula el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas para cada nodo y que se denominan grados de libertad tal que el conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos, se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales, proporcional al número de nodos. A la matriz de dicho sistema de ecuaciones se la conoce como matriz de rigidez del sistema. Una propiedad importante del método es la convergencia: si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge aceleradamente hacia la solución exacta del sistema.

Habitualmente el análisis de los elementos finitos se puede programar **computacionalmente** para calcular gracias a relaciones cinemáticas y constitutivas, tanto el campo de desplazamientos como las deformaciones y tensiones respectivamente (caso de problemas de mecánica de sólidos deformables). Sin atisbo de duda, el método de los elementos finitos es tremendamente usado gracias a su generalidad y la relativa facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (bi o tridimensional). En añadidura, es fácilmente adaptable a otras disciplinas: transmisión de calor, mecánica de fluidos computacional o CFD), vibraciones y/o campos electromagnéticos. Es más, siendo cierto que en ocasiones es imposible encontrar la solución analítica a muchos de estos problemas, los elementos finitos, son la única alternativa práctica de cálculo. El programa informático de elementos finitos empleado para analizar el prototipo, es **ANSYS 18.0 Academic** ([Singiresu S.R., 2018](#)). Este software de simulación de ingeniería es utilizado por miles de universidades en todo el mundo de forma que los estudiantes universitarios aprenden principios de física; los investigadores resuelvan problemas complejos de ingeniería; y los estudiantes de posgrado generan datos para sus tesis doctorales. Así, los estudiantes aprovechan la descarga legal y gratuita para su aprendizaje fuera del entorno habitual de las clases estando solo limitada en celdas a 32.000 para cálculos estructurales o 512.000 para cálculos fluídicos.

ANSYS, Inc. fue fundada en 1970 empleando actualmente unos 1700 empleados, la mayoría con experiencia en elementos finitos y dinámica de fluido computacional. La empresa desarrolla, comercializa y presta soporte a la ingeniería a través de software de simulación para predecir cómo funcionará y reaccionará determinado **prototipo** o producto ya existente bajo un entorno real. La compañía desarrolla continuamente tecnología enfocada a la simulación de problemas complejos tanto para el aprendizaje de la ingeniería como para la industria. *ANSYS* está subdividida en tres herramientas denominadas módulos: el pre-procesador (generación de geometría y mallado); el procesador y el post-procesador. Tanto el primero como el tercero están provistos de una interfaz gráfica amigable, mientras que el procesador de elementos finitos para la solución de problemas mecánicos incluye tareas tales como análisis de estructuras estáticas y dinámicas (ambas para problemas lineales y no lineales); análisis de transferencia térmica y fluidodinámica; problemas de acústica y electromagnetismo. Entre las características más identificativas de *ANSYS*, se citan [\(Thompson M.K. y Thompson J.M., 2017\)](#):

- Es una aplicación **integrada**, pues permite la asociación de diferentes tecnologías para el desarrollo de un prototipo todo ello en una única plataforma. En añadidura, su integración permite la asociación con un amplio abanico de programas *CAD*, como *FreeCAD* (no olvidemos que es el entorno 3D sobre el cual se ha trabajado en el diseño del prototipo). Y además, su sistema de integración permite incluirse con facilidad en sistemas de documentación propios de distintos estándares del sector.
- Es un programa **modular**, pues permite a los usuarios instalar una única aplicación para resolver un problema específico sin tener que invertir recursos en necesidades no existentes. Conforme el usuario avanza en la solución, si precisa análisis más complejos, puede ampliar las herramientas informáticas hasta llegar al proceso de validación final. Así pues, los distintos módulos de *ANSYS* solucionan los problemas por partes.
- Por último es un **software extensible**, pues propone aplicaciones verticales o adaptaciones específicas según las requiera el ingeniero. Las mismas pueden automatizar procesos que realiza normalmente hasta aplicaciones complejas que se adaptan a determinados sectores industriales concretos.

A resultas de todo lo anterior, el proceso típico de realización de un cálculo consta de las siguientes etapas, las cuales han sido seguidas obviamente en este estudio:

- **Pre-procesado:** establecimiento del modelo mediante la construcción de la geometría del prototipo, creando líneas, áreas o volúmenes, modelo sobre el cual se creará la posterior malla de elementos (en realidad esta última parte es opcional, toda vez que la ubicación de los elementos de la malla puede provenir de otras aplicaciones de diseño). También se definen los materiales a ser empleados sobre la base de sus constantes, ya que todo elemento debe tener asignado un material particular. Y por último, la generación de la malla (a mano o automáticamente) mediante una aproximación discreta del problema sobre la base de puntos o nodos, que se interconectan para formar elementos finitos que juntos forman el volumen.

- **Procesado o solver:** aplicación de cargas y condiciones de contorno en los nodos para así manejar fuerzas, tracciones, desplazamientos, momentos, rotaciones... para así llegar a la obtención de la solución, una vez que todos los valores del problema son ya conocidos.
- **Post-procesado:** listado y visualización de resultados (geometría deformada del sólido) en forma de tabla o de forma gráfica.

Figura 4.46. Metodología de elementos finitos (fuente: Julián García de León)

Como se ha comentado con anterioridad, se espera que el prototipo de seguidor pueda estar expuesto a todo tipo de condiciones climatológicas reales: no el producto desarrollado en esta Tesis, pero sí uno que encapsule los sensores y sea más robusto para enfrentarse a dichas condiciones ([Liu D. et al., 2017](#)). En caso de **lluvia** muy intensa o caída de granizo, tanto las superficies colectoras como la estructura en sí sufre una situación de impacto que puede provocar su deterioro. La acción a tomar para proteger a los primeros es ejecutar la maniobra de protección que los lleve a un punto de seguridad; para los segundos, no queda más remedio que cuantificar dicha acción y dimensionar correctamente la estructura para soportar la carga. En caso de caída de **nieve** (no especialmente habitual en Madrid, pero sí perfectamente factible), la estructura sufre una carga vertical añadida a su propio peso cuando se encuentre en posición horizontal, ya que los colectores pueden acumular una parte de dicha nieve. En caso de **viento**, la estructura sufre cargas en la dirección de este por el conocido “efecto vela” y por tanto serán aleatorias y dependerán de la intensidad de este. Por último, se producirán cargas de origen **térmicas** debidas a los efectos de dilatación-contracción de los focos de paraboloide y cilindro-parábola, que cobran especial relevancia en esta Tesis dada la propia naturaleza y su finalidad. Tanto en los estudios teóricos como en los experimentos reales con el seguidor en las épocas de mayor irradiancia, se obtuvieron temperaturas ciertamente elevadas (superando los 250°C).

Tras analizar el problema con detenimiento se llegó a la conclusión de que dado el pequeño tamaño de la estructura de sustentación de los colectores del prototipo, las cargas de lluvia, nieve y el propio peso serían de una magnitud bastante inferior que las de viento, dimensionando por tanto la perfilería de anclaje para dicha sollicitación como la más desfavorable. Igualmente, se consideró que la acción termoelástica no representaría mayor inconveniente por no poner en peligro la integridad de los materiales constructivos (latón para el colector paraboloïdal y vidrio para el cilindro-parabólico). De este modo, se centró el problema a considerar exclusivamente las cargas por viento.

4.5.1 Determinación de presión ejercida por el viento

Para el cálculo de cargas de viento se ha recurrido al **CTE** (Código Técnico de Edificación) en su **Documento básico SE-AE, Seguridad estructural. Acciones en la edificación** ([Ministerio de Fomento, 2009](#)). En concreto, en el epígrafe 3, Acciones variables, apartado 3.3, Viento, se fijan las consideraciones a tener en cuenta acerca de la influencia del viento sobre edificios y estructuras y se deben tener en cuenta las cargas asociadas al efecto del viento. En efecto, la acción de viento por lo general es una fuerza perpendicular a la superficie de cada punto expuesto que se denomina presión estática:

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p \quad (1)$$

donde:

q_e : presión estática, en kN/m²

q_b : presión dinámica del viento, con 0,42 kN/m² para zona A; 0,45 kN/m² para zona B y 0,52 kN/m² para zona C según mapa de velocidades.

c_e : coeficiente de exposición, adimensional y función de la altura y la aspereza del punto de exposición. Hasta 8 alturas, toma un valor de 2, pero un cálculo riguroso se realiza según tabla y expresión contiguas.

c_p : coeficiente eólico o de presión, adimensional y en tablas según forma y orientación respecto al viento, pudiendo ser presión o succión.

Figura 4.47. Valores básicos de velocidad de viento en España (fuente: CTE)

Grado de aspereza del entorno		Altura del punto considerado (m)							
		3	6	9	12	15	18	24	30
I	Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	2,4	2,7	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	3,7
II	Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	2,1	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5
III	Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	1,6	2,0	2,3	2,5	2,6	2,7	2,9	3,1
IV	Zona urbana en general, industrial o forestal	1,3	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,6
V	Centro de negocio de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura	1,2	1,2	1,2	1,4	1,5	1,6	1,9	2,0

Tabla 2. Coeficiente de exposición c_e según aspereza y altura (fuente: CTE)

Para alturas comprendidas entre 30 y 200 m, el coeficiente c_e debe ser calculado a su vez mediante las siguientes expresiones:

$$c_e = F \cdot (F + 7k) \quad (2)$$

$$F = k \cdot \ln\left(\frac{\text{máx } Z}{L}\right) \quad (3)$$

donde:

F, k, Z, L: parámetros característicos del entorno según tabla anexa.

	Grado de aspereza del entorno	Parámetro		
		k	L (m)	Z (m)
I	Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	0,156	0,003	1,0
II	Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	0,17	0,01	1,0
III	Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	0,19	0,05	2,0
IV	Zona urbana en general, industrial o forestal	0,22	0,3	5,0
V	Centro de negocios de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura	0,24	1,0	10,0

Tabla 3. Coeficientes F, k, Z y L según tipo de entorno (fuente: CTE)

	Esbeltez en el plano paralelo al viento					
	< 0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	≥ 5,00
Coeficiente eólico de presión, c_p	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8
Coeficiente eólico de succión, c_s	-0,3	-0,4	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7

Tabla 4. Coeficiente de presión c_p o succión c_s (fuente: CTE)

Una vez tenidos en cuenta todos los factores anteriores y siguiendo un criterio conservador (considerando el caso más desfavorable posible) se estimarán los siguientes factores:

Factor F y coeficiente de exposición c_e : para alturas de hasta 200 m y bajo todas las tipologías de grado de aspereza del entorno (cuyo resultado se muestra a su vez en la siguiente tabla) se comprueba que el tipo (I) de grado de aspereza es la peor situación posible. También y como no podía ser de otra forma, se atestigua que al aumentar la altura, aumenta dicho factor, pues el prototipo estará más expuesto al viento. Aprovechando el formato de hoja de cálculo bajo el cual se realiza el cálculo, se muestra también en la última columna el valor del coeficiente de exposición calculado tomándose el mayor valor de todos ellos: 4,895.

Altura (m)	Factor F (I)	Factor F (II)	Factor F (III)	Factor F (IV)	Factor F (V)	Coef. Exp.
10	1,265	1,174	1,007	0,771	0,553	2,983
20	1,374	1,292	1,138	0,924	0,719	3,387
30	1,437	1,361	1,215	1,013	0,816	3,633
40	1,482	1,410	1,270	1,076	0,885	3,813
50	1,517	1,448	1,312	1,126	0,939	3,956
60	1,545	1,479	1,347	1,166	0,983	4,074
70	1,569	1,505	1,376	1,200	1,020	4,175
80	1,590	1,528	1,402	1,229	1,052	4,264
90	1,608	1,548	1,424	1,255	1,080	4,342
100	1,625	1,566	1,444	1,278	1,105	4,414
110	1,640	1,582	1,462	1,299	1,128	4,478
120	1,653	1,597	1,479	1,318	1,149	4,538
130	1,666	1,610	1,494	1,336	1,168	4,593
140	1,677	1,623	1,508	1,352	1,186	4,644
150	1,688	1,635	1,521	1,367	1,203	4,692
160	1,698	1,646	1,533	1,381	1,218	4,737
170	1,707	1,656	1,545	1,395	1,233	4,780
180	1,716	1,666	1,556	1,407	1,246	4,820
190	1,725	1,675	1,566	1,419	1,259	4,858
200	1,733	1,684	1,576	1,431	1,272	4,895

Tabla 5. Cálculos de factor F y coeficientes de exposición (fuente: Julián García de León)

Coeficiente eólico de presión c_p o succión c_s : sobredimensionando nuevamente los cálculos, se elige un valor de esbeltez ≥ 5 , resultando valores de 0,8 para el coeficiente eólico de presión y de -0,7 para el de succión. Teniendo en cuenta, además, que la acción del viento se manifiesta tanto en una presión sobre la superficie expuesta, como en una succión en el reverso de la superficie, significa que se deben sumar ambos efectos en valor absoluto dando un valor neto de 1,5 para el coeficiente eólico. De esta forma, teniendo en cuenta estos antedichos valores y tomando el máximo valor posible (aun estando el prototipo en zona A de Madrid, se tomará la C por seguridad) se obtiene un valor para la presión estática del viento de:

$$q_e = 0,52 \cdot 4,89 \cdot 1,5 = 3,8 \text{ kN/m}^2 \quad (4)$$

4.5.2 Cálculo de fuerzas netas sobre la estructura

Dada la geometría de la estructura del prototipo de seguidor ya conocida (se explicitan las dimensiones en la imagen anexa), se infiere que las superficies expuestas al viento que van a concentrar su efecto y sufrir por tanto cargas netas de consideración, son los colectores paraboloïdal y cilindro-parabólico. No se analiza su comportamiento elástico pues se asume que están diseñados y fabricados convenientemente para resistir las cargas. Además, se va analizar el más desfavorable de los efectos, estudiando por tanto la superficie efectiva ortogonal a la dirección del viento. En este sentido, gracias a sencillos cálculos de geometría básica, se constata que el paraboloïde (diámetro de 235 mm), y la cilindro-parábola (altura 120 mm, anchura 90 mm) presentan superficies efectivas frente al viento de 0,0434 mm² y 0,0108 mm² respectivamente. Esto, junto con el valor de la presión estática ya calculada, produce unas fuerzas perpendiculares a las superficies de **colectores** 164,92 N y 41,04 N para cada colector, que generan a su vez unas reacciones de $R_1 = 298,16$ N y $R_2 = -92,20$ N, conforme se puede deducir de la aplicación de las ecuaciones de equilibrio estático. Estas cargas a su vez se irán transmitiendo de unas piezas a otras ([Habte F. et al., 2017](#)).

Figura 4.48. Dimensiones y fuerzas en colectores (fuente: Julián García de León)

El problema mecánico del **tubo** del colector cilindro-parabólico, se puede simplificar suponiendo que el mismo es una viga bi-apoyada en las abrazaderas, a las cuales no se transmite momento y, por tanto, solo producirán reacciones verticales. La carga efectiva de 41,04 puede suponerse aplicada justo en el centro del colector y a efectos de cálculo se transmite al cilindro a la misma distancia de las abrazaderas: de esta forma, aplicando nuevamente las ecuaciones de la Estática, se tendrá el resultado que indica que $R_1 = -166,16$ N y $R_2 = 206,20$ N.

Figura 4.49. Reacciones en tubo cilindro-parabólico (fuente: Julián García de León)

La otra pieza clave en el colector es el **soporte piramidal**. Se recuerda la hipótesis de partida mencionada anteriormente alusiva a que el cilindro concentrador se ve sujetado por esta pieza y se entiende que la carga de 41,04 N se transmite al soporte y además produce un momento de valor 1.518,48 N·mm. Dichas cargas se aplicarán en el punto de sujeción de la pieza con el colector, ya que éste es el que está tirando de la misma.

Figura 4.50. Reacciones en soporte (fuente: Julián García de León)

El punto de apoyo de la **cruceta** del paraboloide recibe, como se ha visto, una carga de 298,16 N. Dimensionando el sistema para la situación más desfavorable (paraboloide en posición perpendicular al terreno) y partiendo de la hipótesis de que el apoyo no transmite momentos, aparece una carga horizontal sobre el apoyo: se puede aceptar entonces que dicha carga se transmite tal cual al soporte del actuador lineal. La misma será recibida a partes iguales por los dos casquillos atornillados a dicho soporte, que conectan el mismo con parte inferior de la estructura. Aparte de la carga de 149,08 N, se supone que existe apriete previo en la estructura, estimado en 1.000 N y dirección la vertical de compresión al casquillo.

Figura 4.51. Esfuerzos sobre cruceta (fuente: Julián García de León)

Las cargas recibidas por cada **perfil en L** son las que le transmite el casquillo a él unido. Ambos perfiles se comportan exactamente igual debido a la simetría de las cargas, que son exactamente las mismas que recibía el casquillo correspondiente, más un momento flector debido a la distancia vertical de 20 mm correspondiente a la longitud del casquillo. Esto produce un momento en el perfil de valor $2.981,6 \text{ N}\cdot\text{mm}$.

Figura 4.52. Esfuerzos sobre casquillos de cruceta (fuente: Julián García de León)

La última parte de la estructura afectada por las cargas que van transmitiéndose, es la **polea**, a la cual llegan las cargas desde sendos perfiles a través de otros casquillos con tornillos roscados. Las cargas que reciben estos casquillos son las reacciones en las ligaduras que ocasionan en los perfiles, planteándose un problema hiperestático. Los casquillos que hacen nexo de unión entre perfiles y polea recibirán por tanto unas cargas iguales y opuestas a las reacciones del perfil, más otra carga vertical de apriete de montaje de 1.000 N como ya se había estimado. El sistema de la polea consta de la propia polea de aluminio como tal, de 56 mm de diámetro útil y ejes de 4 mm , más dos casquillos de latón, cuya función es conferir al eje más rigidez y fijación mediante los tornillos de apriete, tanto de la polea como del casquillo de latón.

Este componente forma parte del sistema de transmisión del servomotor. A la polea le llegan cargas a través de los casquillos hexagonales atornillados a ella, y recibe exactamente la misma carga que recibían los primeros. Cabe reseñar que al no haber cargas aplicadas inicialmente en el eje X en el sistema de los perfiles y la simetría de la disposición de los mismos respecto al eje Y, las cargas en X en los 4 casquillos se deben cancelar dos a dos.

Además, se consideró que los **casquillos** ejercen una ligadura sobre la polea impidiendo el movimiento de las superficies en contacto con ella. Además, existe también un tornillo de fijación del eje en la propia polea, y se admite como hipótesis de trabajo que el eje está encajado perfectamente haciendo un contacto lo suficientemente fuerte como para suponer que todos los puntos de contacto de la polea con el mismo también tenían los movimientos restringidos. Así mismo, los puntos del taladro de la polea para el tornillo de apriete también se consideran restringidos. Hay una componente de compresión en cada zona de contacto de los casquillos hexagonales, y se ha supuesto de nuevo que hay un apriete de 1.000 N en la parte inferior de la polea alrededor de los taladros, ya que dichos casquillos están fijados con sus correspondientes tornillos y arandelas. Generar el perfil de la polea revistió ciertas dificultades. En cuanto al mallado de la pieza, al ser la de mayores dimensiones de todos los modelos, no quedó más remedio que hacerlo algo grosero para obtener el máximo partido a las limitaciones de la licencia de ANSYS (hasta el punto de sustituir las circunferencias de los taladros por octógonos).

A la izquierda el taladro central del eje, y a la derecha uno de los taladros practicados para alojar los tornillos roscados internamente a cada casquillo. La aplicación de cargas fue algo laboriosa en relación a los momentos ocasionados por las fuerzas transmitidas en ejes X e Y. En cada taladro, la resultante de las fuerzas aplicadas tenía una dirección distinta. De forma análoga a otras piezas, se calculó un sistema de cargas nodales, equivalente al momento en el centro del taladro, que producirían dichas fuerzas. Se localizaron de manera aproximada los nodos situados en la dirección de aplicación de la resultante en cada taladro, en la superficie de aplicación de la compresión, en la cara de arriba y de la tracción, en la cara de debajo.

Para ello, se calculó el ángulo formado por la resultante respecto de los ejes. Con ayuda de ANSYS se establecieron los nodos más cercanos a esa dirección dentro de la superficie y se tomaron las coordenadas de dichos nodos para calcular sus distancias a la recta perpendicular a la dirección de la carga y poder establecer la equivalencia con el momento total.

Figura 4.53. Esfuerzos sobre polea (fuente: Julián García de León)

4.5.3 Pre-procesado

El primer paso realizado en la fase de pre-procesado de la estructura en ANSYS fue la importación de las geometrías de diseños CAD del prototipo en formato IGES, previamente exportados a ese formato provenientes del diseño realizado en *FreeCAD*. Tal y como afirmar el autor (Julián García de León) de esta parte del estudio en su proyecto fin de carrera de la ETSII de la Universidad Carlos III de Madrid, ANSYS dio problemas en la importación de dichas geometrías, hecho que parece ser bastante común, teniendo que realizar por tanto un duro trabajo de **acondicionamiento** previo antes de poder realizar el mallado de las piezas. En primer lugar, en casi todas ellas solo se importaron las líneas de contornos geométricos y los *keypoints* (puntos de referencia de la construcción geométrica en cualquier programa CAD, a partir de los cuales se definen líneas, circunferencias, polígonos, etc.) correspondientes. Dado que para modelos tridimensionales como los utilizados en este estudio, ANSYS requiere un volumen para definirlos, la primera parte de este trabajo ha consistido en generar primero las líneas, a partir de ellas las superficies, y por último los volúmenes. En añadidura, otro problema añadido fue la duplicidad de varios *keypoints* al realizar la importación, sin estar claro si este hecho es atribuible al diseño en *FreeCAD* o al proceso de importación. Sea como fuere, gracias a las herramientas de pre-procesado de ANSYS ha sido factible dejar el diseño presto para la posterior etapa.

Figura 4.54. Etapas de pre-procesado de diseño CAD (fuente: Julián García de León)

4.5.4 Mallado y distribución de esfuerzos

Para proceder al necesario mallado y posterior distribución de esfuerzos, los elementos sólidos que mejor se ajustan al conjunto de restricciones del programa son los de tipo **tetraédrico** y preferentemente **hexaédrico** de 8 nodos ([Dassi F. et al 2017](#)), que ha sido la elección realizada en la mayoría de los casos para encontrar una solución de compromiso entre potencia de cálculo y precisión que permita disponer así de una malla lo más fina posible. La estrategia seguida de dividir el prototipo

en distintas piezas; el refinado tipo barrido o extrusión; junto a la formulación isoparamétrica que permite una forma irregular de los hexaedros para adaptarse mejor a la geometría de las piezas, se han revelado como buenas decisiones en la búsqueda de una malla suficientemente adecuada para acomodarla a la geometría de partida.

Por terminar, *ANSYS* dispone de una funcionalidad de **test de forma** para establecer si el mallado es lo suficientemente bueno para el posterior cálculo: en efecto, esta funcionalidad efectúa una comprobación en el sentido de que los elementos tengan una forma adecuada, basándose en la concordancia con ciertos parámetros de forma. A su vez, dichos parámetros son función de la geometría y son cotejados con los valores presentados por el elemento al construirse la malla, función del tipo de elemento y ajustes. Entre dichos parámetros a comparar se citan la relación de aspecto, el ángulo de desviación, la desviación paralela, el máximo ángulo en una esquina, el Jacobiano de la transformación de coordenadas, y la medida de la distorsión del elemento.

Otra cuestión relevante es la asignación de **atributos** a los elementos de la malla, donde el más importante sin duda alguna es el tipo de material (aluminios, aceros, plásticos tipo polietileno...), que previamente ha debido ser definido en términos de módulos de Young, coeficientes de Poisson y coeficientes de dilatación térmica. Hay que hacer constar que se puede dar el caso de tener distintos tipos de elementos o incluso materiales, para distintos volúmenes. Seguidamente se reflejan los resultados de mallado y distribución de esfuerzos en varias de las piezas clave de la sustentación física de los componentes del prototipo.

Figura 4.55. Mallado y fuerzas en abrazadera (fuente: Julián García de León)

Figura 4.56. Mallado y fuerzas en soporte (fuente: Julián García de León)

Figura 4.57. Mallado y fuerzas en casquillo (fuente: Julián García de León)

Figura 4.58. Mallado y fuerzas en perfil en L (fuente: Julián García de León)

Figura 4.59. Mallado y fuerzas en polea (fuente: Julián García de León)

4.5.5 Resultados en tensiones: conclusiones

En este último epígrafe, se van a presentar e interpretar los resultados obtenidos en las simulaciones de los distintos modelos recién detallados. Para establecer conclusiones sobre los mismos se han utilizado conceptos de mecánica de sólidos y conocimientos básicos sobre elementos finitos de cara a entregar una solución aproximada del desplazamiento de ciertos puntos (los nodos discretizados por el mallado). Las condiciones de continuidad, entre otras, se le exigen al campo de desplazamientos a través de las funciones de forma por medio de las cuales se realiza la aproximación, de manera que se pueden presentar **tensiones de von Mises** (MPa) y **deformaciones** (mm) a partir de dicha solución aproximada de los desplazamientos nodales ([Khanna K. et al., 2017](#)).

Abrazadera de acero: se observan valores contenidos de la tensión máxima y la distribución de tensiones es bastante coherente con la sollicitación y la geometría. La zona de mayor concentración se produce justo en el borde de la sujeción de la arandela y el máximo se encuentra en la cara orientada al sentido de la fuerza de tracción (sobre la superficie curva interna de la abrazadera). Considerando un acero comercial genérico fácilmente localizable en cualquier ferretería (el material real seleccionado seguirá este criterio) se van a obtener los valores máximos de las tensiones, como punto de partida de los requisitos que habría que verificar que cumple la pieza. Se concluye que la pieza va a **soportar** adecuadamente las sollicitaciones calculadas, pues la tensión máxima es solo de **148,42 MPa < 240 MPa** que puede tomarse como valor promedio de la tensión máxima admisible para un acero convencional.

Figura 4.60. Tensiones von Mises de abrazadera (fuente: Julián García de León)

Soporte de polietileno: aunque el programa ofrece un máximo en un nodo concreto, no hay diferencia real entre las dos zonas simétricamente situadas respecto de la carga (la disposición de los ejes es arbitraria, el sistema coordenado no coincidirá con el resto de modelos de esta pieza debido a que se ha manipulado la posición de la misma en el preproceso para facilitar la aplicación de las cargas, pero esto no tiene la mayor incidencia en los cálculos). La distribución de tensiones que presentan los resultados es coherente con la geometría del problema. Dadas las restricciones de movimiento consideradas y las cargas aplicadas, es perfectamente plausible que se produzcan las máximas tensiones en las zonas con cambio de geometría más abrupta. Con estos resultados, y teniendo en cuenta las propiedades del material que se escogió como posibilidad para la pieza real (polietileno), se llega a la conclusión de que, en las condiciones extremas de carga supuestas para llevar a cabo la simulación, la pieza **fallaría**: se supera la tensión de rotura, **57,17 MPa > 33 MPa** (resistencia a la tracción del antedicho plástico).

Figura 4.61. Tensiones von Mises de soporte (fuente: Julián García de León)

Casquillos de latón: se aprecia que la mayor tensión corresponde a la superficie inferior, donde está unido el casquillo al perfil, en la dirección de aplicación de la carga (eje Y). El tornillo de acero interno únicamente le confiere rigidez al sistema y reduce las tensiones que tendría el casquillo si no estuviera roscado a aquel. Atendiendo a los valores habituales para el límite elástico del latón (material estimado para esta pieza) se está razonablemente lejos de comprometer la estructura por el mismo pues **238,18 MPa < 360 MPa**, siendo además los desplazamientos pequeños, por lo que puede admitirse un **correcto** comportamiento de la pieza.

Figura 4.62. Tensiones von Mises de casquillo (fuente: Julián García de León)

Perfil de aluminio: se aprecian zonas de elevadísima concentración de tensiones, correspondientes a las zonas de la ligadura con uno de los tornillos. A la vista de los resultados y las propiedades de distintos tipos de aluminios (75 MPa) se llega a la conclusión de que la pieza va a **fallar** pues **500 MPa > 75 MPa**. Pero es factible pensar que esas tensiones tan elevadas son debidas a las singularidades introducidas en el modelo por la aplicación de las cargas puntuales en los nodos para simular el sistema equivalente al momento flector, lo que no deja de ser una burda aproximación. El modelo parece, a todas luces, insuficientemente preciso. Sin embargo, un dato importante, las reacciones sí se pueden considerar por buenas, ya que para este caso las singularidades no influyen. Queda, pues, la opción de mejorar el modelo en un futuro, como se comentará en las conclusiones. Una de las opciones más adecuadas a priori sería el modelado mediante la teoría de láminas.

Figura 4.63. Tensiones von Mises de perfil de aluminio (fuente: Julián García de León)

Polea de aluminio: los resultados son coherentes con la aplicación de cargas y la situación de los máximos de la distribución tensional se encuentran alrededor de la dirección Y, en el lado de las cargas de mayor valor. No se aprecian singularidades debidas a la aproximación de los momentos flectores por sistemas de cargas nodales equivalentes como ocurría en otros modelos. A la vista de estos resultados y las propiedades resistentes del aluminio ya vistas en el material anterior, queda claro a priori que va a haber serios problemas de plastificación o incluso **rotura** pues **453,26 MPa < 75 MPa**, a menos que se utilicen aleaciones de alta calidad. Aunque los desplazamientos, por el contrario, no son muy elevados. No obstante, es claro el hecho de las posibles carencias del modelo por las limitaciones de la licencia. Claramente el uso del elemento tetraédrico de 4 nodos, el de menor orden y precisión de todos los elementos sólidos disponibles en ANSYS, junto con la forma de aplicar los momentos flectores en el modelo, hacen que estos resultados sean **revisables**.

Figura 4.64. Tensiones von Mises en polea (fuente: autor)

4.7 Simulación óptica de colectores

Desde finales de la década de los años 80, la industria relacionada con las tecnologías de concentración ha desarrollado códigos de diseño óptico para el diseñar y modelar sistemas de esta índole, entre ellos obviamente los de concentración solar ([Jorgensen G., 1994](#)). Estos primigenios códigos fueron escritos para modelar geometrías ópticas muy particulares de forma que posteriores adaptaciones fueron construidas a partir de las anteriores de forma evolutiva. A modo de ejemplos **históricos** de tales códigos se pueden citar *OPTDSH* (concentradores de disco parabólico de apertura circular); *ODMF* (concentradores de disco parabólico multifacético); *SOLFUR* (horno solar). Conforme la energía termosolar de concentración comenzó a expandirse, el sector se convenció de que se necesitaba una herramienta de cálculo y diseño más generalista. Y ese fue justamente el punto de partida de la metodología de trazado de rayos de Montecarlo como método de simulación en la que están basados los actuales códigos de programación. No en vano, otros códigos de modelado de aquel entonces estaban limitados tanto en la definición geométrica como en la representación óptica de las superficies de reflexión ([Wendelin T., 2003](#)). Y en añadidura, el tiempo y esfuerzo precisos para aprender estos complejos paquetes informáticos (de entornos de desarrollo y uso poco “amigables”) provocó que quedaran en desuso. A resultas de todo ello, surgió una nueva generación de aplicaciones gratuitas y/o de pago tales como *Tonatiuh*, *Comsol Multiphysics (Wave Optics Module)* y *SolTrace*, entre otros.

Figura 4.65. Haz de rayos por método Montecarlo (fuente: Comsol, Soltrace, Tonatiuh)

Basado en sus predecesores, **SolTrace** versión 2012.7.9 proporciona al usuario las bondades de una herramienta de diseño óptico de propósito general, que aplicadas a las necesidades de esta Tesis Doctoral, la convierten en un programa de gran utilidad. Este *software* (programado en un ágil C++ enriquecido con el entorno de programación gráfica Qt) está desarrollado en el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos de América (*NREL*) con el objetivo de modelizar sistemas de energía solar por concentración (*CSP*) y analizar su rendimiento óptico. Tal y como se anticipaba con anterioridad, su código emplea la metodología de trazado de rayos de Montecarlo, bajo el cual el usuario selecciona un número dado de rayos a ser proyectados. Cada uno de ellos es rastreado a través de todo el sistema físico definido mientras encuentra varias interacciones ópticas. Algunas de ellas son probabilísticas *per se* (p.ej., la selección del ángulo del Sol a partir de la distribución de la intensidad de irradiancia), mientras que otras son deterministas (p.ej., el cálculo de la intersección del rayo incidente con una superficie descrita analíticamente y la dirección reflejada resultante). En el

caso de la energía solar de concentración, ya que replica interacciones reales de fotones, el código puede proporcionar resultados precisos para sistemas complejos de difícil modelación. Y como seguramente se intuirá, la precisión aumenta con el número de rayos trazados ([Spencer G.H. et al., 1962](#)), sin sufrir excesivos incrementos del tiempo de procesamiento (cosa que sí sucede con geometrías complejas). Permite la parametrización del problema mediante entrada de texto, hoja de cálculo o modelado de geometrías 3D basado en *SketchUp*. Dicho lo cual, *SoITrace* se puede emplear para modelar geometrías ópticas en series de etapas (físicas o virtuales, para contabilizar los flujos energéticos en todo el sistema) compuestas de cualquier número de elementos ópticos con atributos incluyendo forma, contorno y calidad óptica. Ello permite modelar colectores cilindro-parabólicos, sistemas lineales de Fresnel, geometrías de torre central y sistemas ópticos de enfoque puntual como los colectores cilindro-parabólicos, así como cualquier geometría óptica que posea atributos. Presenta los datos a modo de diagramas de dispersión y mapas de flujo, permitiendo guardar los datos para procesarlos con otro *software* matemático (*Matlab*, *Mathematica*, *Maple*).

El mentado método de **Montecarlo** es un algoritmo no determinista o estadístico, empleado en la aproximación de expresiones matemáticas complejas y costosas de evaluar con exactitud. Recibió su nombre en 1944 en referencia al Casino de Montecarlo (Mónaco) considerada “la capital del juego de azar”: al fin y al cabo, la ruleta es un formidable generador simple de números aleatorios (o así debería ser si no está “trucada”). En resumen, la idea es que resulta más simple tener una concepción somera del resultado general de un juego de azar realizando pruebas múltiples y contando las proporciones de los resultados, que computar todo el conjunto de posibilidades de combinación de manera formal. El empleo de los métodos de Montecarlo como herramienta de investigación, tiene un origen bélico: el desarrollo de la bomba atómica durante la II Guerra Mundial en el Laboratorio Nacional de Los Álamos en EE. UU. El esfuerzo científico de investigación en obtener estimadores para los valores característicos de la ecuación de Schrödinger (*John von Neumann*, *Stanislaw Ulam*, *Harris*, *Herman Kahn*, *Enrico Fermi*, *Nicholas Metropolis*, *Richtmyer* y *Ulam*) desembocó en la simulación de circunstancias probabilísticas de hidrodinámica relacionadas con la difusión de neutrones en el material de fisión (era prácticamente imposible resolver las ecuaciones integro-diferenciales que gobiernan la dispersión, absorción y fisión). Y dicha difusión posee un comportamiento aleatorio, cuyo estudio podía implementarse en el primer ordenador del mundo (el *ENIAC*). El método genera soluciones **aproximadas** a una gran variedad de problemas matemáticos tanto estocásticos como deterministas posibilitando la concepción de experimentos con muestreos de números pseudoaleatorios. Y a diferencia de los métodos numéricos que se basan en evaluaciones de N puntos en un espacio M -dimensional para encontrar una solución aproximada, el método de Montecarlo tiene un error absoluto de la estimación que decrece con el inverso de la raíz cuadrada de N (teorema del límite central). Esto permite probar con experimentos mentales las posibilidades, y para cada etapa, determinar por casualidad qué sucedería (con un número aleatorio distribuido según las probabilidades), totalizando todas las posibilidades para tener una idea global del proceso físico.

¿Por qué la calidad de un trazador de rayos basado en el método de Montecarlo es más **realista** que la de un motor estocástico? ([Neumann A. et al., 2002](#)). El término "trazado distribuido de rayos" fue acuñado originalmente por *Robert Cook* en 1984, cuando observó que para evitar el solapamiento de rayos, el *renderizador* necesitaba tomar más muestras (más rayos) que el número de *píxeles* de la imagen y combinar los resultados. Un método para ejecutar esto consistía en disparar múltiples rayos dentro de un píxel y promediar sus valores de color. Sin embargo, si el *renderizador* ya está trazando varios rayos por *píxel* para obtener una imagen no solapada, dichos rayos pueden ser "distribuidos" entre dimensiones adicionales para muestrear efectos que no pueden ser capturados por un único rayo. Aunque siendo rigurosos el trazado de rayos de Montecarlo es un término levemente ambiguo (en la mayoría de los casos se refiere a técnicas que resuelven la ecuación de *renderizado* introducida por *Jim Kajiya* en 1986) el resumen de la integración de Montecarlo en el mapeado progresivo de trayectorias de fotones, es que es factible calcular la integral de cualquier función eligiendo aleatoriamente puntos en el dominio de integración y promediando el valor de la función para tales puntos ([Steele C.R. et al., 1991](#)). Llevando esta técnica a la energía solar de concentración, es factible utilizar la técnica de Montecarlo para integrar la cantidad de luz que llega al receptor dentro de un *píxel* al objeto de calcular el valor asignado al mismo. Así un trazador de rutas lo hace escogiendo aleatoriamente un punto dentro del *píxel* para disparar el primer rayo y continúa eligiendo aleatoriamente una dirección para continuar en la superficie en la que interseca... y así progresivamente ([Ratzel A.C. et al., 1987](#)).

4.7.1 Definición de factor de forma solar

Pues bien, una vez fijados conocidos los orígenes de esta aplicación, se procede sin más dilación a iniciar el proceso de parametrización de *SolTrace*. Dos características **definen** al **Sol** como fuente de irradiación: la distribución angular de la intensidad de radiación a través del disco solar (denominada forma del Sol) y la posición solar. El primer paso a dar es determinar la dirección del Sol: la mejor opción que el programa ofrece es definir un punto en el sistema de coordenadas global de forma que un vector director desde el origen hasta un punto final, defina la dirección del Sol. De esta forma *SolTrace* calcula la posición del Sol en azimut y elevación y determina un vector unitario correspondiente basado en las ecuaciones de posicionamiento solar basadas en el tiempo solar que provienen de la relación geométrica esférica de la Tierra y el Sol, que se recuerdan:

$$\delta = \arcsen[0,3975 \cdot \cos(0,98563 \cdot (D - 173))] \quad (5)$$

$$\omega = 15(H - 12) \quad (6)$$

$$\alpha = \arcsen(\sen\delta \cdot \sen L + \cos\delta \cdot \cos\omega \cdot \cos L) \quad (7)$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sen\delta \cdot \cos L - \cos\delta \cdot \sen L \cdot \cos\omega}{\cos\alpha}\right) \quad (8)$$

$$x = -\sen\gamma \cdot \cos\alpha; y = \sen\alpha; z = \cos\gamma \cdot \cos\alpha \quad (9)$$

El siguiente paso es determinar la intensidad de la radiación solar en tanto por uno, para lo cual se tienen tres opciones disponibles. Las dos primeras son distribuciones probabilísticas habituales, pero aunque la forma del Sol varía ampliamente con la ubicación terrestre, las condiciones meteorológicas y el tiempo, no es verdaderamente ni gaussiano ni de naturaleza pulsante. Sin embargo, siguiendo las recomendaciones del *NREL*, la forma de pulso rectangular es la aproximación más adecuada para un gran conjunto de problemas como el de esta Tesis, donde el parámetro básico es el ancho de ángulo medio de 4,65 mrad. Para sistemas de alta precisión, no se recomienda el uso de un Sol gaussiano a menos que el sistema incluya errores ópticos suficientemente grandes (bien basados en la geometría o en definiciones de propiedades ópticas).

Figura 4.66. Parametrización del factor de forma solar (fuente: autor)

4.7.2 Definición de propiedades óptico-dimensionales de colectores

Uno de los criterios que es imprescindible tener en cuenta para la definición óptica de elementos en *SolTrace* es que el elemento físico definido como primera etapa óptica de un sistema es el único que “ve directamente” la radiación procedente del Sol. Esto es, los rayos trazados desde el Sol llegan de forma directa únicamente a dicha primera etapa óptica, independientemente del posicionamiento geométrico del resto de etapas que pudiera tener el sistema objeto de modelización. Lo que ven dichas etapas posteriores son los rayos que provienen de la primera etapa, bien reflejados, bien refractados, bien transmitidos desde ella. Este concepto es especialmente necesario tanto por entender el principio de trabajo de la aplicación como por posibles proyecciones de sombras.

En añadidura, se puede afirmar que en general es posible y razonable definir todos los elementos ópticos en esta primera etapa y *de facto* esta estrategia otorga mayor precisión al sistema. A su vez, los elementos ópticos individuales definidos dentro de una etapa pueden tener tanto conjuntos de propiedades reflexivas como refractivas. En concreto, dentro de las propiedades ópticas refractivas son relevantes la transmisividad y los índices

de refracción. De hecho, un componente físico real está constituido por dos elementos o superficies, de forma que la transmisividad se define en tanto por uno como la fracción de rayos que pasan a través de un elemento. Especial cuidado se debe tener en este sentido para definir el elemento susceptible de recibir el rayo incidente para asignarle índices de refracción correctos por la parte anterior o posterior, siendo coherente a su vez con los índices de refracción de los materiales intermedios. *SolTrace* calcula las reflexiones y refracciones en las interfaces de las superficies mediante las conocidas ecuaciones matemáticas de Fresnel, que permiten gestionar correctamente características tales como la Reflexión Interna Total (*Total Internal Reflection* o TIR). Ante cualquier intersección entre un rayo incidente y una superficie refractiva, *SolTrace* primero determina el lado (anterior o posterior) y emplea las propiedades ópticas asociadas para prever las interacciones en esa intersección. Así, el hecho de que un rayo sea absorbido queda determinado por una comparación entre un número aleatorio y el valor de transmitancia vinculado a las propiedades ópticas.

Si no lo es, *SolTrace* calcula los factores de reflexión para las componentes paralelas y perpendicular de polarización, basándose en el cálculo promedio de errores asociados a las pendientes de las superficies incidentes. Así, la fracción transmitida posible es $1-p$ donde p representa la superficie reflectante y donde un número aleatorio comprendido entre 0 y 1 determina si cada rayo es reflejado conforme un ángulo especular θ_1 o propagado dentro del medio con otro ángulo de refracción θ_2 . Ciertamente es que se pueden implementar mejoras en este sentido, pero el algoritmo interno funciona de esta forma y es preciso conocerlo. En cierta medida, se puede asociar dicho número aleatorio a la absorptancia del medio en cuestión, que es otra forma de subsanar en parte ese problema. En términos de reflexión, un elemento o superficie es suficiente para modelizar una superficie especular estando permitida también la transmisión. En este caso, el parámetro relevante es la reflectividad de la parte anterior (totalmente reflexiva) como posterior (reflexiva nula) de la superficie a tratar, pudiéndose incluir un factor p de reflectancia función del ángulo de incidencia.

Para un análisis refractivo y reflexivo simultáneo, se aplica otro conjunto de parámetros que definen la precisión óptica de la superficie. Además del efecto de forma de la superficie del elemento sobre la dirección del haz, se pueden incluir dos errores aleatorios que afectan a la interacción de dicho haz en la superficie de un elemento: error de pendiente y especularidad de la superficie. Se podría decir que el primero propio de la macroestructura del material, mientras que la especularidad es un efecto de su microestructura. Bajo esta premisa, el error óptico global será:

$$\sigma_{\text{optico}} = \sqrt{4\sigma_{\text{pendiente}}^2 + \sigma_{\text{especularidad}}^2} \quad (10)$$

donde σ se sustituirá por la mitad del ancho del pulso rectangular en el caso de emplear dicha distribución. Y donde conforme las leyes de Snell, un error de pendiente de θ se traduce en un error del vector reflejado de 2θ .

Hasta ahora, se ha discutido acerca de la localización, orientación, tipo de elemento óptico y propiedades ópticas. Quedan dos parámetros restantes que precisan ser definidos: la superficie del contorno y la apertura del elemento, ambas disponibles en el tratamiento de *SolTrace*. Entre las primeras se encuentran varios tipos de superficies de revolución: planos, parábolas, semiesferas, hipérbolas, semielipsoides, conos, cilindros y toroides. Pero además de estas superficies analíticas, se pueden describir muchas superficies definidas por series matemáticas, como las series de *Zernike* y las series polinomiales estándar.

Por último, las superficies descritas por nubes de puntos discretos, tanto en sus coordenadas espaciales como en sus primeras derivadas, se pueden fijar vía interpolación cúbica o interpolación no lineal de la primera derivada combinada con las superficies de *Zernike*. Esta última descripción de las superficies es una salida de lo que se conoce como *VSHOT (Video Scanning Hartmann Test)* usado habitualmente para caracterizar concentradores ópticos en aplicaciones termosolares, verdadero punto fuerte de *SolTrace*. Entre las formas de apertura disponibles se encuentran: circular, rectangular, triangular, hexagonal, anular y cuadrilateral. En añadidura, los valores que se asignarán seguidamente en el proceso de parametrización, serán provenientes de las recomendaciones del propio programa informático *SolTrace* al no disponer de datos fidedignos de los fabricantes de equipos de laboratorio. Seguramente los parámetros serán mejores que los reales, razón por la cual en rigor habría que minorar los resultados finales en términos de irradiancia concentrada.

En lo que respecta al colector **cilindro-parabólico**, inicialmente se inicia la parametrización de su concentrador, en la cual se ha asignado una reflectividad de 0,9050; transmisividad de 1; error de pendiente de 3,5 mrad; error de especularidad 0,1 mrad; distribución *gaussiana* del error estadístico e índice de refracción real de 1. El resto de parámetros, se toman por defecto.

Figura 4.67. Parametrización óptica del concentrador cilindro-parabólico (fuente: autor)

Para el absorbedor se asigna una reflectividad de 0,04; transmisividad nula; error de pendiente y error especular ambos de 0,0001 mrad; distribución *gaussiana* del error estadístico e índice de refracción igual a 1.

Figura 4.68. Parametrización óptica del absorbedor cilindro-parabólico (fuente: autor)

Por último, en lo referente al tubo receptor será preciso diferenciar entre cara interior y cara exterior. Para la primera se asocia una reflectividad nula; transmisividad de 0,9650; error de pendiente de 0,0001 mrad; error de especularidad 0,0001 mrad; distribución *gaussiana* del error e índice de refracción de 1.

Figura 4.69. Parametrización parte interior tubo cilindro-parabólico (fuente: autor)

Mientras que para la segunda, se asigna una reflectividad también nula; transmisividad de 0,9800; mismo error de pendiente de 0,0001 mrad; error de especularidad 0,0001 mrad; distribución *gaussiana* del error e índice de refracción de 1.

Figura 4.70. Parametrización parte exterior tubo cilindro-parabólico (fuente: autor)

En cuanto a las dimensiones físicas del colector cilindro-parabólico, quedan parametrizadas por el siguiente conjunto de cotas.

Figura 4.71. Parametrización dimensional colector cilindro-parabólico (fuente: autor)

De forma análoga se procede para el colector **paraboloidal**, donde se parametrizan las propiedades del concentrador con reflectividad, transmisividad e índice de refracción iguales a 1; error de pendiente y de especularidad iguales a 0,0001 mrad y distribución *gaussiana* del error.

Figura 4.72. Parametrización óptica concentrador paraboloidal (fuente: autor)

De forma similar se indican los valores de las dimensiones tanto del concentrador como del absorbedor puntual, tal y como muestran las capturas de pantalla anexas.

Figura 4.73. Parametrización dimensional concentrador paraboloïdal (fuente: autor)

Figura 4.74. Parametrización dimensional absorbedor paraboloïdal (fuente: autor)

4.7.3 Trazado de haces de rayos y obtención de resultados

Una vez definido el sistema completo, se puede seleccionar el número de haces de rayos que serán trazados a través del sistema. Dicho valor depende del nivel de detalle y precisión que se necesite, especialmente en el caso de necesitar un mapa de flujo suficientemente fidedigno, para el cual se suele precisar del orden de 1.000.000 rayos. Y una vez realizado el trazado y lanzada la simulación, los resultados se pueden visualizar de muchas formas. Así, se pueden visualizar los gráficos tridimensionales de intersección de rayos, con o sin la estela de dichos rayos. También se puede obtener información estadística (centroides, picos de flujo, incertidumbre, flujo promedio...) que a su vez puede ser post-procesada posteriormente.

Para terminar, una de las funcionalidades adicionales y más potentes de *SolTrace* estriba en la posibilidad de implementar programación de tareas para automatizarlas: definiciones del Sol; propiedades geométricas u ópticas sin la necesidad de que el investigador interactúe. Una posible línea de trabajo para esta implementación (que en esta Tesis no es objeto de uso) sería p.ej. modelizar una torre central de helióstatos a diferentes posiciones durante todo un año. La programación se preocuparía de calcular todas las orientaciones de los helióstatos en cada paso de programación, correr la simulación del trazado de haces de rayos, salvar los resultados y generar el resultado final y las estadísticas asociadas.

Pues bien, en relación al colector **cilindro-parabólico**, el proceso de trazado de haces de rayos evoluciona tal y como muestran las imágenes.

Figura 4.75. Parametrización trazado rayos colector cilindro-parabólico (fuente: autor)

Figura 4.76. Trazado de rayos sobre colector cilindro-parabólico (fuente: autor)

Y como el lector intuirá, para el colector **paraboloidal** se tiene una metodología y resultados similares a los que aparecen seguidamente.

Figura 4.77. Parametrización trazado rayos sobre colector paraboloidal (fuente: autor)

Figura 4.78. Trazado de rayos sobre colector paraboloidal (fuente: autor)

Una vez realizado el trazado de los haces de rayos para ambos tipos de colectores, las **conclusiones** que se pueden obtener en cuanto a irradiancia concentrada en W/m^2 se pueden representar en términos de trazado de contorno (a modo de visualización termográfica) o bien en términos de trazado de superficie (a modo de representación tridimensional). Seguidamente se muestran las salidas por pantalla que el programa *SoLTrace* genera tras la simulación para el colector cilindro-parabólico y el paraboloidal, respectivamente.

Figura 4.79. Irradiancia del receptor cilindro-parabólico en trazado contorno (fuente: autor)

Figura 4.80. Irradiancia del receptor cilindro-parabólico en trazado superficie (fuente: autor)

Antes de hacer interpretación cuantitativa alguna de los resultados, sí merece la pena indicar que aunque se vislumbra la forma cilíndrica del receptor del colector cilindro-parabólico, se esperaba una definición geométrica más inequívoca (hecho que no ha sucedido). Merecerá la pena un análisis ulterior en el capítulo 6 para comparar resultados teóricos con los empíricos. Sea como fuere, la irradiancia pico (*Peak flux*) es $1.075,7 \text{ W/m}^2$ y la irradiancia promedio (*Avg. flux*) a $780,937 \approx 780,94 \text{ W/m}^2$.

Figura 4.81. Irradiancia del receptor paraboloïdal trazado contorno (fuente: autor)

Figura 4.82. Irradiancia del receptor paraboloïdal trazado superficie (fuente: autor)

Y de forma análoga a como se esbozaba hace escasas líneas, se esperaba una forma geométrica más centrada y esférica en torno al receptor del colector paraboloïdal. La apariencia física obtenida tiene una presentación fusiforme algo inesperada, que también merecerá la pena analizar con detenimiento aunque sea desde el punto de vista geométrico. En cualquier caso, la irradiancia pico (*Peak flux*) es **2.971,8 W/m²** y la irradiancia promedio (*Avg. flux*) a 949,8 W/m².

Por último, la conocida como Ley de Stefan-Boltzmann, permite inferir la **temperatura** que tendrá cada uno de los **receptores** considerados como cuerpos negros, en función de las irradiancias máximas simuladas:

$$\frac{P}{A} = \sigma \cdot T^4 \Rightarrow T = \sqrt[4]{\left(\frac{P}{A}\right) \cdot \left(\frac{1}{\sigma}\right)} \quad (11)$$

donde:

P/A: irradiancia recibida por cada receptor como cuerpo negro, en W/m²

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴: constante de Stefan-Boltzmann

T: temperatura de cada receptor, en K

Para el colector **cilindro-parabólico**, su T_{cp} será:

$$\begin{aligned} \left(\frac{P}{A}\right)_{cp} &= \sigma \cdot T_{cp}^4 \Rightarrow \\ T_{cp} &= \sqrt[4]{\left(\frac{P}{A}\right) \cdot \left(\frac{1}{\sigma}\right)} = \sqrt[4]{1.075,7 \cdot \left(\frac{1}{5,67 \cdot 10^{-8}}\right)} = 371,14 \text{ K} = \mathbf{97,99^\circ C} \end{aligned} \quad (12)$$

Para el colector **paraboloidal**, su T_p será:

$$\begin{aligned} \left(\frac{P}{A}\right)_p &= \sigma \cdot T_p^4 \Rightarrow \\ T_p &= \sqrt[4]{\left(\frac{P}{A}\right) \cdot \left(\frac{1}{\sigma}\right)} = \sqrt[4]{2.971,8 \cdot \left(\frac{1}{5,67 \cdot 10^{-8}}\right)} = 478,47 \text{ K} = \mathbf{205,32^\circ C} \end{aligned} \quad (13)$$

En el capítulo 6 se realizará una **interpretación** de la validez de estos resultados teóricos comparándolos con los datos empíricos reales obtenidos con los sensores de temperatura y con la cámara termográfica.

BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 4

- [1]. Schuh G.; Rudolf S.; Breunig S. Modular Platform Design for Mechatronic Systems using Axiomatic Design and Mechatronic Function Modules. *Procedia CIRP*, Volume 50, 2016, pp. 701-706.
- [2]. González-Lluch C.; Company P.; Contero M.; Camba J.D.; Plumed R. A survey on 3D CAD model quality assurance and testing tools. *Computer-Aided Design*, Volume 83, February 2017, pp. 64-79.
- [3]. Kuriakose J.; Tharamuttam, A.K.N. Design and Development of an Automatic Solar Tracker. Open access, Research article. *Energy Procedia*, Volume 143, December 2017, pp. 629-634.
- [4]. Burleyson C.D.; Nathalie Voisin, Z.; Taylor T.; Yulong X. I.K. Simulated building energy demand biases resulting from the use of representative weather stations. Research article. *Applied Energy*, Volume 209, 1 January 2018, pp. 516-528.
- [5]. Camba J.D.; Contero M.; Company P. Parametric CAD modeling: An analysis of strategies for design reusability. *Computer-Aided Design*, Volume 74, May 2016, pp. 18-31.
- [6]. Beale R.; Bowers P. Chapter Two: CAD and Design Automation in Piping Design. Book chapter. *The Planning Guide to Piping Design (Second Edition)*, 2018, pp. 39-59.
- [7]. Bieker U.; Neumann A. Using logic programming and coroutining for electronic CAD. Open archive, Research article. *The Journal of Logic Programming*, Volume 26, Issue 2, February 1996, pp.199-215.
- [8]. Sun X.; Robaldo L. On the complexity of input/output logic. Research article. *Journal of Applied Logic*, Volume 25, December 2017, pp. 69-88.
- [9]. Alghazzawi T.F. Advancements in CAD/CAM technology: Options for practical implementation. Review article. *Journal of Prosthodontic Research*, Volume 60, Issue 2, April 2016, pp. 72-84.
- [10]. Yokoyama T.; Axelsen H.B.; Glück R. Fundamentals of reversible flowchart languages. Research article. *Theoretical Computer Science*, Volume 611, 18 January 2016, pp. 87-115.
- [11]. Julius R.; Schürenberg M.; Schumacher F.; Fay A. Transformation of GRAFCET to PLC code including hierarchical structures. Research article. *Control Engineering Practice*, Volume 64, July 2017, pp. 173-194.
- [12]. Tan A.; Changjiang J. The Application of Maze algorithm in Translating Ladder Diagram into Instruction Lists of Programmable Logical Controller. Open access, Research article. *Procedia Engineering*, Volume 15, 2011, pp. 264-268.

-
- [13]. Woodward M.R. The use of Nassi-Shneiderman charts and supporting tools in software engineering education. Research article. Computers & Education, Volume 11, Issue 4, 1987, pp. 267-279.
- [14]. Barišić A; Amaral, V.; Goulão M. Usability driven DSL development with USE-ME. Research article. Computer Languages, Systems & Structures, Volume 51, January 2018, pp. 118-157.
- [15]. Ishikawa M.; Maruta I. Rapid Prototyping for Control Education using Arduino and Open-Source Technologies. Research article. IFAC Proceedings Volumes, Volume 42, Issue 24, 2010, pp. 317-321.
- [16]. Townsend L.W.; PourArsalan M.; Hall M.I.; Anderson J.A.; Adamczyk A.M. Estimates of Carrington-class solar particle event radiation exposures on Mars. Research article. Acta Astronautica, Volume 69, Issues 7–8, September–October 2011, pp. 397-405.
- [17]. Abdelghani-Idrissi M.A.; Khalfallaoui S.; Seguin D.; Vernières-Hassimi L.; Leveneur S. Solar tracker for enhancement of the thermal efficiency of solar water heating system. Research article. Renewable Energy, Volume 119, April 2018, pp. 79-94.
- [18]. Kater A.; Wriedt J.P.; Meurer T. Finite Element Modeling and Motion Planning of an Adaptive Elastic Wingsail. Research article. IFAC-PapersOnLine, Volume 50, Issue 1, July 2017, pp. 6768-6773.
- [19]. Singiresu S.R. Chapter 22: Finite Element Analysis Using ANSYS. Book chapter. The Finite Element Method in Engineering (Sixth Edition), 2018, pp. 703-721.
- [20]. Thompson M.K.; Thompson J.M. Chapter 1: Introduction to ANSYS and Finite Element Modeling. Book chapter. ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis, 2017, pp. 1-9.
- [21]. Liu D.; Wang W.; Liu J. Sensitivity Analysis of Meteorological Parameters on Building Energy Consumption. Open access, Research article. Energy Procedia, Volume 132, October 2017, pp. 634-639.
- [22]. Documento Básico Seguridad Estructural. Acciones en la Edificación. CT de la Edificación - Ministerio de Fomento, Madrid, 2009.
- [23]. Habte F.; Chowdhury A.G.; Zisis I. Effect of wind-induced internal pressure on local frame forces of low-rise buildings. Research article. Engineering Structures, Volume 143, 15 July 2017, pp. 455-468.
- [24]. Dassi F.; Kamenski L.; Farrell P.; Si H. Tetrahedral mesh improvement using moving mesh smoothing, lazy searching flips, and RBF surface reconstruction. Research article. Computer-Aided Design, In press, corrected proof, Available online 8 December 2017.
-

-
- [25]. Khanna K.; V.K. Gupta; Nigam S.P. Creep Analysis in Functionally Graded Rotating Disc Using Tresca Criterion and Comparison with Von-Mises Criterion. Research article. Materials Today: Proceedings, Volume 4, Issue 2, Part A, 2017, pp. 2431-2438.
- [26]. Jorgensen G. Comparison of Predicted Optical Performance with Measured Results for Dish Concentrators. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO. 1991. NREL/TP-257-4245.
- [27]. Wendelin T. SolTRACE: A New Optical Modeling Tool for Concentrating Solar Optics. Proceedings of the ISEC 2003: International Solar Energy Conference, Kohala Coast, Hawaii. New York: American Society of Mechanical Engineers, 15-18 March 2003, pp. 253-260. NREL Report No. CP-550-32866.
- [28]. Spencer G.H. Murty, M.V.R.K. General Ray-Tracing Procedure. Journal of the Optical Society of America, Vol. 52, June, 1962. pp. 672-678.
- [29]. Neumann A.; Witzke, A.; Jones, S.A.; Schmitt, G. Representative Terrestrial Solar Brightness Profiles, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 124, May 2002, pp. 198-204.
- [30]. Steele C.R.; Balch, C.D.; Jorgensen, G.J.; Wendelin, T.; Lewandowski, A. Membrane Dish Analysis: A Summary of Structural and Optical Analysis Capabilities, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO. 1991. NREL/TP-253-3432.
- [31]. Ratzel A.C.; Boughton, B.D. CIRCE.001: A Computer Code for Analysis of Point-Focus Concentrators with Flat Targets, SAND86-1866, 1987, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.

LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 4

Figura 4.1. Fases del diseño mecatrónico (fuente: National Instruments)	105
Figura 4.2. Planta del prototipo mecatrónico (fuente: autor).....	107
Figura 4.3. Alzado del prototipo mecatrónico (fuente: autor).....	107
Figura 4.4. Vista latera del prototipo mecatrónico (fuente: autor).....	108
Figura 4.5. Modelización de tareas: concentración y seguimiento solar (fuente: autor)	109
Figura 4.6. Variables meteorológicas capturables por el prototipo (fuente: autor)	109
Figura 4.7. Diseño 3D completo del prototipo de seguidor termosolar (fuente: autor)	110
Figura 4.8. Interfaz de trabajo de FreeCAD 0.16 (fuente: autor)	111
Figura 4.9. Diseño 3D de varios dispositivos mecánicos (fuente: autor)	112
Figura 4.10. Diseño 3D de dispositivos ópticos (fuente: autor)	113
Figura 4.11. Diseño 3D de varios dispositivos electrónicos (fuente: autor)	113
Figura 4.12. Interfaz de trabajo de Fritzing 0.9.3 (fuente: autor)	114
Figura 4.13. Esquema Fritzing conceptual del prototipo (fuente: autor).....	115
Figura 4.14. Esquema Fritzing electrónico del prototipo (fuente: autor).....	116
Figura 4.15. Contabilización de entradas y salidas en el autómeta (fuente: autor).....	116
Figura 4.16. Interfaz de trabajo de PSeInt (fuente: autor)	119
Figura 4.17. Flujograma completo (fuente: autor).....	120
Figura 4.18. Texto auxiliar de ayuda para interpretación de variables (fuente: autor)	121
Figura 4.19. Definición e inicialización de variables (fuente: autor).....	121
Figura 4.20. Posicionamiento manual con joystick (fuente: autor)	121
Figura 4.21. Seguimiento en elevación (fuente: autor)	122
Figura 4.22. Seguimiento en azimut (fuente: autor).....	122
Figura 4.23. Comprobación velocidad de viento (fuente: autor)	122
Figura 4.24. Comprobación caída de lluvia (fuente: autor).....	123
Figura 4.25. Comprobación caída de granizo (fuente: autor)	123
Figura 4.26. Comprobación máximos de radiación (fuente: autor).....	123
Figura 4.27. Comprobación mínimos de radiación (fuente: autor)	123
Figura 4.28. Comprobación alta temperatura colector paraboloïdal (fuente: autor)	124
Figura 4.29. Comprobación alta temperatura colector cilindro-parabólico (fuente: autor)	124
Figura 4.30. Captura de datos meteorológicos (fuente: autor)	124
Figura 4.31. Muestra de datos y condición de salida (fuente: autor).....	124
Figura 4.32. Interfaz de programación de Visualino (fuente: autor)	125
Figura 4.33. Definición e inicialización de variables (fuente: autor).....	127
Figura 4.34. Movimiento manual en azimut y elevación con joystick (fuente: autor)	127
Figura 4.35. Seguimiento en elevación (fuente: autor)	128
Figura 4.36. Seguimiento en azimut (fuente: autor).....	128
Figura 4.37. Comprobación velocidad de viento (fuente: autor)	129
Figura 4.38. Comprobación caída de lluvia (fuente: autor).....	129
Figura 4.39. Comprobación caída de granizo (fuente: autor)	129
Figura 4.40. Comprobación máximos de radiación (fuente: autor).....	130
Figura 4.41. Comprobación mínimos de radiación (fuente: autor)	130
Figura 4.42. Comprobación alta temperatura colector paraboloïdal (fuente: autor)	130
Figura 4.43. Comprobación alta temperatura colector cilindro-parabólico (fuente: autor)	130
Figura 4.44. Captura de datos meteorológicos (fuente: autor)	131
Figura 4.45. Muestra global de datos operativos y meteorológicos (fuente: autor).....	131
Figura 4.46. Metodología de elementos finitos (fuente: Julián García de León)	140
Figura 4.47. Valores básicos de velocidad de viento en España (fuente: CTE)	141
Figura 4.48. Dimensiones y fuerzas en colectores (fuente: Julián García de León)	144
Figura 4.49. Reacciones en tubo cilindro-parabólico (fuente: Julián García de León).....	144
Figura 4.50. Reacciones en soporte (fuente: Julián García de León)	145
Figura 4.51. Esfuerzos sobre cruceta (fuente: Julián García de León)	145
Figura 4.52. Esfuerzos sobre casquillos de cruceta (fuente: Julián García de León)	146
Figura 4.53. Esfuerzos sobre polea (fuente: Julián García de León)	147
Figura 4.54. Etapas de pre-procesado de diseño CAD (fuente: Julián García de León)	148
Figura 4.55. Mallado y fuerzas en abrazadera (fuente: Julián García de León).....	149
Figura 4.56. Mallado y fuerzas en soporte (fuente: Julián García de León).....	149

Figura 4.57. Mallado y fuerzas en casquillo (fuente: Julián García de León)	150
Figura 4.58. Mallado y fuerzas en perfil en L (fuente: Julián García de León)	150
Figura 4.59. Mallado y fuerzas en polea (fuente: Julián García de León)	150
Figura 4.60. Tensiones von Mises de abrazadera (fuente: Julián García de León)	151
Figura 4.61. Tensiones von Mises de soporte (fuente: Julián García de León)	151
Figura 4.62. Tensiones von Mises de casquillo (fuente: Julián García de León)	152
Figura 4.63. Tensiones von Mises de perfil de aluminio (fuente: Julián García de León)	152
Figura 4.64. Tensiones von Mises en polea (fuente: autor).....	153
Figura 4.65. Haz de rayos por método Montecarlo (fuente: Comsol, Soltrace, Tonatiuh)	154
Figura 4.66. Parametrización del factor de forma solar (fuente: autor)	157
Figura 4.67. Parametrización óptica del concentrador cilindro-parabólico (fuente: autor)	159
Figura 4.68. Parametrización óptica del absorbedor cilindro-parabólico (fuente: autor)	160
Figura 4.69. Parametrización parte interior tubo cilindro-parabólico (fuente: autor)	160
Figura 4.70. Parametrización parte exterior tubo cilindro-parabólico (fuente: autor)	161
Figura 4.71. Parametrización dimensional colector cilindro-parabólico (fuente: autor).....	161
Figura 4.72. Parametrización óptica concentrador paraboloidal (fuente: autor).....	161
Figura 4.73. Parametrización dimensional concentrador paraboloidal (fuente: autor)	162
Figura 4.74. Parametrización dimensional absorbedor paraboloidal (fuente: autor)	162
Figura 4.75. Parametrización trazado rayos colector cilindro-parabólico (fuente: autor)	163
Figura 4.76. Trazado de rayos sobre colector cilindro-parabólico (fuente: autor).....	163
Figura 4.77. Parametrización trazado rayos sobre colector paraboloidal (fuente: autor).....	164
Figura 4.78. Trazado de rayos sobre colector paraboloidal (fuente: autor).....	164
Figura 4.79. Irradiancia del receptor cilindro-parabólico en trazado contorno (fuente: autor)	165
Figura 4.80. Irradiancia del receptor cilindro-parabólico en trazado superficie (fuente: autor)	165
Figura 4.81. Irradiancia del receptor paraboloidal trazado contorno (fuente: autor)	166
Figura 4.82. Irradiancia del receptor paraboloidal trazado superficie (fuente: autor)	166

LISTA DE TABLAS CAPÍTULO 4

Tabla 1. Mapeo de señales del prototipo termosolar (fuente: autor)	117
Tabla 2. Coeficiente de exposición c_e según aspereza y altura (fuente: CTE).....	142
Tabla 3. Coeficientes F, k, Z y L según tipo de entorno (fuente: CTE).....	142
Tabla 4. Coeficiente de presión c_p o succión c_s (fuente: CTE)	142
Tabla 5. Cálculos de factor F y coeficientes de exposición (fuente: Julián García de León)	143

ÍNDICE CAPÍTULO 5

5. CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO Y ESTACIÓN DE VALIDACIÓN.....	175
5.1 Selección de componentes mecánicos del prototipo	175
5.1.1 Plancha metálica perforada.....	175
5.1.2 Estructura de sustentación	175
5.1.3 Sistema de transmisión	176
5.1.4 Perfilera de anclaje de colectores	176
5.1.5 Casquillos y tornillería varia	177
5.2 Selección de componentes ópticos del prototipo	178
5.2.1 Colector paraboloïdal	178
5.2.2 Colector cilindro-parabólico.....	178
5.3 Selección de componentes electrónicos del prototipo	179
5.3.1 Núcleo central de procesamiento.....	180
5.3.2 Componentes motrices	185
5.3.3 Sensórica.....	189
5.3.4 Electrónica complementaria	203
5.4 Presupuesto por partidas y coste global del prototipo	210
5.5 Equipos de protección y herramientas de ensamblaje	215
5.6 Recepción de componentes del prototipo.....	217
5.7 Fases de construcción del prototipo termosolar	218
5.8 Estación de validación: funciones, construcción y acabado final	223
BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 5	228
LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 5	231

5. CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO Y ESTACIÓN DE VALIDACIÓN

5.1 Selección de componentes mecánicos del prototipo

Una vez terminado el proceso de diseño, modelado y simulación del prototipo de seguidor termosolar, se inicia la etapa de búsqueda de fabricantes y distribuidores de material de laboratorio e investigación; conformado mecánico de aquellos productos que precisen una modificación estructural; ensamblaje de todos los dispositivos prestos para ser instalados; programación de maniobras de regulación y control; validación de sensores; y finalmente ejecución de puesta en marcha con realización de primeras pruebas de funcionamiento ([Gurr M. y Mülhaupt R., 2016](#)). En este epígrafe, se señalan los componentes que se han catalogado bajo la denominación de **mecánicos**: planchas metálicas perforadas a modo de bases; estructuras de sustentación; sistema de transmisión; perfilera de anclaje de colectores parabólico y cilindro-parabólico; casquillos y tornillería varia. La inmensa mayoría de estos componentes, han sido seleccionados de los proveedores *Microlog* y *Model Reyna*, poseedores de amplios catálogos de material científico. Seguidamente se pormenorizan sus propiedades más relevantes.

5.1.1 Plancha metálica perforada

Constituida por plancha metálica perforada de aluminio, disponible en dimensiones de 240 x 75 x 1,5 mm o bien de 500 x 75 x 1,5 mm. Todos los taladros o perforaciones tienen un diámetro de 4,2 mm, y sus centros están separados entre tanto en vertical como horizontal una distancia de 15 mm. En aras de la estandarización de los montajes mecánicos, estas cotas se replicarán en el resto de materiales mecánicos de sustentación.

Figura 5.1. Plancha metálica perforada (fuente: Microlog)

5.1.2 Estructura de sustentación

Nuevamente de material aluminio y constituido por tiras perforadas y perfiles cortos en secciones con forme de L, U y S.

Figura 5.2. Tira perforada y perfiles en L, U y S (fuente: Microlog)

5.1.3 Sistema de transmisión

Conformado por polea simple y polea doble, de aluminio y ajustables a ejes de 4 mm de diámetro exterior mediante un tornillo prisionero y disponibles en diámetros útiles (41 a 56 mm) y diámetros exteriores (45 a 60 mm); correas de transmisión de caucho de amplio rango de diámetros disponibles (20 a 80 mm); eje de latón de los antedichos 4 mm de diámetro exterior y longitud 240 mm; y engranajes y piñones dentados de latón (mucho más resistentes que el plástico) para encajar en ejes de 4 mm de diámetro exterior; distintos módulos y número de dientes, así como dotados de bulón según necesidades ([Liu D. et al., 2017](#)).

Figura 5.3. Engranajes, eje, polea y correa de transmisión (fuente: Model Reyna)

5.1.4 Perfilera de anclaje de colectores

Amén de los dispositivos de fijación que los propios fabricantes de ambos colectores incluyen en el alcance del pedido, ha sido necesario recurrir entre otros a perfiles longitudinales en L y chapas triangulares y cuadrangulares de configuración compatible con datos ya transmitidos: material aluminio, taladores de 4,2 mm separados 15 mm entre centros y abrazaderas de diámetro 25 mm.

Figura 5.4. Chapas, abrazadera y perfil longitudinal (fuente: Microlog)

5.1.5 Casquillos y tornillería varia

Bajo esta denominación se ubican los casquillos hexagonales de diámetro interior 4 mm a modo de patas de sustentación que se ven terminados por su parte inferior con pequeñas semiesferas de plástico; tornillería galvanizada de métrica M4 (4 mm de diámetro exterior) con filete de rosca normalizado, distintas longitudes (desde 6 hasta 40 mm) y principalmente de cabeza tipo estrella o *Phillips*; tuercas hexagonales de 4 mm de diámetro interior y arandelas M4.

Figura 5.5. Casquillo hexagonal, tornillo, tuerca y arandela (fuente: Microlog)

En añadidura y aunque en rigor las líneas que siguen deberían ubicarse dentro del epígrafe relacionado con componentes electrónicos, se estima que merece la pena incluirlo dentro del concepto tornillería varia. En efecto, la fijación de los dispositivos electrónicos a la chapa metálica base, se ha realizado intercalando pequeñas bases *minikit* de plástico a modo de separación dieléctrica, que evite posibles derivaciones eléctricas entre dispositivos **electrónicos** y la chapa de aluminio.

Dichos *minikits* tienen dimensiones 40 x 60 mm, con taladros de 4 mm de diámetro, grosor 3 mm y separados nuevamente 15 mm (para garantizar la compatibilidad con el resto de montajes). A su vez, la tornillería empleada es de menor diámetro (tornillería de precisión) habiendo recurrido a tornillos M3 e incluso M2, con longitudes comprendidas entre 6 y 30 mm y sus correspondientes tuercas compatibles.

Figura 5.6. Tornillería de precisión y base minikit (fuente: Microlog)

5.2 Selección de componentes ópticos del prototipo

Como seguramente el lector recuerde, los componentes ópticos son únicamente dos: el colector paraboloide y el colector cilindro-parabólico.

5.2.1 Colector paraboloide

El dispositivo, adquirido a la empresa de suministro de material científico *Ventus* Ciencia Experimental, es físicamente un paraboloide de revolución ([Sánchez M. et al., 2014](#)) de diámetro en la base 465 mm y una distancia focal de 100 mm. Sobre dicho punto focal y mediante el auxilio de un pequeño brazo de aluminio, se posiciona el foco constituido por una pequeña esfera de latón de diámetro 5 mm y color negro (para una mayor absorción de la irradiancia solar).

Figura 5.7. Colector paraboloide (fuente: Ventus)

5.2.2 Colector cilindro-parabólico

El dispositivo, igualmente adquirido a la empresa de suministro de material científico *Sidilab* y procedente una vez más del fabricante alemán *Phywe*, está constituido por un espejo colector cilindro-parabólico cóncavo ([Jin J. et al., 2017](#)) en forma de parábola “extrusionada” a lo largo de toda su longitud, que encuentra en su punto focal, un pequeño cilindro de vidrio tintado de color negro. Las dimensiones (longitud x anchura x diámetro de apertura de parábola) del primero son 110 mm x 90 mm x 55 mm. Las dimensiones iniciales del segundo son 250 mm x 8 mm, donde los 250 mm serán recortados hasta adecuar igualar a la longitud del espejo parabólico.

Figura 5.8. Colector cilindro-parabólico (fuente: Sidilab)

5.3 Selección de componentes electrónicos del prototipo

Ya se definió en el capítulo 4 el conjunto de características que debe cumplir la partida electrónica de dicho prototipo. Desde el punto de vista funcional, en dicho capítulo se hacía una primera subdivisión de los componentes que conforman el prototipo. Pormenorizando ahora desde el punto de vista **descriptivo**, se pueden definir cuatro grandes bloques de dispositivos electrónicos constitutivos que seguidamente se enumeran:

- **Núcleo central de procesamiento:** c por el autómata o tarjeta electrónica de control, junto con la carcasa o *shield* de ampliación de la conectividad complementaria, para un rápido conexionado posterior de sensores y actuadores.
- **Componentes motrices** y actuadores: motor paso a paso y actuador lineal junto a *driver* de alimentación-control de ambos.
- **Sensórica:** sin lugar a duda, es el conjunto más nutrido de dispositivos. En el mismo se ubican componentes tales como el sensor de vibración piezoeléctrico, sensor de detección de agua, sensor de temperatura y humedad, sensor de presión barométrica, sensor de calidad del aire, sensor de radiación, sensor de temperaturas focales, anemómetro de cazoletas, brújula electrónica y acelerómetro electrónico de tres ejes.
- **Electrónica complementaria:** como el propio vocablo indica, se trata de componentes electrónicos finales que realizan una tarea complementaria dentro de toda la funcionalidad del prototipo mecatrónico. Enumerando todos ellos, se tiene: potenciómetro analógico (para simular otras posibles señales), *joystick* de control de posicionamiento manual, cámara digital de visión, reloj digital en tiempo real, conmutador ON/OFF, adaptador de conexiones para adecuación de señal del anemómetro y regleta de puertos.

Parece interesante añadir en este instante, que con el objetivo de simplificar el complejo cableado de todos los dispositivos electrónicos la mayoría de los componentes (especialmente sensores) se han seleccionado del fabricante *Seedstudio* cuya familia denominada comercialmente *Grove*, presentan la potente característica de ser del tipo “enchufar y listo” o *plug&play* siguiendo terminología inglesa. Es decir, al objeto de simplificar al máximo la trayectoria de los cables que sería preciso instalar en cada dispositivo convencional junto a una placa de prototipo o *proto-board*, ha parecido adecuado recurrir a esta solución mediante el auxilio de un *shield* conectado al *Arduino* Mega 2560: ello permite un cableado más limpio, compacto y fácil de seguir en su trazado.

Seguidamente se detallan todos y cada uno de estos componentes electrónicos junto a una breve descriptiva de su funcionalidad principal dentro del prototipo. Además, se complementa esta información con documentación técnica del fabricante electrónico que permita entender mejor su principio de trabajo.

5.3.1 Núcleo central de procesamiento

- **Autómata programable:** la tarjeta electrónica de control regula y monitoriza absolutamente todas las tareas y mediciones del prototipo mecatrónico termosolar. En concreto, el equipo incorporado a dicho prototipo, no es otro que uno de los modelos de la afamada familia *Arduino* ([Candelas F.A. et al., 2015](#)) muy conocidos tanto en el mundo científico y universitario como en el entorno de aficionados a prototipos. *Arduino* es una plataforma de *hardware* libre, construida sobre una placa con microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para agilizar el empleo de la electrónica en proyectos multidisciplinarios. La placa mencionada posee un microcontrolador modelo **Atmel AVR** con varios puertos de entrada/salida según los distintos modelos de *Arduino* existentes en el mercado.

En concreto, los microcontroladores más usuales son *Atmega168*, *Atmega328*, *Atmega1280* y *Atmega2560* por su simplicidad y bajo coste que permiten el desarrollo de multitud de diseños mecatrónicos. De otra parte, el *software* de cualquier *Arduino* consiste en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje de programación *Processing/Wiring* (actual heredero del C/C++) y permite la programación de todos los componentes electrónicos. Es interesante añadir que desde octubre de 2012, *Arduino* incorpora también microcontroladoras *CortexM3* de ARM de 32 *bits* (paquetes de transmisión de datos) que coexisten con las antedichas AVR de 8 *bits*. Se da la circunstancia de que ARM y AVR no son compatibles a nivel binario, pero sí son programables con el mismo IDE (entorno de programación) de *Arduino* y construir así programas que se compilen sin cambios en ambas plataformas. Eso sí, es fundamental conocer que los microcontroladoras *CortexM3* trabajan a 3,3 V, cosa que no ocurre con la mayoría de placas con AVR, que trabajan a 5 V.

Arduino puede interactuar con el entorno gracias a sus entradas y salidas analógicas y digitales: se puede trabajar sobre motores, servos, actuadores lineales, *leds*, altavoces... así como capturar datos de sensores de presión, temperatura, humedad, irradiancia... Todo ello gracias a que la placa *Arduino* se programa mediante un lenguaje de programación basado en ***Wiring*** mediante conexión a un ordenador; y el entorno de desarrollo IDE (o cualquier otro sistema más visual) basado en *Processing*, que permite ejecutar programas sin necesidad de estar conectado al antedicho PC. En añadidura, *Arduino* cuenta con software propio descargable de su página oficial (<http://www.arduino.cc>) que incluye *drivers* o controladores y librerías de todas las tarjetas y periféricos oficiales disponibles, lo que hace más fácil la carga de códigos desde el ordenador ([Frenzel L.E., 2017](#)).

Además, el "ecosistema" de fabricantes compatibles se ha disparado, siendo multitud de compañías las que desarrollan toda una serie de componentes que amplían notablemente su potencia. Y por si fuera poco, a este "ecosistema" se le unen programas computacionales de renombre como *Matlab*, *Mathematica*, *Maple*, *LabView*...

Figura 5.9. Tarjetas controladoras de la familia Arduino (fuente: www.arduino.cc)

Haciendo un poco de **historia** (tarea siempre instructiva para conocer el origen de las cosas), el proyecto *Arduino* surgió de un grupo de profesores y estudiantes del Instituto *IVREA*, en *Ivrea* (Italia) en el año 2006. En efecto, en ese momento los estudiantes de electrónica empleaban el microcontrolador *BASIC Stamp*, de un coste cercano a los 100 \$ USA, lo que se estimaba excesivamente costoso para ellos: buscaron fabricar una tarjeta electrónica controladora más asequible para el mundo estudiantil. El nombre del proyecto proviene de la denominación comercial *Bar di Re Arduino* (Bar del Rey *Arduino*, traducido al español desde el italiano) donde *Massimo Banzì* (profesor del antedicho instituto) pasaba algunas horas a la semana. En su creación, también contribuyó el estudiante de origen colombiano *Hernando Barragán*, quien desarrolló la tarjeta electrónica, el lenguaje de programación *Wiring* y la plataforma de desarrollo. Y en añadidura, una vez concluida dicha plataforma, los protagonistas de este trabajo, hicieron un esfuerzo adicional por hacerlo más ligero, económico y disponible para la comunidad de desarrolladores de código abierto (*Open Source*). Tristemente, el Instituto *IVREA* cerró sus puertas por problemas económicos. Así que los investigadores, a los cuales se había unido el español *David Cuartielles*, promovieron la idea de lanzar *Arduino* como una tarjeta electrónica de fácil acceso para todos los estudiantes.

El propio *Banzy* afirmaría años más tarde, que el proyecto nunca emergió como una idea de negocio, sino como una necesidad de pervivencia ante el inminente cierre del centro de formación. Para ser más preciso y conforme la legislación italiana vigente, al concebir un producto de hardware abierto, éste no podría ser embargado.

Para la producción comercial y en serie de la primera versión de **Arduino UNO** se tomó como criterio que el coste no superase los 30 €, que todos sus componentes fueran ensamblados en una única placa azul, que debía ser enchufar y listo (*plug&play*) y que fuera compatible con todas las plataformas informáticas existentes hasta la fecha (*MacOSX*, *Windows* y *GNU/Linux*). Las primeras 300 unidades fabricadas fueron entregadas a los ex-alumnos del Instituto *IVREA*, con el fin de iniciar el período de prueba con el diseño de los primeros prototipos electrónicos. Escasos años después, se incorporó al equipo el profesor *Tom Igoe*, que había trabajado en computación física, tras conocer la existencia del proyecto *Arduino* por internet. Ofreció su apoyo para desarrollar el proyecto a gran escala y distribuir las tarjetas en los EE.UU, presentándose en 2011 en la feria *Maker Fair* la primera placa *Arduino 32 bits* para trabajar tareas más pesadas.

Para la presente Tesis, el *Arduino* por el cual se ha optado no es otro que un **Mega 2560 ADK Android revisión 3** ([Pham C., 2014](#)) cuyo aspecto puede verse en la imagen anexa. Las razones que justifican esta decisión son varias, pero indudablemente el incremento de memoria *RAM* para ejecutar programas y el mayor número de entradas y salidas analógicas y digitales precisas para controlar todos los equipos que conforman el prototipo, fueron clave en la decisión. Es totalmente compatible con el primigenio y ya mentado *Arduino UNO* en cuanto a programas ya desarrollados y periféricos existentes, pero incorpora un potente procesador *AVR ATmega2560* que corre a una frecuencia de reloj de 16 MHz. A resultas de todo ello, se convierte en un procesador idóneo para proyectos mecatrónicos. En concreto y de forma resumida, sus características y cotas relevantes son:

- Microcontrolador: *Atmega 2560*
- *Chip*: *ATmega8U2* para la conversión *USB* a serie
- Conector tipo *jack* para alimentación eléctrica
- Botón de encendido/apagado
- Voltaje de alimentación admitido: 5 - 20 V
- Voltaje de alimentación recomendado: 7 - 12 V

Figura 5.10. Arduino Mega 2560 (fuente: www.arduino.cc)

Figura 5.11. Cotas dimensionales del Arduino Mega 2560 (fuente: www.arduino.cc)

- Pines digitales: 54 (14 de ellos de tipo *PWM*)
- Entradas analógicas: 16
- Puertos *UART* serie: 4
- Corriente máxima por pin: 40 Ma
- Memoria *RAM flash*: 256 KB
- Memoria *SRAM*: 8 KB
- Memoria *EEPROM*: 4 KB
- Velocidad de reloj: 16 MHz

La denominación **ADK** hace mención a *Android Open Accessory Development Kit*, es decir, una reciente modificación por parte de *Arduino* para actualizar el *Arduino Mega 2560* hasta incorporarle conectividad con dispositivos basados en el sistema operativo móvil *Android* (tabletas, teléfonos móviles...) y mediante el antedicho *kit* poder interactuar con la tarjeta electrónica. Para lograr técnicamente este objetivo, la nueva tarjeta dispone de un puerto *USB Host* a modo de interfaz de conexión con dispositivos *Android* gracias al chip *MAX3421e*.

- **Carcasa de expansión:** inequívocamente vinculado al anterior dispositivo y siguiendo la terminología inglesa de amplia difusión en el sector electrónico, el *shield* o carcasa de expansión permite simplificar notablemente el conexionado de todos y cada uno de los sensores y actuadores que el *Arduino Mega 2560* debe controlar, evitando en la mayoría de los casos el uso de una placa de prototipado rápido. Posee unas dimensiones de 92,8 mm x 57,2 mm y se puede visualizar en la imagen adjunta, correspondiente en concreto al fabricante de material electrónico *Seeedstudio*.

Figura 5.12. Carcasa de expansión de Arduino Mega (fuente: Seeedstudio)

Desde el punto de vista **electrónico** descriptivo, esta carcasa de expansión posee estandarizados todos los conectores, en conectores de 4 pines (señal 1, señal 2, Vcc y tierra) de 2 mm de diámetro, manteniendo no obstante algunos de 3 pines (señal, Vcc y tierra) de 2,54 mm de diámetro para servomotores. Todo ello consigue de forma inequívoca simplificar el cableado de proyectos electrónicos de cierta complejidad tal y como se ha comentado con anterioridad (entre los cuales se encuentra el prototipo termosolar) así como dotar de mayor estabilidad a la solución final. En añadidura, este *shield* es capaz de soportar entradas/salidas digitales (0-21) y analógicas (0-15), quedando reservadas habitualmente las digitales (22-53) para el establecimiento de la comunicación con el *Google ADK* para la hipotética programación en *Android*.

Y por terminar su descripción, en las imágenes anexas se aprecia la subdivisión de protocolos de comunicaciones que contempla, así como el mapeo de entradas y salidas junto con los pines de alimentación eléctrica.

Figura 5.13. Comunicaciones y mapeo de señales deL shield (fuente: Seedstudio)

5.3.2 Componentes motrices

- **Servomotor:** dispositivo motriz óptimo para posicionar de forma precisa y fiable el azimuth del seguidor solar. En concreto se ha seleccionado el modelo *HD-9150 MG* del fabricante *Pololu* en virtud de su correcto precio y adecuadas características técnicas: rango de trabajo entre 4,8 V y 6 V; velocidad de giro de la corona (de bronce, no de plástico) comprendida entre 0,20 seg/60° y 0,18 seg/60°; consumo de corriente en movimiento sin carga, entre 300 mA y 350 mA; consumo de corriente en movimiento con carga, entre 2.600 mA y 3.200 mA; par de giro estable entre 13 kg·cm y 16 kg·cm; ángulo de apertura de 180°±10° y reducción 1/278 ([Ubertini F. et al., 2015](#)).

Figura 5.14. Servomotor (fuente: Pololu)

En añadidura, es interesante destacar que la precisión del sistema de control se logra mediante modulación del ancho de pulso de la señal (*PWM* o *Pulse Width Modulation*), que, con un amplificador a una frecuencia de 250 Hz, permite tener una respuesta en rotación de 2.000 µseg.

Figura 5.15. Cotas dimensionales del servomotor (fuente: Pololu)

Por finalizar, es útil informar del conjunto de dispositivos auxiliares conectables al eje de salida de la corona, que permiten interconectar un abanico importante de soluciones, como la que no en vano se ha tomado para transmitir el par de giro al prototipo de seguidor.

Figura 5.16. Accesorios de conexión al servomotor (fuente: Pololu)

- **Actuador lineal:** el actuador lineal seleccionado ([Ubertini F., 2015](#)), responsable del movimiento en elevación del seguidor como ya es sabido, pertenece al fabricante italiano *Firgelli* y en concreto se ha seleccionado el modelo de la serie L12 por sus características específicas. En efecto, *Firgelli* posee una gama de actuadores lineales en miniatura que permiten un amplio espectro de movimientos lineales como el buscado en el prototipo de la Tesis. Esta plataforma de producto es ciertamente flexible, configurable y compacta, siendo totalmente compatible con *Arduino*. En concreto, el modelo L12 posee un diseño axial con una potente pero diminuta caja de cambios interna y una sección rectangular para otorgarle una óptima rigidez. Y para mayor abundamiento, el modelo seleccionado es el *Firgelli* L12-100-100-6R, tal y como se puede apreciar en la imagen anexa, cuyas cotas dimensionales también se anexan.

Figura 5.17. Actuador lineal Firgelli L12 (fuente: Firgelli)

Figura 5.18. Cotas dimensionales del Firgelli L12 (fuente: Firgelli)

El principio de funcionamiento del actuador lineal se basa en traccionar o comprimir una carga a lo largo de toda la longitud hábil de su eje. La velocidad de desplazamiento se determina en función del pequeño tren de engranajes interior y de la carga a mover o fuerza contra la cual el actuador tiene que actuar. En este sentido, son especialmente útiles también las gráficas adicionales que se recomienda visualizar para entender el principio de trabajo y en las cuales se recoge la velocidad y el consumo en amperaje frente a la fuerza realizada. Además, es interesante conocer que cuando el servomecanismo del actuador deja de recibir alimentación eléctrica, el actuador se para y mantiene la posición, a no ser que la carga aplicada exceda la fuerza de retención del propio actuador, en cuyo caso el mismo retornará a la posición de mínima elongación.

Figura 5.19. Velocidad lineal y amperaje consumido por actuador (fuente: Firgelli)

- **Driver de motores de corriente continua** o doble puente H: pequeño dispositivo que puede alimentar y controlar hasta 2 motores de CC (actuador lineal y servomotor en nuestro caso) con rangos de voltaje comprendidos entre 2,7 y 10,8 Vcc y amperajes máximos que llegan a alcanzar 2 A pico para cada uno de los motores (ó 4 A pico para hacer funcionar solo uno de ellos con conexión en paralelo). Es preciso incorporar este componente en el prototipo (marca *Pololu* modelo *drv8833* en este caso), ya que la placa *Arduino Mega* no es capaz de suministrar por sí sola un amperaje suficiente, como para alimentar los motores de CC mencionados. O incluso si lo hiciese, ese suministro no sería sostenible en el tiempo, pudiendo llegar a quemar el *pin* o salida en la cual estuviesen conectados. Además es menester indicar que este *driver* posee protección contra sobrecorrientes, calentamiento excesivo, bajo voltaje e inversión de polaridad ([Chun-Fei, H. y Bore-Kuen L., 2011](#)).

Figura 5.20. Driver de motores de CC (fuente: Pololu)

Figura 5.21. Esquema de conexionado del driver de motores (fuente: Pololu)

5.3.3 Sensórica

- **Sensor de vibración piezoeléctrico:** su misión no es otra que medir el impacto simulado de granizo, lluvia copiosa u otro objeto contundente que pudiera poner en peligro la integridad de los delicados espejos de colectores paraboloïdal y cilindro-parabólico ([Andreev et al., 2017](#)). Si así sucediese, se pasaría a adoptar la denominada posición de protección o reposo (girando el ángulo preciso para permanecer enfrentados hacia el suelo todo lo posible y orientados longitudinalmente, lo cual se consigue con el máximo nivel de extensión del actuador lineal y en posición angular ortogonal frente a la línea E-O). En la figura siguiente se aprecia el sensor que se ha instalado en el prototipo mecatrónico termosolar. En función de la sensibilidad del mismo es factible simular dicha caída de granizo o fenómeno meteorológico similar, para así mesurar el impacto.

Figura 5.22. Sensor de vibración piezoeléctrico (fuente: Seeedstudio)

La electrónica que gobierna este sensor está basado en una película sensible PZT LDT0-028, tal que cuando dicha película recibe un pequeño toque por leve que sea, genera cierto voltaje que es comparado con una referencia fijada previamente mediante un potenciómetro accionado por un sencillo destornillador de estrella, para así cuantificar la magnitud del impacto recibido. El rango dinámico de frecuencias (0,001 Hz hasta 1.000 MHz) garantiza un rendimiento excelente en este tipo de magnitudes.

Figura 5.23. Esquema electrónico del sensor de vibración (fuente: Seeedstudio)

Y el verdadero artífice de la funcionalidad de este sensor, es la película LDT0-028, construida sobre un material polimérico piezoeléctrico de escasamente 28 μm de grosor que posee electrodos con baño de plata y laminado de 0,125 mm de sustrato de poliéster. Todo ello permite un amplio rango de funcionalidades en función de cambios en la frecuencia de resonancia y sensibilidad del sensor dentro de un rango de trabajo entre 0 $^{\circ}\text{C}$ y 85 $^{\circ}\text{C}$.

Figura 5.24. Sensibilidad vs frecuencia del sensor de vibración (fuente: Seeedstudio)

En este sentido, en la imagen adicional anexa se puede apreciar en orden de magnitud la sensibilidad del sensor en mV/g, en términos de sensibilidad a resonancia en V/g y la frecuencia de resonancia a la cual se produce la misma.

TABLE 1: LDT0 as Vibration Sensor				
Added Mass	Baseline Sensitivity	Sensitivity at Resonance	Resonant Frequency	+3 Db Frequency
0	50 mV/g	1.4 V/g	180 Hz	90 Hz
1	200 mV/g	4 V/g	90 Hz	45 Hz
2	400 mV/g	8 V/g	60 Hz	30 Hz
3	800 mV/g	16 V/g	40 Hz	20 Hz

Figura 5.25. Sensibilidad y frecuencia del sensor (fuente: Seeedstudio)

- **Sensor de detección de agua:** este sensor está sin lugar a duda vinculado al anterior toda vez que vuelve a medir nuevamente una magnitud (caída de lluvia) que también podía ser medida con el sensor anterior. En el prototipo se ha encapsulado la misma en un sencillo receptáculo consistente en un “comedero” de alpiste para pájaros. Ello permite simular dicha presencia de caída de lluvia mediante la pulverización de agua con un difusor casero para el regado de plantas, por ejemplo. Y la acción que puede ejecutar el seguidor una vez detectada la presencia de agua, vuelve a ser adoptar la posición de protección o reposo ya mentada ([Bord I. et al., 2007](#)).

Figura 5.26. Sensor de presencia de agua (fuente: Seeedstudio)

Este módulo de dimensiones 20 mm x 20 mm, indica si el sensor está seco, húmedo o inmerso en agua (que representaría la lluvia) mediante la medición de la variación de la conductividad entre las pistas paralelas que conforman la parte expuesta al agua y que poseen una resistencia de 1 MΩ. Se puede conectar tanto a las entradas/salidas digitales del *Arduino* (para detectar simplemente si hay lluvia, valor LOW o no, valor HIGH) o incluso a las analógicas (para medir con más precisión la cantidad de agua recibida). En la imagen anexa se aprecian valores típicos de trabajo del sensor.

Item	Min	Typical	Max	Unit
Working Voltage	4.75	5.0	5.25	V
Current		20		mA
Working Temperature	10		30	°C
Working Humidity	10		90	%

Figura 5.27. Tabla de valores del sensor de agua (fuente: Seeedstudio)

- **Sensor de temperatura y humedad:** sensor nuevamente vinculado con magnitudes meteorológicas (por otra parte, una de las funcionalidades más importantes del prototipo mecatrónico de la Tesis). Como su propio nombre indica permite capturar y monitorizar temperatura ambiente y humedad relativa del aire ([Huerta R., 2016](#)). Más allá de la captura y adquisición de datos meteorológicos para generar una potente base de datos, en este caso no se infiere acción inmediata posterior sobre el prototipo, salvo la de predecir posibles congelaciones o apariciones de escarcha sobre el equipo (en función de datos psicrométricos, por ejemplo). En este caso no se han implementado en la programación de la tarjeta de control, pero *de facto* se han incluido como propuestas de mejora. Una vez detectada dicha circunstancia, se podría enviar aviso de emergencia a central receptora de datos para avisar a personal de mantenimiento (por ejemplo). Ver dispositivo en figura siguiente.

Figura 5.28. Sensor de temperatura y humedad (fuente: Seeedstudio)

Para ser más precisos con el principio de funcionamiento del sensor, es necesario indicar lo siguiente: la señal precalibrada que es capaz de proporcionar se genera mediante un sensor capacitivo que mide la humedad relativa del aire y un termistor tipo NTC que mide la temperatura, otorgando una reseñable fiabilidad y estabilidad incluso a largo plazo, una óptima precisión de 2% para la medición de humedad relativa del aire y 0,3°C para la temperatura ambiente, tomando como referencia mínima capaz de ser medida -40°C. El esquema de principio electrónico del sensor se visualiza en la figura que a continuación se muestra.

Figura 5.29. Esquema electrónico sensor temperatura-humedad (fuente: Seeedstudio)

Y de forma similar, el conjunto de valores en términos de temperatura y humedad frente a voltajes e intensidades asociados, se aprecian en la imagen continua.

Items	Conditions	Min	Norm	Max	Unit
VCC	-	3.3	-	6	Volts
Measuring Current Supply	-	1	-	1.5	mA
Standby Current Supply	-	40	-	50	uA
Measuring Range	Humidity	5%	-	99%	RH
	Temperature	-40	-	80	°C
Accuracy	Humidity	-	-	± 2%	RH
	Temperature	-	-	± 0.5	°C
Resolution	Humidity	-	-	0.1%	RH
	Temperature	-	-	0.1	°C
Repeatability	Humidity	-	-	± 0.3%	RH
	Temperature	-	-	± 0.2	°C
Long-term Stability	-	-	-	± 0.5%	RH/year
Signal Collecting Period	-	-	2	-	S
Respond Time	1/e(63%)	6	-	20	S

Figura 5.30. Temperatura y humedad vs voltaje e intensidad (fuente: Seeedstudio)

- **Sensor de presión barométrica:** perseverando una vez más en la capacidad del prototipo de capturar datos meteorológicos, la variable objeto de análisis en este caso es la presión barométrica, tal y como el propio nombre del sensor indica. Y en este caso, la función que se espera del sensor en sí es únicamente dicha adquisición de presiones para su posterior almacenamiento y/o tratamiento estadístico que permita inferir conclusiones si ha lugar. Se aprecia el dispositivo con el cual se equipa al prototipo en la figura siguiente.

Figura 5.31. Sensor de presión barométrica (fuente: Seeedstudio)

El chip Bosch BMP085 con el cual este sensor va equipado, es capaz de medir presiones entre 300 hPa y 1.100 hPa (valores de presión equivalentes al rango comprendido entre -500 m y +9.000 m sobre el nivel del mar) con un nivel de precisión de hasta 0,03 hPa (0,25 m equivalentes). A su vez ([Dickow A. y Feieterag G., 2014](#)) la altitud sobre el nivel del mar se puede calcular mediante:

$$a = 44.330 \cdot \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{5,255}} \right] \quad (1)$$

donde:

a: altitud, en m

p: presión medida por el sensor, en hPa

p₀: presión a nivel del mar, igual a 1.013,25 hPa

Figura 5.32. Altitud frente presión barométrica (fuente: Seeedstudio)

En rigor técnico el chip solo acepta voltajes de entrada entre 1,8 V y 3,6 V, pero mediante el complemento electrónico (incorporado) correspondiente, el sensor es capaz de ser alimentado a 3,3 V y 5 V, siendo por tanto perfectamente compatible con la gama de controladores *Arduino* a través del protocolo **I2C**. Se puede ver el esquema electrónico de principio en la imagen que se adjunta.

Figura 5.33. Esquema electrónico del sensor presión barométrica (fuente: Seeedstudio)

Y por terminar de complementar la información de este dispositivo, a continuación, se anexa una imagen que resume todo el conjunto de características físicas adicionales (ya transmitidas y no contempladas aún): amperaje, dimensiones, frecuencia de transmisión de datos y masa del componente.

Item	Min	Typical	Max	Unit
Voltage	3	5	5.5	VDC
Current	89	/	130	uA
Pressure Range	300	/	1100	hPa
Faster I2C data transfer	/	/	3.4	MHZ
Dimension	20.4*24.3*9.7			mm
Weight	2			g

Figura 5.34. Características de sensor de presión barométrica (fuente: Seeedstudio)

- **Sensor de calidad del aire:** potente dispositivo en términos de las prestaciones que es capaz de entregar ([Papapostolou et al., 2017](#)). Máxime en una coyuntura como la actual en la cual la sociedad comienza a estar verdaderamente concienciada con las perniciosas emisiones de gases de efecto invernadero que contaminan el aire que respiramos y que están provocando el temido cambio climático.

En esta ocasión, el sensor nuevamente se limita a capturar el dato de calidad del aire para su posterior almacenaje, sin menoscabo de poder programar (también propuesta de mejora) acciones tales como emisión de alarmas para elevados niveles de concentración de gases contaminantes, por ejemplo. Es interesante ver el dispositivo en la figura que se adjunta a continuación.

Figura 5.35. Sensor de calidad del aire (fuente: Seeedstudio)

Cierto es que este sensor está concebido inicialmente para medición de la calidad de aire interior a una estancia, en concreto para la detección de monóxido de carbono, alcoholes, isobutano, acetona, formaldehído, metano, hidrógeno y diluyentes en estado gaseoso. Y además, no menos cierto es que en función del principio de medición seguido, el sensor no puede medir de forma muy fidedigna concentraciones de gases de forma cuantitativa. Es más, una exposición muy prolongada a aire muy polucionado puede disminuir significativamente su sensibilidad para detectar ciertos gases. Sin embargo, sí resulta perfectamente válido para aplicaciones que necesitan solamente resultados cualitativos, precisando únicamente aire relativamente limpio como condición de contorno inicial para su calibrado. Se pueden indicar cuatro estados y valores de percepción:

- Aire fresco: condiciones de aire óptimas (calidad **buena**, 4).
- Baja polución: pequeña concentración de gases que aun así se consideran contaminantes (calidad **aceptable**, 3).
- Elevada polución sin medidas de precaución: alta concentración de gases nocivos, pero sin necesitar tomar medidas de protección (calidad **moderada**, 2).
- Elevada polución con medidas de precaución: la concentración es tal, que es imprescindible tomar medidas para evitar asfixia (calidad **grave**, 1).

El esquema electrónico del sensor objeto de estudio se puede apreciar en la figura contigua a este texto, donde además es especialmente interesante prestar especial atención al componente más importante de todo el circuito: el sensor MP503. En efecto, está construido bajo una delicada tecnología de multicapa de película delgada y tanto el precalentador del sensor como el material semiconductor de óxido metálico depositado sobre el sustrato de cerámica de Al_2O_3 están encapsulados en un cierre metálico.

Figura 5.36. Esquema electrónico del sensor de calidad del aire (fuente: Seeedstudio)

La variación de la conductividad del sensor en función de la concentración de gases presentes en el aire es el principio de funcionamiento del mismo. Conforme la concentración es mayor, mayor será también la conductividad del sensor tal y como se puede constatar en el gráfico adjunto. Esa oscilación en la conductividad se traduce en una señal de salida proporcional a la concentración del gas contaminante objeto de medición.

Figura 5.37. Voltaje vs concentración de gas (fuente: Seeedstudio)

- **Sensor de radiación:** el cometido de este sensor, que en este prototipo se ha ubicado en cuatro posiciones coincidentes con las localizaciones N (norte), S (sur), E (este) y O (oeste) en la cruceta del seguidor termosolar, es crucial para el prototipo: capturar la irradiancia recibida desde la atmósfera. Y en función de cada uno de los valores adquiridos, condicionar al autómata de control para que mueva el motor paso a paso, el actuador lineal o ambos, y conseguir así la máxima perpendicularidad de la base de los colectores respecto al Sol. Con ello se lograría el paralelismo entre el eje del paraboloide y de la parábola cilíndrica con los rayos solares, condición *sine qua non* para concentrar la radiación solar. En la imagen propuesta se aprecia el sensor seleccionado para el prototipo.

Figura 5.38. Sensor de radiación (fuente: Seeedstudio)

Tal y como antes se anticipaba, este sensor es el más importante para el funcionamiento del prototipo de seguidor termosolar, pues sin las cuatro unidades incorporadas, no sería posible un seguimiento autónomo del Sol en la búsqueda de la máxima irradiancia. Electrónicamente se basa en el convertidor de irradiancia a señal digital, modelo TSL2561 conectable a *Arduino* mediante protocolo **I2C**. Pero a diferencia de otros sensores de luz analógicos similares, este módulo permite seleccionar un amplio rango del espectro de radiación gracias a los diodos de sensibilidad dual que incorpora. De cara a la adquisición de datos de irradiancia, es factible seleccionar entre tres modos de detección: modo infrarrojo (de estudio especialmente interesante para la energía termosolar), espectro completo y espectro visible por el ser humano. El rango dinámico de captura se extiende desde 0,1 lux hasta 40.000 lux. Procesa la señal de salida digital a una alta resolución de 16 bits y una frecuencia de 400 kHz. La franja térmica de trabajo se extiende desde -40°C hasta +85°C ([Bognár et al., 2015](#)).

El esquema electrónico del sensor TSL2561 (diagrama de bloques funcional) es el que se explicita en la imagen correspondiente. Su mapa de registro está controlado, monitorizado y es accesible a través de 16 registros (3 de ellos reservados) más un registro de comando a través de la interfaz serial, que determinan los resultados de la conversión analógica a digital.

Figura 5.39. Esquema electrónico del sensor de radiación (fuente: Seeedstudio)

En añadidura, la curva de respuesta espectral en la cual se representan los dos canales con su comportamiento característico (fotodiodo 0 y fotodiodo 1 en el gráfico adjunto) y donde se representa en abscisas longitud de onda en nanómetros frente a la respuesta normalizada adimensional, se aprecia en la figura siguiente.

Figura 5.40. Respuesta del sensor frente longitud de onda (fuente: Seeedstudio)

- **Sensor de temperaturas focales:** el cometido de los dos sensores a los cuales se hace mención es el de capturar las temperaturas de los focos de las cuádricas que definen los colectores termosolares (tanto el paraboloidal como el cilindro-parabólico). Y una vez capturados dichos datos, la tarjeta de control procederá a su almacenamiento, para ulteriores análisis estadísticos. No se impone en este caso *a priori* ningún tipo de condición de protección de dichos colectores, pues se estima que físicamente están bien diseñados para los rangos de temperatura que alcanzarán. Así, en la imagen mostrada justo tras estas líneas, se podrán ver tanto los sensores (termopares tipo K) como la tarjeta electrónica (MAX 6675) que procesa las señales.

Figura 5.41. Termopares y convertidor de señal (fuente: Electronilab)

En efecto, de una parte se dispone de un complejo convertidor de termopar digital monolítico (modelo CJMCU-MAX6675) y amplificador interno de acondicionamiento de señal y bajo ruido a 12 bits de conversión digital/analógico provisto de compensación y corrección, conectable mediante interfaz compatible **SPI** y la consiguiente lógica de control asociado.

Dicho convertir transforma a voltajes compatibles y amplifica a su vez, la señal captadas por los termopares conectados a los canales de entrada ADC. Todo ello garantiza alta precisión en la detección y bajo impacto de posibles interferencias de la señal para capturar de forma fidedigna las temperaturas de los focos en comparación con la referencia de 0°C hasta llegar desde un mínimo teórico de -200°C hasta a un máximo teórico de 1.023,75°C con un rango de sensibilidad de 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ([Yina L, et al., 2017](#)).

- **Sensor de velocidad del viento** o anemómetro de cazoletas ([Ross M. y Pister K.S.J., 1995](#)), es un dispositivo que será fácilmente identificable por el lector con toda seguridad, toda vez que es de los más habituales en cualquier estación meteorológica, ya sea industrial o incluso doméstica. Su aspecto se aprecia en la figura que complementa esta descripción, siendo interesante destacar su nivel de protección contra lluvia y polvo hasta un nivel IP44 y alimentación a 5V. El principio de funcionamiento es sencillo pero eficaz: el sensor posee un contacto magnético que envía una señal de pulso por cada rotación del rotor impelido por la fuerza del viento, de manera que velocidades en torno a 10 km/h se corresponden con 4 vueltas/s.

Figura 5.42. Anemómetro de cazoletas (fuente: Alfieri)

Este anemómetro, con denominación comercial 6710-WIND02 tampoco forma parte de los dispositivos *plug&play* que ya se comentaban al principio de este mismo apartado. Por eso, para poder conectar el mismo al *shield* de *Arduino*, ha sido necesario incorporar un adaptador de conexiónado que se analizará posteriormente. Matemáticamente, las transformaciones que es necesario hacer para la posterior programación del sensor, son las siguientes:

$$i = \frac{1.000}{d} \quad (2)$$

$$v = \frac{i \cdot 10}{4} \quad (3)$$

Sustituyendo la ecuación (2) en la ecuación (3) se tendrá:

$$v = \frac{\frac{1.000}{d} \cdot 10}{4} = \frac{2.500}{d} \quad (4)$$

donde:

i: impulsos, adimensional
 d: duración, en s
 v: velocidad, en km/h

- **Brújula electrónica de tres ejes:** este sensor (ver figura adjunta) dispone de un módulo multi-chip HMC5883L capaz de detectar con elevada precisión pequeños campos magnéticos, basándose en un principio magneto-resistivo amplificado electrónicamente en un dispositivo ASIC de Honeywell y un convertor analógico-digital de 12 bits. Su cometido es obvio: identificar, tal y como haría una brújula "convencional", la posición del prototipo termosolar respecto a la línea N-S terrestre ([Dongsheng Y. y Hertle R.W., 2007](#)). Ello debería permitir un adecuado posicionamiento del prototipo tanto en el hemisferio norte (focalizando sus colectores hacia el sur); como en el hemisferio sur (haciendo lo propio pero hacia el norte). Se interconecta al *shield* mediante protocolo **I²C**, se asegura una precisión entre 1° y 2°, se alimenta a un rango de voltaje entre 3,3 y 6 V y proporciona la señal de salida a una frecuencia 116 Hz. De manera análoga a como se ha realizado en sensores anteriores, seguidamente se representa de forma gráfica el esquema electrónico del multi-chip ya mentado HMC5883.

Figura 5.43. Brújula electrónica de tres ejes (fuente: Seeedstudio)

Figura 5.44. Esquema electrónico de brújula de tres ejes (fuente: Seeedstudio)

- **Acelerómetro electrónico de tres ejes:** componente relativamente similar al anterior como se aprecia en la figura incluida, permite identificar movimiento y orientación del seguidor termosolar para una adecuada interpretación de su posición física. Se intercomunica con el *shield* mediante el protocolo digital **I2C**, es muy estable frente a cambios térmicos significativos y funciona con voltajes entre 3 y 5 V.

Figura 5.45. Acelerómetro electrónico de tres ejes (fuente: Seeedstudio)

La potencialidad de este sensor ([Yinsheg et al., 2017](#)) le permite interpretar por tanto orientación y detección de movimiento a tenor de las características técnicas del módulo de elevada respuesta MMA7660FC, con consumos eléctricos comprendidos entre 2 y 47 μA , precisión de hasta $\pm 1,5\text{g}$ y rango de trabajo de hasta 10.000g. Se aprecia seguidamente el esquema funcional de bloques de este módulo.

Figura 5.46. Esquema funcional de bloques del acelerómetro (fuente: Seeedstudio)

5.3.4 Electrónica complementaria

- **Joystick de control manual:** la palanca de movimiento o *joystick* ([Dicianno et al., 2015](#)) incorporada en el prototipo, es muy similar (ver imagen indicativa) a la que el famoso fabricante de videoconsolas Sony incorpora en los mandos de sus *Playstation* desde hace varias generaciones. Los ejes X e Y son dos potenciómetros de 10 k Ω cada

uno, que controlan el movimiento bidimensionalmente mediante la generación de señales analógicas. El *joystick* también posee un botón de pulsado que puede ser empleado en circunstancias especiales (por ejemplo, colocación de colectores en posición de emergencia o reinicio de las coordenadas de posicionamiento del seguidor). Cuando el módulo electrónico está en modo activado, entregará dos señales analógicas indicativas de las dos direcciones distintas de movimiento. Trabaja con voltajes comprendidos entre 3,3 y 5 V.

Figura 5.47. Joystick de control manual y cotas dimensionales (fuente: Seeedstudio)

El nivel de precisión de este dispositivo es elevado, como se puede visualizar en la imagen anexa, pero aun así el rango de señales analógicas oscila solamente entre 200 y 800, lejos de los valores de *joysticks* comerciales específicos para videojuegos. En añadidura, es posible transformar el valor de salida del puerto analógico de *Arduino* a la resistencia equivalente, así como conocer sus cotas dimensionales (ambas en gráficas anexas):

Item	Min	Typical	Max	Unit
Working Voltage	4.75	5.0	5.25	V
Output Analog Value (X coordinate)	206	516	798	\
Output Analog Value (Y coordinate)	203	507	797	\

Figura 5.48. Sensibilidad analógica del joystick (fuente: Seeedstudio)

- **Potenciómetro analógico:** la razón por la cual se ha optado por incluir un potenciómetro entre el conjunto de componentes electrónicos adicionales que conforman el prototipo, no es otra que la de disponer de un generador de señales artificiales en caso de que fuese preciso simular algún efecto meteorológico ([Leinonen M. et al., 2007](#)). Puede apreciarse el dispositivo en la imagen conjunta.

Figura 5.49. Potenciómetro (fuente: Seeedstudio)

Este potenciómetro es capaz de producir una salida analógica de un voltaje comprendido entre 0 y 5 V, pudiendo modular el rango hasta en una rotación de 300° con un cambio lineal en los valores ofrecidos. El valor resistivo es 10 k Ω , idóneo para cualquier aplicación típica a programar en *Arduino* como la propia de esta Tesis. El esquema electrónico del potenciómetro se visualiza seguidamente.

Figura 5.50. Esquema electrónico del potenciómetro (fuente: Seeedstudio)

- **Cámara digital de visión:** la inclusión de una cámara dentro del prototipo obedece a dos criterios. El primero de ellos, el de poder visualizar en tiempo real lo que el propio seguidor termosolar esté "viendo" en cada instante, para de esta forma poder corroborar todo lo que su conjunto de sensores esté capturando ([Qureshi F.Z. y Terzopoulos D., 2014](#)).

Toda esa información visual podrá ser almacenada en la memoria interna del propio *Arduino*, en un dispositivo externo tipo tarjeta SD (*Secure Digital*) o mejor incluso, ser transferida en tiempo real a un servidor de recepción de datos en la nube (*Plotly*, *Xively* o *Wolfram Data Drop*). El segundo criterio, es el preparar el prototipo para futuras formas de adquirir datos (visión artificial aplicada a identificación de nubes mediante teoría de fractales, por ejemplo).

En la figura contigua se puede visualizar el aspecto de esta cámara objeto de breve análisis. Entre las características más relevantes del alcance del pedido, se puede añadir que incluye una pequeña tarjeta de procesamiento de imágenes, dos lentes intercambiables (una estándar y la otra gran angular, especialmente concebida para monitorizar procesos en tiempo real).

El dispositivo trabaja con un voltaje de 5 V; posee una resolución de 300.000 *pixels* (640 x 480, 320 x 240 y 160 x 120); compresión *JPEG* a alta, media y baja resolución; control automático del balance blancos; *focus* ajustable; transmisión de datos por protocolo *UART* entre 9.600 y 115.200 baudios y comunicación adicional por protocolos RS485 y RS232.

Figura 5.51. Cámara digital de visión (fuente: Seeedstudio)

- **Reloj digital en tiempo real:** el módulo de reloj en tiempo o RTC (*Real Time Clock*) se basa en el *chip* DS1307 y soporta el protocolo **I2C**. Emplea una batería de litio para garantizar el suministro de datos temporales fidedignos en términos de segundos, minutos, horas, días, semanas, meses e incluso años ([Liang Ch et al., 2017](#)). De hecho, lleva implementado el algoritmo de adecuación de días de cada mes (incluyendo meses de 30 ó 31 días e incluso meses bisiestos de 29) para una correcta actualización de fechas, con un calendario perpetuo hasta el 2.100.

Es factible, además, mostrar los datos temporales en formato 12h ó 24h con un indicador AM/PM a tal efecto. Para garantizar la integridad de las fechas volcadas por el reloj al controlador *Arduino* y asegurar que el cristal de cuarzo oscila adecuadamente, es necesario incluir una pila externa de litio tipo CR1225 de 3 V. Se aprecian estos elementos adicionales en las imágenes colindantes.

Figura 5.52. Reloj digital en tiempo real (fuente: Seeedstudio)

Figura 5.53. Circuito electrónico del reloj digital (fuente: Seeedstudio)

- **Conmutador ON/OFF:** su misión es sencilla, simplemente conmutar el modo de trabajo del seguidor termosolar y así poder pasar de modo manual (mediante el *joystick*) a modo automático (mediante las maniobras de control del autómatas programable). El conmutador incluido en el proyecto es de pulsado momentáneo, esto es, el pulsador "rebota" sobre sí mismo una vez que se ha liberado la presión ejercida sobre él. Cuando está presionado devuelve un valor *HIGH* y cuando se ve liberado cambia a salida *LOW*. Se visualiza su aspecto mediante la figura mostrada a continuación, así como el sencillo esquema electrónico de trabajo mostrado a continuación.

Figura 5.54. Conmutador ON/OFF (fuente: Seeedstudio)

Figura 5.55. Esquema electrónico del conmutador (fuente: Seeedstudio)

- **Adaptador de conexiones:** también reconocible como *hub* I2C en su denominación inglesa y tal y como la propia denominación da a entender, este sencillo dispositivo permite conectar cualquier sensor o actuador al formato estándar de conexión propio de *Seeedstudio Grove* con la versatilidad que ello implica de cara a la compatibilidad con el "ecosistema" de este fabricante. Tiene, como el resto de miembros de esta familia de conectores, cuatro conectores de 3,5 mm (incluyendo fase, neutro y dos conectores no definidos) capaces en este caso de hacer fluir hasta 125 V a 6 A. En la figura siguiente se visualiza este dispositivo.

Figura 5.56. Adaptador de conexiones (fuente: Seeedstudio)

- **Regleta de puertos:** en parte es un dispositivo muy parecido funcionalmente hablando al adaptador de conexiones recién descrito, tal y como puede apreciarse visualmente en la figura que complementa el texto. Se podría decir que es un "multiplicador" de señales, hasta el punto de disponer de hasta cuatro conexiones **I2C** que amplían la versatilidad de conexionado. Simplemente hay que prestar especial cuidado en realizar correctamente el conexionado para evitar posibles cortocircuitos. Y en añadidura, son conexiones apilables o encadenables, esto es, es posible anidar distintas conexiones adicionales empleando tales regletas de puertos.

Figura 5.57. Regleta de puertos (fuente: Seeedstudio)

5.4 Presupuesto por partidas y coste global del prototipo

Seguidamente se desglosa el presupuesto por partidas del prototipo de seguidor termosolar, subdividiendo sus componentes en partidas MECÁNICA, ÓPTICA y ELECTRÓNICA, para desembocar en la partida GLOBAL.

Universidad Politécnica de Madrid		Escuela Técnica Superior de Edificación Departamento Tecnología de la Edificación PROTOTIPO MECATRÓNICO DE SEGUIDOR TERMOSOLAR
Nº orden	Unidades	Descripción	Proveedor	Precio unitario (€)	Importe (€)
1 - PARTIDA MECÁNICA					
1	3	Plancha perforada de aluminio 240 x 75 x 1,5 mm	Microlog	3,53	10,59
2	1	Kit tiras perforadas de aluminio diámetro 4,2 mm	Microlog	7,42	7,42
3	1	Kit perfiles perforados de aluminio S y L diámetro 4,2 mm	Microlog	9,30	9,30
4	1	Kit engranajes de latón distintos diámetros y módulos	Model Reyna	9,95	9,95
5	1	Eje de latón 240 mm x 4 mm	Microlog	1,68	1,68
6	1	Polea simple de aluminio diámetro 60mm y eje 4 mm	Microlog	5,95	5,95
7	2	Correa transmisión de plástico diámetro 8 cm	Microlog	0,80	1,60
8	1	Casquillo prisionero de latón con tornillo para ejes 4 mm	Microlog	0,90	0,90
9	1	Rótula cardán para ejes 4 mm	Microlog	3,95	3,95
10	1	Alargador de ejes de latón 4 mm	Microlog	2,40	2,40
11	1	Perfil U perforado de aluminio 240 x 15 x 45 x 15 x 1,5 mm	Microlog	4,97	4,97
12	1	Kit abrazaderas diámetro 20 mm	Microlog	2,30	2,30
13	1	Kit abrazaderas diámetro flexible 23-27 mm	Microlog	3,20	3,20
14	1	Kit casquillos hexagonales diámetro 4 mm	Leroy Merlin	4,50	4,50
15	2	Minikit bases plástico 6 cm x 4 cm y diámetros 4 mm	Microlog	1,95	3,90
16	1	Kit tornillos M2	Microlog	1,20	1,20
17	1	Kit tornillos M3 y 16 mm largo	Microlog	1,60	1,60
18	1	Kit tornillos M3 y 25 mm largo	Microlog	2,60	2,60
19	1	Kit tornillos M4 y 16 mm largo	Microlog	3,10	3,10
20	1	Kit tornillos M3 y 25 mm largo	Microlog	4,15	4,15
21	1	Kit tuercas M2	Microlog	1,30	1,30
22	1	Kit tuercas M3	Microlog	0,85	0,85
23	1	Kit tuercas M4	Microlog	0,98	0,98
24	1	Kit arandelas M3	Microlog	0,75	0,75
25	1	Kit arandelas M4	Microlog	0,85	0,85
SUBTOTAL (€)					89,99
IVA (%)			21,00%		18,90
TOTAL PARTIDA MECÁNICA (€)					108,89

Figura 5.58. Presupuesto partida MECÁNICA de prototipo (fuente: autor)

Universidad Politécnica de Madrid		Escuela Técnica Superior de Edificación Departamento Tecnología de la Edificación PROTOTIPO MECATRÓNICO DE SEGUIDOR TERMOSOLAR
Nº orden	Unidades	PRESUPUESTO POR PARTIDAS			
		Descripción	Proveedor	Precio unitario (€)	Importe (€)
2 - PARTIDA ÓPTICA					
1	1	Colector paraboloidal diámetro 230 mm	Ventus	85,46	85,46
2	1	Colector cilindro-parabólico	Sidilab	79,00	79,00
3	1	Kit transportadores de ángulos	ECI	2,95	2,95
4	1	Pomo de latón negro mate	Leroy Merlin	3,50	3,50
		SUBTOTAL (€)			170,91
		IVA (%)	21,00%		35,89
		TOTAL PARTIDA ÓPTICA (€)			206,80

Figura 5.59. Presupuesto partida ÓPTICA de prototipo (fuente: autor)

Universidad Politécnica de Madrid		Escuela Técnica Superior de Edificación Departamento Tecnología de la Edificación PROTOTIPO MECATRÓNICO DE SEGUIDOR TERMOSOLAR
Nº orden	Unidades	PRESUPUESTO POR PARTIDAS			
		Descripción	Proveedor	Precio unitario (€)	Importe (€)
3 - PARTIDA ELECTRÓNICA					
1	1	Arduino Mega ADK 2560	Electan	34,50	34,50
2	1	Shield para Arduino Mega	Electan	16,75	16,75
3	1	Sensor vibración piezoeléctrico	Electan	6,75	6,75
4	1	Sensor agua	Electan	4,25	4,25
5	1	Compás 3 ejes	Electan	25,95	25,95
6	1	Acelerómetro 3 ejes	Electan	16,95	16,95
7	2	Cables 4 conductores 50 cm 5 ud	Electan	6,95	13,90
8	1	Potenciómetro analógico	Electan	4,25	4,25
9	1	Joystick analógico	Electan	7,45	7,45
10	1	Sensor temperatura y humedad	Electan	13,45	13,45
11	2	Regleta 4 puertos	Electan	3,25	6,50
12	1	Sensor barométrico	Electan	17,75	17,75
13	1	Servo alto par HD-9150MG	Electan	53,62	53,62
14	1	Driver motores DRV8833	Electan	6,85	6,85
15	1	Cámara de vídeo	Electan	31,36	31,36
16	4	Sensores de irradiancia	Electan	9,66	38,64
17	1	Sensor de calidad de aire	Electan	17,50	17,50
18	1	Reloj tiempo real RTC DS1307	Electan	9,25	9,25
19	1	Módulo I2C	Electan	3,50	3,50
20	1	Botón ON/OFF	Electan	2,75	2,75
21	1	Actuador lineal Firgelli L12	Microlog	130,66	130,66
22	1	Kit sensor termopar max 6675 tipo K-SPI	Electronilab	31,00	31,00
23	1	Sensor velocidad viento	Todoelect	25,00	25,00
24	1	Receptáculo sensor agua	Pibenca	3,95	3,95
25	1				
SUBTOTAL (€)					522,53
IVA (%)			21,00%		109,73
TOTAL PARTIDA ELECTRÓNICA (€)					632,26

Figura 5.60. Presupuesto partida ELECTRÓNICA de prototipo (fuente: autor)

Universidad Politécnica de Madrid		Escuela Técnica Superior de Edificación Departamento Tecnología de la Edificación PROTOTIPO MECATRÓNICO DE SEGUIDOR TERMOSOLAR
Nº orden	PRESUPUESTO POR PARTIDAS				
Unidades	Descripción		Proveedor	Precio unitario (€)	Importe (€)
4 - PARTIDA GLOBAL					
1	1	1 - PARTIDA MECÁNICA		89,99	89,99
2	1	2 - PARTIDA ÓPTICA		170,91	170,91
3	1	3 - PARTIDA ELECTRÓNICA		522,53	522,53
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
SUBTOTAL (€)					783,43
IVA (%)			21,00%		164,52
TOTAL PARTIDA GLOBAL (€)					947,95

Figura 5.61. Presupuesto partida GLOBAL de prototipo (fuente: autor)

Si se hace una rápida **interpretación** del antedicho desglose de costes en términos de gráficos de sectores, se pueden inferir las siguientes conclusiones.

Figura 5.62. Desglose costes del prototipo (fuente: autor)

67% (632,26€) se corresponden con la partida **ELECTRÓNICA**.

22% (170,91€) se corresponden con la partida **ÓPTICA**.

11% (108,89€) se corresponde con la partida **MECÁNICA**.

¿Qué coste habría tenido un prototipo netamente **industrial** y operativo?: es difícil responder a la pregunta, pero de forma aproximada se podría multiplicar su coste real al menos x10, habiendo alcanzado entonces la cifra aproximada de 9.479,5€, prácticamente **10.000€**. Esta reflexión no es fruto del azar, sino resultado de haber consultado proveedores de internet industriales (RS Componentes y Matmax, entre otros) y haber trazado una rápida prospección de algunos de los dispositivos instalados en el prototipo con su homónimo industrial. Véase la comparativa de precios entre componentes que cumplen la misma función.

Figura 5.63. Comparativa costes dispositivos prototipo vs industrial (fuente: autor)

5.5 Equipos de protección y herramientas de ensamblaje

A tenor de la gran variedad de componentes que es preciso ensamblar de forma coherente para construir el prototipo termosolar, seguramente se pueda inferir que se precisa de un número apreciable de herramientas. Las cuales, a su vez, provienen de distintas líneas de conocimiento: mecánicas, eléctricas, electrónicas... Y todo ello, además, con los consiguientes riesgos laborales (*a priori* pequeños, pero existentes) que las propias tareas de montaje puedan acarrear, tal y como podría desprenderse de la Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales ([Valbuena S., 2002](#)). Por último, se estima prudente mostrar parte del **aparellaje** que ha sido preciso disponer, en aras de la reproducibilidad del prototipo, bien para construir uno similar, bien para mejorarlo. A resultados de todo ello, seguidamente se muestra de forma somera alguno de los equipos de protección y herramientas que han sido necesarios en esta tarea.

- Equipos de protección individual (EPIs)

Figura 5.64. EPIs: gafas y guantes de protección (fuente: autor)

- Equipos de medida, conformado y apriete mecánico

Figura 5.65. Multiherramienta y atornillador eléctrico (fuente: autor)

Figura 5.66. Llaves de carraca y destornilladores de precisión (fuente: autor)

Figura 5.67. Pinzas de precisión y de sujeción (fuente: autor)

- Equipos de soldadura y medición eléctrico-electrónica

Figura 5.68. Estación de soldadura electrónica y polímetro digital (fuente: autor)

Figura 5.69. Lupa de soldadura electrónica (fuente: autor)

5.6 Recepción de componentes del prototipo

Tampoco es objetivo del trabajo pormenorizar la recepción y desembalaje de todos los componentes, una vez explicitados ya en epígrafes anteriores. Pero sí se estima interesante identificar órdenes de magnitud de sus dimensiones; definir el alcance del pedido a proveedor con periféricos anexos incluidos, así como la disposición en el lugar de trabajo para su ulterior montaje. Precisamente con este objetivo, se procede a mostrar solo alguno de los más **representativos** en función de la ya consabida catalogación: mecánicos, ópticos y electrónicos.

- **Recepción de componentes mecánicos**

Figura 5.70. Recepción y almacenaje de componentes mecánicos (fuente: autor)

- **Recepción de componentes ópticos**

Figura 5.71. Recepción de concentradores solares (fuente: autor)

- **Recepción de componentes electrónicos**

Figura 5.72. Recepción de actuador lineal y tarjeta de control (fuente: autor)

5.7 Fases de construcción del prototipo termosolar

A *priori* podría parecer que acometer las tareas de fabricación del prototipo de seguidor termosolar no debería representar especial esfuerzo: nada más lejos de la realidad, tal y como la experiencia empírica ha demostrado en este trabajo. Son múltiples y variadas las herramientas, equipos y dispositivos que han sido precisos para construirlo, toda vez que es un equipo construido **a medida** para este proyecto, sin contar por tanto con manuales o videotutoriales de montaje ([Klein T.P. y Reinhart G., 2016](#)). No en vano, en algunos casos ha sido preciso acudir al taller de Fabricación Mecánica del centro de formación Salesianos Carabanchel, centro en el cual el autor desarrolla su tarea profesional como profesor del Ciclo formativo de grado superior denominado Eficiencia energética y energía solar térmica.

En añadidura, es factible que el lector intuya que si bien en el escrito se han presentado las tareas de diseño y adquisición de componentes de forma secuencial, en el desarrollo del proyecto real no ha sido así: ha habido un proceso **retroalimentado** de búsqueda de componentes de proveedores reales y rediseño del prototipo en CAD 3D. Eso ha permitido construir en la “vida real” lo que se ha diseñado previamente en el ordenador. Se podría decir que en ciertas fases del diseño ha habido una reingeniería inversa. Sea como fuere, y para demostrar la antedicha aseveración acerca de la complejidad del proceso (amén de obviamente ilustrar algunas de las tareas más relevantes del proceso constructivo), seguidamente se ilustran algunas de las actividades más identificativas de las fases de construcción del prototipo termosolar.

- **Tareas de montaje de componentes mecánicos**

Figura 5.73. Metrología de piezas mecánicas (fuente: autor)

Figura 5.74. Serrado circular de chapas metálicas y plásticas (fuente: autor)

Figura 5.75. Taladrado de piezas metálicas y plásticas (fuente: autor)

Figura 5.76. Fresado de piezas metálicas y plásticas (fuente: autor)

Figura 5.77. Atornillado de piezas metálicas (fuente: autor)

Figura 5.78. Adherido de soportes y plegado de piezas (fuente: autor)

- **Tareas de montaje de componentes ópticos**

Figura 5.79. Serrado de tubo absorbedor y anclaje de paraboloide (fuente: autor)

- **Tareas de montaje de componentes electrónicos**

Figura 5.80. Atornillado de sensores sobre placas de anclaje (fuente: autor)

Figura 5.81. Cableado de sensores (fuente: autor)

- **Detalles del acabado final**

Figura 5.82. Detalles del acabado de componentes mecánicos (fuente: autor)

Figura 5.83. Detalles del acabo de componentes ópticos (fuente: autor)

Figura 5.84. Detalles del acabo de componentes electrónicos (fuente: autor)

Figura 5.85. Prototipo termosolar completo en laboratorio de experimentación

5.8 Estación de validación: funciones, construcción y acabado final

Hasta el momento actual, en el presente trabajo se ha hablado profusamente del **prototipo mecatrónico** de seguidor termosolar como verdadero protagonista indiscutible de la Tesis Doctoral. No en vano, es el dispositivo que debe realizar todas las maniobras de seguimiento solar para posicionar los colectores paraboloïdal y cilindro-parabólico de forma óptima y así captar la máxima radiación solar, mesurando y almacenando datos sobre las temperaturas de sus focos; y debe realizar además toda la captura y almacenamiento de datos meteorológicos que sean de utilidad para inferir *a posteriori* conclusiones acerca de las condiciones climáticas de trabajo de las futuras instalaciones termosolares en la edificación. Datos que serán captados por el conjunto de sensores instalados en el prototipo y conectados al controlador *Arduino*, verdadero “cerebro” del seguidor.

Pero no menos cierto es que parece prudente cotejar la fiabilidad de dichos sensores (o ampliar las magnitudes a medir), con otro dispositivo externo no interconectado al antedicho controlador: este desacoplamiento de valores medidos permitiría pensar en una independencia de los sistemas de medida frente a la misma señal meteorológica. Funcionalidad que podría ser empleada no solo en el proceso de puesta en marcha del prototipo termosolar, sino incluso en tareas de verificación periódica de su fiabilidad; recalibrado de sensores; diagnosis de anomalías o detección de valores estadísticamente atípicos. Es en este instante donde entra en juego lo que se ha denominado **estación de validación** ([Spicer R.A. et al., 2009](#)). Cabe reseñar que el vocablo “validación” se ha tratado de emplear en su justo significado en detrimento de calibración, que es excesivamente ambicioso: este último lleva embebido en su semántica la definición de patrón fidedigno de referencia. Y es sabido que la sensórica de precisión (con categoría suficiente, ahora sí, como para ser inequívoca referencia en términos de magnitud medida) tiene un precio excesivamente elevado como para que haya sido contemplada su inclusión en la Tesis. No es realmente ese el objetivo del módulo de validación, sino simplemente tener términos de comprobación de valores medidos. De otra parte y toda vez que este nuevo dispositivo no posee el protagonismo que el propio prototipo mecatrónico en sí tiene, se van a detallar directamente y de forma gráfica las **fases de construcción**, obviando las de diseño conceptual, modelización, simulación y recepción de componentes. De esta forma se gana en agilidad en la transmisión de conocimiento, siendo además muy intuitivo identificar las funciones de cada dispositivo a tenor. No obstante y aun a riesgo de parecer excesivamente riguroso, se procede a dar una rápida pincelada a cada uno de los componentes que integran esta estación y su uso.

- **Brújula:** su conocida función es identificar la línea Norte-Sur magnética, la cual conviene recordar, no coincide prácticamente nunca con la línea Norte-Sur geográfica. En efecto, el Polo Norte geográfico (o terrestre) es el eje sobre el cual gira nuestro planeta Tierra, está en mitad del Océano Ártico cubierto intermitentemente con hielo y la masa de tierra más cercana se corresponde con la isla de Groenlandia. Por el contrario, el Polo Norte magnético está en constante movimiento, siendo el punto donde las líneas del campo magnético terrestre apuntan verticalmente y hacia abajo. Y como seguramente el lector intuirá, el Polo Sur magnético es el extremo final de la antedicha línea de campo.

En el núcleo externo de la Tierra, existen elementos magnéticos en estado de magma o roca fundida, y son precisamente los cuales son responsables de generar el antedicho campo magnético terrestre. Esta roca fundida no está permanentemente alineada con el eje de rotación de la Tierra y a resultas de todo ello, la línea Norte-Sur magnética no es colineal con la línea Norte-Sur geográfica. La diferencia entre ambas se denomina declinación magnética y es función del lugar de la Tierra en el cual nos ubiquemos así como del instante de tiempo en el cual se realice el cálculo (ni si quiera el ritmo de modificación es constante). Es imprescindible revisar un mapa o calculadora de declinación actualizados para conocer de forma fidedigna la declinación magnética.

Figura 5.86. Brújula de estación de validación (fuente: autor)

- **Pluviómetro:** dispositivo que mide la cantidad de lluvia recibida (0 a 9.999 mm) y en determinado tiempo. En este caso, la estación de validación incorpora un filtro de hojarasca y un pluviómetro paralelepípedo como el de la figura anexa, que consta de un curioso balancín interior que permite cuantificar el agua de lluvia recibida ([Yonghui et al., 2001](#)).

Figura 5.87. Pluviómetro de estación de validación (fuente: autor)

- **Inclinómetro digital:** como su nombre da a entender, permite medir el ángulo de inclinación que una superficie describe respecto la horizontal (0 a 360°), mediante el que es a su vez, el ángulo de apertura descrito por las dos reglas metálicas ([Steven T.W., 2012](#)) que lo conforman en su rotación respecto a un eje de giro común. Su pantalla digital permite una rápida identificación de dicha inclinación en grados sexagesimales.

Figura 5.88. Inclinómetro digital de estación de validación (fuente: autor)

- **Termómetro de dos canales:** dispositivo que mide y compara de forma rápida las temperaturas de dos puntos concretos ([Olivieri, 2015](#)). En el caso que nos ocupa, dichos puntos serán los focos de los colectores parabólico y cilindro-parabólico, respectivamente. El modelo elegido es el PCE-T312 del proveedor PCE-Ibérica y se ha posicionado en una estructura metálica diseñada a tal efecto. Entre las características más relevantes de este dispositivo, es preciso citar que las sondas térmicas incorporadas son tipo K; nivel de precisión de 1°C; rango de trabajo válido desde -200°C hasta 1.372°C y pantalla LCD retroiluminada.
- **Medidor de irradiancia:** entrega la medición de irradiancia (W/m^2) en una pantalla digital y que descansa sobre un soporte propio de teléfono móvil adaptado a este fin ([Polo J. et al., 2017](#)). Se ha elegido el modelo PCE-SPM 1 también del proveedor PCE-Ibérica y cuyo principio de trabajo del dispositivo es una celda fotovoltaica de silicio monocristalino calibrada, integrada en una carcasa de plástico resistente a la intemperie y con una memoria interna de 32.000 valores. Admite hasta 2.000 W/m^2 con precisión de 1 W/m^2 para un rango entre 400 nm y 1.100 nm.

Figura 5.89. Termómetro de dos canales y medidor de irradiancia (fuente: autor)

- **Veleta y anemómetro:** ambos componentes miden respectivamente, tanto la dirección como la velocidad del viento (0 km/h a 108 km/h), a los que hay que añadir los sensores integrados de temperatura exterior y humedad relativa del aire. La veleta es una superficie plana que recibe el “efecto vela” de la presión del aire en movimiento y que lleva solidario un eje con un fiel que marca la dirección preferente del viento. El anemómetro está constituido por tres cazoletas cuya velocidad de giro se “traduce” en velocidad lineal ([Margaret R.W., 2015](#)).

Figura 5.90. Esquema 3D de anemómetro y veleta (fuente: Auriol)

- **Centralita meteorológica:** el *Arduino Mega* es el prototipo mecatrónico lo que la centralita meteorológica es a la estación de validación. Permite visualizar varias magnitudes medidas como son: pluviometría, dirección preferente y velocidad de viento, temperatura exterior (-20° a $+60^{\circ}\text{C}$ con precisión $0,1^{\circ}\text{C}$), humedad relativa del aire (20% a 99% con precisión 1%) y presión atmosférica (850 mbar a 1050 mbar con precisión 10 mbar). Y lo que es más importante ([Devaraju et al., 2015](#)), determinadas predicciones meteorológicas que pueden ser de inestimable ayuda al estudio paralelo del comportamiento del prototipo mecatrónico de seguidor (temperatura de rocío, temperatura de golpe de calor, sensación térmica equivalente por alta velocidad de viento y predicción meteorológica). Todos los datos son recibidos inalámbricamente a 434 MHz con alcance hasta 25 m en espacio abierto.

Figura 5.91. Centralita meteorológica, veleta y anemómetro (fuente: autor)

- **Linterna:** sencilla linterna de leds y pila (recargable) de 1,5V, que permite comprobar la recepción de luz de los *leds* de irradiancia y el ulterior movimiento del seguidor en azimuth y elevación. Se sujeta a la parte inferior con dos útiles abrazaderas de un diámetro levemente inferior al de la propia linterna.

Figura 5.92. Linterna de verificación de sensores (fuente: autor)

Figura 5.93. Acabado final de estación de validación (fuente: autor)

BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 5

- [1]. Gurr M.; Mülhaupt R. Rapid Prototyping. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2016.
- [2]. Liu D.; Wang G.; Ren T. Transmission principle and geometrical model of eccentric face gear. Mechanism and Machine Theory, Volume 109, March 2017, pp 51-64.
- [3]. Sánchez M.; Martínez I.G.; Rincón E.A.; Duran M.D.; Design and Thermal-optic Analysis of an Ultra-solar Concentrator. Energy Procedia, Volume 57, 2014, pp 311-320.
- [4]. Jin J.; Ling Y.; Hao Y. Similarity analysis of parabolic-trough solar collectors. Applied Energy, Volume 204, 15 October 2017, pp 958-965.
- [5]. Candelas F.A.; García G.J.; Puente S.; Pomares J.; Torres F. Experiences on using Arduino for laboratory experiments of Automatic Control and Robotics. IFAC-PapersOnLine, Volume 48, Issue 29, 2015, pp 105-110.
- [6]. Frenzel L.E. Chapter 13: Software, Programming and Electronics: Today, Most Electronics Is a Combination of Hardware and Software. Electronics Explained (Second Edition), 2017, pp 325-346.
- [7]. Pham C. Communication performances of IEEE 802.15.4 wireless sensor motes for data-intensive applications: A comparison of WaspMote, Arduino MEGA, TelosB, MicaZ and iMote2 for image surveillance. Journal of Network and Computer Applications, Volume 46, November 2014, pp 48-59.
- [8]. Ubertini F.; Venanzi I; Comanducci G. Considerations on the implementation and modeling of an active mass driver with electric torsional servomotor. Mechanical Systems and Signal Processing, Volumes 58–59, June 2015, pp 53-69.
- [9]. Ubertini F.; Venanzi I; Comanducci G. Considerations on the implementation and modeling of an active mass driver with electric torsional servomotor. Mechanical Systems and Signal Processing, Volumes 58–59, June 2015, pp 53-69.
- [10]. Chun-Fei H.; Bore-Kuen L. FPGA-based adaptive PID control of a DC motor driver via sliding-mode approach. Expert Systems with Applications, Volume 38, Issue 9, September 2011, pp 11866-11872.
- [11]. Andreev Y.S.; Demkovich N.A.; Isaev R.M.; Tselishev A.A.; Vasilkov S.D. Effect of the Method for Treatment of the Functional Surface of a Piezoelectric Vibration Sensor on its Sensitivity. Procedia Engineering, Volume 176, 2017, pp 96-106.

-
- [12]. Bord I.; Tardy P.; Menil F. Temperature influence on a differential capacitive rain sensor performances. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 125, Issue 1, 16 July 2007, pp 262-267.
- [13]. Dickow A.; Feiertag G. A Framework for Calibration of Barometric MEMS Pressure Sensors. *Procedia Engineering*, Volume 87, 2014, pp 1350-1353.
- [14]. Papapostolou V.; Zhang H.; Feenstra B.J.; Polidori A. Development of an environmental chamber for evaluating the performance of low-cost air quality sensors under controlled conditions. *Atmospheric Environment*, Volume 171, December 2017, pp 82-90.
- [15]. Bognár G.; Szabó P.G.; Takács G. Generalization of the thermal model of infrared radiation sensors. *Microelectronics Journal*, Volume 46, Issue 6, June 2015, pp 543-550.
- [16]. Yina L.; Liang Z.; Chunliu Z.; Dongning W. High-Temperature sensor based on peanut flat-end reflection structure. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, Volume 148, November 2017, pp 293-299.
- [17]. Ross M.; Pister K.S.J. Micro-windmill for optical scanning and flow measurement. *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 47, Issues 1–3, March–April 1995, pp 576-579.
- [18]. Dongsheng Y.; Hertle R.W. Digital head posture analysis using an electronic compass. *Journal of American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus*, Volume 11, Issue 1, February 2007, pp 105.
- [19]. Yinsheng W.; Shudong W.; Hongcai Z.; Hairong G.; Xueyong W. A high resolution tilt measurement system based on multi-accelerometers. *Measurement*, Volume 109, October 2017, pp 215-222.
- [20]. Dicianno B.E.; Mahajan H.; Cooper R.A. Advanced Joystick Algorithms for Computer Access Tasks. *PM&R*, Volume 7, Issue 6, June 2015, pp 555-561.
- [21]. Leinonen M.; Juuti J.; Jantunen H. Interface circuit for resistive sensors utilizing digital potentiometers. *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 138, Issue 1, 20 July 2007, pp 97-104.
- [22]. Qureshi F.Z.; Terzopoulos D. Chapter 21: Virtual Vision for Camera Networks Research. *Academic Press Library in Signal Processing*, Volume 4, 2014, pp 609-625.
- [23]. Liang Ch.; Qile Z.; Zhigang H.; Xinyuan J.; Chuang S. GNSS Global Real-time Augmentation Positioning: Real-time Precise Satellite Clock Estimation, Prototype System Construction and Performance Analysis. *Advances in Space Research*, In press, accepted manuscript, Available online 9 September 2017.
- [24]. Valbuena S. La prevención de riesgos laborales. *Fisioterapia*, Volume 24, Supplement 1, 2002, pp 11-14.
-

-
- [25]. Klein T.P.; Reinhart G. Towards Agile Engineering of Mechatronic Systems in Machinery and Plant Construction. *Procedia CIRP*, Volume 52, 2016, pp 68-73.
- [26]. Spicer R.A.; Valdes P.J.; Spicer T.E.V.; Craggs H.J.; Yang J. New developments in CLAMP: Calibration using global gridded meteorological data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Volume 283, Issues 1–2, 1 December 2009, pp 91-98.
- [27]. Yonghui Z.; Hongxu L.; Qian S.; Kai W.; Guoliang C. Real time remote monitoring and pre-warning system for Highway landslide in mountain area. *Journal of Hydrology*, Volume 245, Issues 1–4, 1 May 2001, pp 32-47.
- [28]. Steven T. W.; Ingram R. L. Reliability and validity of measuring scapular upward rotation using an electrical inclinometer. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, Volume 22, Issue 3, June 2012, pp 419-423.
- [29]. Olivieri E.; Rotter M.; De Combarieu M.; Forget P.; Pari P. Full range resistive thermometers. *Cryogenics*, Volume 72, Part 2, December 2015, pp 148-152.
- [30]. Polo J.; Fernandez-Neira W.G.; Alonso-García M.C. On the use of reference modules as irradiance sensor for monitoring and modelling rooftop PV systems. *Renewable Energy*, Volume 106, June 2017, pp 186-191.
- [31]. Margaret R. W. Weather Vanes. *Mayo Clinic Proceedings*, Volume 90, Issue 1, January 2015, pp e7.
- [32]. Devaraju J.T.; Suhas K.R.; Mohana H.K.; Vijaykumar A.P. Wireless Portable Microcontroller based Weather Monitoring Station. *Measurement*, Volume 76, December 2015, pp 189-200.
-

LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 5

Figura 5.1. Plancha metálica perforada (fuente: Microlog)	175
Figura 5.2. Tira perforada y perfiles en L, U y S (fuente: Microlog)	175
Figura 5.3. Engranajes, eje, polea y correa de transmisión (fuente: Model Reyna)	176
Figura 5.4. Chapas, abrazadera y perfil longitudinal (fuente: Microlog)	176
Figura 5.5. Casquillo hexagonal, tornillo, tuerca y arandela (fuente: Microlog)	177
Figura 5.6. Tornillería de precisión y base minikit (fuente: Microlog)	177
Figura 5.7. Colector paraboloïdal (fuente: Ventus)	178
Figura 5.8. Colector cilindro-parabólico (fuente: Sidilab)	178
Figura 5.9. Tarjetas controladoras de la familia Arduino (fuente: www.arduino.cc)	181
Figura 5.10. Arduino Mega 2560 (fuente: www.arduino.cc)	183
Figura 5.11. Cotas dimensionales del Arduino Mega 2560 (fuente: www.arduino.cc)	183
Figura 5.12. Carcasa de expansión de Arduino Mega (fuente: Seeedstudio)	184
Figura 5.13. Comunicaciones y mapeo de señales deL shield (fuente: Seeedstudio)	185
Figura 5.14. Servomotor (fuente: Pololu)	185
Figura 5.15. Cotas dimensionales del servomotor (fuente: Pololu)	186
Figura 5.16. Accesorios de conexión al servomotor (fuente: Pololu)	186
Figura 5.17. Actuador lineal Firgelli L12 (fuente: Firgelli)	187
Figura 5.18. Cotas dimensionales del Firgelli L12 (fuente: Firgelli)	187
Figura 5.19. Velocidad lineal y amperaje consumido por actuador (fuente: Firgelli)	187
Figura 5.20. Driver de motores de CC (fuente: Pololu)	188
Figura 5.21. Esquema de conexión del driver de motores (fuente: Pololu)	188
Figura 5.22. Sensor de vibración piezoeléctrico (fuente: Seeedstudio)	189
Figura 5.23. Esquema electrónico del sensor de vibración (fuente: Seeedstudio)	190
Figura 5.24. Sensibilidad vs frecuencia del sensor de vibración (fuente: Seeedstudio)	190
Figura 5.25. Sensibilidad y frecuencia del sensor (fuente: Seeedstudio)	190
Figura 5.26. Sensor de presencia de agua (fuente: Seeedstudio)	191
Figura 5.27. Tabla de valores del sensor de agua (fuente: Seeedstudio)	191
Figura 5.28. Sensor de temperatura y humedad (fuente: Seeedstudio)	192
Figura 5.29. Esquema electrónico sensor temperatura-humedad (fuente: Seeedstudio)	193
Figura 5.30. Temperatura y humedad vs voltaje e intensidad (fuente: Seeedstudio)	193
Figura 5.31. Sensor de presión barométrica (fuente: Seeedstudio)	194
Figura 5.32. Altitud frente presión barométrica (fuente: Seeedstudio)	194
Figura 5.33. Esquema electrónico del sensor presión barométrica (fuente: Seeedstudio)	195
Figura 5.34. Características de sensor de presión barométrica (fuente: Seeedstudio)	195
Figura 5.35. Sensor de calidad del aire (fuente: Seeedstudio)	196
Figura 5.36. Esquema electrónico del sensor de calidad del aire (fuente: Seeedstudio)	197
Figura 5.37. Voltaje vs concentración de gas (fuente: Seeedstudio)	197
Figura 5.38. Sensor de radiación (fuente: Seeedstudio)	198
Figura 5.39. Esquema electrónico del sensor de radiación (fuente: Seeedstudio)	199
Figura 5.40. Respuesta del sensor frente longitud de onda (fuente: Seeedstudio)	199
Figura 5.41. Termopares y convertidor de señal (fuente: Electronilab)	200
Figura 5.42. Anemómetro de cazoletas (fuente: Alfieri)	201
Figura 5.43. Brújula electrónica de tres ejes (fuente: Seeedstudio)	202
Figura 5.44. Esquema electrónico de brújula de tres ejes (fuente: Seeedstudio)	202
Figura 5.45. Acelerómetro electrónico de tres ejes (fuente: Seeedstudio)	203
Figura 5.46. Esquema funcional de bloques del acelerómetro (fuente: Seeedstudio)	203
Figura 5.47. Joystick de control manual y cotas dimensionales (fuente: Seeedstudio)	204
Figura 5.48. Sensibilidad analógica del joystick (fuente: Seeedstudio)	204
Figura 5.49. Potenciómetro (fuente: Seeedstudio)	205
Figura 5.50. Esquema electrónico del potenciómetro (fuente: Seeedstudio)	205
Figura 5.51. Cámara digital de visión (fuente: Seeedstudio)	206
Figura 5.52. Reloj digital en tiempo real (fuente: Seeedstudio)	207
Figura 5.53. Circuito electrónico del reloj digital (fuente: Seeedstudio)	207
Figura 5.54. Conmutador ON/OFF (fuente: Seeedstudio)	208
Figura 5.55. Esquema electrónico del conmutador (fuente: Seeedstudio)	208
Figura 5.56. Adaptador de conexiones (fuente: Seeedstudio)	208

Figura 5.57. Regleta de puertos (fuente: Seeedstudio)	209
Figura 5.58. Presupuesto partida MECÁNICA de prototipo (fuente: autor)	210
Figura 5.59. Presupuesto partida ÓPTICA de prototipo (fuente: autor)	211
Figura 5.60. Presupuesto partida ELECTRÓNICA de prototipo (fuente: autor)	212
Figura 5.61. Presupuesto partida GLOBAL de prototipo (fuente: autor)	213
Figura 5.62. Desglose costes del prototipo (fuente: autor)	214
Figura 5.63. Comparativa costes dispositivos prototipo vs industrial (fuente: autor)	214
Figura 5.64. EPIs: gafas y guantes de protección (fuente: autor)	215
Figura 5.65. Multiherramienta y atornillador eléctrico (fuente: autor)	215
Figura 5.66. Llaves de carraca y destornilladores de precisión (fuente: autor)	215
Figura 5.67. Pinzas de precisión y de sujeción (fuente: autor)	216
Figura 5.68. Estación de soldadura electrónica y polímetro digital (fuente: autor)	216
Figura 5.69. Lupa de soldadura electrónica (fuente: autor)	216
Figura 5.70. Recepción y almacenaje de componentes mecánicos (fuente: autor)	217
Figura 5.71. Recepción de concentradores solares (fuente: autor)	217
Figura 5.72. Recepción de actuador lineal y tarjeta de control (fuente: autor)	217
Figura 5.73. Metrología de piezas mecánicas (fuente: autor)	218
Figura 5.74. Serrado circular de chapas metálicas y plásticas (fuente: autor)	218
Figura 5.75. Taladrado de piezas metálicas y plásticas (fuente: autor)	219
Figura 5.76. Fresado de piezas metálicas y plásticas (fuente: autor)	219
Figura 5.77. Atornillado de piezas metálicas (fuente: autor)	219
Figura 5.78. Adherido de soportes y plegado de piezas (fuente: autor)	219
Figura 5.79. Serrado de tubo absorbedor y anclaje de paraboloide (fuente: autor)	220
Figura 5.80. Atornillado de sensores sobre placas de anclaje (fuente: autor)	220
Figura 5.81. Cableado de sensores (fuente: autor)	220
Figura 5.82. Detalles del acabado de componentes mecánicos (fuente: autor)	221
Figura 5.83. Detalles del acabo de componentes ópticos (fuente: autor)	221
Figura 5.84. Detalles del acabo de componentes electrónicos (fuente: autor)	221
Figura 5.85. Prototipo termosolar completo en laboratorio de experimentación	222
Figura 5.86. Brújula de estación de validación (fuente: autor)	224
Figura 5.87. Pluviómetro de estación de validación (fuente: autor)	224
Figura 5.88. Inclínómetro digital de estación de validación (fuente: autor)	225
Figura 5.89. Termómetro de dos canales y medidor de irradiancia (fuente: autor)	225
Figura 5.90. Esquema 3D de anemómetro y veleta (fuente: Auriol)	226
Figura 5.91. Centralita meteorológica, veleta y anemómetro (fuente: autor)	226
Figura 5.92. Linterna de verificación de sensores (fuente: autor)	227
Figura 5.93. Acabado final de estación de validación (fuente: autor)	227

ÍNDICE CAPÍTULO 6

6.	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y CONCLUSIONES.....	234
6.1.	Ubicación del prototipo y trazado de trayectorias	234
6.2.	Validación de componentes, captura y proceso de registro de datos	240
6.3.	Registro e interpretación de seguimiento en elevación y azimut.....	248
6.4.	Registro e interpretación de temperaturas de focos	253
6.5.	Registro e interpretación de irradiancias en seguimiento oeste – este	256
6.6.	Registro e interpretación de irradiancias en seguimiento norte – sur.....	259
6.7.	Registro e interpretación de velocidades de viento	264
6.8.	Registro e interpretación de temperaturas ambiente.....	268
6.9.	Registro e interpretación de humedades relativas.....	272
6.10.	Registro e interpretación de calidades de aire.....	276
6.11.	Registro e interpretación de presiones barométricas	280
6.12.	Análisis termográfico de colectores	284
6.13.	Difusión de resultados conseguidos y transferencia de conocimiento	288
6.14.	Dificultades encontradas.....	290
6.15.	Propuestas de mejora y futuras líneas de investigación.....	292
6.16.	Indicadores de calidad de la Tesis.....	299
6.17.	Herramientas y recursos informáticos empleados.....	301
	BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 6	302
	LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 6	304
	LISTA DE TABLAS CAPÍTULO 6	306

6. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y CONCLUSIONES

6.1. Ubicación del prototipo y trazado de trayectorias

Llegados a este punto, nos enfrentamos al momento de verificar el funcionamiento del prototipo acorde a su potencialidad y condiciones de trabajo para las cuales fue diseñado. La ubicación del mismo se localiza en:

Institución Profesional Salesiana

Ronda Don Bosco 3, 28044 Madrid

Latitud: 40° 22' 29.574" N

Longitud: 3° 45' 9.669" W

Figura 6.1. Prototipo mecatrónico y módulo de validación en experimentación (fuente: autor)

Tras el proceso de validación de sensores y puesta a punto de motores y actuadores, inicialmente se realiza una primera batería de probaturas sencillas con las pertinentes correcciones necesarias para afinar su funcionamiento (tanto desde el punto de vista de sus componentes como desde la perspectiva del código de programación). Posteriormente se somete al prototipo a una toma detallada de datos meteorológicos habiendo seleccionando cuatro días concretos por su relevancia en términos de inicio de las distintas estaciones del año, permitiendo así un barrido anual completo. Dichos días son los correspondientes a cambios de estación, a saber: **21 junio 2017** (solsticio de verano); **22 septiembre 2017** (equinoccio de otoño); **21 diciembre 2017** (solsticio de invierno) y **20 marzo 2018** (equinoccio de primavera), en orden cronológico de captura de datos, conforme el prototipo estuvo en condiciones de hacerlo.

Las **trayectorias** solares que el prototipo de dos ejes ha seguido en los antedichos días indicados se ven reflejadas en las imágenes siguientes en intervalos de 1h y conteniendo la salida y puesta de Sol ([Qing X. y Niu Y., 2018](#)) y el movimiento en términos de azimut y elevación en coordenadas polares:

Figura 6.2. Trayectorias solares del seguidor 21jun17 (fuente: autor)

Figura 6.3. Trayectorias solares del seguidor 22sep17 (fuente: autor)

Figura 6.4. Trayectorias solares del seguidor 21dic17 (fuente: autor)

Figura 6.5. Trayectorias solares del seguidor 20mar18 (fuente: autor)

Figura 6.6. Trayectoria solar en polares del 21jun17 y 22sep17 (fuente: SunEarthTools)

Figura 6.7. Trayectoria solar en polares del 21dic17 y 20mar18 (fuente: SunEarthTools)

Figura 6.8. Trayectoria solar en cartesianas del 21jun17 y 22sep17 (fuente: SunEarthTools)

Figura 6.9. Trayectoria solar en cartesianas del 21dic17 y 20mar18 (fuente: SunEarthTools)

Fecha:	21/06/2017 GMT2	
coordinar:	40.3748729, -3.7526696	
ubicación:	Ronda Don Bosco, 20, 28044 Madrid, España	
hora	Elevación	Azimut
07:45:07	-0.833°	57.68°
8:00:00	1.59°	60.09°
9:00:00	11.91°	69.25°
10:00:00	22.86°	77.99°
11:00:00	34.18°	86.92°
12:00:00	45.58°	97°
13:00:00	56.68°	110.07°
14:00:00	66.59°	130.53°
15:00:00	72.69°	166.88°
16:00:00	70.79°	211.42°
17:00:00	62.51°	239.8°
18:00:00	51.9°	256.21°
19:00:00	40.6°	267.64°
20:00:00	29.2°	277.06°
21:00:00	18.01°	285.81°
22:00:00	7.3°	294.67°
22:48:37	-0.833°	302.31°

Tabla 1. Azimut y elevación 21jun17 (fuente: SunEarthTools)

Fecha:	22/09/2017 GMT2	
coordinar:	40.3748729, -3.7526696	
ubicación:	Ronda Don Bosco, 20, 28044 Madrid, España	
hora	Elevación	Azimut
09:02:37	-0.833°	89°
10:00:00	10.05°	98.39°
11:00:00	21.14°	108.91°
12:00:00	31.48°	121.06°
13:00:00	40.42°	136°
14:00:00	46.92°	154.77°
15:00:00	49.71°	177.03°
16:00:00	48.01°	199.78°
17:00:00	42.31°	219.55°
18:00:00	33.86°	235.36°
19:00:00	23.79°	248.08°
20:00:00	12.83°	258.9°
21:00:00	1.46°	268.79°
21:12:03	-0.833°	270.74°

Tabla 2. Azimut y elevación 22sep17 (fuente: SunEarthTools)

Fecha:	21/12/2017 GMT2	
coordinar:	40.3748729, -3.7526696	
ubicación:	Ronda Don Bosco, 20, 28044 Madrid, España	
hora	Elevación	Azimut
10:34:31	-0.833°	120.65°
11:00:00	3.24°	124.83°
12:00:00	11.97°	135.56°
13:00:00	19.06°	147.8°
14:00:00	23.95°	161.63°
15:00:00	26.11°	176.63°
16:00:00	25.27°	191.86°
17:00:00	21.52°	206.29°
18:00:00	15.33°	219.24°
19:00:00	7.26°	230.61°
19:51:54	-0.833°	239.35°

Tabla 3. Azimut y elevación 21dic17 (fuente: SunEarthTools)

Fecha:	20/03/2018 GMT2	
coordinar:	40.3748729, -3.7526696	
ubicación:	Ronda Don Bosco, 20, 28044 Madrid, España	
hora	Elevación	Azimut
09:18:44	-0.833°	89.5°
10:00:00	7.02°	96.21°
11:00:00	18.22°	106.45°
12:00:00	28.81°	118.07°
13:00:00	38.17°	132.17°
14:00:00	45.4°	149.88°
15:00:00	49.24°	171.36°
16:00:00	48.68°	194.28°
17:00:00	43.91°	214.95°
18:00:00	36.06°	231.71°
19:00:00	26.34°	245.11°
20:00:00	15.57°	256.32°
21:00:00	4.29°	266.38°
21:26:57	-0.833°	270.76°

Tabla 4. Azimut y elevación 20mar18 (fuente: SunEarthTools)

6.2. Validación de componentes, captura y proceso de registro de datos

La memoria interna del *Arduino Mega* es suficiente para realizar el código de programación volcado (gestionado por la memoria *flash*, que en este modelo es de 256 kbytes = 256.000 bytes) así como el registro de datos meteorológicos y de posicionamiento del seguidor (gestionado por la memoria *SRAM*, que es en este caso de 8 kbytes = 8.000 bytes). Los tipos de datos que más memoria ocupan en el entorno de programación de *Arduino* son las variables de tipo *long* y *float*, ambos precisando 4 bytes cada uno de ellos, si bien es cierto que las variables empleadas en el programa son de tipo *int*, que ocupan 2 bytes cada una de ellas.

De otra parte, teniendo en cuenta la tabla-matriz de muestra de resultados, se tienen 72 franjas horarias (filas) x 20 conceptos (columnas) = 1.440 datos para cada día de experimentación, que representan una cantidad de información equivalente a $1.440 \times 2 = \mathbf{2.880 \text{ bytes}}$. Esa cantidad es suficientemente menor que los 8.000 bytes máximos que la memoria interna *SRAM* es capaz de almacenar. Eso sí, es necesario (y prudente) descargar todos esos datos cada vez que se realice la captura de los mismos, bien por preservar su integridad, bien por no saturar la memoria interna del *Arduino*.

Pues bien, el formato de la tabla de registro de valores ([Farah S. et al, 2018](#)) se puede subdividir en siguientes conceptos que seguidamente se desglosa:

- Día-mes-año y tabla de horas con capturas de datos cada 30 minutos desde las 7:30h de la mañana (hora de apertura del centro escolar donde se ha podido ensayar el prototipo) hasta las 19:30h (tras 12h de captura de datos).

Figura 6.10. Fecha e instantes temporales para capturas de datos (fuente: autor)

- Captura de los cuatro sensores de irradiancia (SO, SN, SS y SE), en (W/m^2).

Figura 6.11. Capturas de sensores de irradiancia (fuente: autor)

- Movimiento del seguidor en los cuatro puntos cardinales (N, S, E y O) representado mediante flechas alusivas a dicho movimiento. La circunferencia representará que no hay movimiento alguno en ese paso.

Figura 6.12. Movimiento del seguidor hacia direcciones del espacio (fuente: autor)

- Ángulos de elevación (ALFA) y azimut (BETA) trazados por el seguidor, en grados sexagesimales ($^{\circ}$).

Figura 6.13. Ángulos de elevación y azimut (fuente: autor)

- Velocidad del viento (V), en (m/s) ([Cheng W.Y.Y. et al, 2017](#)).

Figura 6.14. Velocidad del viento (fuente: autor)

- Temperatura de colectores paraboloïdal y cilindro-parabólico, en grados Celsius o centígrados ($^{\circ}\text{C}$).

Figura 6.15. Temperatura colectores paraboloïdal y cilindro-parabólico (fuente: autor)

- Temperatura ambiente y humedad relativa del aire, en grados Celsius (°C) o centígrados y porcentaje (%) respectivamente.

Figura 6.16. Temperatura ambiente y humedad relativa del aire (fuente: autor)

- Calidad de aire según cuatro valoraciones (1-4) inversamente proporcionales a concentraciones en partes por millón (ppm) de gases contaminantes: 4=buena; 3=aceptable; 2=moderada y 1=grave.

Figura 6.17. Calidad del aire (fuente: autor)

- Presión barométrica, en hPa (se recuerda $1 \text{ hPa} = 10^{-3} \text{ bar} \approx 10^{-3} \text{ atm}$).

Figura 6.18. Presión barométrica (fuente: autor)

- Caída de lluvia y/o granizo, con valores 0=ausencia ó 1=presencia.

Figura 6.19. Caída de lluvia y/o granizo (fuente: autor)

Una vez representadas las variables objeto de análisis, seguidamente se muestra el formato de muestra de tales datos en formato **hoja de cálculo**. En concreto, una *Excel* para cada día objeto de análisis: 21 junio 2017, 22 septiembre 2017, 21 diciembre 2017 y 20 marzo 2018, respectivamente. Para apocopar su representación, se indicarán en lo sucesivo como 21jun17, 22sep17, 21dic17 y 20mar18, respectivamente. Estas fechas no son casuales: tal y como se indicó en el epígrafe anterior, se corresponden exactamente con solsticios y equinoccios como puntos representativos de todo un año natural ([Hong T. et al, 2013](#)).

De otra parte y en añadidura, el prototipo estuvo presto para la primera de las tomas de datos precisamente el 21jun17. Y cada tres meses se fueron realizando las progresivas capturas de datos, todos ellos volcados en la antedicha hoja de cálculo. Y en los epígrafes posteriores, se analizarán e interpretarán resultados mediante un trazado gráfico de los mismos. Indudablemente, una representación **gráfica** de datos numéricos es la mejor forma de identificar tendencias, descubrir anomalías, comparar resultados e inferir conclusiones.

Las únicas variables que no se han representado de forma gráfica, son las denominadas C (sensor de **lluvia**) e I (sensor de **granizo**), por motivos constructivos obvios: ni los sensores, ni el prototipo al completo, están realmente preparados para recibir agua de lluvia y/o el impacto del granizo. Cualquiera de los antedichos efectos meteorológicos, pondría en peligro la integridad física de la electrónica implicada, malogrando todo el conjunto de forma inexorable. Es por ello que se tuvo especial cuidado en la toma de datos de los días señalados, para evitar al máximo la posible caída de agua y/o granizo sobre el seguidor: afortunadamente, la meteorología acompañó y no se presentaron ninguna de las antedichas circunstancias. Los valores digitales que ambas variables adquieren en todas las tomas de datos, son siempre 0 (no hay presencia ni de agua ni de granizo), con lo cual carece de sentido su representación gráfica por no aportar nada al respecto.

21-jun-17	h/m/mm	SO	SN	SS	SE	Movimiento seguidor hacia				ALFA	BETA	V	Tp	Tcp	Ta	Hr	A	Pa	C	I
	7:30	708.5	789.7	693.7	811.8					11.0	69.3	2.7	142.7	85.0	18.8	36	4	933.0	0	0
	7:40	729.6	844.8	745.0	796.7					13.0	70.0	2.9	146.4	87.4	19.2	41	4	933.2	0	0
	7:50	721.5	872.3	777.1	800.9					15.1	73.0	3.8	149.4	89.3	19.6	42	4	933.6	0	0
	8:00	740.7	854.7	781.4	846.6					17.5	73.7	2.9	147.5	88.1	20.0	47	3	934.3	0	0
	8:10	769.1	904.2	772.7	863.1					20.2	76.0	2.7	152.8	91.5	20.4	48	4	934.8	0	0
	8:20	758.0	908.0	783.0	858.0					21.0	76.6	3.2	153.2	91.8	20.7	54	4	934.5	0	0
	8:30	831.0	924.3	771.7	924.3					24.0	79.0	3.7	155.0	92.9	21.0	56	4	934.7	0	0
	8:40	804.6	881.7	770.4	907.4					24.9	79.6	3.3	153.2	91.7	21.3	59	4	935.0	0	0
	8:50	826.6	895.4	809.3	869.6					27.8	82.0	3.1	151.9	90.9	21.6	59	4	935.4	0	0
	9:00	870.2	906.9	852.0	923.0					28.8	82.4	4.3	159.3	95.0	22.0	62	3	935.6	0	0
	9:10	827.2	924.0	800.8	888.8					30.5	85.0	3.9	194.9	92.9	22.2	62	3	935.9	0	0
	9:20	831.9	902.7	814.2	920.4					31.8	85.5	3.8	154.5	92.6	22.5	62	3	935.8	0	0
	9:30	851.5	895.9	807.2	958.0					34.2	88.0	4.1	158.4	95.2	22.9	61	3	935.9	0	0
	9:40	837.5	926.6	837.5	962.3					35.9	88.6	4.0	158.9	95.4	23.2	60	4	936.0	0	0
	9:50	866.2	946.6	830.5	982.3					38.1	91.0	4.0	160.9	96.8	23.5	60	4	936.1	0	0
	10:00	801.9	917.7	837.5	935.6					39.2	91.8	3.9	156.1	93.7	23.6	59	4	936.2	0	0
	10:10	880.0	960.9	844.1	978.8					42.8	94.0	3.7	160.5	96.5	23.9	59	4	936.6	0	0
	10:20	856.0	973.1	810.9	946.1					43.7	95.2	3.1	160.0	96.2	24.0	59	4	937.0	0	0
	10:30	866.9	930.1	830.8	921.1					46.9	98.0	2.9	155.6	93.3	24.3	58	4	936.9	0	0
	10:40	858.8	940.2	885.9	994.4					47.5	99.0	3.6	162.1	97.6	24.5	57	4	936.8	0	0
	10:50	896.9	960.4	860.7	933.2					50.0	102.0	3.9	159.7	95.3	24.7	59	4	936.7	0	0
	11:00	816.3	997.7	825.4	952.4					51.2	103.1	3.8	162.4	97.8	24.8	60	4	936.5	0	0
	11:10	897.9	916.1	852.6	970.5					53.1	106.0	4.9	159.7	96.0	25.0	58	4	936.3	0	0
	11:20	853.5	971.6	844.4	926.2					54.3	107.7	4.3	159.8	96.1	25.2	57	4	936.4	0	0
	11:30	881.7	927.2	827.2	954.5					57.9	110.2	4.0	158.1	94.9	25.4	56	4	936.5	0	0
	11:40	873.6	937.3	891.8	991.9					58.6	111.0	4.6	161.0	97.4	25.6	57	4	936.4	0	0
	11:50	828.1	937.3	819.0	919.1					58.6	114.3	5.7	156.3	93.8	25.6	55	4	936.4	0	0
	12:00	864.5	900.9	1.001.0	937.3					61.9	119.0	5.5	162.8	98.0	25.7	55	4	936.4	0	0
	12:10	802.7	902.7	919.1	904.0					64.4	122.0	4.9	159.1	95.0	25.9	54	4	936.0	0	0
	12:20	882.7	873.6	954.6	946.4					65.2	125.6	4.8	159.1	95.6	26.0	53	4	936.6	0	0
	12:30	864.5	891.8	928.2	973.7					67.9	130.8	4.5	160.0	96.2	26.1	53	4	936.7	0	0
	12:40	899.9	890.8	972.6	963.5					68.0	135.6	4.5	159.9	96.1	26.2	52	4	936.8	0	0
	12:50	817.2	898.9	980.6	989.7					70.0	140.6	4.1	161.6	97.3	26.3	52	4	936.7	0	0
	13:00	826.3	880.8	926.2	963.4					70.4	146.5	4.8	168.0	94.0	26.6	51	4	936.8	0	0
	13:10	880.8	871.7	944.3	944.3					71.4	153.0	4.7	157.0	94.2	26.7	50	4	936.7	0	0
	13:20	870.7	861.7	925.1	988.6					72.1	159.7	4.2	161.5	97.2	26.7	47	4	936.8	0	0
	13:30	870.0	842.0	907.5	909.4					72.6	167.2	3.4	161.4	97.1	26.0	40	4	936.6	0	0
	13:40	885.9	867.8	949.2	958.2					73.0	175.5	4.2	158.5	95.2	26.9	46	4	936.7	0	0
	13:50	813.6	885.9	940.2	976.3					73.0	183.1	4.6	160.3	96.4	27.0	45	4	936.7	0	0
	14:00	892.0	837.9	928.0	919.0					72.3	190.5	3.3	155.3	93.2	27.2	44	4	936.7	0	0
	14:10	792.0	792.0	880.0	848.0					71.5	198.6	3.9	160.2	89.9	27.3	43	3	936.8	0	0
	14:20	844.1	853.1	942.9	924.9					71.6	205.4	3.8	156.0	94.2	27.3	44	3	936.5	0	0
	14:30	842.7	842.7	958.0	913.6					69.9	211.6	3.7	158.4	95.2	27.4	45	3	936.5	0	0
	14:40	851.5	869.3	958.0	922.5					69.6	217.7	4.5	158.4	95.2	27.5	44	4	937.1	0	0
	14:50	849.6	823.1	911.6	911.6					67.3	223.2	4.4	153.6	92.0	27.6	43	4	937.2	0	0
	15:00	844.8	862.4	888.8	888.8					67.0	227.9	4.3	151.2	90.5	27.6	43	4	937.2	0	0
	15:10	818.4	862.4	915.2	960.4					64.6	232.4	4.3	157.7	94.7	27.7	42	4	936.9	0	0
	15:20	863.3	819.7	895.2	880.7					62.5	236.4	3.9	152.2	91.1	27.7	42	4	936.4	0	0
	15:30	774.9	826.6	904.1	886.8					62.4	239.9	4.9	152.8	91.5	27.8	42	4	936.8	0	0
	15:40	780.4	780.4	926.6	943.8					60.7	243.3	3.4	157.0	94.2	27.7	40	4	936.5	0	0
	15:50	780.2	763.2	856.5	907.4					59.9	246.3	3.9	153.2	91.7	27.6	41	4	937.0	0	0
	16:00	831.6	806.4	858.8	873.6					56.7	249.0	4.1	149.5	89.4	27.5	40	3	936.5	0	0
	16:10	783.0	774.7	891.3	841.3					55.4	251.6	4.2	151.5	90.6	27.4	41	3	936.8	0	0
	16:20	757.0	805.9	887.3	887.3					52.4	254.1	4.1	151.0	90.4	27.4	40	3	936.9	0	0
	16:30	785.1	737.5	848.5	808.9					51.8	256.2	3.9	146.8	87.7	27.3	39	3	936.7	0	0
	16:40	746.9	716.1	793.1	808.5					49.9	258.4	3.8	142.3	84.8	27.2	38	4	936.1	0	0
	16:50	729.6	721.9	791.0	837.1					48.0	260.5	3.8	145.5	86.8	27.0	39	4	937.0	0	0
	17:00	723.2	686.3	804.4	782.3					46.2	262.3	3.6	141.8	84.5	26.8	38	4	936.2	0	0
	17:10	667.0	652.5	732.3	797.5					44.2	264.2	3.5	141.0	84.0	26.7	40	4	936.2	0	0
	17:20	668.8	688.9	718.1	774.4					42.3	266.0	3.5	138.3	82.3	26.5	38	4	936.5	0	0
	17:30	611.8	651.7	704.9	731.5					40.5	267.7	3.4	133.2	79.1	26.4	37	4	936.5	0	0
	17:40	588.6	627.8	660.5	699.8					39.9	269.4	2.9	129.2	76.6	26.1	38	4	937.0	0	0
	17:50	558.0	576.6	669.6	669.6					36.6	271.0	2.9	125.4	74.3	25.9	38	4	936.9	0	0
	18:00	505.7	555.7	572.7	564.0					35.9	272.5	2.8	113.8	67.3	25.8	37	4	936.5	0	0
	18:10	468.9	515.8	567.9	531.4					32.8	274.1	2.7	111.5	65.9	25.5	38	4	936.1	0	0
	18:20	496.9	496.9	612.1	622.2					31.8	276.6	3.6	104.7	61.9	25.3	39	4	936.0	0	0
	18:30	423.9	402.0	450.1	441.4					28.8	277.1	2.6	93.2	55.4	24.7	38	4	935.9	0	0
	18:40	334.6	327.5	377.4	366.7					27.2	278.6	3.6	80.4	48.3	24.5	36	4	936.1	0	0
	18:50	238.4	251.5	272.5	269.9					24.6	280.1	2.7	59.1	37.3	24.1	37	4	936.2	0	0
	19:00	141.9	143.5	155.5	161.6					21.8	281.5	2.8	55.3	36.7	24.0	36	4	936.0	0	0
	19:10	23.7	25.7	27.0	27.0					21.5	283.0	3.4	43.8	32.1	23.7	36	4	936.1	0	0
	19:20	0.0	0.0	0.0	0.0					21.5	283.0	2.7	35.4	27.8	23.5	36	4	935.9	0	0
	19:30	0.0	0.0	0.0	0.0					21.5	283.0	2.6	29.9	25.2	23.2	36	4	935.8	0	0

Figura 6.20. Captura de datos 21jun17 (fuente: autor)

22-sep-17	h:mm	SO	SN	SS	SE	Movimiento seguidor hacia				ALFA	BETA	V	Tp	Tcp	Ta	Hr	A	Pa	C	I
	7:30	430.2	501.9	430.2	511.5					0.0	89.0	0.0	103.1	61.0	17.2	71	4	934.5	0	0
	7:40	484.1	576.5	521.6	582.9					3.3	94.3	0.0	115.0	66.0	17.7	72	4	934.6	0	0
	7:50	560.3	669.9	590.7	627.3					8.7	97.0	0.0	125.4	74.3	18.2	72	4	934.6	0	0
	8:00	607.2	673.2	646.8	719.4					10.1	98.3	0.1	131.7	78.1	18.5	73	3	934.7	0	0
	8:10	660.8	773.3	688.9	717.1					12.3	100.0	0.2	136.2	82.2	19.0	74	4	935.0	0	0
	8:20	666.0	814.0	680.8	799.2					14.9	102.3	0.8	142.9	85.2	19.4	74	4	935.2	0	0
	8:30	724.7	840.4	717.0	786.4					15.8	104.3	0.0	145.9	87.1	19.6	75	4	934.9	0	0
	8:40	769.3	816.4	730.1	832.1					17.5	105.9	0.0	145.0	86.5	19.8	76	4	934.8	0	0
	8:50	726.2	821.9	782.0	829.9					19.4	107.0	0.1	144.7	86.3	20.3	77	4	934.6	0	0
	9:00	745.9	850.1	761.0	858.1					21.1	108.9	0.0	147.0	88.3	20.6	80	4	934.8	0	0
	9:10	795.4	902.0	811.8	877.4					24.0	111.1	0.1	152.6	91.4	21.3	82	3	934.8	0	0
	9:20	805.4	881.0	755.1	914.5					25.1	114.6	0.1	153.9	92.2	21.5	82	3	934.7	0	0
	9:30	846.5	932.0	820.6	940.5					26.9	117.8	0.1	156.6	94.0	21.7	81	3	934.8	0	0
	9:40	825.6	868.6	817.0	911.6					27.9	119.9	1.0	153.6	92.0	22.0	82	4	934.7	0	0
	9:50	815.9	911.4	807.2	885.4					29.1	120.0	1.2	153.6	92.0	22.2	84	4	935.0	0	0
	10:00	783.0	887.4	826.5	887.4					31.4	121.1	1.4	151.0	90.4	22.5	83	4	935.1	0	0
	10:10	835.1	958.1	817.5	887.8					33.3	124.3	1.5	158.4	95.2	22.7	81	4	935.3	0	0
	10:20	825.8	959.0	801.4	907.9					35.8	127.0	1.3	159.4	95.0	23.0	82	4	935.0	0	0
	10:30	860.2	931.8	833.3	949.8					37.9	129.9	1.4	157.6	94.6	23.2	79	4	936.0	0	0
	10:40	810.0	918.0	837.0	981.0					38.4	132.4	1.0	160.8	96.7	23.4	74	4	935.9	0	0
	10:50	847.9	936.1	811.8	974.2					39.0	134.5	0.9	160.1	96.2	23.6	72	4	935.6	0	0
	11:00	833.5	915.1	824.5	924.1					40.4	136.0	0.9	154.9	92.9	23.8	67	4	935.8	0	0
	11:10	881.7	999.9	818.1	972.6					41.1	140.0	0.8	162.6	97.9	23.9	67	4	935.6	0	0
	11:20	900.9	964.6	846.3	973.7					42.6	143.9	0.8	160.0	96.2	24.2	65	4	935.7	0	0
	11:30	901.9	928.2	829.0	956.6					43.9	147.8	0.8	158.3	95.1	24.3	64	4	935.8	0	0
	11:40	885.5	976.9	876.5	931.3					44.7	150.5	1.1	160.4	96.4	24.5	59	4	935.0	0	0
	11:50	850.0	976.9	895.7	941.4					44.7	153.1	1.0	160.4	96.4	24.6	59	4	935.8	0	0
	12:00	887.6	960.8	841.8	969.9					45.9	154.7	1.1	159.6	96.0	24.8	58	4	935.6	0	0
	12:10	860.1	997.4	860.1	933.3					47.1	158.9	1.4	162.4	97.8	25.2	57	4	935.5	0	0
	12:20	860.1	997.4	832.7	951.6					47.9	164.0	1.3	162.4	97.8	25.0	55	4	935.6	0	0
	12:30	886.6	996.3	868.3	968.8					48.5	168.2	2.5	162.3	97.7	25.3	53	4	935.1	0	0
	12:40	894.7	995.2	840.0	949.5					48.9	173.9	2.4	162.2	97.6	25.4	54	4	935.5	0	0
	12:50	839.0	985.0	820.8	994.1					49.5	175.3	2.0	162.1	97.5	25.6	54	4	935.5	0	0
	13:00	837.2	937.3	900.9	962.0					49.7	177.0	2.3	160.9	96.0	25.8	52	4	935.4	0	0
	13:10	890.8	972.6	836.3	990.8					49.6	180.0	2.3	161.7	97.3	25.8	53	4	935.4	0	0
	13:20	842.6	951.3	815.4	933.2					49.1	185.0	1.8	157.7	94.7	26.0	53	4	935.4	0	0
	13:30	874.9	938.1	820.8	982.2					48.9	189.4	2.9	161.9	97.4	26.1	53	4	935.5	0	0
	13:40	789.9	876.7	833.3	902.7					48.6	193.3	1.7	152.7	91.4	26.3	51	4	935.2	0	0
	13:50	769.5	880.7	816.5	887.8					48.6	196.7	2.8	152.1	91.1	26.4	49	4	935.3	0	0
	14:00	879.1	808.1	941.3	941.3					48.0	199.7	2.8	156.7	94.0	26.5	50	4	935.1	0	0
	14:10	849.6	849.6	973.5	947.0					47.0	203.0	2.9	160.0	96.2	26.5	49	4	935.0	0	0
	14:20	817.5	870.2	923.0	914.2					46.1	205.9	3.0	154.6	92.0	26.6	49	4	934.9	0	0
	14:30	859.3	798.6	885.4	876.7					45.2	210.1	2.6	150.8	90.2	26.6	48	4	934.7	0	0
	14:40	807.5	833.0	884.0	875.5					44.5	213.9	2.5	150.7	90.1	26.5	46	4	934.7	0	0
	14:50	820.5	795.2	863.6	872.1					43.4	216.6	2.9	149.4	89.3	26.4	46	4	934.5	0	0
	15:00	780.3	822.2	847.4	906.1					42.3	219.5	3.8	153.0	91.7	26.3	45	4	934.6	0	0
	15:10	813.4	771.9	846.6	879.8					40.1	222.2	2.4	150.2	89.8	26.3	44	4	934.4	0	0
	15:20	746.2	803.6	877.4	893.8					38.5	225.3	2.4	151.7	90.8	26.2	44	4	934.3	0	0
	15:30	766.1	750.1	814.0	821.9					36.7	228.7	3.5	143.8	85.8	26.2	43	4	934.2	0	0
	15:40	748.8	764.4	803.4	842.4					34.0	231.3	1.9	146.1	87.2	26.1	41	4	934.2	0	0
	15:50	717.0	724.7	848.1	840.4					33.8	233.8	2.7	146.7	87.6	26.0	41	4	934.1	0	0
	16:00	666.0	695.6	777.0	806.6					32.8	235.3	2.1	142.1	84.6	25.9	42	4	934.1	0	0
	16:10	639.7	674.9	717.1	731.1					32.0	237.8	1.9	133.1	79.0	25.7	42	4	933.9	0	0
	16:20	625.5	581.1	757.6	750.6					29.9	239.8	2.9	136.3	81.0	25.5	42	4	933.8	0	0
	16:30	640.2	620.4	699.6	699.6					27.5	242.4	1.7	129.2	76.6	25.4	42	4	933.8	0	0
	16:40	574.2	599.7	644.4	650.8					25.7	245.6	1.5	122.9	72.8	25.2	43	4	933.8	0	0
	16:50	584.6	584.6	633.4	633.4					24.8	246.0	2.4	120.6	71.3	25.0	42	4	933.7	0	0
	17:00	521.6	532.5	571.0	502.0					23.7	248.1	2.4	115.0	68.0	24.9	42	4	933.7	0	0
	17:10	479.0	469.1	504.0	504.0					21.1	250.0	2.7	101.9	60.3	24.6	42	4	933.6	0	0
	17:20	435.0	458.9	482.8	516.2					19.8	252.3	1.8	103.8	61.4	24.3	42	4	933.6	0	0
	17:30	381.2	357.6	420.5	412.7					17.7	254.0	3.0	88.2	52.6	24.0	41	4	933.5	0	0
	17:40	309.9	300.5	316.1	344.3					15.6	256.1	2.0	74.1	45.0	23.7	41	4	933.6	0	0
	17:50	287.1	275.4	298.9	307.7					13.9	257.5	3.7	66.7	41.1	23.5	41	4	933.5	0	0
	18:00	106.0	109.4	182.6	171.0					12.8	258.9	2.9	36.8	33.3	23.2	41	4	933.7	0	0
	18:10	4.7	4.5	5.4	5.4					8.8	260.3	1.9	34.4	32.6	22.9	41	4	933.5	0	0
	18:20	0.0	0.0	0.0	0.0					6.6	262.4	2.1	32.8	31.0	22.4	41	4	933.6	0	0
	18:30	0.0	0.0	0.0	0.0					4.4	264.6	2.5	29.6	26.5	22.5	42	4	933.5	0	0
	18:40	0.0	0.0	0.0	0.0					2.2	266.7	3.0	28.4	26.8	22.1	41	4	933.5	0	0
	18:50	0.0	0.0	0.0	0.0					1.8	267.8	2.8	27.6	25.8	21.8	42	4	933.4	0	0
	19:00	0.0	0.0	0.0	0.0					1.1	268.7	2.2	25.8	22.5	21.5	41	4	933.3	0	0
	19:10	0.0	0.0	0.0	0.0					0.0	270.7	2.7	24.0	21.4	21.1	42	4	933.5	0	0
	19:20	0.0	0.0	0.0	0.0					0.0	270.7	2.2	23.4	21.3	20.8	42	4	933.4	0	0
	19:30	0.0	0.0	0.0	0.0					0.0	270.7	2.0	23.4	21.2	20.5	41	4	933.2	0	0

Figura 6.21. Captura de datos 22sep17 (fuente: autor)

21-dic-17					Movimiento seguidor hacia																
	h:mm	SO	SN	SS	SE						ALFA	BETA	V	Tp	Tcp	Ta	Hr	A	Pa	C	I
	7:30	0.0	0.0	0.0	0.0						0.0	0.0	0.9	14.0	11.3	2.7	79	4	946.5	0	0
	7:40	0.0	0.0	0.0	0.0						0.0	0.0	0.0	24.9	16.9	2.9	78	4	946.6	0	0
	7:50	144.7	171.7	149.5	170.1						0.0	0.0	0.7	33.8	25.4	3.0	79	4	946.7	0	0
	8:00	225.9	261.0	230.9	253.5						0.0	0.0	0.0	56.5	36.0	3.2	81	3	946.7	0	0
	8:10	281.1	319.9	284.1	325.9						0.0	0.0	0.0	70.4	43.0	3.3	81	3	946.6	0	0
	8:20	309.7	336.3	313.0	356.3						0.0	0.0	0.6	76.4	46.2	3.5	81	4	946.8	0	0
	8:30	375.4	422.3	307.1	418.4						0.0	0.0	0.5	88.5	52.7	3.7	80	4	946.0	0	0
	8:40	421.7	434.5	400.4	464.3						0.0	0.0	0.7	95.6	56.7	4.0	81	4	946.8	0	0
	8:50	364.2	464.3	433.6	473.0						0.0	0.0	0.9	97.0	57.5	4.4	81	4	946.9	0	0
	9:00	467.5	486.5	429.3	524.7						0.0	0.0	0.0	105.1	62.1	4.6	81	3	947.0	0	0
	9:10	453.8	492.9	453.8	517.3						0.0	0.0	0.4	104.0	61.5	4.7	81	3	947.1	0	0
	9:20	504.9	530.4	479.4	540.6						2.2	122.1	0.0	107.6	63.5	4.9	81	3	947.3	0	0
	9:30	488.7	580.0	531.6	574.6						3.0	124.8	0.0	113.2	66.9	5.1	80	4	947.5	0	0
	9:40	534.5	600.5	540.0	589.6						4.5	126.6	0.8	116.1	68.7	5.2	81	4	947.5	0	0
	9:50	514.3	609.3	519.9	609.3						6.1	128.3	0.0	117.3	69.4	5.5	81	4	947.7	0	0
	10:00	560.7	624.2	565.4	601.1						8.0	130.0	0.0	119.4	70.6	5.7	80	4	947.8	0	0
	10:10	576.2	623.3	570.4	599.8						8.2	132.9	0.2	119.2	70.5	5.9	79	4	947.7	0	0
	10:20	534.6	629.6	576.2	635.6						10.6	134.7	0.2	120.9	71.5	6.2	78	4	947.6	0	0
	10:30	552.4	667.7	600.9	637.4						12.0	136.1	0.6	125.1	74.1	6.5	77	4	947.9	0	0
	10:40	587.5	630.4	593.6	661.0						14.0	138.2	0.3	124.2	73.6	6.8	75	4	947.0	0	0
	10:50	605.5	661.3	611.8	673.6						14.3	139.5	0.7	125.9	74.5	7.0	72	4	947.7	0	0
	11:00	619.7	688.6	619.7	663.6						16.0	141.5	0.5	127.6	76.8	7.3	70	4	947.8	0	0
	11:10	595.5	648.9	585.9	680.4						16.0	143.6	0.5	126.8	75.1	7.5	69	4	947.5	0	0
	11:20	588.7	677.3	607.7	683.6						18.1	145.8	0.0	127.2	75.4	7.9	68	4	947.9	0	0
	11:30	612.5	644.4	625.2	680.8						19.1	147.6	0.4	122.9	72.8	8.2	66	4	947.9	0	0
	11:40	615.4	647.4	602.5	679.5						19.4	150.1	0.0	126.6	75.0	8.3	65	4	947.8	0	0
	11:50	603.5	647.4	609.9	683.4						21.0	152.4	0.0	128.4	76.1	8.6	64	4	947.8	0	0
	12:00	597.1	693.4	609.9	661.3						22.0	154.2	0.2	128.4	76.1	8.8	63	4	947.9	0	0
	12:10	635.6	654.8	616.3	674.1						22.3	157.0	0.5	126.0	74.6	9.0	61	4	947.7	0	0
	12:20	603.5	648.4	603.5	699.8						24.0	160.5	1.2	129.2	76.6	9.2	62	4	947.7	0	0
	12:30	609.0	666.6	595.1	680.2						24.0	163.1	0.3	125.0	74.0	9.4	59	4	947.6	0	0
	12:40	612.5	682.7	625.2	663.5						24.5	165.8	0.4	127.1	75.3	9.5	58	4	947.7	0	0
	12:50	603.3	673.1	584.2	673.1						25.0	167.9	0.4	126.6	74.5	9.6	57	4	947.4	0	0
	13:00	601.4	652.0	595.0	696.3						25.6	169.1	1.6	128.8	76.4	9.9	56	4	947.3	0	0
	13:10	591.3	660.5	616.4	635.3						25.7	171.7	0.3	124.2	73.5	10.0	56	4	947.1	0	0
	13:20	563.4	682.3	594.7	676.1						25.9	174.2	1.1	127.0	75.3	10.1	55	4	947.1	0	0
	13:30	599.5	630.4	587.1	673.6						26.1	175.7	0.7	125.9	74.6	10.2	56	4	947.0	0	0
	13:40	556.4	630.4	582.7	610.1						26.1	179.3	0.6	120.2	71.1	10.3	55	4	946.0	0	0
	13:50	537.3	630.4	555.2	644.8						26.1	181.9	0.0	122.1	72.3	10.4	54	4	946.8	0	0
	14:00	588.1	588.1	611.8	599.9						26.0	184.3	0.0	117.7	69.6	10.5	53	4	946.7	0	0
	14:10	601.0	607.2	638.5	644.5						25.7	186.9	0.5	122.1	72.3	10.5	52	3	946.5	0	0
	14:20	554.9	560.7	612.7	583.8						25.3	189.5	0.8	117.8	69.7	10.4	51	3	946.5	0	0
	14:30	519.9	508.7	581.4	614.9						26.2	192.1	0.6	118.1	69.8	10.3	50	4	946.9	0	0
	14:40	485.1	528.2	580.6	587.0						24.8	194.5	0.6	114.3	67.6	10.3	49	4	946.2	0	0
	14:50	526.3	520.9	547.7	585.3						24.7	197.0	0.7	114.0	67.4	10.2	48	4	945.8	0	0
	15:00	474.3	504.9	545.7	520.2						23.7	199.3	0.6	108.2	64.0	10.2	46	4	945.9	0	0
	15:10	459.8	464.6	522.7	517.9						23.0	201.8	0.8	104.8	62.0	10.0	47	4	946.0	0	0
	15:20	448.4	462.7	524.7	519.9						22.2	204.2	0.3	105.1	62.1	9.8	48	4	945.9	0	0
	15:30	433.6	403.0	459.9	459.9						22.0	205.4	0.7	94.8	56.3	9.6	46	4	946.0	0	0
	15:40	397.0	385.0	413.0	437.1						20.5	208.7	0.9	91.0	54.1	9.3	48	4	945.8	0	0
	15:50	367.1	363.2	402.7	406.6						19.0	210.9	0.6	85.7	51.2	9.1	40	4	946.1	0	0
	16:00	356.0	334.0	374.3	395.4						18.6	213.0	0.4	83.9	50.2	9.0	47	4	946.1	0	0
	16:10	319.7	306.4	353.0	336.3						17.4	215.3	1.1	75.8	45.9	8.7	49	4	946.2	0	0
	16:20	241.0	246.0	271.1	258.5						16.9	217.3	0.8	58.8	37.1	8.5	48	4	946.1	0	0
	16:30	10.9	10.5	11.1	11.3						15.2	219.3	0.4	53.6	33.5	8.3	49	4	946.1	0	0
	16:40	0.0	0.0	0.0	0.0						15.2	219.3	0.0	47.6	33.2	8.0	49	4	946.0	0	0
	16:50	0.0	0.0	0.0	0.0						15.2	219.3	0.0	42.1	33.2	7.7	51	4	946.2	0	0
	17:00	0.0	0.0	0.0	0.0						15.2	219.3	0.0	37.8	27.8	7.5	50	4	946.2	0	0
	17:10	0.0	0.0	0.0	0.0						15.2	219.3	1.8	33.6	27.1	7.3	51	4	946.2	0	0
	17:20	0.0	0.0	0.0	0.0						15.2	219.3	0.7	28.3	24.4	7.0	52	4	946.2	0	0
	17:30	0.0	0.0	0.0	0.0						15.2	219.3	0.0	21.8	20.8	6.8	54	4	946.1	0	0
	17:40	0.0	0.0	0.0	0.0						15.2	219.3	0.0	18.6	18.1	6.5	56	4	946.3	0	0
	17:50	0.0	0.0	0.0	0.0						15.2	219.3	0.2	12.4	12.3	6.3	55	4	945.9	0	0
	18:00	0.0	0.0	0.0	0.0						15.2	219.3	0.0	11.7	11.7	6.1	56	4	946.2	0	0
	18:10	0.0	0.0	0.0	0.0						15.2	219.3	0.0	9.9	9.8	5.8	57	4	946.4	0	0
	18:20	0.0	0.0	0.0	0.0						15.2	219.3	0.1	7.6	7.7	5.6	58	4	946.6	0	0
	18:30	0.0	0.0	0.0	0.0						15.2	219.3	0.0	6.7	6.4	5.5	59	4	946.5	0	0
	18:40	0.0	0.0	0.0	0.0						15.2	219.3	0.0	5.7	6.3	5.2	59	4	946.5	0	0
	18:50	0.0	0.0	0.0	0.0						15.2	219.3	0.1	6.3	6.2	5.0	61	4	946.6	0	0
	19:00	0.0	0.0	0.0	0.0						15.2	219.3	0.2	5.9	6.0	4.8	61	4	946.5	0	0
	19:10	0.0	0.0	0.0	0.0						15.2	219.3	0.2	5.7	5.6	4.5	62	4	946.7	0	0
	19:20	0.0	0.0	0.0	0.0						15.2	219.3	0.0	5.4	5.3	4.3	63	4	946.7	0	0
	19:30	0																			

20-mar-18					Movimiento seguidor hacia				Alfa		Beta		V		Tp		Tep		Ta		Hr		A		Pa		C		I	
					←	↑	↓	→	Alfa	Beta	V	Tp	Tep	Ta	Hr	A	Pa	C	I											
	7:30	420,0	450,3	407,0	459,0		↑				0,0	0,0	4,1	94,7	56,2	5,6	59	4						945,0	0	0				
	7:40	463,1	512,9	463,1	508,0		↑				0,0	0,0	3,9	103,3	61,1	5,9	59	4						945,2	0	0				
	7:50	529,0	562,0	540,0	589,6		↑				0,0	0,0	5,1	114,6	67,7	6,3	58	4						945,2	0	0				
	8:00	646,6	641,6	634,6	647,6		↑				1,1	91,1	3,3	122,6	72,6	6,6	59	3						944,9	0	0				
	8:10	573,3	648,9	617,4	655,2		↑				3,9	93,0	4,6	123,5	73,1	7,0	60	4						945,0	0	0				
	8:20	646,8	726,0	620,4	719,4		↑				4,9	94,4	4,4	132,5	78,6	7,2	60	4						945,1	0	0				
	8:30	664,5	746,7	630,2	733,0		↑				7,6	97,0	3,6	135,0	80,2	7,6	59	4						945,3	0	0				
	8:40	649,5	755,4	670,7	720,1		↑				8,9	97,6	3,4	136,1	80,9	7,9	60	4						945,4	0	0				
	8:50	698,7	784,3	663,1	741,5		↑				11,1	100,0	4,6	139,5	83,0	8,2	61	4						945,4	0	0				
	9:00	695,0	789,2	695,0	736,4		↑				12,1	101,1	4,7	140,9	83,9	8,4	61	4						945,5	0	0				
	9:10	716,4	760,2	723,7	738,3		↑				16,2	103,1	4,5	136,6	81,2	8,7	61	3						945,6	0	0				
	9:20	693,7	745,4	701,1	792,3		↑				16,6	104,5	5,2	139,2	82,9	8,9	59	3						945,3	0	0				
	9:30	735,0	795,0	705,0	795,0		↑				18,9	106,6	4,6	140,7	83,8	9,1	61	4						945,4	0	0				
	9:40	752,4	828,4	714,4	775,2		↑				19,9	108,0	3,8	144,5	86,2	9,4	61	4						945,6	0	0				
	9:50	712,4	819,6	743,0	773,7		↑				22,7	109,9	5,2	143,5	85,6	9,7	60	4						945,7	0	0				
	10:00	699,8	784,4	722,9	822,8		↑				23,7	111,9	4,8	143,9	85,8	10,0	61	4						945,5	0	0				
	10:10	767,3	844,8	706,3	798,3		↑				24,1	116,7	5,9	146,4	87,4	10,2	60	4						946,3	0	0				
	10:20	731,3	801,3	700,2	824,7		↑				27,2	119,8	4,7	144,1	86,0	10,4	59	4						945,4	0	0				
	10:30	717,6	834,6	772,2	834,6		↑				28,9	119,9	4,6	145,2	86,7	10,6	60	4						945,4	0	0				
	10:40	706,0	816,4	737,9	816,4		↑				31,9	120,0	4,5	143,2	86,4	10,8	58	4						945,3	0	0				
	10:50	770,3	801,7	707,4	793,9		↑				32,2	123,3	5,8	141,5	84,3	11,0	58	4						945,4	0	0				
	11:00	740,7	796,9	732,8	836,3		↑				34,2	124,6	4,0	145,3	86,7	11,1	60	4						945,7	0	0				
	11:10	726,8	861,1	758,4	829,5		↑				35,3	127,8	4,7	148,2	88,5	11,5	59	4						945,8	0	0				
	11:20	728,6	871,2	752,4	839,5		↑				38,0	129,4	5,2	149,3	89,2	11,8	57	4						945,6	0	0				
	11:30	728,6	839,5	784,1	831,6		↑				38,3	130,8	4,3	145,8	87,0	12,0	56	4						945,7	0	0				
	11:40	753,4	856,4	761,3	856,4		↑				40,9	134,6	4,3	147,7	88,2	12,2	57	4						945,6	0	0				
	11:50	753,4	856,4	729,6	864,4		↑				41,0	138,8	4,1	148,5	88,8	12,3	56	4						945,4	0	0				
	12:00	777,1	856,4	765,1	840,6		↑				43,4	140,4	4,8	147,7	88,2	12,4	55	4						945,4	0	0				
	12:10	785,1	800,9	769,2	848,5		↑				43,5	143,5	4,0	146,8	87,7	12,6	55	4						945,2	0	0				
	12:20	744,6	863,3	720,7	863,3		↑				44,6	146,6	3,9	148,4	88,7	12,7	56	4						945,1	0	0				
	12:30	753,4	832,7	713,7	864,4		↑				45,5	149,8	4,2	148,5	88,8	12,9	54	4						944,9	0	0				
	12:40	752,4	871,2	784,1	815,8		↑				47,1	153,0	4,4	149,3	89,2	13,1	54	4						944,8	0	0				
	12:50	743,5	806,8	775,2	854,3		↑				47,2	156,6	3,6	147,4	88,1	13,3	53	4						944,9	0	0				
	13:00	774,2	837,4	766,3	837,4		↑				48,4	160,2	3,4	145,6	86,9	13,4	53	4						944,8	0	0				
	13:10	772,2	851,0	709,2	803,8		↑				48,5	163,7	3,3	147,1	87,8	13,6	52	4						944,6	0	0				
	13:20	714,4	800,7	722,2	847,8		↑				49,0	167,5	3,3	146,7	87,6	13,7	52	4						944,7	0	0				
	13:30	705,6	799,7	705,6	823,2		↑				49,5	171,4	3,9	144,0	85,8	13,8	51	4						944,6	0	0				
	13:40	741,0	850,0	741,0	826,0		↑				49,6	175,0	3,9	147,0	86,3	13,9	50	4						944,5	0	0				
	13:50	697,5	858,0	751,8	806,0		↑				49,6	179,0	3,0	147,8	88,3	13,9	49	4						944,3	0	0				
	14:00	738,2	858,0	792,1	815,1		↑				49,6	182,9	3,5	147,8	88,3	13,9	48	3						944,2	0	0				
	14:10	734,4	757,4	833,9	833,9		↑				49,5	186,9	3,0	145,2	86,6	13,9	49	3						944,0	0	0				
	14:20	729,6	691,6	790,4	813,2		↑				48,9	190,5	2,9	142,8	85,1	14,0	47	3						943,8	0	0				
	14:30	720,0	727,5	772,5	787,5		↑				48,8	194,4	3,1	139,5	83,3	14,0	47	4						943,0	0	0				
	14:40	680,7	710,6	770,4	822,8		↑				48,3	197,9	3,2	143,9	85,8	13,9	46	4						943,5	0	0				
	14:50	720,0	675,0	810,0	817,5		↑				47,6	201,6	3,5	143,3	85,4	14,0	45	4						943,1	0	0				
	15:00	671,6	730,6	752,8	797,0		↑				46,9	205,2	3,8	141,0	83,9	14,0	44	4						943,0	0	0				
	15:10	700,8	671,6	766,5	781,1		↑				46,0	208,5	4,0	139,1	82,8	13,9	44	4						943,0	0	0				
	15:20	716,8	709,5	796,4	767,4		↑				46,1	211,8	4,3	140,9	83,9	14,0	43	4						942,9	0	0				
	15:30	677,8	663,6	720,1	769,5		↑				42,9	214,9	3,1	137,7	81,9	13,9	44	4						942,5	0	0				
	15:40	646,7	619,2	749,9	756,8		↑				42,8	218,0	3,5	136,2	81,0	13,7	43	4						942,5	0	0				
	15:50	637,1	616,5	712,4	733,0		↑				41,7	221,0	3,5	133,3	79,2	13,6	43	4						942,2	0	0				
	16:00	640,2	627,0	726,0	686,4		↑				39,9	223,8	2,6	132,5	78,5	13,6	42	4												

Figura 6.23. Captura de datos 20mar18 (fuente: autor)

6.3. Registro e interpretación de seguimiento en elevación y azimut

Análogamente se trazan los ángulos de elevación (ALFA) y azimut (BETA) en grados sexagesimales ($^{\circ}$) descritos por el actuador y el servomotor.

Figura 6.24. Ángulo de elevación del 21jun17 (fuente: autor)

Figura 6.25. Ángulo de elevación del 22sep17 (fuente: autor)

Figura 6.26. Ángulo de elevación del 21dic17 (fuente: autor)

Figura 6.27. Ángulo de elevación del 20mar18 (fuente: autor)

Figura 6.28. Ángulo de azimuth del 21jun17 (fuente: autor)

Figura 6.29. Ángulo de azimuth del 22sep17 (fuente: autor)

Figura 6.30. Ángulo de azimuth del 21dic17 (fuente: autor)

Figura 6.31. Ángulo de azimuth del 20mar18 (fuente: autor)

En lo referente al seguimiento en **elevación** (ángulo ALFA) se aprecia en todos los días reseñados, un trazado en forma de campana de Gauss. Especialmente “suaves” son los trazados de todas las fechas seleccionadas excepto las del 22sep17, donde se intuyen subidas o bajadas de la elevación más abruptas que las del resto de días. Una circunstancia similar, ya se anticipa, se presenta con respecto al ángulo de azimut (ángulo BETA) en comparación con sus homónimas curvas. Una posible explicación parcial que se puede aportar a este respecto, es precisamente una de las propuestas de mejora de esta Tesis: la correa plástica de transmisión del par de giro pierde propiedades elásticas, que impiden un fluido giro del azimut. Puede por tanto que se haya movido “a pequeños trompicones” en lugar de hacerlo de forma fluida.

Sin embargo, se presenta una situación análoga (aunque no tan pronunciada) en el caso del ángulo de **azimut** (ángulo BETA) que se consigue no mediante el mecanismo de tracción anterior, sino a través un actuador lineal que en nada tiene que ver con él (y por tanto, la explicación anterior no puede arrojar luz de forma completa al problema planteado). ¿Se podría pensar que el prototipo hubiese podido sufrir pequeños golpes que alterasen sus medidas?: no al menos debidas al viento, porque las gráficas que seguidamente se analizarán no son especialmente distintas entre los días analizados.

Para terminar, en las fechas de 21dic17 y 20mar18 se representa un fenómeno similar: un incremento **brusco** de la elevación desde cero hasta el valor alcanzado en cada caso una vez iniciada la mañana y recibidos los primeros rayos solares, que suponen obviamente un incremento brusco de la irradiancia recibida y por tanto, del ángulo azimutal girado ([Burleyson C.D. et al., 2018](#)).

6.4. Registro e interpretación de temperaturas de focos

A continuación, se dibujan las temperaturas de los focos paraboloïdal y cilindro-parabólicos en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$) para las fechas fijadas.

Figura 6.32. Temperaturas focos (Tp vs Tcp) del 21jun17 (fuente: autor)

Figura 6.33. Temperaturas focos (Tp vs Tcp) del 22sep17 (fuente: autor)

Figura 6.34. Temperaturas focos (Tp vs Tcp) del 21dic17 (fuente: autor)

Figura 6.35. Temperaturas focos (Tp vs Tcp) del 20mar18 (fuente: autor)

La interpretación de temperaturas de los focos paraboloidal y cilindro-parabólico, sí reviste de un interés especial en esta Tesis y es por ello que merecen atención especial. De una parte, se aprecia sin atisbo de duda que en todos los casos analizados, la temperatura del foco paraboloidal es siempre **mayor** que la del colector cilindro-parabólico. A esta conclusión es fácil de llegar toda vez que las relaciones de concentración de los colectores del primer tipo son siempre superiores a los del segundo. No en vano, a esta misma conclusión se llegó tras el análisis óptico de ambos dispositivos realizados en el capítulo 4.

De otra parte, se percibe una progresión muy **pareja** en cuanto a la evolución térmica de ambos focos, que solo pierden su pseudo-parallelismo cuando llegan al último tramo de cada día (cuando la irradiancia solar y por ende la temperatura, se desploman). En concreto, el rango de funcionamiento del foco del paraboloide oscila entre **140°C** y **160°C** mientras que el foco de la cilindro-parábola trabaja entre **80°C** y **100°C**, ambos rangos de temperaturas capturadas entre 21dic17 y 21jun17, respectivamente. El lector estará de acuerdo en que son temperaturas nada desdeñables: estamos hablando de trabajo con equipos de investigación, no de índole industrial ([Staffell y Pfenninger, 2018](#)).

6.5. Registro e interpretación de irradiancias en seguimiento oeste – este

En este primer epígrafe se trazan las irradiancias (en W/m^2) capturadas por los sensores SO y SE, para cada día ([Hinkelman L.M. y Schaeffer N., 2017](#)).

Figura 6.36. Irradiancias sensores (SO vs SE) del 21jun17 (fuente: autor)

Figura 6.37. Irradiancias sensores (SO vs SE) del 22sep17 (fuente: autor)

Figura 6.38. Irradiancias sensores (SO vs SE) del 21dic17 (fuente: autor)

Figura 6.39. Irradiancias sensores (SO vs SE) del 20mar18 (fuente: autor)

La primera de las conclusiones que se extrae de estos gráficos es que en todos los días analizados, la irradiancia capturada por el sensor este (SE, color rojo) es **mayor** que la del sensor oeste (SO, color amarillo). La razón de ello es obvia por otra parte: el Sol sale por el este y se pone por el oeste, con lo cual el seguidor se verá obligado a moverse justamente siguiendo esa misma trayectoria para buscar la máxima perpendicularidad de la incidencia de los rayos solares. A resultas de esta aseveración, se puede adelantar que el ángulo de azimut (BETA) va en constante aumento, como constatarán las gráficas del mismo [\(Tsoka S. et al, 2018\)](#).

Ambos niveles de irradiancia transcurren **pseudo-paralelos** (describiendo el mismo trazado, ya sea en sentido ascendente pero especialmente en el sentido descendente) independientemente del día analizado. Ciertamente es que hay pequeños valores atípicos (fruto quizá de una mala medición de los sensores, la recepción de un reflejo de luz o de sombra sobre los mismos -21jun17 a las 14:10h, por ejemplo, posible interacción con la señal recibida al interactuar con el prototipo para verificar su funcionamiento o cualquier otra circunstancia aleatoria).

Los días 21jun17, 22sep18 y 20mar18 se aprecia que en el momento de inicio de la maniobra de captura de datos, ya hay irradiancia **apreciable** (ya ha amanecido en definitiva). No ocurre así para la fecha del 21dic17, donde dicha irradiancia es nula (es de noche aún a las 7:30h). Por el contrario, en el momento de terminar la captura de datos (19:30h) en todos los gráficos se aprecia una progresiva atenuación de la irradiancia hasta llegar a ser nula (o al menos, no capturable por los sensores). Esto motiva que los gráficos no sean pseudo-simétricos salvo quizá precisamente en la fecha del 21dic17.

Para terminar, se puede afirmar que la “**anchura**” de estas gráficas es proporcional al número de horas de Sol, como era de esperar, siendo progresivamente mayor conforme nos acercamos al solsticio de verano y menor cuanto más nos alejamos de él y vamos decayendo hacia el solsticio de invierno [\(Soares E. et al., 2018\)](#).

6.6. Registro e interpretación de irradiancias en seguimiento norte – sur

Análogamente se trazan las irradiancias (en W/m^2) capturadas por los sensores SN y SS, también para cada uno de los cuatro días seleccionados.

Figura 6.40. Irradiancias sensores (SN vs SS) del 21jun17 (fuente: autor)

Figura 6.41. Irradiancias sensores (SN vs SS) del 22sep17 (fuente: autor)

Figura 6.42. Irradiancias sensores (SN vs SS) del 21dic17 (fuente: autor)

Figura 6.43. Irradiancias sensores (SN vs SS) del 20mar18 (fuente: autor)

Muchos de los resultados obtenidos en las gráficas de los sensores este y oeste, son aplicables también para los sensores norte y sur: ambos niveles de irradiancia transcurren **pseudo-paralelos** con independencia del día analizado (especialmente de nuevo en el sentido descendente, donde llegan incluso a confundirse ambas gráficas). Vuelven a aparecer pequeños valores atípicos como el del 21dic17 curiosamente a las 14:10h de nuevo, no imputable *a priori* a ninguna causa meteorológica. De otra parte, los días 21jun17, 22sep18 y 20mar18 vuelve a apreciarse que en el momento de puesta en marcha del prototipo, ya hay irradiancia **apreciable** (ya ha amanecido en definitiva). No ocurre así para la fecha del 21dic17, donde dicha irradiancia es obviamente nula.

Por el contrario, en el momento de terminar la captura de datos (19:30h) en todos los gráficos se aprecia una progresiva atenuación de la irradiancia hasta llegar a ser despreciable (o al menos, los sensores no son tan sensibles como para capturarla). Esto motiva que los gráficos no sean pseudo-simétricos como debería intuirse salvo quizá precisamente en la fecha del 21dic17.

De nuevo se asevera que la “**anchura**” de estas gráficas es proporcional al número de horas de Sol, siendo paulatinamente mayor según nos acercamos al solsticio de verano y progresivamente menor cuanto más nos alejamos de él. Pero de otra parte, si bien es cierto que la irradiancia capturada por el sensor este (SE) era **mayor** siempre que la del sensor oeste (SO), no ocurre lo mismo para con los valores identificados por el sensor norte (SN, color rojo) frente al sensor sur (SS, color amarillo). La razón de ello vuelve a ser obvia en este caso pero por otro motivo: el Sol va ganando progresivamente elevación en su movimiento, hasta que llega a un máximo a partir del cual empieza a descender.

Estando obligado una vez más el seguidor a buscar la máxima perpendicularidad de la incidencia de los rayos solares, se intuye que hay tramos del día donde la irradiancia del SN es mayor que la del SS (la gráfica del primero está por encima de la gráfica del segundo) hasta que hay un punto de inflexión en el cual no solo se igualan, sino que la irradiancia del SS supera a la del SN. A resultas de esta aseveración, se puede adelantar que el ángulo de elevación (ALFA) va en constante aumento hasta que inicia progresivamente su descenso.

Y al objeto de obtener la mejor interpretación posible de los datos obtenidos empíricamente en el prototipo, seguidamente se va a proceder a **comparar** estos datos meteorológicos (y los subsiguientes), con datos estadísticos reales obtenidos de distintas fuentes fidedignas. En las ocho tomas de datos tenidas en cuenta (irradiancias SN, SS, SE y SO) se aprecia una gráfica “acampanada” muy similar a la propia de datos estadísticos meteorológicos. Ello hace pensar que la metodología e instrumentación seguida, es válida para inferir conclusiones de futuro en el prototipo termosolar

Figura 6.44. Irradiancia estadística del 21jun17 (fuente: PVGIS)

Figura 6.45. Irradiancia estadística del 22sep17 (fuente: PVGIS)

Figura 6.46. Irradiancia estadística del 21dic17 (fuente: PVGIS)

Figura 6.47. Irradiancia estadística del 20mar18 (fuente: PVGIS)

6.7. Registro e interpretación de velocidades de viento

Seguidamente se representan las velocidades de viento (m/s) capturadas por el anemómetro del prototipo, nuevamente en los días indicados.

Figura 6.48. Velocidad viento del 21jun17 (fuente: autor)

Figura 6.49. Velocidad viento del 22sep17 (fuente: autor)

Figura 6.50. Velocidad viento del 21dic17 (fuente: autor)

Figura 6.51. Velocidad viento del 20mar18 (fuente: autor).

De las lecturas de los registros de las velocidades de viento, se pueden obtener pocas conclusiones en nuestro modesto parecer, pero éstas sí son concluyentes: las medidas parecen arrojar vientos “**racheados**” o al menos con cambios bruscos en su magnitud y con oscilaciones (incrementos o decrementos aleatorios) conforme avanzan cada uno de los días objeto de análisis. No parece haber de manera clara una mayor **velocidad** de vientos en tramos de mañana frente a tramos de tarde: si bien el 21jun17 parece que decrece, el 22sep17 parece que sucede todo lo contrario y aumenta conforme el día avanza. Y en paralelo, el 21dic17 es relativamente constante ([Hosseini M. et al., 2017](#)).

Sea como fuere, en todos los casos analizados, dicha velocidad de viento oscila entre valores comprendidos entre 0 y 6 m/s (21,6 km/h), cifras muy **contenidas** incluso para encontrarnos a una altura de unos 10 m sobre el nivel del suelo en el taller de energías renovables del centro de formación Salesianos Carabanchel. Especialmente bajas parecen ser las velocidades de viento el 21dic17 en contraposición al 20mar18 que es el día de mayores velocidades elevadas.

Si se realiza una **comparativa** visual con los gráficos anexos construidos con datos de viento de AEMET (fuente suficientemente fiable) para la estación meteorológica más cercana (Cuatro Vientos) extrayendo a su vez el intervalo de tiempo comprendido entre 7:30h-19:30h, se puede inferir lo siguiente: sin ser iguales (obviamente) las gráficas, sí parece existir una clara similitud al menos en cuanto a “zigzagueo” de valores del cual se hablaba anteriormente. Todos ellos además, se circunscriben en orden de magnitud a velocidades semejantes, con lo cual se puede concluir *a priori* que el prototipo cumple bien también su cometido en este terreno.

Figura 6.52. Velocidad estadística viento del 21jun17 (fuente: AEMET)

Figura 6.53. Velocidad estadística viento del 22sep17 (fuente: AEMET)

Figura 6.54. Velocidad estadística viento del 21dic17 (fuente: AEMET)

Figura 6.55. Velocidad estadística viento del 20mar18 (fuente: AEMET)

6.8. Registro e interpretación de temperaturas ambiente

La temperatura ambiente para los solsticios y equinoccios, también en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$), son los representados.

Figura 6.56. Temperatura ambiente del 21jun17 (fuente: autor)

Figura 6.57. Temperatura ambiente del 22sep17 (fuente: autor)

Figura 6.58. Temperatura ambiente del 21dic17 (fuente: autor)

Figura 6.59. Temperatura ambiente del 20mar18 (fuente: autor)

Dentro de las del dispositivo mecatrónico objeto de estudio, una de ellas es la de captura de temperaturas ambiente. No siendo un dato inequívocamente vinculado a la energía solar de concentración, no menos cierto es que posee un indudable valor meteorológico, razón por la cual se incorporó un sensor para ello. En concreto, analizando las temperaturas ambiente para los cuatro días objeto de muestreo, se aprecia en todos ellos la misma **tendencia** (esperable, por otra parte): progresivo incremento de dicha temperatura conforme aumenta el día, para posteriormente experimentar un decremento según se pone el Sol ([Anaya K.L. y Pollitt M.G., 2017](#)).

Ahora bien, el **incremento** de temperatura (ΔT) para cada uno de los días señalados, parece muy similar en todos los casos: oscilando entre 7-10°C aproximadamente, lo cual no deja de ser un dato “extraño” frente a lo que cabría esperarse (mayor incremento en verano que en invierno, por ejemplo).

Volviendo una vez más a **cotejar** los datos capturados por el prototipo frente a datos meteorológicos contrastados, las mediciones del prototipo parecen más “suaves” (al menos visualmente) que las propias de dichos datos estadísticos. Ciertamente es preciso extraer de dichos datos el intervalo coincidente con las horas de trabajo del prototipo (se recuerda, de 7:30-19:30h). Y que además es necesario escalar el factor de forma de ambos gráficos para que su aspecto sea coincidente. Además, se sigue manteniendo el $\Delta T_{\text{máx}} \approx 10^\circ\text{C}$. Luego haciendo una reflexión sobre ambas circunstancias se vuelve a dar validez a los resultados obtenidos con el prototipo mecatrónico.

Figura 6.60. Temperatura ambiente estadística del 21jun17 (fuente: AEMET)

Figura 6.61. Temperatura ambiente estadística del 22sep17 (fuente: AEMET)

Figura 6.62. Temperatura ambiente estadística del 21dic17 (fuente: AEMET)

Figura 6.63. Temperatura ambiente estadística del 20mar18 (fuente: AEMET)

6.9. Registro e interpretación de humedades relativas

La humedad relativa de las fechas indicadas, en tanto por ciento (%), son las indicadas en los gráficos adjuntos.

Figura 6.64. Humedad relativa del 21jun17 (fuente: autor)

Figura 6.65. Humedad relativa del 22sep17 (fuente: autor)

Figura 6.66. Humedad relativa del 21dic17 (fuente: autor)

Figura 6.67. Humedad relativa del 20mar18 (fuente: autor)

La humedad relativa del aire es uno de los conceptos habitualmente más olvidados en el sector Climatización, razón por la cual cualquier esfuerzo que se realice desde la perspectiva de la Psicrometría para adecuar las condiciones higrométricas de las estancias, será siempre bienvenido. Por este motivo nuestro prototipo incorpora la posibilidad de capturar humedades relativas del ambiente, cuyos resultados para los días indicados, son los que se acaban de mostrar.

En todos ellos parece adivinarse una tendencia **decreciente** de dicha humedad relativa, fruto seguramente del hecho de que el rocío de la mañana acaba evaporándose en un porcentaje importante, minorando así la presencia de humedad en el aire. Un caso atípico es el del 21dic17 donde parece haber un repunte conforme la tarde va evolucionando. Los días más secos (21jun17 y 20mar18) presentan oscilaciones en torno al 40-60%; mientras que los más húmedos (22sep17 y 21dic17) oscilan entre 40-80%. En cualquiera de los casos, parecen valores propios de climas continentales como el que experimentamos en Madrid ([Hosseini et al., 2018](#)).

Realizando una vez más el necesario ejercicio de **comparación** entre datos obtenidos por el prototipo y datos meteorológicos estadísticos y siendo la humedad relativa un parámetro más homogéneo (al menos más que la velocidad de viento, por ejemplo) y volviendo a realizar la adecuación de tamaños y escalas de los gráficos, en este caso se aprecia una mayor similitud. Las tendencias son prácticamente iguales a escala de las 12h de análisis del prototipo, sinónimo de buena adquisición de datos por parte del sensor destinado a ello. Queda validado por tanto en cuanto a su validez funcional.

Figura 6.68. Humedad relativa estadística del 21jun17 (fuente: AEMET)

Figura 6.69. Humedad relativa estadística del 22sep17 (fuente: AEMET)

Figura 6.70. Humedad relativa estadística del 21dic17 (fuente: AEMET)

Figura 6.71. Humedad relativa estadística del 20mar18 (fuente: AEMET)

6.10. Registro e interpretación de calidades de aire

La calidad del aire, conforme la catalogación (1-4) inversamente proporcional a la contaminación del aire en partes por millón (ppm) son las siguientes:

Figura 6.72. Calidad del aire 21jun17 (fuente: autor)

Figura 6.73. Calidad del aire 22sep17 (fuente: autor)

Figura 6.74. Calidad del aire 21dic17 (fuente: autor)

Figura 6.75. Calidad del aire 20mar18 (fuente: autor)

La calidad del aire en grandes ciudades es uno de los temas que cobra cada vez mayor relevancia. La creciente conciencia medioambiental de la población, la proliferación de enfermedades respiratorias e incluso las muertes prematuras de ciudadanos por causas de difícil identificación (30.000 personas/año) pero imputables a la mala calidad del aire, justifican con creces la inclusión de sensores capacitados para identificar dicha calidad ([Van Wart J. et al., 2015](#)). Los valores mostrados indican una adecuada calidad general del aire (buena, nivel 4) que solo se ve minorada (aceptable, nivel 3), en determinadas franjas horarias cuya pauta parece repetirse. Y dicha pauta no es otra que las horas de **entrada y salida de alumnos** al centro, especialmente de la sección Enseñanza Secundaria Obligatoria-Bachiller-Formación Profesional (8:00h) y Primaria (9:00h) o (14:15h para el primer bloque de los antedichos alumnos y 16:30h para el segundo). Especialmente importante para el caso de los alumnos que en función de su temprana edad, son traídos por sus progenitores en transporte privado con motores de combustión interna alternativos (ver imágenes siguientes). Se puede deducir que esas bajadas de la calidad del aire se pueden deber a los tubos de escape de los motores de combustión de dichos automóviles.

Figura 6.76. Hora punta de entrada de automóviles en Salesianos Carabanchel (fuente: autor)

El carácter muy local de esta contaminación, así como la diferente representación de los gráficos obtenidos (miden calidades) frente a los meteorológicos (miden emisiones) no permite compararlos directamente. En todo caso, se podría pensar que los primeros son complementarios de los segundos: a mayor emisión de gases contaminantes, menor calidad.

Figura 6.77. Calidad aire estadística del 21jun17 (fuente: Munimadrid)

Figura 6.78. Calidad aire estadística del 22sep17 (fuente: Munimadrid)

Figura 6.79. Calidad aire estadística del 21dic17 (fuente: Munimadrid)

Figura 6.80. Calidad aire estadística del 20mar18 (fuente: Munimadrid)

6.11. Registro e interpretación de presiones barométricas

La presión barométrica Pa (en hPa) registrada durante los días ya conocidos, queda reflejada en las gráficas mostradas a continuación:

Figura 6.81. Presión barométrica 21jun17 (fuente: autor)

Figura 6.82. Presión barométrica 22sep17 (fuente: autor)

Figura 6.83. Presión barométrica 21dic17 (fuente: autor)

Figura 6.84. Presión barométrica 20mar18 (fuente: autor)

De la observación de los últimos gráficos objeto de estudio, no parece deducirse *a priori* ninguna consecuencia que implique una **cadencia** concreta: las presiones oscilan de un día a otro de forma aleatoria, en sentido ascendente-descendente, descendente-ascendente o cambiante en el mismo día. Se podría asemejar a la oscilación de la velocidad del viento pero quizá “suavizada” en cuanto a los picos de valores se refiere ([Tao S. et al., 2016](#)).

Sí que parece cierto, que los días 21dic17 y 20mar18 son días de **mayor** presión barométrica (alcanzando máximos cercanos a los 948 hPa) frente a las fechas de 21jun17 y 22sep17. Y sea como fuere, las diferencias de presión intradía tampoco son extremadamente altas, de escasamente 5 hPa el 20mar18.

Y una vez, construyendo la pertinente **comparativa** de resultados y teniendo en cuenta que el comportamiento de la presión atmosférica es más global que el de otras magnitudes meteorológicas, se obtienen resultados muy similares a los de la humedad relativa del aire. Esto es, las similitudes en las gráficas son patentes (recuérdese, una vez extraído el intervalo de datos objeto de análisis y recalculando escalas). Buen síntoma por tanto de la suficiente calidad del sensor seleccionado y del sistema de muestreo planteado.

Figura 6.85. Presión barométrica estadística del 21jun17 (fuente: AEMET)

Figura 6.86. Presión barométrica estadística del 22sep17 (fuente: AEMET)

Figura 6.87. Presión barométrica estadística del 21dic17 (fuente: AEMET)

Figura 6.88. Presión barométrica estadística del 20mar18 (fuente: AEMET)

6.12. Análisis termográfico de colectores

La termografía infrarroja es una técnica que permite identificar rangos de temperaturas a distancia (sin necesidad de contacto físico con el objeto a medir) basándose en la captación de la radiación **infrarroja** del espectro electromagnético que emite dicho cuerpo. En efecto, teniendo presente datos de las condiciones del entorno (emisividad del objeto, humedad relativa y temperatura del aire, temperatura reflejada, radiación incidente entre otros) es factible convertir la energía radiada detectada por la cámara termográfica en términos de temperaturas: cada pixel de la cámara corresponde con un valor de medición de la radiación y por ende, de temperatura. Dicha imagen es definible como radiométrica.

Entre las múltiples aplicaciones de la termografía infrarroja, se puede citar el mantenimiento predictivo de maquinaria industrial, observación del espacio, detección de patologías y pérdidas energéticas en edificios, identificación y salvamento de accidentados, identificación de gases, diagnosis de enfermedades en medicina, análisis meteorológicos, tareas de seguridad y de índole militar, etc. En lo que respecta al sector **edificación**, al analizar la envolvente en los edificios es factible conocer (o en su defecto estimar) muchos de los problemas de un edificio: pérdidas energéticas, ausencia de estanqueidad, existencia de condensaciones y humedades, dificultades en la adhesión de morteros y plaquetas, incidencia del soleamiento, ventilación insuficiente, inadecuada climatización de estancias, defectos en instalaciones eléctricas y/o térmicas...

En esta Tesis, se ha procedido a capturar imágenes termográficas de ambos colectores de concentración gracias a una cámara termográfica modelo **Fluke Ti90** y analizar resultados gracias al **software** de post-procesado **SmartView 4.3**. Las condiciones de parametrización para la inspección del prototipo son las siguientes: emisividades, las propias de los focos de colectores parabólico y cilindro-parabólico -latón mate (0,22) y vidrio (0,92), respectivamente-; temperatura de fondo 18°C; humedad relativa del aire 55% y distancia cámara-objeto de 1 m;

Figura 6.89. Interfaz de trabajo de SmartView 4.3 (fuente: Autor)

Figura 6.90. Comparativa imagen real vs termográfica de colector paraboloïdal (fuente: autor)

Figura 6.91. Representación 3D de termografía de colector paraboloïdal (fuente: autor)

Figura 6.92. Histograma térmico de colector paraboloïdal (fuente: autor)

Figura 6.93. Imagen real vs termográfica de colector cilindro-parabólico (fuente: autor)

Figura 6.94. Representación 3D de termografía de colector cilindro-parabólico (fuente: autor)

Figura 6.95. Histograma térmico de colector cilindro-parabólico (fuente: autor)

Tras la observación de los gráficos resultantes, es factible hacer una interpretación de resultados como sigue, función del colector objeto de estudio.

- Colector **paraboloidal**: las imágenes termográficas bidimensionales arrojan unos resultados que se podrían catalogar de inmejorables. El reflector aparece “frío” por no absorber prácticamente nada de la radiación solar incidente (entre 20,7°C y 26,1°C), que se ve proyectada en su inmensa mayoría en el concentrador (foco del paraboloide de revolución). Dicho foco llega a adquirir una temperatura, en el momento de realizar el análisis, de la nada desdeñable cifra de **205,3°C**. A su vez, la representación tridimensional de temperaturas confirma la atención impresión, obteniendo un pico térmico coincidente con el ya mentado foco del paraboloide. Por último y en relación al histograma térmico (que ciertamente presenta un aspecto poco vistoso), recordando que representa el número de píxeles que alcanzan determinadas temperaturas, nuevamente vuelve a ser coincidente con la reflexión trazada: el reflector permanece a temperaturas bajas existiendo una gran mayoría de barras de color azul exceptuando una pequeña barra de color rojo intenso alusiva al foco del paraboloide.
- Colector **cilindro-parabólico**: se vuelve a recurrir primeramente a las imágenes termográficas bidimensionales, que en este caso son algo desconcertantes cuando menos. Si bien es cierto que queda claramente remarcado térmicamente el foco de la cilindro-parábola (máxima temperatura de **90,4°C**), no menos cierto es que existe un foco caliente no identificado con claridad de mayor temperatura incluso que el anterior (93,4°C) así como determinadas partes en torno al reflector que *a priori* no deberían aparecer tan calientes en buena lid. La misma impresión se percibe con la visualización del campo tridimensional de temperaturas, confirmando la anterior inferencia. Inferencia que termina de verse confirmada estadísticamente con el histograma térmico: éste detecta una excesiva y variada gama de colores (vistosa pero ineficiente) resultado del abanico de temperaturas existente. En el epígrafe 14. Dificultades encontradas de este mismo capítulo, se analiza con más detalle la que se estima puede ser la respuesta a esta adversa circunstancia.

Sea como fuere, parece innegable la utilidad de la termografía infrarroja para identificar en este caso la validez y **utilidad** de los materiales y equipos usados, en este caso centrado en los colectores paraboloidal y cilindro-parabólico.

6.13. Difusión de resultados conseguidos y transferencia de conocimiento

- Consecución de los **objetivos principales** trazados en la Tesis en el capítulo 1. Introducción: diseñar, modelizar, simular, construir, calibrar y ensayar un prototipo de seguidora dos ejes termosolar (paraboloidal y cilindro-parabólico) a escala.
- Uso del prototipo como **herramienta docente** en el centro formativo Salesianos Carabanchel donde el autor imparte clases como profesor y tutor del Ciclo formativo de grado superior de Eficiencia energética y energía solar térmica. Entre otros objetivos, ha servido para explicar empíricamente los fundamentos de la energía solar de concentración, programar maniobras de regulación y control en seguimiento, así como experimentar con sensores y actuadores electrónicos. Es más, alguno de los alumnos decidió construir su proyecto fin de ciclo partiendo del prototipo de la Tesis, como fue el ensamblaje de un motor Stirling a un colector paraboloidal de mayor envergadura, que sirvió a su vez como lanzadera para la confección de un posterior **artículo de investigación** (“Electrical energy generation in building by means of Stirling dish technology”) presentados por la Escuela Técnica Superior de Edificación a revistas científicas.

Figura 6.96. Alumnos de Salesianos Carabanchel con el prototipo (fuente: autor)

Figura 6.97. Adición de motor Stirling a prototipo termosolar (fuente: autor)

- Siguiendo la anterior línea de pensamiento, también merece la pena comentar que parte de los conocimientos adquiridos sobre mecanismos y programación, se han transmitido a su vez hacia las clases de extraescolares sobre **Robótica educativa** que el autor también imparte en grupos de alumnos de Primaria en Salesianos Carabanchel. Conocimiento que se ha retroalimentado a su vez, pues no en vano algunas de las soluciones encontradas a los problemas planteados en el epígrafe 6.14 Dificultades encontradas, de este mismo capítulo, provienen de esta actividad educativa.

Figura 6.98. Alumnos de Robótica educativa en Salesianos Carabanchel (fuente: autor)

- Adquisición personal de **competencias**, destrezas y habilidades inéditas hasta el momento en el autor y vinculadas inequívocamente a la investigación empírica: bricolaje manual, manejo de herramientas, soldadura de circuitos electrónicos, programación visual...
- Se ha potenciado al máximo el uso de programas informáticos gratuitos y legales (*software* libre o **freeware** en la terminología inglesa): si bien no son la panacea o respuesta a todas las necesidades de herramientas informáticas de cualquier investigador, sí complementan de forma muy equilibrada las inversiones económicas en este sentido. En añadidura, esa filosofía de trabajo ha sido exportada a los ya mentados alumnos a los cuales el autor imparte docencia, con el objetivo de concienciarles en el rigor de respetar la legalidad y los derechos de autor de empresas y programadores.
- Se ha logrado una fructífera **colaboración** entre dos universidades (Universidad Carlos III de Madrid y Universidad Politécnica de Madrid) en las personas de D. Julián García de León y el autor del presente escrito. Tal y como se anticipaba en el capítulo 1-INTRODUCCIÓN, epígrafe 1.1. Dedicatoria y agradecimientos, D. Julián confeccionó su Proyecto Fin de Grado centrado en la simulación estática por métodos numéricos del prototipo frente a solicitaciones físicas reales a las cuales este podrá verse sometido. Su aportación ha enriquecido indudablemente el valor que pueda aportar esta Tesis Doctoral.

6.14. Dificultades encontradas

- Pérdida de las propiedades **elásticas** de las correas de goma plástica, que impide una correcta y precisa tracción entre los engranajes y discos que realizan el seguimiento en azimut. Ello imposibilitaría la robustez necesaria como para que el prototipo pudiera realizar las tareas de medición de forma autónoma. Se sugiere por tanto cambiar de material plástico por otro más duradero o incluso de tipo de correa de transmisión y de polea (para que sea compatible con ella). Una posible opción, encontrada precisamente en las clases de Robótica educativa, sería una correa con pequeños cangilones o muescas para facilitar la tracción (se muestra a continuación):

Figura 6.99. Correa de tracción alternativa (fuente: Edison)

- Inexacto diseño o conformado del colector **cilindro-parabólico** por parte del fabricante del equipo: su sección transversal, en lugar de describir una parábola, describe un arco de circunferencia (muy aproximada, cierto es, pero que provoca desviaciones sensibles como se ha visto en el análisis termográfico). Ello se traduce en una dispersión de los rayos solares sobre el foco de la parábola, que impide una concentración de irradiancia todo lo rigurosa que sería deseable.

Figura 6.100. Identificación de sección real de cilindro-parábola (fuente: autor)

- Elevada interacción electrónica en el **conexiónado** de sensores y actuadores que han provocado no pocos efectos inesperados en el funcionamiento del prototipo.

- Lo anterior unido a las dificultades intrínsecas al proceso de **programación** en cuanto a algoritmos a seguir, formas de implementarlos, colisiones entre maniobras, identificación de errores, depurado del código e interacciones entre protocolos de comunicaciones.
- Toda vez que el prototipo no posee los sensores encapsulados y prestos para soportar condiciones meteorológicas reales (caída de lluvia, granizo, inserción de viento...) se tuvieron especiales **precauciones** durante los cuatro días de tomas de datos reales. Afortunadamente ninguno de los cuatro días se presentó fenómeno meteorológicos suficientemente adversos como para comprometer la integridad de la electrónica del prototipo.
- Acelerado e inesperado **desgaste** de los engranajes de material plástico, que justificó su cambio por los mismos pero de material latón, material levemente más caro, pero de mayor durabilidad y previsión mecánica.

- Cierta fragilidad en el alineamiento del eje del **anemómetro**, que ha provocado no pocos problemas de mediciones de velocidad de viento. En efecto, los movimientos obvios de manipulación del prototipo han provocado que el eje de rotación del anemómetro de cazoletas haya perdido la condición de coaxialidad con el cojinete de rodamiento interno, generando un inesperado y elevado rozamiento suficiente como para parar el movimiento de giro incluso con existencia de viento.

6.15. Propuestas de mejora y futuras líneas de investigación

- Al objeto de acotar una de las dificultades transmitidas en el epígrafe anterior, sería ciertamente interesante proceder al **encapsulado** de sensores, motores, actuadores y autómatas de control; así como empleo de tornillería de acero inoxidable, al objeto de garantizar su uso a la intemperie. Ello evitaría la entrada de agua y/o polvo en el interior de los componentes electrónicos y garantizaría una elevada durabilidad, de forma que el prototipo podría ser posicionado en cualquier ubicación real de forma indefinida.
- Cambio total del **autómata** programable: pasar del controlador educativo *Arduino Mega 2560 ADK*, por un autómatas industrial (incluso basado en la propia gama *Arduino*) como los propios de la familia *Controllino*, *Industruino* y/o *Industrial Shields*. Todos ellos aúnan las ventajas del entorno de programación *Arduino*, con mejoras en su robustez, adecuación a entornos industriales, montaje en carril *din* e integración de protecciones eléctricas.

Figura 6.101. Arduino MEGA industrial Controllino (fuente: autor)

- Incorporación de termografía **infrarroja** como cámara alternativa a la cámara de visión real. Ello permitiría capturar imágenes termográficas al prototipo, pudiendo así ampliar su nivel de utilidad. El mercado ofrece distintas opciones y a distintos precios: desde lentes de germanio encapsuladas y conectables vía USB a un teléfono móvil, a pequeñas cámaras portátiles ideales para ser integrada con el prototipo.

Figura 6.102. Soluciones termográficas portátiles (fuente: Seekthermal, Flir y Thermapp)

- Aprovechamiento de la tecnología de **impresión 3D** y corte por láser, para diseñar a medida determinadas piezas o componentes (el ya mentado encapsulado de sensores, sin ir más lejos). Con ello se lograría un prototipado más fidedigno y seguramente económico.
- **Simulación** de las maniobras de programación confeccionadas con *Visualino* o *IDE Arduino* antes de volcarlas sobre los dispositivos reales. Ello evitaría muchos de los problemas encontrados

Figura 6.103. Simulación de maniobras de programación (fuente: autor)

- Integración entre obtención de datos reales, con **simulación** virtual mediante aplicaciones informáticas cuyo motor de cálculo sean funciones de transferencia construidas en base a transformadas de Laplace: *OpenModelica* o *Wolfram Systemmodeler*, por ejemplo.

Figura 6.104. Modelización de seguidor mediante funciones de transferencia (fuente: autor)

- Visualización cinemática de **trayectorias** dibujadas por el seguidor, para anticipar posibles colisiones o errores y ejemplificar el montaje en perspectiva explosionada dinámica. En las versiones actuales de *FreeCAD* se precisarían conocimientos avanzados del lenguaje de programación *Python* para implementar dichas mejoras.

- Confección de un sistema **SCADA** para monitorizar e interactuar de forma remota con el autómata de control, realizable con herramientas informáticas tales como *MyOpenlab*, *Labview*, *Wolfram Data Drop* o por ejemplo.

Figura 6.105. Soluciones SCADA de gestión remota (fuente: MyOpenlab y Labview)

- Realización de mejoras electrónicas en la concepción del prototipo: *leds* de iluminación indicativas de las maniobras de movimiento en azimuth-elevación; fines de carrera para garantizar el poner fin al movimiento precisamente de las antedichas maniobras e inclusión de una pantalla **TFT** para visualizar datos en tiempo real, como la mostrada de *Seedstudio* ya adquirida para proseguir la mejora del prototipo.

Figura 6.106. Pantalla TFT de visualización de datos (fuente: autor)

- Rediseño parcial del prototipo para permitir la **autopropulsión** del mismo por superficies planas, lo que permitiría cambiar de posición sobre cubiertas, evitando proyección de posibles sombras.
- Cálculo, diseño, simulación y ensamblaje de dispositivos que repliquen los ciclos termodinámicos Rankine y Stirling, para así conseguir una pequeña máquina productora de energía eléctrica **a escala**. Ello permitiría, mediante un riguroso análisis conforme el teorema de PI o *Buchingham*, inferir resultados a mayor escala que podrían ser aplicados al sector edificación.
- Aprovechamiento de potentes teorías **matemáticas** que mejorasen las prestaciones del prototipo: lógica difusa o *fuzzy* para anticipar resultados meteorológicos; teoría de fractales y visión artificial para modelizar el comportamiento de las nubes.

Figura 6.107. Programa gratuito de control difuso (fuente: Xfuzzy)

- Incorporación de una **veleta** para registrar las orientaciones de viento preferentes y construir un perfil de viento detallado. Ello permitiría analizar el “efecto vela” y dimensionar sustentaciones más seguras para el anclaje de colectores paraboloïdales y/o cilindro-parabólicos.
- Incorporación de un panel **fotovoltaico** integrado con una **batería** que permitiera alimentar el prototipo. Ello le otorgaría gran independencia respecto fuentes de suministro eléctrico “convencionales” (baterías o enchufes cercanos) dando más flexibilidad a su operativa. Seguidamente se adjunta imagen del dispositivo ya comprado en *Lidl* para este fin.

Figura 6.108. Panel fotovoltaico con batería integrada (fuente: autor)

- Puede ser interesante recurrir a la **realidad aumentada (RA)** como tecnología que ayude a comprender mejor el seguimiento solar. En concreto, se han probado sobre un teléfono móvil (Android en este caso) AR Compass y Sun Locator Lite. Dicho móvil se ha posicionado justo en la ubicación de la cámara del seguidor, y se han obtenido las imágenes que se muestran seguidamente, con el trazado de la trayectoria prevista por el Sol superpuesta a su ubicación real y orientación seguida respecto la línea N-S. En este análisis en concreto, se muestra la imagen obtenida con fecha 22sep17 donde existe una mínima diferencia entre la posición real del Sol y la estimada por la aplicación (debida quizá a que es preciso recalibrar los sensores internos del móvil).

Figura 6.109. Brújula en RA desde perspectiva del seguidor (fuente: autor)

Figura 6.110. Trayectoria en RA desde perspectiva del seguidor (fuente: autor)

- Diseñar el pequeño tren de engranajes mediante algún programa informático que otorgue flexibilidad, facilidad y potencia de cálculo, para de esta forma realizar cualquier nueva configuración de manera sencilla. Se propone recurrir para tal fin a **Relatran 3.5** como aplicación legal y gratuita.

Figura 6.111. Cálculo de engranajes con Relatran 3.5 (fuente: Relatran)

- Analizar las posibilidades de mejora de la **integración arquitectónica** de la energía de concentración aplicada a la edificación. Hasta la fecha, salvo excepciones puntuales, la energía termosolar no ha tenido gran difusión en el sector edificación (razón que en parte despertó el interés del autor por esta innovadora línea de trabajo). Los factores de forma de los colectores parabólicos y cilindro-parabólicos no ayudan a integrarse de forma natural en la envolvente del edificio, pero existen ideas en el mercado de sectores afines que se podrían aplicar. Es el caso del seguidor fotovoltaico de paneles con tecnología retráctil *Smartflower*.

Figura 6.112. Seguidor fotovoltaico retráctil (fuente: Smartflower)

Figura 6.113. Fases del despliegue de paneles fotovoltaicos (fuente: Smartflower)

Figura 6.114. Posibles fases del despliegue de colector paraboloïdal (fuente: Wolfram)

- Estudiar en detalle algunas de las ideas pioneras seguidas por determinados centros de investigación (*Agenzia nazionale per le nuove tecnologie*, ENEA) que ha desarrollado uno de los primeros colectores con disco **Stirling** aplicados a la edificación en Casaccia, Roma: posee una potencia de hasta 15 kW, el concentrador alcanza 900°C, tiene un diámetro de paraboloide de 12 m y una microturbina de aire adaptada de motores de automóvil con turbo-compresor que puede girar a una velocidad de hasta 150.000 rpm.
- Programar el autómat *Arduino Mega ADK* aprovechando su compatibilidad con el sistema operativo **Android** con el objetivo de monitorizar y controlar su funcionamiento a partir de móviles y tabletas compatibles.
- Mejorar el conocimiento de la aplicación **SolTrace** al objeto de modelizar de forma más fidedigna los colectores paraboloïdal y cilindro-parabólico, evitando así posibles dispersiones de resultados.
- Realizar una programación más **elegante** definiendo funciones independientes del orden de eventos en el código de programación, a las cuales posteriormente se les pueda hacer llamada dentro de la consecución de eventos cronológicos del programa.
- Someter al prototipo a proyección de **agua y/o polvo** (siempre que no se rayen las superficies especulares) para ver condiciones reales de trabajo de estos dispositivos a escala y realizar así un análisis de sensibilidad de los resultados obtenidos (temperaturas de focos, por ejemplo).

6.16. Indicadores de calidad de la Tesis

Amén de la tarea de estudio previo y escritura de esta Tesis doctoral, el autor ha podido desarrollar una nutrida actividad que se podría cifrar como divulgativa, docente e investigadora, que se plasma en las siguientes publicaciones:

- Director Pedagógico de Ciclos formativos (2009-2015) en Salesianos Carabanchel. Actualmente profesor y tutor del Ciclo formativo de grado superior “Eficiencia energética y energía solar térmica”, del mismo centro.
- Profesor y tutor (2008 - actualidad) en Acedis Formación, centro de enseñanza online sobre materias vinculadas a energías renovables (https://www.acedis.com/Energias-Renovables-1_3_12.html).
- Díaz J.P.; Morón, C.; Ferrández D.; Saiz P.; Vega G.; (2017). “Mechatronic Prototype of Parabolic Solar Tracker”. *Sensors*, 16(6), 882; doi:10.3390/s16060882.
- Morón, C.; Ferrández D.; Saiz P.; Vega G.; Díaz J.P. (2017). “New Prototype of Photovoltaic Solar Tracker Based on Arduino”. *Energies*, 10(9), 1298; doi:10.3390/en10091298.
- Autor del libro “Sistemas de energías renovables”, Editorial Paraninfo, 2015, Madrid, ISBN 978-84-9732-467-0.
- Díaz, J.P.; Ferrández, D.; Morón C. (2018). “Modelizado, programación y simulación virtual de dispositivos mecatrónicos”, CITE 2018, Madrid, España. ISBN: 978-84-16397-71-6.
- Díaz, J.P.; Ferrández, D.; Morón C. (2017). “Frío solar como alternativa a climatización con refrigerantes: análisis de aplicabilidad a caso real mediante simulación por ordenador”, CITE 2017, Madrid, España. ISBN: 978-84-16397-56-3.
- Díaz, J.P.; Ferrández, D.; Morón C. (2017); Abu Y; Pardo A. “Estudio comparativo entre el colector de tubo de vacío y el colector de placa plana en energía solar térmica”, CITE 2016, Madrid, España. ISBN: 978-84-16397-28-0.
- Morón C.; Díaz, J.P.; Ferrández, D.; Morón C. (2017); Saiz P. “Electrical energy generation in building by means of Stirling dish technology”, *Anales de Edificación*. Vol. 3, N°2, 9-16 (2017). ISSN: 2444-1309. Doi: 10.20868/ade.2017.3567.
- Morón C.; Díaz, J.P.; Ferrández, D.; Morón C. (2017); Saiz P. “Protocol for technical evaluation of a Solar Thermal Installation”, *Anales de Edificación*. Vol. 2, N°2, 21-27 (2016). ISSN: 2444-1309. Doi: 10.20868/ade.2016.3307.

-
- Díaz, J.P.; Ferrández, D.; Morón C. (2018); Vega G. “Learning based on projects: construction of a photovoltaic drone in training cycles”, CINIE 2018, Madrid, España. ISBN: 978-84-16397-70-9.
 - Díaz, J.P.; Ferrández, D.; Morón C. (2018); Vega G. “El software libre en la enseñanza: aplicación en los ciclos formativos de grado superior”, CINIE 2017, Madrid, España. ISBN: 978-84-16397-55-6.
 - Díaz, J.P.; Abu Y. “Enseñanza de energías renovables en Ciclos formativos (FP)”, II Jornadas desarrollo sostenible, 2016, Aranjuez (Madrid), España.
 - Díaz, J.P.; Ferrández, D.; Gandía, J. “La enseñanza de energías renovables en España” Congreso Iberoamericano de Educación CIMCA 2016, Madrid, Universidad Rey Juan Carlos, julio 2016.
 - Ferrández, D.; Díaz, J.P.; Morón C.; Ramos M^a Paz. “Learning and knowledge technologies in professional training”. INTED 2016.
 - Ramos M^a Paz. Ferrández, D.; Saiz P.; Díaz, J.P.; Morón C.; “Mindfulness in vocational education training”. Edulearn 2016.
 - Publicación de artículos técnicos en revistas especializadas: “Control inteligente de instalaciones de energía solar térmica”, revista Instalaciones y Técnicas del Confort, octubre 2006. “Nuevas líneas de I+D+i en instalaciones de energía solar térmica”, revista Energética XXI, marzo 2007.
 - Ponente en jornada “Actividades de I+D en energía solar térmica” organizadas por la Universidad de Castilla-La Mancha, 2006.

6.17. Herramientas y recursos informáticos empleados

El motivo por el cual se hace un desglose pormenorizado de las herramientas informáticas que se han empleado para la redacción y defensa de esta Tesis, no es otro que permitir al lector interesado poder replicar o mejorar los cálculos, análisis y simulaciones realizadas conociendo los requisitos técnicos en materia de potencia, velocidad de cálculo y recursos hardware y software.

Herramientas **hardware**:

- Ordenador portátil *Hewlett Packard Omen 15,6"*, *Intel® Core i7-4710HQ*, 16 GB RAM, 512 GB SSD, aceleradora gráfica dedicada *NVIDIA 4 GB*.
- Ratón *Logitech MX Master*
- Ratón *SpaceMouse Wireless 3D Connexion*
- Impresora de inyección *PIXMA MG5700*

Herramientas **software**:

- *Microsoft Windows 10*
- *Microsoft Office 2016*
- *FreeCAD 0.16*
- *IDE Arduino 1.8.0*
- *Visualino 1.0*
- *Evernote 7.17.1*
- *ANSYS 18.0 Academic*
- *PSeInt 2017*
- *Fritzing 9.3b*
- *SolTrace 2012.7.9*
- *SmartView 4.3*
- *Sun Locator Lite*
- *AR Compass 3D*

BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 6

- [1]. Farah S.; Saman W.; Boland J. Development of robust meteorological year weather data. Research article. Renewable Energy, Volume 118, April 2018, pp 343-350.
- [2]. Qing X.; Niu Y. Hourly day-ahead solar irradiance prediction using weather forecasts by LSTM. Research article. Energy, Volume 148, 1 April 2018, pp. 461-468.
- [3]. Cheng W.Y.Y.; Liu Y.; Bourgeois A.; Wu Y.; Haupt S.E. Short-term wind forecast of a data assimilation/weather forecasting system with wind turbine anemometer measurement assimilation. Research article. Renewable Energy, Volume 107, July 2017, pp. 340-351.
- [4]. Hong T.; Chang W-K; Lin H-W. A fresh look at weather impact on peak electricity demand and energy use of buildings using 30-year actual weather data. Research article. Applied Energy, Volume 111, November 2013, pp. 333-350.
- [5]. Hinkelman L.M.; Schaeffer N. Relating solar resource and its variability to weather and climate across the northwestern United States. Research article. Solar Energy, Volume 157, 15 November 2017, pp. 966-978.
- [6]. Soares E.; Costa P.; Costa B.; Leite D. Ensemble of evolving data clouds and fuzzy models for weather time series prediction. Research article. Applied Soft Computing, Volume 64, March 2018, pp. 445-453.
- [7]. Tsoka S.; Tolika K.; Theodosiou T.; Tsikaloudaki K.; Bikas D. A method to account for the urban microclimate on the creation of 'typical weather year' datasets for building energy simulation, using stochastically generated data. Research article. Energy and Buildings, Volume 165, 15 April 2018, pp. 270-283.
- [8]. Burleyson C.D.; Voisin N.; Taylor Z.T.; Xie Y.; Kraucunas I. Simulated building energy demand biases resulting from the use of representative weather stations. Research article. Applied Energy, Volume 209, 1 January 2018, pp. 516-528.
- [9]. Hosseini M.; Lee B.; Vakilinia S. Energy performance of cool roofs under the impact of actual weather data. Research article. Energy and Buildings, Volume 145, 15 June 2017, pp. 284-292.
- [10]. Staffell I.; Pfenninger S. The increasing impact of weather on electricity supply and demand. Open access, Research article. Energy, Volume 145, 15 February 2018, pp. 65-78.
- [11]. Anaya K.L.; Pollitt M.G. Using stochastic frontier analysis to measure the impact of weather on the efficiency of electricity distribution businesses in

developing economies. Research article. *European Journal of Operational Research*, Volume 263, Issue 3, 16 December 2017, pp. 1078-1094.

- [12]. Hosseini M.; Tardy F.; Lee B. Cooling and heating energy performance of a building with a variety of roof designs; the effects of future weather data in a cold climate. Research article. *Journal of Building Engineering*, Volume 17, May 2018, pp. 107-114.
- [13]. Van Wart J.; Grassini P.; Yang H.; Claessens L.; Cassman K.G. Creating long-term weather data from thin air for crop simulation modeling. Open access, Research article. *Agricultural and Forest Meteorology*, Volumes 209–210, 15 September 2015, pp. 49-58.
- [14]. Tao S.; Corcoran J.; Hickman M.; Stimson R. The influence of weather on local geographical patterns of bus usage. Research article. *Journal of Transport Geography*, Volume 54, June 2016, pp. 66-80.

LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 6

Figura 6.1. Prototipo mecatrónico y módulo de validación en experimentación (fuente: autor)	234
Figura 6.2. Trayectorias solares del seguidor 21jun17 (fuente: autor)	235
Figura 6.3. Trayectorias solares del seguidor 22sep17 (fuente: autor)	235
Figura 6.4. Trayectorias solares del seguidor 21dic17 (fuente: autor)	236
Figura 6.5. Trayectorias solares del seguidor 20mar18 (fuente: autor)	236
Figura 6.6. Trayectoria solar en polares del 21jun17 y 22sep17 (fuente: SunEarthTools)	237
Figura 6.7. Trayectoria solar en polares del 21dic17 y 20mar18 (fuente: SunEarthTools)	237
Figura 6.8. Trayectoria solar en cartesianas del 21jun17 y 22sep17 (fuente: SunEarthTools)	237
Figura 6.9. Trayectoria solar en cartesianas del 21dic17 y 20mar18 (fuente: SunEarthTools)	237
Figura 6.10. Fecha e instantes temporales para capturas de datos (fuente: autor)	240
Figura 6.11. Capturas de sensores de irradiancia (fuente: autor)	240
Figura 6.12. Movimiento del seguidor hacia direcciones del espacio (fuente: autor)	241
Figura 6.13. Ángulos de elevación y azimut (fuente: autor)	241
Figura 6.14. Velocidad del viento (fuente: autor)	241
Figura 6.15. Temperatura colectores paraboloïdal y cilindro-parabólico (fuente: autor)	241
Figura 6.16. Temperatura ambiente y humedad relativa del aire (fuente: autor)	242
Figura 6.17. Calidad del aire (fuente: autor)	242
Figura 6.18. Presión barométrica (fuente: autor)	242
Figura 6.19. Caída de lluvia y/o granizo (fuente: autor)	243
Figura 6.20. Captura de datos 21jun17 (fuente: autor)	244
Figura 6.21. Captura de datos 22sep17 (fuente: autor)	245
Figura 6.22. Capturas de datos 21dic17 (fuente: autor)	246
Figura 6.23. Captura de datos 20mar18 (fuente: autor)	247
Figura 6.24. Ángulo de elevación del 21jun17 (fuente: autor)	248
Figura 6.25. Ángulo de elevación del 22sep17 (fuente: autor)	248
Figura 6.26. Ángulo de elevación del 21dic17 (fuente: autor)	249
Figura 6.27. Ángulo de elevación del 20mar18 (fuente: autor)	249
Figura 6.28. Ángulo de azimut del 21jun17 (fuente: autor)	250
Figura 6.29. Ángulo de azimut del 22sep17 (fuente: autor)	250
Figura 6.30. Ángulo de azimut del 21dic17 (fuente: autor)	251
Figura 6.31. Ángulo de azimut del 20mar18 (fuente: autor)	251
Figura 6.32. Temperaturas focos (T_p vs T_{cp}) del 21jun17 (fuente: autor)	253
Figura 6.33. Temperaturas focos (T_p vs T_{cp}) del 22sep17 (fuente: autor)	253
Figura 6.34. Temperaturas focos (T_p vs T_{cp}) del 21dic17 (fuente: autor)	254
Figura 6.35. Temperaturas focos (T_p vs T_{cp}) del 20mar18 (fuente: autor)	254
Figura 6.36. Irradiancias sensores (SO vs SE) del 21jun17 (fuente: autor)	256
Figura 6.37. Irradiancias sensores (SO vs SE) del 22sep17 (fuente: autor)	256
Figura 6.38. Irradiancias sensores (SO vs SE) del 21dic17 (fuente: autor)	257
Figura 6.39. Irradiancias sensores (SO vs SE) del 20mar18 (fuente: autor)	257
Figura 6.40. Irradiancias sensores (SN vs SS) del 21jun17 (fuente: autor)	259
Figura 6.41. Irradiancias sensores (SN vs SS) del 22sep17 (fuente: autor)	259
Figura 6.42. Irradiancias sensores (SN vs SS) del 21dic17 (fuente: autor)	260
Figura 6.43. Irradiancias sensores (SN vs SS) del 20mar18 (fuente: autor)	260
Figura 6.44. Irradiancia estadística del 21jun17 (fuente: PVGIS)	262
Figura 6.45. Irradiancia estadística del 22sep17 (fuente: PVGIS)	262
Figura 6.46. Irradiancia estadística del 21dic17 (fuente: PVGIS)	263
Figura 6.47. Irradiancia estadística del 20mar18 (fuente: PVGIS)	263
Figura 6.48. Velocidad viento del 21jun17 (fuente: autor)	264
Figura 6.49. Velocidad viento del 22sep17 (fuente: autor)	264
Figura 6.50. Velocidad viento del 21dic17 (fuente: autor)	265
Figura 6.51. Velocidad viento del 20mar18 (fuente: autor)	265
Figura 6.52. Velocidad estadística viento del 21jun17 (fuente: AEMET)	266
Figura 6.53. Velocidad estadística viento del 22sep17 (fuente: AEMET)	267
Figura 6.54. Velocidad estadística viento del 21dic17 (fuente: AEMET)	267
Figura 6.55. Velocidad estadística viento del 20mar18 (fuente: AEMET)	267
Figura 6.56. Temperatura ambiente del 21jun17 (fuente: autor)	268
Figura 6.57. Temperatura ambiente del 22sep17 (fuente: autor)	268

Figura 6.58. Temperatura ambiente del 21dic17 (fuente: autor)	269
Figura 6.59. Temperatura ambiente del 20mar18 (fuente: autor).....	269
Figura 6.60. Temperatura ambiente estadística del 21jun17 (fuente: AEMET).....	270
Figura 6.61. Temperatura ambiente estadística del 22sep17 (fuente: AEMET).....	271
Figura 6.62. Temperatura ambiente estadística del 21dic17 (fuente: AEMET).....	271
Figura 6.63. Temperatura ambiente estadística del 20mar18 (fuente: AEMET)	271
Figura 6.64. Humedad relativa del 21jun17 (fuente: autor)	272
Figura 6.65. Humedad relativa del 22sep17 (fuente: autor)	272
Figura 6.66. Humedad relativa del 21dic17 (fuente: autor)	273
Figura 6.67. Humedad relativa del 20mar18 (fuente: autor).....	273
Figura 6.68. Humedad relativa estadística del 21jun17 (fuente: AEMET).....	274
Figura 6.69. Humedad relativa estadística del 22sep17 (fuente: AEMET).....	275
Figura 6.70. Humedad relativa estadística del 21dic17 (fuente: AEMET).....	275
Figura 6.71. Humedad relativa estadística del 20mar18 (fuente: AEMET)	275
Figura 6.72. Calidad del aire 21jun17 (fuente: autor)	276
Figura 6.73. Calidad del aire 22sep17 (fuente: autor)	276
Figura 6.74. Calidad del aire 21dic17 (fuente: autor).....	277
Figura 6.75. Calidad del aire 20mar18 (fuente: autor).....	277
Figura 6.76. Hora punta de entrada de automóviles en Salesianos Carabanchel (fuente: autor). 278	
Figura 6.77. Calidad aire estadística del 21jun17 (fuente: Munimadrid)	278
Figura 6.78. Calidad aire estadística del 22sep17 (fuente: Munimadrid)	279
Figura 6.79. Calidad aire estadística del 21dic17 (fuente: Munimadrid).....	279
Figura 6.80. Calidad aire estadística del 20mar18 (fuente: Munimadrid).....	279
Figura 6.81. Presión barométrica 21jun17 (fuente: autor)	280
Figura 6.82. Presión barométrica 22sep17 (fuente: autor)	280
Figura 6.83. Presión barométrica 21dic17 (fuente: autor)	281
Figura 6.84. Presión barométrica 20mar18 (fuente: autor).....	281
Figura 6.85. Presión barométrica estadística del 21jun17 (fuente: AEMET).....	282
Figura 6.86. Presión barométrica estadística del 22sep17 (fuente: AEMET).....	283
Figura 6.87. Presión barométrica estadística del 21dic17 (fuente: AEMET).....	283
Figura 6.88. Presión barométrica estadística del 20mar18 (fuente: AEMET)	283
Figura 6.89. Interfaz de trabajo de SmartView 4.3 (fuente: Autor)	284
Figura 6.90. Comparativa imagen real vs termográfica de colector paraboloïdal (fuente: autor).. 285	
Figura 6.91. Representación 3D de termografía de colector paraboloïdal (fuente: autor)	285
Figura 6.92. Histograma térmico de colector paraboloïdal (fuente: autor).....	285
Figura 6.93. Imagen real vs termográfica de colector cilindro-parabólico (fuente: autor)	286
Figura 6.94. Representación 3D de termografía de colector cilindro-parabólico (fuente: autor)... 286	
Figura 6.95. Histograma térmico de colector cilindro-parabólico (fuente: autor).....	286
Figura 6.96. Alumnos de Salesianos Carabanchel con el prototipo (fuente: autor)	288
Figura 6.97. Adición de motor Stirling a prototipo termosolar (fuente: autor)	288
Figura 6.98. Alumnos de Robótica educativa en Salesianos Carabanchel (fuente: autor)	289
Figura 6.99. Correa de tracción alternativa (fuente: Edison).....	290
Figura 6.100. Identificación de sección real de cilindro-parábola (fuente: autor)	290
Figura 6.101. Arduino MEGA industrial Controllino (fuente: autor)	292
Figura 6.102. Soluciones termográficas portátiles (fuente: Seekthermal, Flir y Thermapp).....	292
Figura 6.103. Simulación de maniobras de programación (fuente: autor).....	293
Figura 6.104. Modelización de seguidor mediante funciones de transferencia (fuente: autor)	293
Figura 6.105. Soluciones SCADA de gestión remota (fuente: MyOpenlab y Labview)	294
Figura 6.106. Pantalla TFT de visualización de datos (fuente: autor)	294
Figura 6.107. Programa gratuito de control difuso (fuente: Xfuzzy)	295
Figura 6.108. Panel fotovoltaico con batería integrada (fuente: autor).....	295
Figura 6.109. Brújula en RA desde perspectiva del seguidor (fuente: autor)	296
Figura 6.110. Trayectoria en RA desde perspectiva del seguidor (fuente: autor)	296
Figura 6.111. Cálculo de engranajes con Relatran 3.5 (fuente: Relatran)	297
Figura 6.112. Seguidor fotovoltaico retráctil (fuente: Smartflower).....	297
Figura 6.113. Fases del despliegue de paneles fotovoltaicos (fuente: Smartflower)	298
Figura 6.114. Posibles fases del despliegue de colector paraboloïdal (fuente: Wolfram)	298

LISTA DE TABLAS CAPÍTULO 6

Tabla 1. Azimut y elevación 21jun17 (fuente: SunEarthTools)	238
Tabla 2. Azimut y elevación 22sep17 (fuente: SunEarthTools).....	238
Tabla 3. Azimut y elevación 21dic17 (fuente: SunEarthTools).....	239
Tabla 4. Azimut y elevación 20mar18 (fuente: SunEarthTools).....	239