



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y  
DISEÑO INDUSTRIAL

Grado en Ingeniería Electrónica y Automática Industrial

## TRABAJO FIN DE GRADO

### TÍTULO DEL TRABAJO

Álvaro Cañil Montero

*Cotutor (si lo hay):* nombre y  
apellidos

*Departamento:* departamento

*Tutor:* Nom y apell

*Departamento:* departamento

Madrid, Mes, Año





escuela técnica superior de  
**ingeniería**  
y diseño  
**industrial**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y  
DISEÑO INDUSTRIAL

Grado en Ingeniería Electrónica y Automática Industrial

## TRABAJO FIN DE GRADO

### TÍTULO DEL TRABAJO

Firma Autor

*Firma Cotutor (si lo hay)*

*Firma Tutor*



Copyright ©2026. Álvaro Cañil Montero

Esta obra está licenciada bajo la licencia Creative Commons

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 3.0 Unported (CC BY-NC-ND 3.0). Para ver una copia de esta licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/deed.es> o envíe una carta a Creative Commons, 444 Castro Street, Suite 900, Mountain View, California, 94041, EE.UU. Todas las opiniones aquí expresadas son del autor, y no reflejan necesariamente las opiniones de la Universidad Politécnica de Madrid.



**Título:** título del trabajo

**Autor:** nombre del alumno

**Tutor:** nombre del tutor

**Cotutor:** nombre del cotutor

## EL TRIBUNAL

Presidente:

Vocal:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo Fin de Grado el día ..... de ..... de ... en ....., en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de:

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



# Agradecimientos

Agradezco a .....



# Resumen

En un sistema BIPV de ventana compacto dotado de un vidrio externo con un conjunto de lentes de Fresnel que concentran la radiación solar directa en líneas focales horizontales, es necesario un control preciso de un plano móvil situado en el interior del marco de la ventana. Este plano permite hacer coincidir células solares dispuestas transversalmente al panel con dichas líneas focales a lo largo del día, siguiendo el movimiento aparente del Sol. Asimismo, el sistema permite regular la cantidad y el tipo de luz que se transmite al interior del edificio.

Este trabajo presenta la arquitectura de un programa de control en lazo abierto que, introduciendo únicamente la localización geográfica del sistema y la orientación del panel (azimut del panel e inclinación), calcula las posiciones objetivo y gobierna el movimiento del plano móvil para realizar un seguimiento solar efectivo.

**Palabras clave:** BIPV, concentración solar, lentes de Fresnel, seguimiento solar, ventanas fotovoltaicas, control en lazo abierto.



# Abstract

**Keywords:** keyword1, keyword2, keyword3.



# Nomenclatura

|                 |                                       |
|-----------------|---------------------------------------|
| $\alpha_s$      | Elevación solar                       |
| $AO$            | Adelanto horario                      |
| $B$             | Fracción del año                      |
| $B_s$           | Radiación Directa                     |
| $\beta$         | Inclinación de una superficie, Tilt   |
| $D$             | Radiación Difusa                      |
| $\delta$        | Declinación solar                     |
| $\Delta\lambda$ | Corrección de longitud                |
| $\gamma$        | Ángulo azimutal de la superficie, Pan |
| $\gamma_s$      | Azimut solar                          |
| $E_C$           | Energía banda conducción              |
| $E_F$           | Energía banda prohibida               |
| $E_V$           | Energía banda de valencia             |
| $EoT$           | Ecuación del tiempo                   |
| $\phi$          | Latitud                               |
| $TO$            | Hora oficial                          |
| $TST_h$         | Tiempo solar verdadero                |
| $\theta$        | Ángulo de incidencia                  |
| $\theta_z$      | Ángulo zenital                        |
| $\lambda$       | Longitud                              |
| $F_s$           | Factor de sombra                      |
| $G$             | Radiación Global                      |
| $R$             | Radiación Reflejada o de albedo       |



# Índice general

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Agradecimientos</b>   | <b>IX</b>   |
| <b>Resumen</b>   | <b>XI</b>   |
| <b>Abstract</b>  | <b>XIII</b> |
| <b>Nomenclatura</b>  | <b>XV</b>   |
| <b>Índice</b>  | <b>XIX</b>  |
| <b>1. Introducción</b>   | <b>1</b>    |
| 1.1. Motivación del proyecto . . . . .   | 1           |
| 1.2. Objetivos . . . . .   | 2           |
| 1.2.1. Objetivo general . . . . .  | 2           |
| 1.2.2. Objetivos específicos . . . . .   | 2           |
| 1.2.3. Alcance del proyecto . . . . .  | 2           |
| 1.3. Materiales utilizados . . . . .   | 3           |
| 1.3.1. Hardware . . . . .  | 3           |
| 1.3.2. Software . . . . .  | 3           |
| 1.4. Estructura del documento . . . . .  | 3           |
| <b>2. Marco Teórico</b>  | <b>7</b>    |
| 2.1. Radiación Solar . . . . .   | 7           |
| 2.1.1. Naturaleza de la radiación solar . . . . .                              | 7           |
| 2.1.2. Influencia de la atmósfera terrestre en la radiación solar . . . . .    | 8           |
| 2.1.3. Dirección de la radiación solar directa . . . . .                       | 9           |
| 2.2. Efemérides Solares . . . . .  | 10          |
| 2.2.1. Hora solar y hora oficial . . . . .                                     | 10          |
| 2.2.2. Fracción del año . . . . .  | 11          |
| 2.2.3. Declinación solar . . . . .   | 11          |
| 2.2.4. Ecuación del tiempo . . . . .   | 11          |
| 2.2.5. Tiempo solar verdadero . . . . .  | 12          |
| 2.2.6. Ángulo horario . . . . .  | 12          |
| 2.2.7. Ángulo cenital, elevación y azimut solar . . . . .                      | 12          |
| 2.3. Cálculo de ángulos de incidencia en la superficie de la ventana . . . . . | 13          |
| 2.3.1. Transformación de efemérides solares a ángulos de incidencia .          | 13          |
| 2.4. Interpolación bilineal . . . . .  | 15          |
| 2.5. Fundamentos de la energía Solar Fotovoltaica . . . . .                    | 16          |
| 2.5.1. Células solares . . . . .   | 16          |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.5.2. Teoría de semiconductores . . . . .                             | 18        |
| 2.5.3. Unión <i>p-n</i> . . . . .                                      | 19        |
| 2.5.4. Conversión fotovoltaica . . . . .                               | 20        |
| 2.5.5. Caracterización eléctrica de una célula fotovoltaica: curva I–V | 21        |
| 2.5.6. Pérdidas: circuito equivalente . . . . .                        | 26        |
| 2.6. Módulos fotovoltaicos . . . . .                                   | 26        |
| 2.6.1. Estructura y componentes de un módulo fotovoltaico . . . . .    | 26        |
| 2.6.2. Tipos de arrays fotovoltaicos . . . . .                         | 28        |
| 2.6.3. BIPV . . . . .  | 30        |
| 2.7. Óptica geométrica . . . . .                                       | 30        |
| 2.7.1. Principio de Fermat . . . . .                                   | 31        |
| 2.7.2. Refracción de la luz y ley de Snell . . . . .                   | 31        |
| 2.7.3. Lentes delgadas . . . . .                                       | 31        |
| 2.7.4. Concentración de la radiación solar . . . . .                   | 33        |
| 2.7.5. Lente de Fresnel . . . . .                                      | 33        |
| <b>3. Estado del arte</b>  | <b>35</b> |
| <b>4. Presentación del prototipo</b>                                   | <b>41</b> |
| 4.1. Punto de partida . . . . .  | 41        |
| 4.1.1. Movimiento vertical . . . . .                                   | 41        |
| 4.1.2. Movimiento horizontal . . . . .                                 | 42        |
| <b>5. Planteamiento de requisitos y selección tecnológica</b>          | <b>45</b> |
| 5.1. Requisitos del sistema . . . . .                                  | 45        |
| 5.1.1. Requisitos funcionales . . . . .                                | 45        |
| 5.1.2. Requisitos no funcionales . . . . .                             | 46        |
| 5.2. Criterios de selección tecnológica . . . . .                      | 46        |
| 5.3. Alternativas para la plataforma hardware . . . . .                | 48        |
| 5.3.1. PLC (Controladores lógicos programables) . . . . .              | 48        |
| 5.3.2. FPGA (Field Programmable Gate Array) . . . . .                  | 48        |
| 5.3.3. STM32 . . . . .   | 49        |
| 5.3.4. ESP32 . . . . .   | 50        |
| 5.3.5. Otros microcontroladores de 32 bits . . . . .                   | 51        |
| 5.3.6. Descartes hardware . . . . .                                    | 52        |
| 5.4. Selección de Software . . . . .                                   | 53        |
| 5.4.1. Software asociado a ESP32 . . . . .                             | 53        |
| 5.4.2. Software asociado a STM32 . . . . .                             | 54        |
| 5.4.3. Software asociado a microcontroladores SAMD/SAME . . . . .      | 54        |
| 5.5. Discusión de las decisiones adoptadas . . . . .                   | 55        |
| 5.5.1. Justificación de la plataforma ESP32-S3-DevKitC-1 . . . . .     | 56        |
| <b>6. Diseño del sistema de control</b>                                | <b>59</b> |
| 6.1. Enfoque general del diseño . . . . .                              | 59        |
| 6.2. Diseño electrónico . . . . .                                      | 59        |
| 6.2.1. Arquitectura hardware . . . . .                                 | 59        |
| 6.2.2. Subsistema de alimentación . . . . .                            | 62        |
| 6.2.3. Subsistema de control . . . . .                                 | 62        |
| 6.2.4. Subsistema de accionamiento . . . . .                           | 62        |

|   |           |
|---|-----------|
| 6.2.5. Subsistema de la planta . . . . .                                  | 63        |
| 6.2.6. Discusión de la arquitectura hardware . . . . .                    | 63        |
| 6.3. Arquitectura funcional del sistema de control . . . . .              | 63        |
| 6.4. Diseño software . . . . .  | 64        |
| 6.4.1. Arquitectura software . . . . .                                    | 65        |
| 6.5. Diseño de la interfaz . . . . .                                      | 74        |
| <b>7. Implementación del control de movimiento</b>                        | <b>77</b> |
| 7.1. Implementación inicial del movimiento . . . . .                      | 77        |
| 7.2. Detección de problemas mecánicos . . . . .                           | 77        |
| 7.3. Problema de backlash e histéresis en el eje Z . . . . .              | 78        |
| 7.4. Implementación del homing y establecimiento de referencias . . . . . | 79        |
| 7.5. Compensación del backlash . . . . .                                  | 79        |
| 7.6. Resultado de la evolución del control de movimiento . . . . .        | 79        |
| 7.7. Detección de problemas software . . . . .                            | 80        |
| <b>8. Resultados</b>  | <b>81</b> |
| 8.1. Demostración del movimiento del sistema . . . . .                    | 81        |
| 8.2. Validación de la precisión de posicionamiento . . . . .              | 82        |
| 8.3. Resultados en el modo automático . . . . .                           | 82        |
| 8.4. Validación del modo efemérides . . . . .                             | 83        |
| 8.5. Consumo energético . . . . .   | 84        |
| <b>9. Conclusiones</b>  | <b>89</b> |
| 9.1. Evaluación global de los resultados . . . . .                        | 89        |
| 9.2. Discusión de aspectos clave . . . . .                                | 90        |
| 9.3. Rendimiento de la selección tecnológica . . . . .                    | 90        |
| 9.4. Fiabilidad del diseño . . . . .                                      | 91        |
| 9.5. Limitaciones del sistema . . . . .                                   | 91        |
| 9.6. Aportación del proyecto . . . . .                                    | 91        |
| 9.7. Líneas de trabajo futuro . . . . .                                   | 91        |
| 9.8. Impacto ambiental . . . . .  | 92        |
| <b>A. Anexo</b>   | <b>93</b> |
| A.1. ESP32-S3-Devkit-C1 . . . . .   | 93        |
| <b>Bibliografía</b>   | <b>95</b> |



# Índice de figuras

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.1.  | Prototipo de la ventana a controlar. . . . .   | 6  |
| 2.1.  | (a) Trayectoria Sol-Tierra. Los nombres de los solsticios y equinoccios están particularizados para el hemisferio Norte. (b) Variación de la radiación atmosférica solar mensual. (c) Declinación. . . . . | 8  |
| 2.2.  | (a) Ángulo cenital, pan, tilt, ángulo azimutal de la superficie y azimut solar para una superficie inclinada. (b) Ángulo azimutal solar [7]. . . . .   | 9  |
| 2.3.  | Procedimiento de cálculo del ángulo de incidencia . . . . .  | 12 |
| 2.4.  | Orientación de la ventana para pan y tilt nulos. . . . .   | 15 |
| 2.5.  | Estructura simplificada de una célula fotovoltaica de unión p-n. Las dimensiones relativas de cada elemento se han exagerado para una mejor visualización [11]. . . . .                                    | 17 |
| 2.6.  | Semiconductores tipo p y tipo n. (a) y (b) de HelioEsfera. (c) de UPV. . . . .   | 19 |
| 2.7.  | Polarización de la unión p-n. . . . .  | 23 |
| 2.8.  | Iluminación sobre una célula solar . . . . .   | 24 |
| 2.9.  | Curvas I-V y P-V . . . . .   | 25 |
| 2.10. | Diferentes asociaciones de células y configuraciones de módulos [12] . . . . .   | 27 |
| 2.11. | Distintas distribuciones de arrays en campos solares . . . . .   | 30 |
| 2.12. | Lentes delgadas. . . . .   | 31 |
| 2.13. | Lentes de fresnel. . . . .   | 34 |
| 3.1.  | Captación de luz del sistema SMARTWIN. . . . .   | 39 |
| 3.2.  | Comparativa deslumbramiento con distintas configuraciones y sistemas. . . . .  | 40 |
| 6.1.  | Diagrama de diseño de interconexiones hardware. . . . .  | 61 |
| 6.2.  | Diagrama de diseño funcional. . . . .  | 64 |
| 6.3.  | Diagrama de comunicación. . . . .  | 66 |
| 6.4.  | Máquina de estados finitos del sistema. . . . .  | 67 |
| 6.5.  | Rutinas de inicio del servidor web y GPS. . . . .  | 68 |
| 6.6.  | Diagrama secuencial de los procesos de inicio. . . . .   | 68 |
| 6.7.  | Flujo de datos del sistema. . . . .  | 69 |
| 6.8.  | Diagrama secuencial del modo automático. . . . .   | 71 |
| 6.9.  | Diagrama de flujo del modo automático. . . . .   | 71 |
| 6.10. | Diagrama de flujo de datos del modo efemérides. . . . .  | 73 |
| 6.11. | Diagrama de flujo de datos del modo manual. . . . .  | 73 |
| 6.12. | Diagrama secuencial de los modos manual y efemérides. . . . .  | 73 |
| 6.13. | Interfaz gráfica de usuario. . . . .   | 75 |
| 8.1.  | Secuencia de demostración del movimiento. . . . .  | 87 |

|  |    |
|--|----|
| 8.2. Corrientes frente al tiempo. Izquierda MCU, derecha fuente de alimentación. . . . . | 88 |
| A.1. Esquemático. . . . .  | 94 |

# Índice de tablas

|   |    |
|---|----|
| 2.1. Símbolos utilizados en la geometría solar. . . . .                     | 13 |
| 8.1. Comparación entre resultados Python y ESP con error absoluto . . . . . | 83 |
| 8.2. Consumo de corriente. . . . .  | 84 |



# Capítulo 1

## Introducción

El aprovechamiento de la energía solar se ha convertido en uno de los pilares de la transición energética. Su integración en edificios (BIPV) es una estrategia clave para aprovechar superficies ya existentes y abre un nuevo abanico de posibilidades arquitectónicas, como elementos pasivos de generación o una aproximación híbrida entre un sistema de concentración solar y un elemento arquitectónico activo.

En la fotovoltaica integrada en edificios surgen constantemente nuevos conceptos para el aprovechamiento de la luz solar, y los más clásicos, como los paneles en las techumbres de los edificios, no dejan de reinventarse para maximizar su eficiencia energética. El elemento máximo de interés en relación con este proyecto son las ventanas BIPV, potencial candidato para reemplazar las ventanas convencionales, mejorando sus características ópticas, eléctricas y de transmisión de calor [19].

Los seguidores solares convencionales rotan siguiendo el Sol para maximizar la eficiencia. Dado que no es viable modificar la orientación de un edificio para maximizar la captación solar de sus elementos BIPV -en este caso, las ventanas- se deduce que el propio elemento integrado debe incorporar partes móviles capaces de obtener un rendimiento similar al de los seguidores solares. De esta aproximación nace el objeto de este proyecto: desarrollar el sistema de control de un panel transparente con células fotovoltaicas dispuestas en tiras transversales, situado dentro de una ventana, que realiza un seguimiento de la luz solar. Esta luz es previamente procesada por unas lentes longitudinales de concentración de fresnel, que conforman la parte exterior de la ventana y concentran la radiación directa del Sol en franjas horizontales que inciden sobre las células del panel móvil. Estas franjas de luz se desplazan sobre el plano a lo largo del día con el movimiento del Sol, razón por la cual es necesario el control de un sistema mecatrónico que responda a esta necesidad de mover el panel para generar energía.

### 1.1. Motivación del proyecto

Una de las problemáticas de la generación de energía solar fotovoltaica es el gran espacio que ocupan los seguidores solares, restringiendo el suelo para otros usos. De la necesidad de aprovechar la superficie, nace la fotovoltaica integrada en edificios, que permite volver a emplear superficies arquitectónicas ya existentes para la generación de energía o creación de nuevas con elementos integrados. Este proyecto surge de reinventar el concepto que se tenía hasta el momento de la ventana solar, donde se utilizan paneles translúcidos o coloreados para decoración. Un panel semitrans-

parente deja pasar parte de la luz directa del Sol dentro del edificio, produciendo deslumbramientos indeseados.

A raíz de estos inconvenientes, se propone utilizar la tecnología fotovoltaica de concentración para crear una ventana que, además de generar electricidad, produzca un efecto similar al de una persiana dentro de la habitación, dejando pasar solo la luz difusa para lograr una alta generación y bajo deslumbramiento, o la luz difusa y franjas de luz directa para una alta iluminación. De este modo, no solo tendrá una finalidad generativa, sino que aporta, además, una finalidad arquitectónica novedosa para controlar la cantidad de luz que se requiere dentro del edificio y coadyuvar a condiciones lumínicas adecuadas.

Este sistema innovador no solo incrementa la eficiencia energética, sino que también garantiza el confort visual de los usuarios al ofrecer un preciso control sobre la cantidad y tipo de luz que entra en el espacio. Al filtrar la luz directa y proporcionar una iluminación difusa, se reduce el deslumbramiento y se propicia un ambiente más agradable y saludable, mejorando la productividad y el bienestar dentro del edificio. Este enfoque arquitectónico no solo responde a necesidades energéticas, sino que también promueve un entorno visualmente cómodo, adaptado a las diversas condiciones de luz a lo largo del día. Este proyecto pretende sentar las bases para futuras líneas de investigación en ventanas fotovoltaicas activas, integrando conceptos de energía solar, electrónica de control y diseño óptico.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

El principal objetivo que ha estado presente desde el inicio del proyecto es desarrollar un sistema de control capaz de posicionar el panel móvil de la ventana, permitiendo seguir el desplazamiento de las franjas de luz directa concentrada producidas por las lentes de fresnel con el movimiento del Sol al cambiar el foco de la lente, garantizando así la captación óptima de radiación. Es necesario caracterizar el correcto funcionamiento del programa.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Diseñar un sistema de control con tres modos de funcionamiento diferenciados.
- Implementar un modo automático capaz de seguir el desplazamiento de las franjas de luz directa.
- Desarrollar un modo manual que permita el posicionamiento directo del panel.
- Incorporar un modo de simulación basado en ángulos azimutales y de elevación.
- Integrar el sistema de control en un microcontrolador de bajo consumo.

### 1.2.3. Alcance del proyecto

El alcance de este proyecto se limita al diseño, implementación y validación de un sistema de control para una ventana fotovoltaica activa a escala de prototipo de

laboratorio. El trabajo se centra en el desarrollo del software de control, la integración con el hardware seleccionado y la caracterización experimental del sistema en términos de precisión de movimiento y consumo eléctrico.

Quedan fuera del alcance de este proyecto el diseño estructural de la ventana, caracterizar la generación del sistema ,su optimización industrial y su análisis económico a gran escala.

### 1.3. Materiales utilizados

#### 1.3.1. Hardware

- **ESP32-S3-DevkitC1**, microcontrolador con sistema operativo *FreeRTOS*, punto de acceso WIFI y conexión Bluetooth.
- Módulo **GPS NEO-6M**, es un módulo integrable en *Arduino* utilizado para proporcionar la fecha y la hora al microcontrolador.
- Motores paso a paso **NEMA-15** y **NEMA-17**, empleados para producir el movimiento del panel.
- Finales de carrera, para detectar los límites físicos de la maqueta que restringen el movimiento del panel.
- Reductor buck LM2596S-Like de 12 – 24 V a 5 V

#### 1.3.2. Software

El desarrollo del código para el control de la ventana se realiza en el entorno de *Arduino*<sup>1</sup>, *Arduino-IDE*, motivado por la gran compatibilidad de bibliotecas que ofrece para implementar el punto de acceso wifi e integrar el GPS.

### 1.4. Estructura del documento

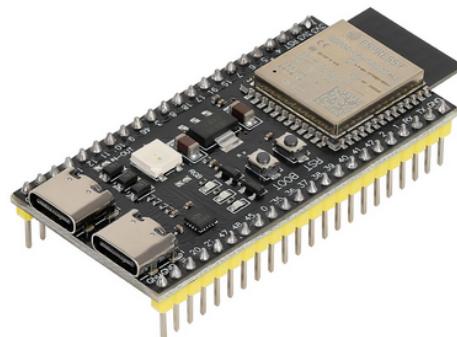
A continuación, y para facilitar la lectura del documento, se detalla el contenido de cada capítulo.

- En el capítulo 1 se realiza una introducción donde se relatan el objeto, la motivación del documento y los objetivos. Define los materiales utilizados a nivel de Hardware y Software.
- En el capítulo 2 se hace un repaso de los conceptos teóricos que facilitan el seguimiento y comprensión del proyecto. Se tratan aquí la energía solar fotovoltaica, desarrollando y su aplicación integrada en edificios, óptica de geométrica de concentración, los distintos algoritmos empleados, la ubicación del Sol respecto de un plano y la obtención de sus ángulos de incidencia y la interpolación bilineal de la que se obtienen las posiciones de desplazamiento para el seguimiento del Sol.

---

<sup>1</sup><https://www.arduino.cc/>

- En el capítulo 3 se ubica el estado del arte, donde se mencionan distintas líneas de investigación en materia de ventanas BIPV, entrando en profundidad en aquella que da vida al proyecto.
- En el capítulo 4 se presenta la maqueta a controlar y se determinan las características mecánicas que deben considerarse en el diseño.
- En el capítulo 5 se plantean los requisitos funcionales y no funcionales que definen el programa, junto a los criterios de selección necesarios sobre los que se escoge la plataforma hardware a emplear de entre una lista de candidatos.
- En el capítulo 6 se desarrolla el diseño del programa, incluyendo las arquitecturas software, hardware y la interfaz gráfica de usuario.
- En el capítulo 7 se explican las estrategias adoptadas que solventan los inconvenientes mecatrónicos que aparecen durante la implementación y el origen de estos.
- En el capítulo 8 se recogen los resultados que surgen de la demostración del movimiento, la validación de precisión en el posicionamiento y de los distintos modos y el consumo del sistema.
- En el capítulo 9 tienen lugar las conclusiones, que incluyen una valoración de los resultados obtenidos y de la fidelidad del diseño respecto al resultado final, así como los posibles desarrollos futuros y el alcance del impacto ambiental del sistema.



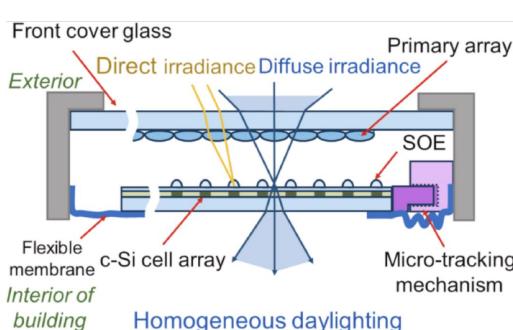
(a) ESP32-S3-DevkitC1



(b) Nema-15



(c) Nema-17



(d) CNC-Shield con drivers A4998



(e) Convertidor DC-DC Buck

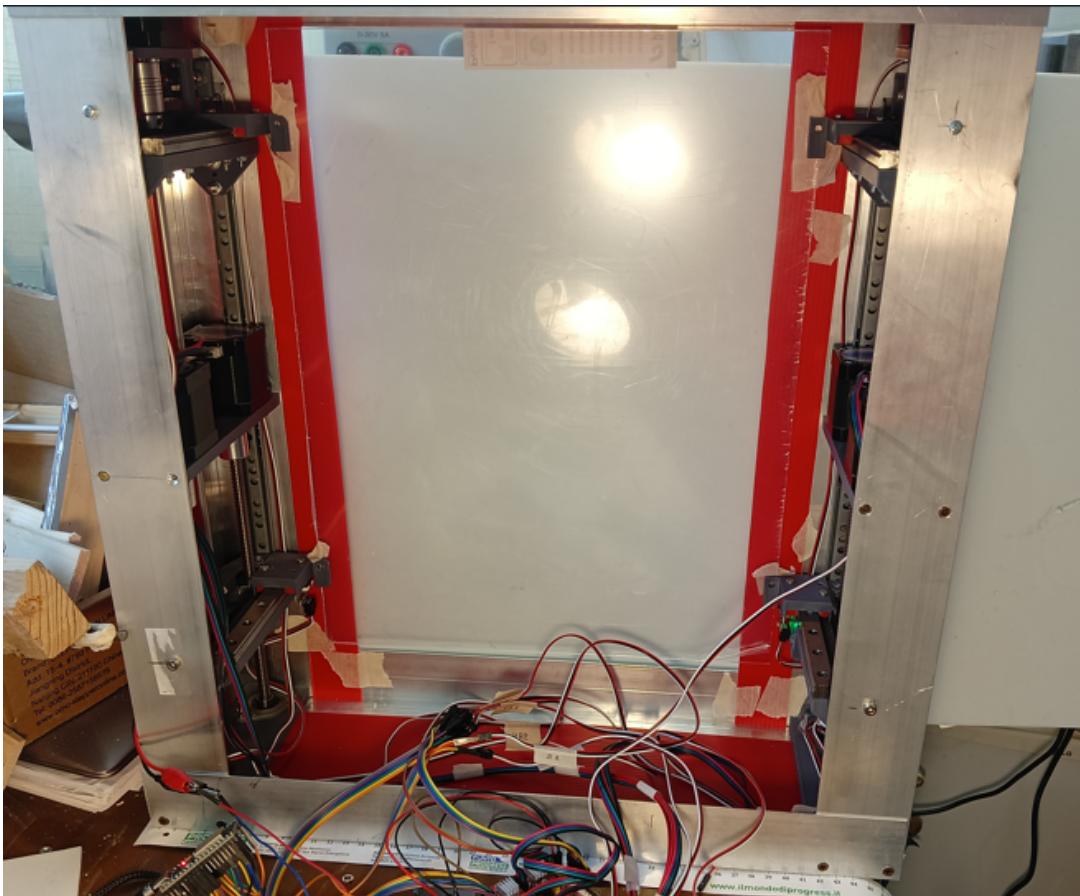


Figura 1.1: Prototipo de la ventana a controlar.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. Radiación Solar

El Sol es una estrella que ilumina y calienta la Tierra comportándose como un reactor nuclear de fusión. En su interior tiene lugar una serie de reacciones que producen una pérdida de masa que se transforma en energía, la cual se distribuye como radiación electromagnética, con un valor alrededor de unos  $5,4 \times 10^{24}$  julios (J). A esta radiación electromagnética proveniente del Sol se le denomina radiación solar [2].

Para cuantificar la radiación que llega a una superficie concreta de la Tierra proveniente del Sol, se emplean los términos de irradiancia e irradiación solar. La irradiancia solar es la potencia de radiación solar por unidad de área incidente en una superficie (S.I.  $\frac{W}{m^2}$ ), y la irradiación solar es la integral durante un período de tiempo de la irradiancia; es decir, la energía de radiación solar por unidad de área incidente en una superficie (S.I.  $\frac{Wh}{m^2}$ ) [22].

#### 2.1.1. Naturaleza de la radiación solar

La radiación extraterrestre emitida por el Sol presenta pequeñas variaciones debidas a la aparición de manchas solares<sup>1</sup>. Se han estudiado las distintas periodicidades con las que ocurren estos sucesos, con conclusiones discutidas. Willson et al. (1981) reporta varianzas de hasta el 0,2 % relacionadas con la aparición de estas manchas, pero otros lo consideran inconcluyente o que no indica una variabilidad regular. Datos de Hickey et al. (1982) recogidos durante 2.5 años desde el satélite *Nimbus 7* sugieren que la constante solar decrece un 0.02 % al año. Debido a la incertidumbre de estos estudios, para propósitos ingenieriles se considera que la luz que emite el Sol es fija [7].

La radiación emitida por el Sol fuera de la atmósfera terrestre atraviesa el espacio vacío en todas direcciones sin sufrir pérdidas apreciables por interacción con medios materiales. Sin embargo, la irradiancia solar se atenúa de acuerdo con el cuadrado de la distancia, parte de la cual es interceptada por la Tierra. Por lo tanto, al ser excéntrica la órbita que describe la Tierra alrededor del Sol (Subfigura 2.1a<sup>2</sup>), la

<sup>1</sup>Región solar con una zona central oscura “umbra” rodeada de otra más clara “penumbra”. Tiene una temperatura más baja que sus alrededores y presenta intensa actividad magnética.

<sup>2</sup> $\delta$  es la declinación solar, ángulo entre los rayos del Sol y el ecuador terrestre. AU es “Unidades astronómicas” y equivale a 150 millones de kilómetros.

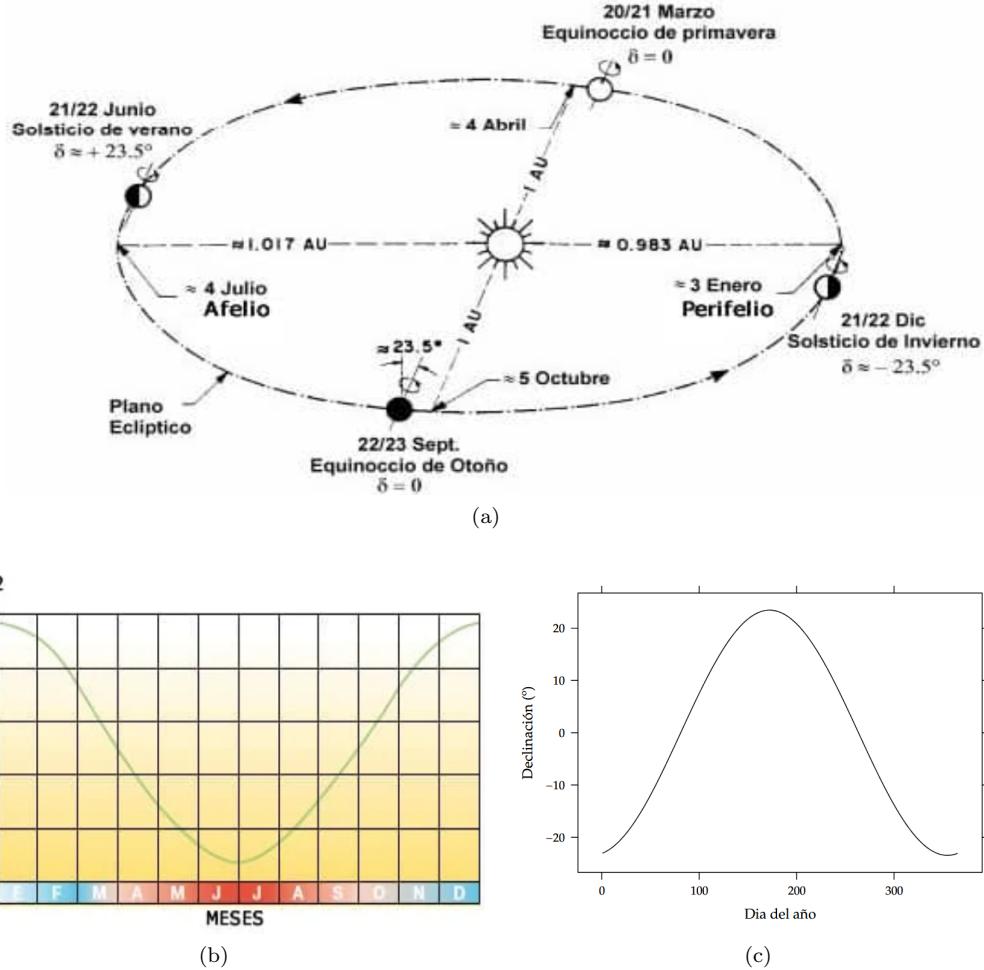


Figura 2.1: (a) Trayectoria Sol-Tierra. Los nombres de los solsticios y equinoccios están particularizados para el hemisferio Norte. (b) Variación de la radiación atmosférica solar mensual. (c) Declinación.

radiación atmosférica solar fluctúa en el rango de  $\pm 3\%$ , como puede verse en la Subfigura 2.1b.

### 2.1.2. Influencia de la atmósfera terrestre en la radiación solar

La radiación solar es atenuada a su paso por la atmósfera, sometida a una combinación de procesos de reflexión, absorción y difusión que alteran sus características. La reflexión en las nubes disminuye la radiación incidente en la superficie terrestre mientras que la absorción por vapor de agua, ozono y CO<sub>2</sub> produce una modificación de las características espectrales de la radiación. Además, la dispersión por partículas modifica la distribución espacial de la radiación.

De esta forma, la radiación que llega a la superficie terrestre se puede dividir en tres componentes:

- Radiación Directa,  $B_s$ : representa la fracción de irradiancia procedente en línea recta al Sol. Es afectada por el fenómeno de absorción y varía en función de la nubosidad del momento y de la estación del año.

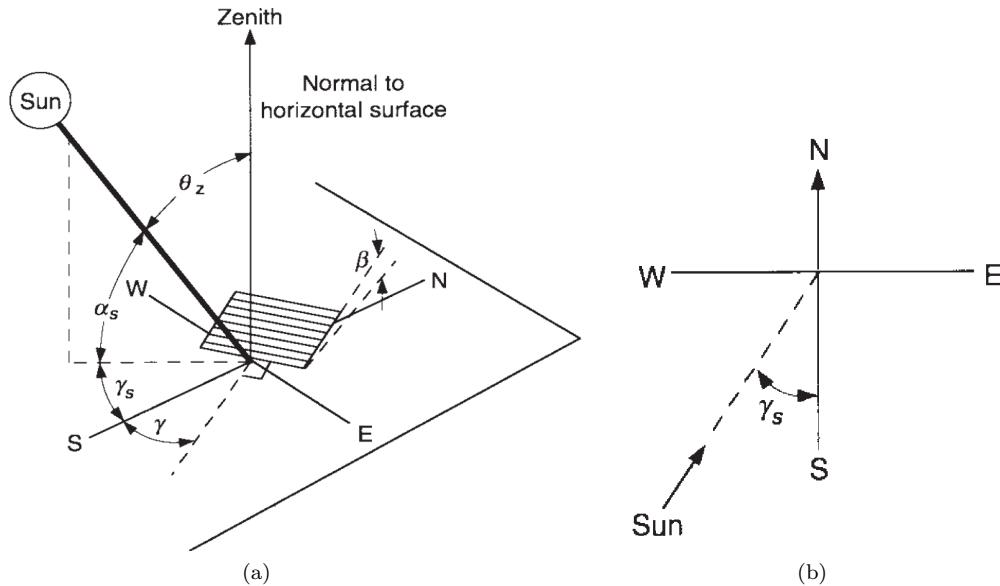


Figura 2.2: (a) Ángulo cenital, pan, tilt, ángulo azimutal de la superficie y azimut solar para una superficie inclinada. (b) Ángulo azimutal solar [7].

- Radiación Difusa,  $D$ : cuantifica la radiación procedente de todo el cielo, salvo del Sol. Es decir, de todos los rayos dispersados en la atmósfera sobre las nubes, partículas de aire y resto de procesos descritos anteriormente.
- Radiación de albedo,  $R$ : fracción de radiación procedente de la reflexión con el suelo

La suma de radiación directa, difusa y de albedo constituye la irradiancia global, que sirve para saber la capacidad de generación de energía que tienen los paneles solares de un sistema fotovoltaico.

$$G = B_s + D + R \quad (2.1)$$

### 2.1.3. Dirección de la radiación solar directa

La posición del Sol relativa a un plano se define en función de varios ángulos indicados en la Figura 2.2, que expresan las relaciones geométricas entre ese plano y una orientación particular relativa a la Tierra a cualquier hora, así como la radiación solar directa recibida.

Los ángulos para posicionar un plano sobre la superficie terrestre son los siguientes:

- φ **Latitud**: localización angular al norte o sur del ecuador; norte positivo.  $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$
- λ **Longitud**: localización angular al este o oeste del meridiano de Greenwich; este positivo.  $-180^\circ \leq \lambda \leq 180^\circ$ .

Los ángulos que posicionan la superficie:

- β **Tilt**: inclinación, ángulo entre el plano de la superficie y la horizontal;  $-180^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ .

$\gamma$  **Pan:** ángulo acimutal de la superficie, desviación de la proyección de la normal de la superficie desde el meridiano local, con cero hacia el sur, este negativo y oeste positivo;  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ .

Y los ángulos que posicionan al Sol respecto a la superficie:

$\theta_z$  **Ángulo zenital:** ángulo entre la vertical y la línea del Sol.

$\gamma_s$  **Azimut solar:** desplazamiento angular desde el sur de la proyección del rayo solar sobre la superficie horizontal.

$\alpha_s$  **Elevación solar:** ángulo entre la horizontal y la línea del sol; complementario al ángulo cenital.

$\theta$  **Ángulo de incidencia:** ángulo entre el rayo del Sol sobre la superficie y la normal de esta.

## 2.2. Efemérides Solares

La determinación de la posición de un astro en cualquier instante requiere calcular un conjunto de magnitudes conocidas como *efemérides*. En concreto, si se habla del Sol, *efemérides solares*. Estas variables describen la geometría Sol–Tierra a lo largo del año y permiten obtener los ángulos con los que se caracteriza la incidencia de la radiación directa sobre una superficie. Los parámetros fundamentales son: la declinación solar, la ecuación del tiempo, el ángulo horario y el tiempo solar verdadero. A partir de los cuales se calculan el ángulo cenital, el azimut y la elevación solar<sup>3</sup>.

En ingeniería solar es habitual emplear formulaciones aproximadas, ofreciendo una precisión suficiente para gran parte de las aplicaciones, como las expresiones armónicas publicadas por la NOAA [18]. Cuando se requiere alta exactitud (por ejemplo, para calibración de sensores o modelos de referencia), se suele recurrir a las ecuaciones astronómicas de Meeus [14] o al algoritmo SPA del NREL [17], cuya implementación calcula las efemérides solares con una error del orden de  $10^{-4}$  grados.

### 2.2.1. Hora solar y hora oficial

Para calcular el tiempo solar a partir de la hora que se puede leer en un reloj, es necesario realizar diferentes correcciones. La hora oficial en una zona del planeta es una medida de tiempo ligada a un meridiano, denominado huso horario. En la actualidad hay 39 distintos que se cuentan a partir del meridiano de Greenwich, denominado *GMT*, considerándose positivos aquellos al Este de este huso origen. Por ejemplo, en España, aunque se pertenece a la región del meridiano de Greenwich, se utiliza el huso horario de Centroeuropa,  $15^\circ E$ ,  $GMT+1$ . Al adelantar 60 minutos la hora correspondiente, se realiza una corrección [2.2] que tiene en cuenta la distancia angular entre el meridiano local y la longitud del huso horario.

$$\Delta\lambda = \lambda_L - \lambda_H \quad (2.2)$$

---

<sup>3</sup>Estas expresiones han sido seleccionadas y reorganizadas a partir de libros de Perpiñán Lamigueiro [22], Duffie y Beckman [7], Meeus [14] y de NOAA Solar [18] de manera que, considero, hará más fluido y comprensible su contenido al lector. Forman la base del algoritmo SPA [17], que añade correcciones astronómicas adicionales para obtener coordenadas con mayor precisión, utilizado en el programa motivo de este documento.

siendo  $\lambda_L$  la longitud local y  $\lambda_H$  la del huso horario.  $\Delta\lambda$  positiva cuando la localidad está al este del huso horario. Como diferencia adicional, ha de considerarse que algunos estados deciden utilizar un horario de verano, adelantando otros 60 minutos la hora local.

Desde 1972, la medida del día solar medio con GMT (*Greenwich Mean Time*) ha sido sustituida por la UTC (*Coordinated Universal Time*). La relación entre el tiempo solar real y el tiempo solar medio se expresa con la ecuación del tiempo, EoT. Esta expresión considera la órbita elíptica alrededor del Sol y la declinación.

### 2.2.2. Fracción del año

La variación anual de la geometría orbital se representa mediante la fracción del año,  $B$ , definida a partir del número de día  $n$ .

$$B = \frac{360^\circ}{365}(n - 1) \quad (2.3)$$

donde  $n$  = día del año.  $1 \leq n \leq 365$ .  $B$  en grados. Este parámetro se utiliza para modelar la declinación solar y la ecuación del tiempo mediante series senoidales que recogen el comportamiento anual del Sol.

### 2.2.3. Declinación solar

La declinación solar determina la altura máxima que alcanza el Sol a mediodía e introduce la estacionalidad de la radiación. Para aplicaciones comunes se emplea la aproximación armónica propuesta por Cooper(1969) [18]:

$$\delta = 23,45^\circ \sin\left(\frac{360^\circ}{365}(n + 284)\right) \quad (2.4)$$

Las formulaciones astronómicas exactas, basadas en series de la oblicuidad de la eclíptica y la longitud eclíptica del Sol, se encuentran desarrolladas en Meeus [14] y son las que implementa el algoritmo SPA [17].

### 2.2.4. Ecuación del tiempo

La ecuación del tiempo, EoT, cuantifica la diferencia entre el tiempo solar verdadero y el tiempo solar medio. Este desfase se debe a la excentricidad orbital terrestre y a la oblicuidad del eje. Spencer(1971) la expresa de la siguiente manera, en minutos:

$$\begin{aligned} \text{EoT} = & 229,18 \cdot (0,000075 \\ & + 0,001868 \cos(B) - 0,032077 \sin(B)) \\ & - 0,04089 \sin(2B) - 0,014615 \cos(2B) \end{aligned} \quad (2.5)$$

donde  $B$  es la fracción del año en radianes. Valores positivos indican que el Sol está “adelantado” respecto al tiempo medio.

### 2.2.5. Tiempo solar verdadero

A partir de la hora local, la longitud geográfica y la ecuación del tiempo se obtiene el tiempo solar real, TST, definido como:

$$\text{TST}_h = TO - AO + \frac{\Delta\lambda}{15} + \frac{\text{EoT}}{60} \quad (2.6)$$

donde  $TO$  es la hora local y  $AO$  el adelanto durante el horario de verano.  $TO$  y  $AO$  en horas,  $\Delta\lambda$  en grados y EoT en minutos.

### 2.2.6. Ángulo horario

El ángulo horario,  $w$ , representa el desplazamiento angular del Sol respecto al mediodía solar verdadero. Se calcula como:

$$\omega = 15 \cdot (TO - AO - 12) + \Delta\lambda + \frac{\text{EoT}}{4} \quad (2.7)$$

donde  $\omega$ ,  $\Delta\lambda$ , en grados, y EoT está en minutos. Con  $w = 0^\circ$  en el mediodía local, valores positivos por la tarde y negativos por la mañana.

### 2.2.7. Ángulo cenital, elevación y azimut solar

Una vez conocidos la latitud  $\phi$ , la declinación  $\delta$  y el ángulo horario  $w$ , se obtiene el ángulo cenital  $\theta_z$  mediante:

$$\cos \theta_z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos w \quad (2.8)$$

La elevación solar es el complementario del ángulo cenital:

$$\alpha_s = 90^\circ - \theta_z \quad (2.9)$$

El azimut solar puede definirse con varias convenciones. Usando la adoptada por Duffie y Beckman [7], se calcula como:

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin w}{\sin \theta_z} \quad (2.10)$$

y su signo se determina mediante la posición del Sol respecto al meridiano local.

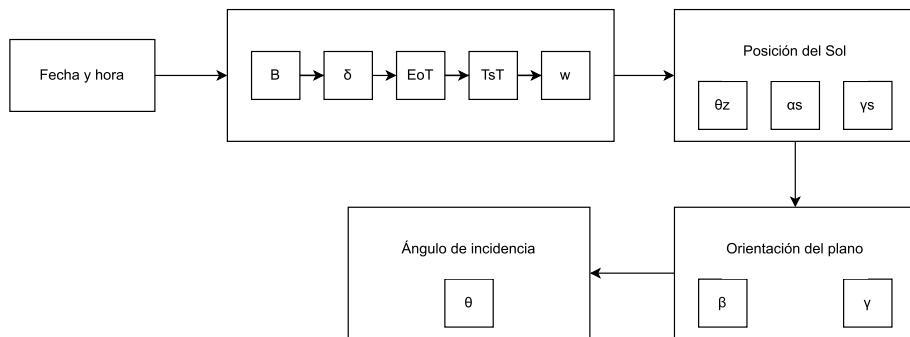


Figura 2.3: Procedimiento de cálculo del ángulo de incidencia

### 2.3. CÁLCULO DE ÁNGULOS DE INCIDENCIA EN LA SUPERFICIE DE LA VENTANA 13

| Símbolo         | Nombre                 | Descripción  |
|-----------------|------------------------|--|
| $\alpha_s$      | Elevación solar        | Ángulo de altura del Sol; $\alpha_s = 90^\circ - \theta_z$ . |
| $AO$            | Adelanto horario       | Horas añadidas por horario de verano ( $AO = 1$ si aplica).  |
| $B$             | Fracción del año       | Variable auxiliar para modelar $\delta$ y la EoT.            |
| $\beta$         | Inclinación            | Ángulo de la superficie respecto a la horizontal.            |
| $\delta$        | Declinación solar      | Ángulo entre los rayos solares y el ecuador terrestre.       |
| $\Delta\lambda$ | Corrección de longitud | Diferencia entre longitud local y la del huso horario.       |
| $\gamma$        | Azimut del plano       | Orientación del plano respecto al sur.                       |
| $\gamma_s$      | Azimut solar           | Ángulo del Sol respecto al meridiano sur (E negativo).       |
| EoT             | Ecuación del tiempo    | Corrección en minutos por variación del día solar.           |
| $n$             | Día del año            | Día juliano simplificado (1–365).                            |
| $\phi$          | Latitud                | Positiva en el hemisferio norte.                             |
| $TO$            | Hora oficial           | Hora civil mostrada en el reloj.                             |
| $TST_h$         | Tiempo solar verdadero | Tiempo solar en horas decimales.                             |
| $\theta$        | Ángulo de incidencia   | Ángulo entre el rayo solar y la normal del plano.            |
| $\theta_z$      | Ángulo cenital         | Ángulo entre la vertical y el rayo solar.                    |
| $w$             | Ángulo horario         | Desplazamiento angular del Sol respecto al mediodía solar.   |

Tabla 2.1: Símbolos utilizados en la geometría solar.

## 2.3. Cálculo de ángulos de incidencia en la superficie de la ventana

Para poder explicar el conjunto de cálculos que transforman las efemérides solares en ángulos de incidencia, es necesario definir la orientación del sistema. El plano de la ventana se sitúa sobre los ejes cardinales orientando las células transversalmente de este a oeste. El rango de operación del sistema óptico de captación de rayos concentra la luz directa reflejada cuando su pan está en el rango de  $90^\circ \leq \gamma \leq 270^\circ$ , pues para unos ángulos de pan y tilt nulos, la concentración de las lentes actúa de norte a sur, siendo imposible la captación de rayos en esta situación en el hemisferio norte. Para entender mejor este concepto, se aporta la Figura 2.4, donde la flecha sobre el plano indica la dirección de concentración de las lentes de fresnel ?? son capaces de concentrar la luz solar, y las líneas transversales simulan la colocación de las células.

### 2.3.1. Transformación de efemérides solares a ángulos de incidencia

Una vez obtenidas las efemérides solares en términos de azimut solar  $\gamma_s$  y elevación solar  $\alpha_s$ , es necesario transformarlas al sistema de referencia del módulo con el fin de calcular los ángulos de incidencia sobre el plano de la ventana. Para ello,

se emplea una transformación geométrica basada en coordenadas cartesianas, que permite encadenar de forma directa las rotaciones asociadas al pan y al tilt del sistema.

### Conversión a coordenadas cartesianas

Partiendo de las coordenadas solares horizontales, se define el vector unitario de dirección solar en un sistema cartesiano local como:

$$\begin{aligned} x &= \cos(\alpha_s) \cos(\gamma_s) \\ y &= \cos(\alpha_s) \sin(\gamma_s) \\ z &= \sin(\alpha_s) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Este vector representa la dirección de incidencia del rayo solar antes de aplicar las rotaciones del módulo.

### Rotación por pan

El movimiento de pan del sistema se modela como una rotación alrededor del eje  $Z$ . Dicha transformación se aplica en sentido horario mediante:

$$\begin{aligned} x_{pan} &= y \sin(\gamma_p) + x \cos(\gamma_p) \\ y_{pan} &= y \cos(\gamma_p) - x \sin(\gamma_p) \\ z_{pan} &= z \end{aligned} \quad (2.12)$$

donde  $\gamma_p$  es el ángulo de pan del módulo.

### Rotación por tilt

Posteriormente, se aplica la rotación correspondiente al tilt del sistema, definida como una rotación alrededor del eje  $Y$ :

$$\begin{aligned} x_{tilt} &= x_{pan} \cos(\beta) - z_{pan} \sin(\beta) \\ y_{tilt} &= y_{pan} \\ z_{tilt} &= x_{pan} \sin(\beta) + z_{pan} \cos(\beta) \end{aligned} \quad (2.13)$$

donde  $\beta$  representa el ángulo de inclinación del módulo.

### Corrección de orientación del módulo

Debido a la naturaleza asimétrica del sistema óptico, cuando el ángulo de tilt supera un valor umbral (por ejemplo  $45^\circ$ ), es necesario realizar una rotación adicional de  $180^\circ$  en azimut para mantener los ángulos de incidencia dentro del rango operativo de las lentes. Esta corrección se implementa mediante una rotación adicional alrededor del eje  $Z$ :

$$\begin{aligned} x' &= y_{tilt} \sin(180^\circ) + x_{tilt} \cos(180^\circ) \\ y' &= y_{tilt} \cos(180^\circ) - x_{tilt} \sin(180^\circ) \\ z' &= z_{tilt} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Este umbral está relacionado con la elevación del sol y varía con la longitud en la que se sitúa la ventana. Para saber con qué inclinación es necesario hacer esta

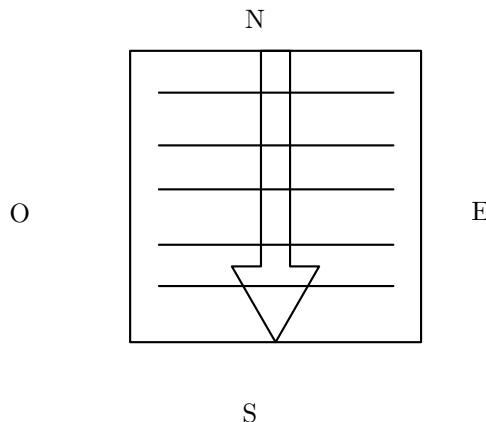


Figura 2.4: Orientación de la ventana para pan y tilt nulos.

transformación, deberá estudiarse la elevación del sol durante todo el año y calcular por encima de qué ángulo de inclinación, las horas de captación del panel son menores que rotándolo 180°. La actuación de esta corrección se llamará *tilt\_correction* en este proyecto.

#### Obtención de efemérides relativas al módulo

A partir del vector solar transformado, se calculan las nuevas coordenadas angulares relativas al módulo:

$$\delta = \arcsin(z') \quad (2.15)$$

$$H = \arctan 2(y', x') \quad (2.16)$$

donde  $\delta$  es la elevación relativa y  $H$  el azimut relativo del Sol respecto al sistema del módulo.

#### Cálculo de los ángulos de incidencia

Finalmente, los ángulos de incidencia longitudinal (AOIL) y transversal (AOIT) se obtienen proyectando el vector solar sobre los planos  $YZ$  y  $XZ$ , respectivamente:

$$\text{AOIL} = \arctan 2(y', z') \quad (2.17)$$

$$\text{AOIT} = \arctan 2(x', z') \quad (2.18)$$

Adicionalmente, el ángulo de incidencia total respecto a la normal del plano se calcula como:

$$\text{AOI} = \arccos(z') \quad (2.19)$$

Este procedimiento permite relacionar de forma directa las efemérides solares con la respuesta geométrica del sistema óptico, manteniendo la coherencia entre el modelo matemático y su implementación en el sistema embebido.

## 2.4. Interpolación bilineal

Para estimar valores continuos a partir de una magnitud definida sobre una malla bidimensional discreta, se ha empleado el método de interpolación bilineal. Este

procedimiento permite aproximar el valor de una función escalar en un punto arbitrario del plano a partir de los valores conocidos en los cuatro nodos más próximos que delimitan la celda en la que se encuentra dicho punto.

Sea una función  $f(x, y)$  definida sobre una malla regular en los ejes  $x$  e  $y$ . Dado un punto de consulta  $(x, y)$  comprendido en el rectángulo delimitado por los nodos:

$$(x_i, y_j), \quad (x_{i+1}, y_j), \quad (x_i, y_{j+1}), \quad (x_{i+1}, y_{j+1}),$$

con valores conocidos:

$$f_{00} = f(x_i, y_j), \quad f_{10} = f(x_{i+1}, y_j), \quad f_{01} = f(x_i, y_{j+1}), \quad f_{11} = f(x_{i+1}, y_{j+1}),$$

se definen los parámetros adimensionales de interpolación como:

$$t_x = \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i}, \quad t_y = \frac{y - y_j}{y_{j+1} - y_j}, \quad (2.20)$$

con  $0 \leq t_x, t_y \leq 1$ .

El procedimiento se realiza en dos etapas. En primer lugar, se interpola linealmente en la dirección  $y$  para los dos valores correspondientes a  $x_i$  y  $x_{i+1}$ :

$$f_0 = f_{00} + t_y(f_{01} - f_{00}), \quad (2.21)$$

$$f_1 = f_{10} + t_y(f_{11} - f_{10}). \quad (2.22)$$

Posteriormente, se interpola linealmente en la dirección  $x$  entre los valores obtenidos:

$$f(x, y) = f_0 + t_x(f_1 - f_0). \quad (2.23)$$

Este método garantiza continuidad en el valor interpolado dentro de cada celda de la malla y constituye una aproximación eficiente y suficientemente precisa cuando la función presenta variaciones suaves entre nodos adyacentes.

## 2.5. Fundamentos de la energía Solar Fotovoltaica

El efecto fotovoltaico es, por definición, "el proceso por el cual se genera una diferencia de potencial entre dos puntos de un material cuando sobre él incide la radiación electromagnética. Se fundamenta en la conversión fotovoltaica, es decir, la transformación de la luz solar en electricidad sin la interferencia de ningún motor térmico. Los equipos fotovoltaicos son robustos, con un diseño simple y requieren muy poco mantenimiento.

### 2.5.1. Células solares

La célula solar es un dispositivo electrónico de estado sólido que constituye la unidad esencial de un sistema de generación de energía. Es el lugar donde la luz solar se convierte en energía eléctrica, empleando como medio material un compuesto semiconductor que transforma la radiación solar en electricidad en un proceso de una sola etapa (absorción-conversión) o dos etapas (captación y absorción) en los sistemas FV de concentración. La energía eléctrica producida se suministra en forma de una corriente eléctrica continua (DC) a una carga externa conectada mediante un circuito a uno o varios grupos de células que se ensamblan en unidades compactas denominadas *módulos fotovoltaicos*, los cuales pueden acoplarse en serie y paralelo hasta alcanzar los niveles de tensión y corriente adecuados [11].

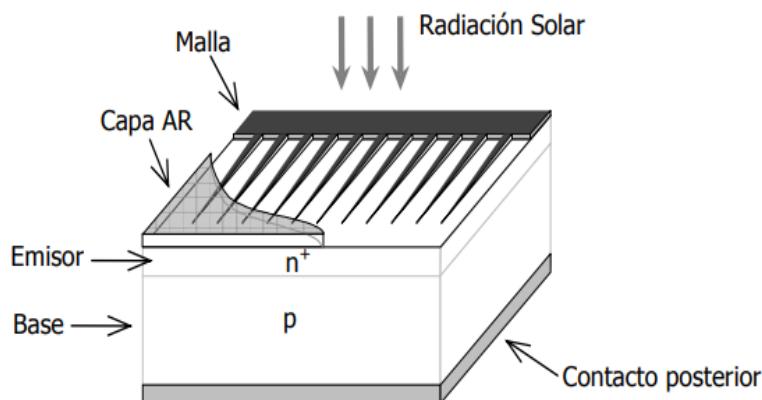


Figura 2.5: Estructura simplificada de una célula fotovoltaica de unión p-n. Las dimensiones relativas de cada elemento se han exagerado para una mejor visualización [11].

### Estructura de una célula fotovoltaica

Los principales elementos o secciones que conforman la estructura simplificada de una célula fotovoltaica se muestran en la Figura 2.5. Desde el punto de vista de los fotones incidentes, comenzando por su cara anterior, encontramos, por este orden:

- Una capa antirreflejante (capa AR), diseñada para reducir al máximo las pérdidas por reflexión superficial. El espesor y el índice de refracción de esta capa (puede ser una capa compuesta de varias) se diseñan de forma que la reflectancia sea mínima a cierta longitud de onda y en un intervalo lo más amplio posible del espectro. Además de estas capas, muchas células presentan superficies dotadas de surcos, micro-pirámides y otras texturas creadas para reducir aún más las pérdidas por reflexión.
- Una malla de metalización, representada en forma de peine en la Figura 2.5, pero que puede presentar diversas formas. El diseño de esta malla es crítico, pues debe garantizar una colección adecuada de los electrones del dispositivo, sin introducir una resistencia eléctrica elevada, pero al mismo tiempo debe dejar pasar la mayor cantidad posible al interior del dispositivo. Si parámetro más característico es el *factor de sombra*,  $F_s$ , que mide la cantidad de superficie ocupada por los dedos metálicos respecto al área total del dispositivo.
- Las capas activas de material semiconductor, en el que distinguimos entre las dos regiones que forman la unión p-n (denominadas *emisor* y *base*). Habitualmente, estas capas activas aparecen depositadas o crecidas sobre un sustrato más grueso que confiere mayor resistencia mecánica al conjunto. Además del tipo y la calidad del semiconductor empleados, el espesor de las capas y la densidad o concentración de impurezas influyen notablemente en el rendimiento final del dispositivo.
- El contacto metálico posterior, que suele realizarse metalizando toda la superficie del dispositivo cuando no existe el requisito de que ésta reciba luz por su parte posterior [11].

### Principio de funcionamiento de las células solares

Se puede dividir en tres procedimientos esenciales:

1. El semiconductor electrónico absorbe los fotones para generar los portadores de carga (pares electrón-hueco). La absorción de un fotón con energía  $E_f$  mayor que la energía de banda prohibida,  $E_F$ , del material semiconductor dopado significa que su energía se utiliza para excitar un electrón desde la banda de valencia,  $E_V$ , hacia la banda de conducción,  $E_C$ , dejando un vacío (hueco) en el nivel de valencia. La energía cinética adicional se transfiere al electrón o al hueco mediante la energía sobrante del fotón ( $h\nu - h\nu_0$ ).  $h\nu_0$  es la energía mínima o función de trabajo del semiconductor necesaria para generar un par electrón-hueco. La energía excedente se disipa como calor en el semiconductor.
2. Posteriormente, tiene lugar la separación de los portadores de carga generados por la luz. En un circuito solar externo, los huecos pueden alejarse de la unión a través de la región p, y los electrones pueden salir a través de la región n y pasar por el circuito antes de recombinarse con los huecos.
3. Por último, los electrones separados pueden utilizarse para accionar un circuito eléctrico. Después de que los electrones hayan circulado por el circuito, se recombinan con los agujeros.

El tipo n debe ser más fino que el tipo p. De esta manera, los electrones pueden pasar a través del circuito en un corto periodo de tiempo y generar una corriente antes de recombinarse con los agujeros [1].

#### 2.5.2. Teoría de semiconductores

##### Semiconductor tipo n

Un semiconductor extrínseco que ha sido dopado con átomos donadores de electrones se llama *semiconductor de tipo n* (Subfigura 2.6a), pues sus portadores de carga en la red cristalina son electrones negativos. La estructura cristalina del silicio contiene cuatro enlaces covalentes de cuatro electrones de valencia, por lo que necesita que se le añadan impurezas pentavalentes, con cinco electrones, que actúan como donantes. Algunos dopantes pentavalentes utilizados son el arsénico, el fósforo o el antimonio, contribuyendo a la formación de electrones libres y aumentando su conductividad en gran medida.

##### Semiconductor tipo p

Cuando un semiconductor ha sido dopado con átomos aceptores de electrones se denomina *semiconductor de tipo p* (Subfigura 2.6b), pues la mayoría de los portadores de carga de la red cristalina son agujeros de electrones -portadores de carga positiva-. El silicio se dopa con elementos trivalentes (grupo III) que funcionan como aceptores y reemplazan átomos de silicio en el cristal, creando un agujero de electrones. Estos agujeros suponen la falta de un electrón en una posición en la que puede existir uno. El boro, el aluminio o el galio, son algunos de los dopantes trivalentes que se utilizan para crear semiconductores de tipo p.

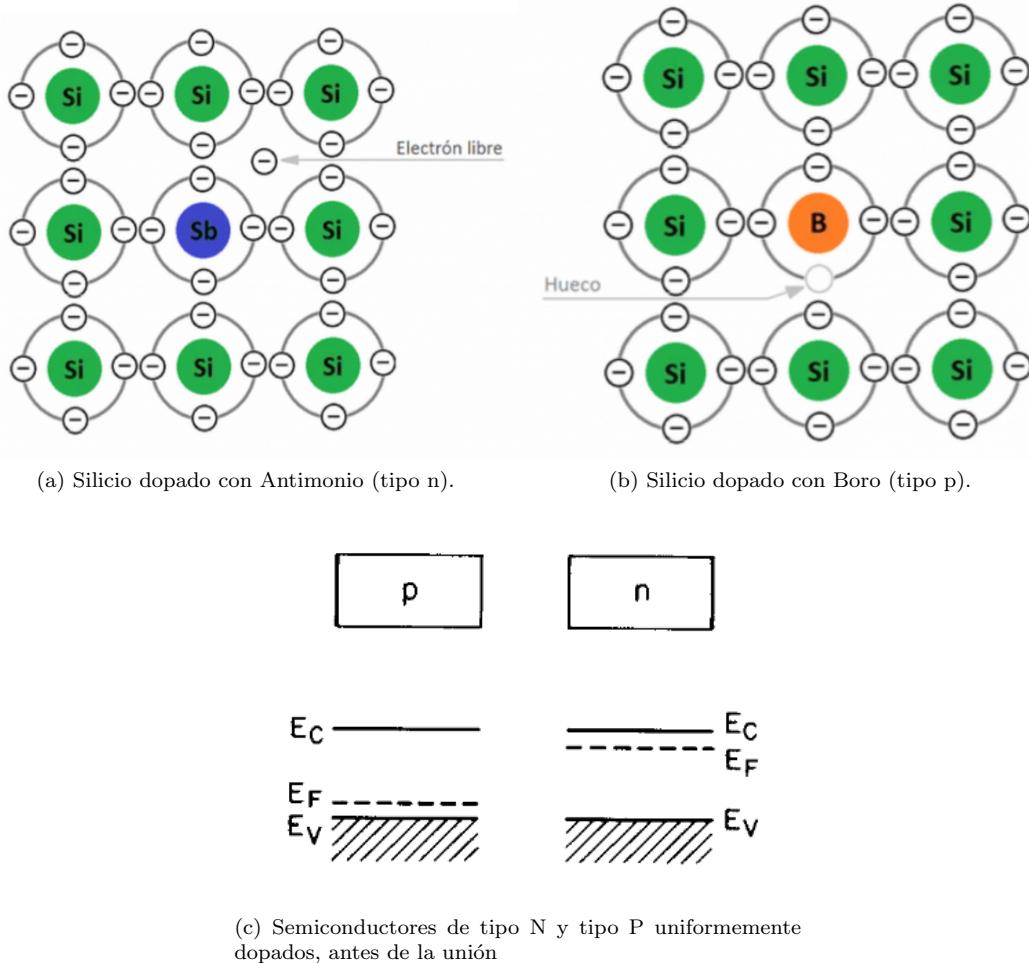


Figura 2.6: Semiconductores tipo p y tipo n. (a) y (b) de HelioEsfera. (c) de UPV.

### 2.5.3. Unión *p-n*

La unión *p-n* se genera al poner en contacto dos regiones de un semiconductor dopadas de forma distinta. Se produce un desequilibrio debido a la diferente concentración de electrones y huecos en cada cristal. Para alcanzar el equilibrio se produce la difusión de portadores mayoritarios, apareciendo un movimiento de huecos desde el cristal p al cristal n, quedando p cargado negativamente. Al mismo tiempo se ocasiona un movimiento de electrones desde el cristal n al cristal p, quedando n cargado positivamente y generando un campo eléctrico en esta dirección, contraria a la de difusión.

Se alcanza un equilibrio cuando ambos movimientos, arrastre y difusión, se compensan, recombiniéndose y formando enlaces de electrones que provienen de p a huecos de n y viceversa. Esta recombinación se produce en la zona cercana a la unión, denominada zona de carga del espacio.

La región de carga del espacio, también llamada *zona de deplexión*, es la zona alrededor de la unión en la que los portadores libres han desaparecido debido a la recombinación, quedando únicamente los iones fijos ligados a la red cristalina. Estos iones generan un campo eléctrico interno que crea la barrera de potencial

característica de la unión p-n e impide el paso de portadores mayoritarios entre ambos cristales, alcanzando equilibrio y anulando la corriente eléctrica.

Para conseguir la circulación de corriente a través de la unión p-n, es necesario romper el equilibrio alcanzado polarizándola —aplicando una diferencia de potencial base emisor— de dos formas distintas [22]:

- **Polarización directa:** el lado p adquiere tensión positiva y el n negativa. Se reduce la barrera de potencial y la corriente de arrastre disminuye, no pudiendo compensar la de difusión. Aparece un flujo neto de corriente y los huecos de p pueden atravesar la zona de carga de espacio, siendo inyectados en la zona n, donde son portadores minoritarios. En la zona de carga se origina un proceso de difusión y recombinación debido a un exceso de huecos. Lo mismo puede decirse de los electrones de la zona n. De esta forma, aparecen dos corrientes contrarias pero de distinto signo, por lo que en lugar de anularse, originan una corriente total aprovechable. El criterio convencional en electricidad toma como sentido de la corriente el debido a las cargas positivas, entrando la corriente en la unión por la zona p y saliendo por la zona n.
- **Polarización inversa:** si la diferencia de potencial aplicada consigue que la zona n esté a mayor tensión que la zona p, la unión se polariza a la inversa. La barrera de potencial queda reforzada en la unión y el paso de portadores de una zona a otra queda aún más debilitado. Así, la corriente que atraviesa la unión en polarización inversa es de muy bajo valor.

#### 2.5.4. Conversión fotovoltaica

Los fotones incidentes sobre la unión p-n aportan energía para que los electrones se desplacen a la banda de conducción, generando un campo eléctrico interno que permite separar los portadores generados, evitando su recombinación inmediata. Esta corriente de iluminación, *fotocorriente*, puede ser aprovechada por un circuito externo. La presencia de tensión en los terminales p-n favorece los procesos de recombinación y constituyen la corriente del diodo. De esta forma, en una unión p-n iluminada se encuentran la fotocorriente, generada por la incidencia de los fotones y que circula de n a p, y la corriente de diodo, debida a la recombinación de portadores, que lo hace de p a n. Esta corriente puede expresarse de la siguiente manera (Subfigura 2.8a[22]) :

$$I = I_L - I_D \quad (2.24)$$

donde  $I_L$  es la fotocorriente e  $I_D$  es la corriente de diodo.

$$I_D = I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{V}{m \cdot V_T}\right) - 1 \right] \quad (2.25)$$

donde  $I_0$  es la *corriente inversa de saturación del diodo*,  $m$  es el *factor de idealidad del diodo*, parámetro adimensional con valores típicos entre 1 y 2, y  $V_T$  es el denominado *voltaje térmico*, que tiene la siguiente expresión:

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (2.26)$$

siendo  $k$  la constante de Boltzmann,  $T$  la temperatura absouta y  $q$  la carga del electrón. Su valor típico a 300K es de 26mV

### La unión p-n iluminada

El fenómeno de generación de portadores por efecto fotoeléctrico depende de la frecuencia de los fotones incidentes. La energía que porta un fotón se expresa en 2.27 y la frecuencia del fotón, en 2.28. Si el fotón es poco energético, es decir, su energía es menor que la necesaria para sobrepasar la banda prohibida, atraviesa el semiconductor como si fuera transparente y supone las pérdidas de no-absorción. Los fotones con  $E_f > E_F$  son absorbidos aunque, debido a la anchura finita del semiconductor y su coeficiente de absorción, parte de estos fotones no se absorben y constituyen las pérdidas de transmisión (Subfigura 2.8b[22]).

La diferencia entre los índices de refracción del aire y el dispositivo provoca pérdidas por reflexión. Para reducirlas, se recurre a capas que adaptan los índices de refracción del aire y del dispositivo, y al texturizado de la superficie para conseguir que el rayo de luz reflejado vuelva a introducirse en el material [22].

La expresión que describe la energía de un fotón es la siguiente:

$$E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.27)$$

donde  $h$  es la constante de Planck,  $c$  la velocidad de la luz en el vacío y  $\lambda$  la longitud de onda del fotón; siendo

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2.28)$$

la frecuencia del fotón.

### 2.5.5. Caracterización eléctrica de una célula fotovoltaica: curva I-V

La caracterización del comportamiento eléctrico de una célula solar se realiza mediante una ecuación ideal conocida como el *modelo de una exponencial*, que da forma a la curva corriente-tensión (curva I-V), obtenida a partir de la respuesta del dispositivo frente a diferentes valores de carga bajo unas condiciones determinadas de irradiancia y temperatura. La curva I-V (Figura 2.9) permite evaluar los parámetros más relevantes del dispositivo fotovoltaico y su rendimiento global. La corriente  $I$  de la célula [2.24] resulta del balance de la corriente producida por la luz incidente y la correspondiente al diodo de unión p-n que forma su núcleo.

A partir de la curva I-V se definen varios parámetros fundamentales:

- **Corriente de cortocircuito,  $I_{SC}$ :** corriente máxima suministrada por la célula bajo iluminación cuando la tensión es nula ( $V = 0$ ). Está directamente relacionada con la irradiancia y con la capacidad de generación de portadores.

$$I_{SC} = I(V = 0) = I_L \quad (2.29)$$

- **Tensión de circuito abierto,  $V_{OC}$ :** tensión máxima del dispositivo cuando la corriente es cero ( $I = 0$ ). Depende del campo eléctrico interno, la recombinación y la temperatura.

- **Punto de máxima potencia,  $MPP$ :** punto de operación en el que el producto  $I \cdot V$  es máximo, definiendo la máxima energía eléctrica que puede entregar la célula.

$$MPP = I_{mpp} \cdot V_{mpp} \quad (2.30)$$

donde  $V_{mpp}$  e  $I_{mpp}$  son la tensión y la corriente en el punto de máxima potencia.

- **Factor de forma,  $FF$ :** indica la calidad de la curva I-V y se define como

$$FF = \frac{MPP}{I_{SC}V_{OC}} \quad (2.31)$$

- **Eficiencia,  $\eta$ :** relación entre la potencia máxima entregada por la célula y la potencia radiante incidente sobre su superficie.

Las condiciones externas influyen de manera significativa en la curva I-V. La irradiancia afecta principalmente a  $I_{sc}$ , mientras que la temperatura tiene un impacto notable en  $V_{oc}$  debido al aumento de la corriente de saturación del diodo. La presencia de resistencias parásitas también modifica la curva, reduciendo el factor de forma y, por tanto, la eficiencia del dispositivo.

El análisis completo de la curva I-V proporciona información esencial para el diseño, simulación y evaluación del rendimiento de sistemas fotovoltaicos, constituyendo una herramienta imprescindible tanto en laboratorio como en campo.

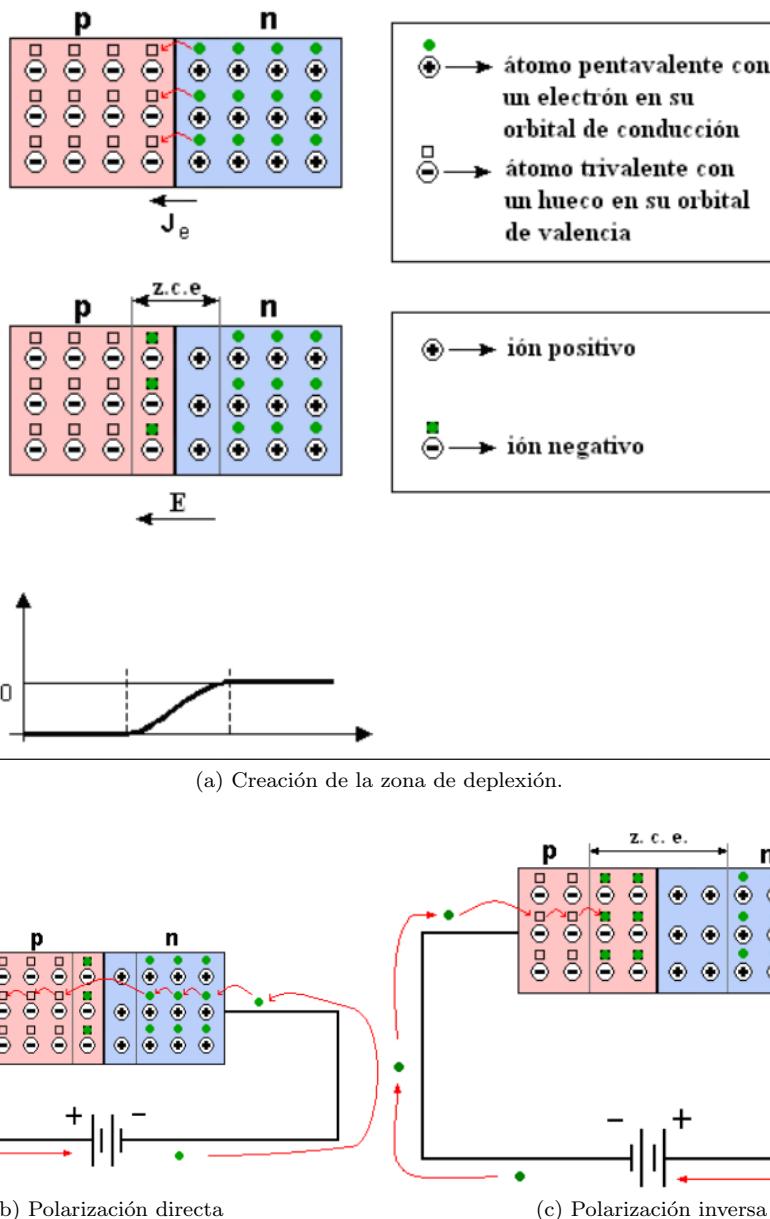
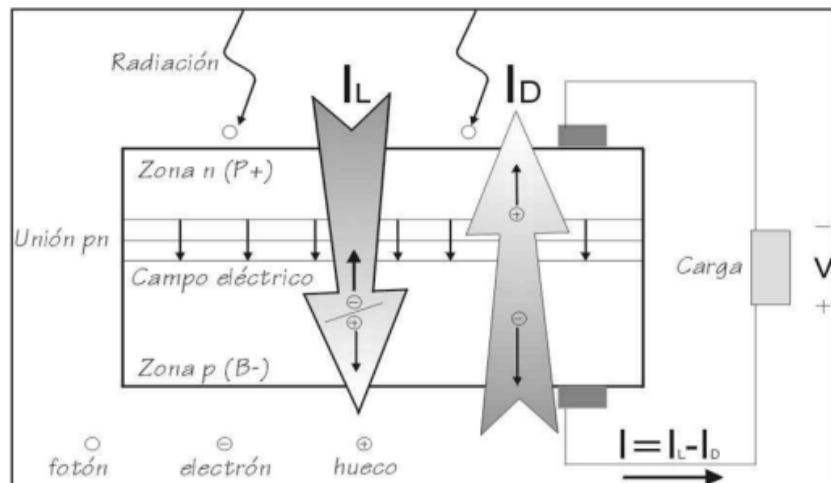
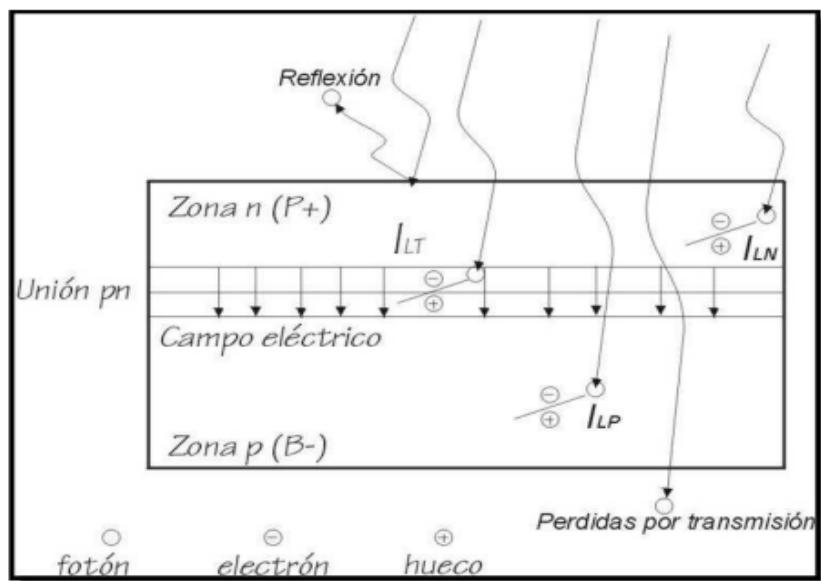


Figura 2.7: Polarización de la unión p-n.

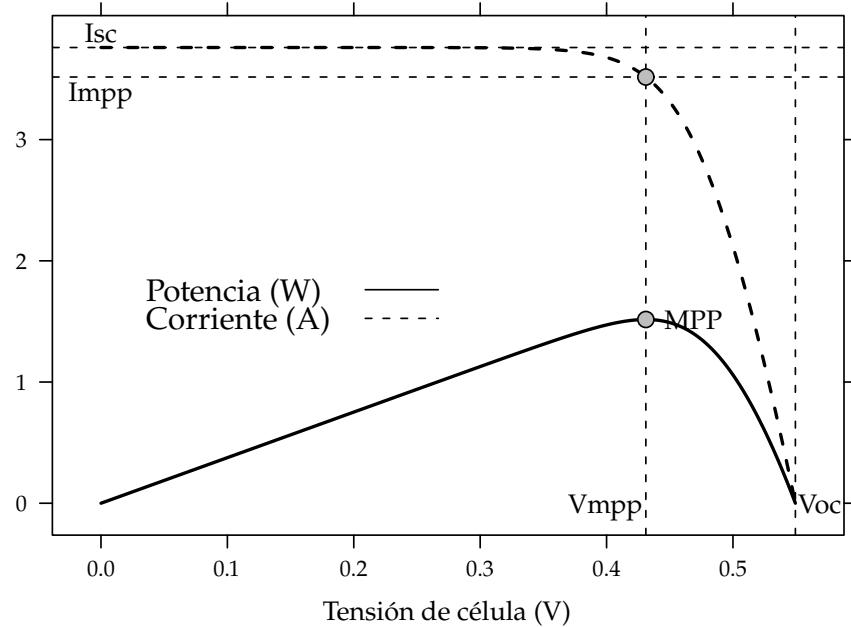


(a) Corriente de iluminación y corriente de diodo en una célula solar que alimenta una carga

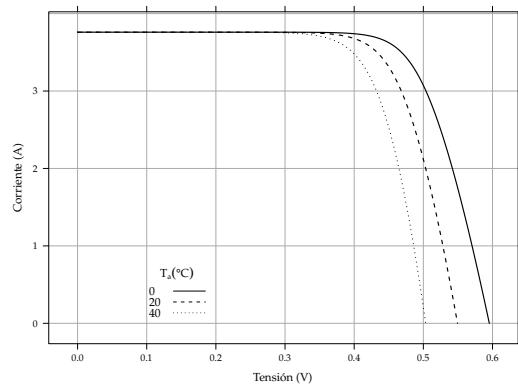


(b) Pérdidas de transmisión, reflexión y recombinación en una célula solar

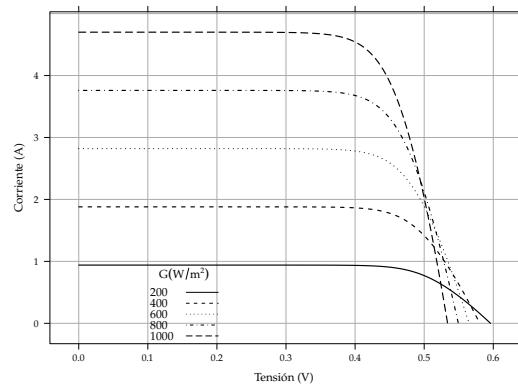
Figura 2.8: Iluminación sobre una célula solar



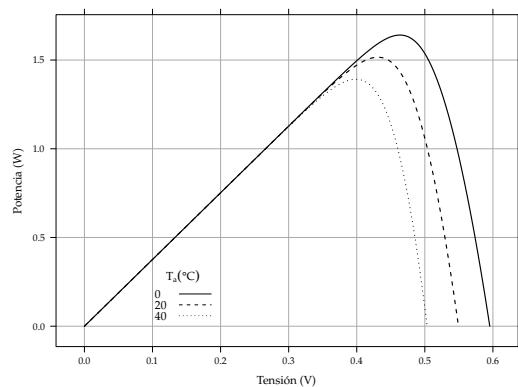
(a) Curvas con parámetros característicos



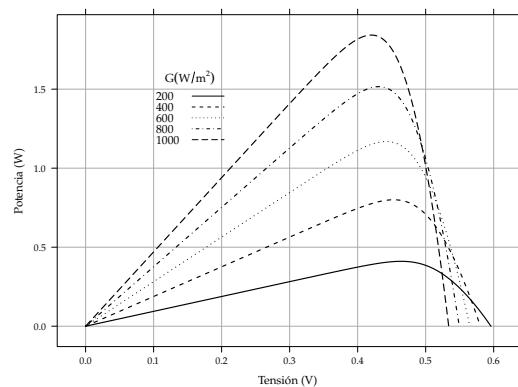
(b) Curvas I-V a diferentes temperaturas



(c) Curvas I-V con irradiancias distintas



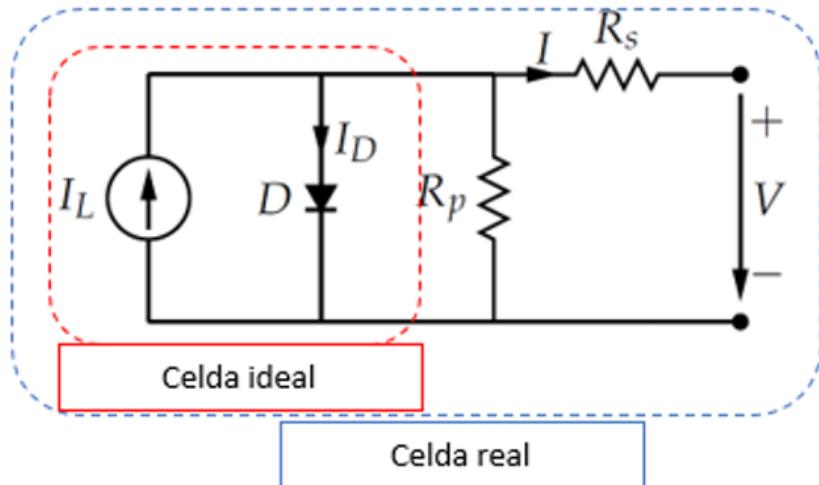
(d) Curvas P-V con diferentes temperaturas



(e) Curvas P-V con irradiancias distintas

Figura 2.9: Curvas I-V y P-V

### 2.5.6. Pérdidas: circuito equivalente



Para poder describir el funcionamiento real de una célula fotovoltaica es necesario conocer las distintas pérdidas que aparecen, que deberán ser controladas en la medida de lo posible. Una de las principales pérdidas es debida a la resistencia en serie,  $R_S$ , cuyas contribuciones provienen de la resistencia al paso de la corriente en los semiconductores, de las diferentes concentraciones de impurezas y de la malla de metalización, cuya aportación a las pérdidas está ligada al diseño de esta, pues si es excesivamente fina aumenta considerablemente y, si tienen mayor grosor para reducir  $R_S$ , aumenta el factor de sombra y se reduce la eficiencia de la célula.

La resistencia de fugas,  $R_P$ , es la aportación de diversas causas debidas a imperfecciones o defectos en la estructura cristalina o de la unión p-n de la célula. Se caracterizan como una resistencia en paralelo con el dispositivo. Suele tener un valor muy elevado y poca importancia en el funcionamiento, disminuyendo aún más en las células que operan bajo luz concentrada.

La expresión de 2.24 con las pérdidas añadidas quedaría entonces de la siguiente manera:

$$I = I_L - I_0 \cdot [\exp\left(\frac{V}{m \cdot V_T}\right) - 1] - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (2.32)$$

## 2.6. Módulos fotovoltaicos

Un módulo fotovoltaico es la agrupación básica de células solares, conectadas en serie o paralelo, para optimizar y ajustar la cantidad de energía que producen. Varios módulos fotovoltaicos conforman un panel solar que puede agruparse de distintas maneras, como se puede ver en la Figura 2.10, formando un *array*. Estos *arrays* constituyen la unidad de generación que constituye un campo fotovoltaico.

### 2.6.1. Estructura y componentes de un módulo fotovoltaico

Un módulo fotovoltaico tiene sus células ensambladas dentro de una estructura multicapa que garantiza su protección mecánica, su aislamiento eléctrico y la durabilidad necesaria para operar durante décadas en exteriores. La mayoría de los

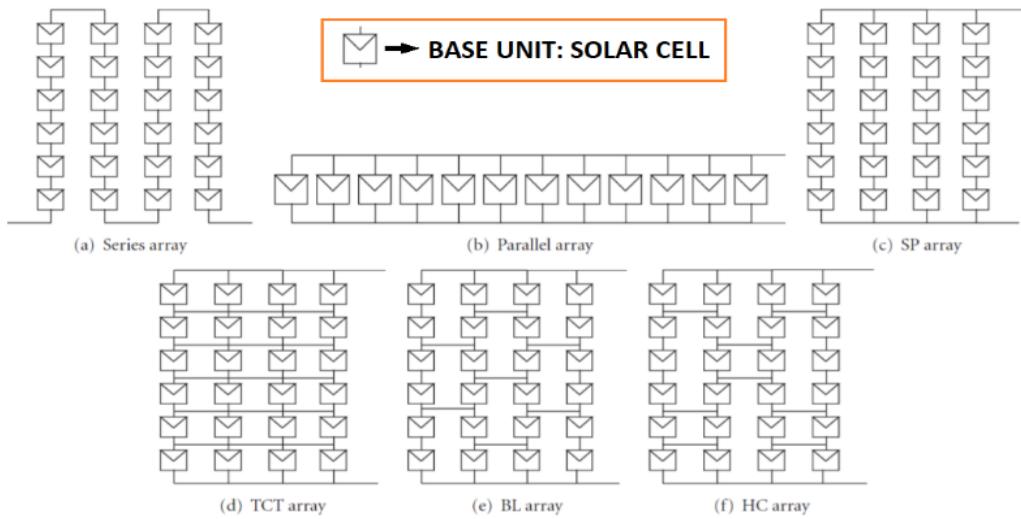


Figura 2.10: Diferentes asociaciones de células y configuraciones de módulos [12]

módulos comerciales comparten los mismos elementos fundamentales, que se describen a continuación.

### Vidrio frontal

El vidrio frontal es la primera capa expuesta a la radiación incidente. Habitualmente se emplea vidrio templado de bajo contenido en hierro para maximizar la transmitancia óptica y minimizar las pérdidas por absorción. Permite el paso del mayor número posible de fotones hacia las células y ofrece una elevada resistencia frente a impactos, abrasión o cargas mecánicas (viento, nieve, dilataciones térmicas).

### Encapsulante frontal y trasero

Entre el vidrio frontal, las células solares y la capa posterior se sitúan las láminas encapsulantes. Su misión principal es proteger las células frente a la humedad, oxidación y vibraciones, además de garantizar la adhesión entre las distintas capas del módulo. El material más empleado es el EVA (Etil-Vinil-Acetato), aunque en diseños de mayor durabilidad también se utilizan películas de POE (Poliolefina Elastómera). Durante el proceso de laminación, el encapsulante se funde y envuelve completamente las células, fijándolas en su posición y asegurando su aislamiento.

### Células solares

Se disponen normalmente en serie para aumentar la tensión de salida, aunque algunos módulos combinan conexiones serie-paralelo para equilibrar corriente, tensión y tolerancia a sombras. Su número depende del diseño, siendo habituales configuraciones de 36, 60, 72 o 144 medias células en los módulos actuales. Las células

quedan inmersas en el encapsulante, lo que evita roturas, microfisuras y corrosión de los contactos metálicos.

### **Recubrimiento trasero**

En la parte posterior del módulo se encuentra el recubrimiento trasero, que puede ser una lámina polimérica multicapa o una segunda lámina de vidrio en el caso de los módulos vidrio–vidrio. Su función es proteger eléctricamente la parte trasera, impedir la entrada de humedad y aportar estabilidad mecánica al conjunto. Los módulos vidrio–vidrio ofrecen mayor durabilidad y resistencia frente a degradación, aunque son más pesados.

### **Marco**

Muchos módulos incorporan un marco periférico de aluminio anodizado. Este elemento facilita la manipulación, el montaje sobre la estructura y la disipación térmica, además de proporcionar rigidez y resistencia frente a torsión y cargas mecánicas. También cumple un papel relevante en la conexión a tierra del módulo. Existen módulos sin marco, cada vez más comunes en sistemas BIPV, donde la integración arquitectónica es prioritaria.

### **Caja de conexiones**

En la parte posterior se sitúa la caja de conexiones, donde convergen los terminales positivos y negativos del módulo. En su interior se alojan uno o varios diodos de bypass, cuya función es evitar puntos calientes y proteger las células cuando parte del módulo queda sombreada. La caja suele estar sellada para evitar la entrada de humedad y se conecta mediante cables y conectores estandarizados al resto del sistema.

### **2.6.2. Tipos de arrays fotovoltaicos**

Los *arrays* de paneles solares comerciales pueden ser fijos, orientados al Sur en el hemisferio Norte y hacia el Norte en el hemisferio Sur, o móviles, rotando siguiendo el movimiento del Sol. Pueden configurarse de dos maneras distintas, con una fila de paneles en vertical (configuración V), o con dos hileras verticales (configuración 2V). Dependiendo de las características de captación de luz, pueden ser monofaciales, captando radiación solar solo por una cara del panel, y bifaciales, haciéndolo por ambas. A su vez, pueden estar dispuestos o no de lentes de concentración, que concentran la radiación solar directa de una superficie del panel en la célula, cuyas propiedades concretas se tratan en ??.

Los paneles fijos deben tener una inclinación que está relacionada con el ángulo óptimo, que será igual a la latitud donde se encuentre el panel, recomendándose evitar inclinaciones menores a los 15° para favorecer la limpieza de las partículas que se depositen en el panel con la lluvia.

Es importante considerar la sombra que proyectan los paneles sobre la superficie para instalar filas una detrás de otra. Cada *array* de módulos fotovoltaicos debe tener una separación que se calcula típicamente con la siguiente expresión:

$$D_p = \frac{h}{\tan(61^\circ - \text{latitud})} \quad (2.33)$$

donde  $D_p$  es la distancia entre filas,  $h$  la altura máxima del panel y la latitud es aquella en la que se encuentra el panel, en grados.

A continuación, se hará una breve descripción y comparación de estas disposiciones.

- **Paneles monofaciales:** son los más comunes en instalaciones fotovoltaicas. Este tipo de módulo solo aprovecha la radiación incidente en su cara frontal, por lo que suelen instalarse sobre estructuras inclinadas con el ángulo óptimo para maximizar la captación directa. Por dar una referencia de módulos comerciales, Trina Solar tiene una serie de paneles monofaciales con una potencia de 430–460W con eficiencias entre  $\approx 21,5\%$  y  $23,0\%$  bajo condiciones estándar de funcionamiento.
- **Paneles bifaciales:** permiten la captación de radiación por ambas caras. Sus tituyen el recubrimiento trasero opaco por una lámina de vidrio y la caja de conexiones es más compacta para evitar sombreado. La ganancia bifacial depende del albedo, la distancia al suelo, la inclinación y el sombreado estructural. De manera general, el incremento de energía se sitúa entre un 5% y un 20%, pudiendo alcanzarse valores del orden del 30% en terrenos con alto albedo o configuraciones elevadas [5, 8]. Por este motivo, estas tecnologías suelen utilizarse con estructuras más altas y en configuraciones que permitan la entrada de radiación difusa y reflejada.
- **Configuración V:** la estructura que soporta los paneles únicamente dispone de un *array* vertical. Es la opción más utilizada cuando la superficie disponible no es limitada, ya que presenta la mejor relación entre coste y energía generada. Su comportamiento es equivalente al de los paneles inclinados convencionales, aunque con mayor distancia entre filas para evitar sombras.
- **Configuración 2V:** en este caso, la estructura sostiene dos *arrays* verticales, uno sobre otro. La mayor altura permite aumentar la captación total de radiación y la energía generada por metro lineal de estructura. Dependiendo del diseño de la planta y del albedo del terreno, la producción anual puede aumentar entre un 10% y un 20% respecto a una configuración V equivalente [13]. Este tipo de instalación se utiliza cuando se desea maximizar la energía por unidad de longitud o cuando la superficie disponible es limitada.
- **Seguidores solares:** son *arrays* que incluyen un sistema mecánico para variar su orientación siguiendo la trayectoria solar. Los seguidores de un eje (rotación Este-Oeste) suelen incrementar la generación anual entre un 15% y un 25% respecto a estructuras fijas optimizadas [15]. Los seguidores de dos ejes, mucho menos empleados por su mayor coste, permiten un seguimiento completo del Sol y pueden aumentar la energía producida en torno a un 35–40% respecto a un sistema fijo.

Como se ha introducido en la sección 1, el empleo del suelo es limitado y restringe su explotación para otro tipo de actividades. Por esta razón, cada vez está tomando más protagonismo la integración fotovoltaica en edificios.



Figura 2.11: Distintas distribuciones de arrays en campos solares

### 2.6.3. BIPV

La energía solar fotovoltaica integrada en edificios, Building Integrated Photovoltaics en Inglés, es un método por el cual los módulos PV pueden ser incorporados en la fachada y la techumbre de los edificios [10].

#### Ventanas BIPV

Las ventanas BIPV integran células solares en el acristalamiento. No solo interesa que produzcan electricidad, sino que también pueden suponer un componente estético para el edificio y proporcionar un efecto de sombreado de persiana en el interior [21].

Desde un punto de vista conceptual, las soluciones BIPV permiten que los elementos constructivos tradicionales asuman simultáneamente una función energética. En el caso de las ventanas, esta integración plantea un compromiso entre generación eléctrica, transmisión luminosa y confort visual, ya que el acristalamiento deja de ser un elemento ópticamente neutro.

En función de la tecnología empleada, las ventanas BIPV pueden actuar como elementos semitransparentes, filtros espectrales o sistemas de sombreado activo, modificando tanto la cantidad como la calidad de la radiación que penetra en el interior del edificio. Este doble papel, como cerramiento y como sistema energético, convierte a las ventanas BIPV en un caso particular dentro de la integración fotovoltaica en edificios, donde las consideraciones ópticas adquieren un peso relevante en el diseño del sistema.

## 2.7. Óptica geométrica

La óptica geométrica proporciona un marco simplificado para el análisis de sistemas ópticos en los que la propagación de la luz puede aproximarse mediante trayectorias rectilíneas [9].

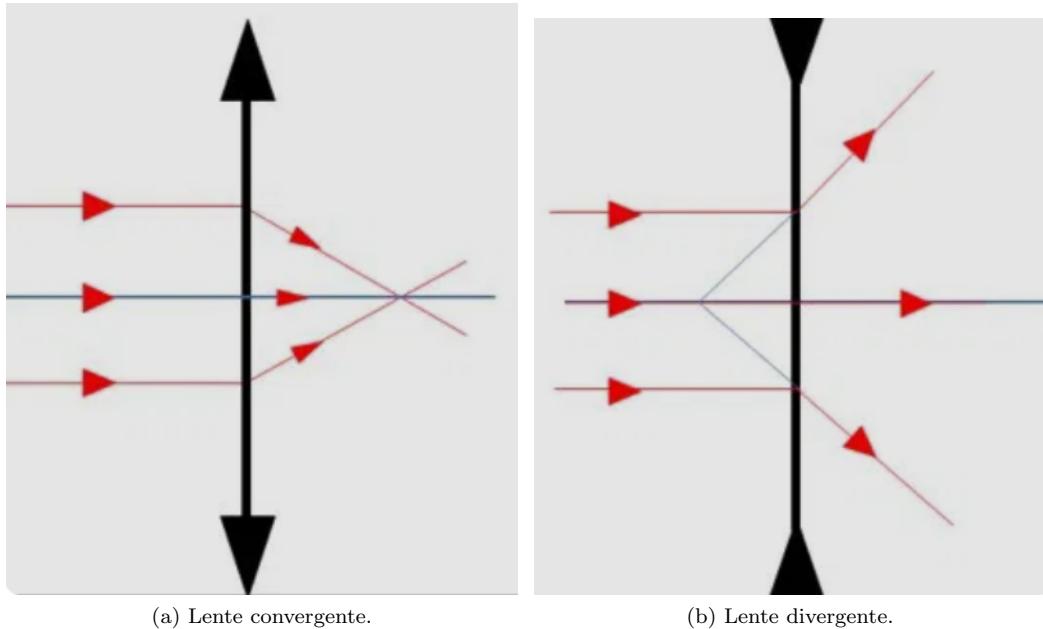


Figura 2.12: Lentes delgadas.

### 2.7.1. Principio de Fermat

El principio de Fermat establece que la trayectoria que sigue un rayo de luz entre dos puntos es aquella en la que el tiempo empleado es mínimo, o más precisamente, estacionario (un mínimo, un máximo o un punto de inflexión) respecto a posibles variaciones cercanas, lo que en la práctica suele ser el tiempo mínimo. Este principio constituye la base teórica a partir de la cual se describen fenómenos como la reflexión y la refracción, y resulta especialmente útil para el análisis de sistemas ópticos formados por superficies refractantes.

### 2.7.2. Refracción de la luz y ley de Snell

Cuando un rayo de luz atraviesa la frontera entre dos medios transparentes con distinto índice de refracción, su dirección de propagación cambia, fenómeno conocido como refracción. Este comportamiento se describe mediante la ley de Snell, que relaciona los ángulos de incidencia y refracción con los índices ópticos de ambos medios.

Desde el punto de vista de la óptica geométrica, la refracción puede interpretarse como una consecuencia directa del principio de Fermat, ya que el rayo adopta la trayectoria que minimiza el tiempo de propagación al atravesar materiales con diferentes velocidades de la luz. Este principio es fundamental para comprender el funcionamiento de sistemas ópticos basados en lentes, donde la desviación controlada de los rayos permite modificar su convergencia o divergencia.

### 2.7.3. Lentes delgadas

Una lente es un sistema óptico que modifica la trayectoria de los rayos luminosos mediante refracción en sus superficies. En función de su geometría, las lentes pueden clasificarse como convergentes o divergentes (Figura 2.12).

Las lentes convergentes hacen que rayos inicialmente paralelos al eje óptico se concentren en un punto denominado foco, mientras que las lentes divergentes separan los rayos, produciendo un foco virtual. La distancia entre la lente y el foco define la distancia focal, parámetro clave en el diseño de sistemas ópticos de concentración.

En aplicaciones de captación solar, las lentes convergentes permiten aumentar la densidad de potencia luminosa sobre una superficie reducida, facilitando el uso de células fotovoltaicas de menor área y mejorando la eficiencia del sistema.

### Ecuación de la lente delgada

Bajo la aproximación de lente delgada, válida cuando el espesor de la lente es pequeño frente a las distancias características del sistema, la formación de imagen puede describirse mediante una relación sencilla entre la distancia al objeto  $s$ , la distancia a la imagen  $s'$  y la distancia focal  $f$ :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \quad (2.34)$$

donde  $f$  es la distancia focal de la lente,  $s$  la distancia del objeto a la lente y  $s'$  la distancia de la imagen formada.

En el caso particular de una fuente situada en el infinito —como ocurre de forma aproximada con la radiación solar—, los rayos incidentes pueden considerarse paralelos y la imagen se forma en el plano focal de la lente.

### Ecuación del fabricante de lentes

La distancia focal de una lente no es un parámetro arbitrario, sino que depende de la geometría de sus superficies y del índice de refracción del material. Para una lente delgada inmersa en aire, esta dependencia puede expresarse como:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.35)$$

donde  $n$  es el índice de refracción del material de la lente, y  $R_1$  y  $R_2$  son los radios de curvatura de sus caras anterior y posterior, respectivamente. Esta expresión muestra cómo la capacidad de una lente para desviar y concentrar la luz está directamente relacionada con la curvatura de sus superficies.

### Desplazamiento del foco y dependencia angular

Desde el punto de vista geométrico, el comportamiento puede analizarse aplicando la formulación de lente delgada en el plano de curvatura, mientras que en la dirección perpendicular no se produce enfoque. Esta característica resulta especialmente adecuada para sistemas en los que el movimiento relativo entre la fuente y el concentrador se produce principalmente a lo largo de un eje.

Cuando la radiación incidente no es normal a la lente, el foco deja de situarse sobre el eje óptico y se produce un desplazamiento lateral de la línea focal. Para pequeños ángulos de incidencia  $\theta$ , este desplazamiento puede aproximarse como:

$$\Delta x \approx f \tan \theta \quad (2.36)$$

Este efecto es especialmente relevante en aplicaciones solares, ya que la posición del foco varía continuamente a lo largo del día debido al movimiento aparente del Sol. En sistemas de concentración estáticos, este desplazamiento reduce la eficiencia de captación, mientras que en sistemas con seguimiento permite definir estrategias de control para mantener el receptor alineado con la región de máxima concentración.

#### 2.7.4. Concentración de la radiación solar

La concentración óptica consiste en redirigir la radiación incidente desde una superficie de entrada amplia hacia una región de salida más pequeña, aumentando la irradiancia efectiva sobre el receptor. Este principio se emplea ampliamente en sistemas solares fotovoltaicos para reducir la cantidad de material activo necesario.

Desde el punto de vista geométrico, la concentración se logra controlando el ángulo de incidencia y la trayectoria de los rayos mediante elementos ópticos pasivos. No obstante, la eficiencia del proceso depende fuertemente de la posición relativa entre la fuente, el sistema óptico y el receptor, así como de las pérdidas por reflexión y aberraciones.

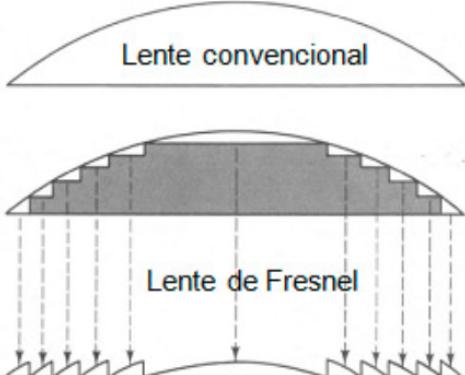
#### 2.7.5. Lente de Fresnel

Una lente de Fresnel puede definirse como una lente ordinaria “segmentada” en anillos concéntricos o tiras longitudinales, donde cada sección conserva la geometría óptica necesaria para desviar los rayos de igual manera que lo haría una lente gruesa de curvatura continua [20]. Esta segmentación permite que la lente mantenga su distancia focal, eliminando la mayor parte del material y reduciendo peso y espesor. Existen dos configuraciones relevantes.

- **Lentes de Fresnel concéntricas:** los anillos siguen una disposición circular alrededor del eje óptico y producen un enfoque puntual, común en iluminación y en concentración solar puntual.
- **Lentes de Fresnel lineales:** los elementos ópticos son secciones rectas paralelas. El sistema concentra la luz en una línea focal en lugar de un punto. Es adecuado para aplicaciones donde el movimiento o la captación se produce a lo largo de un eje. [16].

En particular, las lentes de fresnel permiten implementar sistemas de concentración con un espesor reducido y una geometría compatible con superficies planas, lo que las hace especialmente adecuadas para su integración en soluciones arquitectónicas activas basadas en concentración óptica. En configuraciones lineales, la concentración se produce en una dimensión, simplificando el sistema mecánico y óptico, y adaptándose de forma natural a dispositivos donde el movimiento relativo se realiza a lo largo de uno o dos ejes.

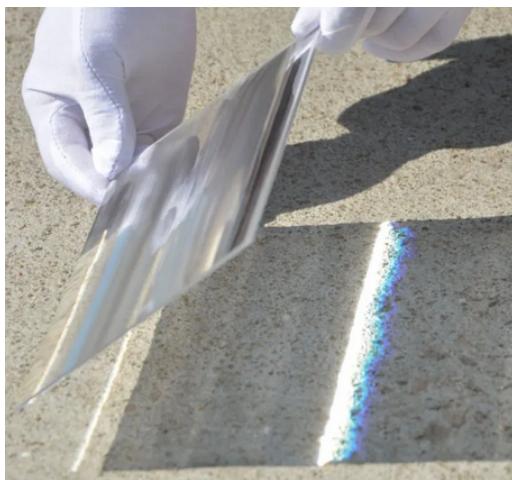
En el caso de las lentes lineales, la curvatura se presenta únicamente en una dirección, mientras que en la dirección ortogonal la geometría permanece constante. Como consecuencia, la concentración de la luz no se produce en un punto focal, sino a lo largo de una línea focal.



(a) Comparación fresnel y lente delgada.



(b) Lente de fresnel concéntrica en un faro.



(c) Lente divergente.



(d) Lente de fresnel por imprimación ultravioleta para concentración solar en paneles fotovoltaicos.

Figura 2.13: Lentes de fresnel.

# Capítulo 3

## Estado del arte

La integración de sistemas fotovoltaicos en la envolvente de los edificios, conocida como *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV), constituye una de las líneas de investigación más consolidadas dentro del ámbito de la arquitectura energética y la generación distribuida. Tradicionalmente, esta integración se ha materializado en cubiertas y fachadas opacas, donde la prioridad ha sido maximizar la potencia instalada sin condicionantes significativos de transparencia o interacción con el usuario.

Sin embargo, en la última década ha crecido el interés por trasladar esta integración a elementos arquitectónicos transparentes, en particular a las ventanas. Las denominadas *ventanas fotovoltaicas* buscan compatibilizar tres funciones tradicionalmente enfrentadas: permitir el paso de luz natural, mantener la relación visual con el exterior y generar energía eléctrica. Los primeros enfoques se basaron en la inclusión de células fotovoltaicas semitransparentes en el vidrio, lo que permitía una generación limitada a costa de una reducción apreciable de la transmitancia óptica. Este tipo de configuraciones son, a su vez, un componente estético atractivo que ha ido ganando peso paulatinamente en diseños arquitectónicos modernos, al poder emplear vidrios de tonalidades muy variadas.

Con el objetivo de superar estas limitaciones, han surgido propuestas más recientes que utilizan recubrimientos selectivos y arquitecturas ópticas capaces de capturar parte de la radiación solar incidente y conducirla hacia zonas activas situadas en los bordes del vidrio. En este contexto se enmarcan diversos proyectos europeos de investigación orientados al desarrollo de ventanas generadoras de energía con altos niveles de transparencia y una integración compatible con los procesos constructivos habituales de la edificación. Estos trabajos han demostrado la viabilidad del concepto de ventana activa desde el punto de vista energético y arquitectónico, aunque con potencias específicas moderadas y sin incorporar mecanismos de adaptación dinámica.

Paralelamente, la investigación en fachadas energéticas ha evolucionado hacia sistemas más complejos y activos, donde la generación fotovoltaica se combina con estrategias de seguimiento solar y gestión de la iluminación natural. En este ámbito destacan las denominadas fachadas solares adaptativas, en las que elementos móviles integran módulos fotovoltaicos capaces de modificar su orientación en función de la posición solar, las condiciones ambientales o las necesidades del edificio. Estas soluciones, desarrolladas principalmente en entornos académicos y de investigación aplicada, incorporan conceptos como seguimiento solar, sombreado dinámico y op-



(a) Adaptive Solar Facade. ETH Zurich.

(b) FlectoSol. Stuttgart University.



(c) Sistemas convencionales. Izquierda de colores, centro semitransparentes y derecha opacos. Cortesía de Solreina.

timización energética global del edificio.

Algunos desarrollos recientes han logrado trasladar estos conceptos a aplicaciones reales, dando lugar a envolventes arquitectónicas capaces de combinar microgeneración con movimientos activos que responden a la posición del Sol y a las condiciones ambientales. Por ejemplo, el proyecto Adaptive Solar Facade desarrollado por el grupo de investigación *Architecture and Building Systems* de la ETH Zurich ha implementado módulos fotovoltaicos montados sobre una estructura de fachada que pueden orientarse individualmente para maximizar la captación solar y gestionar simultáneamente la iluminación y la generación energética (ver ASF y prototipos instalados). En estas fachadas dinámicas, cada módulo puede ajustar su ángulo de incidencia en ambos ejes para realizar un seguimiento solar continuo, lo que permite incrementar la energía generada y adaptar la fachada al entorno inmediato en tiempo real [3].

De manera similar, investigaciones recientes como el sistema *FlectoSol* proponen elementos de fachada con actuadores que permiten el movimiento de los paneles PV en dos direcciones para seguir la trayectoria solar y, de esta forma, maximizar la generación eléctrica directamente desde la envolvente del edificio. Este tipo de desarrollos representan un cambio de paradigma respecto a las fachadas PV estáticas, al incorporar microseguimiento activo y microgeneración dentro de una misma solución de envolvente arquitectónica [4].

Estas aplicaciones novedosas surgen de la necesidad de solucionar los inconvenientes propios de los sistemas convencionales. Estos producen sombreados en el edificio que pueden perjudicar el confort visual, no tienen un control directo sobre las propiedades de la luz diurna, tienen baja eficiencia comparada con los sistemas fotovoltaicos adosados a edificios y tienen un alto ratio de coste por vatio pico.

En este contexto se sitúa el proyecto **SMARTWIN**, cuyo planteamiento recoge

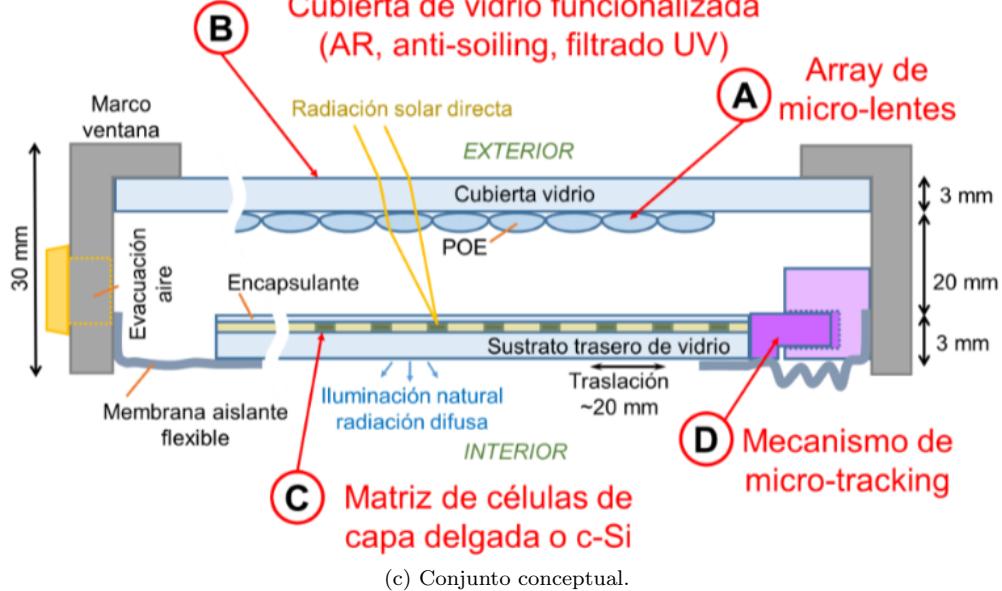
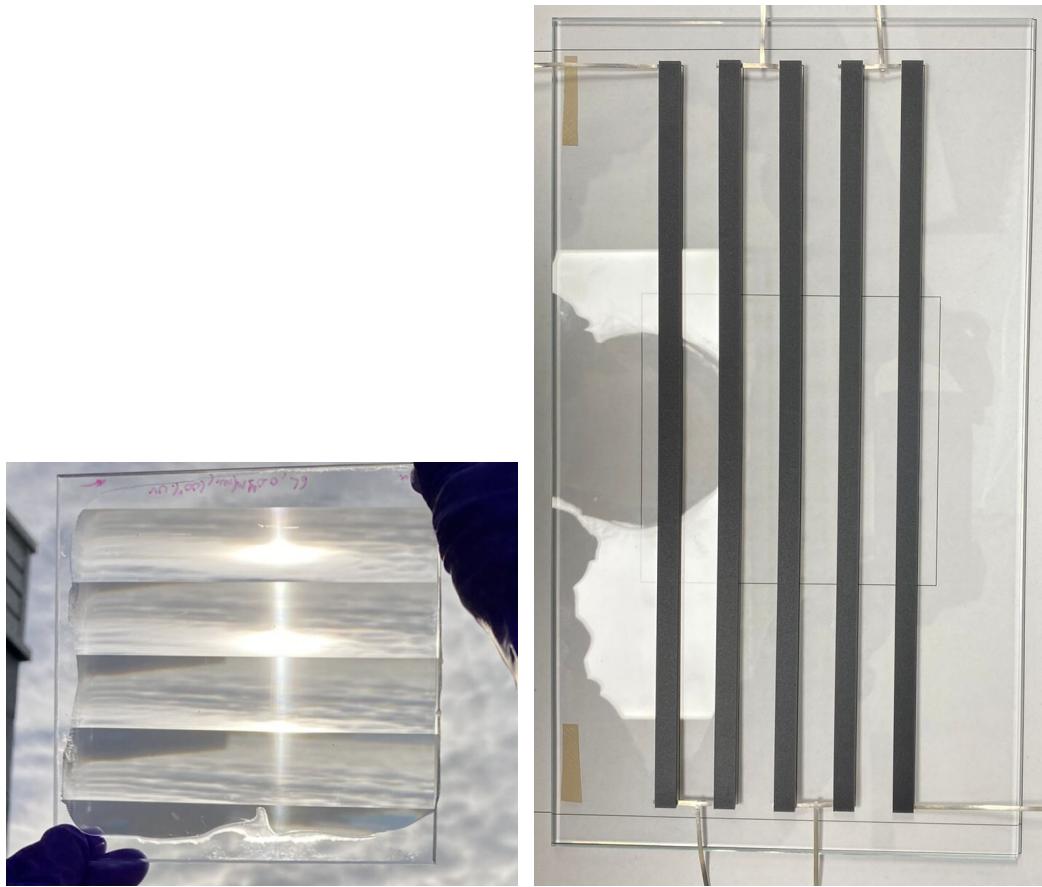
elementos de ambas líneas de investigación: por un lado, la integración fotovoltaica en un elemento transparente propio de la edificación, y por otro, la incorporación de estrategias activas de control y orientación que controlan el deslumbramiento y las propiedades de la luz solar. SMARTWIN propone un enfoque modular y específicamente orientado a aplicaciones de ventana y muro-cortina, donde la concentración óptica, el seguimiento solar y la generación eléctrica se combinan en un único sistema compacto. Este posicionamiento permite explorar soluciones intermedias entre las ventanas BIPV tradicionales y las fachadas adaptativas complejas, aportando una aproximación específica y focalizada al problema de la captación solar en entornos arquitectónicos transparentes. Este sistema consta de tres partes principales que lo caracterizan:

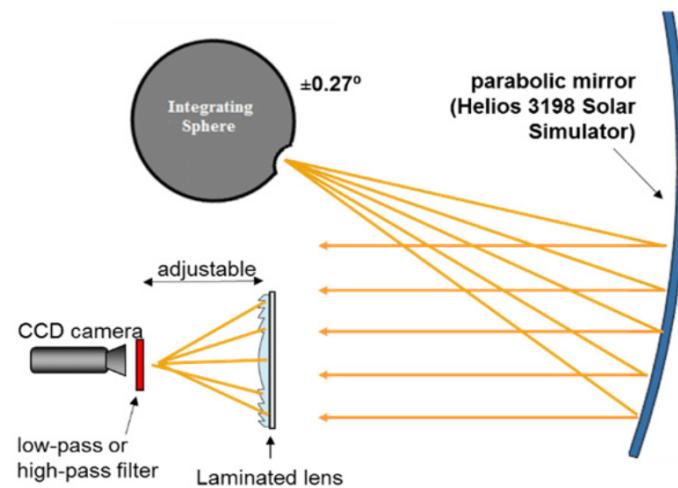
- Un vidrio exterior con lentes de fresnel asimétricas basadas en el principio de Fermat 2.7.1 que actúa concentrando longitudinalmente la radiación solar directa que recibe. Subfigura 3.1a
- Un panel móvil con células longitudinales colocadas transversalmente que se mueve siguiendo la luz concentrada por el panel exterior. Subfigura 3.1b
- Un sistema de control que permite al panel móvil hacer un seguimiento efectivo de los focos longitudinales que van desplazándose con el movimiento del Sol a lo largo del día.

Para la caracterización del sistema óptico se emplea el simulador solar Helios 3198 [6], que permite, mediante un espejo colimador que refleja el foco de luz incidente con el paralelismo característico de los rayos de luz solar, identificar las posiciones que ocupa la línea focal de la luz concentrada en un plano para un rango de ángulos de incidencia de  $0 - 85^\circ$ . El estudio solo incluye el rango hasta  $85^\circ$ , pues la eficiencia de generación eléctrica para ángulos cercanos a  $90^\circ$  es muy limitada, Subfigura 3.1b, debido al comportamiento de estas lentes de fresnel, permitiendo operar entre  $0 - 90^\circ$ . La Subfigura 3.1c muestra las posiciones  $x$  y  $z$  del micro-seguimiento de la posición solar durante los solsticios y equinoccios. De esta manera, se construyen dos matrices  $85 \times 85$  que recogen las coordenadas  $x$  y  $z$  para los ángulos de incidencia rango de operación definido.

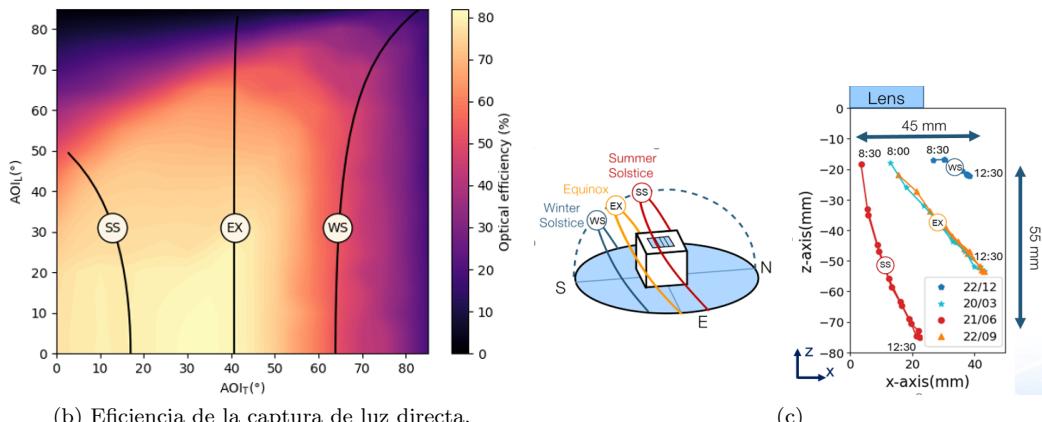
Esta configuración permite controlar el deslumbramiento dentro del edificio, pues, como se muestra en la Figura 3.1, las células solares recogen la luz directa mientras el espacio entre ellas deja pasar la luz difusa al interior. De forma análoga, si las células no se encuentran sobre la línea focal, el sistema permite tanto la entrada de luz difusa, como de luz directa. La Figura 3.2 compara la iluminación de una habitación empleando ventanas convencionales y de módulos BIPV semitransparentes con los modos de alto y bajo deslumbramiento de SMARTWIN.

Este enfoque de ventana generadora compacta que permite controlar el deslumbramiento en el interior de los edificios necesita un sistema de control que sea capaz de seguir con precisión las líneas focales y permutar entre diferentes configuraciones de iluminación. De este modo nace el objeto de este documento, validar un sistema de control que permita el seguimiento de estas líneas focales para una ventana situada en cualquier parte del globo.





(a) Sistema Helios 3198 para caracterización de lentes de fresnel.



(b) Eficiencia de la captura de luz directa.

(c)

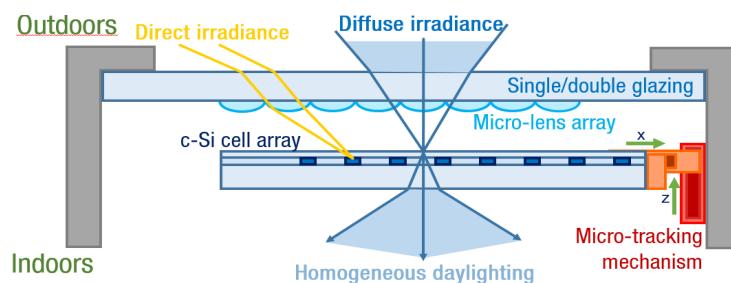


Figura 3.1: Captación de luz del sistema SMARTWIN.

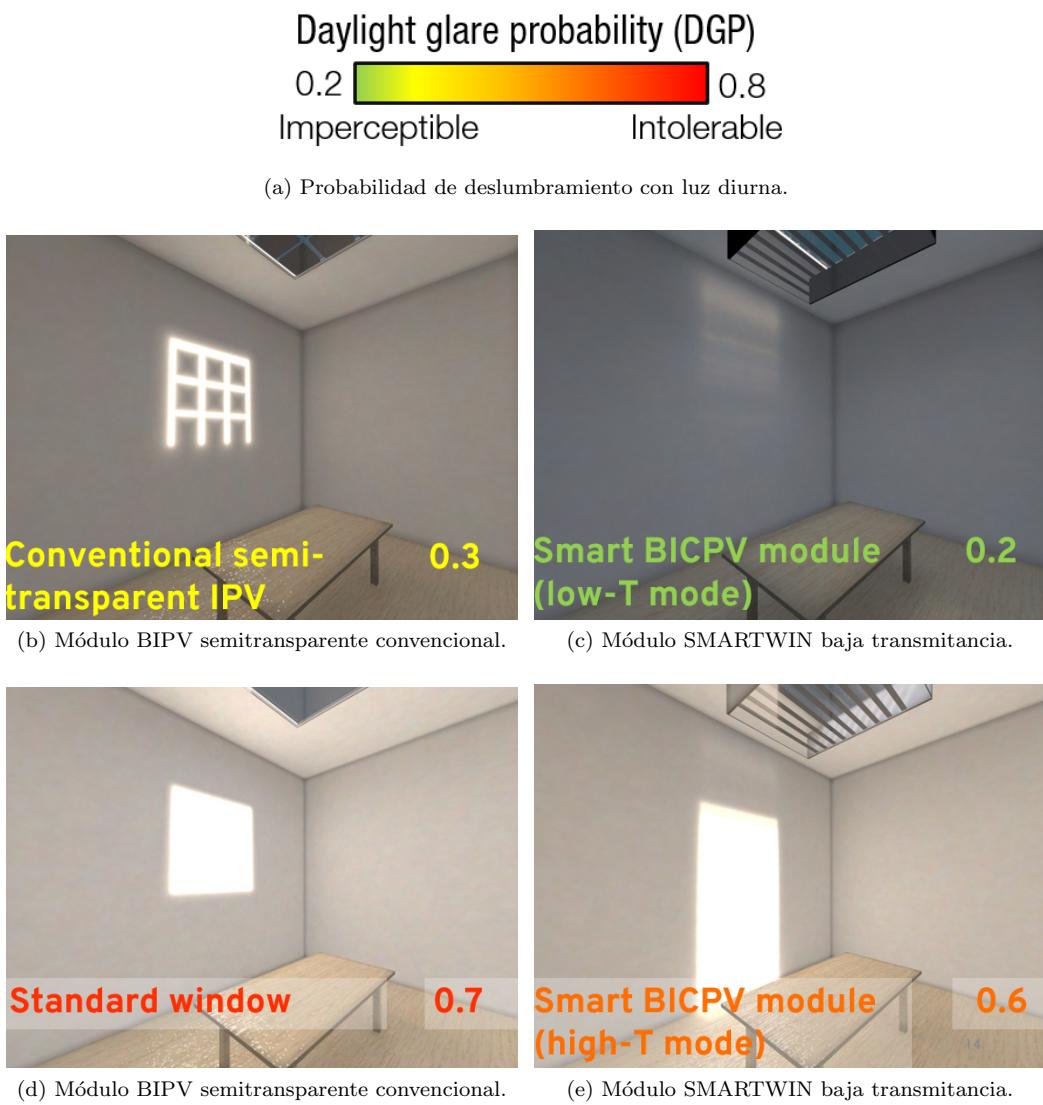


Figura 3.2: Comparativa deslumbramiento con distintas configuraciones y sistemas.

## Capítulo 4

# Presentación del prototipo

### 4.1. Punto de partida

La maqueta a controlar [1.1] ha sido cedida al IES por la Universidad de Salerno como parte del proyecto SMARTWIN, explicado en el estado del arte [3]. Este prototipo cuenta con seis motores paso a paso, dos NEMA-15 enfrentados para el movimiento horizontal, con un mecanismo de correas que producen desplazamiento en los patines que sujetan la ventana, y cuatro NEMA-17 enfrentados dos a dos para el vertical, con un mecanismo de husillo que eleva o descende la plataforma. Estos están integrados en una placa de expansión, CNC-Shield, que permiten el acoplamiento de drivers, en este caso A4988. Esta metodología es muy utilizada para fresadoras CNC, impresoras 3D, grabadoras láser, u otros usos que requieran de desplazamiento en ejes cartesianos. También se entregaron seis finales de carrera que no estaban integrados en la maqueta y que deberán de ajustarse a las necesidades de este proyecto. El control se realizó en una ESP32-Wrover, con un programa que permitía elegir la posición absoluta a la que se movía el plano de la ventana móvil a la posición introducida en una interfaz HTML cliente-servidor en el microcontrolador. Los motores vienen alimentados con una fuente de 12 V y 6 A conectada a instalación eléctrica. A la hora de decantarse por una plataforma hardware se deben tener en cuenta todos estos componentes, parte del prototipado, y su integración al modelo de control que se realizará siguiendo unos criterios de selección bien establecidos y diferenciados.

#### 4.1.1. Movimiento vertical

El movimiento vertical depende del número de pasos ejecutados por los motores paso a paso del eje vertical y del paso del husillo de bolas, que es de 2 mm. Tal y como se muestra en la Subfigura 4.1a, cuando ambos motores verticales (1) se encuentran energizados, permanecen fijados a la estructura del sistema. Los husillos de bolas (2) transforman el movimiento rotacional en desplazamiento lineal, provocando el movimiento de la parte horizontal inferior, la cual se desliza a lo largo de una guía lineal. La parte superior se encuentra unida mecánicamente a la misma guía, por lo que ambas se desplazan de forma solidaria.

Los motores paso a paso empleados presentan un ángulo de paso de  $1,8^\circ$ , que corresponde a 200 pasos por vuelta completa. Considerando un husillo con un paso de 8 mm por revolución, la relación de transmisión entre los pasos del motor y el

desplazamiento lineal puede calcularse como:

$$\Delta x_{\text{paso}} = \frac{8 \text{ mm}}{200} = 0,04 \text{ mm/paso} \quad (4.1)$$

De este modo, cada paso del motor produce un desplazamiento vertical de 0,04 mm en el eje *Z*, lo que supone:

$$1 \text{ mm} \longleftrightarrow 20 \text{ pasos} \quad (4.2)$$

Esta relación se utiliza directamente en el software de control para el posicionamiento vertical del sistema, garantizando un movimiento preciso y repetible.

#### 4.1.2. Movimiento horizontal

El movimiento horizontal depende del número de pasos ejecutados por el motor horizontal y del sistema de transmisión por correa dentada, tal y como se ilustra en la Subfigura 4.1c. El motor acciona una polea central de 20 dientes, que transmite el movimiento a la correa, desplazando el carro horizontal unido al panel de policarbonato.

El motor paso a paso utilizado presenta un ángulo de paso de  $18^\circ$ , correspondiente a 20 pasos por revolución. En la configuración mecánica empleada, una revolución completa del motor produce un desplazamiento lineal de 4 mm del carro horizontal.

Por tanto, sin aplicar microstepping, la resolución lineal del sistema es:

$$\Delta z = \frac{4 \text{ mm}}{20} = 0,2 \text{ mm por paso} \quad (4.3)$$

equivalente a:

$$1 \text{ mm} \longleftrightarrow 5 \text{ pasos} \quad (4.4)$$

Para aumentar la resolución del sistema, se emplean drivers A4988 configurados en modo de microstepping 1/4, mediante el conexiónado de los pines de selección correspondientes en la CNC Shield. Esta configuración multiplica por cuatro el número de pasos efectivos por revolución:

$$20 \times 4 = 80 \text{ micro-pasos por revolución} \quad (4.5)$$

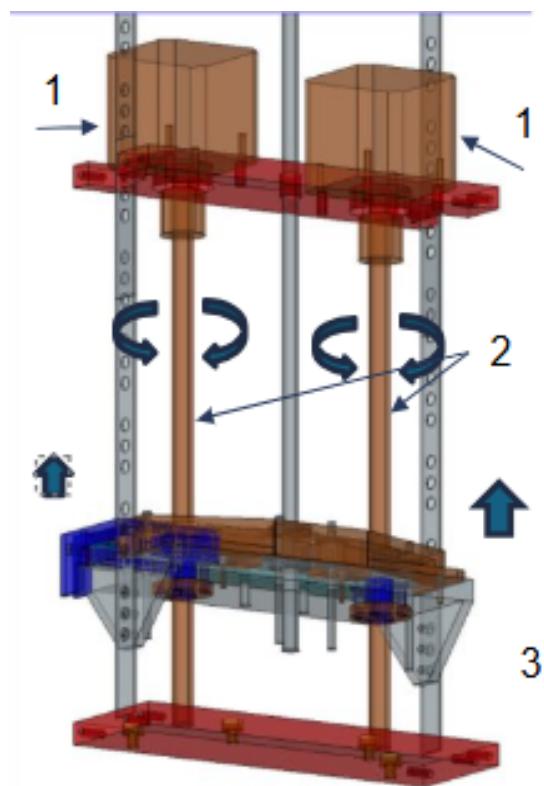
Como consecuencia, la resolución lineal final del eje horizontal pasa a ser:

$$\Delta x = \frac{4 \text{ mm}}{80} = 0,05 \text{ mm por paso} \quad (4.6)$$

lo que implica:

$$1 \text{ mm} \longleftrightarrow 20 \text{ pasos} \quad (4.7)$$

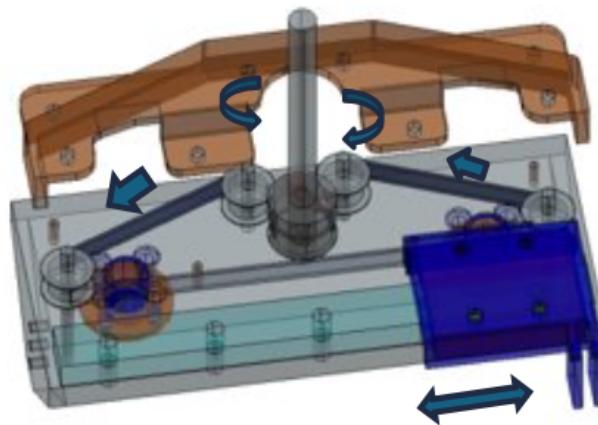
Esta es la relación empleada en el software de control para el posicionamiento horizontal del sistema.



(a) Mecanismo del movimiento vertical.



(b) Mecanismo de un lateral, replicado en el lado opuesto.



(c) Mecanismo del movimiento horizontal.



# Capítulo 5

## Planteamiento de requisitos y selección tecnológica

### 5.1. Requisitos del sistema

Es de vital importancia fijar claramente los requisitos que debe tener el programa antes de abordarlo para poder realizar una planificación adecuada que cubra las necesidades de caracterización, permitiendo al usuario tener un total control del movimiento del panel móvil de la ventana. Se diferencia a continuación entre requisitos funcionales, aquellos que describen qué debe hacer el sistema, y no funcionales, que definen cómo debe hacerse.

#### 5.1.1. Requisitos funcionales

- El sistema debe disponer de una referencia temporal precisa para seguir el desplazamiento del Sol.
- El sistema debe tener tres modos de funcionamiento, como se mencionó en la Introducción 1.2.2, que permitan al usuario escoger la manera específica con la que se controla el movimiento de la ventana.
- Interfaz de usuario que permita establecer la configuración de la ventana, restablecer sus valores predeterminados, cambiar entre los distintos modos y visualizar el estado de la parte móvil, es decir, en qué estado se encuentra, en qué posición está y su configuración, así como la fecha y hora.
  1. **Modo automático:** es el responsable de realizar el seguimiento de la radiación directa concentrada por las lentes durante el día solar. Para ello se emplean tres algoritmos distintos que permiten calcular la posición correspondiente a la que debe dirigirse el marco móvil.
    - a) Cálculo de ángulo azimutal y elevación: a partir de los parámetros de configuración, fecha y hora, zona horaria, pan, tilt, longitud y latitud, devuelve la elevación y el ángulo azimutal.
    - b) Cálculo de  $AOI_l$  y  $AOI_t$ : recibe la elevación y el ángulo azimutal calculados en el paso anterior y devuelve los ángulos de incidencia sobre el plano con las lentes de fresnel.

- c) Interpolación lineal: partiendo de la matriz obtenida mediante ??, donde la precisión es de un grado, se realiza una interpolación bilineal entre dicha matriz y los ángulos de incidencia obtenidos.
- 2. **Modo efemérides:** permite desplazar el panel a la posición simulando los ángulos de azimut y elevación que tiene el Sol respecto del plano. Solo necesita disponer del cálculo de los ángulos de incidencia y de la interpolación lineal.
- 3. **Modo manual:** el usuario decide la posición a la que se desplaza el panel o lo mueve progresivamente.

### 5.1.2. Requisitos no funcionales

Existen una serie de requisitos no funcionales que condicionan el diseño y la implementación del sistema de control.

- **Restricción de diseño:** el control del panel móvil se realiza en lazo abierto.
- **Precisión temporal:** el sistema debe disponer de una referencia temporal con una precisión suficiente para garantizar un correcto cálculo de la posición solar, pues desviaciones de decenas de segundos pueden provocar errores significativos en la captación de la radiación directa concentrada.
- **Precisión en el posicionamiento:** el sistema de control debe ser capaz de posicionar el panel móvil con una resolución compatible con la precisión de los algoritmos de cálculo y de la matriz de interpolación empleada.
- **Fiabilidad del sistema:** el sistema debe operar de forma estable durante períodos prolongados de tiempo sin intervención del usuario, evitando comportamientos erráticos o bloqueos del sistema de control.
- **Robustez frente a errores del usuario:** la interfaz debe prevenir configuraciones no válidas y garantizar que el movimiento del panel no exceda los límites físicos establecidos por los finales de carrera.
- **Usabilidad:** la interfaz de usuario debe ser intuitiva y permitir un manejo sencillo de los distintos modos de funcionamiento, así como una visualización clara del estado del sistema.
- **Mantenibilidad y extensibilidad:** el software debe estructurarse de forma modular, permitiendo futuras modificaciones o ampliaciones del sistema, como la incorporación de nuevos algoritmos de control, sensores adicionales o el manejo de varias ventanas simultáneamente.

## 5.2. Criterios de selección tecnológica

La selección tecnológica se ha confeccionado atendiendo a una serie de pautas derivados de los requisitos funcionales y no funcionales definidos anteriormente. Siguiendo el carácter proyectual de la elaboración de un prototipo orientado a la investigación, se han priorizado los criterios de flexibilidad, pues puede requerirse exportar el proyecto a un entorno distinto, hacer adecuaciones para una nueva maqueta, cambiar funcionalidades o algoritmos de operación; facilidad de integración,

pues se requiere de un sistema unificado que aglutine todos las funcionalidades requeridas de una manera coherente; y rapidez de desarrollo frente a la exploración de soluciones altamente optimizadas a nivel industrial.

Los principales criterios considerados son los siguientes:

- **Compatibilidad con los requisitos:** la plataforma ha de permitir la implementación de los distintos modos de funcionamiento definidos, así como la integración de los algoritmos de cálculo solar y control del movimiento. Para mitigar el error del reloj interno del sistema, se considera la integración de un módulo GPS.
- **Capacidad de comunicación:** el sistema debe disponer de suficientes interfaces, en particular puertos serie independientes, que permitieran la comunicación simultánea con el módulo GPS y otros posibles dispositivos externos.
- **Facilidad de desarrollo y depuración:** se valora especialmente la disponibilidad de entornos de desarrollo accesibles, que faciliten la programación con bibliotecas suficientemente robustas y maduras, así como herramientas de depuración que reducen el tiempo de implementación y validación del sistema.
- **Portabilidad:** el código tiene que ser fácilmente adaptable a otros entornos de características similares, permitiendo la reutilización del trabajo realizado en futuros prototipos o líneas de investigación.
- **Escalabilidad:** se prioriza una arquitectura software que permita la fácil incorporación de nuevas funcionalidades, algoritmos de control o sensores adicionales, aun cuando el sistema seleccionado opere próximo a los límites de sus recursos.
- **Interfaz de usuario desacoplada del hardware:** se valora la posibilidad de implementar una interfaz accesible desde dispositivos externos que facilite la configuración, supervisión y manejo del sistema durante la fase experimental.
- **Soporte y comunidad:** la existencia de una comunidad activa y repositorios relacionados con la implementación deseada, además de una documentación extensa se considera muy relevante para garantizar la resolución de posibles incidencias y la sostenibilidad del desarrollo.
- **Consumo energético:** el consumo del sistema de control es pequeño comparado con el de los actuadores, pero debe minimizarse al tratarse de un sistema generador de electricidad.
- **Coste y disponibilidad:** se tienen en cuenta el coste de la plataforma y su fácil disponibilidad, aspectos relevantes para el desarrollo de prototipos experimentales. Tanto para la elaboración del software como para la documentación, se trata de escoger alternativas gratuitas o con licencia de estudiante.

Es necesaria en toda buena selección exponer, basándose en los criterios establecidos, si las diversas opciones que se podrían considerar satisfacen, y en qué medida lo hacen, la incorporación de todas aquellas funcionalidades de las que debe estar dotado el sistema.

### 5.3. Alternativas para la plataforma hardware

#### 5.3.1. PLC (Controladores lógicos programables)

Los PLCs constituyen una plataforma ampliamente empleada en entornos industriales para el control de sistemas electromecánicos, destacando por su elevada fiabilidad y comportamiento temporal determinista.

En relación con la compatibilidad con los requisitos, los PLCs permiten implementar los distintos modos de funcionamiento definidos, así como integrar la comunicación con un módulo GPS mediante protocolos estándar como RS-485 o interfaces serie. Su arquitectura cíclica de ejecución resulta coherente con el control en lazo abierto del sistema. Pueden trabajar con pantallas HMI altamente dedicadas para la interfaz de usuario y los modelos recientes permiten actuar como punto de acceso Wi-Fi y establecer un servidor HTTP básico, aunque con ciertas limitaciones a la hora de intercambiar mensajes.

Respecto a la capacidad de comunicación, los PLCs suelen disponer de módulos de comunicación industriales bien documentados, lo que facilita la conexión con dispositivos externos. La gestión de eventos en tiempo real puede requerir módulos adicionales según el modelo.

En cuanto a la facilidad de desarrollo y depuración, los entornos de programación de PLC están orientados a aplicaciones industriales y priorizan la estabilidad frente a la flexibilidad. Permiten una depuración eficaz de secuencias de control, pero la implementación de algoritmos matemáticos complejos —como el cálculo de efemérides solares o la interpolación bilineal— resulta menos ágil que en plataformas de programación más básicas.

Desde el punto de vista de la portabilidad, el uso de entornos propietarios y dependientes del fabricante limita la reutilización directa del software desarrollado en otros contextos o plataformas distintas, condicionando la escalabilidad del sistema en líneas de investigación futuras.

El consumo energético de un PLC durante la operación continua se sitúa típicamente en el orden de varios vatios, incluso en ausencia de carga de proceso, lo que supone una penalización relevante.

Finalmente, en términos de coste y disponibilidad, los PLCs y sus entornos de desarrollo suelen implicar un coste elevado, incluso considerando licencias académicas, lo que reduce su idoneidad para el desarrollo de prototipos experimentales.

#### 5.3.2. FPGA (Field Programmable Gate Array)

Las FPGA constituyen una alternativa de alto rendimiento para la implementación de sistemas de control y procesamiento, especialmente en aplicaciones donde se requiere paralelismo, baja latencia y un comportamiento determinista.

En relación con la compatibilidad con los requisitos, una FPGA permite implementar los modos de funcionamiento definidos, así como el control del movimiento del panel móvil. La integración de un receptor GPS es técnicamente viable mediante interfaces serie estándar, procesando las series NMEA. Es posible implementar interfaces avanzadas, pero es necesario un diseño significativamente extendido y no están orientadas a la modificación frecuente de la interfaz de usuario.

Respecto a la capacidad de comunicación, permiten la implementación flexible de múltiples interfaces, incluyendo UART, SPI, I<sup>2</sup>C o buses industriales. Requiere

un mayor esfuerzo de diseño y validación respecto a plataformas más abstractas.

En cuanto a la facilidad de desarrollo y depuración, el uso de FPGAs para satisfacer todas las funcionalidades presenta una curva de aprendizaje significativamente más elevada. Los entornos de desarrollo se basan en lenguajes de descripción hardware como VHDL o Verilog, que no están orientados al desarrollo algorítmico secuencial. Aunque es posible implementar algoritmos matemáticos complejos, como el cálculo de efemérides solares o la interpolación bilineal, estos deben adaptarse a un paradigma de diseño hardware, lo que incrementa en gran medida el tiempo de desarrollo y la complejidad del sistema. La depuración se realiza mediante simulaciones y herramientas específicas, menos inmediatas que en plataformas de programación de alto nivel.

Desde el punto de vista de la portabilidad, el diseño desarrollado en FPGA presenta una fuerte dependencia del dispositivo y del fabricante. Si bien los lenguajes de descripción hardware son estándar, la reutilización del sistema en otros entornos resulta limitada sin un esfuerzo de adaptación significativo.

En términos de escalabilidad, las FPGAs permiten ampliar funcionalidades mediante la incorporación de nuevos bloques lógicos en paralelo. Sin embargo, se encuentra condicionada por los recursos disponibles del dispositivo y por el incremento de la complejidad del diseño, especialmente si se ha de combinar control, comunicaciones e interfaz de usuario.

El consumo energético de una FPGA está fuertemente ligado al dispositivo y diseño implementado, situándose típicamente en el orden de uno a varios vatios, lo que requiere un diseño cuidadoso para no penalizar el balance energético del sistema.

Finalmente, en lo referente al coste y disponibilidad, las plataformas FPGA presentan un coste superior al de microcontroladores de propósito general. Aunque existen versiones académicas de los entornos de diseño, el esfuerzo necesario para implementar un sistema de control completo orientado a prototipado experimental limita su idoneidad frente a soluciones más ágiles.

### 5.3.3. STM32

La familia de microcontroladores STM32 es altamente empleada en sistemas embebidos de control y automatización debido a su flexibilidad de programación. Son dispositivos basados en la arquitectura ARM Cortex-M, con una gama de modelos que cubren desde las aplicaciones más sencillas hasta sistemas de control complejos.

En relación con la compatibilidad con los requisitos, permiten implementar sin restricciones los distintos modos de funcionamiento definidos. Dispone de un reloj interno cuya desviación varía según el cristal de cuarzo que usa cada modelo. Su capacidad de cálculo es suficiente para ejecutar algoritmos complejos en tareas en tiempo real, cumpliendo con los requisitos de precisión temporal y de posicionamiento establecidos. La integración de un GPS es posible gracias a interfaces serie estándar. Se puede comunicar con un PC o una interfaz local compuesta de una pantalla y botones, pero la integración del punto de acceso Wi-Fi necesita de módulos externos, compitiendo por recursos en el procesador, y en configuraciones orientadas a bajo coste suelen tener memorias muy limitadas.

Respecto a la capacidad de comunicación, la gran cantidad de modelos y compatibilidad con módulos propios de microcontroladores de 32 bits ofrece un amplio abanico de posibilidades a la hora de establecer comunicaciones, soportando cone-

xiones UART, SPI, I<sup>2</sup>C o buses industriales.

En cuanto a la facilidad de desarrollo y depuración, las bibliotecas de abstracción de hardware (HAL) facilitan el acceso a los periféricos y aceleran el proceso de desarrollo. Existen herramientas que permiten la generación automática de código embebido a partir de modelos desarrollados en entornos como MATLAB/Simulink, facilitando la validación de algoritmos en fases tempranas del desarrollo. Asimismo, estas herramientas permiten una depuración detallada del sistema, observando variables internas y ejecutando el código progresivamente o con interrupciones en los puntos de interés.

El software para STM32 es portable y escalable dentro de la propia familia de microcontroladores, pudiendo migrar el sistema a modelos con prestaciones más amplias en caso necesario. Sin embargo, la configuración y gestión de relojes están ligadas al fabricante y adaptados a su arquitectura, por lo que solo podrían migrarse fuera de la familia las partes con lógica de alto nivel como los algoritmos matemáticos.

La familia STM32 cuenta con una comunidad amplia y activa, así como con una documentación extensa proporcionada por el fabricante, existiendo numerosos ejemplos de implementación.

Desde el punto de vista económico, los microcontroladores STM32 presentan un coste moderado y una amplia disponibilidad en el mercado. Los entornos de desarrollo y bibliotecas asociadas son gratuitos, haciéndolos adecuados para proyectos académicos y prototipos de investigación.

Los microcontroladores STM32 presentan un consumo energético reducido, típicamente del orden de decenas a centenas de miliwattios durante la operación activa, resultando considerablemente adecuados.

Finalmente, desde el punto de vista del consumo energético, presentan un consumo reducido, con corrientes del orden de decenas de miliamperios en funcionamiento normal, y la disponibilidad de modos de bajo consumo. Esto los hace adecuados para sistemas alimentados a partir de generación propia,

#### 5.3.4. ESP32

La familia de microcontroladores ESP32 constituye una plataforma orientada al desarrollo de sistemas embebidos con capacidades avanzadas de comunicación. Esta característica, junto con una capacidad de cálculo elevada para su rango de coste, la convierte en una opción especialmente atractiva para prototipos de investigación que requieren interacción remota y flexibilidad en la interfaz de usuario.

En relación con la compatibilidad con los requisitos, permite implementar sin restricciones los distintos modos de funcionamiento definidos para el sistema, así como ejecutar los algoritmos de cálculo de efemérides solares, obtención de ángulos de incidencia e interpolación bilineal. La integración de un módulo GPS se realiza de forma directa mediante interfaces UART independientes.

Uno de los aspectos más relevantes del ESP32 es su capacidad para implementar de forma nativa una interfaz de usuario accesible mediante un navegador web. El microcontrolador puede actuar como punto de acceso Wi-Fi propio y alojar un servidor HTTP que permita al usuario visualizar el estado del sistema y controlarlo sin necesidad de hardware adicional ni de software externo. Esta característica resulta especialmente adecuada para el carácter experimental del prototipo.

Respecto a la capacidad de comunicación, el ESP32 dispone de múltiples interfaces serie, incluyendo UART, SPI e I<sup>2</sup>C, además de conectividad inalámbrica integrada. Esto permite la comunicación simultánea con el módulo GPS y otros dispositivos externos, manteniendo una arquitectura compacta y reduciendo la complejidad del sistema.

En cuanto a la facilidad de desarrollo y depuración, puede programarse utilizando entornos de alto nivel como Arduino IDE o ESP-IDF, que ofrecen una amplia disponibilidad de bibliotecas y ejemplos, facilitando la implementación rápida de funcionalidades complejas, como la interfaz web o la gestión de comunicaciones, reduciendo significativamente el tiempo de desarrollo y validación del sistema. Además, la mayoría de estos dispositivos tienen un procesador dual que rentabiliza el empleo de procesos ligeros, tasks de FreeRTOS, pues permite ligarlos a uno de los dos procesadores sin interrumpir la ejecución de otros procesos recurrentes, como podría ser el acceso Wi-Fi y el movimiento de los motores del sistema.

Desde el punto de vista de la portabilidad, el uso de APIs de alto nivel y bibliotecas ampliamente extendidas permite una adaptación relativamente sencilla del código a otras plataformas compatibles con entornos Arduino o microcontroladores de 32 bits con capacidades similares. Si bien el sistema puede operar próximo a los límites de memoria disponibles, una arquitectura software modular permite su escalabilidad funcional dentro de las restricciones propias del dispositivo.

La plataforma ESP32 cuenta con una comunidad muy activa y una documentación extensa, lo que favorece la resolución de incidencias y la evolución del sistema.

El consumo energético del ESP32 durante la operación se sitúa en el orden de décimas de watio, por lo que no supone un inconveniente en un sistema generador.

Finalmente, en términos de coste y disponibilidad, el ESP32 presenta un coste reducido y una alta disponibilidad en el mercado, con entornos de desarrollo gratuitos, haciéndolo especialmente adecuado para prototipos experimentales y proyectos académicos.

### 5.3.5. Otros microcontroladores de 32 bits

Además de las plataformas analizadas anteriormente, existen numerosos microcontroladores de 32 bits que podrían emplearse para la implementación del sistema de control. Entre ellos se incluyen familias como los microcontroladores de NXP (LPC, i.MX RT), Microchip (SAME, PIC32), Texas Instruments (MSP432) o RP2040, entre otros.

En términos de compatibilidad con los requisitos, estas plataformas ofrecen capacidades de cálculo suficientes para ejecutar los algoritmos de efemérides solares, el cálculo de ángulos de incidencia y la interpolación de matrices, así como temporizadores y periféricos propios de microcontroladores de 32 bits. Asimismo, la integración de un módulo GPS puede realizarse mediante interfaces serie estándar.

Respecto a la capacidad de comunicación, estos dispositivos suelen incorporar múltiples interfaces de propósito general, como UART, SPI e I<sup>2</sup>C, y en algunos casos buses industriales o conectividad Ethernet. No obstante, la conexión inalámbrica suele requerir módulos externos, lo que incrementa la complejidad del sistema y el esfuerzo de integración.

En cuanto a la facilidad de desarrollo, estas plataformas se apoyan en entornos específicos del fabricante y bibliotecas de abstracción hardware propias. Aunque

ofrecen un alto grado de control sobre los periféricos, el proceso de desarrollo es menos inmediato que en entornos de alto nivel para la implementación de interfaces de usuario avanzadas o servicios de red.

Desde el punto de vista de la portabilidad, el software desarrollado para estas plataformas presenta una reutilización elevada, siempre que se mantenga una adecuada separación entre la capa de control y la capa de acceso al hardware. Sin embargo, la migración entre familias de microcontroladores de distintos fabricantes requiere la adaptación de los controladores hardware y de la configuración del sistema, lo que implica un esfuerzo adicional.

Otros microcontroladores de 32 bits presentan consumos energéticos comparables, generalmente en el rango de decenas a centenas de miliwatios, siendo adecuados para aplicaciones de control con restricciones energéticas.

Finalmente, en términos de coste y disponibilidad, estos microcontroladores presentan un coste moderado y una amplia disponibilidad, siendo utilizados habitualmente en entornos académicos y de prototipado. La ausencia de conectividad inalámbrica integrada y la mayor complejidad de desarrollo, en comparación con otras plataformas que estén más orientadas al prototipado rápido, limitan su idoneidad para el enfoque experimental del presente proyecto.

### 5.3.6. Descartes hardware

Los PLCs son equipos destinados a la automatización industrial, pensados para gestionar múltiples entradas y salidas que lanzan diferentes eventos. Para la automatización de una ventana cuyo control es en lazo abierto, no resulta una solución eficiente utilizar este tipo de equipos sin emplear un microcontrolador que se comunique con él. En caso de que el control fuese en lazo cerrado, con encoders en los husillos de los motores, además de los finales de carrera, que proporcionasen algún tipo de realimentación al sistema por el cual el PLC pudiese gestionar de manera autónoma el movimiento, podría ser una opción a considerarse. Aunque, de todos modos, implementar algoritmos en estos dispositivos resulta bastante laborioso sin hardware adicional.

Las FPGA están orientadas a aplicaciones donde se requiere un alto grado de paralelismo, procesamiento en tiempo real con latencias extremadamente bajas. Si bien permiten implementar cualquier funcionalidad lógica, su uso para el control de una ventana móvil en lazo abierto requiere adaptar los procesos de cálculo a un paradigma de diseño hardware, lo que incrementa significativamente la complejidad del sistema. Para disponer de una arquitectura comparable a la de un microcontrolador sería necesario implementar o integrar un procesador embebido, lo que introduce una capa adicional de diseño y validación que no aporta ventajas claras en el contexto del proyecto, tal y como ocurre en los PLCs.

Asimismo, la implementación de una interfaz de usuario flexible, especialmente basada en tecnologías web o comunicación inalámbrica, resulta poco natural en una FPGA o un PLC sin recurrir a arquitecturas híbridas o hardware adicional. Esto contrasta con el enfoque experimental del proyecto, donde se prioriza la facilidad de configuración, modificación y validación del sistema.

Desde el punto de vista energético, el consumo de PLCs y FPGAs, incluso en diseños moderados, es superior al de microcontroladores de 32 bits que pueden cumplir las mismas funcionalidades, penalizando el balance energético global del sistema.

Por todo ello, aunque las FPGA y PLC constituyen una solución potente en otros ámbitos, su utilización en el presente proyecto supondría un esfuerzo de desarrollo desproporcionado, sin aportar ventajas relevantes frente a plataformas más orientadas al control embebido y al prototipado experimental.

## 5.4. Selección de Software

Es necesario explicar de manera independiente como el software ligado a cada plataforma descrita anteriormente proporciona las herramientas adecuadas para satisfacer las funcionalidades requeridas. De esta forma se tiene una visión global de cada plataforma, facilitando la comparación de viabilidad y la elección final del sistema de implementación.

### 5.4.1. Software asociado a ESP32

En cuanto a los entornos de desarrollo disponibles, el ESP32 puede programarse mediante Arduino-IDE, el framework oficial ESP-IDF y herramientas integradas como PlatformIO. Todos ellos se basan principalmente en el uso del lenguaje C/C++, permitiendo tanto la utilización de bibliotecas de alto nivel como el acceso directo a los periféricos del microcontrolador. El entorno Arduino destaca por su simplicidad y rapidez de desarrollo, facilitando la implementación y validación temprana del sistema, mientras que ESP-IDF proporciona un mayor grado de control sobre el sistema operativo en tiempo real, la gestión de tareas y la configuración de los recursos internos del dispositivo. PlatformIO actúa como un entorno de desarrollo más avanzado que permite emplear indistintamente Arduino o ESP-IDF como framework, mejorando la organización del proyecto y la gestión de dependencias sin modificar sustancialmente la base de código.

Desde el punto de vista de la capacidad del lenguaje y la portabilidad de la arquitectura software, el uso de C/C++ favorece una clara separación entre la lógica de alto nivel del sistema y la capa de acceso al hardware, pero permitiendo que se integren eficazmente. Los algoritmos de cálculo pueden implementarse de forma independiente del microcontrolador, facilitando su reutilización en otras plataformas que puedan compilar C/C++.

Uno de los aspectos más relevantes del ecosistema software de Arduino es la disponibilidad de bibliotecas para la implementación de conectividad Wi-Fi, servicios web e integración del GPS sin tener que traducir sentencias NMEA. El microcontrolador puede configurarse para operar como punto de acceso inalámbrico independiente, permitiendo la comunicación directa con dispositivos externos sin necesidad de infraestructura de red adicional. Mediante bibliotecas como *AsyncWebServer*, es posible implementar una interfaz web accesible desde un navegador, que permita al usuario configurar los parámetros del sistema, seleccionar los distintos modos de funcionamiento, supervisar el estado del panel móvil y enviar órdenes de control en tiempo real. Esta interfaz desacoplada del hardware resulta especialmente adecuada para la fase experimental del proyecto, al simplificar el acceso y la interacción con el sistema.

En lo relativo al almacenamiento de configuración y parámetros persistentes, el ESP32 dispone de memoria flash interna que puede utilizarse para guardar información de forma no volátil. A través de bibliotecas como *Preferences*, es posible

almacenar y recuperar parámetros de configuración, estado, modo de funcionamiento u otros datos relevantes, garantizando su conservación tras reinicios o pérdidas de alimentación. Esta capacidad contribuye a mejorar tanto la usabilidad como la robustez del sistema durante ensayos prolongados y campañas experimentales.

#### **5.4.2. Software asociado a STM32**

En cuanto a los entornos de desarrollo disponibles, los microcontroladores de la familia STM32 pueden programarse mediante herramientas como STM32CubeIDE, entornos compatibles con el estándar ARM-GCC y plataformas integradas como PlatformIO. El desarrollo se realiza principalmente en lenguaje C/C++, permitiendo tanto el uso de bibliotecas de abstracción de hardware como el acceso directo a los registros del microcontrolador. STM32CubeIDE integra el configurador STM32CubeMX, que facilita la inicialización de periféricos, la configuración de relojes y la generación de código base, agilizando el desarrollo.

Desde el punto de vista de la capacidad del lenguaje y la portabilidad de la arquitectura software, el uso de C/C++ permite una clara separación entre la lógica de control y el acceso a hardware. De este modo, la implementación de los algoritmos es independiente del microcontrolador, facilitando su reutilización en otras plataformas de 32 bits compatibles con ARM Cortex-M o arquitecturas similares, con un esfuerzo de adaptación moderado. La dependencia específica del fabricante se centra principalmente en la inicialización de periféricos, la gestión de interrupciones y la configuración del sistema de relojes. La plataforma permite la integración de módulos GPS mediante interfaces serie estándar, procesando sentencias NMEA.

En relación con la conectividad y la implementación de interfaces de usuario, los microcontroladores STM32 no incorporan conectividad inalámbrica de forma nativa en la mayoría de sus modelos, por lo que la implementación de interfaces web o comunicaciones Wi-Fi requiere el uso de módulos externos. Estos módulos pueden comunicarse mediante UART, SPI u otros buses estándar, permitiendo la creación de una interfaz de configuración y supervisión accesible desde dispositivos externos. Esto incrementa la complejidad del sistema y el uso de recursos, al requerirse una gestión adicional de la comunicación y del protocolo de aplicación.

Finalmente, en lo relativo al almacenamiento de parámetros persistentes, los STM32 disponen de memoria flash interna que puede utilizarse para almacenar los diferentes tipos de datos, garantizando su conservación tras reinicios o pérdidas de alimentación. Esta capacidad resulta fundamental para asegurar un funcionamiento coherente del sistema en ensayos prolongados y ciclos repetidos de operación.

#### **5.4.3. Software asociado a microcontroladores SAMD/SAME**

Los microcontroladores de 32 bits de Microchip, pertenecientes a las familias SAMD y SAME, están basados en la arquitectura ARM Cortex-M, como las STM32, y se emplean habitualmente en aplicaciones de control embebido y prototipado avanzado. Estos dispositivos pueden programarse mediante entornos compatibles con ARM-GCC, el framework ASF (Atmel Software Framework) y plataformas integradas como PlatformIO, así como a través del ecosistema Arduino en determinadas placas comerciales.

El desarrollo se realiza principalmente en lenguaje C/C++, permitiendo tanto el uso de bibliotecas de abstracción de hardware como el acceso directo a los periféricos

del microcontrolador. Esto facilita la separación entre la lógica de control del sistema y la capa de acceso al hardware, permitiendo la reutilización de los algoritmos de cálculo en otras plataformas de microcontroladores de 32 bits.

En relación con la conectividad y la interfaz de usuario, los microcontroladores SAMD/SAME no incorporan conectividad inalámbrica de forma nativa en la mayoría de sus modelos, por lo que la implementación de interfaces web o comunicación Wi-Fi requiere el uso de módulos externos. Estos se integran mediante interfaces UART o SPI, incrementando la complejidad del sistema y el esfuerzo de desarrollo, especialmente en aplicaciones orientadas a la supervisión remota.

En lo relativo al almacenamiento de parámetros persistentes, estas familias disponen de memoria flash interna que puede emplearse para almacenar configuraciones y estados del sistema de forma no volátil. Asimismo, ofrecen modos de bajo consumo que permiten reducir significativamente la potencia disipada durante la operación continua, resultando adecuados para sistemas de control con restricciones energéticas.

## 5.5. Discusión de las decisiones adoptadas

A partir del análisis de los requisitos del sistema y de los criterios de selección tecnológica definidos, se realiza una evaluación comparativa de las distintas plataformas potencialmente aplicables al sistema de control propuesto. Esta evaluación no se basa únicamente en las prestaciones máximas de cada tecnología, sino en su adecuación al carácter experimental del proyecto, a la necesidad de flexibilidad durante la fase de desarrollo y a las restricciones energéticas propias de un sistema generador.

Los microcontroladores de 32 bits permiten abordar el problema desde una perspectiva más flexible, facilitando la implementación de los algoritmos necesarios, la gestión de comunicaciones y la interacción con el usuario dentro de una única plataforma compacta. En este grupo, las familias STM32, ESP32 y otros microcontroladores ARM Cortex-M presentan capacidades suficientes para satisfacer los requisitos establecidos, con consumos energéticos reducidos y costes moderados.

La familia STM32 constituye una solución sólida técnicamente, ampliamente utilizada en sistemas de control embebido, con herramientas maduras y una elevada escalabilidad dentro de su propia gama. Sin embargo, la ausencia de conectividad inalámbrica integrada en la mayoría de sus modelos implica la necesidad de módulos externos para implementar una interfaz de usuario desacoplada del hardware, aumentando la complejidad del sistema y el esfuerzo de integración.

En este contexto, la plataforma ESP32 destaca por integrar de forma nativa capacidades de comunicación inalámbrica, permitiendo implementar una interfaz de usuario basada en tecnologías web sin requerir hardware adicional. Esta característica resulta especialmente relevante para la capacidad de caracterización posterior al proyecto, donde se prioriza la facilidad de configuración, supervisión y modificación del sistema frente a soluciones altamente optimizadas. Además, la disponibilidad de entornos de desarrollo de alto nivel y bibliotecas maduras reduce significativamente el tiempo necesario para la implementación y validación del prototipo.

Desde el punto de vista energético, tanto STM32 como ESP32 presentan consumos compatibles con el sistema generador planteado. No obstante, el ligero incremento de consumo asociado a la conectividad inalámbrica del ESP32 se considera

asumible frente a las ventajas funcionales que aporta en términos de interfaz y facilidad de uso.

En consecuencia, la elección de una plataforma basada en ESP32 se justifica como un compromiso equilibrado entre capacidad de cálculo, facilidad de desarrollo, flexibilidad de la interfaz de usuario y consumo energético. Esta decisión no excluye la posibilidad de migrar el sistema a otras plataformas de microcontroladores de 32 bits en fases posteriores del proyecto, ya que la arquitectura software propuesta favorece la reutilización de los algoritmos y la adaptación a otros entornos con un esfuerzo moderado.

### 5.5.1. Justificación de la plataforma ESP32-S3-DevKitC-1

La placa ESP32-S3-DevKitC-1 se ha seleccionado por ajustarse de forma precisa a los requisitos de comunicación, memoria y consumo energético del sistema de control propuesto.

El microcontrolador dispone de hasta tres pares de interfaces UART completamente configurables, lo que permite dedicar un canal serie exclusivo al módulo GPS sin comprometer la disponibilidad de puertos para depuración u otros dispositivos externos. Esta característica resulta especialmente relevante para mantener una arquitectura limpia y flexible, evitando multiplexaciones o soluciones software adicionales para la gestión de comunicaciones serie.

La placa integra 16 MB de memoria flash, capacidad suficiente para alojar sin restricciones las bibliotecas empleadas en el sistema, en particular *TinyGPSPlus* y *ESPAsyncWebServer*, que constituyen las dependencias de mayor tamaño del proyecto. Asimismo, esta memoria permite almacenar dos matrices de interpolación de tamaño  $86 \times 86$ , junto con el código del programa y los parámetros de configuración, manteniendo un margen amplio para futuras ampliaciones o modificaciones del software.

Desde el punto de vista del consumo energético, el ESP32-S3 presenta un consumo del orden de décimas de vatios durante el reposo, hasta un rango de 1 – 2 W, compatible con su integración en un sistema generador de electricidad. Además, la posibilidad de gestionar la actividad de las comunicaciones y emplear modos de bajo consumo contribuye a minimizar el impacto energético del sistema de control.

El entorno de desarrollo seleccionado para este microcontrolador es Arduino-IDE. La elección de este entorno se fundamenta en su adecuación al carácter experimental y funcional del proyecto. Este entorno permite un desarrollo rápido e iterativo, facilitando la integración de las bibliotecas que se han reconocido como obligatorias para la implementación de comunicación inalámbrica, servicios web y procesamiento de datos GPS. Todo ello sin necesidad de una configuración compleja en tiempo real ni de una gestión manual de tareas. Dado que el sistema de control no presenta requisitos estrictos de temporización dura ni una elevada concurrencia de procesos, las capacidades adicionales ofrecidas por ESP-IDF no resultan determinantes en este caso.

Asimismo, el uso de Arduino-IDE reduce significativamente la complejidad inicial del desarrollo, permitiendo centrar el esfuerzo en la implementación y validación de los algoritmos de control y de la interfaz de usuario, en lugar de en aspectos de bajo nivel relacionados con la configuración del sistema. Esta decisión resulta coherente con los objetivos del proyecto, donde se prioriza la flexibilidad, la facilidad

de depuración y la rapidez de modificación del prototipo frente a una optimización exhaustiva de los recursos.

Por último, el empleo de Arduino-IDE no limita la portabilidad futura del software, ya que el código desarrollado en C/C++ puede migrarse a entornos como ESP-IDF o PlatformIO con un esfuerzo moderado, manteniendo la arquitectura y los algoritmos principales del sistema.

La idoneidad del ESP32-S3 para aplicaciones similares queda respaldada por su uso habitual en proyectos de seguimiento solar, sistemas de monitorización energética y control embebido con interfaz web, ampliamente documentados en repositorios técnicos y plataformas especializadas de desarrollo de sistemas embebidos, lo que refuerza su elección para el presente proyecto.



# Capítulo 6

## Diseño del sistema de control

### 6.1. Enfoque general del diseño

En un sistema embebido de control, el hardware y el software están estrechamente integrados. El diseño se divide en dos partes diferenciadas por su naturaleza, pero concebidas de forma conjunta: el diseño electrónico y el diseño software.

Por una parte, el diseño electrónico comprende los aspectos relativos a la selección e interconexión de los distintos componentes físicos que conforman el sistema, incluyendo la unidad de control, el sistema de accionamiento, los sensores y referencias físicas, así como la alimentación y las consideraciones eléctricas asociadas. Esta parte del diseño da respuesta principalmente a los requisitos de precisión en el posicionamiento, robustez frente a errores del usuario y fiabilidad del sistema, al establecer los límites físicos de operación, los mecanismos de referencia y la arquitectura de potencia y control.

Por la otra parte, el diseño software aborda la implementación de las funcionalidades del sistema de control sobre la plataforma embebida seleccionada. Incluye la arquitectura software, la gestión de los distintos modos de funcionamiento, el control del movimiento del panel móvil, la gestión del tiempo y de los errores y la interfaz de usuario. Esta parte del diseño responde directamente a los requisitos funcionales definidos, garantizando la correcta ejecución de los algoritmos de cálculo, la interacción con el usuario y la operación estable del sistema durante períodos prolongados de tiempo.

La separación conceptual entre diseño electrónico y diseño software permite analizar cada parte de forma estructurada y sin perder de vista su integración, pues las decisiones adoptadas en una de las partes condicionan el comportamiento global del prototipo.

### 6.2. Diseño electrónico

#### 6.2.1. Arquitectura hardware

La arquitectura hardware del sistema de control se ha definido con el objetivo de integrar, de forma clara y modular, los distintos subsistemas necesarios para el accionamiento del plano móvil. La Figura 6.1 muestra el diagrama de bloques de la arquitectura hardware, donde se representan los principales componentes y las interconexiones funcionales entre ellos.

El sistema se organiza en torno al microcontrolador, que centraliza la lógica de control y la comunicación con el usuario. Este bloque se comunica con el sistema de accionamiento, integrado en una placa CNC Shield equipada con drivers A4988, encargados de excitar los motores paso a paso responsables del movimiento del panel móvil.

Los motores, de tipo NEMA-15 y NEMA-17, transmiten el movimiento a la plataforma móvil mediante mecanismos de correas y husillos, permitiendo el desplazamiento en los ejes horizontal y vertical. La posición extrema del sistema es delimitada por finales de carrera, que proporcionan referencias físicas y protección frente a movimientos fuera de rango. Estos motores pueden visualizarse en la Figura ??

La referencia temporal necesaria para el cálculo de la posición solar se obtiene mediante un módulo GPS conectado directamente al microcontrolador a través de una interfaz serie. El sistema se alimenta a partir de una fuente de 12 V, destinada principalmente al accionamiento de los motores, mientras que la electrónica de control se alimenta mediante un convertidor DC-DC que genera las tensiones requeridas por la lógica.

Esta arquitectura permite una clara separación entre los subsistemas de potencia, control, accionamiento y planta, facilitando la integración del hardware, la depuración del sistema y su posible adaptación a futuras modificaciones del prototipo.

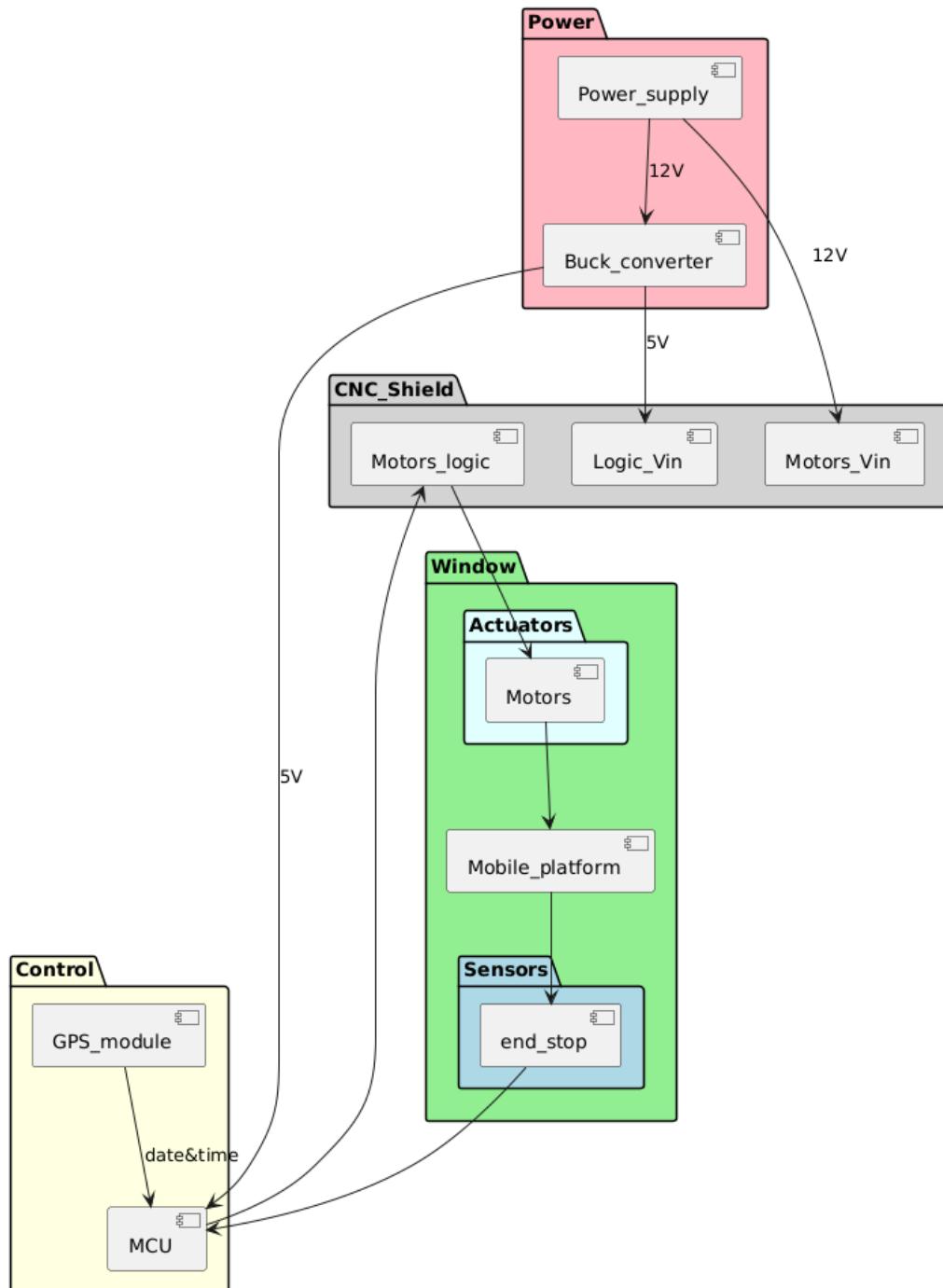


Figura 6.1: Diagrama de diseño de interconexiones hardware.

### 6.2.2. Subsistema de alimentación

El subsistema de alimentación es el encargado de proporcionar las tensiones necesarias para el correcto funcionamiento de los distintos bloques del sistema. Está compuesto por una fuente de alimentación principal de 12 V, encargada de suministrar energía al sistema de accionamiento, y por un convertidor DC-DC reductor que genera las tensiones necesarias para la lógica de control, es decir, para el correcto funcionamiento de las placas de expansión y del microcontrolador. Se escoge un convertidor Buck DC-DC que reduce con rectificación síncrona en un rango de 9-36 V a 5.2 V estables. Esta estabilidad resulta crítica para el correcto funcionamiento de la lógica de control. La separación entre la alimentación de potencia (motores) y de lógica permite amortiguar posibles interferencias eléctricas y garantizar una operación estable del microcontrolador y de los dispositivos de comunicación, contribuyendo a la fiabilidad global del sistema. Asimismo, cuenta con protección contra sobrecorriente y cortocircuito, protegiendo así los componentes conectados. Como puede apreciarse en el propio módulo, este convertidor permite la conexión USB con el microcontrolador y con cableado para la placa de expansión. Estas características han hecho este convertidor sobresalientemente adecuado para la alimentación de los componentes lógicos.

### 6.2.3. Subsistema de control

El subsistema de control está basado en un microcontrolador ESP32-S3, que actúa como núcleo del sistema embebido. Este bloque es responsable de la ejecución de los algoritmos de cálculo, la gestión de los modos de funcionamiento, el control del movimiento del panel móvil y la comunicación con el usuario. Recibe la referencia temporal a través de un módulo GPS conectado mediante una interfaz serie, garantizando la precisión necesaria para el cálculo de la posición solar. Asimismo, procesa las señales procedentes de los finales de carrera, que proporcionan información sobre los límites físicos del sistema y permiten implementar mecanismos de referencia y protección frente a errores.

Este enfoque centralizado simplifica la coordinación entre los distintos subsistemas y facilita la adopción de estrategias de supervisión y la implementación del control.

### 6.2.4. Subsistema de accionamiento

El subsistema de accionamiento está constituido por dos placas de expansión CNC Shield y los drivers de los motores paso a paso. Se empleará una para el movimiento vertical y otra para el horizontal, facilitando de esta forma la implementación y la posible modificación del conexionado. Este bloque actúa como interfaz entre el subsistema de control y los actuadores, traduciendo las señales lógicas generadas por el microcontrolador en corrientes adecuadas para el control de los motores. La comunicación entre el microcontrolador y el sistema de accionamiento se realiza mediante señales de control de tipo *step* y *direction*, coherentes con la estrategia de control en lazo abierto adoptada, acorde con los requisitos del prototipo experimental. Esta arquitectura permite un control preciso del desplazamiento del panel sin necesidad de realimentación continua de posición.

### 6.2.5. Subsistema de la planta

El sistema físico de la ventana está compuesto por la plataforma móvil, los motores paso a paso y los finales de carrera. Los motores transmiten el movimiento a la plataforma mediante mecanismos de correas y husillos, permitiendo el desplazamiento del panel en los ejes horizontal y vertical. Los finales de carrera delimitan los recorridos máximos permitidos y proporcionan referencias físicas al sistema de control, garantizando que el movimiento del panel se mantiene dentro de los límites mecánicos establecidos.

### 6.2.6. Discusión de la arquitectura hardware

La arquitectura propuesta permite una clara separación entre potencia, control y planta, facilitando la identificación de responsabilidades de cada subsistema y simplificando la integración del hardware y software. Esta organización resulta especialmente adecuada para el carácter experimental del proyecto, ya que permite modificar o sustituir bloques individuales sin afectar al conjunto del sistema.

La centralización de la lógica de control en el microcontrolador y el uso de interfaces estándar favorecen la escalabilidad del sistema y su posible migración a otras plataformas hardware en fases posteriores del proyecto.

## 6.3. Arquitectura funcional del sistema de control

Antes de abordar en detalle la arquitectura software y la implementación de los distintos módulos del sistema, es conveniente presentar una visión funcional de alto nivel del sistema de control. Esta representación permite identificar los principales bloques que intervienen en el sistema, así como los flujos de información entre el usuario, el sistema embebido y la planta física.

La Figura 6.2 muestra el diagrama de arquitectura funcional del sistema, donde se integran los subsistemas de control, interfaz de usuario, accionamiento y planta, independientemente de su implementación hardware o software concreta.

El usuario interactúa con el sistema a través de una interfaz gráfica, accesible mediante una web cliente, que se comunica de forma inalámbrica con el sistema embebido. Las peticiones del usuario son procesadas por el servidor web, que actúa como intermediario entre la interfaz y el microcontrolador.

El microcontrolador centraliza la lógica de control del sistema, integrando la información temporal proporcionada por el módulo GPS y el estado de los sensores de fin de carrera. A partir de esta información, genera las señales de control necesarias para el accionamiento de los motores, que producen el desplazamiento de la plataforma móvil. El estado del sistema es comunicado de vuelta al usuario mediante la misma cadena de comunicación inversa.

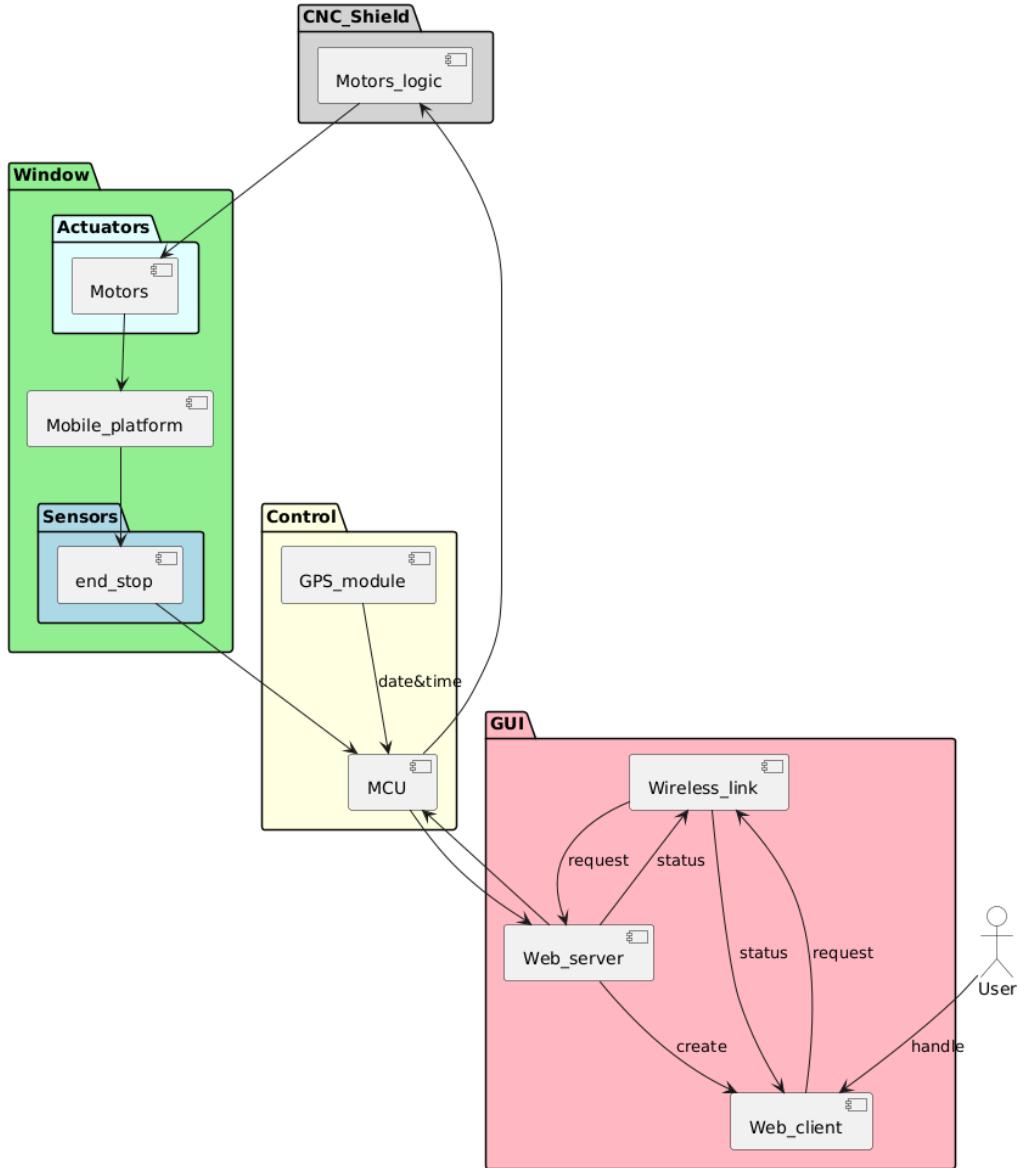


Figura 6.2: Diagrama de diseño funcional.

## 6.4. Diseño software

El diseño del software del sistema se aborda desde una perspectiva funcional y orientada al comportamiento, donde se prioriza la claridad en la descripción de los flujos de ejecución y de los intercambios de información frente a una abstracción descompuesta en bloques software.

Dado el carácter embebido del sistema, la lógica de control se articula principalmente en torno a eventos, estados y secuencias de ejecución bien definidas. En este contexto, el uso de diagramas de bloques software de alto nivel no representa eficazmente el funcionamiento real del sistema, ya que no refleja adecuadamente las interacciones temporales ni la dependencia entre los distintos modos de operación.

Por este motivo, el diseño software se documenta mediante diagramas de flujo, diagramas de flujo de datos y diagramas de secuencia UML, que permiten describir

de forma más precisa y comprensible el comportamiento del sistema en sus distintos modos de funcionamiento.

#### 6.4.1. Arquitectura software

La arquitectura software se ha diseñado con un enfoque orientado a funcionalidades. En el contexto del sistema embebido desarrollado, el uso de un diseño fuertemente orientado a objetos no resulta especialmente adecuado, dado que no se trabaja con objetos dinámicos ni con jerarquías complejas, sino con algoritmos, estados y flujos de ejecución bien definidos. En este sentido, el diseño se estructura alrededor de la implementación de los distintos algoritmos de control, cuyos datos se gestionan mediante estructuras globales compartidas que facilitan la interacción entre los bloques lógicos y la interfaz web.

El acceso a estas estructuras se encuentra condicionado por variables de estado que determinan el modo de funcionamiento activo, garantizando una ejecución coherente del sistema. De este modo, el programa se estructura de forma atómica, implementando cada modo y funcionalidad de manera independiente, lo que permite realizar pruebas específicas sobre cada bloque y comprobar su correcto funcionamiento de forma aislada.

Este enfoque favorece una elevada cohesión interna de cada módulo y un acoplamiento moderado entre ellos, priorizando la simplicidad, la rapidez de implementación y la facilidad de depuración, aspectos especialmente relevantes en el carácter experimental del proyecto. El sacrificio parcial en encapsulación se ve compensado por la agilidad en el desarrollo y la posibilidad de introducir modificaciones sin necesidad de reestructurar grandes secciones del código.

Los distintos algoritmos empleados han sido detallados en el marco teórico, por lo que en esta sección se hará referencia a ellos únicamente en el contexto de los modos de funcionamiento, sin entrar en profundidad en su formulación matemática.

La visibilidad entre bloques del sistema debe permitir que los parámetros introducidos por el usuario en la interfaz lleguen a los algoritmos de los distintos modos de funcionamiento, por lo que es necesario establecer una comunicación eficiente. Para ello, la web debe permitir el envío de parámetros al servidor, responsable de lanzar los distintos modos, siendo estos los responsables, a su vez, de ejecutar los algoritmos y controlar los motores. También se encarga de gestionar de manera activa el guardado de variables en la flash y la propia interfaz web. Figura 6.3

Con el objetivo de materializar este mecanismo de control, se ha definido una máquina de estados finitos que gobierna el comportamiento global del sistema y regula las transiciones entre los distintos modos de funcionamiento. Esta máquina de estados finitos tiene la responsabilidad de coercionar el acceso del usuario, a través de las condiciones de cambio de estado, a distintas funcionalidades que causarían un funcionamiento indeseado o inesperado en el programa. Asimismo, es el encargado de gestionar la resincronización del GPS, el modo automático y la manera en la que el microcontrolador entra en suspensión y sale de esta. Este enfoque resulta especialmente adecuado para sistemas embebidos reactivos, donde el comportamiento depende del estado global y de eventos externos asincrónicos.

La Figura 6.4 muestra la máquina de estados implementada, donde se representan los estados principales del sistema y las condiciones que habilitan las transiciones entre ellos.

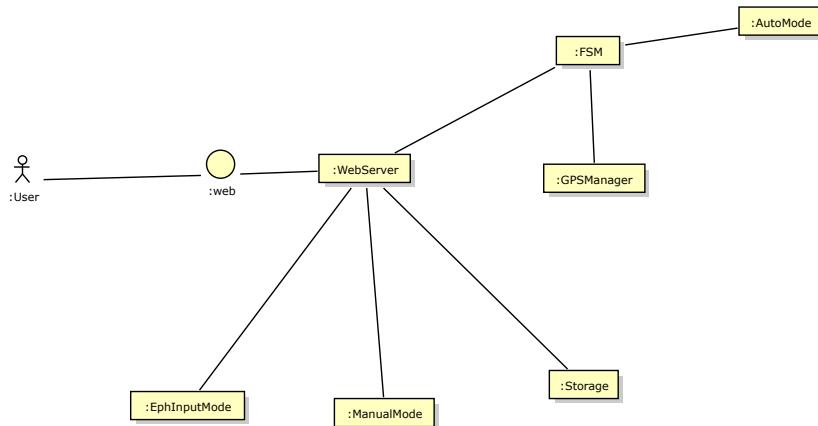


Figura 6.3: Diagrama de comunicación.

La máquina de estados no pretende detallar el comportamiento interno de cada modo, sino definir las condiciones de acceso, salida y coexistencia entre ellos, garantizando un uso coherente y seguro del sistema.

El entorno de Arduino propone utilizar una función inicial, `setup`, donde se inicializan los distintos componentes que forman el sistema y una función `loop` que se ejecuta en un bucle infinito. El comportamiento dual del microcontrolador permite mantener el servidor web de forma asíncrona mientras se maneja este bucle.

La Figura 6.5 muestra el flujo de ejecución asociado a la inicialización del servidor web y al proceso de sincronización temporal mediante GPS. En ella se observa cómo, tras el arranque del sistema, se habilitan los servicios de comunicación y se gestiona de forma robusta la adquisición de la referencia temporal, incluyendo mecanismos de reintento ante fallos de sincronización. De forma complementaria, la Figura 6.6 presenta un diagrama secuencial UML que describe el orden de ejecución de las rutinas de inicialización durante la fase de arranque.

El sistema tiene unos valores de configuración predefinidos para una lucernaria localizada en Madrid, orientada al sur. Estos valores deben ser configurables y rigen el flujo de datos del sistema. Con independencia del modo de funcionamiento activo, el sistema emplea un conjunto común de estructuras de datos que centralizan la información de configuración, posición y estado. La Figura 6.7 muestra el flujo de adquisición y actualización de estos datos, así como las distintas fuentes que pueden intervenir en su modificación.

Por último, se describen en detalle los distintos modos de funcionamiento implementados en el sistema de control. Cada modo responde a un objetivo operativo concreto y presenta diferencias tanto en el origen de los datos como en la cadena de procesamiento.

La descripción de cada modo es acompañada de los diagramas de flujo de datos

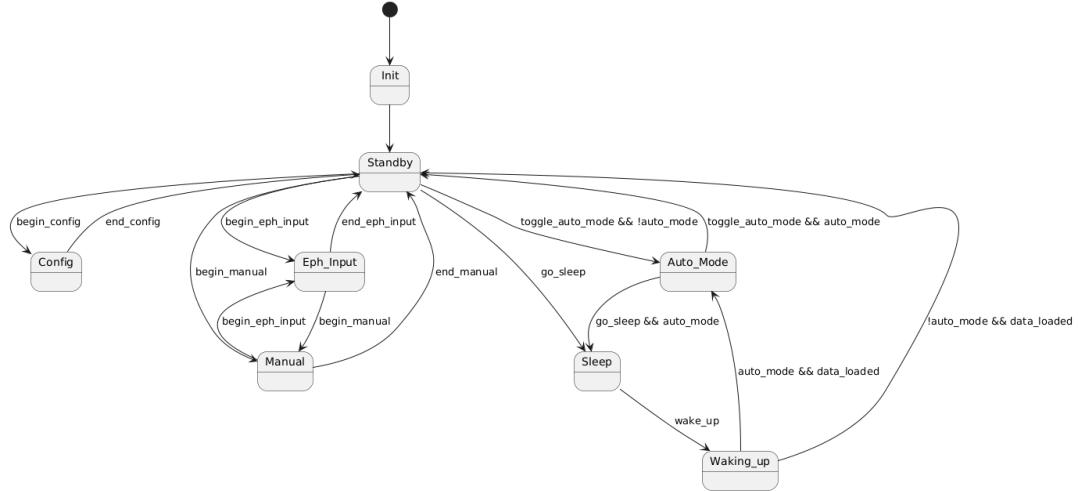


Figura 6.4: Máquina de estados finitos del sistema.

y los diagramas secuenciales correspondientes, con el fin de ilustrar de manera clara el comportamiento del sistema, el intercambio de información entre bloques y la secuencia de ejecución asociada. Este enfoque permite comprender no solo qué hace el sistema en cada modo, sino también cómo y en qué orden se llevan a cabo las distintas operaciones, manteniendo la coherencia con la máquina de estados definida previamente.

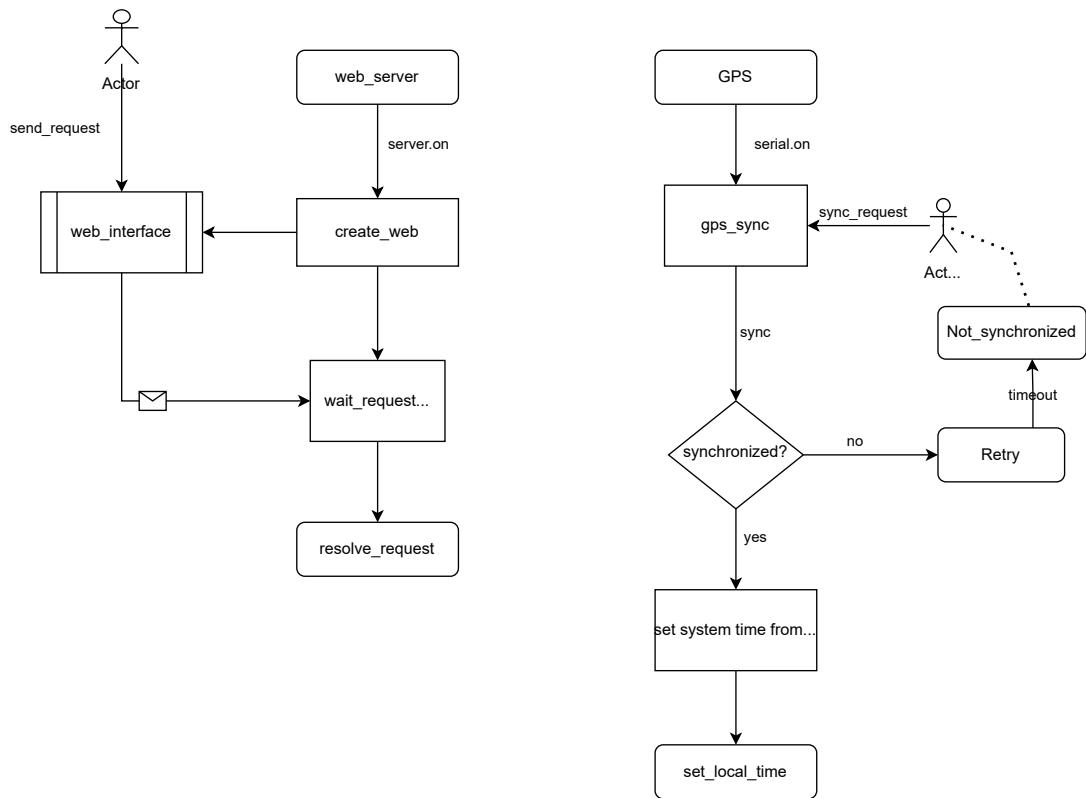


Figura 6.5: Rutinas de inicio del servidor web y GPS.

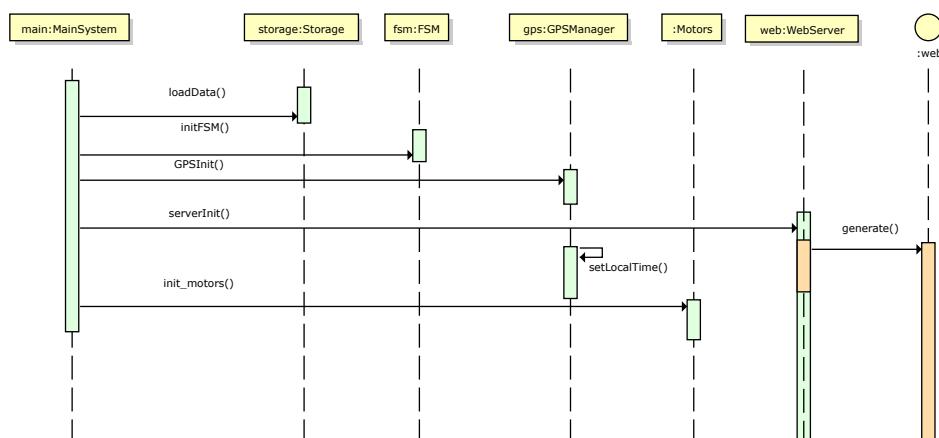


Figura 6.6: Diagrama secuencial de los procesos de inicio.

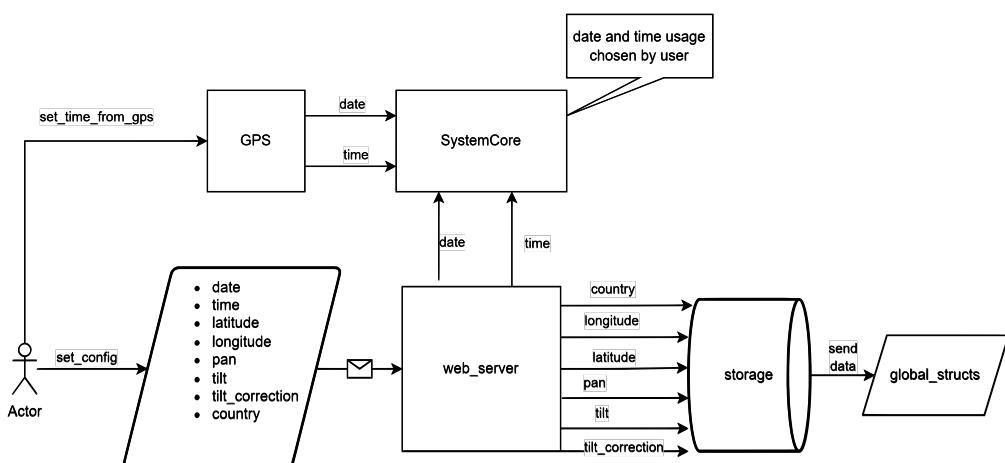


Figura 6.7: Flujo de datos del sistema.

### Modo automático

El modo automático se ejecuta en bucle e incluye los tres algoritmos que se implementan en la primera fase de desarrollo. Para el cálculo de efemérides solares, es necesario que el sistema conozca de antemano la fecha y la hora, pues es necesario ajustar el reloj del microcontrolador y para poder consultarlas en cada iteración y no depender constantemente del GPS, que permanecerá activo solo para la resincronización necesaria debido al desvío que se produce en el reloj interno de dicho microcontrolador, reduciendo los recursos que esta condición acarrea. También será necesario conocer la latitud y longitud donde se ubica la ventana, que se introduce en la configuración del sistema y permanece constante a no ser que se reconfigure. Este bloque utiliza el algoritmo SPA (Solar Position Array) de NMEA, versión extendida y precisa del procedimiento explicado en 2.2.

Una vez conocidos los ángulos azimutal y de elevación, junto con los parámetros de configuración de pan, tilt y corrección del tilt, se puede proceder al cálculo de los ángulos de incidencia [2.3.1], de los que se obtendrá la posición que debe ocupar el panel realizando una interpolación bilineal [2.4] de las matrices de ángulos de incidencia elaboradas en [3].

Por último, se enviará la posición que debe ocupar el panel a las funciones de movimiento que gestionan los motores.

El flujo de ejecución de este modo puede visualizarse en la Figura 6.9 a través de un diagrama secuencial UML. Adicionalmente, mediante la Figura 6.8 se muestra el diagrama de flujo de datos necesarios para la correcta ejecución de este modo.

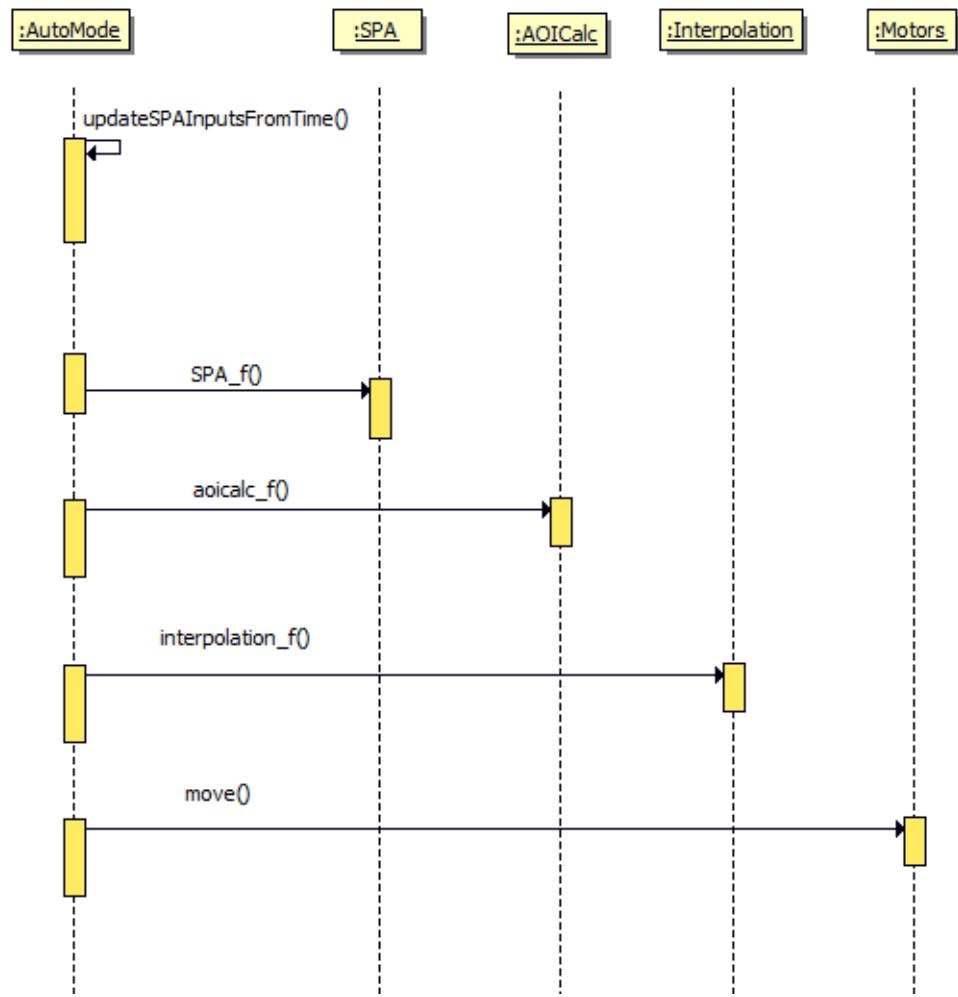


Figura 6.8: Diagrama secuencial del modo automático.

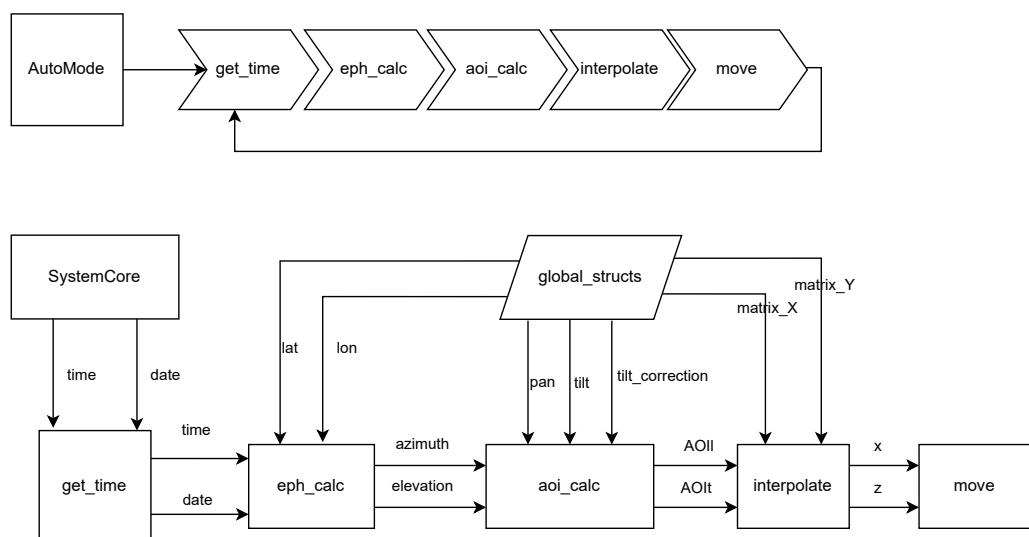


Figura 6.9: Diagrama de flujo del modo automático.

### Modo efemérides

Este modo recibe como parámetros una elevación y azimut introducidos por el usuario a través de la interfaz web, simulando una posición del Sol en el cielo, y desplaza el panel móvil a la posición correspondiente. Consecuentemente, es necesario que este modo calcule los ángulos de incidencia y realice la interpolación bilineal.

A pesar de que el modo efemérides reutilice gran parte de los bloques funcionales del modo automático, se documenta de forma independiente debido a la modificación en el origen de los datos y en la estructura del flujo de información. En este modo, los valores de azimut y elevación no se obtienen mediante el cálculo de efemérides, sino que son introducidos directamente por el usuario a través de la interfaz web, siendo gestionados por el CoreSystem.

El diagrama de flujo de datos mostrado en la Figura 6.10 pone de manifiesto esta diferencia, al eliminar el bloque de cálculo de efemérides y modificar la entrada de datos al sistema, manteniendo inalterados los bloques de cálculo de ángulos de incidencia, interpolación y movimiento.

### Modo manual

El modo manual constituye el modo de control más directo del sistema y está diseñado deliberadamente con una estructura mínima. Su objetivo no es la ejecución de algoritmos de cálculo, sino proporcionar al usuario un control inmediato sobre el movimiento del panel móvil, tanto mediante desplazamientos incrementales como a través de la introducción directa de coordenadas de posición.

En este modo, la cadena de ejecución se reduce a la recepción de órdenes desde la interfaz web, su validación por parte del sistema de control y la generación directa de las señales de movimiento correspondientes.

Este modo será necesario en futuros proyectos sobre la maqueta para parametrizar la iluminación de la ventana en el modo de generación o de máxima iluminación.

La Figura 6.11 muestra el diagrama de flujo de datos del modo manual. En él puede observarse la simplicidad del flujo, donde las órdenes introducidas por el usuario a través de la interfaz web se transmiten directamente al sistema de control para la ejecución del movimiento, sin bloques intermedios de procesamiento.

El flujo de ejecución de los modos manual y efemérides se representa mediante un único diagrama secuencial, mostrado en la Figura 6.12, con el objetivo de simplificar la documentación y evitar la duplicación de diagramas con estructuras muy similares.

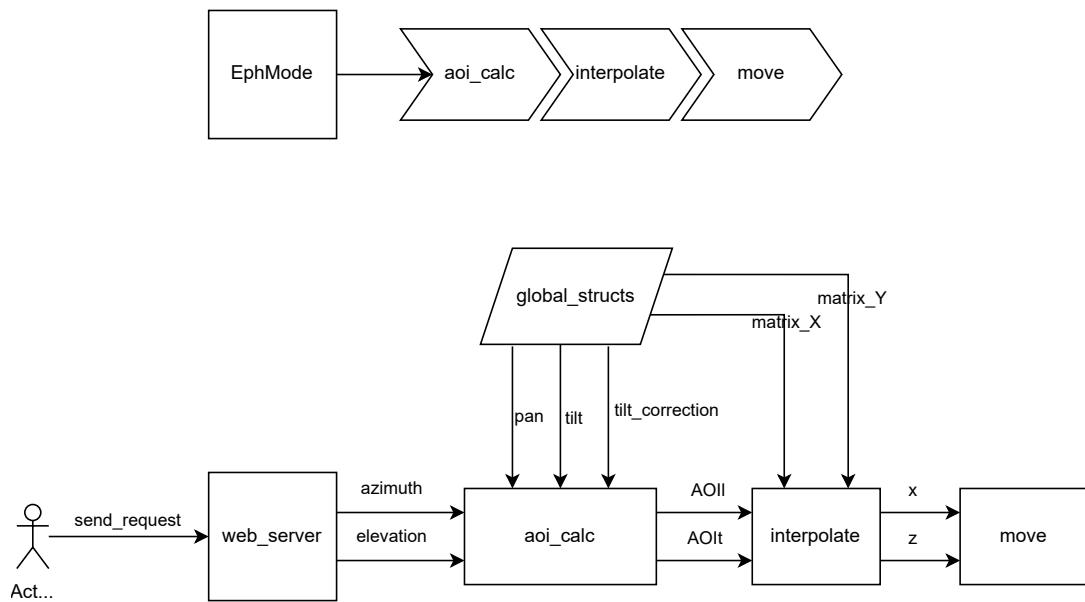


Figura 6.10: Diagrama de flujo de datos del modo efemérides.

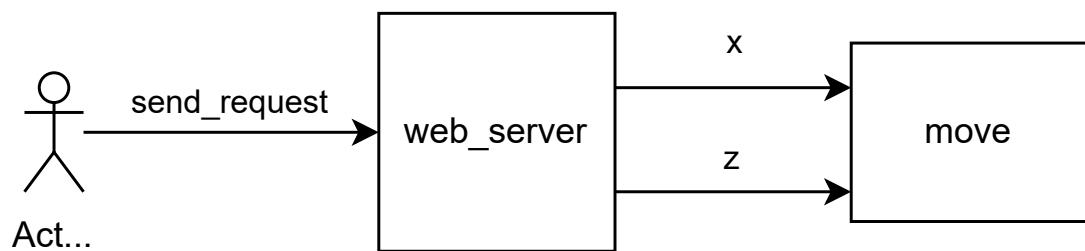


Figura 6.11: Diagrama de flujo de datos del modo manual.

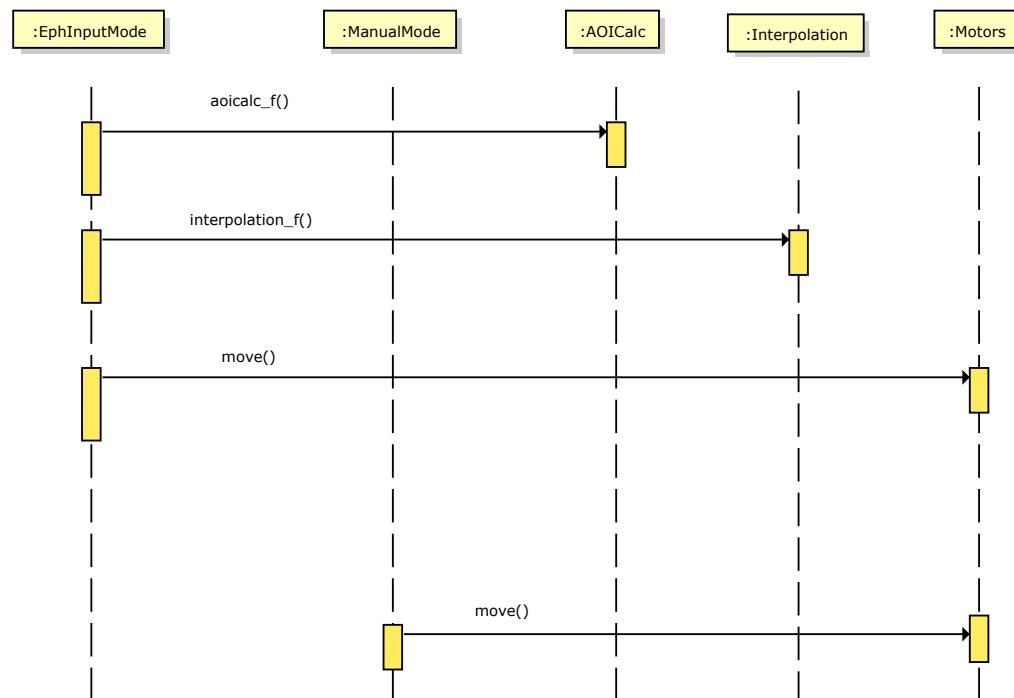


Figura 6.12: Diagrama secuencial de los modos manual y efemérides.

## 6.5. Diseño de la interfaz

El diseño de la interfaz debe permitir que el usuario acceda a todas las funcionalidades del programa. Esta se divide en cinco secciones, ordenadas según su disposición en la página web empezando por la superior: configuración, modo efemérides, modo manual, estado del sistema y botones generales para el modo automático, entrada del microcontrolador en *sleep*, reset y sincronizar la hora con el GPS. Las tres primeras secciones son accesible mediante un botón de inicio, *begin*, que permite acceder a ella, uno para el envío de formulario y uno último de vuelta a reposo. Como se ha mencionado anteriormente, las peticiones del usuario son validadas a través de la FSM, no permitiendo usar botones generales estando dentro de modos ni enviar peticiones sin estar en el estado correspondiente, y mediante los límites físicos de movimiento. La situación del sistema mostrada en *System Status* se actualiza cada segundo para poder seguirla en tiempo real. Los distintos bloques de la interfaz pueden visualizarse en la Figura 6.13.

**Initial Configuration**

Latitude:

Longitude:

Pan:

Tilt:

Tilt correction:  Enable  
Country:

**Manual Date & Time**

Date (YYYY-MM-DD):

Time (HH:MM:SS):

**System Status**

State: **AUTO\_MODE**  
Latitude: -34.61  
Longitude: -58.38  
Pan: 0  
Tilt: 0  
Tilt correction: Disabled  
Date: 2026-01-20  
Time: 11:48:20  
X position: 15.845435  
Z position: 67.516815

**Sun-Surface Angles**

Azimuth: 54.051553  
Elevation: 67.732005  
AOII: 18.339876  
AOIlt: 13.516679

**Ephemeris Input**

Azimuth:

Elevation:

**Manual Movement**

Global X / Z

X+   
Z-  Z+   
X-

X target:   
Z target:

(a) Configuración.

(b) Estado.

(c) Modo efemérides.

(d) Modo manual.

(e) Botones.

Figura 6.13: Interfaz gráfica de usuario.



## Capítulo 7

# Implementación del control de movimiento

Este capítulo describe el proceso de implementación y depuración del control de movimiento del sistema, poniendo el foco en las decisiones prácticas adoptadas y en los problemas reales detectados durante las pruebas experimentales. A diferencia del capítulo de diseño, donde se definen arquitecturas y responsabilidades, aquí se aborda cómo el sistema ha evolucionado desde una implementación mínima hasta una solución funcional y robusta, adecuada para la validación experimental del prototipo.

### 7.1. Implementación inicial del movimiento

En una primera etapa del desarrollo, el control del movimiento del panel móvil se implementó mediante una única función elemental, encargada de transformar desplazamientos expresados en milímetros en secuencias de pasos para los motores paso a paso. Esta función, denominada `move()`, coordinaba el movimiento de los motores asociados a los ejes vertical y horizontal, generando directamente las señales de tipo *step* y *direction* necesarias para el accionamiento.

En esta fase inicial no se implementaron rutinas de homing, mecanismos de compensación de holguras ni estrategias de protección frente a errores mecánicos o de sensorización. El objetivo de este enfoque deliberadamente simple era validar, lo más directamente posible, el funcionamiento básico del sistema de movimiento y comprobar la correcta generación de trayectorias, coordinadas por el usuario.

Este planteamiento permitió detectar de manera temprana una serie de problemas que no estaban relacionados con el software, sino con la integración mecánica y el comportamiento real del sistema físico.

### 7.2. Detección de problemas mecánicos

Durante las primeras pruebas de movimiento manual, se observó que uno de los motores asociados al eje vertical no respondía de forma consistente, a pesar de que las señales de control generadas por el microcontrolador eran correctas. Este comportamiento condujo a una profunda inspección del conjunto mecánico, en la que

se detectó que el eje del motor no se encontraba correctamente fijado, careciendo de los tornillos de apriete necesarios para asegurar la transmisión del par.

Esta falta de apriete provocaba un desacoplamiento total entre el motor y el sistema mecánico, dando lugar a movimientos erráticos en la plataforma, debidos a la inmovilidad de este motor, que, desde el punto de vista del software, eran indistinguibles de un fallo de control. Una vez corregido este problema mecánico, el sistema comenzó a comportarse de forma coherente en el eje vertical, permitiendo avanzar en la validación del resto del sistema.

Superado este primer inconveniente, las pruebas pusieron de manifiesto un segundo problema en el eje horizontal (eje Z). Los motores encargados del desplazamiento de los patines no se movían de forma completamente sincronizada, especialmente en el movimiento milímetro a milímetro con el pad de direcciones y en los cambios de sentido. Esto provocaba errores de posicionamiento y falta de repetibilidad, evidenciando la presencia de holguras mecánicas (*backlash*) en el conjunto husillo-correa-patín, así como diferencias en la respuesta dinámica de los motores.

### 7.3. Problema de backlash e histéresis en el eje Z

El *backlash*, o juego mecánico, aparece como una diferencia en la posición final alcanzada por el sistema, dependiendo del sentido desde el que se llega a dicha posición. En el modelo desarrollado, este efecto se hacía especialmente evidente en el eje Z, donde los cambios de sentido y las órdenes intermitentes de control provocaban pequeños desplazamientos no deseados antes de que el movimiento efectivo se transmitiera al panel móvil.

Este fenómeno introduce histéresis en el sistema, degradando la precisión y la repetibilidad del posicionamiento. Además, en las primeras pruebas, la combinación de holguras mecánicas y esfuerzos no compensados llegó a provocar situaciones de sobrecorriente en los drivers de los motores, derivando en la avería de algunos de ellos, que tuvieron que ser sustituidos. Estas incidencias manifestaron la necesidad de introducir mecanismos específicos de protección y compensación desde el software de control.

Adicionalmente, se identificó que parte del comportamiento no deseado del sistema no tenía su origen exclusivamente en la mecánica, sino también en la forma en la que se generaban las órdenes de movimiento durante el modo manual. En la implementación inicial, el pad de control manual enviaba comandos incrementales que provocaban desplazamientos inmediatos de la posición del sistema, ejecutando pequeños movimientos consecutivos cada vez que se pulsaba una dirección.

Este esquema de control paso a paso, aunque conceptualmente sencillo, acentuaba los efectos del backlash y la histéresis, especialmente en el eje Z. La sucesión de órdenes de pequeño desplazamiento a través de la interfaz web impedía que los patines y los elementos de transmisión funcionaran correctamente, dando lugar a movimientos imprecisos, falta de repetibilidad y esfuerzos innecesarios sobre los motores y los drivers. Esta falta de repetibilidad hace ineficiente la implementación de algoritmos de corrección de pasos, como el algoritmo de Bresenham, donde se cuantifica el error y se aplican avances o retrocesos en función de este error acumulado.

Por esta razón y, siendo suficiente para el ensayo experimental el movimiento manual mediante la introducción de posiciones absolutas, se ha decidido retirar el pad del sistema.

## 7.4. Implementación del homing y establecimiento de referencias

Para dar respuesta a los problemas detectados, se implementó una rutina de homing destinada a establecer una referencia absoluta de posición tras el arranque del sistema y al inicio de cada modo de funcionamiento. Este procedimiento permite eliminar la dependencia de la posición inicial del panel y garantizar que el sistema parte siempre de un estado conocido.

El proceso de homing se basa en una aproximación rápida a los finales de carrera, seguida de un retroceso controlado (*backoff*) y una segunda aproximación a velocidad reducida (*slow touch*). Esta estrategia permite mejorar la precisión en la detección de la posición de referencia y reducir los efectos de rebotes mecánicos o imprecisiones en los sensores.

Adicionalmente, se incorporaron contadores de seguridad que limitan el número máximo de pasos durante el proceso de homing, protegiendo el sistema frente a fallos en los finales de carrera o desconexiones accidentales. Una vez completado el homing, los contadores internos de posición se reinician y el sistema queda preparado para ejecutar movimientos relativos con una referencia coherente.

## 7.5. Compensación del backlash

Para mitigar los efectos del backlash en el eje Z, se implementó una función específica de compensación que se ejecuta durante la fase de inicialización de los motores y cada cierto tiempo, garantizando la estabilidad prolongada del sistema. Esta rutina consiste en la realización de ciclos controlados de avance y retroceso, forzando el asentamiento del sistema mecánico en una condición inicial reproducible.

Este enfoque no pretende eliminar el juego mecánico mediante modelos matemáticos complejos, sino reducir su impacto práctico asegurando que los elementos mecánicos parten siempre de una posición de contacto consistente. De este modo, se mejora de forma significativa la repetibilidad del movimiento, especialmente en aplicaciones donde los cambios de sentido son frecuentes.

## 7.6. Resultado de la evolución del control de movimiento

La implementación final del control de movimiento es el resultado de un proceso iterativo de prueba, detección de fallos y refinamiento progresivo. Partiendo de una función de movimiento básica, el sistema ha evolucionado incorporando rutinas de homing, mecanismos de protección y compensación de holguras, adaptándose a las limitaciones reales del sistema físico.

Este proceso ha permitido transformar un control puramente cinemático en un sistema de movimiento más robusto, repetible y seguro, adecuado para la validación experimental de los distintos modos de funcionamiento del sistema y para la obtención de resultados consistentes en las pruebas posteriores.

## 7.7. Detección de problemas software

Al ejecutar el modo efemérides, el movimiento prolongado de los motores provocaba que saltase un *watchdog* que reiniciaba el MCU, pues el proceso de motores bloqueaba la recepción de mensajes por parte del servidor (proceso *asynctcp*). Al crear un proceso ligero que aglutine el movimiento de los motores, se puede decidir qué procesador se emplea para la tarea FreeRTOS para evitar que se produzca esta colisión.

# Capítulo 8

## Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos tras la implementación, depuración y validación del sistema de control de movimiento. El objetivo principal de esta fase es verificar que el sistema es capaz de ejecutar desplazamientos precisos y reproducibles, coherentes con las posiciones teóricas definidas por el usuario o calculadas por los algoritmos de control.

Para ello, se han realizado ensayos experimentales en los distintos modos de funcionamiento, comparando las posiciones objetivo con las posiciones reales alcanzadas por el sistema, así como comprobando la correcta inicialización mediante el proceso de homing y la estabilidad del movimiento tras múltiples ciclos de operación.

### 8.1. Demostración del movimiento del sistema

Como primer paso, se ha verificado el correcto funcionamiento del sistema mecánico y del control de movimiento. El objetivo de esta prueba es demostrar que los ejes pueden desplazarse de forma independiente y conjunta, así como comprobar la correcta ejecución del proceso de homing, fundamental para garantizar una referencia absoluta del sistema.

Por esta razón, la demostración debe validar los siguientes aspectos:

- La correcta ejecución del proceso de homing.
- El movimiento independiente de los ejes vertical y horizontal.
- La coordinación entre ambos ejes en movimientos combinados.
- La capacidad del sistema para re-referenciarse tras desplazamientos arbitrarios.

La secuencia de imágenes fotográficas de la Figura 8.1 conforma una serie de escenarios ensayados representativos que demuestran el movimiento del sistema. Estos son:

1. Estado inicial del sistema, partiendo de una posición arbitraria 8.1a.
2. Ejecución del proceso de homing 8.1b.
3. Movimiento únicamente vertical (eje X) 8.1c.
4. Movimiento únicamente horizontal (eje Z) 8.1d.

5. Segunda ejecución del homing tras los desplazamientos 8.1e.
6. Movimiento combinado en los ejes X y Z 8.1f.

Estas pruebas gráficas permiten verificar visualmente que el sistema es capaz de recuperar correctamente su referencia mediante el proceso de homing, los movimientos en cada eje se realizan de forma independiente cuando así se solicita y el movimiento combinado se ejecuta sin interferencias entre ejes.

## 8.2. Validación de la precisión de posicionamiento

Una vez comprobada la capacidad de movimiento del sistema, se ha evaluado la precisión del posicionamiento en los distintos modos de funcionamiento. Para ello, se han comparado las posiciones teóricas calculadas por el sistema con las posiciones reales alcanzadas por la maqueta.

Las pruebas se han realizado en los tres modos, midiendo con un flexómetro los desplazamientos en los ejes X y Z para distintos comandos de entrada, sin realizar *homing* entre movimientos. Se ha considerado suficiente para la validación de posición medidas con precisión de milímetro, pues un error absoluto menor que esta unidad se considera aceptable para la posterior caracterización. Una vez eliminados los problemas de implementación ligados al software[ 7.3], el sistema no muestra error de posición, corroborando el buen posicionamiento del panel móvil durante períodos prolongados de actividad, con cambios de sentido involucrados.

Tras separar en dos procesadores distintos el movimiento y el servidor Wi-Fi, el mecanismo de movimiento horizontal ha reducido casi completamente el error de desplazamiento que se resultaba del movimiento con el pad unidad a unidad. Sin embargo, el movimiento intermitente de los motores de manera prolongada seguía propiciando la aparición de holguras que provocan un funcionamiento indeseado del sistema.

## 8.3. Resultados en el modo automático

El modo automático recibe como entradas del sistema la fecha y la hora, a partir de las cuales se calculan internamente los ángulos solares mediante el algoritmo SPA. Para la validación de este modo, se han probado distintas configuraciones de fecha y hora a lo largo del día.

Para cada configuración, se ha registrado:

- Fecha y hora introducidas.
- Ángulos solares calculados (azimut y elevación).
- Ángulos de incidencia resultantes.
- Desplazamientos teóricos en los ejes X y Z.
- Posición real alcanzada por el sistema.

Los resultados obtenidos se han comparado con cálculos externos realizados en python, empleando la librería PVLIB extensamente empleada para la caracterización y validación de sistemas seguidores fotovoltaicos. De esta forma se verifica que

los ángulos solares y los desplazamientos coinciden con los valores obtenidos por el microcontrolador. Finalmente, se ha comprobado de forma experimental que la maqueta alcanza las posiciones correspondientes a cada configuración temporal.

| Configuración |              |         |         |                         |          |         |  |
|---------------|--------------|---------|---------|-------------------------|----------|---------|--|
| Caso          | Ciudad       | Lat (°) | Lon (°) | Fecha y hora            | Tilt (°) | Pan (°) |  |
| 1             | Madrid       | 40.41   | -3.70   | 2026-01-15 15:37:49 +02 | 90       | 180     |  |
| 2             | Madrid       | 40.41   | -3.70   | 2026-01-15 13:19:12 +02 | 90       | 180     |  |
| 3             | Madrid       | 40.41   | -3.70   | 2026-01-15 15:35:54 +02 | 75       | 200     |  |
| 4             | Madrid       | 40.41   | -3.70   | 2026-01-15 15:58:37 +02 | 85       | 135     |  |
| 5             | Buenos Aires | -34.61  | -58.38  | 2026-01-20 11:48:20 -03 | 0        | 0       |  |
| 5             | Bialystok    | -34.61  | -58.38  | 2026-01-20 11:48:20 -03 | 0        | 0       |  |

| Azimut y Elevación |            |        |       |               |       |       |  |
|--------------------|------------|--------|-------|---------------|-------|-------|--|
| Caso               | Azimut (°) |        |       | Elevación (°) |       |       |  |
|                    | py         | esp    | error | py            | esp   | error |  |
| 1                  | 199.16     | 199.16 | 0.00  | 26.22         | 26.22 | 0.00  |  |
| 2                  | 163.01     | 163.01 | 0.00  | 26.71         | 26.70 | 0.01  |  |
| 3                  | 198.68     | 198.65 | 0.03  | 26.34         | 26.34 | 0.00  |  |
| 4                  | 204.29     | 204.28 | 0.01  | 24.76         | 24.76 | 0.00  |  |
| 5                  | 54.04      | 54.05  | 0.01  | 6.77          | 6.77  | 0.00  |  |
| 6                  | 170.41     | 170.41 | 0.00  | 18.03         | 18.02 | 0.01  |  |

| Ángulos de Incidencia (AOI) |          |        |       |          |       |       |  |
|-----------------------------|----------|--------|-------|----------|-------|-------|--|
| Caso                        | AOIL (°) |        |       | AOIT (°) |       |       |  |
|                             | py       | esp    | error | py       | esp   | error |  |
| 1                           | -19.16   | -19.16 | 0.00  | 27.54    | 27.53 | 0.01  |  |
| 2                           | 16.99    | 16.97  | 0.02  | 27.75    | 27.76 | 0.01  |  |
| 3                           | 12.03    | 12.03  | 0.00  | 11.34    | 11.35 | 0.01  |  |
| 4                           | -67.23   | -67.22 | 0.01  | 47.52    | 47.50 | 0.02  |  |
| 5                           | 18.33    | 18.34  | 0.01  | 13.52    | 13.52 | 0.00  |  |
| 6                           | 9.12     | 9.13   | 0.01  | 3.27     | 3.26  | 0.01  |  |

| Posición (X, Z) |       |       |       |       |       |       |  |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| Caso            | X     |       |       | Z     |       |       |  |
|                 | py    | esp   | error | py    | esp   | error |  |
| 1               | 23.89 | 23.93 | 0.04  | 64.88 | 64.89 | 0.01  |  |
| 2               | 28.56 | 28.57 | 0.01  | 65.89 | 65.88 | 0.01  |  |
| 3               | 14.34 | 14.35 | 0.01  | 71.44 | 71.44 | 0.00  |  |
| 4               | 20.35 | 20.35 | 0.00  | 20.51 | 20.41 | 0.10  |  |
| 5               | 15.85 | 15.85 | 0.00  | 67.52 | 67.52 | 0.00  |  |
| 6               | 4.59  | 4.58  | 0.01  | 61.80 | 61.79 | 0.01  |  |

Tabla 8.1: Comparación entre resultados Python y ESP con error absoluto

A partir de los valores obtenidos para las posiciones calculadas, se ha evaluado el error absoluto medio entre los resultados generados por el modelo en Python y los obtenidos en el sistema embebido (ESP). El error absoluto promedio en la coordenada X es de 0,010, mientras que en la coordenada Z el valor asciende a 0,022. Estos resultados indican una alta concordancia entre ambos sistemas, siendo las discrepancias numéricas reducidas y atribuibles principalmente a efectos de redondeo y diferencias en la precisión del método de cálculo, pues PVLIB de Python tiene mayor precisión que el algoritmo de SPA empleado.

## 8.4. Validación del modo efemérides

Para la validación de este modo, se han empleado los ángulos azimutales y de elevación que han resultado de las distintas validaciones del modo automático. A partir de estos valores, el sistema calcula los desplazamientos correspondientes en los ejes X y Z. En la Figura ?? puede visualizarse como el posicionamiento es idéntico en ambos modos, comprobados en el caso 6 la Tabla 8.1.

## 8.5. Consumo energético

Para medir el consumo del sistema se ha empleado un multímetro que registra los datos medidos y pueden ser extraídos en formato csv. El estudio se realiza durante veinte minutos recogiendo la medida instantánea de la corriente tomando tres muestras cada intervalo de diez segundos. Este dispositivo agrega los picos máximos y mínimos para la integración de la corriente media, dando un resultado con precisión suficiente para su análisis. Las mediciones pueden consultarse en la tabla 8.2.

Mientras que el procesador ESP32 consume en el orden de micro-amperios, los elementos auxiliares de la placa de desarrollo, como el conversor USB-UART, el regulador de tensión y los LEDs y el LDO, permanecen activos incluso cuando el núcleo del microcontrolador se encuentra en reposo.

En la Figura 8.2 se representa la evolución temporal de la corriente media consumida por el microcontrolador, obtenida a partir de las medidas experimentales realizadas con una tensión de alimentación constante en el convertidor buck DC-DC de 5 V, y de la fuente de alimentación, con una tensión de 12 V y hasta 6 A.

A partir de los valores de corriente registrados, se ha calculado la potencia instantánea como el producto de la tensión de alimentación y la corriente media medida. Con una intensidad media en la fuente de 0,1896, A:

$$P_{24/7} = 12,3, \text{V} \cdot 0,1896, \text{A} = 2,333, \text{W} \quad (8.1)$$

$$E_{20\min} = 0,57 \text{ Wh} \quad (8.2)$$

Suponiendo un funcionamiento continuo del sistema durante las 24 h del día, la potencia media obtenida a partir del ensayo se ha extrapolado a un periodo anual completo. Bajo esta hipótesis pesimista, el consumo energético anual del microcontrolador vendría dado por:

$$E_{\text{anual},24/7} = 2,333, \text{W} \cdot 8760, \text{h} \approx 20,4, \text{kWh/año} \quad (8.3)$$

Como aproximación más realista, se ha considerado un modelo de funcionamiento diferenciado entre periodo diurno y nocturno. Durante las horas nocturnas, el microcontrolador se mantiene en estado activo sin ejecución de tareas adicionales, conservando la conectividad Wi-Fi. La corriente media de la fuente en este estado es de 0,1638 V. La potencia consumida durante el periodo nocturno viene dada por:

$$P_{\text{noche}} = 12,3, \text{V} \cdot 0,1638, \text{A} \approx 2,01, \text{W} \quad (8.4)$$

Durante el periodo diurno, el sistema opera en modo automático con seguimiento solar activo, presentando una corriente media en la fuente de 0,1896, A, lo que corresponde a una potencia media de:

|                 | $I_{\text{máx}} [\text{A}]$ | $\langle I \rangle [\text{A}]$ |
|-----------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Fuente 12V      | 1.6253                      | 0.1896                         |
| Fuente sleep    |                             | 0.1202                         |
| MCU + GPS 5V    | 0.4076                      | 0.3383                         |
| MCU_SLEEP + GPS |                             | 0.2124                         |
| GPS             |                             | 0.0403                         |

Tabla 8.2: Consumo de corriente.

$$P_{\text{día}} = 12,3 \text{ V} \cdot 0,1896 \text{ A} \approx 2,33 \text{ W} \quad (8.5)$$

Para la localización de Madrid se han considerado aproximadamente 2900 h/año de funcionamiento diurno y 5860 h/año de funcionamiento nocturno. De este modo, el consumo energético anual total del microcontrolador se estima como:

$$\begin{aligned} E_{\text{anual}} &= P_{\text{día}} \cdot 2900 + P_{\text{noche}} \cdot 5860 \\ &\approx 2,33 \cdot 2900 + 2,01 \cdot 5860 \\ &\approx 18,5 \text{ kWh/año} \end{aligned} \quad (8.6)$$

Los microprocesadores de 32 bits tienen distintas estrategias de ahorro energético. En el MCU seleccionado se puede escoger entre distintos modos de "sueño", donde el microprocesador se desprende de una parte o la totalidad de sus funciones. Para este sistema generador se usa el sueño profundo, siendo este el de mayor ahorro energético, pues el sistema debe consumir lo menos posible durante el transcurrir la noche. El estado de sueño profundo al que entra el MCU desde el modo automático cuando anocchece, despertando al amanecer, o seleccionándolo durante un periodo de tiempo específico desde *standby* o el propio modo automático, solo mantiene el RTC y las interrupciones. De este modo, permanece durmiendo hasta que se active una señal física de despertar o llegue la hora indicada.

Siguiendo el procedimiento anterior considerando la corriente de la fuente en modo sueño profundo, se obtiene:

$$E_{\text{anual}} \approx 15,4 \text{ kWh/año} \quad (8.7)$$

Una vez que se tienen los consumos anuales para los distintos casos, es procedente calcular el porcentaje de reducción de consumo que se consigue al emplear el modo de sueño para las horas de oscuridad de la siguiente manera:

$$E_{\text{anual,normal}} \approx 18,5 \text{ kWh/año} \quad (\text{sin sueño profundo}) \quad (8.8)$$

$$E_{\text{anual,profundo}} \approx 15,4 \text{ kWh/año} \quad (\text{con sueño profundo}) \quad (8.9)$$

$$\Delta E = E_{\text{anual,normal}} - E_{\text{anual,profundo}} \quad (8.10)$$

$$= 18,5 - 15,4 \quad (8.11)$$

$$= 3,1 \text{ kWh/año} \quad (8.12)$$

$$\text{Reducción \%} = \frac{\Delta E}{E_{\text{anual,normal}}} \cdot 100 \quad (8.13)$$

$$= \frac{3,1}{18,5} \cdot 100 \quad (8.14)$$

$$\approx 16,8 \% \quad (8.15)$$

Consultando ensayos anteriores sobre las células que se emplearán para la caracterización del sistema sobre un panel de 140x75 cm ubicado en Madrid, con un tilt de 75° y un pan de 180° se ha estimado que produce una energía anual de 148,27 kWh/año, lo que supone un coeficiente de rendimiento respecto a un panel comercial convencional del 60,53%. Entonces, para un panel móvil con dimensiones de 75x75 cm:

$$E_{120x60} \approx 101,67 \text{ kWh/año} \quad (8.16)$$

y considerando el consumo eléctrico invertido en alimentar el sistema:

$$E_{th\_prototipo} \approx 86,27 \text{ kWh/año} \quad (8.17)$$

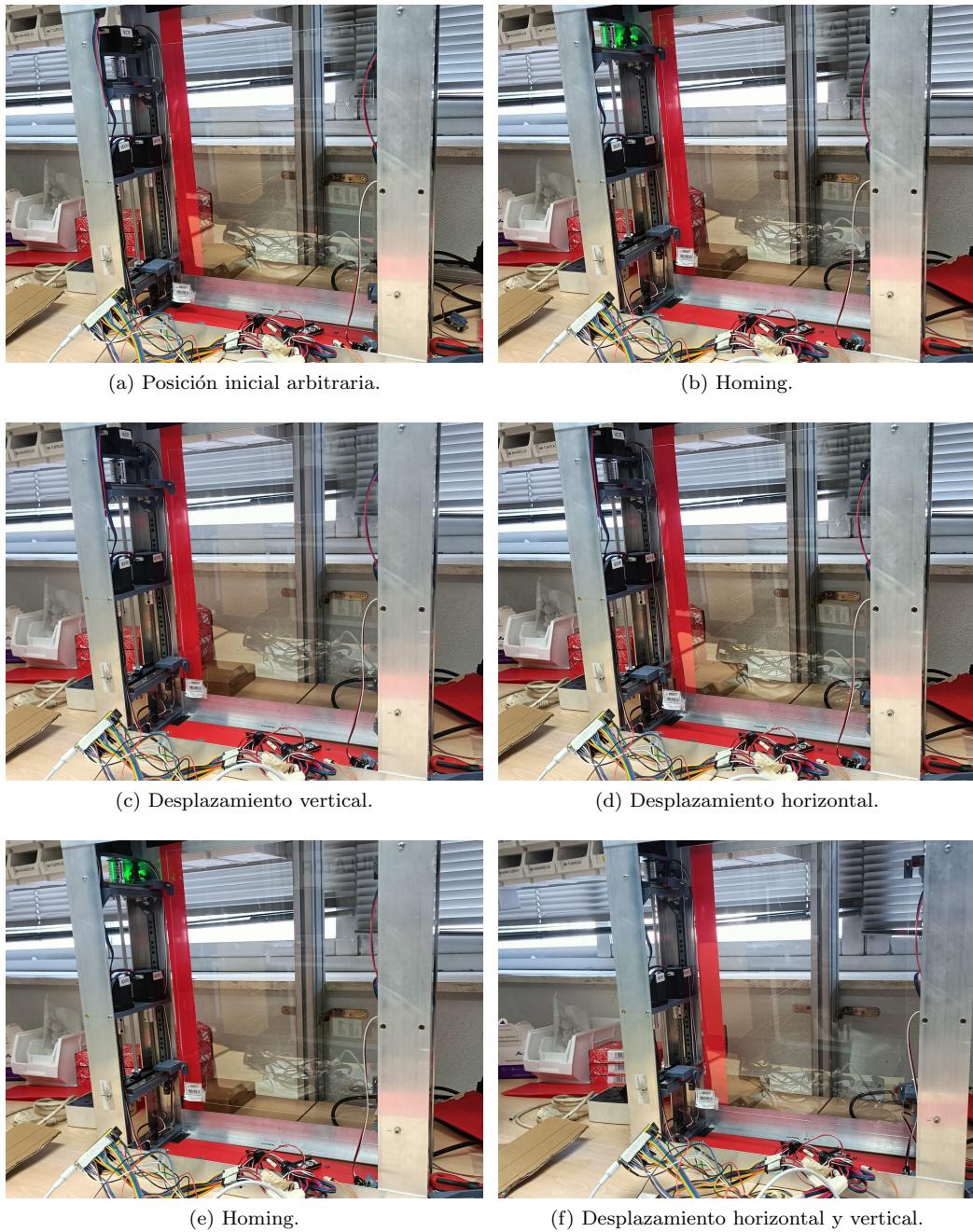


Figura 8.1: Secuencia de demostración del movimiento.

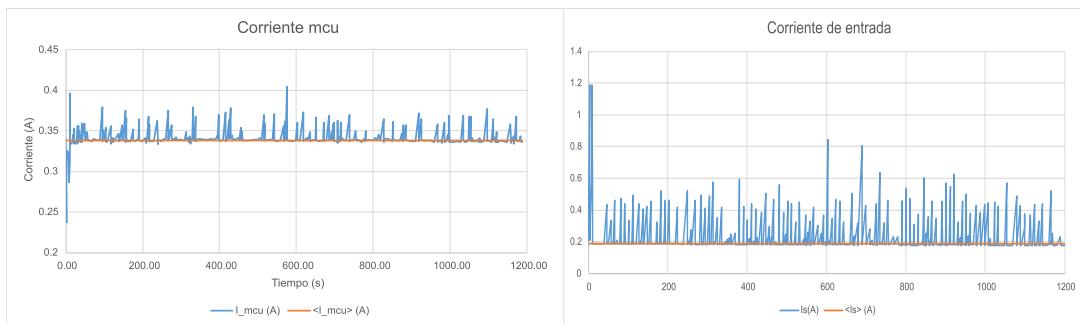
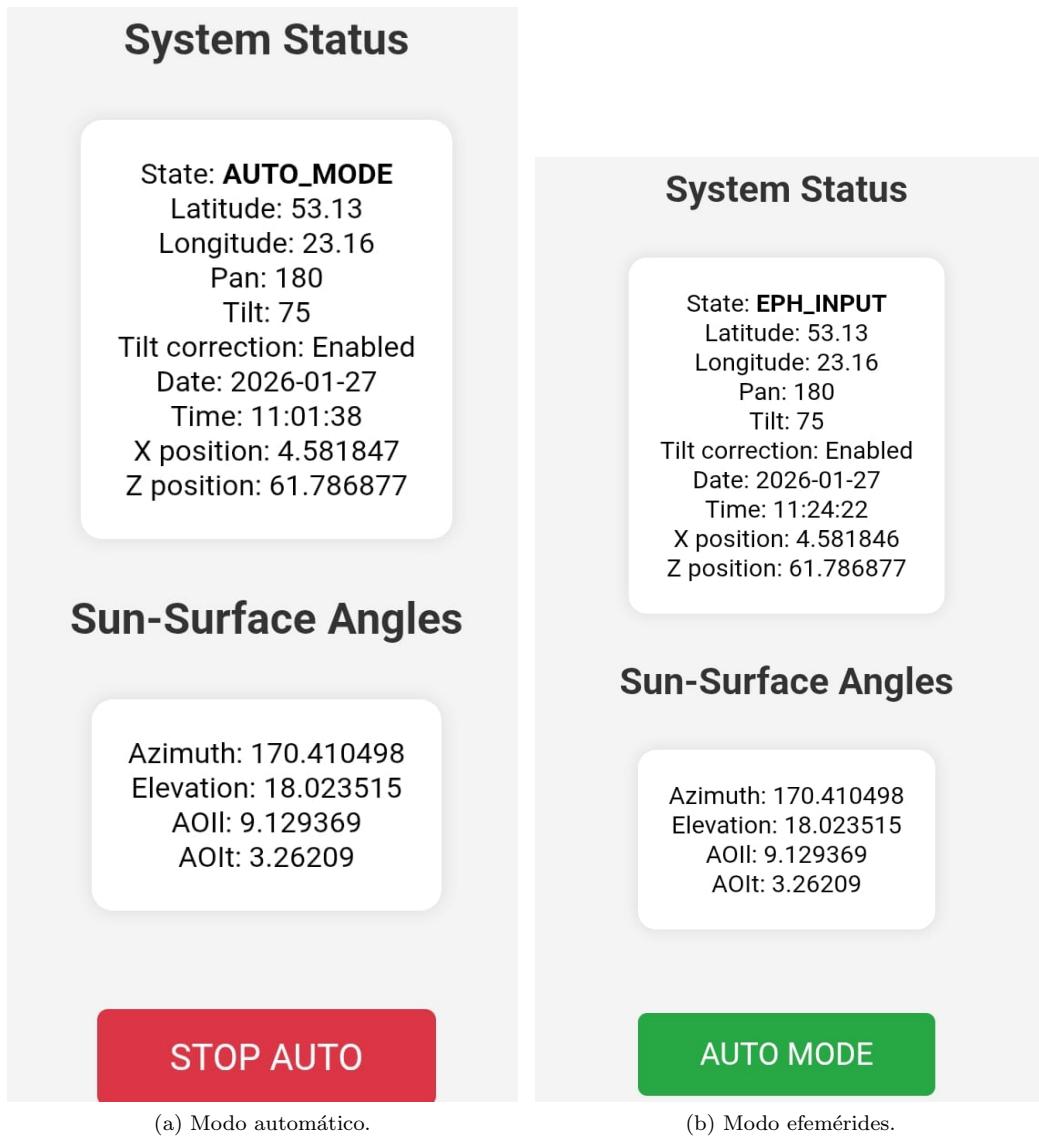


Figura 8.2: Corrientes frente al tiempo. Izquierda MCU, derecha fuente de alimentación.

# Capítulo 9

## Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado y validado un sistema de control para la captación solar de una ventana que combina concentración óptica lineal, seguimiento activo en dos ejes y generación fotovoltaica. El objetivo principal del proyecto ha sido estudiar la viabilidad técnica de este tipo de dispositivos, así como sentar las bases para su control y optimización, en el marco de aplicaciones BIPV con capacidad de adaptación al entorno solar.

A lo largo del proyecto se ha abordado el problema desde una perspectiva multidisciplinar, integrando aspectos de óptica geométrica, diseño mecánico, electrónica de control y modelado del movimiento solar. Esta aproximación ha permitido no solo construir un prototipo funcional, sino también brindar la oportunidad de analizar de forma coherente el comportamiento del sistema en condiciones reales de operación.

### 9.1. Evaluación global de los resultados

Los resultados obtenidos confirman que el sistema es capaz de seguir de forma consistente el movimiento solar mediante el uso de efemérides y transformaciones geométricas, manteniendo alineado el plano móvil con la posición de máxima captación del sistema óptico. El modelo de conversión entre coordenadas solares y coordenadas del módulo demuestra ser adecuado para describir la posición relativa del Sol respecto al sistema, permitiendo calcular los ángulos de incidencia relevantes con una precisión tal, que no produce desviaciones de posición suficientemente significativas.

Desde el punto de vista mecánico, los mecanismos de desplazamiento vertical y horizontal presentan un comportamiento suficientemente robusto y preciso para el rango de aplicación considerado. La resolución obtenida mediante el uso de husillos, correas dentadas y microstepping resulta coherente con los requisitos del sistema, permitiendo posicionar teóricamente la línea focal concentrada dentro de la región activa de las células fotovoltaicas. A partir de la validación de los distintos modos de funcionamiento en fechas, lugares y horas distintas, se concluye que el sistema es capaz de ejecutar movimientos fiables y repetibles en los ejes X y Z, recuperar una referencia absoluta mediante el proceso de homing y traducir correctamente entradas de tipo geométrico (posiciones espaciales y azimut y elevación) y temporal (fecha y hora) en movimientos físicos.

Estos resultados validan el funcionamiento del sistema de control desarrollado y sientan las bases para futuras mejoras y ampliaciones del prototipo. En términos energéticos, el consumo del sistema se sitúa dentro de valores compatibles con una

aplicación autónoma o semi-autónoma. El análisis diferenciado entre funcionamiento diurno y nocturno muestra que el uso de estrategias de gestión energética, como los modos de reposo del microcontrolador, tiene un impacto significativo en el consumo anual, reforzando la importancia del control no solo óptico y mecánico, sino también energético.

## 9.2. Discusión de aspectos clave

Uno de los aspectos más relevantes del proyecto es la validación experimental del concepto de concentración lineal aplicada a un sistema tipo ventana. A diferencia de sistemas de concentración puntual, la configuración lineal simplifica tanto el diseño óptico como el mecánico, adaptándose de forma natural a dispositivos alargados y planos, como los elementos acristalados en fachadas.

Asimismo, el uso de seguimiento activo permite mitigar uno de los principales problemas de los sistemas de concentración estáticos: la pérdida de eficiencia debida al desplazamiento del foco a lo largo del día. Los resultados muestran que, incluso con un control relativamente sencillo -movimiento en dos ejes cartesianos-, es posible mantener condiciones favorables de incidencia durante una parte significativa del ciclo solar.

El modelo de control basado en efemérides, en lugar de sensores solares directos, aporta robustez y previsibilidad al sistema, reduciendo la dependencia de condiciones atmosféricas variables. Esta elección resulta especialmente adecuada en aplicaciones arquitectónicas, donde la fiabilidad y la integración discreta son factores clave.

## 9.3. Rendimiento de la selección tecnológica

La elección del entorno de Arduino ha resultado enormemente satisfactoria desde el comienzo de la programación, gracias a que permite monitorear constantemente la ejecución del programa a través de la comunicación serie entre la computadora y el microcontrolador. Asimismo, la inmensa cantidad de documentación que el su foro alberga, han sido de gran utilidad solucionando errores comunes y no tan comunes que aparecen en desarrollos similares.

El ESP32 se ha comunicado con el GPS satisfactoriamente sin grandes esfuerzos de programación, han quedado libres varios pines de comunicación configurables que permiten la inclusión de nuevos dispositivos en el sistema y ha reaccionado favorablemente durante todas las validaciones del sistema de control. El doble núcleo del procesador permite que no haya bloqueos en la ejecución de procesos prolongados gracias a permitir ligar tareas o procesos ligeros a uno de sus procesadores, solventando limitaciones de seguridad hardware que, de eliminarse, pueden producir daños severos al MCU.

Esta serie de cuestiones evidencia por qué selecciones tecnológicas basadas en microcontroladores de la misma familia están reemplazando los módulos de arduino convencionales. Así mismo, para proyectos de características similares donde sea necesaria la comunicación Wi-Fi, resulta un serio competidor de la familia STM32.

## 9.4. Fiabilidad del diseño

El planteamiento arquitectónico inicial del sistema ha resultado especialmente robusto, ya que ha permitido completar el desarrollo sin introducir cambios estructurales respecto al diseño original. El prototipo final se ajusta de forma precisa a la concepción inicial, validando la corrección de las decisiones tomadas en las primeras etapas del proyecto.

Además, la modularidad del diseño ha facilitado la incorporación de nuevas funcionalidades y la resolución de incidencias durante la implementación, demostrando una elevada flexibilidad y capacidad de adaptación sin comprometer la estabilidad del sistema.

## 9.5. Limitaciones del sistema

A pesar de los resultados satisfactorios, el sistema presenta una serie de limitaciones inherentes al carácter experimental del prototipo. La presencia de holguras en el desplazamiento horizontal deja de manifiesto que, en el caso de mantenerse un diseño con correas, estas deben de ser de algún material que resista posibles tensiones generadas en el mecanismo provocadas por el movimiento y los cambios de sentido y temperaturas extremas que puedan producirse en el interior de la ventana.

Por último, el consumo energético del sistema, aunque razonable, está condicionado por el uso de una placa de desarrollo y componentes auxiliares que no están optimizados para bajo consumo, lo que abre la puerta a mejoras significativas en futuras iteraciones.

## 9.6. Aportación del proyecto

Este proyecto aporta una demostración práctica de la viabilidad de integrar concentración óptica, seguimiento solar y generación fotovoltaica en un dispositivo tipo ventana compacto. Más allá del prototipo construido, se ha desarrollado una metodología clara para el modelado geométrico, el control del movimiento y la evaluación energética del sistema.

El trabajo se enmarca en una línea de investigación emergente orientada a envolventes arquitectónicas activas, capaces de adaptarse dinámicamente a las condiciones solares. En este contexto, el sistema desarrollado puede considerarse un banco de pruebas para futuras soluciones BIPV avanzadas, como las exploradas en el proyecto SMARTWIN.

## 9.7. Líneas de trabajo futuro

Como continuación natural de este trabajo viene el proceso de caracterización del sistema. Para ello, una vez validado el programa de movimiento, se debe fijar la lente de fresnel en el frontal de la ventana y colocar los módulos lineales en el plano móvil. De esta forma puede dar comienzo un análisis exhaustivo de la óptica y la generación de este sistema compacto.

Se plantean diversas líneas de mejora, como la optimización del diseño mecánico para reducir holguras y mejorar la repetibilidad o la integración de estrategias

software y componentes electrónicos específicamente diseñados para bajo consumo. En una primera aproximación cabría considerar el empleo de MOSFET que apaguen totalmente el suministro de los motores y demás componentes activos al entrar en sueño profundo, además de una batería que mantenga al microcontrolador en este estado. Adicionalmente, se podrían emplear modos de sueño ligeros para reducir el consumo del sistema entre el final de los algoritmos de desplazamiento y las iteraciones de movimiento de motores.

Finalmente, la validación del sistema en un entorno arquitectónico real, evaluando simultáneamente generación eléctrica, iluminación natural y confort térmico, constituiría un paso decisivo hacia la aplicación práctica de este tipo de soluciones en edificios.

## 9.8. Impacto ambiental

En el contexto actual de transición energética y descarbonización del sector de la edificación, el desarrollo de soluciones BIPV avanzadas se alinea con los objetivos establecidos por la Unión Europea en materia de eficiencia energética y reducción de emisiones. En particular, las directivas y estrategias europeas para 2030 y 2050 plantean una mejora sustancial del comportamiento energético de los edificios, tanto residenciales como no residenciales, así como una progresiva integración de generación renovable distribuida.

En este marco, si los resultados de caracterización fotovoltaica del sistema desarrollado en este trabajo resultan positivos, la generalización de soluciones de este tipo podría contribuir a mejorar la eficiencia energética de las envolventes arquitectónicas, transformando elementos tradicionalmente pasivos, como las ventanas, en componentes activos capaces de generar energía eléctrica.

La integración de concentración óptica y seguimiento solar en dispositivos acristalados permitiría aumentar el aprovechamiento del recurso solar disponible en entornos urbanos densos, donde la superficie útil para generación renovable es limitada. De este modo, este tipo de sistemas podría aportar una vía complementaria para reducir la demanda energética neta de los edificios y, en consecuencia, sus emisiones asociadas.

Asimismo, la adopción de soluciones de generación distribuida integradas en fachadas podría favorecer, a largo plazo, un mayor grado de autosuficiencia energética en grandes núcleos urbanos, contribuyendo a la resiliencia del sistema energético y a la reducción de pérdidas asociadas al transporte de energía.

En cualquier caso, el alcance real de este impacto dependerá de factores externos al propio sistema, como el marco normativo, la viabilidad económica, la aceptación por parte del sector de la edificación y la integración con las infraestructuras energéticas existentes. El presente trabajo no pretende cuantificar dicho impacto a gran escala, sino aportar una base técnica que permita evaluar el potencial de este tipo de soluciones en futuros desarrollos.

# Apéndice A

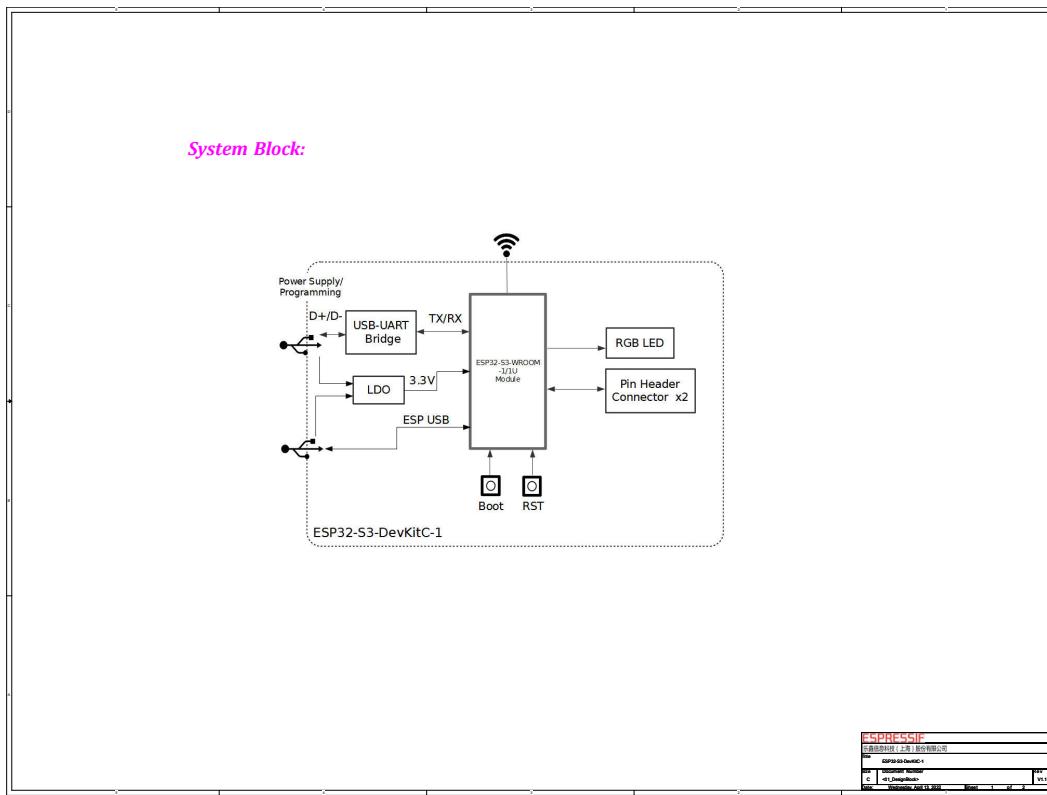
## Anexo

### A.1. ESP32-S3-Devkit-C1

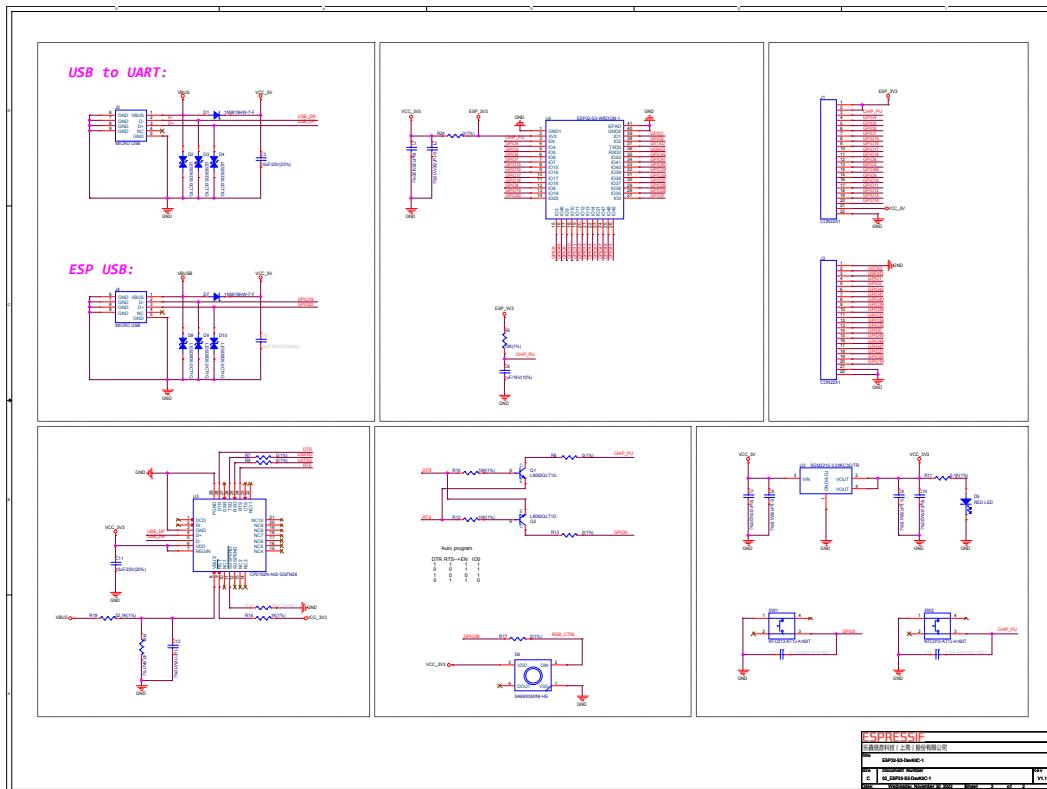
El enlace <sup>1</sup> accede a la hoja de características del módulo ESP32-S3 y la Figura ?? contiene el esquemático de la placa de desarrollo Devkit-C1.

---

<sup>1</sup>[https://documentation.espressif.com/esp32-s3-wroom-1\\_wroom-1u\\_datasheet\\_en.pdf](https://documentation.espressif.com/esp32-s3-wroom-1_wroom-1u_datasheet_en.pdf)



(a)



(b)

Figura A.1: Esquemático.

# Bibliografía

- [1] Athil S. Al-Ezzi and Mohamed Nainar M. Ansari. Photovoltaic solar cells: A review. *Applied System Innovation*, 5(4), 2022.
- [2] Miguel Pareja Aparicio. *Radiación solar y su aprovechamiento energético*. Marcombo, 2010.
- [3] Architecture and Building Systems, ETH Zurich. Asf – adaptive solar facade, 2024. Proyecto de fachada fotovoltaica dinámica con módulos PV orientables para seguimiento solar y gestión energética integrada.
- [4] Larissa Born, Edith Anahi González San Martín, Matthias Ridder, Axel Hannes Körner, Jan Knippers, and Götz T. Gresser. Flectosol – a pneumatically activable pv-functionalized façade shading module with bending motion in two directions for solar tracking. *Developments in the Built Environment*, 18:100372, 2024.
- [5] Subhash Chander, Indu Purohit, and S Nehra. A comprehensive review of pv panel performance under partial shading. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52:713–724, 2015.
- [6] C Dominguez, S Askins, I Antón, and G Sala. Characterization of five cpv module technologies with the helios 3198 solar simulator. In *2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, pages 001004–001008. IEEE, 2009.
- [7] John A. Duffie and William A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley, 2020.
- [8] Vikas Gupta and Manoj Sharma. Bifacial photovoltaic modules: A review. *Energy Conversion and Management*, 196:885–895, 2019.
- [9] Eugene Hecht. *Optics*. Pearson, 5 edition, 2017.
- [10] Andreas Henemann. Bipv: Built-in solar energy. *Renewable Energy Focus*, 9(6, Supplement):14–19, 2008.
- [11] José L. Balenzategui Manzanares. Fundamentos de la conversión fotovoltaica: la célula solar. <https://www.eoi.es/sites/default/files/savia/documents/componente45310.pdf>, 2008. Accedido: 7 diciembre 2025.
- [12] Ricardo A. Marques Lameirinhas, João Paulo N. Torres, and João P. de Melo Cunha. A photovoltaic technology review: History, fundamentals and applications. *Energies*, 15(5), 2022.

- [13] Jonathan Mason, Clifford Hansen, and Joshua Stein. Vertical bifacial solar farms: gains, limitations, and land-use performance. *Progress in Photovoltaics*, 29(4):389–404, 2021.
- [14] Jean Meeus. *Astronomical Algorithms*. Willmann-Bell, Richmond, Virginia, 2 edition, 1998.
- [15] Hossein Mousazadeh and Alireza Keyhani. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8):1800–1818, 2009.
- [16] Leno S. Pedrotti Frank, Leno M. *Introduction to Optics*. Pearson, 4th ed edition, 2017.
- [17] Ibrahim Reda and Afshin Andreas. Solar position algorithm for solar radiation applications. Technical Report NREL/TP-560-34302, National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2008.
- [18] David C. Rich. Solar calculation details. Technical report, NOAA Earth System Research Laboratory, 2008. Consultado en 2025.
- [19] Shaohang Shi and Ning Zhu. Challenges and optimization of building-integrated photovoltaics (bipv) windows: A review. *Sustainability*, 15(22), 2023.
- [20] W. J. Smith. *Modern Optical Engineering: The Design of Optical Systems*. McGraw-Hill, 4 edition, 2007.
- [21] Guoqing Yu, Hongxing Yang, Daina Luo, Xu Cheng, and Mark Kyereydey Ansah. A review on developments and researches of building integrated photovoltaic (bipv) windows and shading blinds. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149:111355, 2021.
- [22] Óscar Perpiñán Lamigueiro. Energía solar fotovoltaica, 2013. Recurso en línea.