

Proyecto Fin de Grado

Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Diseño de Sistema de Alineación de Paneles Solares de Alta Concentración

Autor: Tomás Barba Gómez

Tutor: Luis Fernando Castaño Castaño

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022



Proyecto Fin de Grado
Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Diseño de Sistema de Alineación de Paneles Solares de Alta Concentración

Autor:

Tomás Barba Gómez

Tutor:

Dr. Luis Fernando Castaño Castaño

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Proyecto Fin de Carrera: Diseño de Sistema de Alineación de Paneles Solares de Alta Concentración

Autor: Tomás Barba Gómez

Tutor: Luis Fernando Castaño Castaño

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

A todos aquellos que me han acompañado en estos 4 años de mi vida. En especial a ellos, a mis padres, nada de esto habría sido posible sin su sacrificio. A mis amigos de carrera, que han estado ahí en los momentos más duros de estos años, que son muchos. También a mi tutor del proyecto, Fernando, que desde el primer día ha estado para todo lo que he necesitado.

Tomás Barba Gómez

Sevilla, 2022

Resumen

Este trabajo se desarrolla a partir de una idea propuesta por el tutor Fernando Castaño, su objetivo es la realización del estudio preliminar de viabilidad y cálculo de un prototipo inicial a usar en seguidores solares que alberguen paneles solares de alta concentración.

En los seguidores solares con múltiples paneles de alta concentración, las exigencias de precisión en el seguimiento son muy altas, debido a que al incorporar estos paneles ópticas de concentración de los rayos incidentes, estos deben llegar al panel prácticamente perpendiculares, permitiéndose pocas desviaciones, (del orden de un grado o grado y medio), en el caso de producirse mayores desviaciones el panel prácticamente no genera energía, produciéndose una disminución general de la producción al estar los paneles conectados en serie eléctricamente.

En un seguidor solar con paneles de alta concentración todos sus paneles deben apuntar de la forma más precisa posible al sol, para ello deben estar todos en un mismo plano (o planos paralelos). Esta condición puede que en algunas circunstancias no se dé, (fallos de montaje, dilataciones, u otros incidencias), de modo que aunque la estructura y el propio seguidor tengan un buen comportamiento, la producción no será la esperada.

La idea de este trabajo es el diseño de un orientador de paneles a nivel individual que permita corregir pequeñas desviaciones de ángulo en el montaje de los paneles. De forma que esta corrección se realice de forma automatizada, incluso con el seguidor en producción.

Se parte del diseño de dos elevadores situados convenientemente en dos de los tres puntos de apoyo del panel. Estos elevadores serán movidos mediante cadenas o engranajes por dos motores paso a paso y el conjunto será controlador por un automata programable para el que se ha diseñado una serie de funciones genéricas (que podrían servir para otros prototipos). El automata utilizado para el trabajo es el PLC M340 programado mediante el software *Unity Pro XL*, ambos de *Schneider Electric*.

Aunque no se ha llegado a construir el prototipo, si se han realizado simulaciones en Unity que permite asegurar la viabilidad técnica del trabajo.

Abstract

This work is developed from an idea proposed by the tutor Fernando Castaño, its objective is to carry out the preliminary feasibility study and calculation of an initial prototype to be used in solar trackers that house high concentration solar panels.

In solar trackers with multiple high-concentration panels, the demands for precision in tracking are very high, because by incorporating these optical panels for the concentration of the incident rays, they must reach the panel practically perpendicular, allowing few deviations, (of the order of one degree or degree and a half), in the event of greater deviations, the panel practically does not generate energy, producing a general decrease in production as the panels are electrically connected in series.

In a solar tracker with high concentration panels, all its panels must point as precisely as possible at the sun, for this they must all be in the same plane (or parallel planes). This condition may not occur in some circumstances (assembly failures, dilations, or other incidents), so that although the structure and the tracker itself behave well, production will not be as expected.

The idea of this work is the design of a panel orienter at an individual level that allows correcting small angle deviations in the assembly of the panels. So that this correction is done automatically, even with the tracker in production.

It is based on the design of two elevators conveniently located in two of the three support points of the panel. These elevators will be moved by chains or gears by two stepper motors and the set will be controlled by a programmable automata for which a series of generic functions have been designed (which could be used for other prototypes). The automata used for the work is the PLC M340 programmed using the Unity Pro XL software, both from Schneider Electric.

Although the prototype has not been built, simulations have been carried out in Unity to ensure the technical feasibility of the work.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
ÍNDICE DE TABLAS	xviii
ÍNDICE DE FIGURAS	xix
1 Introducción	1
1.1 Contexto	1
1.2. Seguidores Solares de 2 Grados de Libertad	2
1.3. Problemáticas de los seguidores solares	4
1.4. Conveniencia de diseño de prototipo de bajo coste	7
2 Formas de orientación	9
2.1. A nivel seguidor	9
2.2. A nivel panel	13
3 Panel de alta concentración	15
3.1. Introducción a las Tecnologías de Concentración	15
3.1.1. LCPV	15
3.1.2. HCPV	16
3.2. HCPV ISOFOFOTÓN GEN-2	18
3.2.1 Dimensiones	24
4 Justificación del prototipo	26
4.1. Introducción	26
4.2. Sistemas del prototipo	29
4.2.1. Autómata programable: Modicon M340 de Schneider Electric	31
4.2.2. Motor paso a paso y driver	38
4.2.3. Transmisión y acoplamiento	40
5 Elección de sistemas de referencia	42
5.1. Sensor Solar: ISS-DX Solar MEMS	43
5.2. Sensor fotoeléctrico para operación de HOMING	48
6 Cálculos y funcionamiento	50
6.1 Cálculos	50
6.2 Funcionamiento general del sistema	54
7 Funciones para el manejo de motores	57
7.1 Función Motor	58
7.2 Función Acoplamiento	59
7.3 Función Dispositivo	60
7.4 Función Panel	62

8 ANEXOS	64
8.1 <i>Pantalla de Operador</i>	64
8.2 <i>MueveMOTOR</i>	65
8.3 <i>MueveACOPLAMIENTO</i>	67
8.4 <i>MueveDISPOSITIVO</i>	68
8.5 <i>MuevePANEL</i>	70
8.6 <i>Procedimiento de Pruebas</i>	72
Referencias	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1	Características eléctricas del módulo solar	21
Tabla 5-1	Características generales del sensor	44
Tabla 5-2	Información adicional del sensor	47
Tabla 6-1	Relación entre angleY, avanceYZ y pulsosYZ	52
Tabla 6-2	Relación entre angleX, avanceXZ y pulsosXZ	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1	Ejes de giro: Elevación (arriba) y Azimut (abajo)	2
Figura 1-2	Esquema de clasificación de seguidores solares	3
Figura 1-3	Seguidor de eje polar	3
Figura 1-4	Cimentación de un seguidor solar para evitar posibles desfases temporales	4
Figura 1-5	Desalineación de paneles solares en un seguidor solar	5
Figura 1-6	Paneles no coplanarios (azul) y mala precisión en el montaje (rojo)	5
Figura 1-7	Configuración de cimentación en terreno antes cargas de viento	6
Figura 2-1	Sistema de control de orientación de seguidor solar con motores asíncronos.	9
Figura 2-2	Posición a lo largo de un día de un seguidor solar	9
Figura 2-3	Seguidor real del proyecto con los 24 paneles	10
Figura 2-4	Estructura del seguidor solar completo	11
Figura 2-5	Sistemas de referencia del seguidor completo. Vista perfil.	12
Figura 2-6	Relación entre sistemas de referencia	13
Figura 2-7	No paralelismo entre vectores normales de seguidor y paneles	13
Figura 2-8	Movimientos de la placa respecto a ejes coordenados	14
Figura 3-1	Panel fotovoltaico de baja concentración	15
Figura 3-2	Panel fotovoltaico de alta concentración	16
Figura 3-3	Suma anual de irradiación global en España	17
Figura 3-4	Panel y célula solar de HC	18
Figura 3-5	Lente Fresnel y ángulos de incidencia (de más a menos aceptable)	19
Figura 3-6	Potencia de salida en función del ángulo de incidencia del rayo	19
Figura 3-7	Cono de luz en 2D de la zona eficiente	20
Figura 3-8	Cono de luz 3D de la zona eficiente	20
Figura 3-9	Curva V-I (Azul) y V-P (Rojo)	22
Figura 3-10	Configuración con diodos de paso con panel 2 en polarización inversa	23
Figura 3-11	Curva IV de 3 paneles en serie con diferentes eficiencias instantáneas	23
Figura 3-12	Eficiencia del panel solar	23
Figura 3-13	Vista trasera frontal del módulo solar	24
Figura 3-14	Vista lateral del módulo solar	25
Figura 3-15	Distancia entre agujeros sobre panel real	25
Figura 4-1	Mala orientación de paneles frente a orientación de seguidor	26
Figura 4-2	Disposición de los motores PaP y de las diferentes esquinas de la placa	27
Figura 4-3	Prototipo completo a desarrollar	28
Figura 4-4	Nueva relación entre sistemas de referencia	29
Figura 4-5	Conexionado entre sistemas	30

Figura 4-6	PLC Modicon M340	31
Figura 4-7	Bastidor con 4 slots de M34	33
Figura 4-8	Módulo de contaje EHC200	33
Figura 4-9	Símbolo y descripción de cada pin de entrada de canal	34
Figura 4-10	Símbolo y descripción de cada pin de salida	34
Figura 4-11	Conexionado de sensores con canal de la tarjeta	35
Figura 4-12	Conexionado de salida.	36
Figura 4-13	Entradas y salidas de la tarjeta rápida EHC200	36
Figura 4-14	Conexionado de los canales de las tarjetas con driver	37
Figura 4-15	Motor paso a paso	38
Figura 4-16	Driver de los motores paso a paso	39
Figura 4-17	Piñón de la transmisión (x2)	40
Figura 4-18	Transmisión completa (vista superior)	40
Figura 4-19	Acoplamiento mecánico para el ajuste del panel	41
Figura 5-1	Sistemas de referencia y ángulos más relevantes para el ajuste del panel	42
Figura 5-2	Sensor solar ISS-DX de Solar MEMS	43
Figura 5-3	Cuadrantes del sensor ISS-DX	43
Figura 5-4	Sistema de referencia del sensor: {4}	44
Figura 5-5	Referencia para ángulos medidos	45
Figura 5-6	Ángulos límite	45
Figura 5-7	Tiempos de espera de comunicación	46
Figura 5-8	Conexionado eléctrico del sensor ISS-DX	48
Figura 5-9	Dimensiones del sensor ISS-DX	48
Figura 5-10	Barrera fotoeléctrica de horquilla de Eickmann Elektronik	49
Figura 6-1	Panel con ángulos y avances	50
Figura 6-2	Planos y ángulos de incidencias	54
Figura 6-3	Secuencia de movimientos (z3: antes de ajuste / z3': después de ajuste)	55
Figura 6-4	Avances según dirección de incidencia de los rayos solares	55
Figura 6-5	Orientación inicial y final tras ajuste, según configuración de la figura 6-1.	56
Figura 7-1	Diferentes capas jerárquicas (funciones) del programa de control	57
Figura 7-2	Acoplamiento del sistema	60
Figura 7-3	Dispositivo: límites geométricos y sensor de HOME	62
Figura 8-1	Pantalla de Operador	64
Figura 8-2	Función MueveMOTOR	66
Figura 8-3	Función MueveACOPLAMIENTO	67
Figura 8-4	Función MueveDISPOSITIVO	69
Figura 8-5	Función MuevePANEL	71
Figura 8-6	Movimientos de panel para AngleY=-0.9° y AngleX=0.2°	72
Figura 8-7	Movimientos de panel para AngleY=0.5° y AngleX=-0.7°	73

1 INTRODUCCIÓN

La simplicidad es la máxima satisfacción.

- Leonardo da Vinci -

1.1 Contexto

Este trabajo se ha realizado con el objetivo de proponer un mecanismo físico de bajo coste y una serie de funciones de librería que hagan que la precisión de la orientación de un panel fotovoltaico (o solar) sea la máxima admisible para obtener la mayor eficiencia, en este caso una mayor potencia de salida del panel según las condiciones ambientales, partiendo de la base de que en un principio este no apunta exactamente donde debería.

El trabajo se encuentra dentro del campo de la automatización para el control y supervisión de sistemas controlados por motores paso a paso. Estos dispositivos se encuentran hoy en día en multitud de sistemas que necesitan un grado de precisión elevado, ya que este tipo de motores permite obtener una precisión muy elevada (0.36° - 1.8° en su eje principal) dada por su paso (por lo general suelen tener 1000 - 200 posiciones en una vuelta completa del eje del motor). Además, estos motores poseen un alto par, y garantizan el frenado del eje cuando el sistema se encuentra en reposo.

Para controlar dichos motores habrá que hacer uso de un driver que les proporcione la corriente necesaria y de un autómata programable que le envíe señales analógicas de control. Será necesario el uso también de sistemas externos como una fuente de alimentación y de un ordenador para hacer toda la parte del software y programación del PLC, además de diversos sensores que se desarrollaran en capítulos posteriores.

De aquí en adelante se tratará de exponer todos los puntos a tener en cuenta en este tipo de proyecto, ya sea el tipo de fallas que provoca el desajuste, el tipo de control a realizar, las funciones de software a diferentes niveles jerárquicos, los componentes físicos de los que será necesario disponer, etc.

En primer lugar se tratará de plantear toda la parte mecánica del proyecto, para que posteriormente en los últimos capítulos este se centre más en aspectos de software.

1.2. Seguidores Solares de 2 Grados de Libertad

En este proyecto se trabaja sobre un panel solar que pertenece a una serie de 24 paneles en serie orientados más o menos en una dirección aceptable por un seguidor solar de 2 grados de libertad. Que un seguidor tenga 2 grados de libertad hace referencia a la capacidad o limitación de movimiento que tiene, en este caso, puede hacer giros en elevación y/o azimut, como se presenta en la Figura 1-1 o con eje polar, como se verá en este capítulo.



Figura 1-1 Ejes de giro: Elevación (arriba) y Azimut (abajo)

Los ángulos de elevación y azimut que permite el seguidor también son controlados por autómatas externos a este trabajo (este se centra en el nivel placa solar, no seguidor solar). El movimiento de azimut no tiene restricción de giro (de 0° a 360°), mientras que el de elevación sí, que en función de cada seguidor tendrá uno u otro rango de movimiento. En general, presentan un recorrido de 90° , con posiciones límites cuando el plano del panel es horizontal al plano del suelo y cuando es perpendicular a este.

Estos seguidores por lo general son así debido a la necesidad de captar la luz solar con una mayor precisión, es decir, con una incidencia del rayo solar perpendicular al plano del panel. Cuando se trabaja con células de alta concentración, que como se verá es el caso de este proyecto, se necesita que la incidencia sea muy precisa ($90^\circ \pm 2^\circ$) para que la potencia de salida no caiga a valores mínimos.

En seguidores estáticos o de 1 grado de libertad (ya sea con azimut o elevación) no es nada recomendable instalar paneles de alta concentración ya que sería muy difícil hacer que la luz incidiese con el ángulo correcto durante al menos un tiempo razonable. Para ello se usan otros tipos de paneles que, aunque aportan menos energía, son más eficientes en términos de rango de valores de ángulos de incidencia, por ejemplo los usados en campos solares, que suelen tener 0 o 1 grado de libertad. En la siguiente figura se representa un esquema de clasificación de seguidores de 1 y 2 grados de libertad.

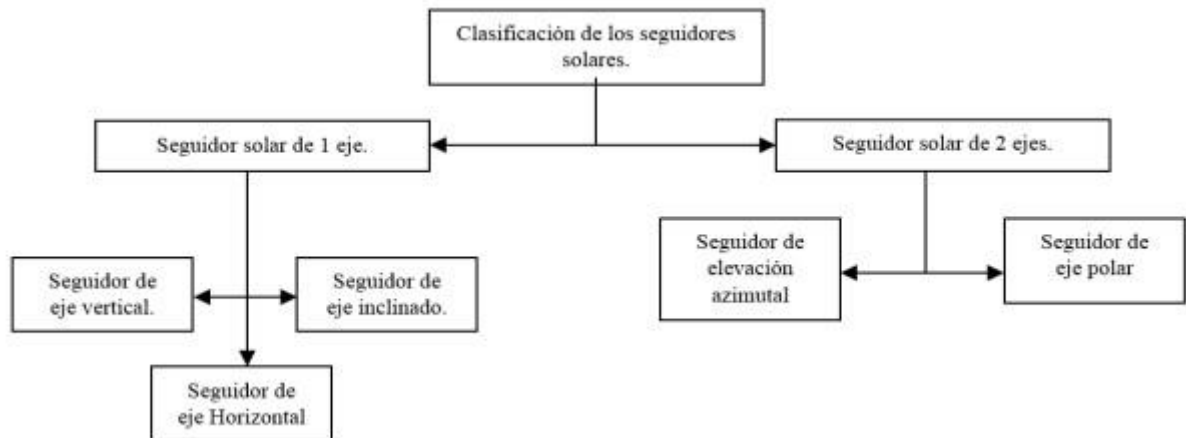


Figura 1-2 Esquema de clasificación de seguidores solares

En cuanto a los seguidores solares de 2 ejes, se puede distinguir entre:

- Eje polar: Consisten en una serie de ejes inclinados respecto a la horizontal y con una orientación concreta (en España por ejemplo esta debería ser norte-sur) sobre el que giran los paneles. Todos los ejes están conectados entre sí mediante una barra de transmisión. En la Figura 1-3 se muestra este seguidor.



Figura 1-3 Seguidor de eje polar

- Elevación-Azimutal: Este tipo de seguidores es sobre el que se trata en este trabajo. En la página anterior se ha hecho una breve explicación de su funcionamiento mecánico y cabe destacar que son los más eficientes a la hora de producir energía por su buena capacidad de orientación. Dentro de este tipo de seguidores existen diversas configuraciones, pero siempre manteniendo la idea de movimiento azimutal y de elevación. Este tipo de seguidor se representa en la Figura 1-1, y en capítulos posteriores se estudiará más en profundidad.

Aún teniendo 2 grados de libertad sigue habiendo ciertas fallas que hacen que el rendimiento del seguidor caiga a valores mínimos cuando se trabaja con paneles de alta concentración. Estas pueden ser imprecisión en el montaje inicial, movimientos de tierra, rigidez de la estructura, cargas de viento, etc. La limpieza o rotura de los paneles son otro tipo de variable a tener en cuenta, aunque mucho más imprevisibles, no tanto como la situación del clima en el momento de la captación, que aunque es previsible, no es posible hacer nada para cambiar dicha situación. En el siguiente punto se tratan algunos problemas en seguidores solares con “fácil” solución.

1.3. Problemáticas de los seguidores solares

En el caso de los paneles fotovoltaicos es de imprescindible cumplimiento hacer una buena planificación y estudio de la zona antes de empezar a construir la estructura. El paso del tiempo hace que las estructuras cedan, que los terrenos se muevan, que lo que en un principio parecía estar bien anclado ya no lo está. Por eso, hay que tener en cuenta un gran número de variables a evitar para obtener en todo momento una orientación aceptable.

En el caso que ocupa, al trabajar con paneles de alta concentración, necesitamos que todo esos problemas no sucedan, ya que por mínimos que sean harán que la energía captada caiga a valores que no se pueden aceptar. Se presentan a continuación los problemas más comunes en la vida de los seguidores solares:

- **Movimientos de terreno.** Es muy importante hacer una buena cimentación para que el seguidor no tenga ninguna deriva temporal sobre el terreno. Los seguidores están instalados en el terreno o sobre la azotea de edificios. En el primer caso, haciendo una buena planificación de la cimentación bastaría, ya que sería bastante difícil que sufriera deriva temporal debido a movimientos (inesperados) del terreno. En cambio, cuando el seguidor está instalado sobre una azotea, es más fácil que sufra pequeñas variaciones. Los edificios cedan con el tiempo (por muy poco que sea, tener siempre en cuenta el grado de precisión que necesitan estos paneles), y con ellos los seguidores.

Existen casos en los que el seguidor está apoyado sobre vigas de acero (normalmente en forma de H), y estas a su vez ancladas a alguna parte del edificio. Estas vigas también cedan con el tiempo, haciendo que el seguidor también lo haga con ellas.



Figura 1-4 Cimentación de un seguidor solar para evitar posibles desfases temporales

- **Imprecisiones en el montaje** por parte de los operarios. La mano humana no es milimétricamente exacta, y si no se trabaja con el material adecuado ni con la experiencia necesaria se producen imperfecciones en el montaje del seguidor (y de los paneles) que provocan que el rendimiento del panel sea mínimo. Los paneles van anclados al perfil del seguidor, pero para obtener una buena potencia de salida, estos deben estar bien orientados (todos exactamente en una misma dirección). Si un tornillo no ha sido bien roscado, no se han medido bien las distancias del panel al perfil o si el panel queda torcido, hará que la cara de los paneles no sean coplanarios, haciendo que la potencia global decaiga a valores no rentables energéticamente hablando. El hecho de una mala orientación hace que el rayo incidente no sea el ideal (paralelo a la normal del panel, o a la de todos los paneles). En la figura 1-5 se observa una representación de una posible desalineación de los paneles dentro de un seguidor solar. Se ve que los vectores normales (n_1 , n_2 , n_3) no tienen la misma dirección, y en paneles de alta concentración es una condición que ha de cumplirse perfectamente. En la imagen 1-6 se ve con claridad este problema de desajuste, en este caso en un seguidor real.

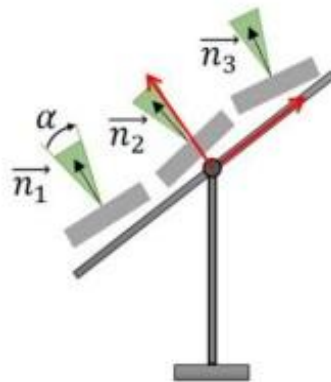


Figura 1-5 Desalineación de paneles solares en un seguidor solar

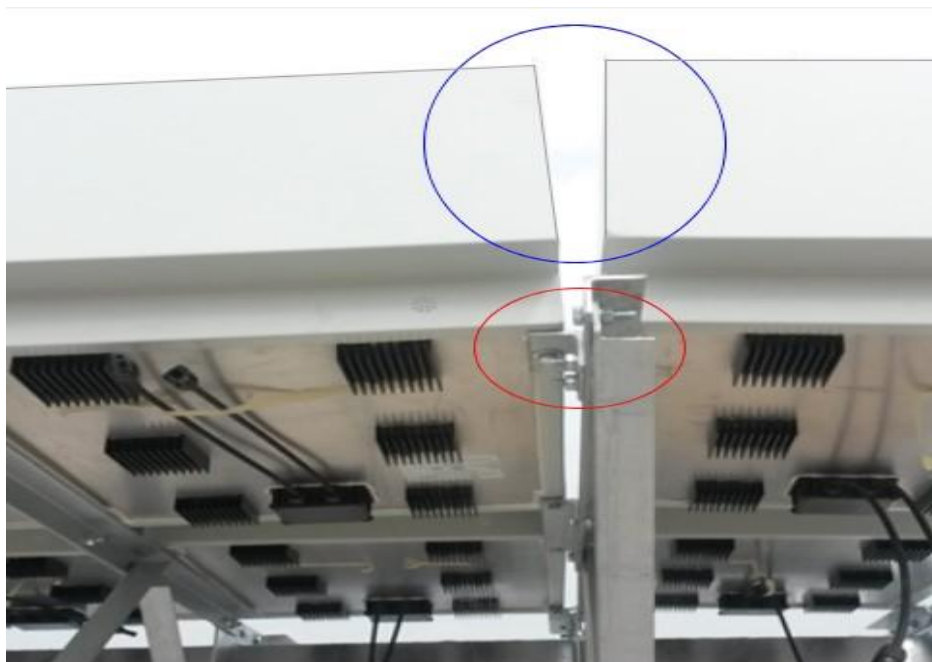


Figura 1-6 Paneles no coplanarios (azul) y mala precisión en el montaje (rojo)

- **Esfuerzos.** A lo largo del tiempo, la estructura del seguidor experimentará esfuerzos extra a causa del viento, del propio peso del panel, dilatación por altas temperaturas. Se ha de tener muy en cuenta el tipo de estructura y de material a usar para crear los perfiles donde irán los paneles solares, ya que las causas antes comentadas pueden que antes valores límites, la estructura ceda o se desoriente, haciendo que el problema de alineación sea más complejo. En la Figura 1-7 se muestra la cimentación que podría tener un seguidor solar antes cargas de viento. Esta es diferente a la vista en la Figura 1-4, hay multitud de configuraciones de cimentación, siendo cada una la idónea según el emplazamiento donde se vaya a instalar el seguidor.

Normalmente, para la estructura de un seguidor se suelen usar perfiles en L, ya que son formas simples con poco peso, y soportan bien esfuerzos de torsión y flexión que pueda tener la estructura a lo largo del tiempo, ya sea a factores ambientales como viento y agua o a el propio peso de los paneles.

El material ha de elegirse teniendo en cuenta las temperatura que puedan alcanzarse en su ubicación final del seguidor, ya que un material fuertemente dependiente de la temperatura hará que cuando estas sean más altas de cierto valor límite, el metal se ablande y la estructura se modifique, provocando desajustes no muy deseados. Este material por lo general suele ser acero galvanizado.



Figura 1-7 Configuración de cimentación en terreno antes cargas de viento

1.4. Conveniencia de diseño de prototipo de bajo coste

Como ya se ha comentado, a pesar de tener un buen montaje e instalación del seguidor, siempre existirán pequeñas desviaciones debido a factores ambientales y/o humanos que harán que la precisión que en un primer momento se creía que se tenía ya no se tenga. Por esta razón en este trabajo se propone un prototipo de bajo coste para intentar corregir en tiempo real esa desviación. Será necesario tanto equipos mecánicos como electrónicos, así como de potencia, además de software específico.

Se crea este prototipo para un tipo concreto de seguidor, de 2 grados de libertad, con paneles en serie de alta concentración. Se podría extrapolar a otro tipo de seguidores, con otra configuración, pero quizás no sea tan apropiado debido al software programado, características de los sistemas de tracción, dimensiones, etc. Todos los equipos que se usarán serán de fácil obtención, de presupuesto relativamente asequible. Aunque hay que tener en cuenta que el proyecto se centra en un sólo panel, si este ajuste se quisiera hacer a un número más o menos grande de paneles, quizás (habría que estudiarlo) el coste se elevaría bastante. En ese caso, varios de los sistemas que aquí se usarán para un sólo panel, podrían usarse para el control de varios, ya que puede existir cierta redundancia entre algunos elementos de control de los paneles

2 FORMAS DE ORIENTACIÓN

2.1. A nivel seguidor

En el caso de un seguidor perfectamente montado, calibrado y orientado al sol, sólo debería existir el ajuste a nivel seguidor, que no es más que el propio movimiento del seguidor “buscando” el sol. Estos movimientos son, como ya se comentó en el capítulo anterior, el de *azimut* y *elevación*. Esta orientación se consigue mediante dos motores independientes que permiten el movimiento de un mecanismo que hace orientar al seguidor. La señal de control a los motores debe provenir de algún software de tiempo real previamente programado que le haga saber en todo momento al controlador del sistema la respuesta en tensión que ha de suministrarle a los motores. En la figura siguiente se muestra lo comentado, aunque en la imagen aparece un sólo panel solar con diferentes células, se puede extrapolar a un seguidor con diferentes paneles.

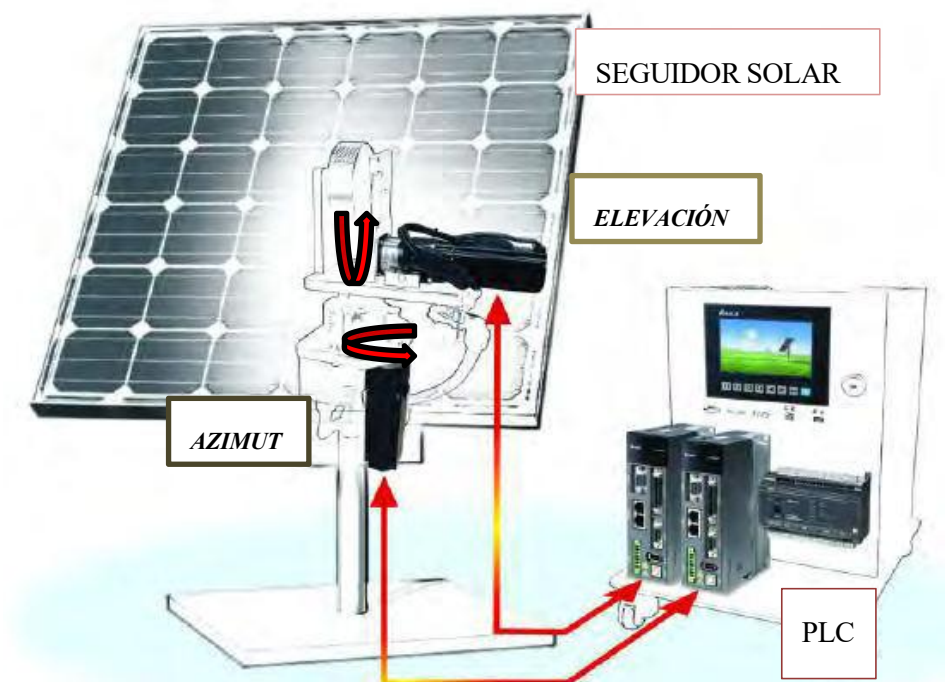


Figura 2-1 Sistema de control de orientación de seguidor solar con motores asíncronos.

Para esta aplicación se hace necesario el uso de motores asíncronos con variadores de velocidad, ya que existe la necesidad de mover mayores pesos, que se pueden ver incrementados en algunos momentos a causa por ejemplo de la fuerza de viento. Con estos motores se puede obtener un alto par. La precisión de estos no es tan precisa como podría ser la de un servomotor o un motor paso a paso, pero igualmente con un buen bucle de control se cumple con las especificaciones de orientación. Además, para obtener la orientación deseada, estos equipos de seguimiento suelen contar con sistemas de engranajes para hacer que con una relación de transmisión dada se obtenga el paso deseado en la orientación del seguidor.

Estos elementos por lo general suelen estar al aire libre, expuestos a cualquier cambio ambiental. Por ejemplo, la corrosión suele ser un problema a tratar en estos sistemas, ya que un engranaje o un eje oxidado puede causar problemas, ya no sólo de orientación, sino de seguridad tanto para el seguidor como para el personal que pueda encontrarse cerca de él.

Los seguidores solares pueden seguir al sol diversas formas, ya sea a través de las ecuaciones solares PSA, mediante sensores de ángulo de irradiancia, o mediante las dos anteriores de forma redundante, usando las primeras como orientación en bucle abierto (se basa en ecuaciones pero sin realimentación de ningún tipo) y las segundas como bucle cerrado (obtiene la realimentación mediante la medida leída por el sensor).

En la Figura 2-2 se puede observar una secuencia discreta de posiciones que tomaría el seguidor según la posición del sol a lo largo de un día, sólo haciendo uso de los movimientos de elevación y azimut.

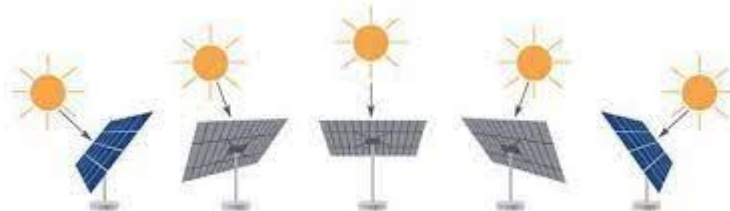


Figura 2-2 Posición a lo largo de un día de un seguidor solar

El seguidor real sobre el que se montarán los paneles se muestra en la figura 2-3. Este, como ya se ha comentado, es un seguidor de 2 grados de libertad (grado de azimut y elevación) para un mejor ajuste de la orientación del mismo, independientemente del vector normal de cada panel. Este seguidor contiene un sensor solar que se comunica con un controlador (PLC) para orientar al sol toda la estructura del seguidor. Está montado sobre dos vigas en forma de H, que a su vez están sobre otras dos vigas perpendiculares a esta también en forma de H (como se comentó anteriormente, esta no es la mejor opción ya que con el tiempo el material puede sufrir pequeñas variaciones, por pequeñas que sean). Se trata de un seguidor con dos alas de 12 paneles cada una, aproximadamente de 9.3 m² de área. Su estructura (sin paneles) presenta un aspecto como el que se muestra en la figura 2-4. y como se comentó, los perfiles tienen forma de L por su buena relación peso-resistencia ante diferentes esfuerzos.



Figura 2-3 Seguidor real del proyecto con los 24 paneles

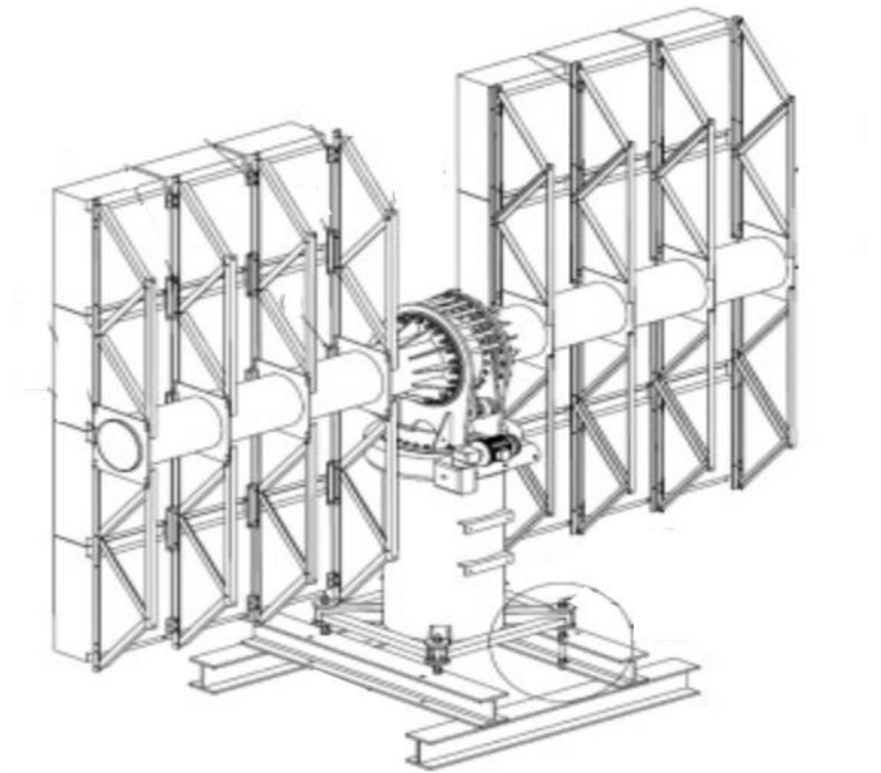


Figura 2-4 Estructura del seguidor solar completo

Cada parte móvil del seguidor solar tendrá un sistema de referencia asociado, como se observa en la figura 2-5. Los dos grados de libertad del seguidor quedan representados con las variables θ_1 y θ_2 , ambos movimientos circulares alrededor de un eje de giro, uno de azimut y el otro de elevación, respectivamente. Se detallan a continuación los sistemas de referencia:

- Sistema de referencia global $\{G\}$: a la cual está referida la posición del sol.
- Plataforma $\{0\}$: la plataforma descansa sobre el terreno. Base del seguidor.
- Poste $\{1\}$: primera articulación del seguidor.
- Vela $\{2\}$: segunda articulación del seguidor y la estructura sobre la que se montan todos los demás sistemas. Su movimiento está limitado. Su variable θ_2 puede variar entre 0° y 80° partiendo de que 0° es con la vela totalmente apuntando hacia arriba (vector normal de la vela paralelo a z_1).
- Placas solares $\{3i\}$: La i se refiere a cada uno de los 24 paneles de los que comprende el seguidor. En principio el origen de este sistema de referencia se colocará centrado en el panel, aunque en capítulos posteriores se verá que no es el lugar más idóneo a la hora de realizar ciertos cálculos.
- Sensor Solar $\{S\}$: El sensor solar a través del cual todo el sistema se orienta se ubica en la vela.

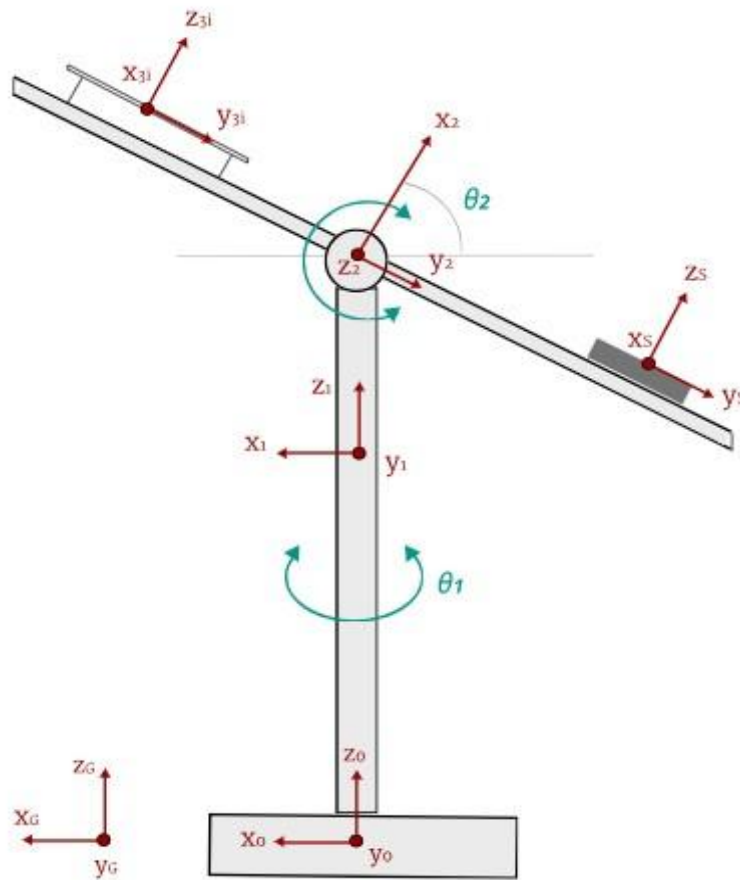


Figura 2-5 Sistemas de referencia del seguidor completo. Vista perfil.

Como se observa en la figura anterior, se tiene a simple vista los vectores x_2 , z_{3i} y z_S son paralelos. Pero he aquí el motivo de este proyecto, el no paralelismo de los mismos. Los vectores x_2 y z_S pueden considerarse paralelos ya que el sensor solar está bien acoplado mecánicamente al sistema de referencia 2, por lo que se supone que no habrá deriva temporal ni en su distancia ni en su paralelismo. En cambio, los vectores x_2 y z_{3i} z_S no son perfectamente paralelos por las razones explicadas en el punto 1.4. Ambos vectores no necesariamente deben de ser paralelos, es una condición no prescindible. La condición que sí ha de cumplirse para garantizar una correcta captación de energía es la del paralelismo entre z_{3i} y z_S , ya que el vector z_S es el que la normal de las placas han de tener (**condición de paralelismo entre vectores directores z_{3i} y z_S**).

En la figura siguiente se presenta un pequeño esquema de la dependencia de un sistema de referencia con otro. Tener en cuenta que aunque el sistema de referencia 3 y S no están directamente relacionados, si lo están indirectamente, por la razón que se explica en el párrafo anterior.

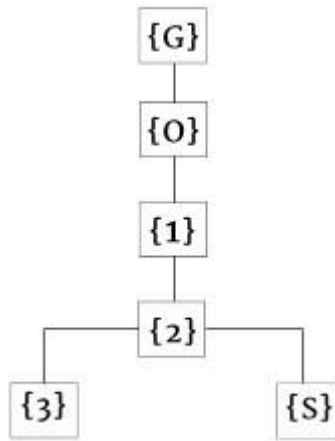


Figura 2-6 Relación entre sistemas de referencia

2.2. A nivel panel

En un caso ideal este punto no se debería desarrollar, ya que con la orientación del propio seguidor bastaría para obtener una buena orientación de todo el conjunto de paneles. Sería un ajuste redundante, a veces no necesario, y por supuesto que incrementaría el presupuesto del prototipo.

Este trabajo se centra precisamente en este punto, en la orientación independiente de un panel dentro de un seguidor solar que está bien orientado, pero dicho panel sufre desajuste en su propia orientación. En la figura 2-1 se muestra este problema a corregir.

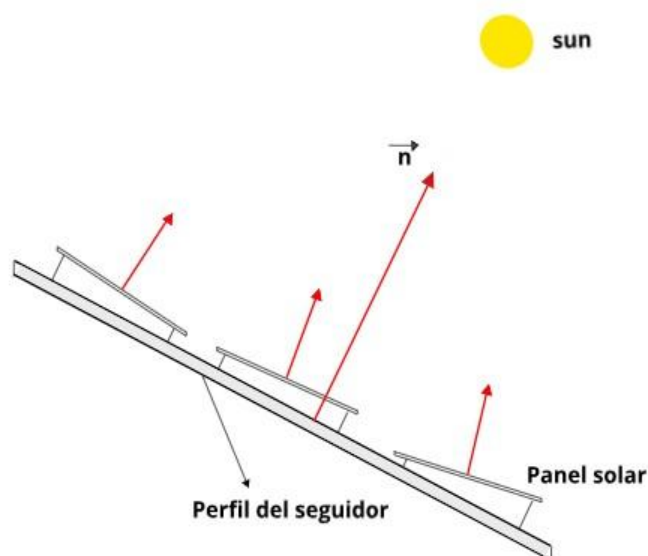


Figura 2-7 No paralelismo entre vectores normales de seguidor y paneles

Es decir, existe un desajuste del propio panel respecto a la dirección del sol y seguidor. Para paliar este problema no hay sistemas integrados con este fin, sino que habría que desarrollar un mecanismo electro-mecánico que consiguiese dicha orientación con cierto grado de precisión. Hay muchas formas de corregir el problema si se tienen en cuenta cuestiones como presupuesto, material, complejidad, fiabilidad, durabilidad, precisión, etc. En este trabajo se desarrollará un tipo de sistema concreto para ajustar paneles con poca desviación, que será explicado con todo detalle en apartados posteriores. Sea cual sea el método a usar para el ajuste del panel, este se podrá simplificar como una serie de rotaciones sobre sus tres ejes coordenados, centrados en el centro del panel. En la siguiente imagen se muestra los movimientos que podría experimentar el panel para que el vector \mathbf{n} llegue a ser paralelo a \mathbf{I} (irradiancia solar).

Los movimientos respecto a los ejes paralelos al plano del panel se pueden obtener con movimientos lineales de dos motores situados bajo este, por ejemplo. Mientras, el movimiento de giro respecto a la normal al plano se puede hacer mediante el seguidor (el mismo para todos los paneles del seguidor). Este último movimiento sería redundante (o innecesario) debido a que el panel con los dos primeros podría acceder a todos los puntos que se requiera dentro de unos límites de movimiento.

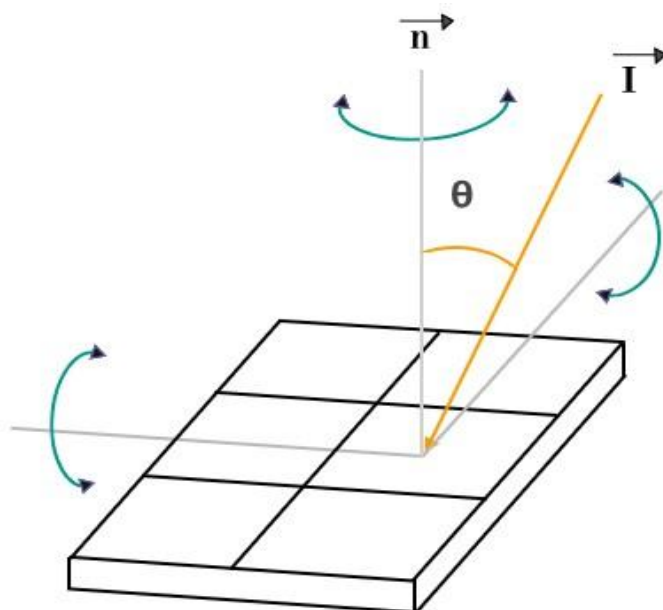


Figura 2-8 Movimientos de la placa respecto a ejes coordenados

3 PANEL DE ALTA CONCENTRACIÓN

Los paneles de alta concentración fotovoltaica (**HCPV**, por sus siglas en inglés) son, dentro de todos los tipos de paneles solares, un tipo especial de estos por ser capaces de redirigir los rayos de sol hasta un punto concreto muy pequeño, obteniendo así una eficiencia mayor que los paneles convencionales.

Este trabajo se ha desarrollado entorno a un tipo concreto de seguidor solar compuesto por una serie de paneles de alta concentración. Este seguidor se ubica en la azotea de los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, en concreto en el edificio L1E (Ingeniería de Sistemas y Automática). El seguidor lleva tiempo sin operar debido a los desajustes que tiene. Estos desajuste hacen que los paneles de alta concentración no obtengan un rendimiento suficientemente alto como para entrar en funcionamiento. El seguidor en concreto es que se ha mostrado en la figura 2-3 del capítulo anterior.

3.1. Introducción a las Tecnologías de Concentración

Los sistemas de energía fotovoltaica de concentración se categorizan de acuerdo a la cantidad de concentración solar que reciben, medida esta en “soles”. Estas pueden ser de alta o baja concentración, en función de la cantidad de soles, del presupuesto, de la capacidad de precisión que se tenga, etc.

3.1.1. LCPV

Las lentes convencionales, o paneles fotovoltaicos de baja concentración (LCPV) reciben una cantidad de entre 2 y 100 soles. Esto les permite no tener un seguimiento activo de la trayectoria del sol, ya que los grados de incidencia de los rayos solares son bastantes amplios. Por lo general se utilizan células de silicio, pero por tener tan poca incidencia el flujo de calor se hace mínimo, haciendo que no sea necesario el uso de disipadores. Este tipo de paneles son los que se encuentran fijos en los tejados de hogares o industrias, apuntando su vector normal siempre a la misma dirección independientemente de donde se ubique el sol. En la siguiente imagen se muestra una panel solar de baja concentración usado para ACS.



Figura 3-1 Panel fotovoltaico de baja concentración

3.1.2. HCPV

Los paneles fotovoltaicos de alta concentración son un tipo especial de paneles por su alto grado de precisión en cuanto a la dirección de la radiación incidente. Esta tecnología emplea una óptica de concentración basada en lentes Fresnel (o reflectores de platos concéntricos) que concentran la luz solar con intensidades mayores a 1000 soles. La principal diferencia con la tecnología de baja concentración es que en esta se hace necesario un seguimiento activo de la trayectoria del sol, debido a que el grado de incidencia de los rayos solares debe ser muy cercano a la normal al plano del panel para que el rendimiento sea aceptable.

Con estos paneles se hace necesario el uso de disipadores, debido a la alta temperatura que puede alcanzarse en un momento determinado por la concentración de tantos haces de luz en una región tan pequeña.

Se muestra a continuación una figura del panel de alta concentración con el que se trabajará a lo largo de este documento, el cual se encuentra colocado en el seguidor solar que se describió en el capítulo anterior.



Figura 3-2 Panel fotovoltaico de alta concentración

Esta tecnología de alta concentración obtiene resultados óptimos en función de la zona donde se ubique. Estas, por lo general, han de ser zonas que reciben una alta irradiación solar directa y en las que se alcanzan elevadas temperaturas. Esta tecnología está diseñada para soportar dosis muy elevadas de irradiación solar. Esto es medido en kWh/m²*día de energía luminosa proveniente del sol. En todo el mundo existen zonas más o menos apropiadas para la ubicación de estos paneles. Cabe destacar que España es uno de los mejores emplazamientos para instalar estos sistemas de captación solar sobre seguidores. En la siguiente figura se muestra un mapa de España de las zonas más favorables. Se observa la tendencia al sur que sigue la irradiación solar en un año completo, ya sea por su ubicación o por sus elevadas horas de sol.

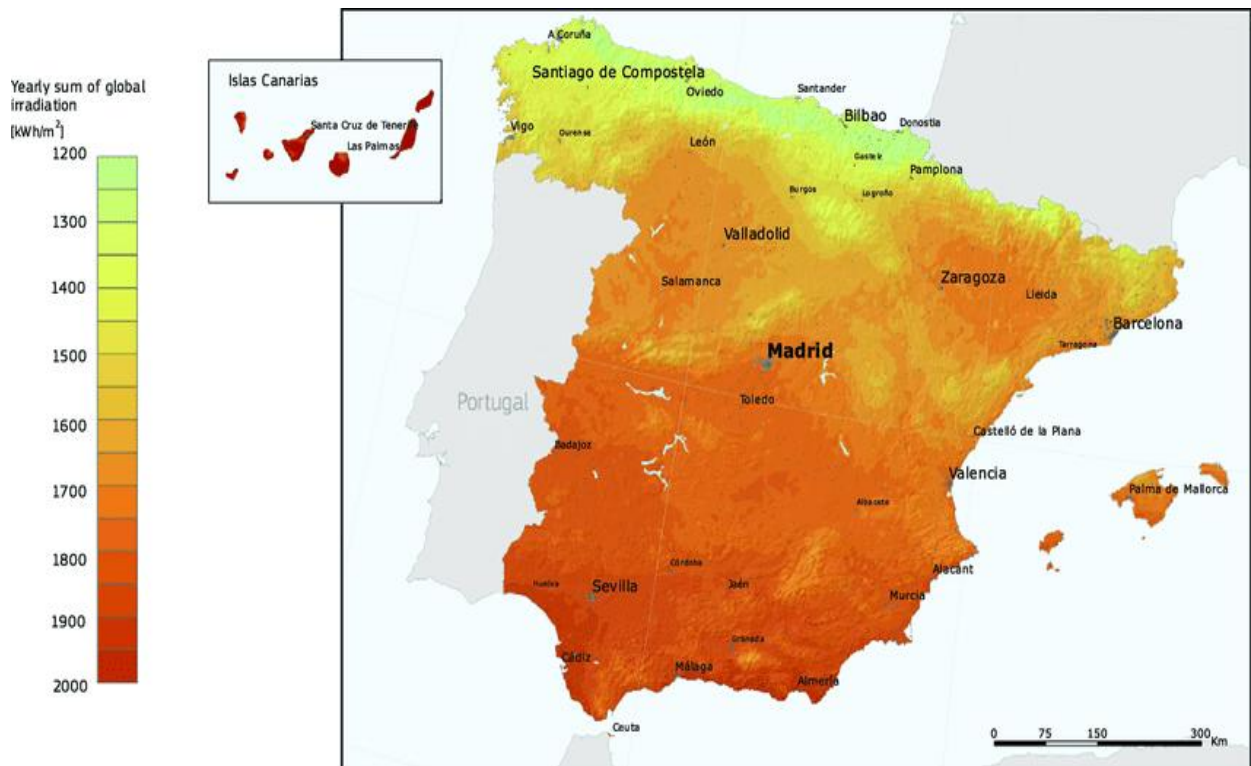


Figura 3-3 Suma anual de irradiación global en España

El uso de la tecnología HCPV no es en vano, sino que existen una serie de ventajas respecto a las tecnologías fotovoltaicas convencionales que hace que el uso de estas en determinados casos sea lo más apropiado. Algunas características de esta tecnologías son:

- Flexibilidad: Esta tecnología es apta para plantas de muy variada potencia, desde 1MWp hasta varios MWp.
- Eficiencia: Los coeficientes de temperaturas de los semiconductores usados mejoran considerablemente los resultados en campo de la tecnología de alta concentración.
- Escalabilidad: Una planta cualquiera (varios seguidores, y paneles) puede ser escalada a mayores potencias con facilidad y sin ser necesario un nuevo desarrollo de sistemas y procedimientos
- Inmediatez: El plazo de construcción y puesta en marcha de una planta (o seguidor) con tecnología HCPV es muy corto.
- Sostenibilidad medioambiental: Esta tecnología disminuye el impacto con el medio ambiente.
- Economía del espacio: Las plantas (o seguidor) basadas en la tecnología HCPV requieren de una menor cantidad de terreno para su instalación. Es decir, el ratio kWh/M2 es my superior al de las tecnologías más primitivas o convencionales como el x-Si (silicio mono y policristalino) o las tecnologías de capa delgada como el CdTe ó a-Si.

3.2. HCPV ISOFOTÓN GEN-2

El panel concreto es el de la figura 3-2 del apartado anterior, este panel de alta concentración pertenece a la tecnología HCPV de ISOFOTON, en concreto el modelo GEN-2. Obtiene energía eléctrica mediante la concentración de la luz del sol a través de un sistema óptico sobre células fotovoltaicas de alta eficiencia, las cuales obtienen dicha energía eléctrica mediante el conocido efecto fotoeléctrico.

Este sistema obtiene una elevada producción de energía eléctrica con una superficie de semiconductores muy inferior a otros paneles convencionales. Las células solares de alta eficiencia son fabricadas con materiales semiconductores III-V. Disponen de un sistema óptico basado en 2 lentes de Fresnel, capaces de concentrar miles de veces la luz solar sobre células que transforman la luz del sol en energía eléctrica con un rendimiento de aproximadamente el 39%. En la siguiente figura se muestra un HCPV con todo detalle, incluyendo ambas lentes Fresnel, y como estas “modifican” la trayectoria de los rayos solares. En ella se ha supuesto que los rayos solares inciden perpendiculares al plano del panel, haciendo así que la eficiencia del mismo sea máxima. Como se observa, cada panel contiene 6 células solares, todas ellas conectadas en serie.

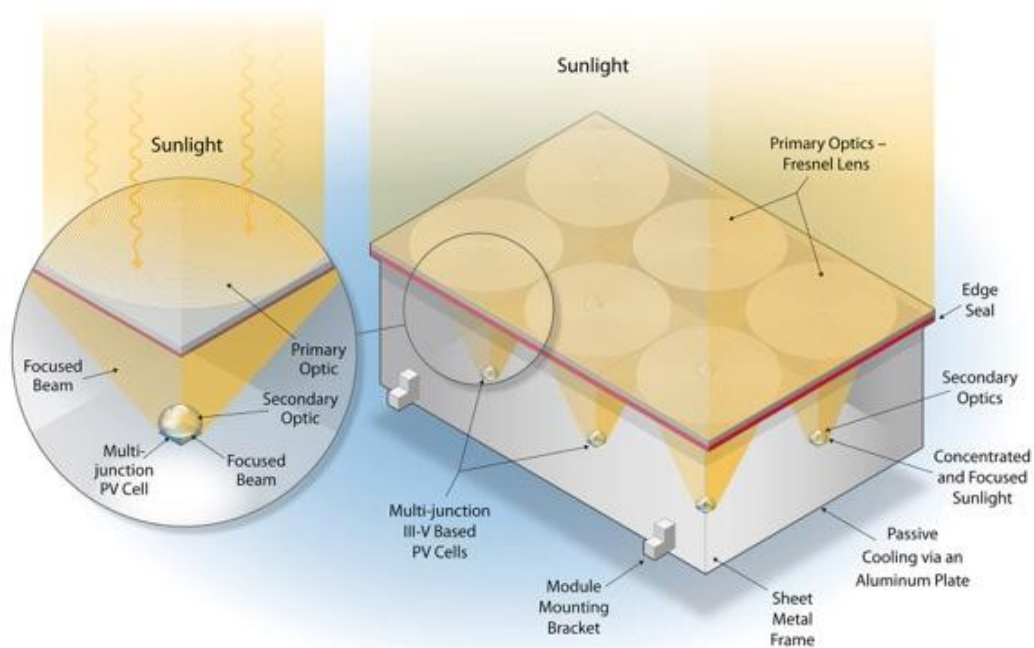


Figura 3-4 Panel y célula solar de HC

Esta concentración tan alta se consigue gracias a las lentes Fresnel, que como se explicó anteriormente, son lentes que concentran la luz solar en un punto muy pequeño, lo que reduce la cantidad de material requerido, haciendo que los costes se reduzcan. Por esto, se permiten el uso de células más eficientes, siendo de otra manera demasiado caro. En la figura siguiente se muestra un esquema de como actúan estas lentes ante la incidencia de rayos.

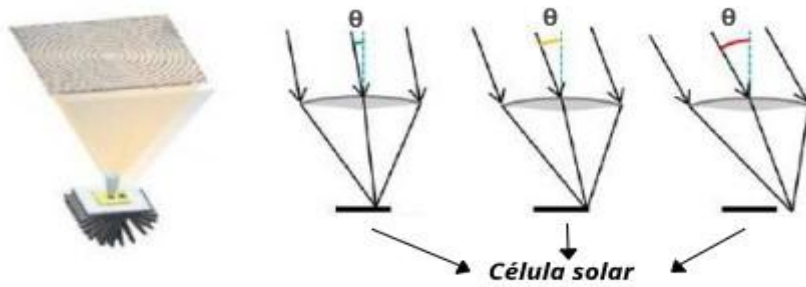


Figura 3-5 Lente Fresnel y ángulos de incidencia (de más a menos aceptable)

En la figura anterior, se muestra a la izquierda la lente Fresnel. Se distinguen los círculos concéntricos usados para desviar la trayectoria de la luz hacia otra lente más pequeña que vuelve a agrupar los rayos en otro punto aún más pequeño. Este punto se trata de la célula solar propiamente dicha (semiconductor).

En la parte derecha de la figura se muestran tres casos distintos, aunque ninguno de ellos 100% eficiente. Se muestra como los rayos solares inciden de forma no perpendicular al plano de la célula solar (o panel). Estos inciden con un ángulo θ distinto de 0. Cuanto mayor sea este ángulo, peor será el rendimiento de la célula. Hay un valor límite de θ (para este panel se sitúa entorno a los 2°) que hace que la potencia de salida de la placa caiga a valores mínimos. La potencia en función del ángulo de incidencia (θ) podría modelarse como una exponencial negativa cuando este ángulo se desplaza unos cuantos de grados de 90 (perpendicular).

En la siguiente figura se observa como para valores cercanos a 90° , la potencia de salida se mantiene en niveles elevados, mientras que cuando el grado de incidencia comienza a alejarse de la normal al plano, esta potencia experimenta un descenso casi exponencial. La zona eficiente se puede considerar la que comprende entre 90° y una discrepancia de $1.5\text{-}2^\circ$ como máximo respecto a este, aproximadamente. Para valores más altos, la célula (o panel) deja de ser eficiente en términos de potencia. El borde derecho de la zona eficiente se podría corresponder con el primer caso de la figura 3-4.

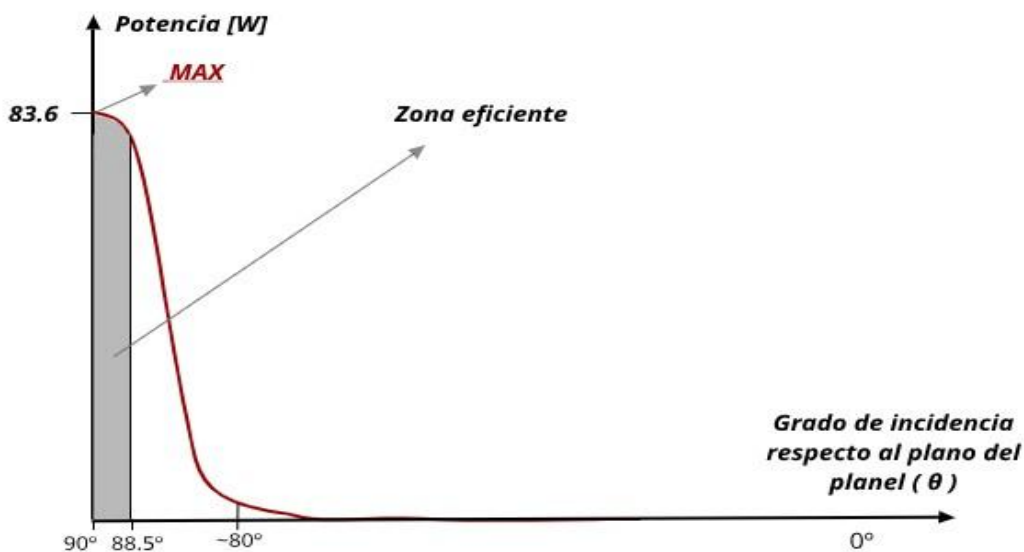


Figura 3-6 Potencia de salida en función del ángulo de incidencia del rayo

Como la potencia es fuertemente dependiente del ángulo de incidencia de los rayos solares, existirá un cono de luz para cada célula (idénticos) que indicará cual será la zona eficiente del panel. Esta zona indica la dirección límite de la que podrán proceder los rayos. En cualquier otro caso, si los rayos proceden con un ángulo mayor a θ se considerará que el panel está desajustado, siendo este no operativo bajo esas condiciones.

En las siguientes figuras se muestra este cono de luz, una en 2D (vista superior paralela al plano) y la otra en 3D. Este patrón de luz se repite para las células restantes del panel.

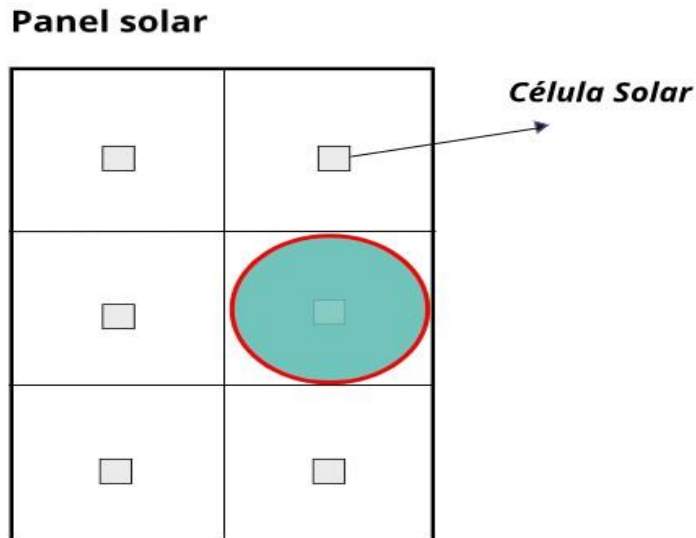


Figura 3-7 Cono de luz en 2D de la zona eficiente

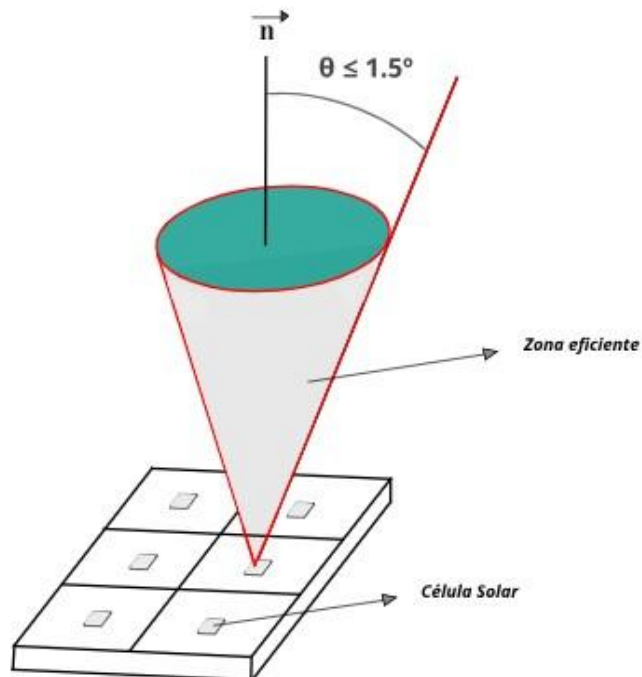


Figura 3-8 Cono de luz 3D de la zona eficiente

Estos paneles han de colocarse sobre seguidores de dos grados de libertad o más debido a la precisión que requieren las células solares. Los HCPV son capaces de resistir y de ser muy eficientes incluso en las condiciones medioambientales más adversas. Presentan además una combinación de materiales de alta fiabilidad y durabilidad escogidos especialmente para asegurar una larga vida al seguidor.

En cuanto a la célula, se puede decir que está formada por una asociación monolítica en serie de tres sub-células de distintos materiales semiconductores (GaIn - GaInAs - Ge) optimizados para absorber regiones específicas del espectro solar, de forma que la conversión a energía eléctrica a partir de la solar sea mucho más eficiente que en la convencionales. Estas células ensayadas en laboratorio cuentan con una eficiencia mayor al 43%, y en producción normal se aproximan al 41%. Cuentan con un elevado potencial para aumentar su rendimiento y ser aún más eficiente si se requiere en un futuro.

Por otra parte, el panel o módulo solar (conjunto de las 6 células) está certificado por IEC 62106 que garantiza la superación de los más altos estándares de calidad y las pruebas más duras medioambientales que garantizan su correcto funcionamiento a la vez que aseguran fiabilidad y durabilidad en el tiempo.

Para una irradiancia de 1000 W/m², y una temperatura ambiental de 25 °C, el panel solar completo presenta las características eléctricas que se presentan en la siguiente tabla.

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS / ELECTRICAL CHARACTERISTICS		
Corriente de Corto Circuito	Short-circuit current (I _{sc})	5.59A
Tensión de Circuito Abierto	Open-circuit voltage (V _{oc})	17 V
Potencia DC	DC power	83.6 W
Corriente punto máxima potencia	Maximum power current (I _{mp})	5.45 A
Tensión punto máxima potencia	Maximum power point voltage (V _{mp})	15.34 V
Dimensiones (Largo x Ancho x Alto)	Dimensions (Length x Width x Height)	754 x 514 x 303.2 mm

Tabla 3-1 Características eléctricas del módulo solar

En la tabla se observa que en circuito abierto (corriente nula) la tensión de salida alcanza 17 V y para un cortocircuito (resistencia muy pequeña), la corriente de salida sería de 5.59 A. Para estos valores, la potencia total que obtendríamos de la placa sería de aproximadamente 95W, pero esto no es posible, por como se puede observar en la figura 3-10. Estos valores se obtienen para valores límites de tensión y corriente instantáneas, pero estos valores no van a coincidir en el tiempo, haciendo que dicha potencia no se llegue a alcanzar en situaciones normales.

Las gráficas de tensión-intensidad y tensión-potencia no son lineales. Es decir, para este módulo en concreto se obtiene una forma de curva característica, haciendo que la potencia de salida en condiciones normales sea de 83.6 W, y se alcance con valores de 4.45 A y 15.34 V.

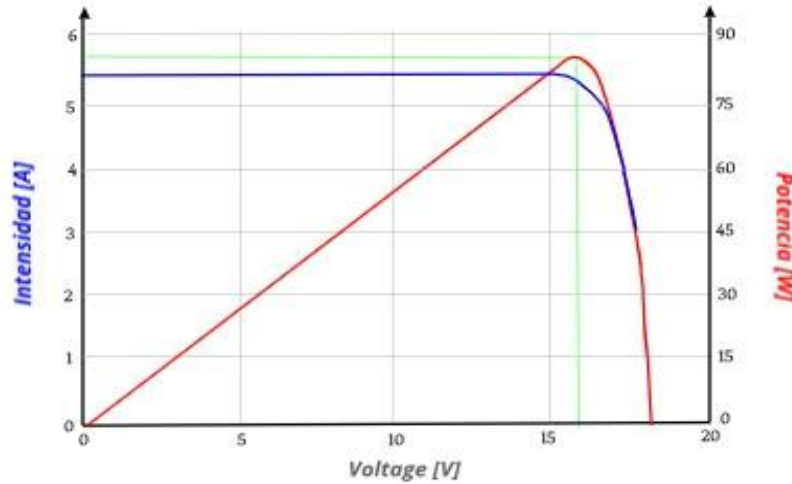


Figura 3-9 Curva V-I (Azul) y V-P (Rojo)

Para una configuración como la del seguidor a estudiar, con 24 paneles ISO FOTON GEN-2 idénticos, de 83.6 W cada uno, se obtendrá una potencia de salida de aproximadamente 2.006 W ($24 \times 83,6$). Las 6 células de cada panel se conectan en serie. Una célula solar se puede modelar como una fuente de intensidad con diodo conectado en paralelo, más una resistencia en serie y otra en paralelo. Cuando se analiza todo el conjunto de paneles conectados, al estar conectados en serie, la intensidad que pasa por ellos es la misma y podemos sumar las tensiones para cada valor de esta intensidad, pudiendo así obtener la curva IV del sistema de captación completo.

Para evitar daños por posibles desalineamientos, los paneles fotovoltaicos contienen un diodo de paso en antiparalelo, para que cuando el panel se polariza en inversa el diodo de paso lo haga de forma directa, quedando ese panel fuera del circuito serie global. Este diodo se usa para garantizar la seguridad del panel (ver figura 3-11).

En las siguientes figuras se representa una configuración de paneles conectados en serie, con sus diodos de paso y obviando las resistencias serie y paralelo de cada uno de ellos. Se observa como uno de los paneles queda inversamente polarizado, haciendo que entre en juego el diodo y quedando ese panel fuera del circuito serie. En la otra imagen, la 3-12., se tiene la curva IV de tres paneles en serie que tienen diferentes eficiencias instantáneas, que puede variar entre 0 y 1 según el ángulo de aceptación (ángulo de incidencia de los rayos a la célula). Esta eficiencia instantánea se utiliza para hallar la potencia lumínica por unidad de área instantánea como la irradiancia (W/m^2) por dicha eficiencia [0,1]. La gráfica de la eficiencia según el ángulo de aceptación se observa en la figura 3-13.

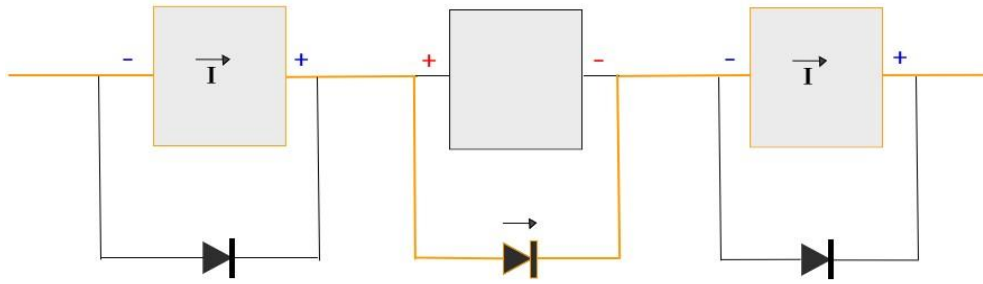


Figura 3-10 Configuración con diodos de paso con panel 2 en polarización inversa

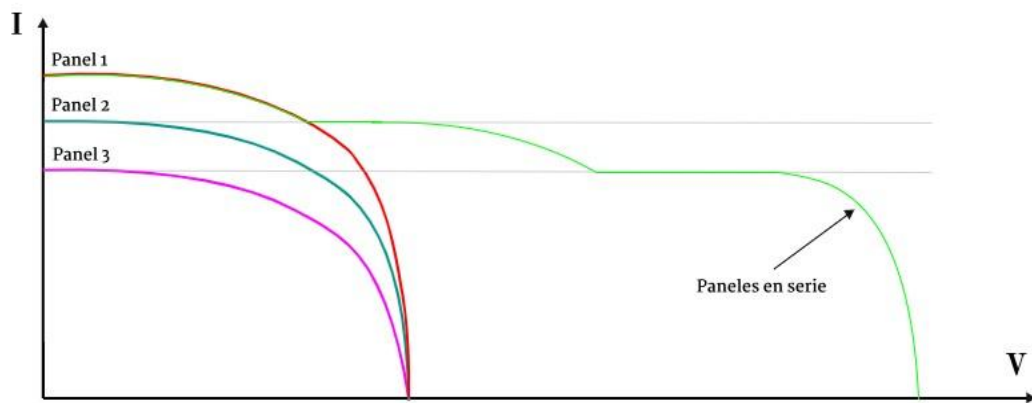


Figura 3-11 Curva IV de 3 paneles en serie con diferentes eficiencias instantáneas

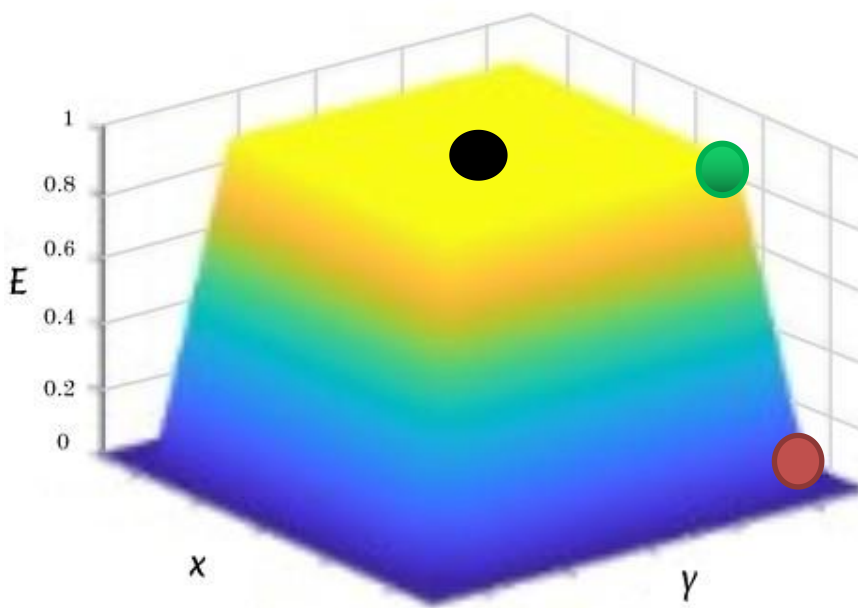


Figura 3-12 Eficiencia del panel solar

Como se representa en la figura 3-7. o 3-8., la zona eficiente depende del ángulo del rayo incidente, haciendo que la zona eficiente tome forma de cono. En esta figura, la 3-13, se muestra la eficiencia de la célula en función de la zona del plano XY de la célula donde incidan los rayos. A partir de este punto se puede hallar el ángulo de aceptación como la variación que tienen los rayos incidentes respecto a la normal al plano. Es decir el punto verde dibujado sobre la gráfica 3D de la figura 3-13 representa la mayor eficiencia posible ($E=1$) con un ángulo θ que se podrá mover entre 0° y 1° . A partir de que este ángulo se vaya haciendo mayor, la eficiencia empieza a caer rápidamente hasta alcanzar un valor de 0 (punto rojo). Este límite se consigue para un ángulo θ' menor o igual a 1.5° . Lo ideal sería que la célula trabajase siempre entorno al punto negro, con valores de x e y centrados en el receptor de la célula solar.

3.2.1 Dimensiones

Los paneles de ISO FOTON cuentan con las dimensiones que se observan en las figuras siguientes. Para su anclaje a cualquier perfil cuenta con cuatro agujeros roscados de métrica 8 (diámetro nominal). Antes del ajuste que se le aplicarán a los paneles con este trabajo, estos se encuentran sujetos al perfil del seguidor a través de 3 puntos en las esquina, quedando una de ellas libre. No es la mejor forma para anclarlos, ya que experimentan desviaciones con el tiempo, que por muy pequeñas que sean, hacen que la eficiencia caiga a mínimos.

Las dos primeras figuras son esquemas de los paneles, de frente (trasera) y de perfil, indicando las cotas más relevantes a tener en cuenta del panel. La última figura es una foto real de un panel que se encuentra en el laboratorio, indicando las distancias entre agujeros, necesarias para el capítulo de cálculo.

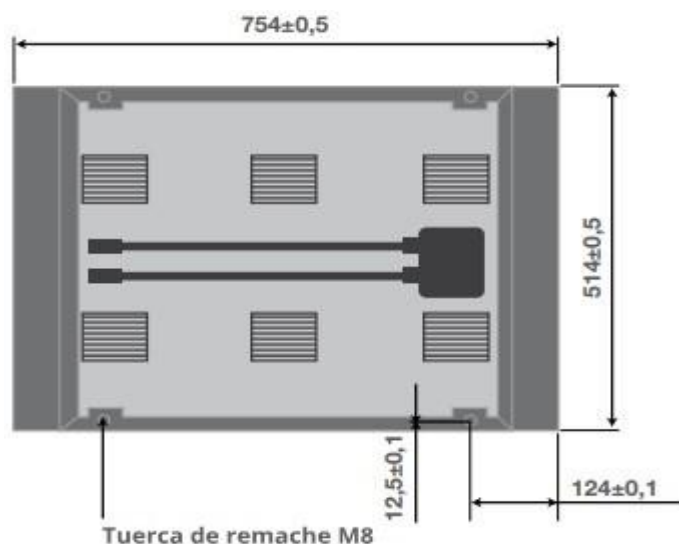


Figura 3-13 Vista trasera frontal del módulo solar

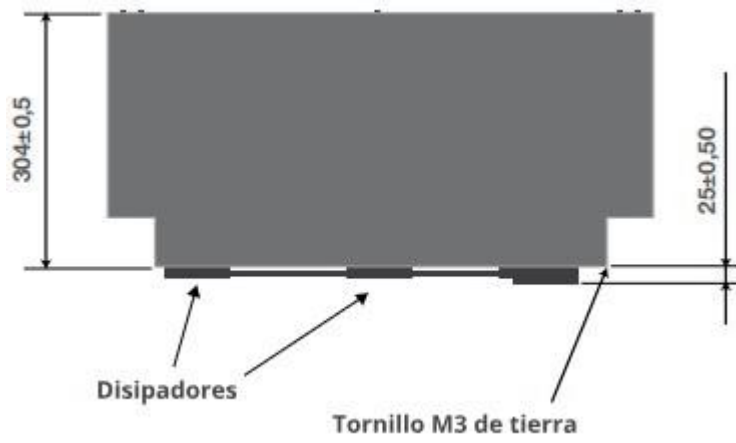


Figura 3-14 Vista lateral del módulo solar

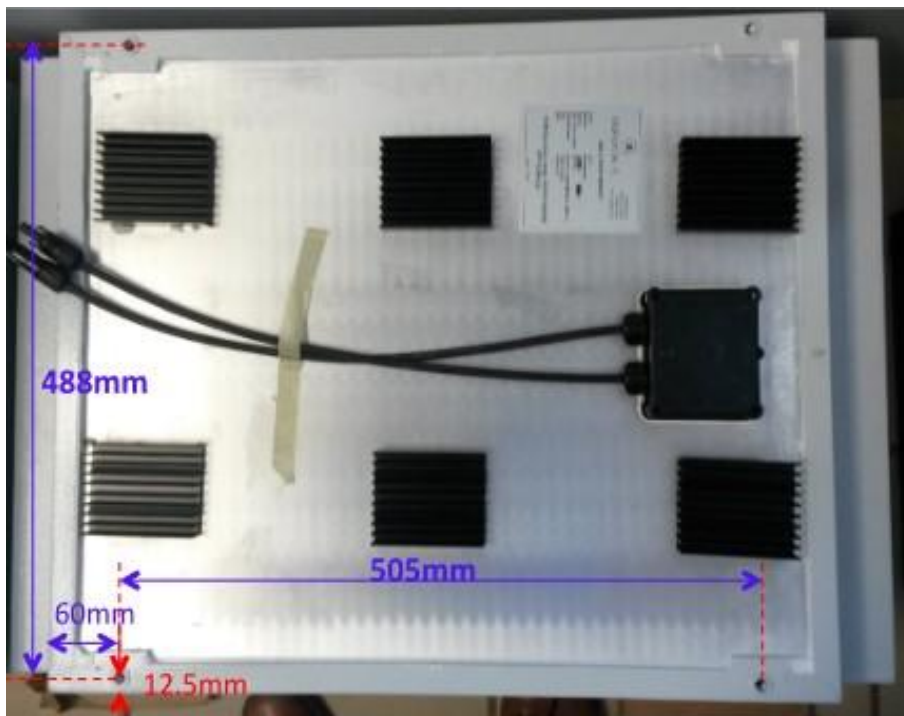


Figura 3-15 Distancia entre agujeros sobre panel real

4 JUSTIFICACIÓN DEL PROTOTIPO

4.1. Introducción

Como se ha demostrado en capítulos anteriores, los seguidores solares tienen pequeñas desviaciones dimensionales que hacen que los paneles de alta concentración que se sitúan sobre él tengan una orientación no óptima para la correcta captación de energía. Por este motivo se propone en este capítulo un prototipo de físico y de software para la corrección de los desajustes de los paneles. Este prototipo se le podrá aplicar a los paneles de forma independiente, a la vez que se busca que sea de un bajo coste económico.

Recordando las figuras 2-5 y 2-6., se tiene que la orientación del sistema de referencia $\{3i\}$ (las placas) está fuertemente relacionada con la orientación del sistema $\{2\}$ (el propio seguidor). El problema está en que al no estar perfectamente anclados los paneles a la estructura del seguidor, estos sistemas de referencias no serán todo lo paralelos que se requiere, y por consecuencia, sus vectores directores tampoco lo serán. En la siguiente imagen se observa como los vectores directores de $\{3i\}$ y de $\{2\}$ no están perfectamente paralelos, haciendo que los rayos no incidan de forma perpendicular en la placa, y que por consecuencia directa la lente Fresnel no concentre todos los rayos solares en la pequeña célula solar semiconductor. Se parte de la hipótesis de que el sensor solar $\{S\}$ está perfectamente solidario a $\{2\}$, y que entre ellos no habrá deriva temporal de ningún tipo (vectores directores siempre paralelos).

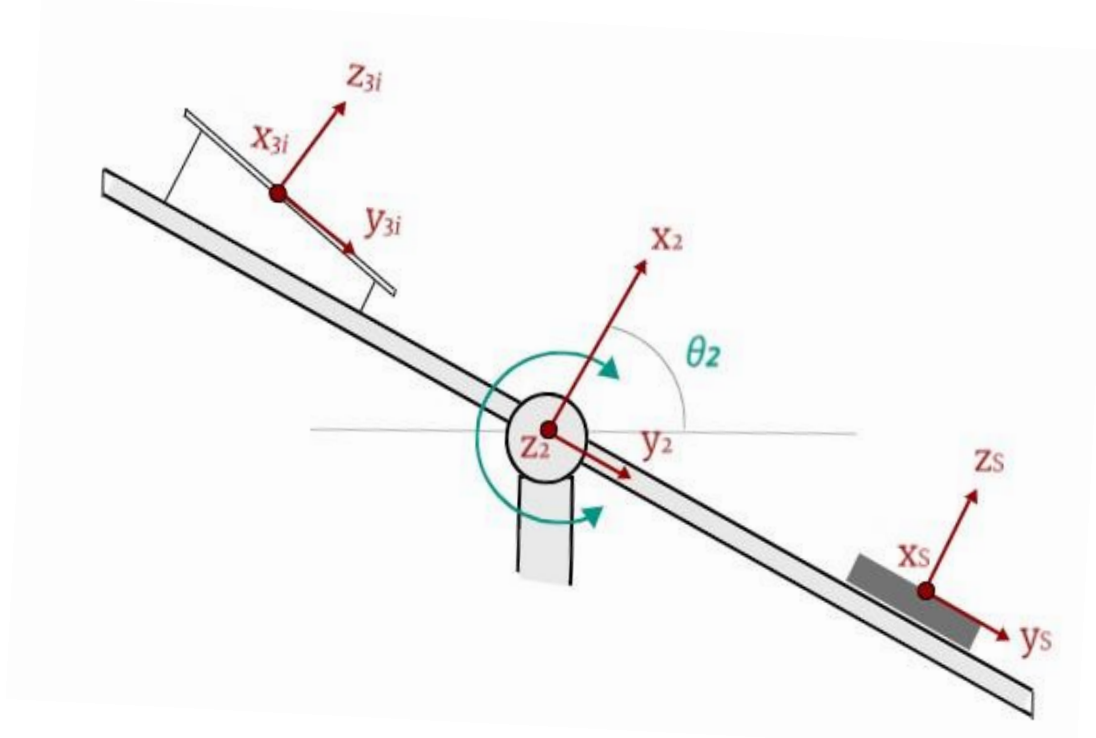


Figura 4-1 Mala orientación de paneles frente a orientación de seguidor

Se propone pues en este capítulo el sistema de bajo coste que reajuste dicha orientación de los paneles. El sistema sólo se aplica al sistema de referencia $\{3i\}$, en concreto a dos de sus tres puntos de apoyo con el perfil del seguidor. El fin será conseguir que los vectores normales al seguidor y al sensor solar, lo sean también con el del panel solar, es decir, $Z_{3i} \parallel (Z_s \& X_2)$.

El sistema de monitorización de la orientación de paneles consiste en acoplar dos motores paso a paso a los puntos de apoyo del panel, haciendo que se puedan mover de forma lineal hacia arriba y abajo. Sendos motores se colocarán en el tramo corto superior del panel, mientras, la esquina anclada restante, permanecerá igual (se le podría acoplar alguna rótula para mayor precisión, pero no se ha tenido en cuenta en este trabajo). Este sistema estará monitoreado por un autómata programable con una serie de funciones que se desarrollarán para este efecto concreto. El autómata programable (o PLC) necesitará de elementos externos como fuente de alimentación, drivers, etc., y estará realimentado en todo momento por señales o sensores externos para indicar tanto la orientación del panel como de la ubicación del sol, así como finales de carrera.

Los motores paso a paso no irán directamente acoplados a los anclajes de las esquinas del panel, sino que tendrán un acoplamiento en forma de cadena con dos piñones, uno al eje del motor y otro al de la placa, como se muestra en la siguiente figura.

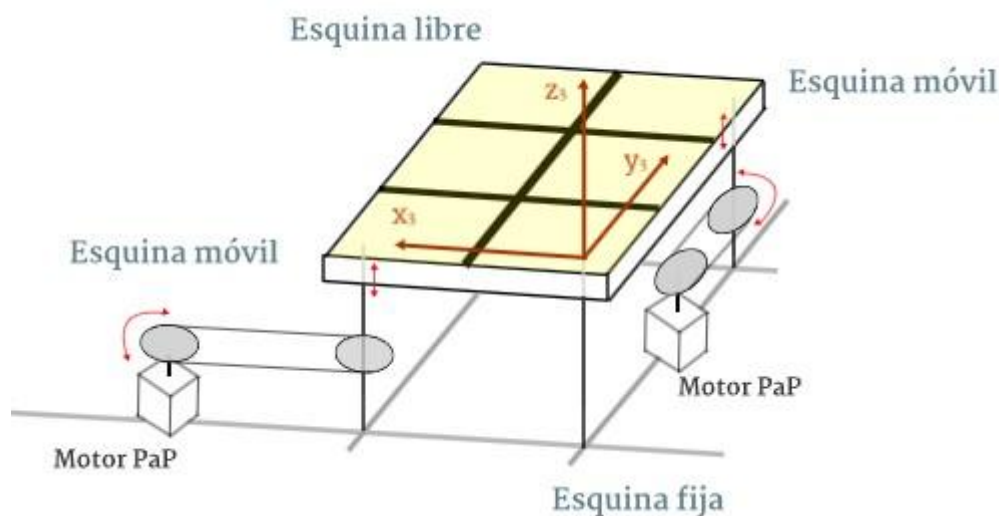


Figura 4-2 Disposición de los motores PaP y de las diferentes esquinas de la placa

El ajuste se hará mediante un sensor solar independiente a cada panel (aparte del que se ubica en la vela del seguidor) que se describirá en capítulos posteriores. El fin de este sensor es corregir el pequeño error de paralelismo que tienen los sistemas $\{3i\}$ y $\{S\}$ (ó $\{2\}$) y mandarle esta información al PLC, que mediante el software programado en él, le mandará las órdenes necesarias a los drivers del motor para que se muevan de forma que se obtenga la orientación óptima.

En la siguiente imagen se muestra el sistema completo a desarrollar, con todos los sistemas físicos que se han de implementar y con los sistemas de referencias más relevantes que se han de tener en cuenta para el cálculo de la orientación del panel. Dichos sistemas físicos pasarán a desarrollarse individualmente en el siguiente subapartado. En principio todos los sistemas irán anclados al perfil del seguidor, aunque no se entrará en ese detalle excepto para el acoplamiento del tornillo con el perfil y el panel.

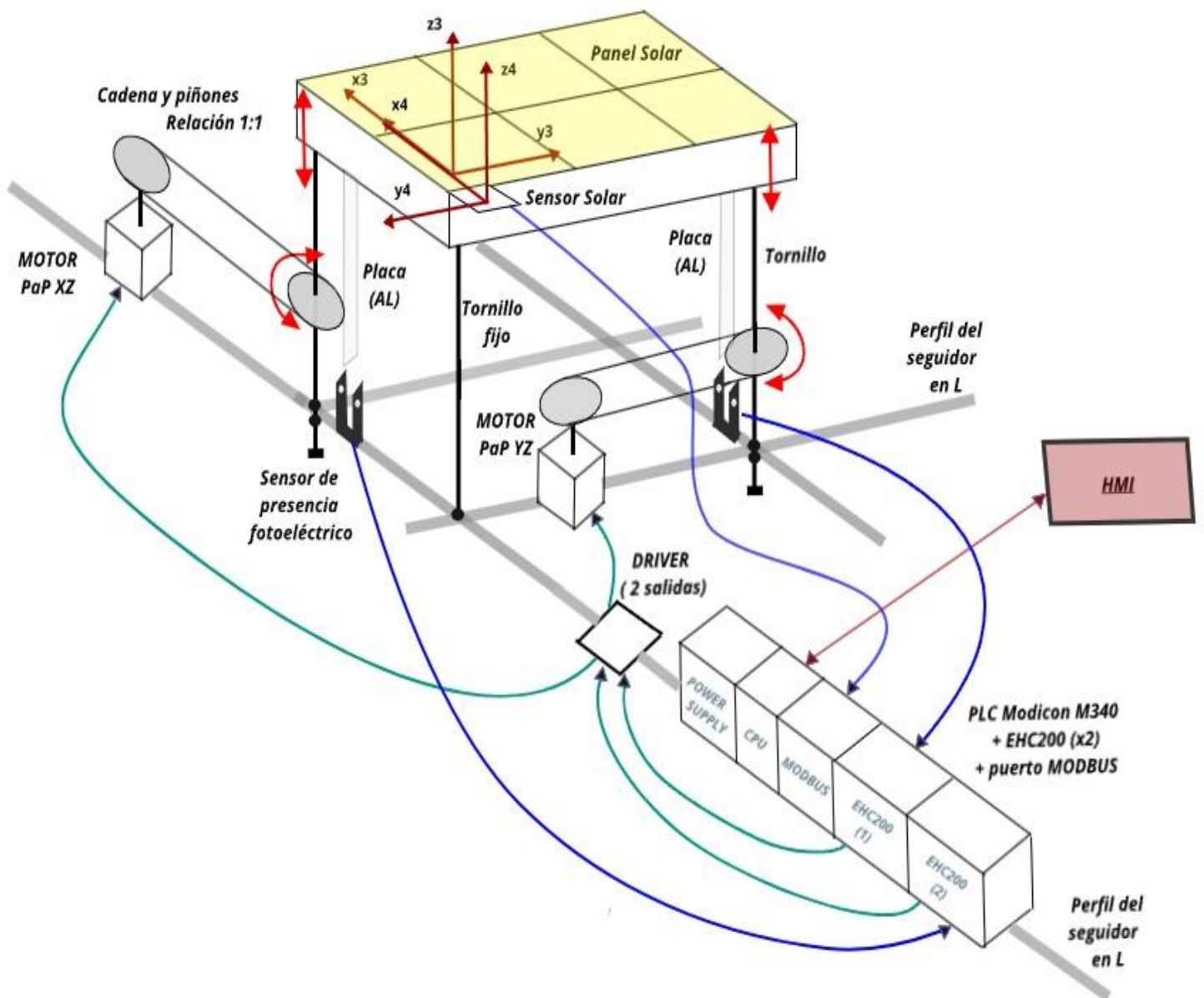


Figura 4-3 Prototipo completo a desarrollar

El hecho de introducir un nuevo sistema de referencia, el del sensor solar acoplado al panel, hace que la relación entre sistemas de referencia se modifique. En este caso, el nuevo sistema de referencia, $\{4\}$, será dependiente de $\{3\}$, que a su vez lo será de $\{2\}$. Aún así, mediante una realimentación de la orientación se llegará a que los tres sistemas de referencia ($\{2\}$, $\{3\}$ y $\{4\}$) tendrán vectores directores paralelos. En la siguiente imagen se muestra esta nueva relación entre sistemas.

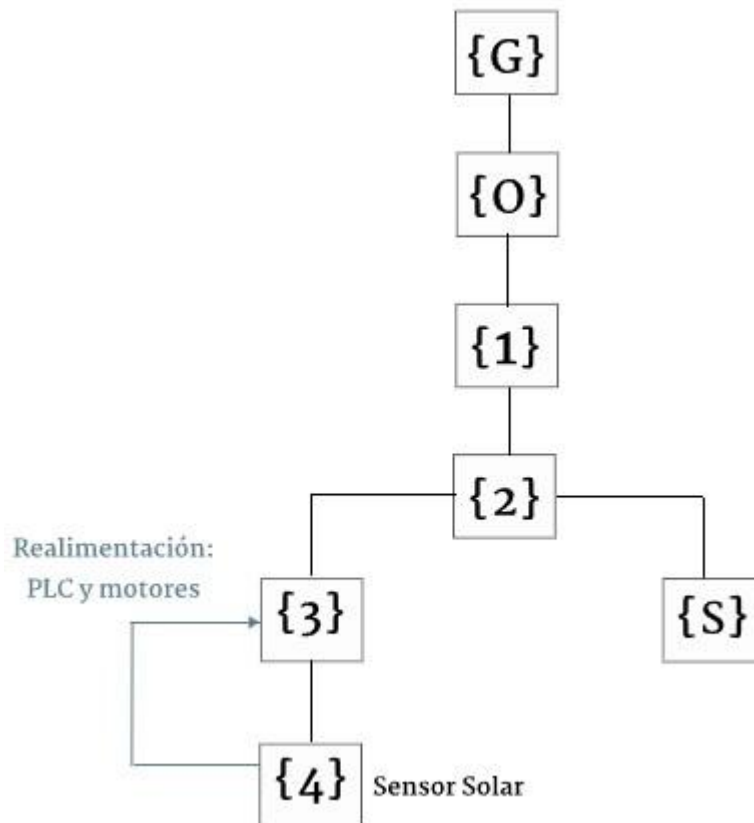


Figura 4-4 Nueva relación entre sistemas de referencia

4.2. Sistemas del prototipo

En este apartado se describirán los equipos necesarios para llevar a cabo el ajuste del panel. En primer lugar se describen los sistemas físicos, luego, el software usado para la programación del PLC con el programa concreto. En apartados siguientes, se detallará el funcionamiento de todo el conjunto de sistemas. La siguiente figura muestra la conexión entre sistemas, con diferentes “cables” que los interconectan entre sí. Tras la figura se definen todos y cada uno de esos cables, dándoles nombre e indicando que se señales manejan.

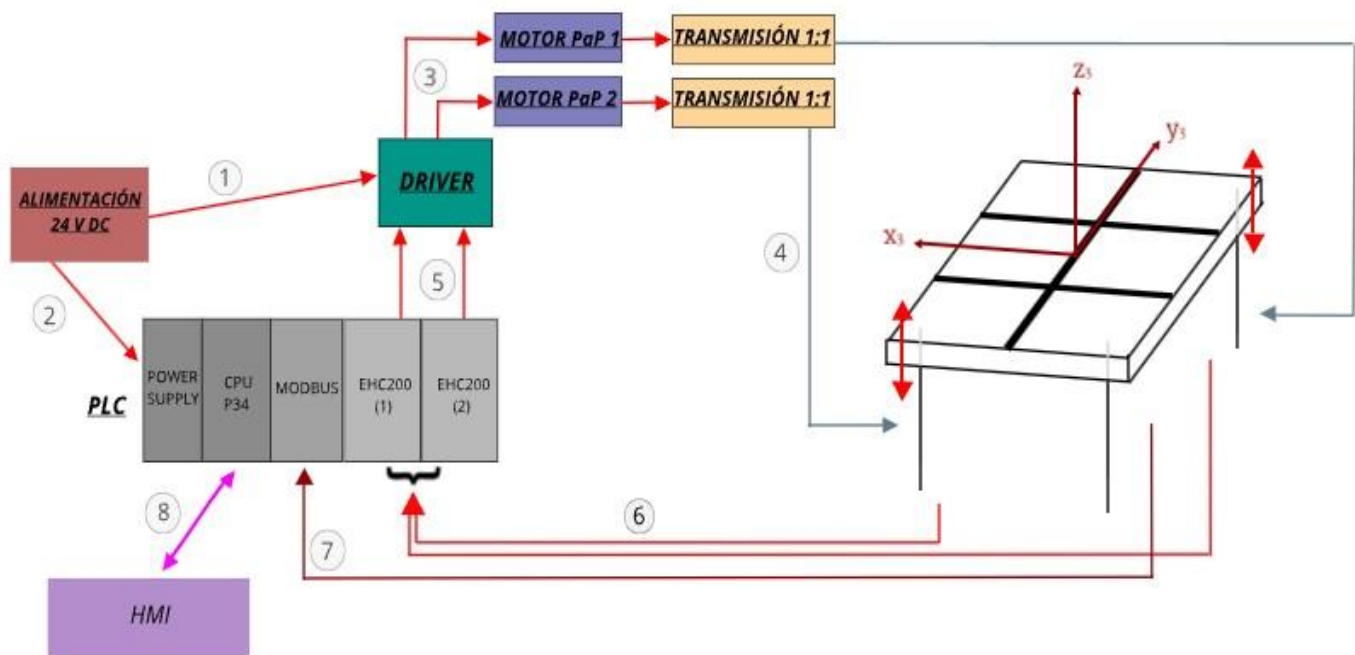


Figura 4-5 Conexión entre sistemas

- 1: Cable de alimentación al driver de los motores.
- 2: Cable de alimentación al PLC.
- 3: Salidas con señales de accionamiento a los motores paso a paso.
- 4: No es una señal, esta línea indica el movimiento lineal en el sentido de Z_s producido por el giro de la transmisión, que a su vez proviene del motor paso a paso. Sería el acoplamiento transmisión-tornillo.
- 5: Diferentes señales de los módulos especiales EHC200 del PLC (se describen más adelante). Se tratan de 3 señales por módulo.
- 6: Diferentes señales procedentes de sensores, que sirven para obtener de una u otra forma una realimentación del sistema. Por ejemplo el sensor de HOME.
- 7: Señal proveniente del sensor solar con información válida para el ajuste del sistema. En este caso la información es mediante MODBUS, por lo que se ha añadido este bloque al bastidor del PLC.
- 8: Canales opcionales de entrada y salida al PLC. Con esto un usuario podría disponer de una interfaz hombre-máquina (HMI) con las entradas y salidas del sistema para facilitar la maniobrabilidad del mismo, y así poder darle en un momento dado una señal externa que actúe sobre el sistema.

4.2.1. Autómata programable: *Modicon M340 de Schneider Electric*

4.2.1.1. Introducción

El dispositivo usado para el manejo de los motores paso a paso ha sido un PLC de la marca Schneider Electric, en concreto, el modelo M340 de la serie Modicon .

Este se trata de un controlador lógico programable diseñado para entorno industriales, y que permite una instalación rápida y flexible. Tiene varias ventajas frente a otros autómatas, ya que incorpora un simulador integrado que permite probar su programación antes de ser mandada al sistema físico, lo que ayuda a evitar posibles riesgos en cualquier industria. Otra ventaja de este autómata es que permite la incorporación de módulos externos que, según el fin del proyecto, interesan añadirlo. En este caso, necesitaremos dos tarjetas rápidas EHC200.



Figura 4-6 PLC Modicon M340

En este proyecto concreto, el PLC realizará dos tareas fundamentales para garantizar el correcto funcionamiento del sistema:

- Enviará al driver de los motores las señales pertinentes para que los motores se muevan de una determinada forma que haga que la orientación del panel sea la óptima.
- Recibirá y tratará las señales provenientes de los sensores externos, como fines de carrera o el propio sensor solar, que realimenta en todo momento la posición (orientación) del sol.

4.2.1.2. Datos técnicos y características

Software de programación:

- Unity Pro XL
- 6 lenguajes de programación
- Incluye una multitud de librerías de procesos

Flexibilidad:

- Se pueden instalar 4,6,8 o 12 tarjetas para bastidores
- Se puede expandir y conectar con otros autómatas
- Permite la instalación de tarjetas de entrada y salida digitales y analógicas

Alta densidad:

- Incluye 64 canales de entrada y salida digitales
- Incluye 8 canales de entrada y salida analógicas

Mantenimiento:

- Incluye visor de diagnóstico integrado
- Permite mantenimiento en remoto
- FDT/ DTM. Admite tecnología estándar para la comunicación de los dispositivos de campo y las herramientas de ingeniería. Así, el software que tenga integrado FDT puede configurar, monitorizar, y diagnosticar dispositivos que tengan DTM de cualquier fabricante, siempre que estén conectados entre sí a través de cualquier tipo de bus.

4.2.1.3. Módulos instalados: EHC200 y configuración del mismo

Como se comentó anteriormente, este dispositivo admite una gran variedad de módulos a instalar además de la fuente de alimentación, el procesador BMX P34 (CPU). Para este proyecto en concreto, será necesario el uso de dos módulos adicionales, dos tarjetas rápidas EHC200, también de Schneider Electric. En la figura siguiente se observa el bastidor completo con estos módulos.

Esta tarjeta se trata de un módulo (externo al M340) de contaje. Esta se usa para contar los impulsos generados mediante un captador o para tratar las señales de un codificador incremental. Este módulo se diferencia por su número de vías de contaje, las frecuencias altas de entrada con las que puede trabajar, sus funciones, sus interfaces en entrada y salidas auxiliares. La tarjeta puede instalarse en cualquier slot disponible en el bastidor de la estación del M340, menos en la posición de la alimentación y la CPU. Se conectan y desconectan en tensión.

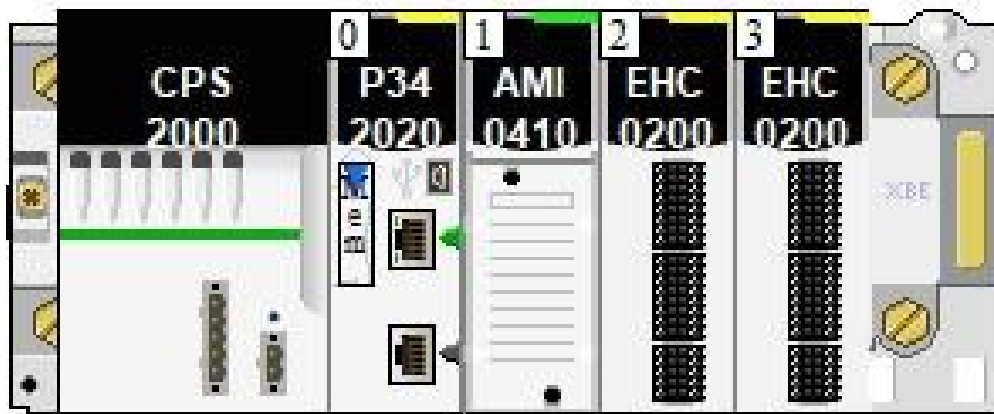


Figura 4-7 Bastidor con 4 slots de M34

La tarjeta dispone de circuitos específicos para generar trenes de pulsos, de sincronización, contabilización de señales, actuación refleja, etc. Los parámetros de este módulo han de configurarse mediante el software Unity Pro XL. Este módulo o tarjeta dispone de dos canales (CH0 y CH1), que se computan a una frecuencia máxima de 60 kHz. La tarjeta trabaja con su propio procesador y se comunica con la CPU cada cierto tiempo de forma implícita mediante un bus de comunicación (ver figura 4-5). Esta tarjeta trabaja con el concepto de salida refleja, es decir, cuando un evento se cumple, se actúa inmediatamente o de forma refleja sobre la salida o sobre alguna variable que dependa de ella. El procesador propio de la tarjeta es el que puede efectuar dicha acción refleja, y no el procesador del autómat (CPU lenta). El uso de la tarjeta en el proyecto recae en la lentitud de movimientos del motor sólo con la CPU (orden de Hz). Por este motivo la CPU debe delegar las tareas generación de señales de alta frecuencia y contadores rápidos en esta tarjeta.

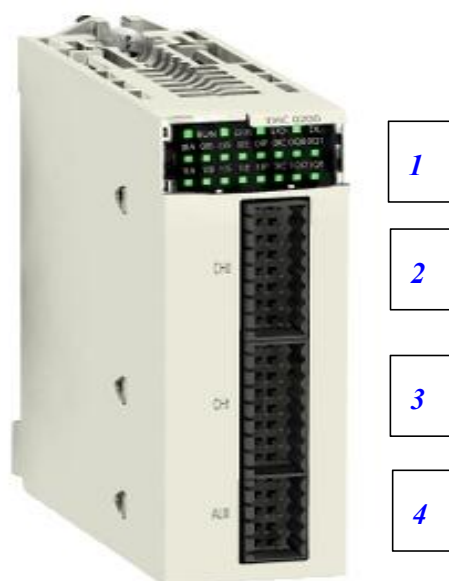
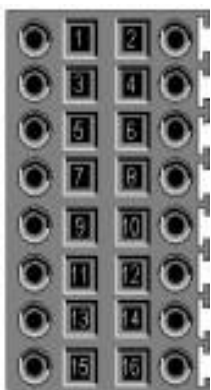


Figura 4-8 Módulo de contaje EHC200

En la imagen anterior, se observan unos números que corresponden a diferentes zonas del hardware de la tarjeta rápida. Se tratan de:

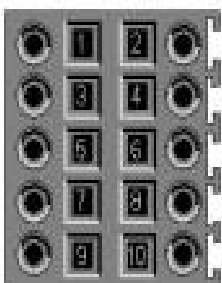
- 1: Indicadores LED del estado del módulo.
- 2: Conector de 16 pins para los sensores (entradas) del canal 0.
- 3: Conector de 16 pins para los sensores (entradas) del canal 1.
- 4: Conector de 10 pins para conectar salidas auxiliares y/o fuentes de alimentación. De aquí saldrán las salidas al driver de los motores.

El módulo de conteo dispone de dos conectores de 16 pins correspondientes a los canales 0 y 1 y un conector de 10 pins correspondiente a las salida. Los indicadores LED son usadas para saber en todo momento el estado en el que se encuentra la tarjeta. En función de los LEDs que estén encendidos, apagados o parpadeando, se tendrá una información de su estado actual. En las siguientes figuras se muestra la ubicación física de los números de pin con el nombre y la descripción de cada uno de ellos. En primer lugar se muestra el conector de entrada (idéntico para ambos canales) y luego el de salida.



Número de pin	Símbolo	Descripción
1, 2, 7, 8	24V_SEN	Salida de 24 V CC para la alimentación de los sensores
5, 6, 13, 14	GND_SEN	Salida de 24 V CC para la alimentación de los sensores
15, 16	FE	Conexión a tierra funcional
3	IN_A	Entrada A
4	IN_SYNC	Entrada de sincronización
9	IN_B	Entrada B
10	IN_EN	Entrada de habilitación seleccionada
11	IN_REF	Entrada de toma de referencia en curso
12	IN_CAP	Entrada de captura

Figura 4-9 Símbolo y descripción de cada pin de entrada de canal



Número de pin	Símbolo	Descripción
1	24V_IN	Entrada de 24 V CC para la alimentación de los sensores
2	GND_IN	Entrada de 24 V CC para la alimentación de los sensores
5	Q0-1	Salida Q1 para canal de conteo 0
6	Q0-0	Salida Q0 para canal de conteo 0
7	Q1-1	Salida Q1 para canal de conteo 1
8	Q1-0	Salida Q0 para canal de conteo 1
9	24V_OUT	Entrada de 24 V CC para la alimentación de los actuadores
10	GND_OUT	Entrada de 24 V CC para la alimentación de los actuadores

Figura 4-10 Símbolo y descripción de cada pin de salida

La tarjeta permite la utilización de dos tipos de sensores, de proximidad (capacitivos, inductivos, fotoeléctricos, de proximidad...) y codificadores de señal incremental. En este proyecto se hará uso del sensor de proximidad fotoeléctrico con forma de horquilla, el cual se desarrollará en capítulos posteriores. En la siguiente figura se muestra la configuración en cuanto al conexionado de sensores a la hora de conectarlos con la tarjeta. En la figura, cada número se refiere a:

- 1: Entrada IN_A
- 2: Entrada IN_B
- 3: Entrada IN_SYNC (entrada de sincronización)
- 4: Entrada IN_EN (entrada de habilitación)

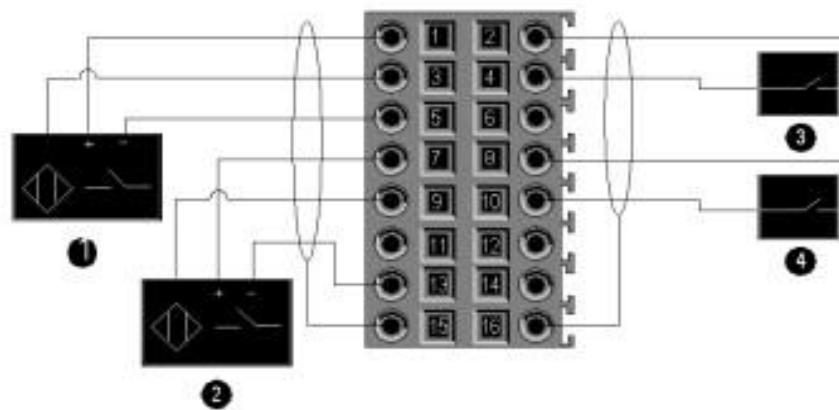


Figura 4-11 Conexionado de sensores con canal de la tarjeta

En cuanto a la conexión de alimentaciones de salida y actuadores con el conector de salida de 10 pins, se muestra la siguiente figura donde cada número fuera del conector tiene una descripción:

- 1: Alimentación 24 V para actuadores
- 2: Alimentación 24 V para sensores
- 3: Actuador de la salida Q0 del canal de conteo 0
- 4: Actuador de la salida Q1 del canal de conteo 0
- 5: Actuador de la salida Q0 del canal de conteo 1
- 6: Actuador de la salida Q1 del canal de conteo 1

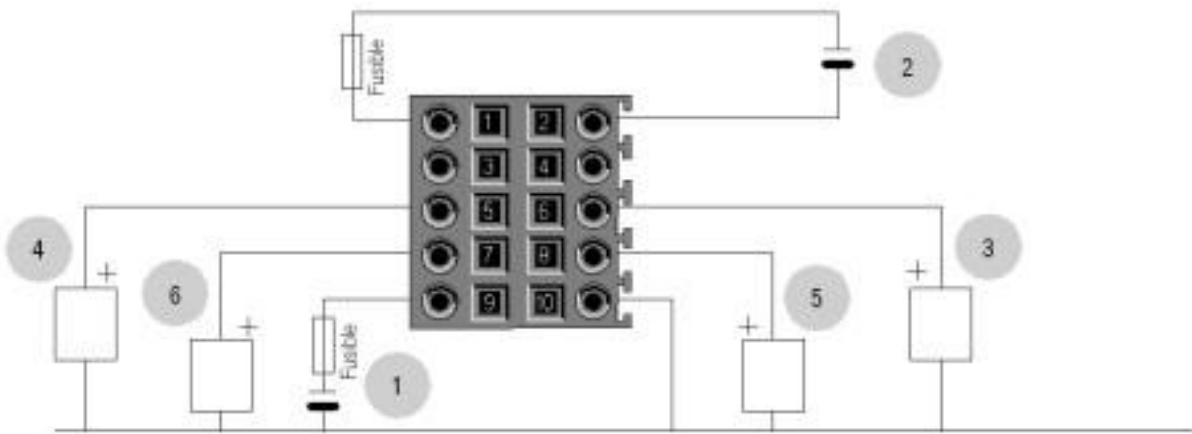


Figura 4-12 Conexión de salida.

Para tener una imagen más gráfica y completa del hardware de la tarjeta con las entradas y salidas de los canales 0 y 1, se tiene la siguiente figura, que relaciona cada posición (puntos negros) con el tipo de entrada o salida de la tarjeta que se han definido anteriormente. Esta configuración sería idéntica en ambas tarjetas, es decir, lo correspondiente a los bloques 2, 3 y 4 de la imagen anterior.

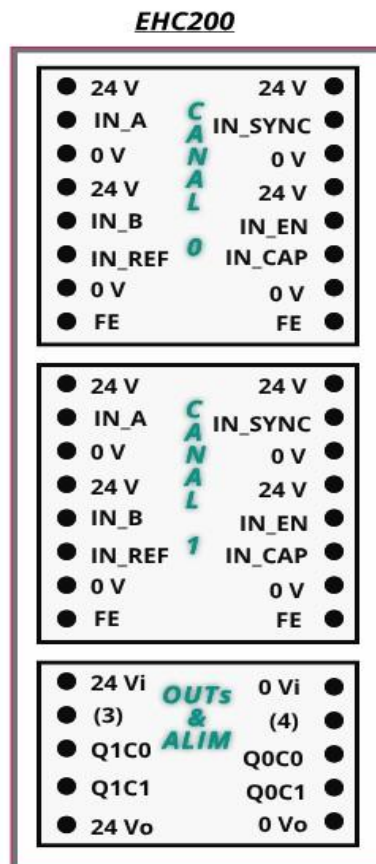


Figura 4-13 Entradas y salidas de la tarjeta rápida EHC200

El Canal 0 (CH0) para este fin se configurará (dentro de las 9 posibles configuraciones que tiene) como modulador de ancho de pulsos (PWM). El módulo utiliza un generador de reloj interno para ofrecer señales periódicas de alta frecuencia únicamente en la salida Q0, no afectando a priori en la salida Q1. Aún así, la salida Q1 se usará para la dirección de giro del motor y Q0 para mandar pulsos al driver-motor.

El canal 1 (CH1) está configurado como contador libre de 32 bits. Este leerá los pulsos y la dirección generados en el canal 0, de modo que contabilizará la posición del motor y así genere una salida refleja en Q0 que pueda deshabilitar el canal 0 (dejar de generar pulsos) cuando se alcancen ciertas referencias. La salida Q1 de este canal es usada como señal de habilitación del driver del motor.

La siguiente figura muestra como habría que proceder para la conexión de los equipos con las salidas de los canales de la tarjeta. La idea es que desde la CPU se pueda utilizar una función que maneje el motor paso a paso. Esta actúa sobre los registros de la tarjeta rápida a través de los campos de una estructura que se actualiza de forma implícita el bus de comunicación interno.

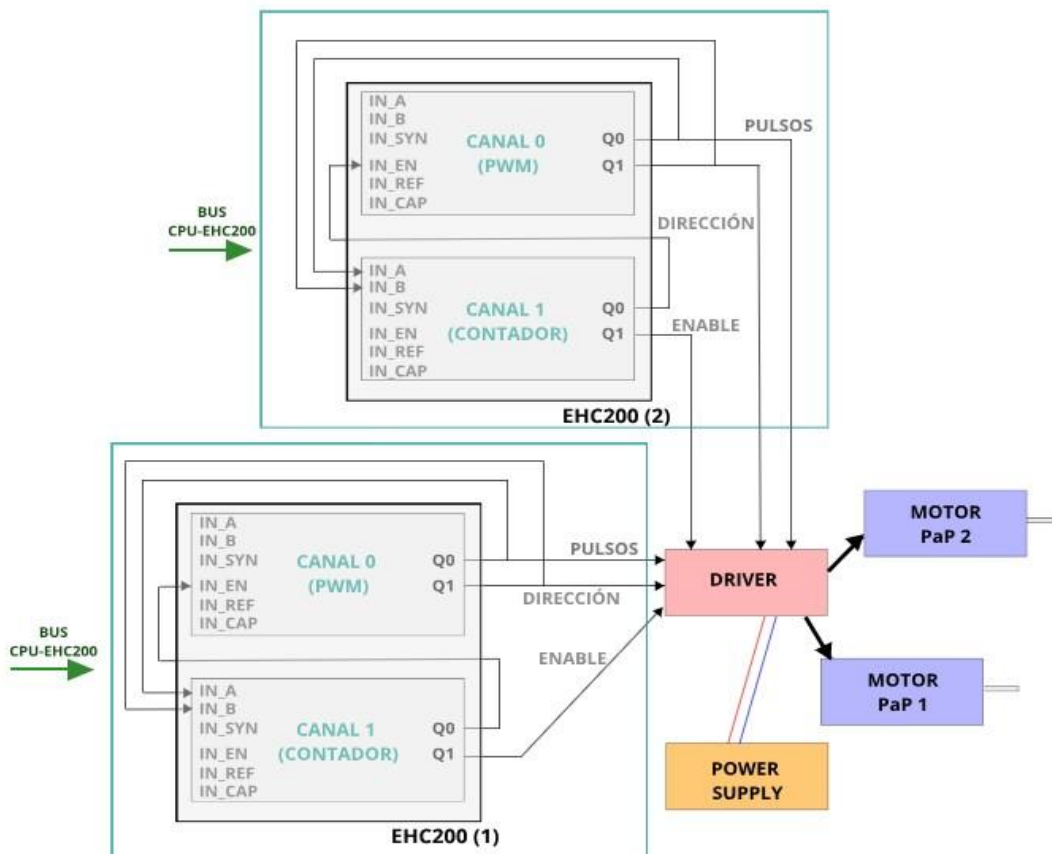


Figura 4-14 Conexión de los canales de las tarjetas con driver

La configuración de la tarjeta en cuanto a los modos de los canales y demás parámetros a configurar en el software Unity Pro XL se hará en el capítulo 7.

4.2.2. Motor paso a paso y driver

4.2.2.1. Motor paso a paso

Harán falta dos motores paso a paso, uno para cada esquina móvil del panel. En modo resumido, un motor paso a paso se puede decir que es un dispositivo electromecánico que convierte pulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos de su eje de giro. Este motor es de corriente continua, sin escobillas, y que como se ha comentado, discretiza las posiciones angulares en una vuelta de su eje de giro. Normalmente, una revolución completa del eje de 360° se divide en 200 posiciones (o pasos) a poder alcanzar por el eje. Esto equivale a una discrepancia entre paso y paso de 1.8° .

Estos motores son ideales para este trabajo en concreto, ya que proporcionan un alto grado de precisión y un gran par de fuerza a bajas velocidades, necesario para poder mover el panel incluso en las condiciones de viento más adversas. Para ello, habrá que buscar un modelo óptimo para dicha aplicación. Además estos motores poseen una característica importante respecto a los de corriente continua, y es que poseen lo que se conoce como “par de detención”. Esto hace que los motores paso a paso en condiciones de reposo se mantengan firmes. Esta característica es útil cuando el motor deja de moverse y se quiere mantener su eje fijo, manteniendo la fuerza en el mismo. Así se elimina la necesidad de colocar un freno externo, aumentando el coste del prototipo.

El número de pasos de estos motores determinará el avance lineal que se tendrá en una de las esquinas del panel. Aunque primero se ha de comentar los demás elementos del prototipo.



Figura 4-15 Motor paso a paso

4.2.2.2. Driver

Este elemento es primordial, ya que se trata de un sistema de potencia que hace que los motores paso a paso tengan la suficiente corriente, sin llegar a quemarse. Es una especie de elevador de corriente, y que es controlador mediante el microcontrolador del PLC mediante una señal de control de baja corriente. A la hora de elegir el driver concreto, se tendrán que tener en cuenta aspectos como voltaje máximo, intensidad máxima de salida, etc. Para este proyecto, y para evitar mayores costes, se optará por un driver con dos estructuras de entradas (cada una proveniente una de la tarjetas rápidas EHC200) y dos de salidas (una para cada motor paso a paso).

Las estructuras de salidas del driver (que son idénticas) tienen varias conexiones, cada una de ellas para un fin. Estas son las fases positiva y negativa de cada bobina del motor, que hace que el motor se mueva a una cierta velocidad en una de los dos sentidos de giro. Al conjunto del motor y driver se le conoce como motor-driver.

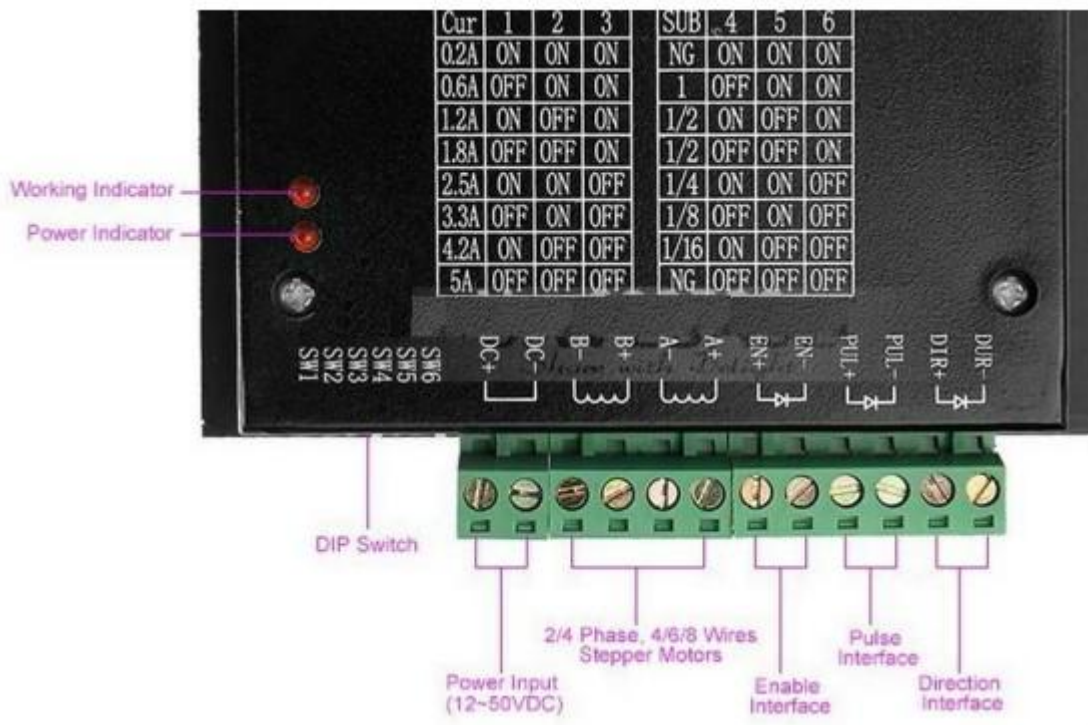


Figura 4-16 Driver de los motores paso a paso

4.2.3. Transmisión y acoplamiento

En este apartado se desarrollará tanto la transmisión del eje del motor al tornillo de sujeción del panel como el propio acoplamiento del tornillo con el panel, el perfil del seguidor, y el piñón de la transmisión.

En primer lugar, comentar que la transmisión se llevará a cabo mediante una cadena con dos engranajes (piñones) en sus extremos, uno en el eje de un motor paso a paso y otro en uno de los tornillos de sujeción del panel, como muestra la figura 4-2 y 4-3. Esta transmisión tiene una relación de giro 1:1, es decir, por cada vuelta que da el motor paso a paso, el eje del tornillo también dará una vuelta, que luego se transformará en un avance lineal en un sentido u otro. Se han de tener dos transmisiones, una por cada motor. En la práctica, esta cadena debería reproducir casi a la perfección un mínimo giro del motor, es decir, 1.8° de giro angular, ya que la precisión del sistema ha de ser máxima. En la figura 4-13, se puede observar el piñón. Observar como posee un pequeño orificio diametral para anclarlo al eje del tornillo o del motor, que así giran los dos solidariamente. En la figura 4-14, se puede ver la transmisión completa, con relación 1:1.



Figura 4-17 Piñón de la transmisión (x2)

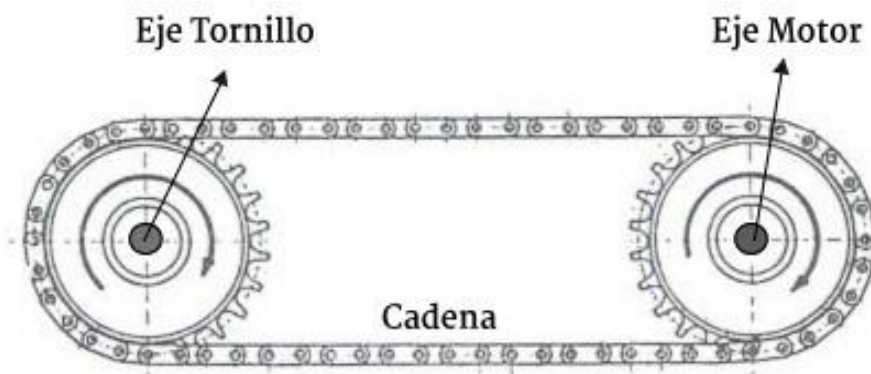


Figura 4-18 Transmisión completa (vista superior)

En cuanto al acoplamiento del tornillo, con el engranaje, con el perfil del seguidor y con el panel, se tiene el esquema de la figura 4-15. Las flechas rojas indican el sentido de avance o retroceso y de giro, en el caso del tornillo dentro del panel (en realidad es el panel el que avanza sobre el tornillo) y en el del engranaje, respectivamente.

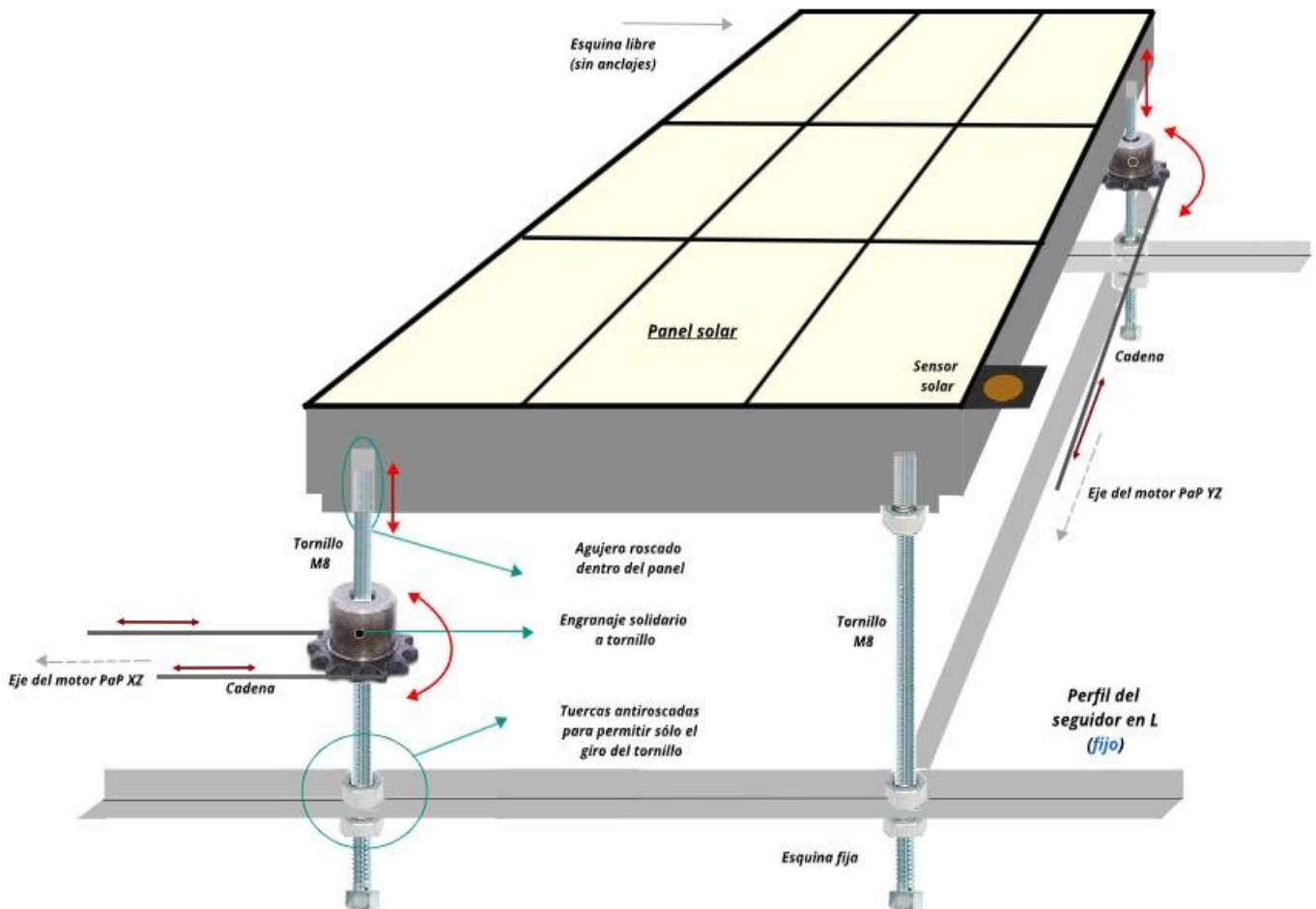


Figura 4-19 Acoplamiento mecánico para el ajuste del panel

Sólo con la esquina fija se podría dar a pensar que el sistema quedaría bien anclado e inmóvil. Pero la realidad es que siempre se tiene una pequeña holgura, en este caso, como se trabaja con movimientos muy pequeños, basta con que se tenga esta pequeña holgura en la esquina fija para producir un ángulo de incidencia óptimo por las dos esquinas móviles. En capítulos posteriores se detallarán las vueltas de motor que habría que dar para conseguir un avance dado en cada tornillo. En la figura se han obviado algunos elementos externos.

Las tuercas antiroscadas permiten el giro del tornillo respecto al perfil del seguidor, pero no su avance. Al no avanzar el tornillo, y al estar dentro del agujero roscado del panel, lo que hará este último será deslizarse sobre el tornillo según su sentido de giro. Es decir, el tornillo es fijo en cuanto al avance, lo único que se desplazará será el panel

5 ELECCIÓN DE SISTEMAS DE REFERENCIA

Se presenta en este capítulo una explicación sobre los sistemas de referencia que se verán modificados por el ajuste del panel solar. Estos son {3} y {4}, el propio del panel y el referente al sensor solar, respectivamente. Los sistemas de referencia aguas arriba de {3} se han comentado en el capítulo 2.

En cuanto a {3}, hay que comentar que se ha colocado en un nuevo lugar (no como en figuras anteriores que se hallaba en el centro del panel). El origen de este será ahora el punto (imaginario) por donde el tornillo de la esquina fija atravesaría el panel por la cara superior. En la imagen 4.5 se observa con claridad. Este es solo usado para el cálculo, por eso se ha optado por colocarlo lo más cómodo posible.

El sistema {4}, el del sensor solar del que se hablará en adelante, se ha colocado en la esquina fija, en el lado corto. Este sensor, como ya se verá, tiene también un sistema de referencia con ejes coordenados en su centro, que nos servirá para poder captar la orientación exacta de los rayos solares y desde este enviarle al PLC la información necesaria para mover sendos motores hasta que angleX y angleY se hagan 0.

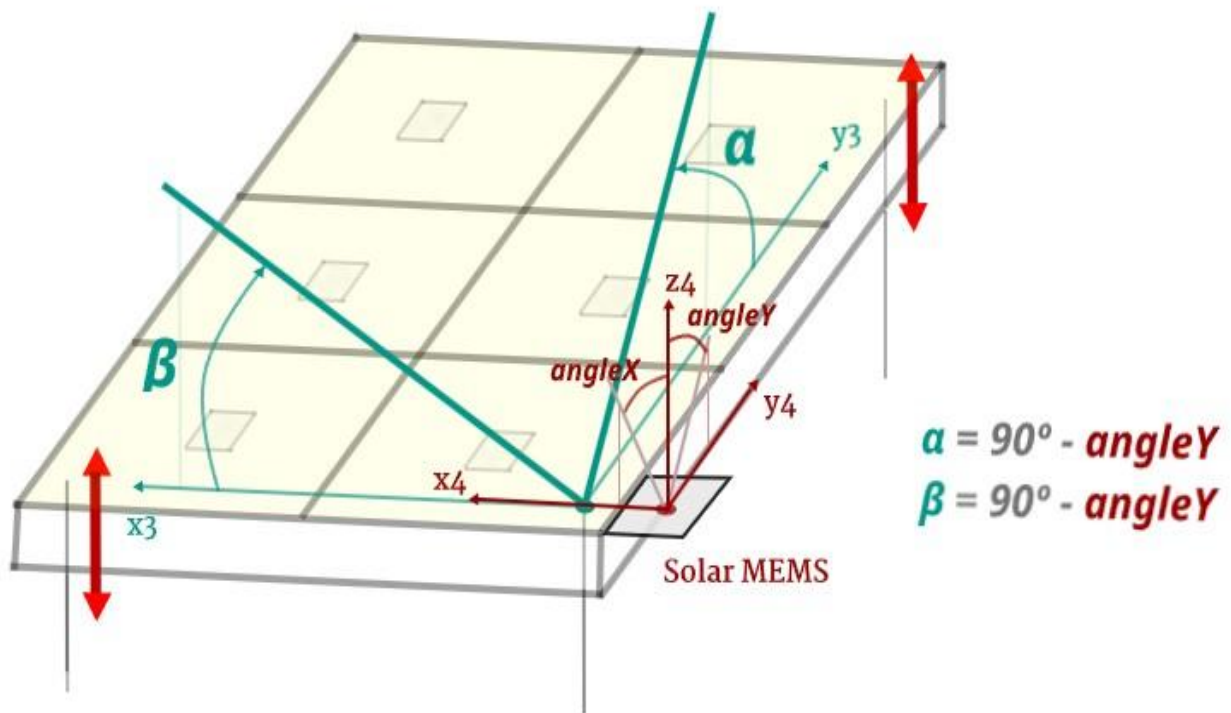


Figura 5-1 Sistemas de referencia y ángulos más relevantes para el ajuste del panel

5.1. Sensor Solar: ISS-DX Solar MEMS

El sistema de referencia {4} se trata de un sensor solar, en este caso se usará el sensor solar ISS-DX, un sensor solar digital con comunicación MODBUS, de la empresa andaluza Solar MEMS. Este sensor, como se puede apreciar en la figura anterior, mide el ángulo de incidencia de un rayo solar en dos ejes ortogonales entre sí (x e y). Presenta una muy alta precisión y sensibilidad ante cambios de orientación. Aunque para este trabajo se ha elegido este sensor concreto, no es el único que podría usarse. Hay multitud de sensores solares con similares características. En este caso, el ISS-DX es muy cómodo debido a que da directamente la descomposición en ángulos ortogonales del ángulo de incidencia.

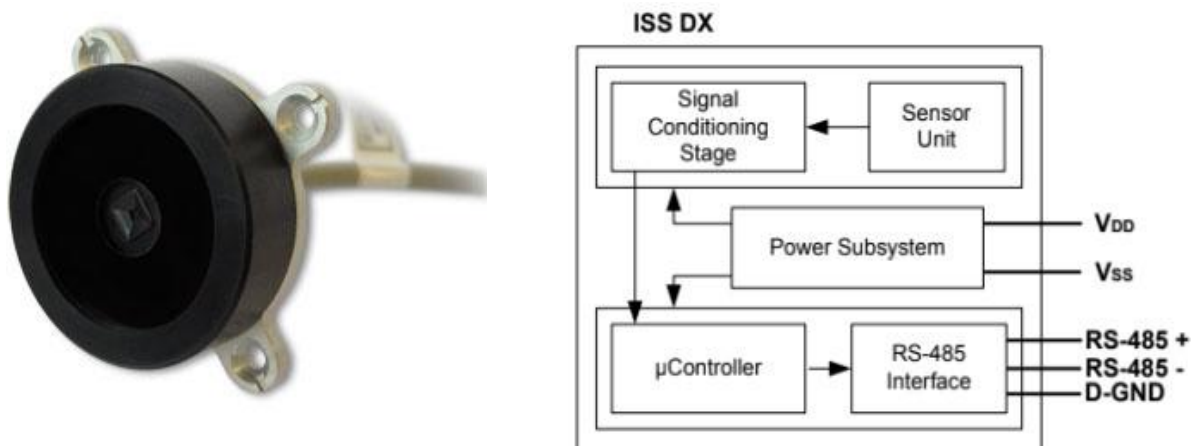


Figura 5-2 Sensor solar ISS-DX de Solar MEMS

El detector del sensor se divide en cuatro cuadrantes como se ve en la imagen siguiente. El rayo solar entrará por una especie de orificio llamado ventana e incidirá con más o menos intensidad en uno de los cuadrantes. La precisión del sensor es inversamente proporcional a lo que se conoce como campo de visión (FOV, por sus siglas en inglés), es decir, a menor campo de visión, mayor precisión en la medida. En este caso nuestro sensor solar tendrá un campo de visión de 10° , o lo que es lo mismo, su cono de apertura tendrá un ángulo máximo de 10° . Esto último quiere decir que el rayo incidente podrá tener como máximo una amplitud de 5° respecto al eje z .

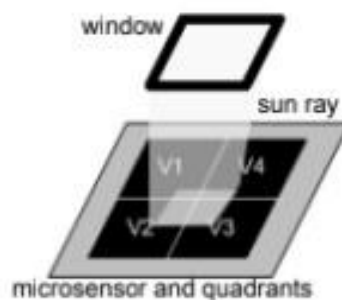


Figura 5-3 Cuadrantes del sensor ISS-DX

El sensor solar, que tiene una resolución de la radiación de 1 W/m^2 y una radiación máxima incidente de 1200 W/m^2 , presenta las siguientes características generales.

Parameter	D5	Unit
Sensor type	2 axes	-
Field of view (FOV)	10	°
Accuracy	< 0,1	°
Precision	< 0,005	°
Average consumption	33	mA
Dimensions		
Diameter	80	mm
Height	27	mm
Weight	100	g
Level of protection	IP65	

Tabla 5-1 Características generales del sensor

El sistema de referencia {4} es el que se muestra en las siguientes imágenes. Este sensor irá anclado al panel de tal manera que todos los ejes coordenados de {3} y {4} sean paralelos (independientemente si coinciden x con y , por ejemplo).

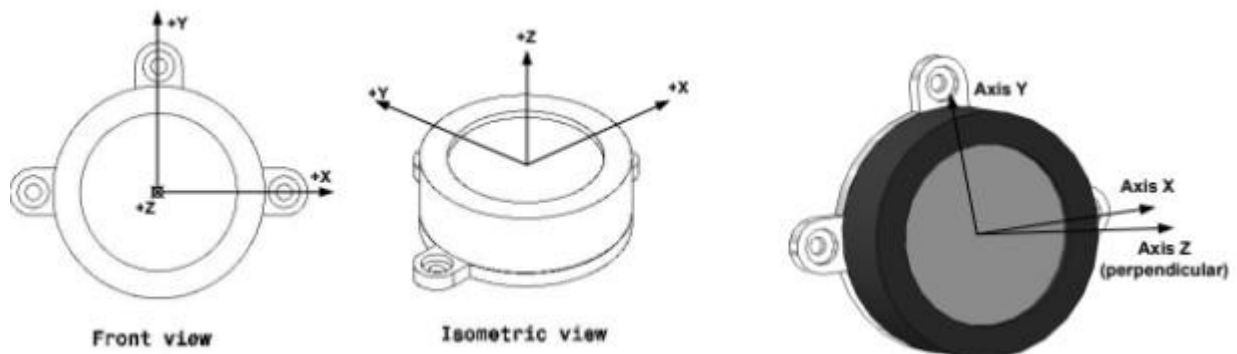


Figura 5-4 Sistema de referencia del sensor: {4}

El ángulo con que los rayos solares inciden en el fotoreceptor del sensor se divide en dos, $angleX$ y $angleY$. Estos dos ángulos son los que separa a las rectas imágenes en el plano X y plano Y respecto al eje perpendicular Z. La precisión del sensor aumenta cuanto menor son los ángulos $angleX$ y $angleY$.

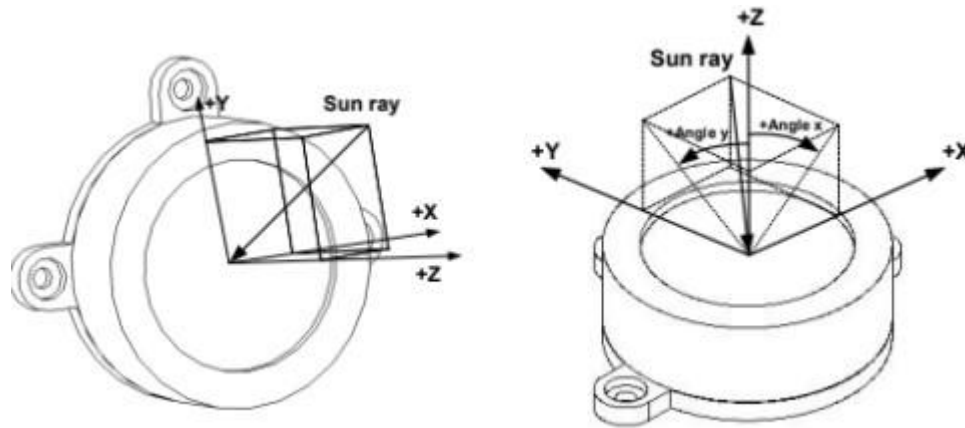


Figura 5-5 Referencia para ángulos medidos

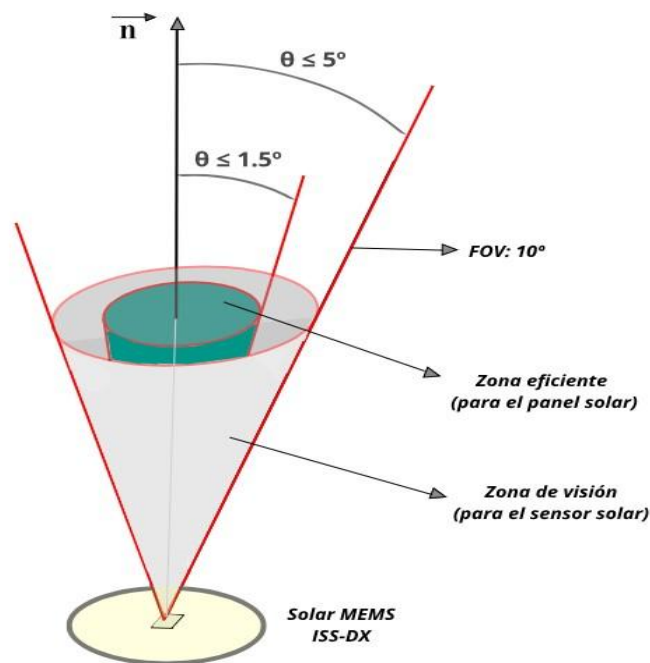


Figura 5-6 Ángulos límite

Como se ha comentado en capítulos anteriores, el ángulo de incidencia de los rayos solares en la célula solar ha de ser menor o igual a 1.5° respecto a su normal para que el panel sea eficiente energéticamente en la conversión. El sensor solar, que tiene un campo de visión (FOV) de 10° o lo que es lo mismo, un ángulo de incidencia de los rayos de 5° máximo, permite el ajuste dinámico del panel si los rayos incidentes se encuentran con una desviación entre 0 y 5° respecto a la normal. Si este ángulo es mayor, no se podrá hacer el ajuste. La figura anterior muestra estas dos zonas, la primera (en azul) muestra la zona eficiente donde la célula (la del panel solar) estaría haciendo correctamente la conversión de energía. La segunda (en gris), que también contempla la primera, representa la zona en la que el sensor solar estaría percibiendo los rayos solares. Si los rayos inciden con un ángulo mayor a 5° en la ventana del sensor solar, este no podrá mandarle la información correspondiente al PLC, enviando así algún valor de los que muestra la figura 5-9.

La información válida para el cálculo de la orientación, que se procesará en el PLC y se le enviará como pulsos a los motores son estos dos ángulos. La información se proporciona a través de una canal UART RS485 (configuración master-slave). Esta configuración le permite obtener al sistema la información requerida del ISS-DX cuando se le solicite. Se recomienda no usar una frecuencia de muestreo mayor a 10 Hz.

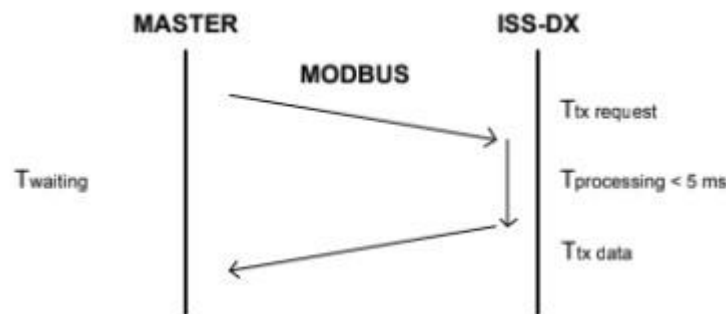


Figura 5-7 Tiempos de espera de comunicación

La siguiente información es un paquete de datos para validar las medidas. Indica si el sensor solar recibe suficiente radiación, o si detecta el Sol fuera de su campo de visión (FOV). El paquete de datos es un byte con el siguiente significado según su valor:

Value (hexadecimal)	Information	Comments
0x00	No information	
0xFF	Zero radiation	Angles values set to 0° Radiation not enough: less than 300 W/m ²
0x33	Sun is out of FOV	Angles values set to 0°
0x01	Sun is out of FOV	Angles values set to 0° Sun is to X positive reference
0x02	Sun is out of FOV	Angles values set to 0° Sun is to X negative reference
0x10	Sun is out of FOV	Angles values set to 0° Sun is to Y positive reference
0x20	Sun is out of FOV	Angles values set to 0° Sun is to Y negative reference
0x11	Sun is out of FOV	Angles values set to 0° Sun is to X positive and Y positive reference
0x12	Sun is out of FOV	Angles values set to 0° Sun is to X negative and Y positive reference
0x21	Sun is out of FOV	Angles values set to 0° Sun is to X positive and Y negative reference
0x22	Sun is out of FOV	Angles values set to 0° Sun is to X negative and Y negative reference

Tabla 5-2 Información adicional del sensor

La caja del sensor está compuesta por una carcasa superior e inferior, ambas de aluminio 6082. Tiene una buena resistencia a la corrosión. La carcasa superior tiene una capa protectora de anodizado y es negro lacado, en cambio, la carcasa inferior tiene una capar protectora de color mate.

En cuanto al cableado eléctrico de sus puertos externos y a sus dimensiones, se prestan las siguientes imágenes.

Colour	Terminal	Type	Comments
Red	VDD	Power	Power Supply
Blue	VSS	Power	Ground
Yellow	RS-485 +	I/O	Terminal + RS-485
Green	RS-485 -	I/O	Terminal - RS-485
Grey	D-GND	Communications	Digital Ground
White	-	-	Do Not connect
Brown	-	-	Do Not connect
Pink	-	-	Do Not connect

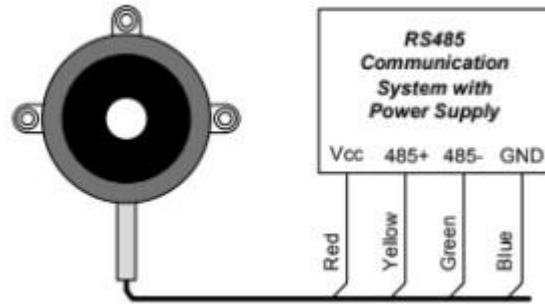


Figura 5-8 Conexión eléctrica del sensor ISS-DX

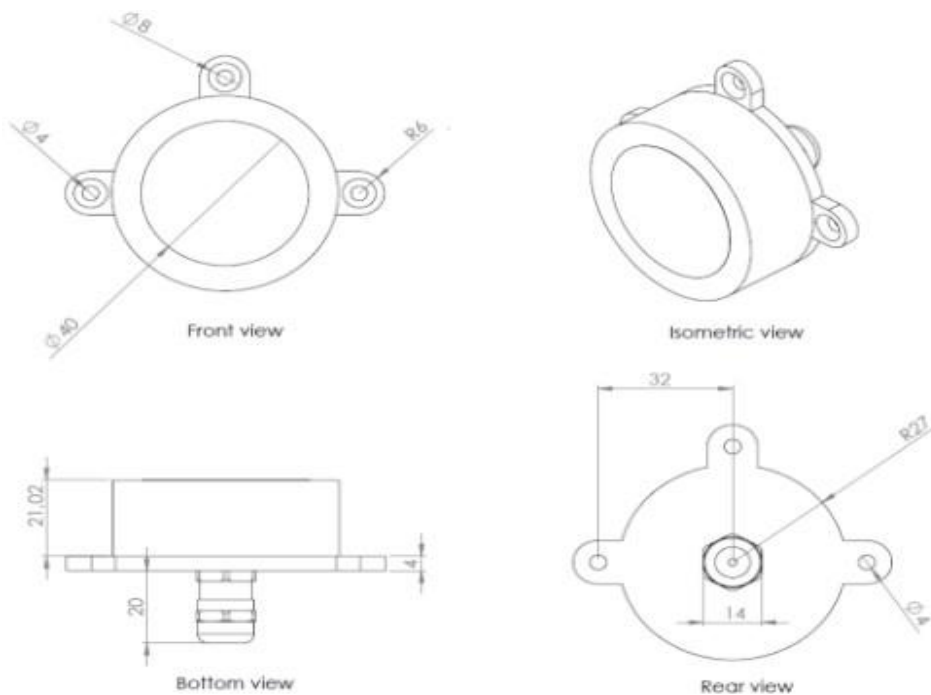


Figura 5-9 Dimensiones del sensor ISS-DX

5.2. Sensor fotoeléctrico para operación de *HOMING*

Para hacer la operación de HOMING que se detallará en el capítulo 7 se usarán dos sensores tipo barrera como el que se muestra en la figura 5-11. Estos sensores irán conectados al canal 1 de cada una de las tarjetas, a la variable correspondiente para su detección. El sensor tiene un ancho de horquilla de 20 mm, una frecuencia de conmutación de 5000 Hz, modo luz y una alta protección IP67 (resistencia al polvo y al agua). La luz transmitida es roja, sincronizada y la salida con conmutación PNP. El objeto más pequeño detectable es de 0.4 mm de diámetro, pero la placa que se usará para la detección ocupará más del ancho del sensor. Se conecta mediante tres cables, correspondiendo dos de ellos a la alimentación y otro a la propia señal de detección o sincronismo (ver figura 4-10).

Estos sensores trabajan en el rango de tensiones de 10-35 V, por lo que se tendrá que tener una fuente de alimentación externa. Recordar que también es necesario alimentar externamente el driver, por lo que sería idóneo usar la misma para los sensores y el driver.

Puede trabajar en un amplio rango de temperaturas, desde -10° a 60° , que teniendo en cuenta que estará en el exterior, es un aspecto muy a tener en cuenta.



Figura 5-10 Barrera fotoeléctrica de horquilla de Eickmann Electronik

El sensor trabajará por flancos, es decir, en operaciones de homing, cuando el sensor detecte o deje de detectar la placa, será que la posición HOME que se busca ha sido detectada. Para ello es necesario una buena fijación del sensor y de la plaquita de aluminio al perfil del seguidor y al panel solar, respectivamente.

6 CÁLCULOS Y FUNCIONAMIENTO

6.1 Cálculos

Lo que se refiere a los cálculos de este proyecto son las ecuaciones (en principio geométricas) que se tendrían que aplicar para obtener una buena orientación del panel. Se describen primero de forma general, para luego especificar para el panel de ISOFOTON.

Como es sabido, los movimientos de avanceYZ y avanceXZ son totalmente independientes el uno de otro. El primero de ellos anula la componente “y” del rayo solar (*angleY*) girando entorno al vector OX3, mientras que el segundo anula la componente “x” (*angleX*) girando entorno a OY3. El movimiento de una de las esquinas no debería afectar a la orientación de la otra debido a que cada agujero tiene cierta tolerancia, actúa como una especie de rótula sólo para valores muy pequeños de desplazamiento vertical, como es el caso de este trabajo. Trigonómicamente se observa que la relación entre los ángulos de incidencia y los avances de las diferentes esquinas tal y como están definidos los sistemas de referencia son (ver figura 6-1):

$$\text{avanceYZ} = \text{largo} \times \tan(-\text{angleY})$$

$$\text{avanceXZ} = \text{ancho} \times \tan(-\text{angleX})$$

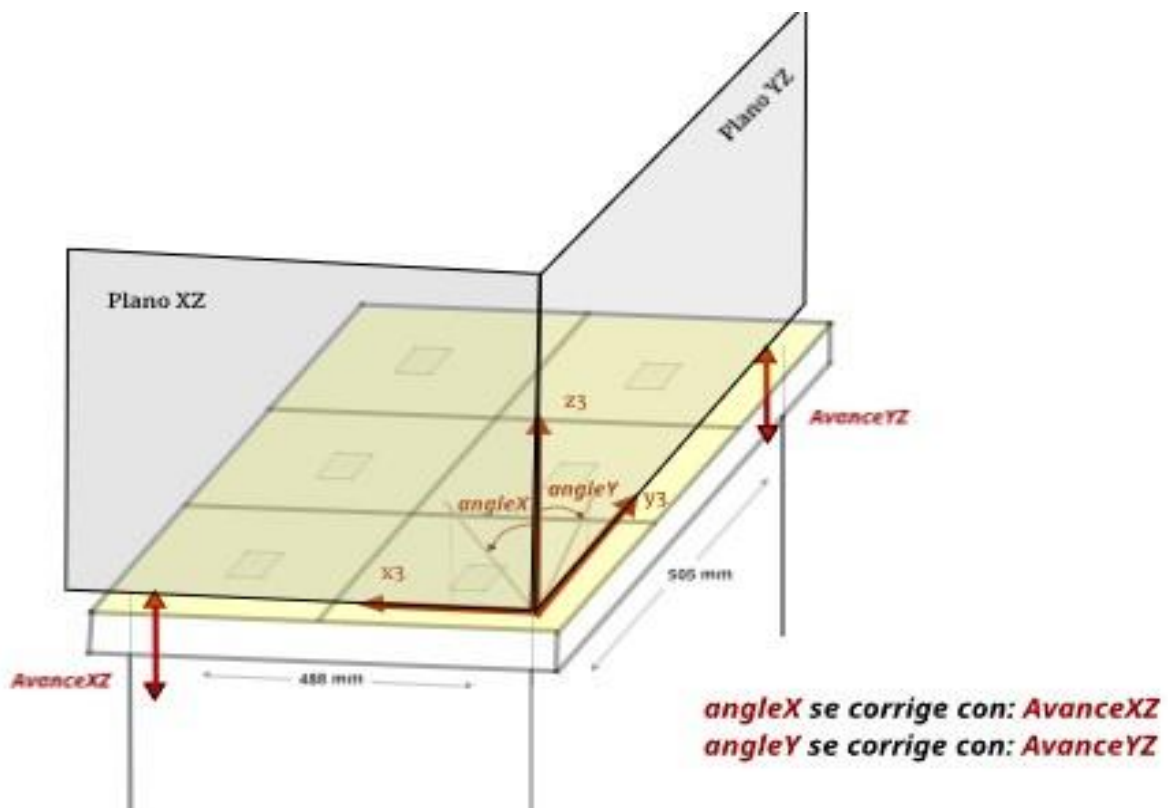


Figura 6-1 Panel con ángulos y avances

Estos avances hay que traducirlos en pulsos de motor. Los motores paso a paso que se usarán tienen un paso de 1.8 grados por pulso. Es decir, en una vuelta completa se tendrán 200 pulsos, y como el avance del tornillo (que en realidad lo avanza el panel) es de 12.5 mm por vuelta, la cantidad de pulsos necesarios a enviar al driver de los motores para obtener el avance dado serían:

$$pulsoYZ = \frac{200 \times avanceYZ}{12.5}$$

$$pulsoXZ = \frac{200 \times avanceXZ}{12.5}$$

Juntando los dos conjuntos de ecuaciones anteriores queda la cantidad de pulsos necesarios en función del ángulo de incidencia de una de las dos coordenadas. Esto es:

$$pulsoYZ = \frac{200 \times largo \times \tan(-angleY)}{12.5}$$

$$pulsoXZ = \frac{200 \times ancho \times \tan(-angleX)}{12.5}$$

Para este proyecto concreto, con una dimensiones entre tornillos de 500x488 mm, se obtiene la relación entre los pulsos de motor y el ángulo de inclinación de las componentes en las que se divide el rayo solar en el plano XY e YZ.

$$pulsoYZ = 8080 \times \tan(-angleY)$$

$$pulsoXZ = 7808 \times \tan(-angleX)$$

Los pulsos pueden ser positivos o negativos según como estos están definidos en las ecuaciones anteriores. Que puedan ser positivos o negativos es necesario para saber la dirección en la que girará el motor, aunque al driver del motor no tiene sentido que le lleguen pulsos negativos, por lo que por programa habrá que sacar el valor absoluto de los mismos y enviar dicha cantidad al driver. El giro en un sentido u otro se hará con otra variable. Los pulsos que hacen al motor girar en sentido antihorario harán al panel moverse hacia abajo (el tornillo se introduce más dentro del agujero), viceversa

El panel, como se ha explicado en capítulos anteriores, tiene un FOV de 3°, es decir, de 1.5° respecto a su normal. Como se comentará en el siguiente capítulo, el agujero del tornillo en el panel tiene una longitud de 20 mm, ± 10 mm si el origen está en medio del agujero (HOME) (ver figura 7-3.). Según los cálculos anteriores, para el ángulo límite de 1.5° se tendría un avanceYZ (por ejemplo) de -13.22 mm, pasando del límite máximo teórico de los 10 mm. Por ello, se parte en las siguientes tablas que relacionan ángulos, avances y pulsos de motor se parte de 1.2°, que es el primero que se saldría del rango de ángulos válidos. El rango válido para ambas tablas será de [1.1°, -1.1°]. Se han descrito únicamente los ángulos positivos, ya que la tabla quedaría exactamente igual para los negativos, haciéndose en este caso el avance y los pulsos (dirección) positivos.

<u><i>AngleY (°)</i></u>	<u><i>AvanceYZ (mm)</i></u>	<u><i>PulsosMotorYZ</i></u>
1.2	-10.57	-169
1.1	-9.69	-155
1	-8.81	-141
0.9	-7.93	-127
0.8	-7.05	-113
0.7	-6.17	-99
0.6	-5.28	-84
0.5	-4.40	-70
0.4	-3.52	-56
0.3	-2.63	-42
0.3	-1.76	-28
0.1	-0.88	-14
0.0	0.00	0

Tabla 6-1 Relación entre angleY, avanceYZ y pulsosYZ

<u><i>AngleX (°)</i></u>	<u><i>AvanceXZ (mm)</i></u>	<u><i>PulsosMotorXZ</i></u>
1.2	-10.22	-164
1.1	-9.37	-150
1	-8.51	-136
0.9	-7.66	-123
0.8	-6.81	-109
0.7	-5.96	-95
0.6	-5.11	-82
0.5	-4.25	-68
0.4	-3.40	-54
0.3	-2.55	-41
0.3	-1.70	-27
0.1	-0.85	-14
0.0	0.00	0

Tabla 6-2 Relación entre angleX, avanceXZ y pulsosXZ

El tipo de avance ha de ser *REAL* (punto flotante), al igual que los ángulos. En cambio, los pulsos de motor ha pesar de que el resultado real también sea de punto flotante, ha de ser *DINT* o *INT*. Habrá que tomar la parte entera de este resultado, ya que no tiene sentido dar pulsos con decimales.

6.2 Funcionamiento general del sistema

En este apartado se pretende juntar todos los conceptos de los capítulos anteriores para explicar cual sería el funcionamiento completo del sistema de orientación de paneles.

- El sistema recibirá de alguna forma la componente imagen del rayo incidente en cada plano perpendicular al plano XY, es decir, los ángulos reflejados reflejados en los planos XZ y YZ, respectivamente. (ver figura siguiente). El canal de comunicación entre el sensor y el autómatas podrá ser mediante MODBUS, Ethernet, USB o mediante referencia dada por un operador. Estos valores de ángulos serán recibidos cada cierto tiempo, tiempo definido mediante prueba-error por un operador por pantalla.

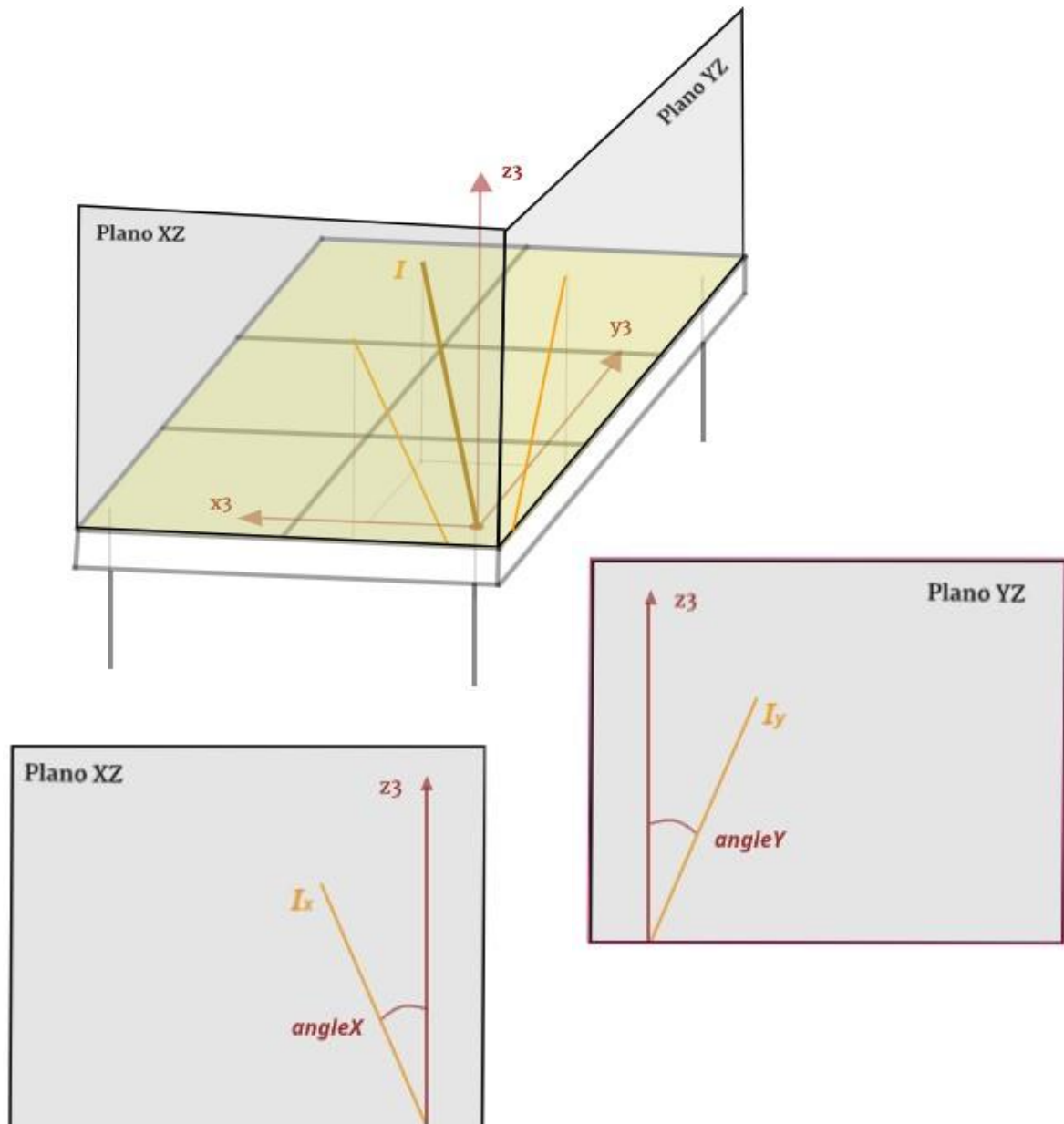


Figura 6-2 Planos y ángulos de incidencias

- Una vez se tengan los ángulos dentro de la memoria de la CPU, se le asignan las variables *angleX* y *angleY*. Se hacen los cálculos descritos en el apartado anterior para que a partir de estos ángulos hallar la referencia en posición de efector final (mm). Este valor se guarda en memoria como *RefPosicion*, que tras una serie de cálculos, se traducirá a pulsos de motor. Esta posición irá cambiando en el sentido que se requiera para hacer que tanto *angleX* como *angleY* sean hagan 0. En la siguiente figura se detalla este ajuste, que se podrá hacer cada cierto tiempo definido por el operador, ya que el Sol se mueve, y con el la orientación del seguidor y los paneles. Una vez corregido, el panel estará orientado de forma correcta con su vector normal apuntando en la dirección de los rayos solares incidentes.

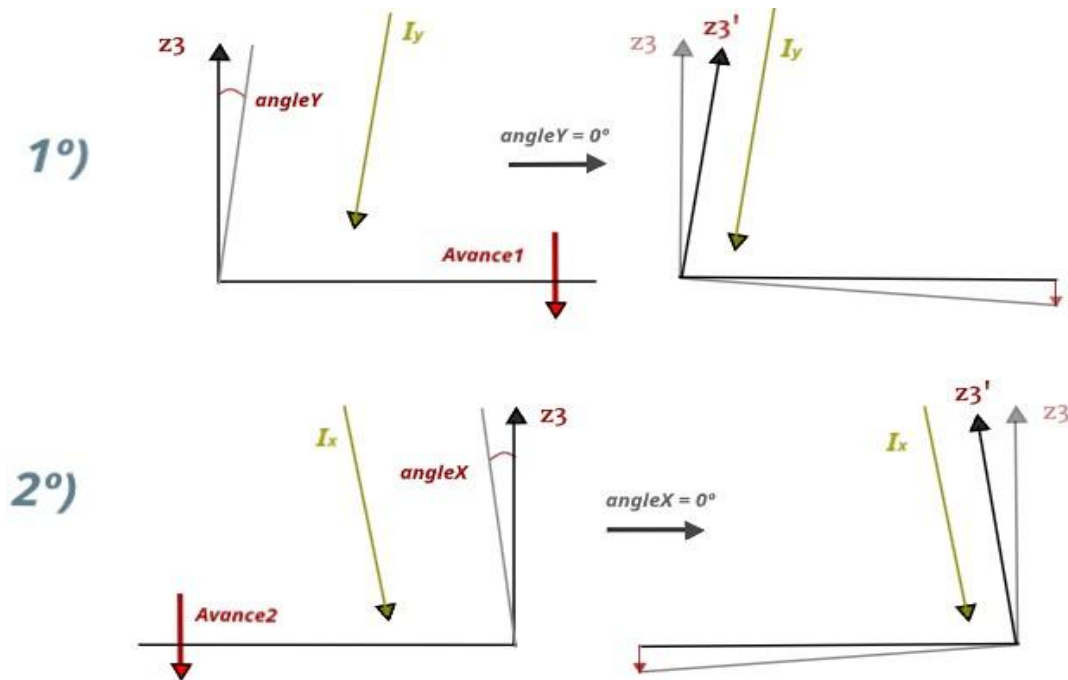


Figura 6-3 Secuencia de movimientos (z_3 : antes de ajuste / z_3' : después de ajuste)

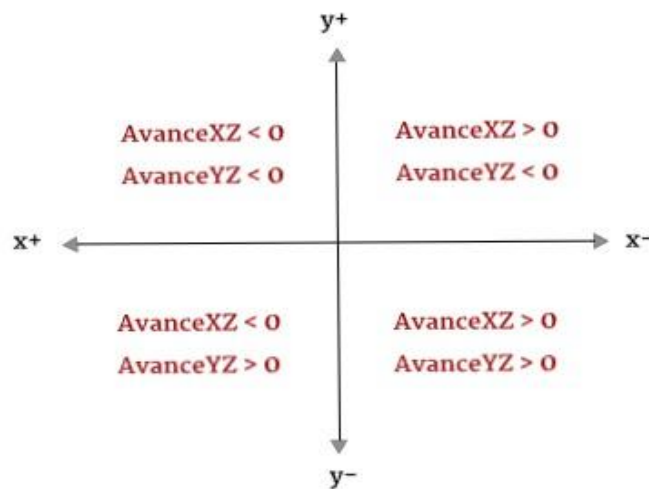


Figura 6-4 Avances según dirección de incidencia de los rayos solares

En la siguiente figura se puede distinguir entre la orientación antes y después de hacer el ajuste. Se representa una orientación tal que el rayo incidente sea el de la figura 6-2, con ángulos imagen positivos, es decir, que el rayo solar venga del primer cuadrante del plano XY del panel.

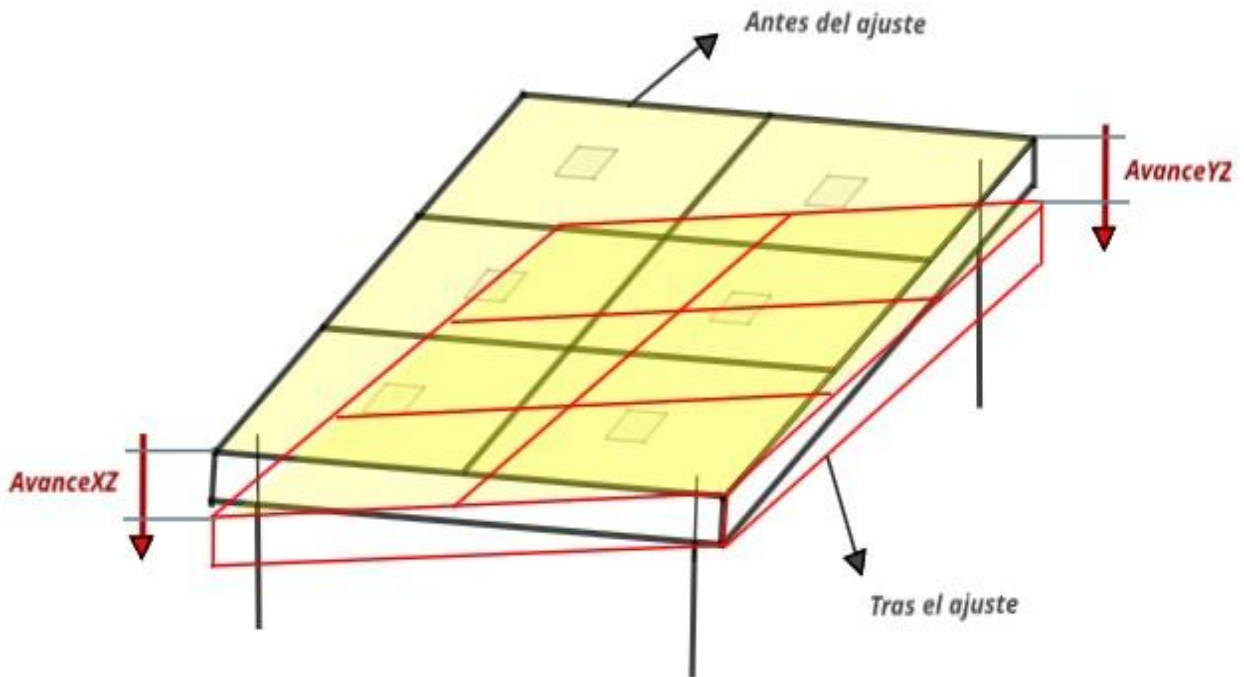


Figura 6-5 Orientación inicial y final tras ajuste, según configuración de la figura 6-1.

7 FUNCIONES PARA EL MANEJO DE MOTORES

Como se comentó en la introducción del proyecto, este consta de dos partes bien diferenciadas. Primero, la presentación del prototipo físico y segundo la programación de una serie de funciones para automatizar de cierta forma el sistema mediante el uso de PLC, motores paso a paso, etc.

La programación de las funciones que harán moverse a los motores se hará con el software Unity Pro XL, de *Schneider Electric*, un software común de programación, puesta a punto y explotación de autómatas de gama media-alta.

La programación se hará por capas o por jerarquía. Es decir, habrá cuatro funciones, unas embebidas dentro de otras, haciendo así que unas tomen cierta preferencia frente a otras. Esto se hace así para tener una buena diferenciación entre subsistemas. En este caso se tendrán los subsistemas de: motor, acoplamiento, dispositivo y panel, que se pasarán a explicar en detalle a continuación.

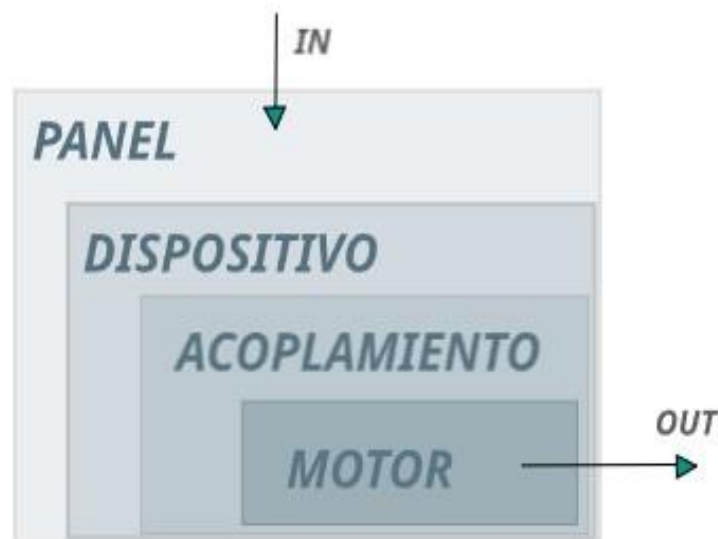


Figura 7-1 Diferentes capas jerárquicas (funciones) del programa de control

Para entender la figura anterior, se podría ver a modo de caja negra, con entradas y salidas. Dentro de dicha caja negra se tienen diferentes capas las cuales también tiene entradas y salidas, y que funcionan en cascada. En primer lugar las entradas físicas (referencia de operario en pantalla de operador, sensores) “entran” a la función PANEL, algunas necesarias para el propio funcionamiento de la función y otras para las demás funciones, lo mismo ocurre con las salidas. Así ocurre hasta llegar a MOTOR, donde las entradas a esta son las causantes del movimiento del motor después de una serie de relaciones entre ellas. Sus salidas van hacia las funciones superiores, hacia algún sistema HMI o hacia el propio driver.

A continuación se procede a explicar cada una de las funciones, con sus entradas y salidas correspondientes (algunas de ellas coincidirán):

7.1 Función *Motor*

El objetivo de esta función es generar un tren de pulsos a una cierta frecuencia al driver de los motores paso a paso, desde un punto inicial a una referencia dada (que para el motor se traducirá en pulsos). Estos trenes de pulsos o señales partirán de los canales de la tarjeta rápida EHC200 y tendrá como destino los puertos de entrada del driver. Se trabaja con posiciones absolutas (positivas o negativas) en función de la posición de partida y a la que se quiera llegar. Los motores por lo general disponen de 200 posiciones por vuelta completa de su eje, o lo que es lo mismo, un desplazamiento mínimo de 1.8° por posición o pulso. Esto dota al sistema de una gran precisión a la hora de querer obtener avances tan sumamente pequeños.

Esta función es la más primitiva de todas, y puede recibir señales de usuario mediante la función superior *ACOPLAMIENTO*. Las salidas tendrán como destino al sistema físico (driver-motor), a una pantalla de operador para su visualización en tiempo real o las funciones superiores.

En cuanto a las entradas, salidas y entradas/salidas (para la propia realimentación de la función) de la capa MOTOR se describen a continuación. Se describirán las de un sólo motor (o esquina), ya que a pesar de que pueden tomar valores distintos al mismo tiempo, tienen la misma funcionalidad. Estas variables de entrada y salida serán independientes para cada motor, no afectando las de un motor al otro.

- Entradas:

RefPosPulsoVirtual : Variable que fija la posición en pulsos a la que se pretende llegar. Puede ser tanto positiva como negativa. Este signo indica el sentido de giro del eje.

Hz¹ : Variable que indica la frecuencia de movimiento de los motores.

STOP : Variable binaria que detiene el motor en cualquier circunstancia de forma súbita, sin afectar a su funcionamiento una vez que se reanude el movimiento, es decir, se queda “congelado”.

- Salidas:

PosPulsoVirtual: Variable que da la posición en pulsos del eje del motor, hasta llegar al número de pulsos dado por *RefPosPulsoVirtual*.

ESTADO: Variable que indica el estado en el que se encuentra el motor.

0: El motor está en la referencia.

1: El motor se encuentra en movimiento.

2: Motor en STOP.

3: Herzios menor que 0.

- Entradas-Salidas: (son un tipo de estructura de entrada-salida para la propia realimentación de la función):

Canal0_PWM : Estructura del canal 0 configurado en modo generador de pulsos. De este canal saldrán las salidas del tren de pulsos y dirección para el motor.

Canal1_CONTADOR : Estructura del canal 1 configurado en modo contador libre de 32 bits. La habilitación para el motor saldrá de este canal, más una salida refleja al canal 0.

Existen más variables internas de la función, que no se explicarán individualmente pero que se podrán observar comentarios en el código de la función. Este se presenta en el ANEXO de este documento, con comentarios embebidos dentro del propio código para clarificar su uso.

¹ Para simulación se trabajará en el orden de los 10 Hz, mientras que con la tarjeta real se hará en el orden de los 50 kHz

7.2 Función Acoplamiento

Esta función es sencilla y de cierto aspecto geométrico, ya que su único propósito es pasar de pulsos de motor a unidades de ingeniería (normalmente milímetro). La relación entre estas dos variables se consigue con el avance, que en este proyecto se considerará de 1. Sirve de nexo entre la función de motor y la inmediatamente superior de dispositivo, no cambiando en ningún momento el valor de ninguna variable.

En cuanto a las entradas, salidas y entradas/salidas (para la propia realimentación de la función) de la capa MOTOR se describen a continuación. Se describirán las de un sólo motor (o esquina), ya que a pesar de que pueden tomar valores distintos al mismo tiempo, tienen la misma funcionalidad. Estas variables de entrada y salida serán independientes para cada motor, no afectando las de un motor al otro.

- Entradas:

RefPosVirtual : Variable que fija la posición en pulsos a la que se pretende llegar. Puede ser tanto positiva como negativa. Este signo indica el sentido de giro del eje.

Hz : Variable que indica la frecuencia de movimiento de los motores.

STOP : Variable binaria que detiene el motor en cualquier circunstancia de forma súbita, sin afectar a su funcionamiento una vez que se reanuda el movimiento, es decir, se queda “congelado”.

Avance: Relación entre pulsos y unidades de ingeniería (mm). En este caso valdrá 1, por lo que los pulsos serán en todo momento del mismo orden que las unidades de ingeniería.

- Salidas:

PosVirtual: Variable que da la posición en pulsos del eje del motor, hasta llegar al número de pulsos dado por *RefPosVirtual*.

ESTADO: Variable que indica el estado en el que se encuentra el motor.

0: El motor está en la referencia.

1: El motor se encuentra en movimiento.

2: Motor en STOP.

3: Hercios menor que 0.

4: Avance menor o igual a 0

- Entradas-Salidas: (son un tipo de estructura de entrada-salida para la propia realimentación de las demás funciones, ya que esta no utiliza la tarjeta):

Canal0_PWM : Estructura del canal 0 configurado en modo generador de pulsos. De este canal saldrán las salidas del tren de pulsos y dirección para el motor.

Canal1_CONTADOR : Estructura del canal 1 configurado en modo contador libre de 32 bits. La habilitación para el motor saldrá de este canal, más una salida refleja al canal 0.

Existen más variables internas de la función, que no se explicarán individualmente pero que se podrán observar comentarios en el código de la función. Este se presenta en el ANEXO de este documento, con comentarios embebidos dentro del propio código para clarificar su uso.

7.3 Función *Dispositivo*

Para esta función lo que se intenta conseguir es definir la zona de trabajo del sistema motor-acoplador, junto con los diferentes elementos auxiliares que definen ciertos límites o referencia.

Se tendrán una serie de argumentos de entrada fijos que definirán el área de trabajo del sistema completo, ya que esta función, además de incorporar las entradas de la anterior función, también incorpora dos sensores fotoeléctricos para hacer la operación de homing (resetear el sistema para volver a un punto conocido y bien definido). Los sensores se ubican en cada una de las esquinas móviles (ver apartado 5.2).

Esta función relaciona argumentos de los cuales dependerán otros distintos aguas abajo de esta función, es decir, las de las funciones *ACOPLAMIENTO* y *MOTOR*. En la figura 7-1. se observa esta jerarquía.

Será necesario saber de antemano el avance del acoplamiento intermedio entre la entrada y la salida. En este caso sabemos que entre el motor y el efector final se encuentra un mecanismo de cadena-piñón con relación de transmisión de 1:1 (mismas vueltas en la entrada que en la salida) y un tornillo de métrica 8, al cual va acoplado uno de los piñones. Este tornillo tiene un avance por vuelta de 12.5 mm. Sólo rota entorno al punto fijo del perfil del seguidor, ya que no avanza gracias al par de tuercas contrarroscaadas que posee en dicho perfil. En la siguiente figura puede observarse el acoplamiento completo, cuya relación global es de 12.5 mm lineales por 1 vuelta de motor en el caso de este trabajo. Si se traduce en pulsos de motor (200 pulsos por vuelta completa) se tiene una relación global de 12.5 mm por 200 pulsos, o lo que es lo mismo, 0.0625 mm por 1 pulso de motor. Un giro antihorario en el eje de giro del motor producirá un descenso de la esquina del panel donde se ubique este. Por contraposición, un giro horario producirá un avance de la esquina del panel.

Observar en la figura siguiente como un giro horario del eje motriz produce el cambio en la orientación del panel que se observa (de \mathbf{n} a \mathbf{n}') haciendo así que el vector normal \mathbf{n}' se haga paralelo al de incidencia de los rayos solares (\mathbf{I}).²

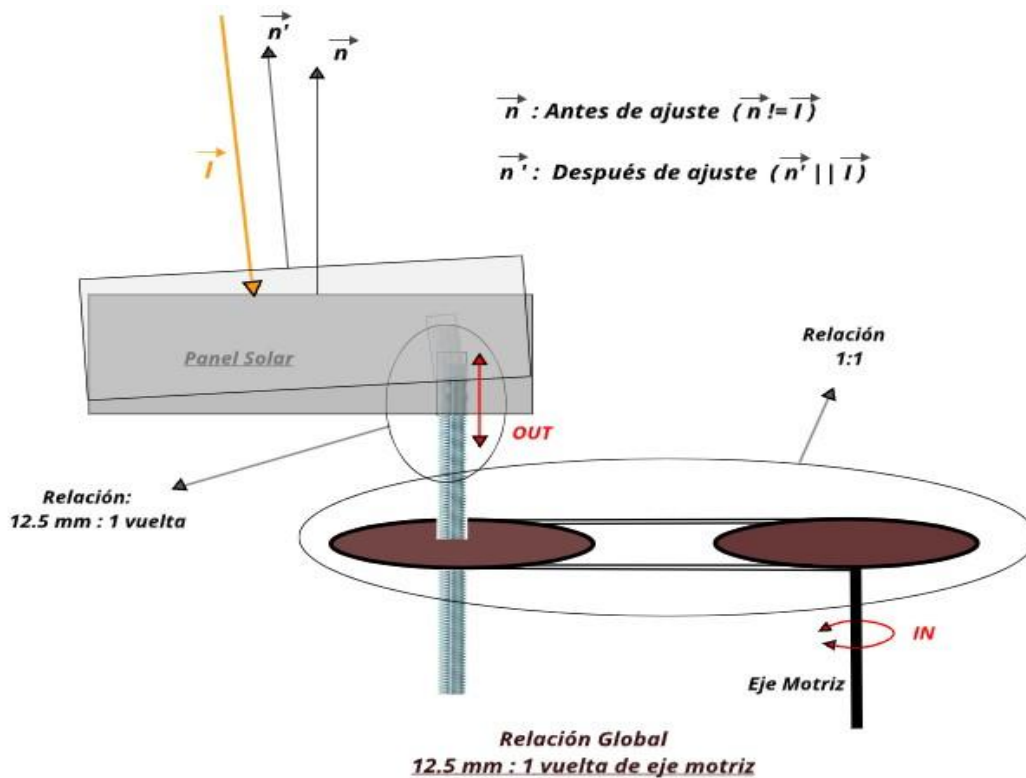


Figura 7-2 Acoplamiento del sistema

² Tener en cuenta que el sentido de avance de una tuerca sobre un tornillo es girando este último en sentido horario.

En cuanto a las entradas, salidas y entradas/salidas (para la propia realimentación de la función) de la capa *DISPOSITIVO* se tiene (se describirán las de un sólo motor, ya que al ser independientes uno de otro, serán exactamente iguales):

-Entradas:

RefPosVirtual : Variable que fija la referencia, en mm, de la posición a la que se pretende llegar con el efector final.

Avance : Relación entre pulsos y unidades de ingeniería (mm). En este caso valdrá 1, por lo que los pulsos serán en todo momento del mismo orden que las unidades de ingeniería.

Hz: Variable que indica la frecuencia de movimiento del motor.

STOP: Variable binaria que detiene el motor en cualquier circunstancia de forma súbita, sin afectar a su funcionamiento una vez que se reanude el movimiento, es decir, se queda congelado.

Carrera : Variable que se define como la longitud (en mm o pulsos) en la que el efector final (panel sobre tornillo) tiene permitido el movimiento, considerando el punto de partida como la posición *HOME*. Esta carrera se divide en dos, quedando el HOME en el centro de esta, como se observa en la figura 7-3

OffsetHOME: Variable que da los pulsos a desplazarse desde que se sincroniza el sensor HOME con la tarjeta hasta la posición nueva inicial que se quiera definir. Normalmente suele ser 0, pero se deja a elección del usuario.

-Salidas:

Posicion : Variable que da la posición en pulsos del eje del motor, hasta llegar al número de pulsos dado por *RefPosVirtual* .

ESTADO: Variable que indica el estado en el que se encuentra el motor.

0: El motor está en la referencia.

1: El motor se encuentra en movimiento.

2: Motor en STOP.

3: Herzios menor que 0.

4: Avance menor o igual a 0

11 : Si se llega a las posiciones límites de \pm Carrera/2

- Entradas-Salidas: (son un tipo de estructura de entrada-salida para la propia realimentación de la función):

Canal0_PWM : Estructura del canal 0 configurado en modo generador de pulsos.

Canal1_CONTADOR: Estructura del canal 1 configurado en modo contador libre de 32 bits. En este caso, el sensor se conectará al canal 1 de la tarjeta, asignándole la variable de la estructura *SYNC_REF_FLAG*, con la entrada física *IN_REF* (ver figura 4.10).

HOMEok : Argumento de entrada/salida que sirve para iniciar el procedimiento de búsqueda de Home en caso de desajuste ('0'), o para indicar que dicha posición ya se ha encontrado con éxito ('1'). El procedimiento del procedimiento de Homing se detalla en el apartado de MueveDispositivo del Anexo.

El código de esta función se presenta en el ANEXO de este documento, con comentarios embebidos dentro del propio código para clarificar su uso.

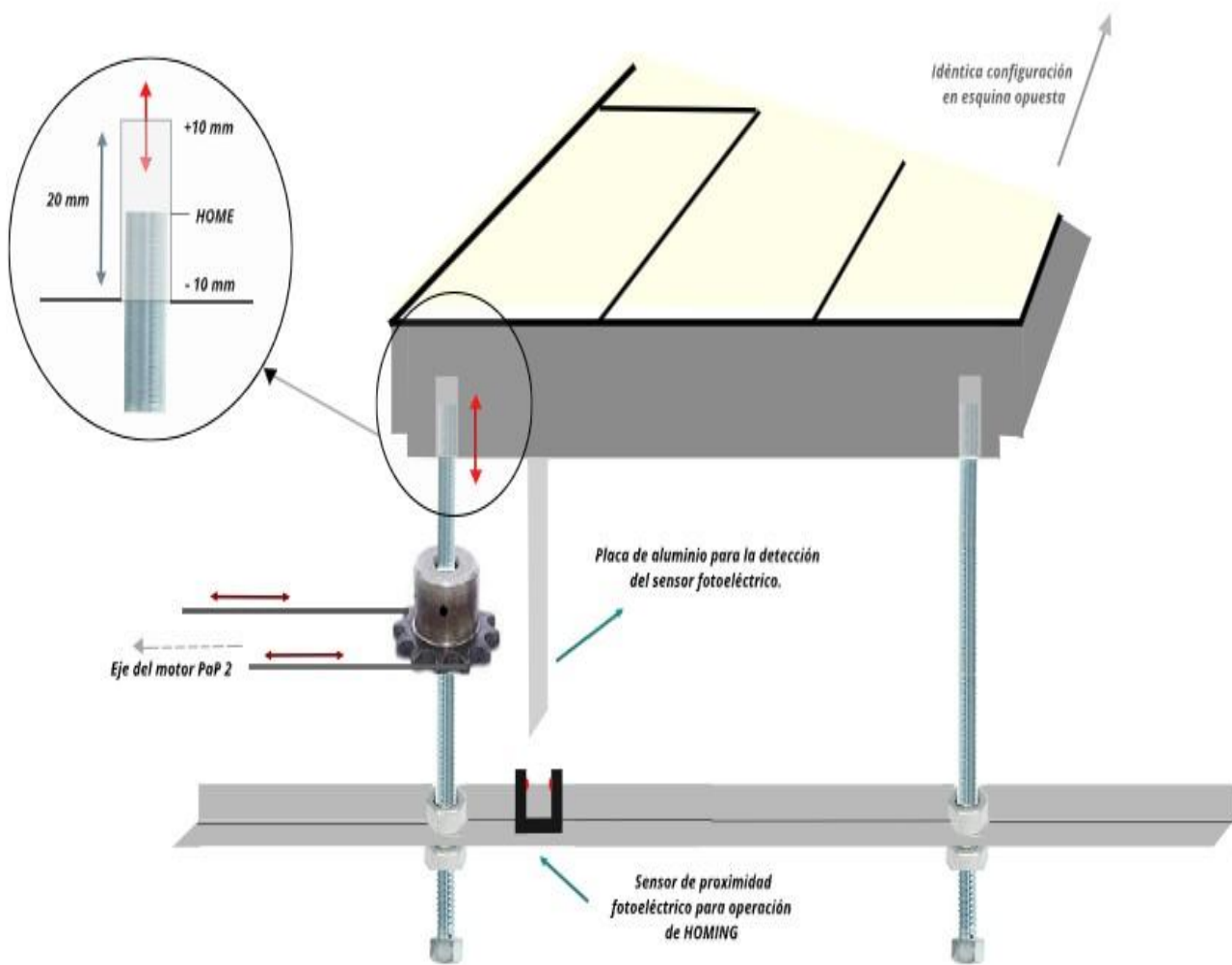


Figura 7-3 Dispositivo: límites geométricos y sensor de HOME

7.4 Función Panel

Esta es la última o más superficial de las funciones. En ella se reciben todas las variables de entrada del sistema, además, ella misma obtiene mediante ciertas relaciones otras variables que les servirán de entrada a las funciones aguas abajo. Básicamente lo que hace es pasar del ángulo (en grados) del rayo incidente en el plano correspondiente a pulsos de motor según las ecuaciones del apartado 6.1, además de pasarle argumentos de entrada a las funciones de abajo como puede ser una parada con STOP o una búsqueda de home con HOMEOK.

-Entradas:

Avance : Relación entre pulsos y unidades de ingeniería (mm). En este caso valdrá 1, por lo que los pulsos serán en todo momento del mismo orden que las unidades de ingeniería.

Hz: Variable que indica la frecuencia de movimiento del motor.

STOP: Variable binaria que detiene el motor en cualquier circunstancia de forma súbita, sin afectar a su funcionamiento una vez que se reanuda el movimiento, es decir, se queda congelado.

Carrera : Variable que se define como la longitud (en mm o pulsos) en la que el efector final (panel sobre tornillo) tiene permitido el movimiento, considerando el punto de partida como la posición *HOME*. Esta carrera se divide en dos, quedando el HOME en el centro de esta, como se observa en la figura 7-3

OffsetHOME: Variable que da los pulsos a desplazarse desde que se sincroniza el sensor HOME con la tarjeta hasta la posición nueva inicial que se quiera definir. Normalmente suele ser 0, pero se deja a elección del usuario.

PULxRev : Pulsos de motor por revolución. Normalmente este argumento vale 200, pero según el driver del motor puede cambiar hasta 400, 600 o 1200 pulsos por revolución.

AvanceTornillo : Paso del tornillo. En este caso será de 12.5 mm lineales por revolución del tornillo.

Dist : Distancia en milímetros entre el punto fijo y el eje secundario del acoplamiento, es decir, el eje que mueve el panel hacia arriba o abajo.

Angle: Ángulo de incidencia del rayo solar reflejado en el plano XZ o YZ según corresponda. A partir de este argumento el sistema podrá ajustarse para conseguir hacer a este cero. Recordar que este ángulo ha de ser muy pequeño debido a las limitaciones de la carrera y la distancia entre el origen y el punto de avance.

AngleNeg :Variable binaria que indica si *Angle* es positivo o negativo, según la dirección de incidencia del rayo en el sistema de referencia fijado por el sensor solar.

-Salidas:

PosPulsos : Variable que da la posición en pulsos del eje del motor.

RP: Argumento de salida que da la referencia en pulsos después de hacer una serie de relaciones matemáticas con algunos de los argumentos de entrada. Ver anexo de MuevePanel y apartado 6.1

ESTADO: Variable que indica el estado en el que se encuentra el motor.

0: El motor está en la referencia.

1: El motor se encuentra en movimiento.

2: Motor en STOP.

3: Herzios menor que 0.

4: Avance menor o igual a 0

11 : Si se llega a las posiciones límites de \pm Carrera/2

- Entradas-Salidas: (son un tipo de estructura de entrada-salida para la propia realimentación de la función):

Canal0_PWM : Estructura del canal 0 configurado en modo generador de pulsos.

Canal1_CONTADOR: Estructura del canal 1 configurado en modo contador libre de 32 bits. En este caso, el sensor se conectará al canal 1 de la tarjeta, asignándole la variable de la estructura *SYNC_REF_FLAG*, con la entrada física *IN_REF* (ver figura 4.10).

HOMEok : Argumento de entrada/salida que sirve para iniciar el procedimiento de búsqueda de Home en caso de desajuste ('0'), o para indicar que dicha posición ya se ha encontrado con éxito ('1').

8 ANEXOS

8.1 Pantalla de Operador

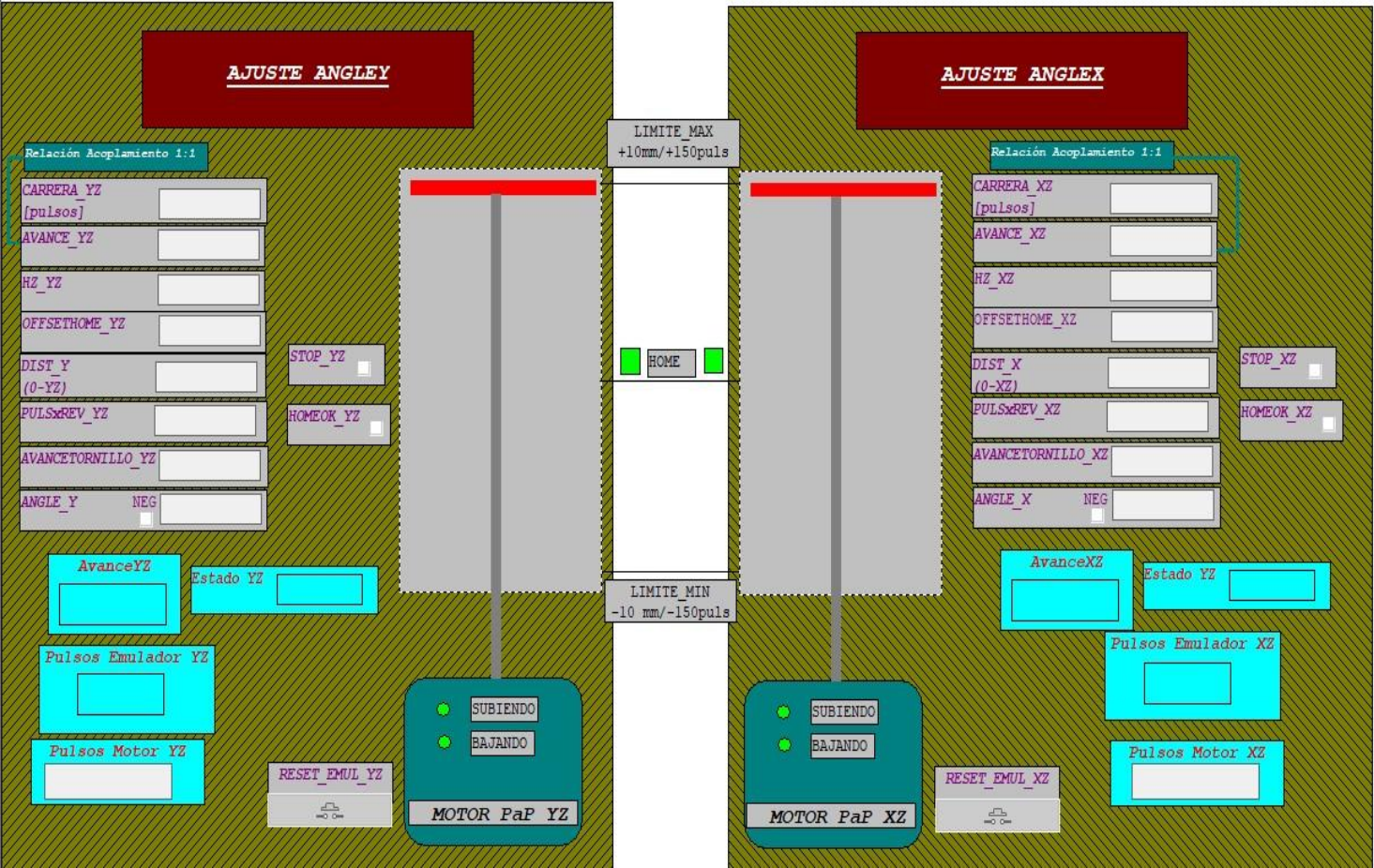
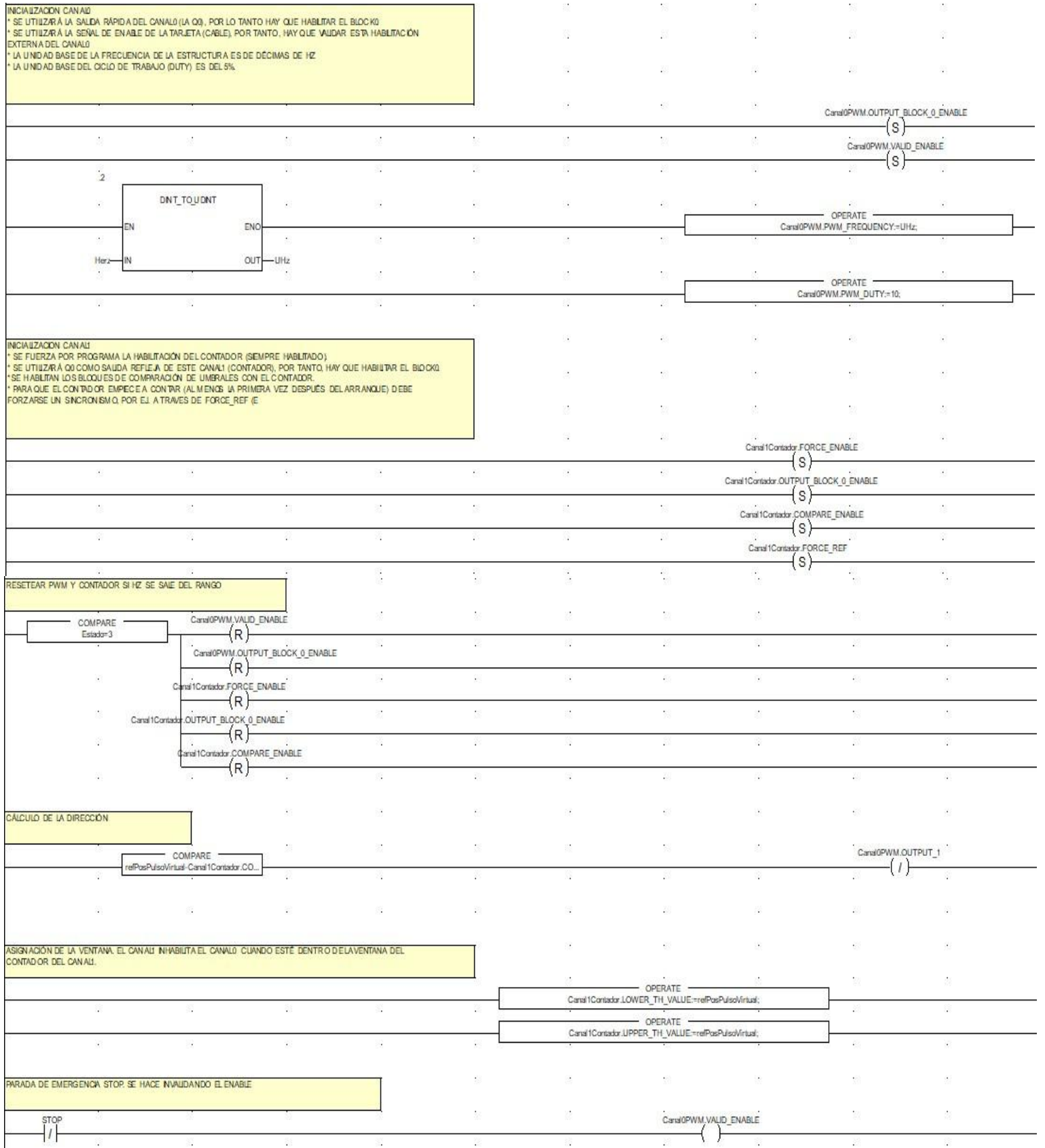


Figura 8-1 Pantalla de Operador

8.2 MueveMOTOR



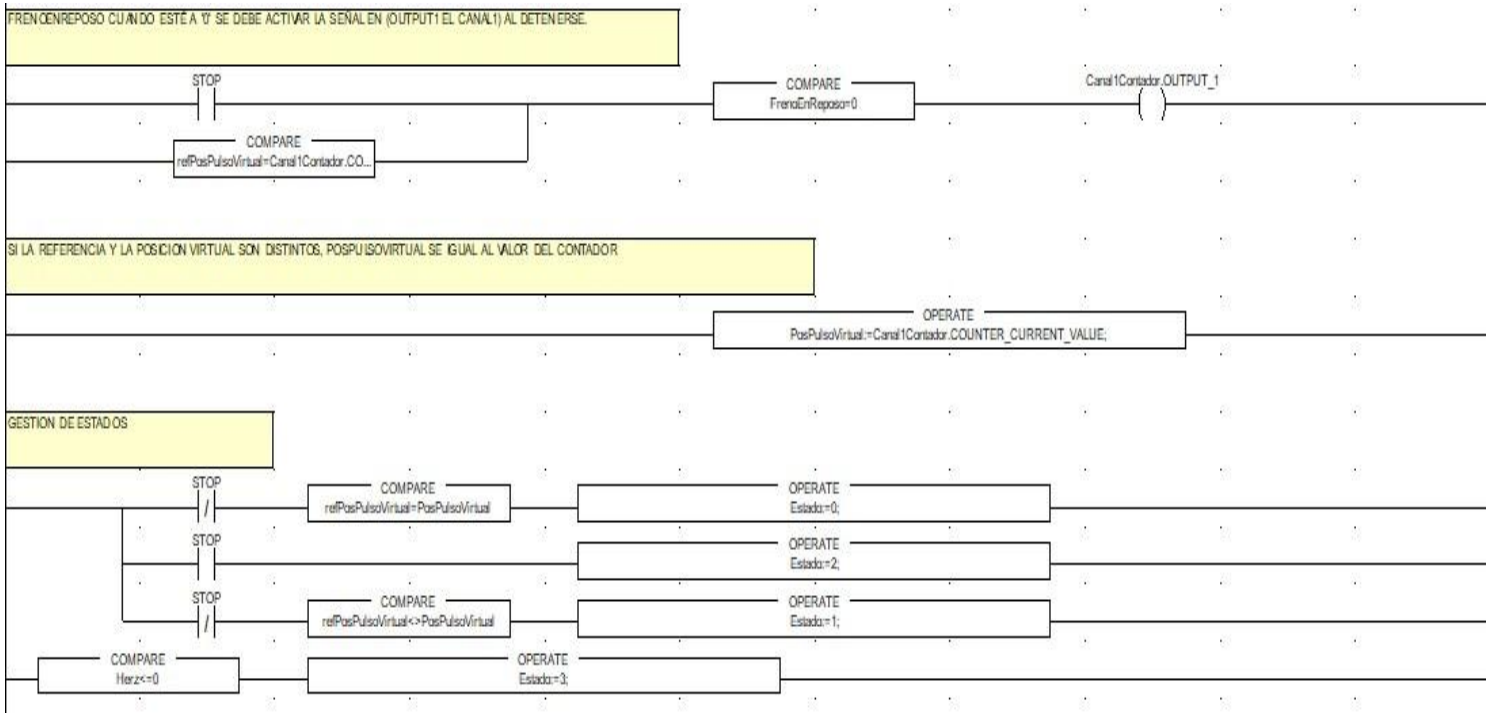


Figura 8-2 Función **MueveMOTOR**

8.3 MueveACOPLAMIENTO

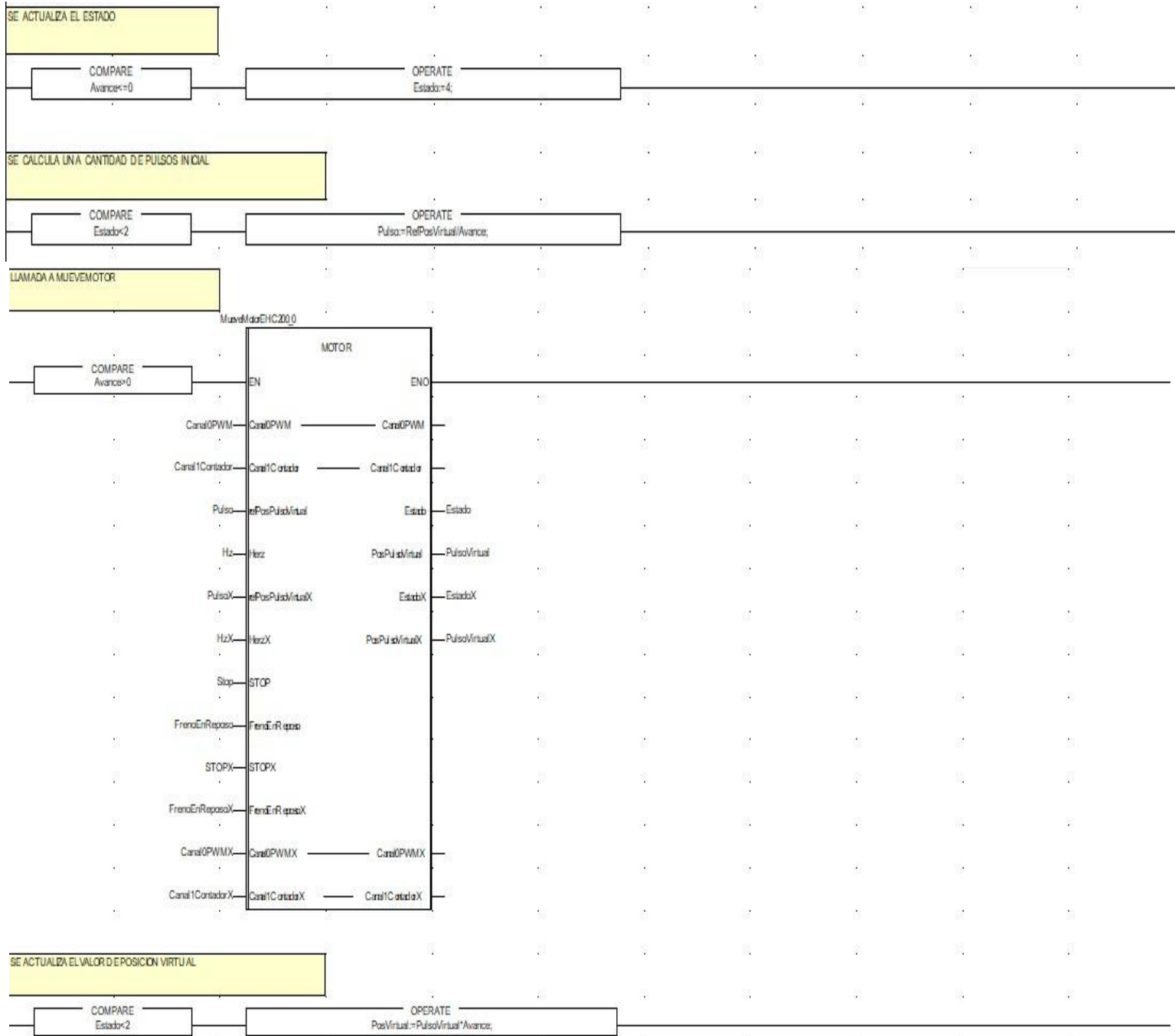
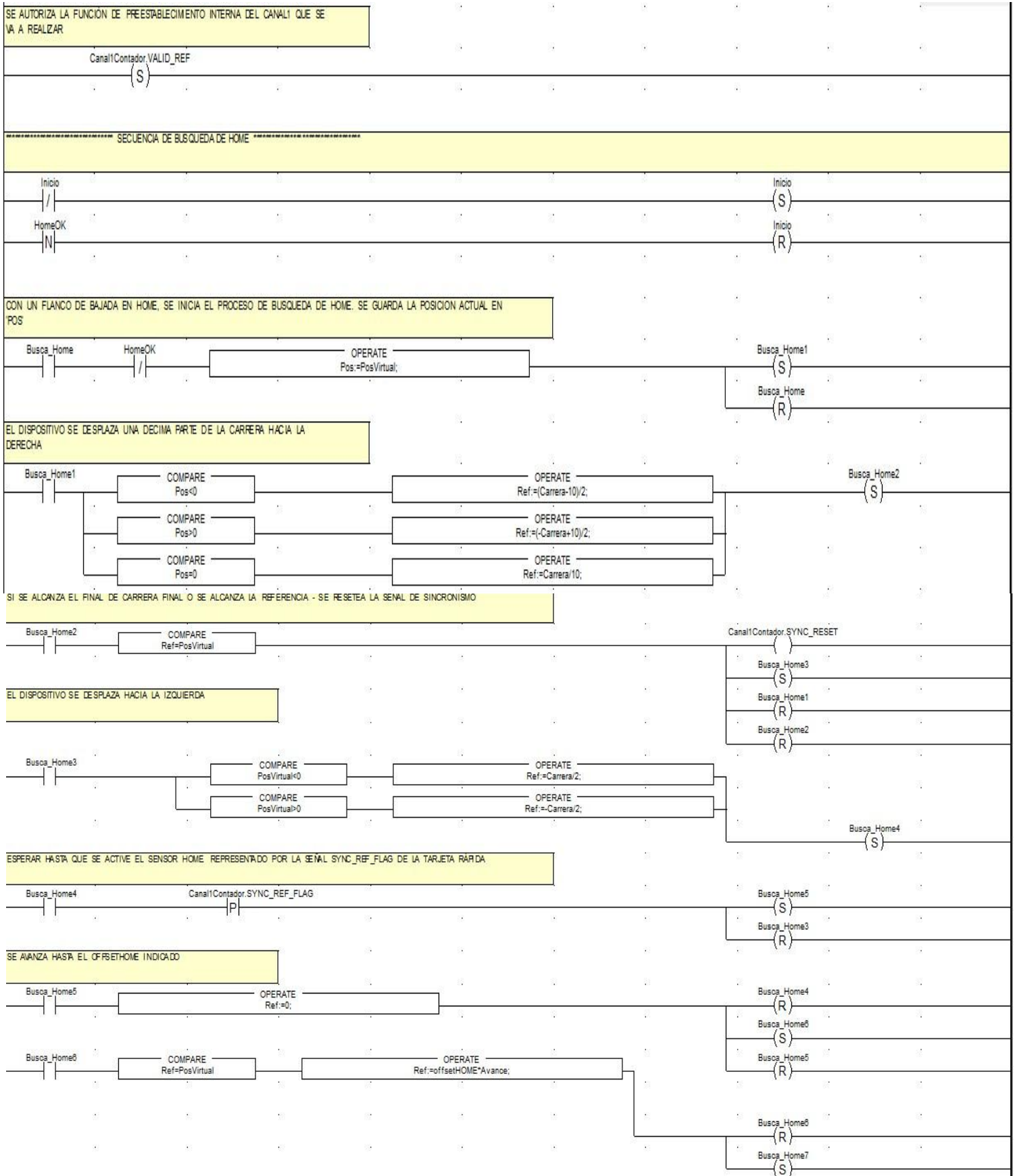


Figura 8-3 Función MueveACOPLAMIENTO

8.4 MueveDISPOSITIVO



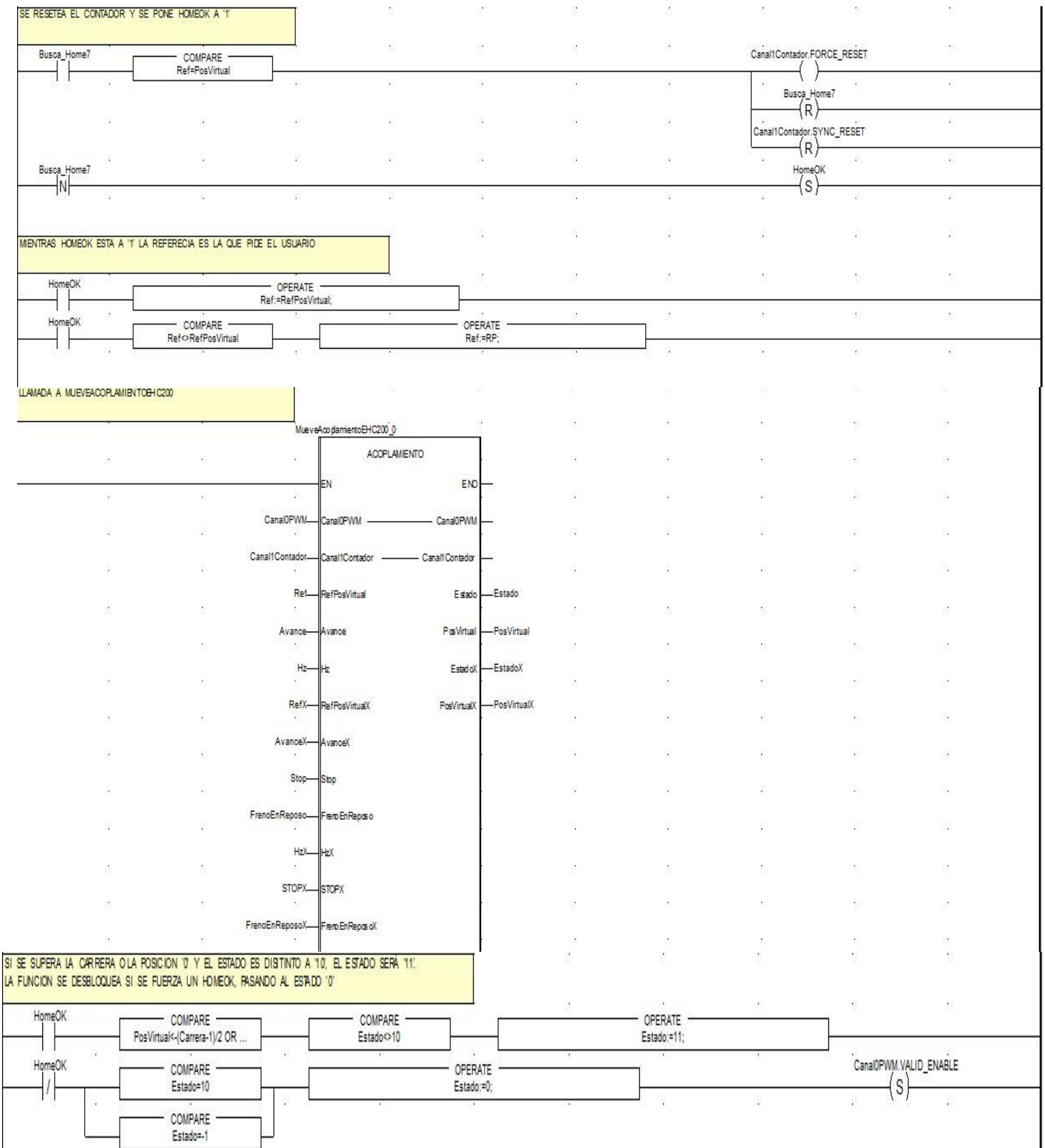
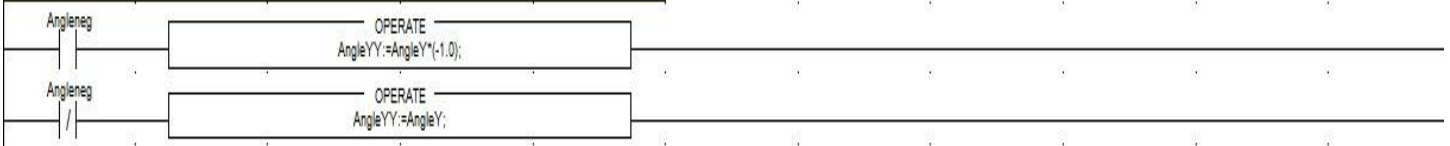


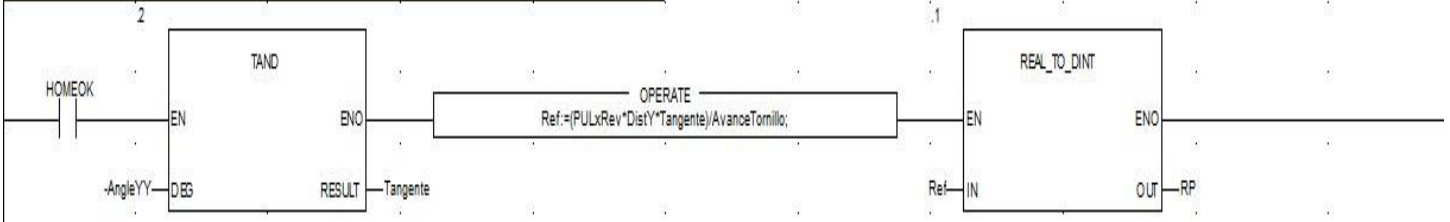
Figura 8-4 Función MueveDISPOSITIVO

8.5 MuevePANEL

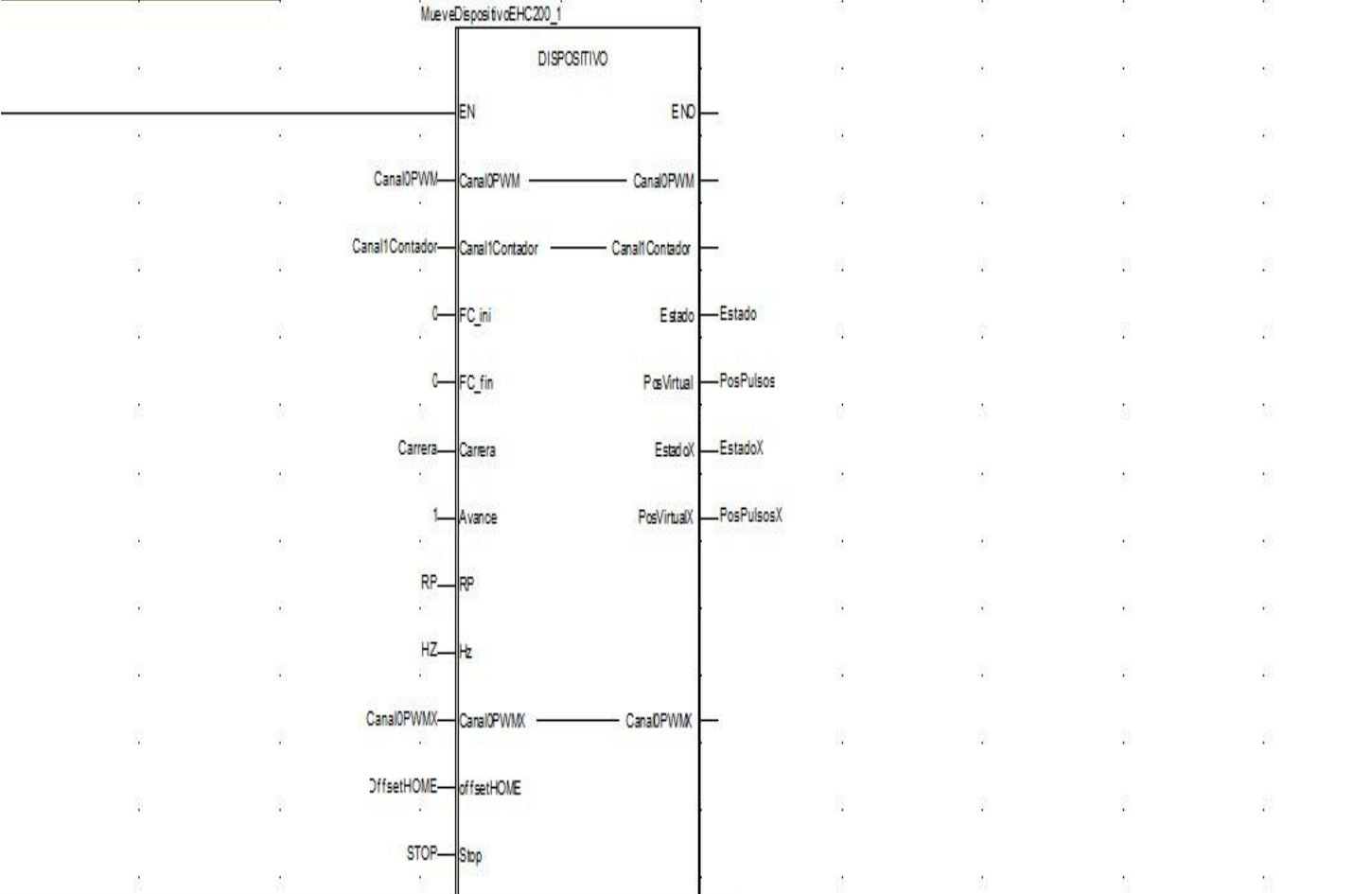
SI SE PULSA ANGLENEG, ES DECIR, SI EL ANGULO X O ANGULO Y ES NEGATIVO, EL VALOR DE ANGLEYY CAMBIA DE SIGNO



SE HACE LA TANGENTE DE -ANGLEY Y MEDIANTE UNA ECUACION SE SACA LA REFERENCIA EN PULSOS DEMOTOR A LLEGAR



LLAMADA A MUEVEDISPOSITIVO



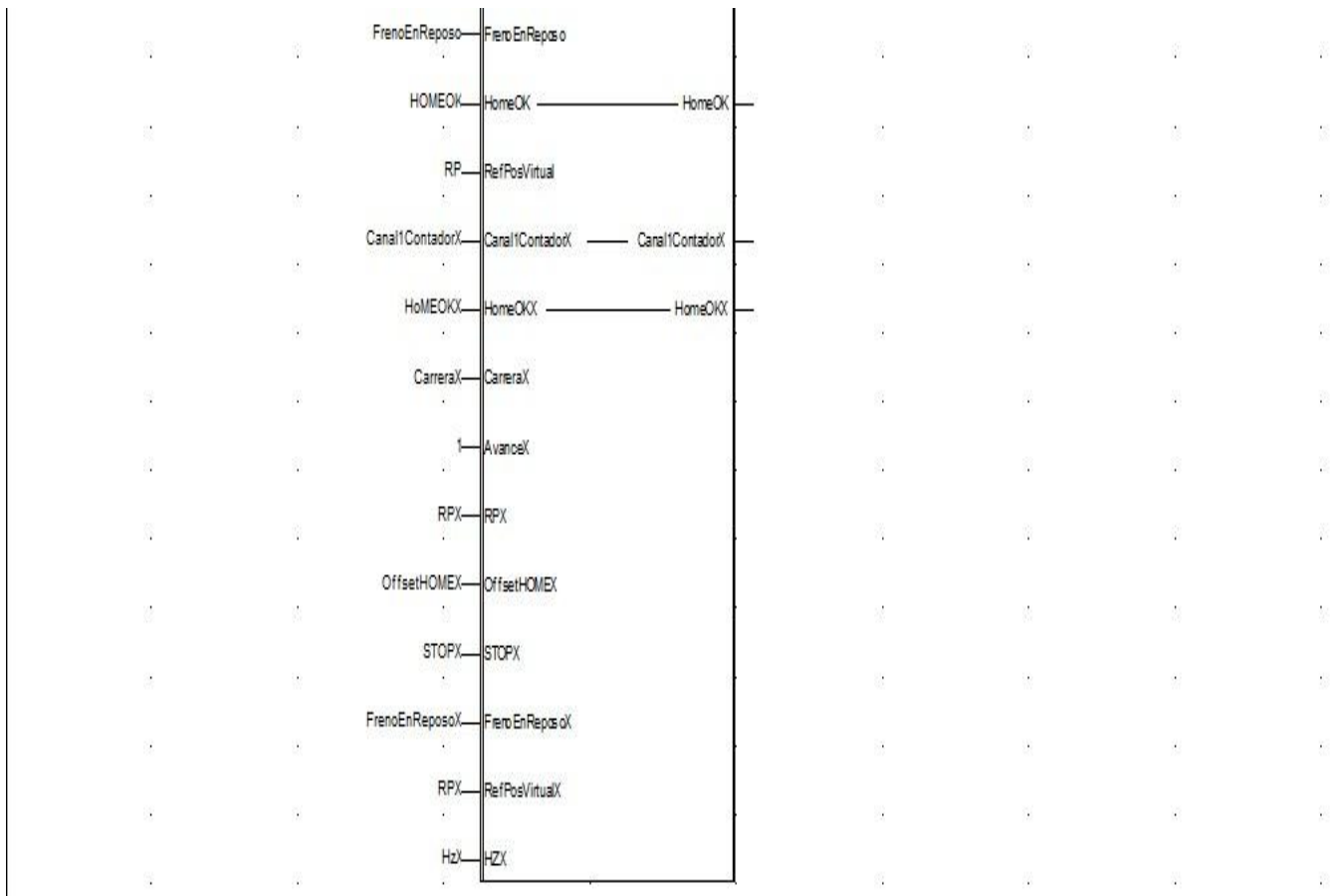


Figura 8-5 Función **MuevePANEL**

8.6 Procedimiento de Pruebas

Para este apartado es interesante observar las tablas 6-1 y 6-1, ya que se capturarán momentos para varios ángulos de entrada (tanto AngleX como AngleY), dando unos valores de salidas que se corresponderán con los valores previamente calculados de las tablas (avances y pulsos). Estas tablas están calculadas para motores con 200 pulsos por vuelta y avance de tornillo de 12.5 mm.

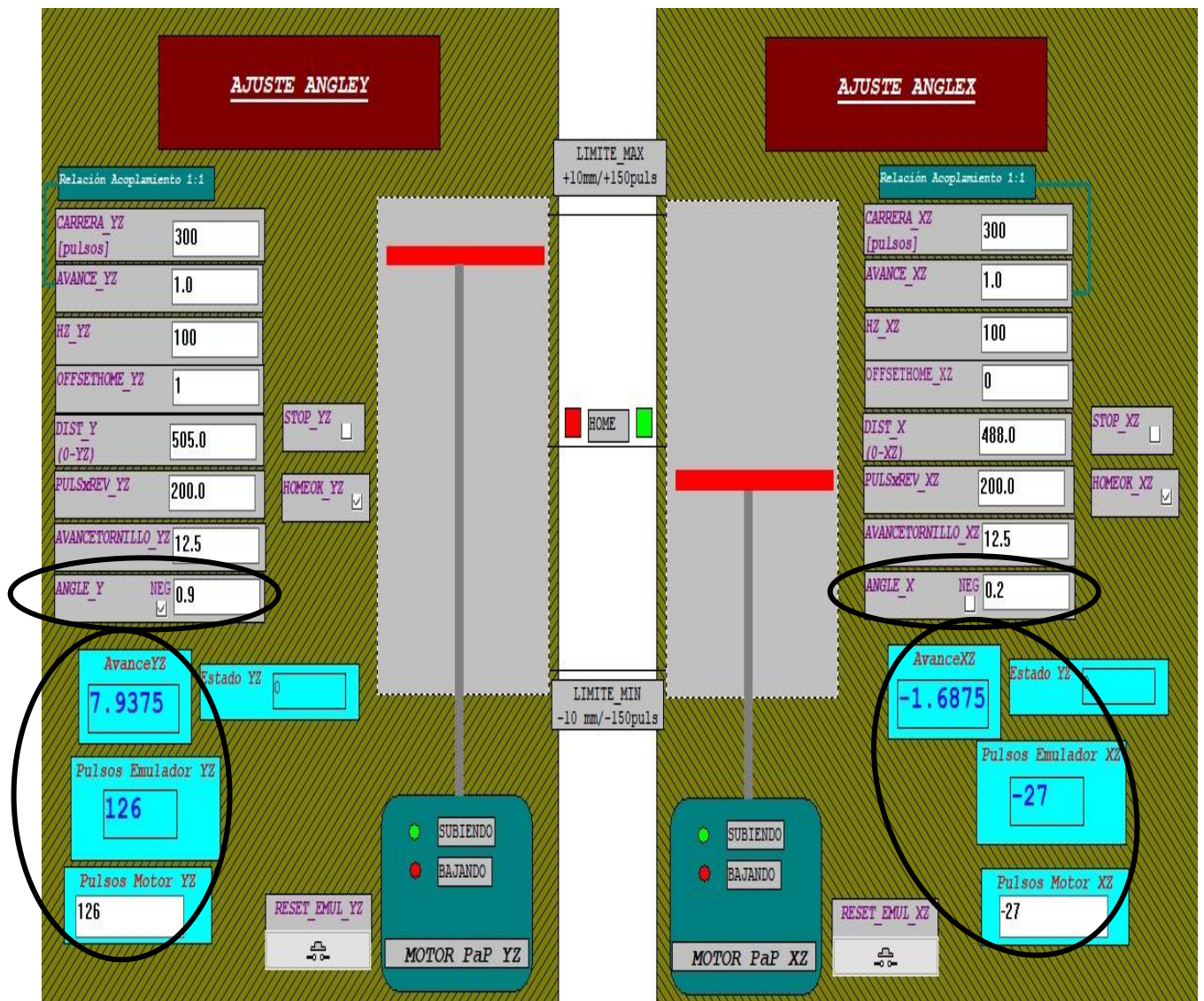


Figura 8-6 Movimientos de panel para AngleY=-0.9° y AngleX=0.2°

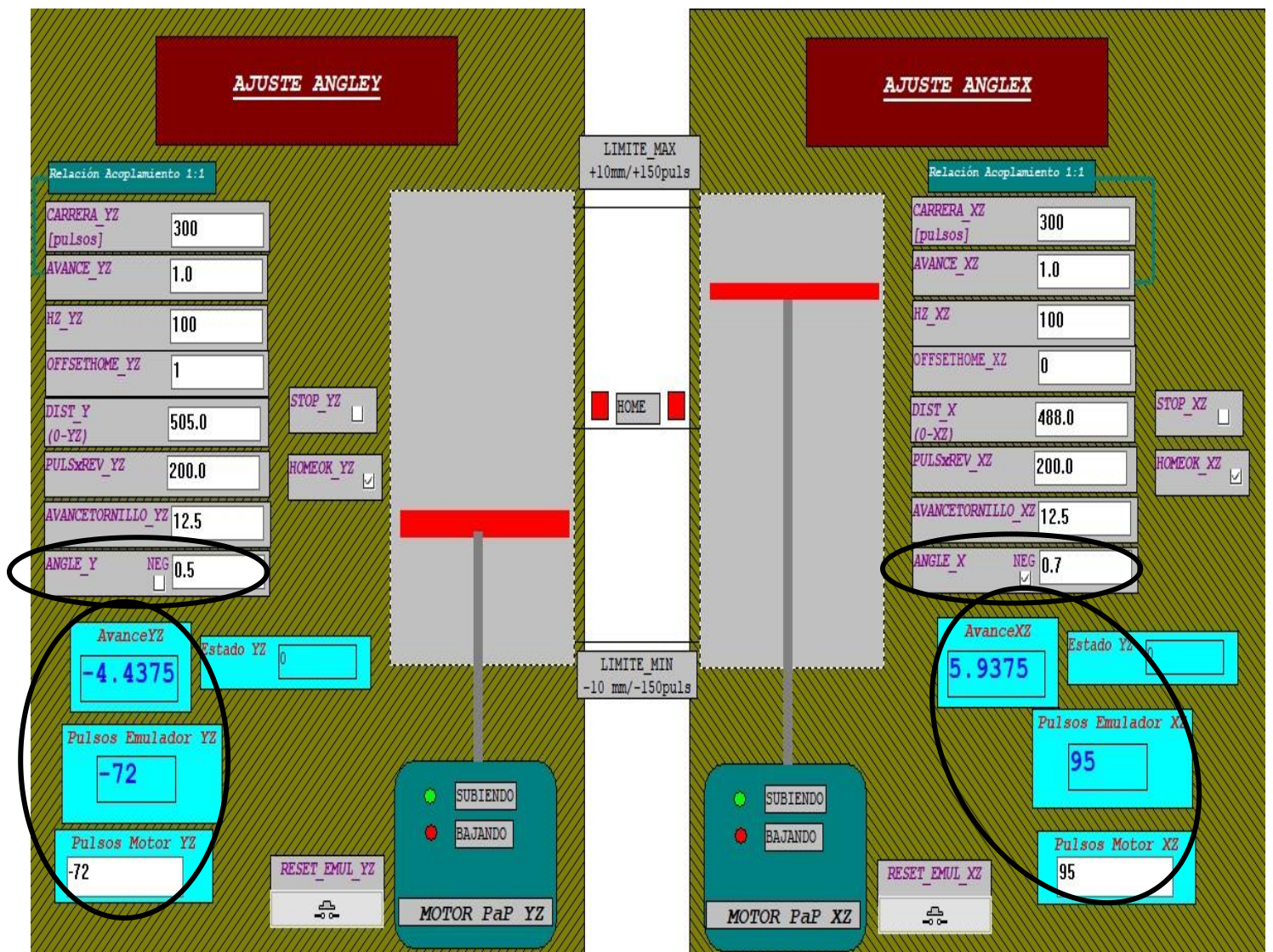


Figura 8-7 Movimientos de panel para AngleY=0.5° y AngleX=-0.7°

REFERENCIAS

- [1] SCHNEIDER ELECTRIC, Modicon M340, Automation Platform Catalog, Versión 4, 2021
- [2] SCHNEIDER ELECTRIC, Módulo EHCH200, Hoja de datos del producto, Versión 14, 2019
- [3] SOLARMEMS. ISS-DX Technical Specifications, Versión 1.15.M
- [4] L. Fernando Castaño, F. Rubio, Manuel G. Ortega, Manuel G. Satué, MODELADO DE UN SEGUIDOR SOLAR CON PANELES DE ALTA CONCENTRACIÓN, 2019
- [5] ISOFOTON, Tecnología solar de alata concentración: GEN-2, 2020. Disponible en:
http://bk.net.my/materials/isofoton/hcpv__3.pdf

