

# UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ingenierías

Departamento de Ingeniería Industrial

Ingeniería en Mecatrónica



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

**Trabajo Escrito**

**"Sistema de control de posición para concentrador solar, con retroalimentación por visión artificial de alta precisión"**

**T E S I S**

Presentada por:

**Carlos Alberto Sánchez Ortega**

Director de Tesis

**Dr. Cuitláhuac Iriarte Cornejo**

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



## Resumen

Los sistemas de disco parabólico o SDP, están compuestos de una superficie cóncava capaz de concentrar la radiación solar sobre el punto focal geométrico de sus superficies. En dicho punto geométrico es situado un sistema capaz de aprovechar la energía solar presente. El desempeño de estos sistemas en el aprovechamiento de la energía solar depende del ángulo de incidencia de los rayos solares en las superficies parabólicas, debido a esto, el sistema de control cobra una gran relevancia a la hora de mantener al equipo en un ángulo adecuado el cual genere la mayor cantidad de energía según el momento del día.

Para ello es necesario un sistema de control adecuado, el cual sea capaz de realizar un seguimiento solar de alta precisión. Este documento presenta el desarrollo de un sistema de control basado en lenguaje de escalera y SCL (siglas en inglés para lenguaje estructurado de control) dentro de un PLC (siglas en inglés para controlador lógico programable) basado en un sistema de relevadores lógicos y un sistema de visión para la realización de seguimiento solar.

El concentrador solar presentado en este proyecto consta de una estructura metálica con dos superficies cóncavas capaces de concentrar la radiación solar incidente en una celda fotovoltaica 1000 veces y aprovechar este alto flujo radiactivo obtenido, además, este concentrador solar cuenta con un sistema de dos ejes (elevación y acimut) los cuales son movidos por dos motores de corriente directa, controlados por un PLC Siemens S7-1200, donde se desarrolló un sistema de control enfocado al seguimiento solar que cuenta con retroalimentación por medio de encoder montado en cada motor y un sistema de visión artificial. Dicho sistema de visión consta de una cámara montada en un sistema de Raspberry PI 3 comunicado al PLC por medio del protocolo RS485.

El sistema de control desarrollado para este equipo proporciona 3 modalidades de movimiento: Manual, Semiautomático y Automático, donde, en este último es presentado el seguimiento solar por dos tipos distintos de control: código SPA (siglas en inglés para algoritmo de posición solar) y cámara de visión, obteniendo en este último un error máximo de seguimiento solar de 1 mrad.

## Abstract

Parabolic disk systems or PDS consist of a concave surface capable of concentrating solar radiation on their geometric focal points. At this geometric point, a system capable of taking advantage of the solar energy present is located.

The performance of these systems in the use of solar energy depends on the angle of incidence of the solar rays on the parabolic surfaces, due to this, the control system is of great relevance when it comes to keeping the equipment at an appropriate angle which generates the greatest amount of energy every point in time during the day.

In order to achieve that, an adequate control system capable of high-precision solar tracking is necessary. This document presents the development of a control system based on ladder and structured control language (SCL) on a programmable logic controller (PLC) based on a logic relay system and a vision system for solar tracking.

The system presented in this project consists of a metallic structure with two concave surfaces capable of concentrating 1000 times the incident solar radiation on a photovoltaic cell and thus taking advantage of the high radiant flux obtained. In addition, this solar concentrator has a two-axis system (elevation and azimuth) that relies on two direct current motors, controlled by a Siemens S7-1200 PLC, and for which a control system focused on solar tracking was developed using an encoder mounted on each motor and an artificial vision system as feedback the vision system consists of a camera mounted on a Raspberry PI 3 system and communicates to the PLC using RS485 protocol.

The control system developed for this equipment allows 3 modes of operation: Manual, Semiautomatic and Automatic, where, for the latter, two different solar tracking control techniques are presented: solar position algorithm (SPA) code and camera vision, obtaining an error in the latter 1 mrad maximum solar tracking.

## Agradecimientos.

Este trabajo de tesis recibió apoyo del Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética a través del Proyecto 207450, “Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol)” y particularmente dentro del Proyecto Estratégico No. **P53**

**“Desarrollo de planta piloto demostrativa para calor de proceso con tecnología solar basada en mini heliostatos”**

This work (article, thesis, poster, etc.) has been partially supported by Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética through Grant 207450, “Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol)”, within Strategic Project No **P53**

**"Development of a demonstration pilot plant for process heat with solar technology based on mini heliostats"**

Quiero agradecer especialmente a mi tutor, el Dr. Cuitláhuac Iriarte Cornejo, quien compartió conmigo sus conocimientos, me orientó y apoyó en todas y cada una de las etapas y procesos de este proyecto; gracias por su incondicional ayuda y motivación. Asimismo, agradezco al Dr. Rafael Cabanillas, responsable técnico de la Plataforma Solar de Hermosillo, por facilitar el espacio y proveer el equipo necesario para el desarrollo de esta investigación.

También quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a Universidad de Sonora por hacerme parte del proyecto 207450 "Desarrollo de planta piloto demostrativa para calor de proceso con tecnología solar basada en mini-heliostatos", por brindarme los recursos necesarios, los conocimientos y las herramientas fundamentales para su lograda realización.

# Contenido

Resumen.....	ii
Abstract .....	iii
Agradecimientos.....	iv
Lista de Figuras.....	vii
CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	1
1.1    Introducción .....	1
1.2    Justificación .....	2
1.3    Objetivo general.....	3
1.4    Objetivos específicos.....	3
1.5    Hipótesis.....	3
1.6    Alcance y limitaciones .....	3
1.7    Justificación .....	4
CAPITULO 2 .....	5
MARCO DE REFERENCIA.....	5
2.1    Geometría Solar .....	5
2.1.1    Órbita de la tierra alrededor del sol.....	6
2.1.2    Declinación solar .....	7
2.1.3    Ecuación de tiempo.....	7
2.1.4    Ángulos solares.....	10
2.1.5    Ángulo cenital.....	12
2.1.6    Ángulo acimutal.....	12
2.2    Algoritmo de Posición Solar (SPA).....	13
2.3    Sistema de concentración de posición angular de alta precisión.....	14
2.4    Sistema de control.....	15
2.4.1    Controlador Lógico Programable (PLC).....	15
2.4.2    Lenguaje de escalera .....	16
2.4.3    Elementos de programación de escalera.....	16
2.4.4    Funciones .....	17
2.4.5    Lenguaje Estructurado de Control (SCL).....	19
2.5    Concentrador fotovoltaico.....	20

CAPITULO 3 .....	21
Metodología teórica.....	21
3.1    PLC Siemens S7-1200. ....	21
3.2    Sistema .....	21
3.2.1    Estructura mecánica.....	22
3.2.2    Sistema eléctrico .....	23
3.2.3    Controlador Lógico Programable (PLC) .....	24
3.2.4    Sistema de visión artificial solar .....	24
3.2.5    Ejes de movimiento.....	26
3.2.6    Código.....	26
CAPITULO 4 .....	29
DESARROLLO .....	29
4.1    Análisis PLC y observación del helióstato.....	29
4.2    Sistema de control.....	31
4.2.1    Sensores .....	31
4.3    Estructura del Código .....	33
4.3.1    Función principal .....	34
4.3.2    Selección de movimientos.....	40
4.3.3    Movimiento Automático .....	46
4.3.4    Movimiento semiautomático.....	56
4.3.5    Movimiento Manual.....	57
CAPITULO 5 .....	59
RESULTADOS .....	59
5.1    Movimiento en eje de elevación.....	59
5.2    Movimiento en eje de acimutal. ....	60
CAPITULO 6 .....	65
CONCLUSIONES .....	65
CAPITULO 7 .....	66
Bibliografía .....	66

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Superficie contra los rayos incidentes .....	5
<b>Figura 2.</b> Órbita de la tierra alrededor del sol .....	6
<b>Figura 3.</b> Husos horarios .....	8
<b>Figura 4.</b> Ángulos solares .....	10
<b>Figura 5.-</b> Ángulos solares con indicación de ejes.....	11
<b>Figura 6.</b> Ángulo cenital .....	12
<b>Figura 7.</b> Vector Solar .....	13
<b>Figura 8.</b> Distribución interna de gabinete .....	15
<b>Figura 9.</b> Ejemplo, SPA - código SCL. ....	19
<b>Figura 10.</b> Diagrama general del sistema de control (hardware, software) .....	22
<b>Figura 11.</b> Sistema mecánico.....	23
<b>Figura 12.</b> Imagen cruda del Sol(1920X1080) en gris, sistema de visión .....	25
<b>Figura 13.</b> Sistema de visión artificial solar .....	25
<b>Figura 14.</b> Interfaz eléctrica para señales de control .....	26
<b>Figura 15.</b> Indicadores visuales del sistema.....	27
<b>Figura 16.</b> Código de verificación de funcionamiento de motores .....	29
<b>Figura 17.</b> Cambio de selección de motor por contador .....	30
<b>Figura 18.</b> Mando manual .....	31
<b>Figura 19.</b> Encoder, eje acimut .....	32
<b>Figura 20.</b> Encoder, eje de elevación. ....	32
<b>Figura 21.</b> Cámara de visión artificial .....	33
<b>Figura 22.</b> Diagrama de funciones secuenciales principal.....	34
<b>Figura 23.</b> Código en bloques de llamado de rutina SPA .....	35
<b>Figura 24.</b> Selección de movimiento .....	35
<b>Figura 25.</b> Módulo CM1241 y pantalla de configuración del protocolo RS485(hardware) .....	36
<b>Figura 26.</b> Llamada a la subrutina de atención a datos en cola RS485 .....	36
<b>Figura 27.</b> Configuración del protocolo RS485 y selección de cola para recepción .....	37
<b>Figura 28.</b> Diseño de cola (FIFO) de recepción de datos RS485.....	37
<b>Figura 29.</b> Llamada a subrutina de servicio a Webserver .....	38
<b>Figura 30.</b> Página principal del Servido tipo WEB .....	38
<b>Figura 31.</b> Variables internas del programa configurables desde computadora remota... ..	39

<b>Figura 32.</b> Tipos de movimientos .....	40
<b>Figura 33.</b> Condiciones de incremento de contador .....	41
<b>Figura 34.</b> Función de comparación con el entero "1" .....	41
<b>Figura 35.</b> Condiciones para operar en Movimiento Automático .....	42
<b>Figura 36.</b> Código de encendido de luz indicadora para operador.....	42
<b>Figura 37.</b> Secuencia de Reset .....	43
<b>Figura 38.</b> Código para envío a "home" desde mando físico .....	43
<b>Figura 39.</b> Activación de luces indicadoras de mando a "home".....	44
<b>Figura 40.</b> Diagrama de secuencias de "Movimientos".....	45
<b>Figura 41.</b> Segmentos movimiento automático.....	46
<b>Figura 42.</b> Configuración de encoder en modo HSC1 .....	47
<b>Figura 43.</b> Llamada a la actualización del acumulador de encoder acimut .....	47
<b>Figura 44.</b> Llamado de la función de movimiento en eje acimutal.....	48
<b>Figura 45.</b> Mapa de función, movimiento acimutal .....	50
<b>Figura 46.</b> Mapa de función, movimiento cenital .....	51
<b>Figura 47.</b> Curva característica del eje cenital.....	52
<b>Figura 48.</b> Conversión de ángulo a pulsos de encoder.....	52
<b>Figura 49.</b> Error de apuntamiento eje acimutal.....	53
<b>Figura 50.</b> Cálculo de tiempo de encendido de motor, eje de acimut .....	54
<b>Figura 51.</b> Llamada a cuadro de función de control por cálculo SPA.....	55
<b>Figura 52.</b> Mapa conceptual, movimiento automático.....	56
<b>Figura 53.</b> Movimiento semiautomático .....	57
<b>Figura 54.</b> Movimiento manual .....	58
<b>Figura 55.</b> Corrección de motor de elevación.....	60
<b>Figura 56.</b> Corrección de motor - acimutal .....	60
<b>Figura 57.</b> Obstrucción de cámara, simulación paso de nubes .....	61
<b>Figura 58.</b> Obstrucción de visión artificial .....	62
<b>Figura 59.</b> Prueba 1, Stop / Seguimiento.....	64
<b>Figura 60.</b> Corrección de movimiento, ejes de elevación y acimutal.....	64

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

### 1.1 Introducción

Las energías renovables han ido tomando mayor relevancia en los últimos años debido a la creciente demanda de energía eléctrica y a la necesidad de disminuir los gases contaminantes que se generan en la producción de esta última.

Una alternativa a este problema es la generación de energía eléctrica por medio de sistemas fotovoltaicos, cuya estructura puede variar según el proceso de obtención de energía: ya sea estructuras orientadas constantemente hacia un punto en específico para recibir los rayos del sol de una forma determinada, estructuras estáticas o fijas, o a manera de seguidor solar, rotándose sobre su(s) eje(s) según la disposición del sol.

Aquellos paneles cuyo movimiento se enfoca en sus ejes y aquellos donde se parte del movimiento continuo y del posicionamiento del sol, es decir, del seguidor solar, generan mayor cantidad de energía, lo que representa un mejor aprovechamiento de los rayos del sol en comparación con los sistemas fijos.

La eficiencia de los sistemas fotovoltaicos depende de los componentes y la instalación que estos tengan. Un panel estático convierte entre un 15% y 20% de la energía solar recibida en electricidad. No obstante, según una investigación realizada por Vázquez & Jeison (2012), el rendimiento diario de estos equipos aumenta en 42.8% con la instalación de sistemas o mecanismos que permitan seguir la trayectoria solar.

Su funcionamiento, sin embargo, está sujeto a la potencia y a la orientación de la radiación solar, la cual varía según las condiciones atmosféricas, el lugar donde se encuentre (latitud y longitud), la hora y día del año. Debido a esta variabilidad de factores, y puesto que la eficiencia de los módulos fotovoltaicos de silicio casi ha alcanzado su límite teórico, la producción de más energía (para una creciente demanda) y más barata (para ser

competitiva ante los combustibles fósiles) hace necesario el desarrollo de tecnologías innovadoras como la energía fotovoltaica de concentración.

El presente proyecto presenta un sistema de seguimiento solar por medio de un algoritmo de posicionamiento solar, (SPA por sus siglas en inglés), aplicado por medio de un controlador lógico programable (PLC por sus siglas en inglés), adaptado a un sistema de disco parabólico (SDP), el cual consiste en dos espejos con forma parabólica capaces de concentrar la radiación solar en un punto o foco geométrico de esta superficie y donde se encuentra situado un elemento fotovoltaico capaz de aprovechar la energía solar concentrada y transformarla en energía eléctrica.

Los concentradores solares son sistemas basados en uno o un arreglo de varios espejos en formación cóncava con el propósito de concentrar energía solar en un receptor determinado. Estos concentradores tienen ventajas con respecto a los concentradores clásicos, tales como: una alta eficiencia óptica y menores costos de construcción.

Una de las mayores dificultades encontradas en este tipo de sistemas es garantizar que los rayos solares incidan en el sistema de forma paralela al eje óptico del equipo concentrador durante las horas de mayor irradiancia solar. Para ello es desarrollado un sistema de seguimiento del movimiento aparente del sol de alta precisión, para concentrar la mayor cantidad de energía posible durante el día.

## **1.2 Justificación**

El presente proyecto expone el desarrollo y la automatización de un sistema de seguimiento solar para un sistema fotovoltaico de alta concentración solar, compuesto de espejos parabólicos por medio de un sistema robusto de control, que consiste en un mecanismo de montura alta-acimutal, un sistema de visión artificial y un controlador lógico programable (PLC). Éste último utiliza la longitud y latitud geográfica, hora y fecha del año donde se encuentre ubicado el concentrador para la realización de cálculos de posición angular mediante un algoritmo de posición solar o código SPA (Solar Position Algorithm en inglés), el cual produce los grados acimutal y cenital del sistema para realizar el seguimiento solar de manera completamente autónoma.

### **1.3 Objetivo General**

Desarrollar un sistema de control de posición angular por medio de PLC (controlador lógico programable), para un sistema de concentración solar de posición angular de alta precisión.

### **1.4 Objetivos específicos**

- 1.- Implementación de rutinas de cálculo de seguimiento solar SPA (algoritmo de posicionamiento solar) en PLC (controlador lógico programable) Siemens.
- 2.- Establecer un sistema de comunicación RS-485 con un sistema de visión basado en Raspberry.
- 3.- Desarrollo de sistemas de control basado en SPA y encoder (baja precisión).
- 4.- Desarrollar sistemas de control con retroalimentación por visión artificial.

### **1.5 Hipótesis**

Dotar de una función de control automático de seguimiento solar al equipo fotovoltaico de alta concentración, hará de éste un sistema capaz de aprovechar de manera satisfactoria la radiación obtenida del sol. Asimismo, proporcionará una interfaz sencilla y de fácil utilización a aquellos usuarios con la necesidad de utilizar dicho sistema.

### **1.6 Alcance y limitaciones**

Se desarrollará un sistema de control en PLC Siemens para un concentrador solar con retroalimentación por sistema de visión a través de una cámara integrada a la plataforma de desarrollo Raspberry, el sistema cuenta con una montura alta-acimutal controlada por dos motores de corriente directa, que tienen retroalimentación de posición lineal y angular por medio de pulso y encoder incremental, respectivamente, que entran al PLC; el PLC calcula la posición solar basado en algoritmo SPA(solar position algorithm) [John A. Duffie, 2013], con el que realiza la posición solar de baja precisión, esto sirve de apuntamiento a

la cámara de alta resolución montada en dispositivo Raspberry PI 3 con comunicación RS-485 hacia el PLC, para obtener una retroalimentación de alta precisión al control de posición solar, y así tener una concentración de solar de alta eficiencia.

Se espera contar con datos experimentales de error de seguimiento.

El trabajo se desarrollará en la Plataforma Solar de Hermosillo, con el apoyo y supervisión directo del Dr. Cuitláhuac Iriarte Cornejo.

## **1.7 Justificación**

El presente proyecto tiene como finalidad plantear, desarrollar e implementar un sistema de control autónomo para el aprovechamiento de la radiación solar, que esté compuesto de una interfaz de usuario simple y fácil de utilizar, para que pueda ser operado por personal técnico y académico de investigación en la Plataforma Solar de Hermosillo. Para ello se realizará la implementación de un sistema de control por medio de PLC (controlador lógico programable) el cual ofrecerá al usuario la interfaz y el control de los motores para realizar el seguimiento solar. Actualmente no se cuenta con ningún mecanismo que realice esta función de manera autónoma en el área de trabajo (sistema fotovoltaico de alta concentración compuesto de dos espejos parabólicos).

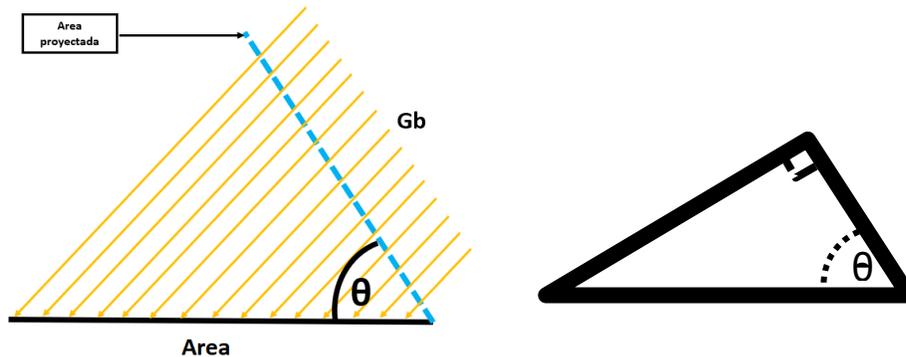
## CAPITULO 2

### MARCO DE REFERENCIA

#### 2.1 Geometría Solar

Además de luz y calor, la tierra está constantemente siendo irradiada por rayos UV, gama y rayos x, estos generados directamente por el sol. No obstante, la atmosfera terrestre atenúa dicha radiación absorbiéndola por los componentes existentes en ella (gases, aerosoles, nubes, etc.) y/o reflejando esta radiación hacia el espacio nuevamente.

El flujo de calor o potencia recibida en una superficie depende directamente del área de y de la cantidad de radiación solar recibida, además la inclinación angular formada con respecto a la superficie y la dirección de la radiación solar, genera un área proyectada, como se muestra la **Figura 1**.



*Figura 1. Superficie contra los rayos incidentes*

Debido a que la variación de potencia generada por un ángulo de incidencia es necesario determinar este para realizar el cálculo del flujo de calor, donde tenemos que:

$$\dot{Q} = G_b A \cos\theta \quad (1)$$

Donde:

$\dot{Q}$  = Flujo de calor (Potencia)

$G_b$  = Radiación solar directa

$\theta$  = Angulo generado entre la dirección de incidencia del sol y el área de superficie

$A$  = Área de la superficie

### 2.1.1 Órbita de la tierra alrededor del sol

El plano de la eclíptica es la elipse formada por la traslación de la tierra alrededor del sol (como es mostrado en la Figura 2), donde la distancia promedio de ambos astros es de  $1.496 \times 10^{11} \text{ m}$  con una variación de  $\pm 1.7\%$ .

Tomando esto como consideración, la tierra cuenta con un eje de rotación (eje polar), el cual permanece con un ángulo constante de  $23.45^\circ$  con respecto al eje perpendicular al plano de la eclíptica.

Si tomamos en cuenta las dimensiones del sol y la tierra contra la distancia entre ambos obtendríamos que el semiángulo entre ambos es  $4.7 \text{ mrad}$ . Siendo que:

Diámetro del Sol =  $1.39 \times 10^9 \text{ m}$

Diámetro de la Tierra =  $1.27 \times 10^7 \text{ m}$

Distancia entre tierra y sol =  $1.496 \times 10^{11} \pm 1.7\% \text{ m}$

Donde:  $\Delta_s = 4.7 \text{ mrad} = 0.25^\circ = 16'$

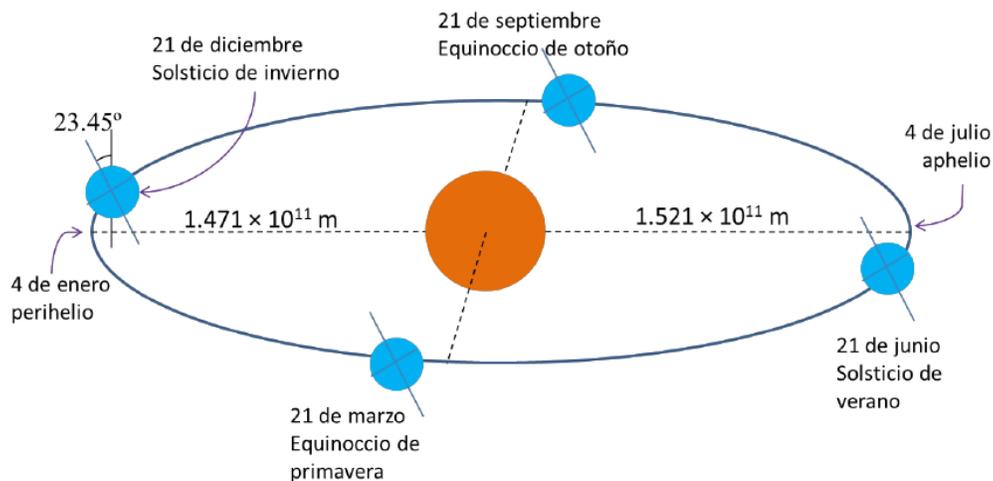


Figura 2. Órbita de la tierra alrededor del sol

### 2.1.2 Declinación solar

Puesto que la tierra rota sobre su eje y a su vez órbita alrededor del sol, los rayos solares que penetran la atmósfera del planeta son variables: su ángulo se modifica con el transcurrir del día y del año.

El eje ecuatorial es perpendicular al eje terrestre. Al ángulo que se genera entre los centros de la tierra y del sol con el plano ecuatorial se le conoce como declinación solar, dicho ángulo se cataloga como positivo si se mide con dirección al norte y como negativo si su dirección se encuentra hacia el sur. Este ángulo, por ejemplo, tiene un valor de  $23.45^\circ$  durante el solsticio del verano, y pasa a negativo al llegar el periodo del solsticio de invierno. Durante los equinoccios de marzo y septiembre, que corresponden a la primavera y el otoño respectivamente, su valor es de cero.

Los cambios de la trayectoria del sol a lo largo del año y con el fluir de las estaciones y los movimientos que acompañan a la tierra, generan una variación continua del ángulo de declinación solar.

A continuación, se expone la ecuación donde se describe lo anteriormente mencionado:

$$\delta = 23.45^\circ \text{Sen}\left[\left(\frac{360}{365}\right)(284 + N)\right] \quad (2)$$

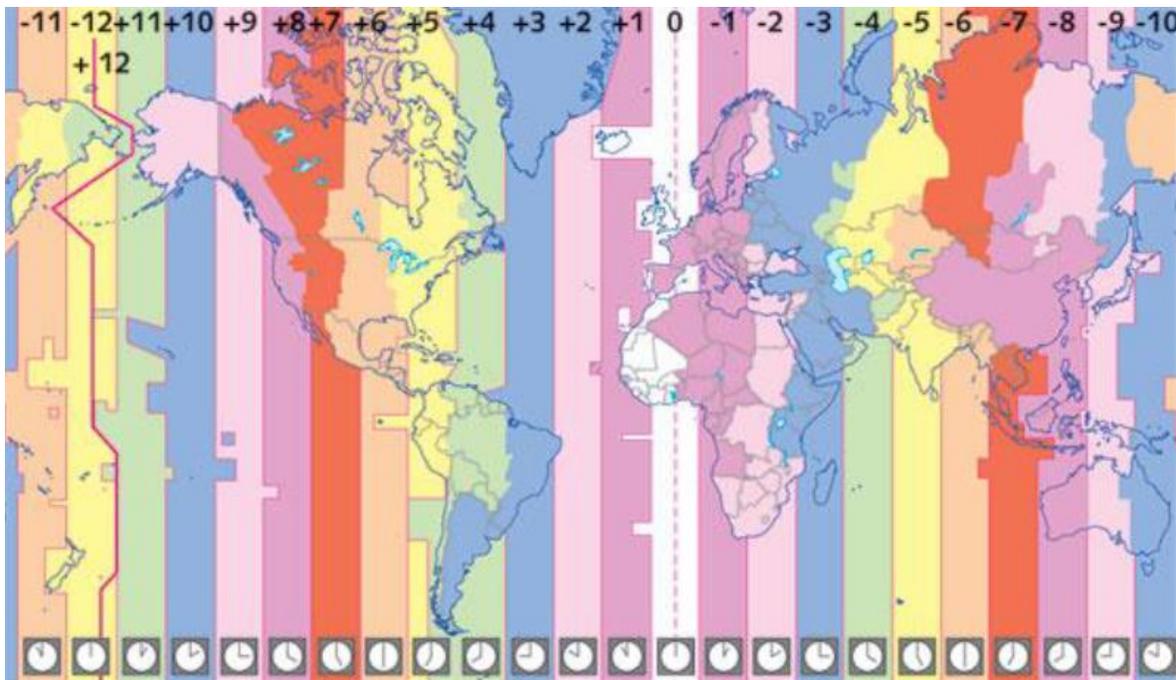
Esta ecuación parte del calendario juliano, por lo que comprende únicamente de 1 a 365 días, es decir, un año juliano. Sin embargo, deja al lado los años bisiestos, cuyo calendario consta de 366 días y se presenta cada cuatrienio, por lo que simplemente se podría considerar como una ecuación aproximada.

En conclusión, los años no tienen una duración que comprenda un periodo de días determinado o fijo, razón que altera la ecuación de la relación tierra-sol y que proporcionará resultados estimados.

### 2.1.3 Ecuación de tiempo

A lo largo de la historia el hombre ha recurrido a diferentes elementos para calcular el paso del tiempo. El primero de ellos fue el sol, las civilizaciones antiguas medían el transcurrir

del día a partir de la sombra que proyectaba un gnomon o puntero triangular sobre una superficie marcada con una escala. Posteriormente se utilizaron clepsidras o relojes de agua y relojes de arena, relojes mecánicos, de péndulo, hasta que llegó la era del reloj digital. Sin embargo, es el reloj de sol el que se regía a partir del posicionamiento del sol y en el que se ahondará en este apartado: partiendo de ese método, el mediodía ocurre cuando el sol atraviesa por su punto más alto, y es a través de dicho método donde se puede describir el movimiento aparente del sol a lo largo del cielo, pues se hace evidente. No obstante, no en todos los sitios del mundo ocurre el mediodía a las 12:00 p.m., debido a que, según su ubicación, los relojes están sincronizados en distintos horarios respecto a los meridianos, ejemplo de esto se expresa en la 3, husos horarios.



**Figura 3.** Husos horarios

Una de las principales disimilitudes entre el tiempo estándar, proporcionado por el reloj, y el tiempo solar, es que hay que compensar la diferencia entre el meridiano local, es decir, la ubicación del sujeto, y el meridiano estándar del huso horario establecido. Dado que el planeta realiza el movimiento de rotación en un periodo de 24 h., la velocidad aparente del sol en el firmamento es de  $15 \text{ grados/hora} = 0.25 \text{ grados/minuto}$ . Por lo anterior, hay que multiplicar la diferencia de los meridianos por 0.25 para conseguir así la compensación en minutos. Los husos horarios también se ven afectados por los equinoccios, donde se

adelantan o atrasan los relojes según la ubicación. De igual manera, el movimiento de traslación genera un cambio en la declinación solar, esto, combinado con el movimiento de rotación de la tierra sobre su eje, hace que se vuelvan variables las velocidades de dichos movimientos naturales simultáneos, evento que se ve reflejado en la velocidad aparente del sol en el cielo.

En definitiva, la velocidad aparente del sol no es siempre la misma, diversos factores alteran la duración de los días, aunque el tiempo estándar estimado se resume en 24 horas.

La ecuación que se expone a continuación permite convertir los valores de tiempo estándar a tiempo solar:

$$t_{sol} = t_{est} + 4(L_{est} - L_{local}) + V + E_t \quad (3)$$

Donde:

$t_{sol}$  = Tiempo solar

$t_{est}$  = Tiempo estandar

$L_{est}$  = Longitud del meridiano

$L_{local}$  = Longitud local

$V$  = Correccion del horario de verano

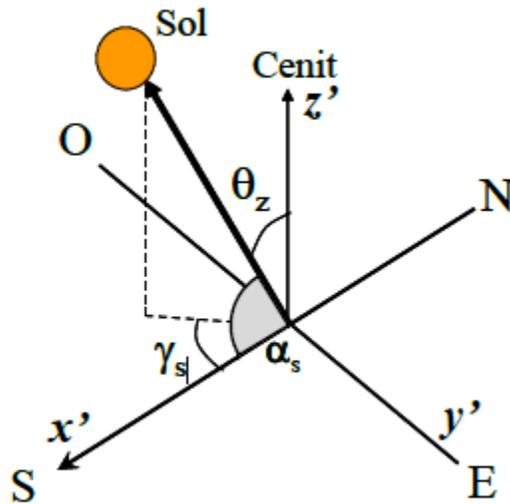
$V = \begin{cases} -60 \text{ min} & \text{Horario de verano} \\ 0.0 \text{ min} & \text{Horario de invierno} \end{cases}$

$$E_t = 229.2[7.5 \times 10^{-5} + 0.001868 \text{ Cos}B - 0.032077 \text{ Sen}B - 0.014615 \text{ Cos}(2B)] \quad (4)$$

Donde:  $B = (N - 1) \frac{360^\circ}{365}$

En ella se toman en cuenta tanto el tiempo solar como el tiempo estándar del reloj, la longitud correspondiente al meridiano local, es decir, la ubicación; la longitud del meridiano estándar, es decir, el huso horario y el ajuste del horario de verano o de invierno, según los lugares y las fechas donde se ubique. A la diferencia que existe entre el tiempo estándar y el tiempo solar aparente se le conoce como "ecuación del tiempo".





**Figura 5.-** Ángulos solares con indicación de ejes

$$\theta_z + \alpha = 90^\circ \quad (5)$$

Donde:

$\gamma_s = \text{Ángulo acimutal}$

$\theta_z = \text{Ángulo cenital}$

$\alpha = \text{Altura solar}$

El ángulo que mejor describe la trayectoria aparente del sol es llamado “ángulo horario”, el cual está descrito por la siguiente ecuación:

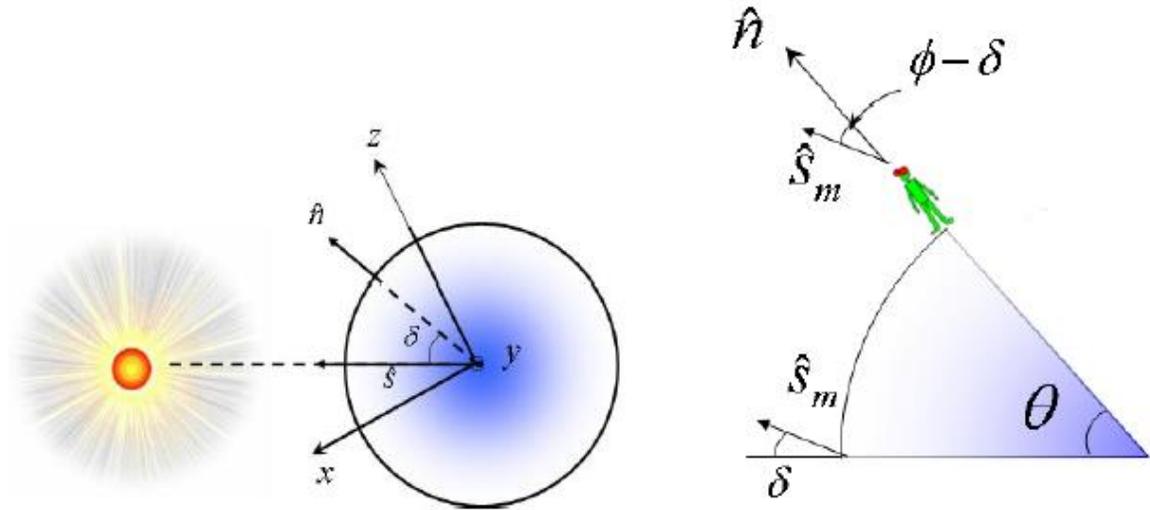
$$\omega = 0.25^\circ(t_{sol}-720) \quad (6)$$

$\omega = \text{Ángulo horario}$

Donde el sol avanza  $15^\circ$  por hora, descrito por la velocidad de rotación de la tierra ( $360^\circ$  en 24 horas).

### 2.1.5 Ángulo cenital.

El ángulo cenital es la magnitud restante a la magnitud de la vertical de la incidencia solar a un cuerpo en tierra. Donde el sol estará directamente en dirección sur en el hemisferio norte y al norte en el hemisferio sur, como se puede observar en la **Figura 66**.



**Figura 6.** Ángulo cenital

La ecuación que expresa este sistema de referencia se puede expresar como:

$$\text{Cos}\theta_z = \hat{S} * \hat{n} = \text{Cos}\phi \text{Cos}\delta \text{Cos}\omega + \text{Sen}\delta \text{Sen}\phi \quad (7)$$

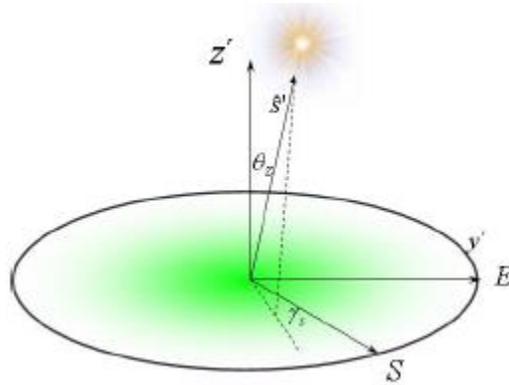
Donde:

$$\hat{n} = (\text{Cos}\theta, 0, \text{Sen}\theta)$$

$$\hat{S} = M_{(-\omega)}\hat{S} = (\text{Cos}\omega \text{Cos}\delta, -\text{Sen}\omega \text{Cos}\delta, \text{Sen}\delta)$$

### 2.1.6 Ángulo acimutal.

El ángulo acimutal calcula la magnitud generada por el desplazamiento del sol con respecto a su sur, como es expresado por la siguiente imagen (Figura 7).



**Figura 7. Vector Solar**

De modo que este puede escribirse como:

$$\gamma'_s = \text{ArcTan} \left( \frac{\text{Sen}(\omega) \text{Cos}(\delta)}{\text{Sen}\phi \text{Cos}\omega \text{Cos}\delta - \text{Cos}\phi \text{Sen}\delta} \right) \quad (8)$$

Cuando:

$$\gamma'_s = \begin{cases} \gamma' & C_s \geq 0 \\ -180^\circ + \gamma'_s & C_s < 0 \text{ y } S_s < 0 \\ 180^\circ + \gamma'_s & C_s < 0 \text{ y } S_s > 0 \end{cases}$$

Teniendo como vector solar:

$$\hat{S}' = (\text{Cos } \gamma_s \text{ Sen}\theta_z, -\text{Sen } \gamma_s \text{ Sen}\theta_z, \text{Cos}\theta_z)$$

## 2.2 Algoritmo de Posición Solar.

En la actualidad existen distintos tipos de algoritmos que son capaces de realizar seguimiento solar, pero tienen distintas funciones o capacidades, así como su grado de complejidad en implementación. Los parámetros básicos requeridos son: latitud, longitud, fecha, hora, nivel respecto al mar y ajustes de condiciones ambientales locales. Tal es el caso para el algoritmo conocido como SPA o Solar Position Algorithm (Algoritmo de Posición Solar). Este sistema de posicionamiento solar cuenta con un periodo de validez del año 2000 a.C. a 6000 d.C.

Dicho algoritmo utiliza una serie de coeficientes constantes para el cálculo de la posición relativa entre la tierra y el sol para un instante de tiempo deseado. Algunos de los parámetros utilizados por SPA para estas aproximaciones son la latitud, longitud, el radio del sol con respecto a la tierra, el radio de la tierra con respecto del sol, las variaciones de la rotación lunar sobre la rotación terrestre, la nutación terrestre, la oblicuidad de la eclíptica terrestre, la refracción de los rayos solares debido a la atmosfera terrestre, temperatura y presión atmosféricas, entre otros.

De este modo el algoritmo SPA es capaz de generar una gran cantidad de cálculos para una serie de aplicaciones solares de alta precisión como son seguidores solares y sistema de helióstatos.

### **2.3 Sistema de concentración de posición angular de alta precisión.**

La montura altacimutal es una montura para telescopios astronómicos capaz de rotar tanto de manera horizontal como vertical. Al movimiento horizontal se le conoce "acimutal", mientras que al movimiento vertical se le llama "altura", de ahí el nombre de la invención. Ambos movimientos son medidos con relación al observador, cuyos valores de posición (acimutal y altura) son iguales a 0°.

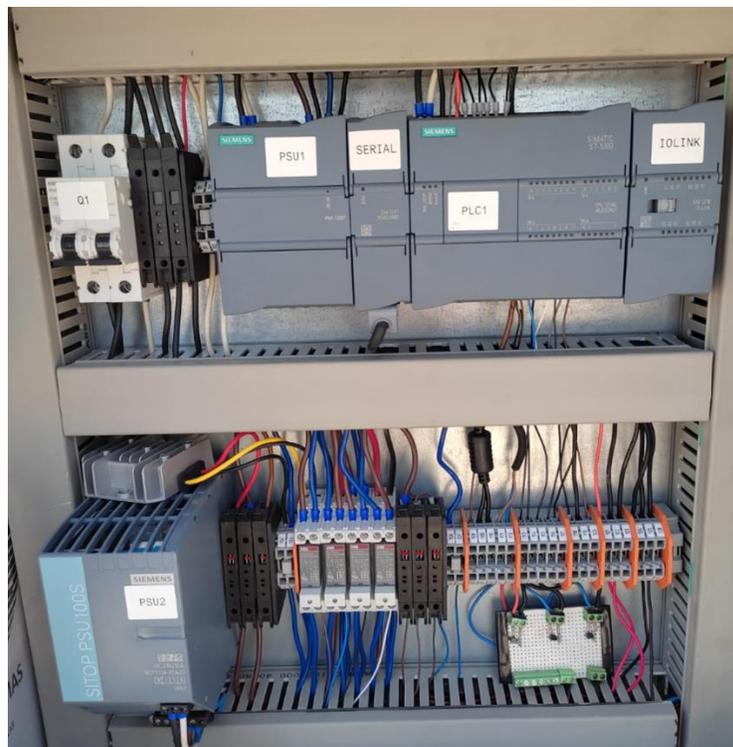
La montura altacimutal se diferencia de la montura ecuatorial o montura paralela (soporte para telescopios que también fue creado y desarrollado por Roemer), puesto que la primera utiliza como punto de referencia los paralelos y meridianos de la tierra, el polo sur y el polo norte, mientras que la última parte de la proyección de dichos conceptos en el cielo: el polo norte celeste y el polo sur celeste.

El sistema altacimutal se utiliza para identificar la ubicación de un objeto en la esfera celeste con respecto al horizonte visible local. El ángulo altacimutal es el que se forma desde el norte y hacia la derecha, siguiendo el sentido de las agujas del reloj. Los puntos situados debajo del horizonte tienen un valor negativo y las coordenadas altacimutales son variables, cambian constantemente a lo largo del tiempo. [Rodolfo Escobar, 2017]

## 2.4 Sistema de control.

### 2.4.1 PLC.

Un controlador lógico programable (PLC por sus siglas en inglés) es un dispositivo electrónico diseñado para ejecutar, controlar y automatizar procesos electromecánicos cuya programación puede ser alterada o reprogramada según sea el caso. El PLC parte del monitoreo de entradas y salidas, sus principales componentes son la unidad central de proceso (CPU por sus siglas en inglés) y diferentes interfaces de entrada y de salida. El CPU está formado por un procesador, mismo que se encarga de ejecutar el programa o código establecido por el usuario. La interfaz de entrada capta señales para posteriormente interpretarlas y la interfaz de salida tiene como objetivo enviar una señal eléctrica con el fin de activar una salida de energía para accionar un actuador. Se muestra la distribución de los componentes en la figura 8.



*Figura 8. Distribución interna de gabinete*

### **2.4.2 Lenguaje escalera**

El lenguaje escalera o Ladder, también conocido como diagrama de escalera, es un lenguaje de programación gráfico que, mediante símbolos, representa los componentes principales de un circuito eléctrico. Se le conoce como diagrama de escalera debido a la semejanza que tienen con éstas, ya que se componen de dos rieles verticales y diferentes escalones o líneas horizontales que se desprenden de las mismas y que definen y coordinan las operaciones a través de funciones. Dichas operaciones se realizan de manera simultánea, aunque igualmente pueden partir de un orden de sucesión o secuencia, según la programación establecida por el usuario.

Es por medio de este lenguaje que pueden simplificarse tanto la estructura como el proceso de un sistema de control y programación del PLC.

Algunas de las principales características del lenguaje escalera son las siguientes:

- Las instrucciones de entrada o condiciones se colocan hacia la izquierda, mientras que, por el contrario, las instrucciones de salida o acciones, al lado derecho.
- El número de salidas para cada renglón es variable, pueden ser más de una.
- El procesador examina los peldaños del diagrama de escalera en un formato descendente, desde arriba hacia abajo, y de izquierda a derecha.

### **2.4.3 Elementos de programación Ladder.**

Contacto NA (normalmente abierto): este contacto se activa cuando hay un uno lógico en el elemento que representa, es decir, una entrada (para captar información del proceso a controlar), una variable interna o un bit de sistema

Contacto NC (normalmente cerrado): su función es similar al contacto normalmente abierto, sin embargo, este tipo de contacto se ve activado cuando existe unos cero lógicos.

Bobina NA: se activa cuando la función a su izquierda o indicada en su entrada da como resultado un uno lógico.

Bobina NC: esta bobina se acciona cuando la combinación establecida en su entrada da un cero lógico y su comportamiento es muy similar al de la bobina anteriormente mencionada.

Bobina SET: tiene su correspondiente con la Bobina RESET. Sirve para memorizar bits y, si se complementa con la bobina RESET, da una potencia mayor en la programación.

Bobina JUMP: Sirve para realizar subprogramas, esta bobina permite al usuario poder saltar instrucciones del programa.

## **2.4.4 Funciones**

### **2.4.4.1 Temporizadores**

Un temporizador es un dispositivo que permite al usuario llevar un control preciso del tiempo de activación de un proceso, pues le otorga la facultad de preestablecer duraciones de tiempo. Al valor de tiempo que el usuario ha establecido se le conoce como PRESET o meta. Tras haberse concluido el periodo de tiempo indicado, activan un contacto interno, sin embargo, hay que establecer los parámetros y las condiciones con las cuales comenzar a temporizar. Para lo anterior, los temporizadores cuentan con una entrada de inicio

START, a la cual deben llegar los contactos designados como condición de arranque.

Existen distintos tipos de temporizadores y para su utilización deben ajustarse algunos parámetros:

Arranque del temporizador: distintos contactos que accionan el temporizador, conector según convenga al usuario

Carga del tiempo: generalmente parte de una constante de tiempo, sin embargo, pueden existir otros ajustes: leyendo las entradas, un valor de una base de datos, entre otros.

### **2.4.4.2 Contadores**

El contador se utiliza con la finalidad de contar acciones internas de un proceso o ciclo. Permite al usuario saber la cantidad exacta de veces que ha ocurrido algo. El contador debe tener un valor preestablecido como meta, el usuario debe fijarlo para que el contador se

active o inactive según su valor y a partir del resultado que arroje el contador podrán tomarse diversas decisiones, como finalizar, pausar o finalizar procesos.

#### 2.4.4.3 Monoestables

El monoestable tiene la capacidad de mantener activada una salida durante un periodo de tiempo establecido y programado por el usuario, así como el poder de desactivarla automáticamente una vez terminado ese periodo de tiempo. Únicamente posee una entrada y una salida.

Entradas START: cuando se activa comienza la cuenta que se le ha programado

Salidas RUNNING: ocurre mientras se mantiene activada la cuenta y se desactiva al finalizarla.

#### 2.4.4.4 Operaciones.

Operaciones aritméticas. Pueden realizarse operaciones matemáticas como sumas, restas, comparaciones, multiplicaciones, divisiones, etc., las cuales parten de los valores contenidos en los registros de memoria de contadores, entradas, salidas, temporizadores y demás elementos. Las operaciones aritméticas con números enteros son representadas por medio de cajas, en las cuales se colocan tanto las operaciones a llevar a cabo como los operandos.

Operaciones de comparación. Un comparador permitirá relacionar dos datos del mismo formato, ya sea por comparaciones de igualdad, desigualdad, mayor que, menor que, mayor o igual, menor o igual.

#### 2.4.4.5 SET Y RESET

SET activa la bobina correspondiente cada vez que se envía un impulso, y se desactivará una vez que enviemos otro impulso a la instrucción RESET.

### 2.4.5 Lenguaje Estructurado de Control

El lenguaje estructurado de control (SCL por sus siglas en inglés) es un lenguaje de programación para PLC Siemens basado en el lenguaje de programación Pascal, que implementa programación en texto estructurado (ST por sus siglas en inglés). Este lenguaje también contiene elementos del lenguaje Ladder, como son: entradas, salidas, timers, contadores, y muchos más. Aunado a esto, este sistema es compatible con programación KOP (Esquema de contactos) y FUP (diagrama de funciones), además de programar bloques defunciones conformes a las normas.

Es posible combinar los bloques programados como SCL con sistemas realizados en lenguaje Ladder o diagrama de funciones, donde cualquiera de ambos es capaz de llamarse entre sí, de manera análoga. Aunado a esto, es posible insertar segmentos SCL en diagramas de funciones realizados en Ladder. En la figura 9 es mostrado un fragmento de código SPA en modo de ejemplo de código SCL

```
//-----sun_right_ascension_parallax_and_topocentric_dec-----
#u_temp := ATAN(0.99664719 * TAN((#Latitude * #pi) / 180.0));
#y_temp := 0.99664719 * SIN(#u_temp) + #Elevation * SIN((#Latitude * #pi) / 180.0) / 6378140.0;
#x_temp := COS(#u_temp) + #Elevation * COS((#Latitude * #pi) / 180.0) / 6378140.0;

#atan2_y := - #x_temp * SIN((#xi * #pi) / 180.0) * SIN((#h * #pi) / 180.0);
#atan2_x := COS((#delta * #pi) / 180.0) - #x_temp * SIN((#xi * #pi) / 180.0) * COS((#h * #pi) / 180.0);

GOTO atan2;

sun_right_ascension_parallax_and_topocentric_dec::
#delta := #delta;
#atan2_y := (SIN((#delta * #pi) / 180.0)) - (#y_temp * SIN((#xi * #pi) / 180.0) * COS(#delta_alpha_rad));
#atan2_y := #atan2_y;
#delta := #delta;

#atan2_x := COS((#delta * #pi) / 180.0) - #x_temp * SIN((#xi * #pi) / 180.0) * COS((#h * #pi) / 180.0);
#step := 9;

GOTO atan2;
```

*Figura 9. Ejemplo, SPA - código SCL.*

## **2.5 Concentrador fotovoltaico.**

Un sistema de concentración fotovoltaico consiste en un sistema mecánico capaz de realizar concentraciones solares en puntos específicos mediante una configuración óptica de lentes o espejos. En estos puntos es localizada una celda fotovoltaica de alta eficiencia la cual aprovecha la concentración solar para transformar la radiación en energía eléctrica, además de la adaptación de un sistema de control para el seguimiento solar.

Una manera de clasificar los tipos de concentradores son los concentradores de imagen y no imagen. Los concentradores de imágenes se utilizan en aplicaciones ópticas (telescopio, cámaras, astronomía). Estos requieren una alta precisión en el seguimiento.

Además de este último, existen dos tipos de categorías de los sistemas fotovoltaicos de concentración: Sistema de control capaz de realizar seguimiento solar o sin sistema de control para seguimiento (sistemas estáticos), los cuales también pueden dividirse como seguidores solares ecuatoriales y seguidores azimutales.

Una de las mayores ventajas de este tipo de sistemas es una inversión menor de capital comparada con la necesaria para los sistemas convencionales. Existen análisis de costos los cuales han predicho que la utilización de lentes o espejos para la concentración de energía solar en celdas especiales o pequeñas, conduce a costos reducidos en la producción de energía eléctrica. [Swanson, 2003].

## **CAPITULO 3**

### **Metodología teórica.**

#### **3.1 PLC Siemens S7-1200.**

Los dispositivos S7-1200 de Siemens son piezas de control por medio de programación lógica (PLC). Estos cuentan con distintos módulos adaptables para funciones específicas, como módulos de control o comunicación.

Este PLC cuenta con una interfaz de comunicaciones Ethernet / Profinet integrada, 8 entradas lógicas, donde 6 son digitales y 2 son analógicas, también tiene 8 salidas tipo relevador, además este PLC es capaz de expandirse mediante módulos interconectados a un bus de datos. La Interfaz de desarrollo (IDE) se realiza mediante el software TiaPortal.

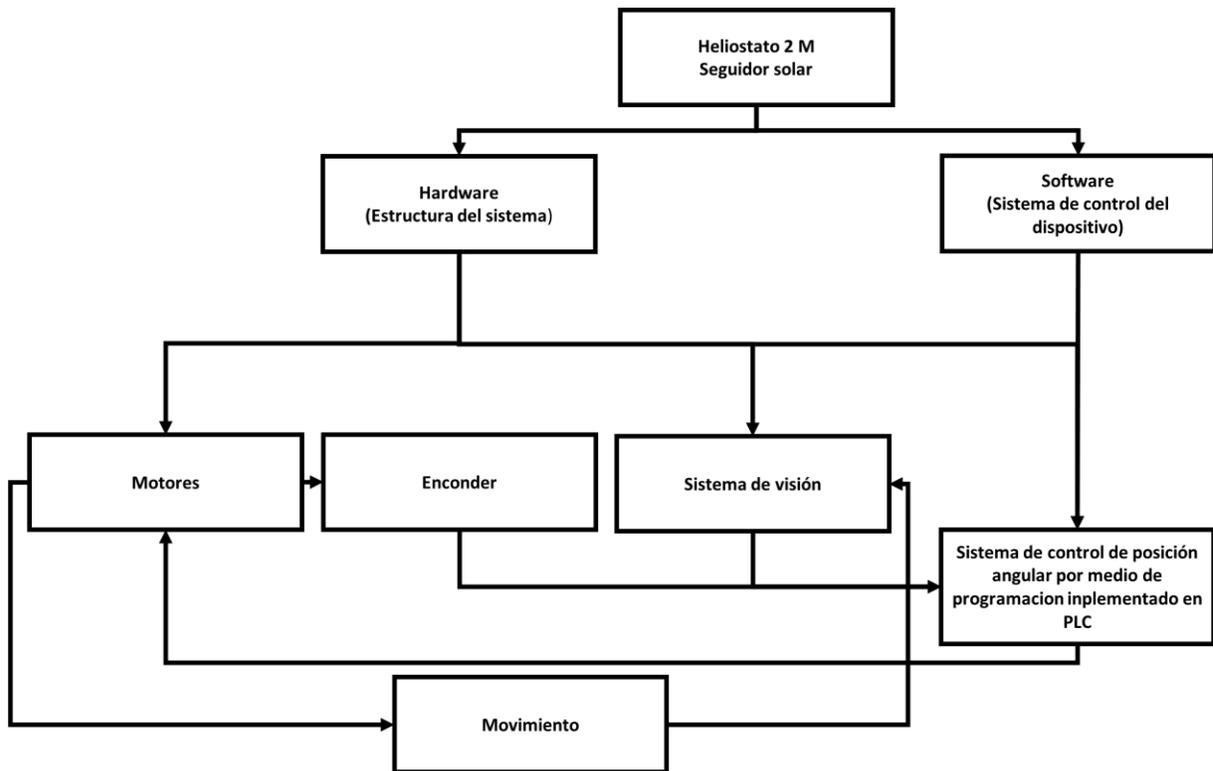
Todos los PLC S7-1200 de Siemens pueden expandirse hasta con tres módulos de comunicación los cuales son conectados a los laterales del dispositivo, estos son módulos Profibus maestro / esclavo y comunicación GPRS <li>AS-i y más sistemas Fieldbus.

#### **3.2 Sistema**

En este trabajo se desarrolló un sistema de control en un dispositivo PLC Siemens S7-1200 AC/DC/Rly para un concentrador solar con retroalimentación por sistema de visión a través de una cámara integrada al equipo. El sistema cuenta con una montura alta-acimutal controlada por dos motores de corriente directa, que tienen retroalimentación de posición lineal y angular por medio de pulso y encoder incremental, respectivamente, que entran al PLC, este calcula la posición solar basado en algoritmo SPA (solar position algorithm) con el que realiza la posición solar de baja precisión, esto sirve de apuntamiento a la cámara de alta resolución montada en el equipo, con comunicación RS-485 hacia el PLC, para

obtener una retroalimentación de alta precisión al control de posición solar, y así tener una concentración solar de alta eficiencia.

En el diagrama mostrado en la **Figura 1010** es posible observar el seguimiento dado para la formación del presente proyecto, donde son encontrados a manera de detalle los pasos secuenciados de la realización.



*Figura 10. Diagrama general del sistema de control (hardware, software)*

### 3.2.1 Estructura mecánica

El sistema mecánico del heliostato 2M consiste en una estructura metálica en formato de “T”, con dos ejes de movimiento, rotación y elevación, consistentes en dos motores de corriente directa, los cuales efectúan los movimientos del dispositivo. Dos espejos cóncavos localizados en la parte media superior de la estructura con la finalidad de concentrar la energía solar en un punto preciso (punto focal), donde se encuentra un arreglo de celdas

fotovoltaicas de alta eficiencia capaces de operar con la energía solar concentrada, a su vez montada en un soporte de pase en tres puntos con separación de  $120^\circ$ . En la siguiente imagen (figura 11), se muestran los componentes del sistema mecánico.



*Figura 11. Sistema mecánico.*

### 3.2.2 Sistema eléctrico

El sistema eléctrico del concentrador solar en cuestión está conformado por una serie de interconexiones de los distintos componentes, iniciando con la fuente de voltaje que convierte la energía eléctrica alterna a 24V de corriente directa, para alimentar al PLC, indicadores, interruptores, así como sensores de posición angular (encoders) y actuadores lineales. El sistema de visión artificial cuenta con una alimentación independiente de 5V de corriente directa. También se cuenta con un cableado eléctrico secundario que tiene la función de drenar la energía eléctrica producida por las celdas solares, interconectadas a un banco de resistencias eléctricas de potencia.

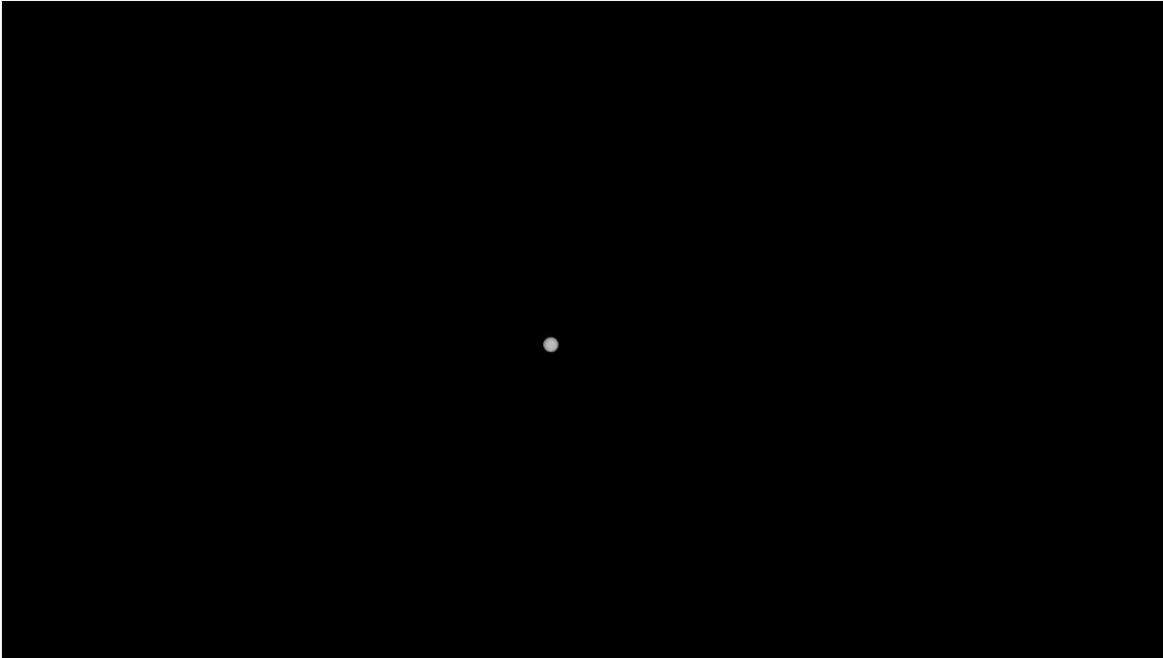
### 3.2.3 Controlador Lógico Programable (PLC)

Se cuenta con un gabinete de control donde se alojó un PLC de la marca Siemens S7-1200 AC/DC/Rly, que cuenta con 14 entradas digitales de 24V de corriente directa integradas, 10 salidas a relevador de 2A cada una, una memoria de trabajo de 75 kbytes y una velocidad de 2.5 micro segundos por operación de una instrucción en punto flotante. También cuenta con una interfaz de comunicación RS485. El poder de procesamiento de este dispositivo hace posible la programación de algoritmos extensos y de alta densidad en operaciones matemáticas, como los requeridos para el cálculo de posición solar por SPA.

### 3.2.4 Sistema de visión artificial solar

El módulo de visión artificial se encuentra compuesto de una computadora de arquitectura abierta Raspberry PI modelo 3 B+, con un procesador de cuatro núcleos Cortex-A53 de 64 bits a una velocidad de 1.6Ghz, 2 GB de memoria RAM estática y una memoria de programa de 32 GB tipo FLASH, 4 puertos USB 2.0, puerto Gigabit ethernet y comunicación Wireless IEE 802.11 (Wifi). Además, tiene un puerto estándar CSI (Camera Serial Interface) donde se conecta una cámara nativa Raspberry V2, con resolución máxima de 5 MP(Megapíxeles) en formato 2592X1944 Pixeles. Para esta aplicación se configuró para entregar una resolución de captura de 2MP en formato de 1920X1080 pixeles, haciendo uso de un filtro solar de calibre 12F y todo el sistema ensamblado en un gabinete de proyectos.

La resolución alcanzada es de aproximadamente 12 pixeles por radio promedio de sol, que corresponden a 0.375 mili-Radianes por pixel, para el cálculo del centroide solar esta resolución se ve mejorada debido a la interpolación de todos los puntos de la circunferencia solar, alcanzado resoluciones de 0.01 mili-Radianes o más. En la **Figura 1212** se muestra una imagen captura del sol a través del filtro solar, sin procesamiento de la posición solar.



**Figura 12.** Imagen cruda del Sol(1920X1080) en gris, sistema de visión

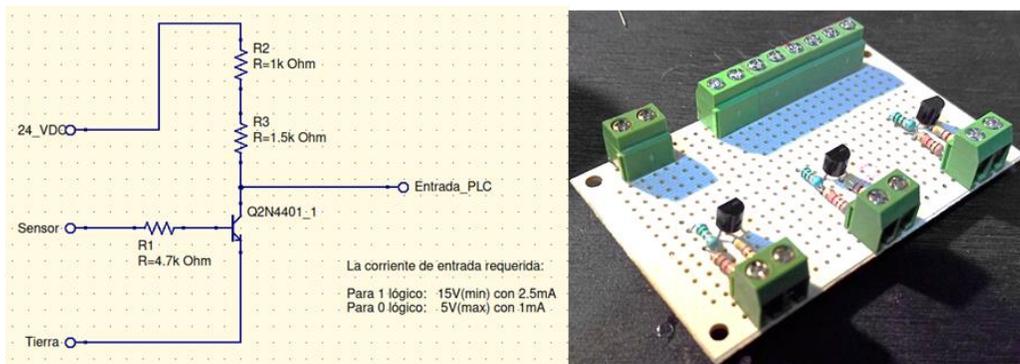
La comunicación entre el sistema de visión y el PLC se realiza a través del protocolo de comunicaciones estándar RS-485, por lo que se adaptó un dispositivo de comunicaciones RS-485 a USB de la marca Connective Peripherals, donde se envía la información de posición solar relativa al marco de la imagen. En la **Figura 13**, se muestra la disposición de los componentes internos.



**Figura 13.** Sistema de visión artificial solar

### 3.2.5 Ejes de movimiento.

Se cuenta con dos ejes de movimiento para controlar la normal de apuntamiento del sistema, el eje denominado elevación tiene un actuador tipo pistón eléctrico, mientras que el eje acimut tiene un sistema de rotatorio con tornillo sinfín-corona, ambos ejes son impulsados por motores de corriente directa (DC) de 24V. Como dispositivos de retroalimentación y medición de desplazamiento se tienen sensores tipo interruptor para el eje de elevación y del tipo encoder incremental para el eje de acimut, ambos sensores tienen salidas de 5 VDC y el PLC tiene entradas de 24VDC, por lo que se tuvo que desarrollar una interfaz de acoplamiento de niveles de voltajes para que pudieran ser leídos por el PLC. La **Figura 14** muestra el diagrama eléctrico esquemático de dicha interfaz.

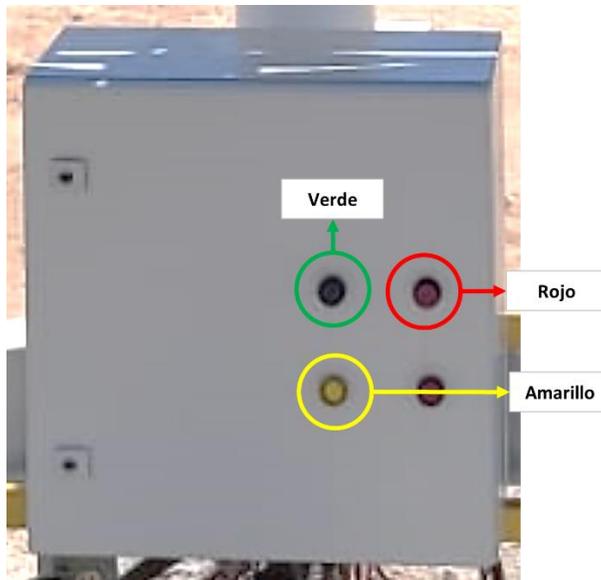


**Figura 14.** Interfaz eléctrica para señales de control

### 3.2.6 Código.

El código del dispositivo consiste en un menú de decisiones implementado con una máquina de estados finitos donde las entradas son ingresadas por un control físico de 4 botones, estos son nombrados como Stop, Start, Adelante, Atrás.

Al encender el dispositivo se inicializa en el estado Stop por defecto, y es necesario presionar el botón de Start (Comienzo) para que el sistema salga del estado de Stop. Una vez fuera, es posible navegar por un menú de 3 estados: automático, semiautomático y control manual, donde será necesario presionar el botón “Adelante” para cambiar de estado. Como ayuda al usuario, es encendida una luz asociada a cada estado, la cual indicara el estado en el que este se encuentre (azul – automático, amarillo – semiautomático, rojo – manual). Una vez seleccionado el estado deseado es necesario presionar nuevamente el botón “Start” para entrar al estado deseado. La figura 15 muestra los indicadores antes mencionados.



**Figura 15.** Indicadores visuales del sistema

#### 3.2.6.1 Modo automático.

El modo automático toma como referencia el código SPA (Algoritmo de Posición Solar), que se encarga de calcular los ángulos de elevación y acimut mediante una serie de datos locales (latitud, longitud, fecha, hora, entre otros), el cual es tomado por el sistema para, posteriormente, realizar una serie de cálculos los cuales determinaran el movimiento de los motores para localizar el heliostato en posición al sol. Una vez que el equipo este apuntando en una zona cercana a la posición solar, entra en funcionamiento el sistema de visión artificial, que manda la información de posición local, relativa a la imagen capturada al PLC por medio del protocolo RS485, donde el código corregirá los errores de posición que puedan existir para que el heliostato este directamente en dirección del sol.

Para la realización de esto, el dispositivo es constantemente retroalimentado por medio de encoders encontrados en cada uno de los motores y el dispositivo de visión.

#### 3.2.6.2 Modo semiautomático.

El modo semiautomático deja de lado el algoritmo de posición solar para hacer uso de un sistema de control semi manual, donde el usuario deberá colocar los puntos angulares de elevación y/o acimutal de manera manual mediante el código, conectado directamente al PLC o mediante su servidor web. Una vez estos datos hayan sido ingresados, el PLC

realizara una serie de cálculos para dirigir el dispositivo a los puntos deseados por el usuario.

#### 3.2.6.3 Modo Manual.

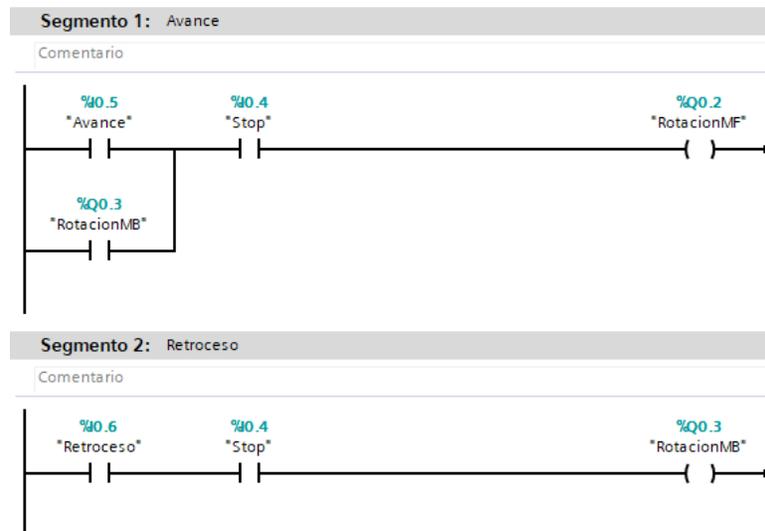
El modo manual está diseñado para que el usuario tome disposición total del dispositivo, donde, por medio del control de mando físico dirigirá al dispositivo hacia delante o atrás, pudiendo alternar entre elevación o acimut presionando el botón “Start” como toggle o palanca de estado.

## CAPITULO 4

### DESAROLLO

#### 4.1 Análisis PLC y observación del concentrador solar.

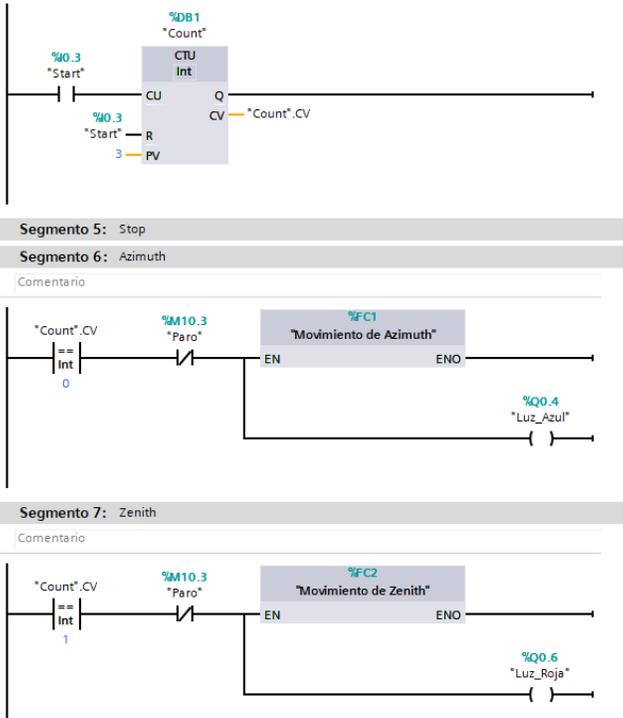
En esta etapa del proyecto fue verificado el estado y funcionamiento de los distintos dispositivos, iniciando por el PLC. Fueron realizadas una serie de códigos prueba para la evaluación de las entradas y salidas del PLC Siemens S7-1200. Estos códigos fueron enfocados en el forzado de salidas y aplicación de entradas, de modo que se pudiese definir el funcionamiento e iniciar con el control del heliostato con este dispositivo. En la **Figura 166** se presenta un trozo del código de prueba, donde se visualizan estados de avance y retroceso del motor de acimut del equipo.



**Figura 16.** Código de verificación de funcionamiento de motores

Una vez fue validado el funcionamiento del PLC Siemens S7-1200, se prosiguió a realizar pruebas en conjunto con el concentrador solar. Principalmente se cambió el cableado del equipo y se conectaron los distintos sensores y motores al PLC para hacer uso de ellos. Una vez que el concentrador solar y el dispositivo de control, estaban correctamente conectados se hizo uso de un código simple orientado al control de motores y toma de retroalimentación por sensores del equipo. Esto se hizo realizando un programa el cual contenía los movimientos esperados a futuro para el dispositivo, movimiento de elevación y acimutal. Para ello se comenzó programa el cual mueve el equipo en los ejes ya mencionados, haciendo uso de un mando manual físico que cuenta con 4 botones: “Start”, “Stop”, “Delante”, “Atrás”, todos conectados a las entradas del PLC.

En este código se colocó un contador que se incrementa cada vez que se presiona el botón “Start”, y se restablece al contar 4 unidades, proporcionando así 4 estados finitos enumerados del 0 al 3. En el estado “0” se tiene control de movimiento sobre el eje acimutal, “1” para el control de movimiento en el eje cenital y “2” un estado de reposo. En la **Figura 177** es posible observar un fragmento del código con las funciones indicadas, y en **Figura 188** y el control físico utilizado.



**Figura 17.** Cambio de selección de motor por contador



*Figura 18. Mando manual*

## 4.2 Sistema de control

El sistema de control se realiza mediante la interacción de las entradas el tipo: Control de mando físico, sensores tipo encoder y sistema de visión con comunicación por protocolo RS-485, así como de los actuadores tipo pistón y tornillo sinfín-corona, todos interconectados al PLC Siemens y programado en lenguaje escalera y SCL.

### 4.2.1 Sensores

El equipo utiliza dos sensores de posición angular y una cámara de visión artificial. Estos ayudan al equipo a tener noción del punto en el que estos se encuentran y dan retroalimentación constante al equipo. Cada motor del dispositivo cuenta con un encoder, los cuales mandan una señal por pulsos las cuales son leídas por el PLC y, por medio de ecuaciones, este determina la posición angular de cada eje. Las imágenes de la **Figura 199** y **Figura 200** se tienen respectivos encoders de cada eje acimut y elevación respectivamente.

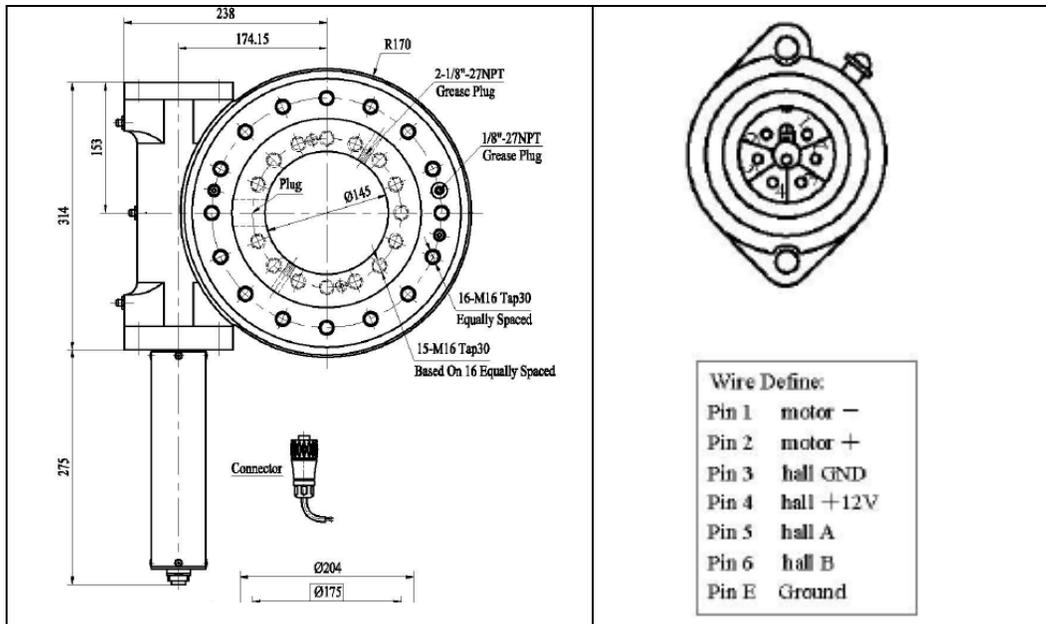


Figura 19. Encoder, eje acimut

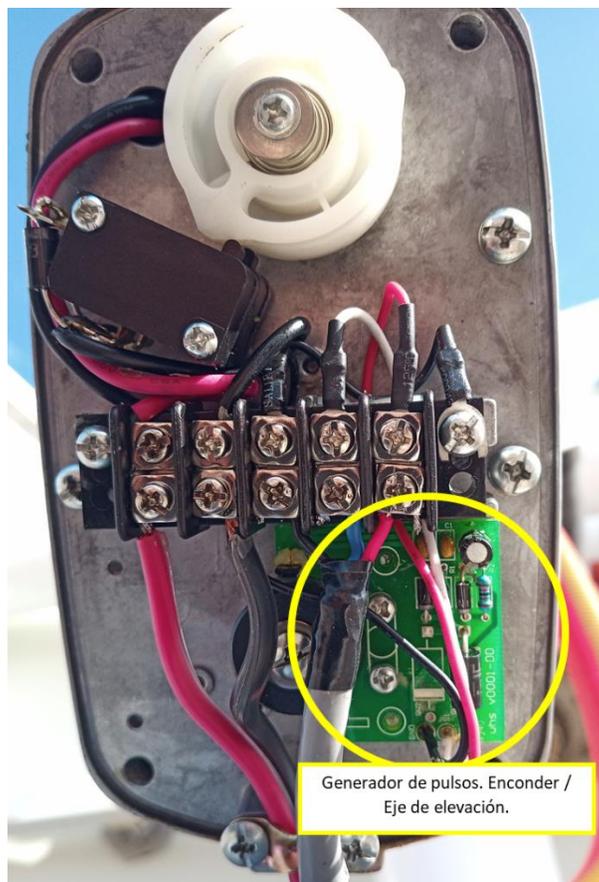


Figura 20. Encoder, eje de elevación.

Por otra parte, el sistema cuenta con una cámara de visión artificial. Que proporciona una posición relativa a la captura de imagen de muy alta resolución, y tiene el propósito de dar retroalimentación al PLC, y releva la tarea desempeñada por el cálculo de posición solar por medio de SPA (algoritmo de posición solar). Esta tarea se realiza mandando la información de la posición del sol en un número de píxeles de la cámara, por medio del protocolo de comunicación RS485. Estos datos son leídos por el PLC y por medio de una serie de ecuaciones en el código del dispositivo, realiza seguimiento solar, controlando en base a estos datos los movimientos de los motores, omitiendo el sistema de retroalimentación de los engranes. En la **Figura 21** se muestra una imagen del montaje de prueba de la cámara en la base de la estructura tipo “T”, para la realización de pruebas de control del seguimiento solar del concentrador solar.



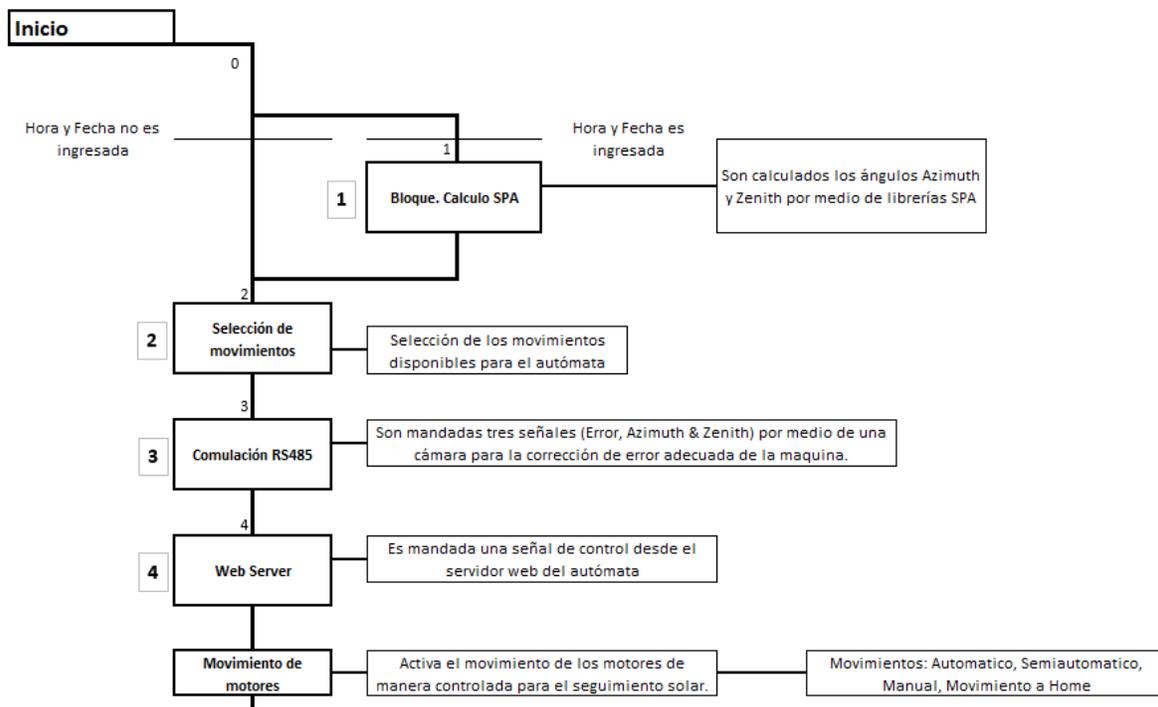
*Figura 21. Cámara de visión artificial*

### **4.3 Estructura del Código**

Se desarrolló un código enfocado al seguimiento solar. Este se encuentra organizado en distintas secciones como son:

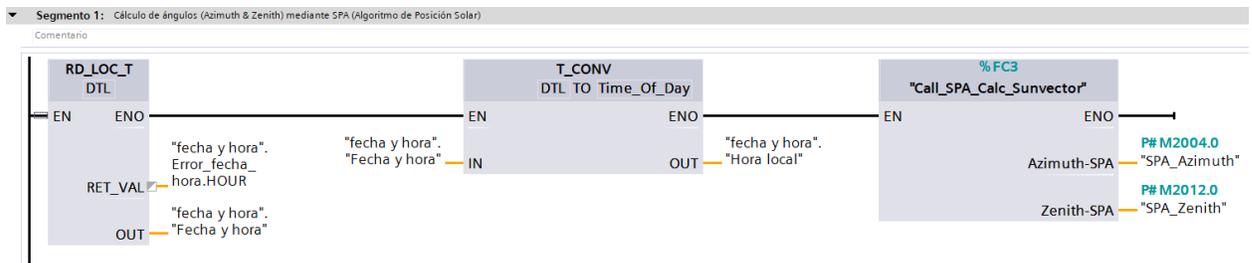
### 4.3.1 Función principal

Aquí se tienen los diferentes bloques de programación del programa en general, cada sección se describe más adelante de forma específica. La **¡Error! No se encuentra el origen d e la referencia.22** muestra la sección del diagrama de flujo principal del código y este se divide en: Bloque de cálculo SPA (1), Selección de movimientos (2), Bloque de comunicación RS485 (3), Web Server (4), y control del movimiento de los motores.



**Figura 22.** Diagrama de funciones secuenciales principal

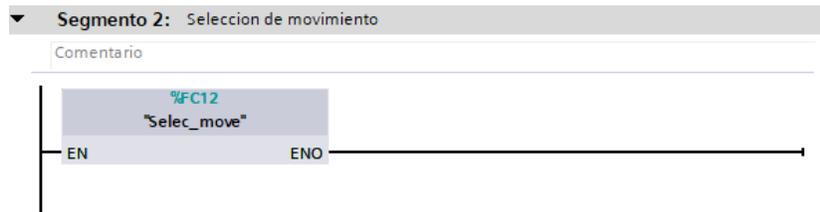
**Segmento 1:** Cálculo de ángulos acimutal y cenital mediante SPA (algoritmo de posición solar). En este segmento se provee al bloque del algoritmo SPA de la fecha y hora local en tiempo real para realizar los cálculos de posición del sistema en todo momento. Todos los demás parámetros requeridos por la función SPA se dejaron de forma fija en el código dentro de la función, ejemplo de los parámetros fijos son: longitud, latitud, altura con respecto al nivel del mar entre otros. La **Figura 2323** muestra el fragmento de código donde es llamada a la rutina SPA o segmento 1.



**Figura 23.** Código en bloques de llamado de rutina SPA

**Segmento 2.** Selección de movimiento, esta sección de código es donde el operador tiene la capacidad de seleccionar una configuración del modo de operación, y se divide en cuatro modos que son: movimiento automático, movimiento semiautomático, movimiento manual, movimiento a posición de inicio, “home”. Una vez que se ha seleccionado un modo de operación se queda registrado y se empieza a ejecutar las rutinas necesarias para la determinada operación.

Se realizó el llamado a un submenú para la selección de movimiento. Este siempre estará activo para que el operador pueda decidir en cualquier momento el modo de movimiento que desee utilizar. En la **Figura 2424** se muestra el fragmento de código al llamar la rutina de selección de movimiento en Segmento 2.



**Figura 24.** Selección de movimiento

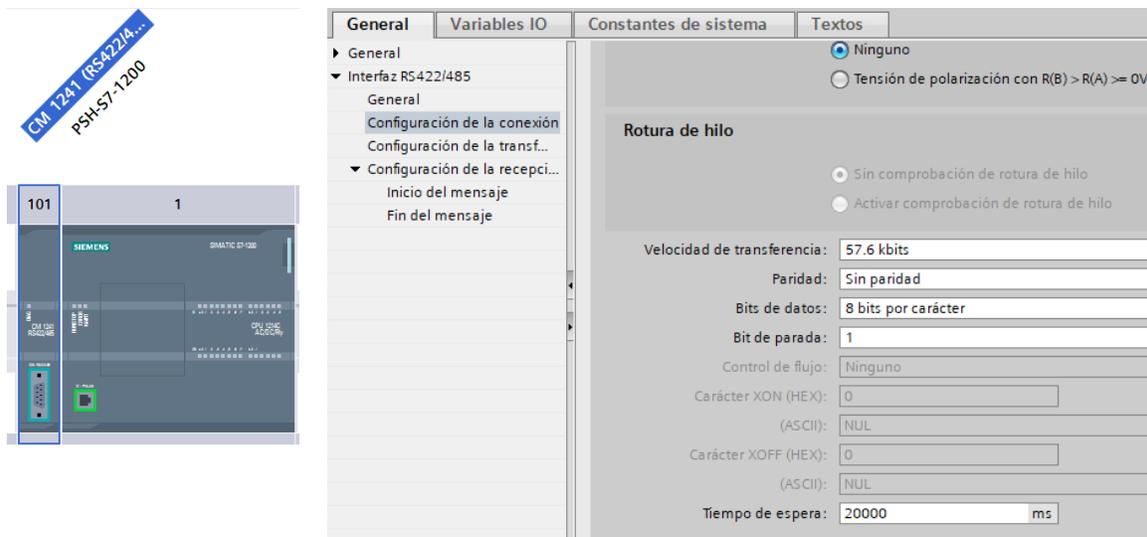
### Segmento 3. Conexión RS485 (Cámara)

En esta sección es establecido el llamado para la comunicación RS485. En este bloque se encuentra la configuración para poder recibir datos provenientes de la cámara, los cuales indicarán al equipo la posición del sol en pixeles. Se anexan imágenes “Segmento 3” y “Configuración RS485”, las cuales presentan las líneas de código donde es configurado el cuadro de función para recibir los datos por el módulo RS485. Para realizar esta configuración es necesario precargar los siguientes valores al módulo de comunicación,

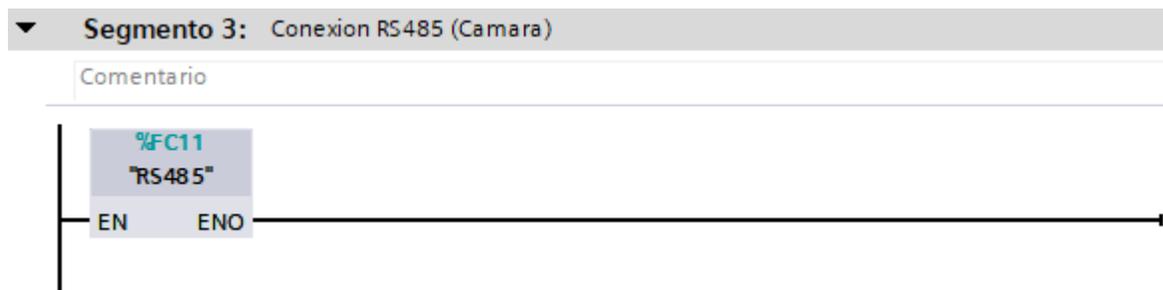
como se muestra en la **Figura 2525** el módulo CM 1241, esta configuración corresponde a los parámetros de hardware requeridos.

- Velocidad de transferencia: 57.6 kbits.
- Paridad: Sin paridad.
- Bits de datos: 8 bits por carácter.
- Tiempo de espera: 20000 ms.

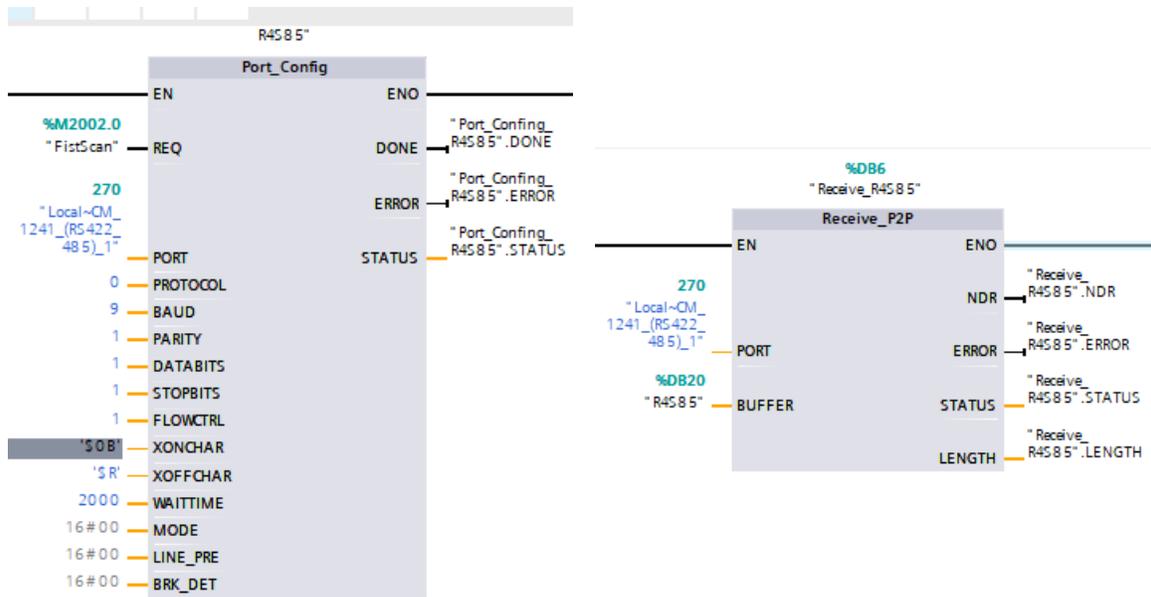
Una vez los valores han sido cargados, es diseñada una cola FIFO (First Input, First Output) del mismo tipo de variables que envíe el dispositivo externo, en la **Figura 276** se muestra el código generado por la configuración inicial de hardware y el llamado a cola. Mientras que en la **Figura 287** se muestra el diseño de la cola de información recibida de la cámara, con 4 datos tipo entero de dos bytes cada uno, estas variables se utilizan en después en el código del modo automático.



**Figura 25.** Módulo CM1241 y pantalla de configuración del protocolo RS485(hardware)



**Figura 26.** Llamada a la subrutina de atención a datos en cola RS485



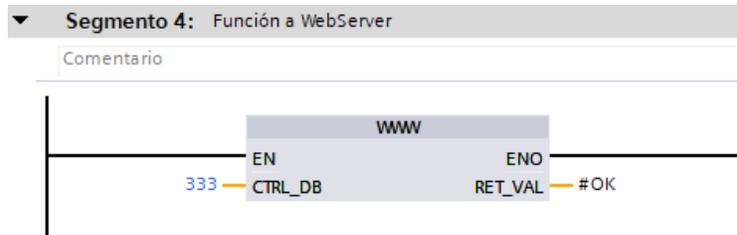
**Figura 27.** Configuración del protocolo RS485 y selección de cola para recepción

R4585				
	Nombre	Tipo de datos	Offset	Valor de arranq...
	Static			
	Basura 1	Int	0.0	0
	Basura 2	Int	2.0	0
	Azimuth	Int	4.0	0
	Zenith	Int	6.0	0

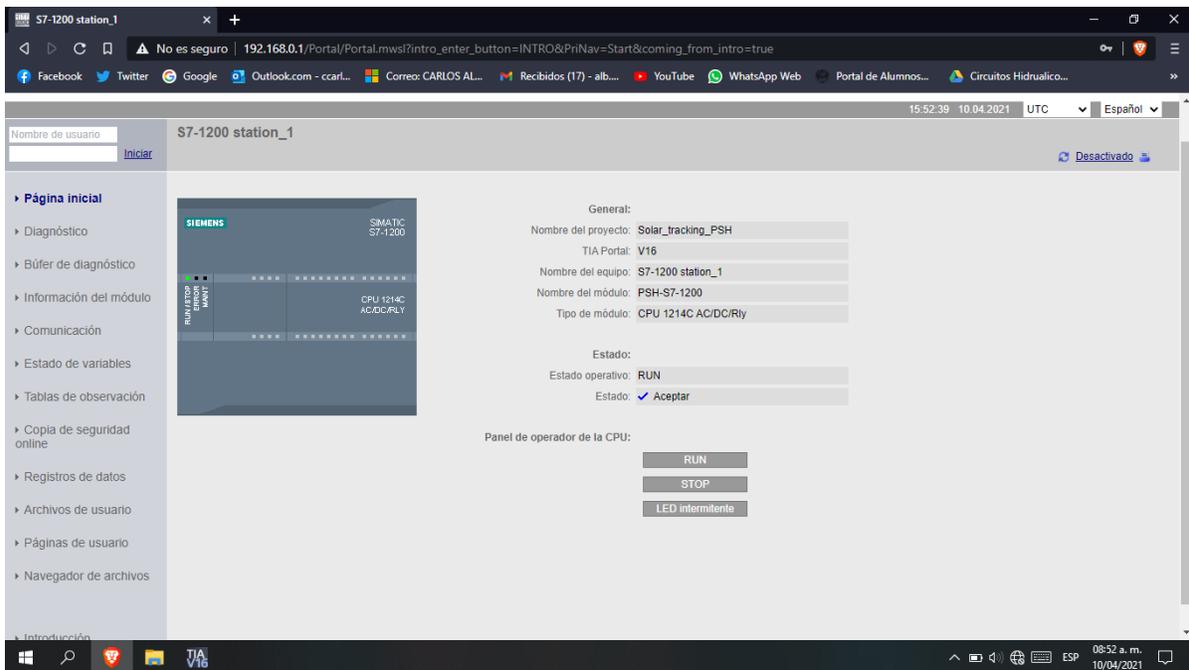
**Figura 28.** Diseño de cola (FIFO) de recepción de datos RS485

#### Segmento 4. Subrutina de servicio WebServer.

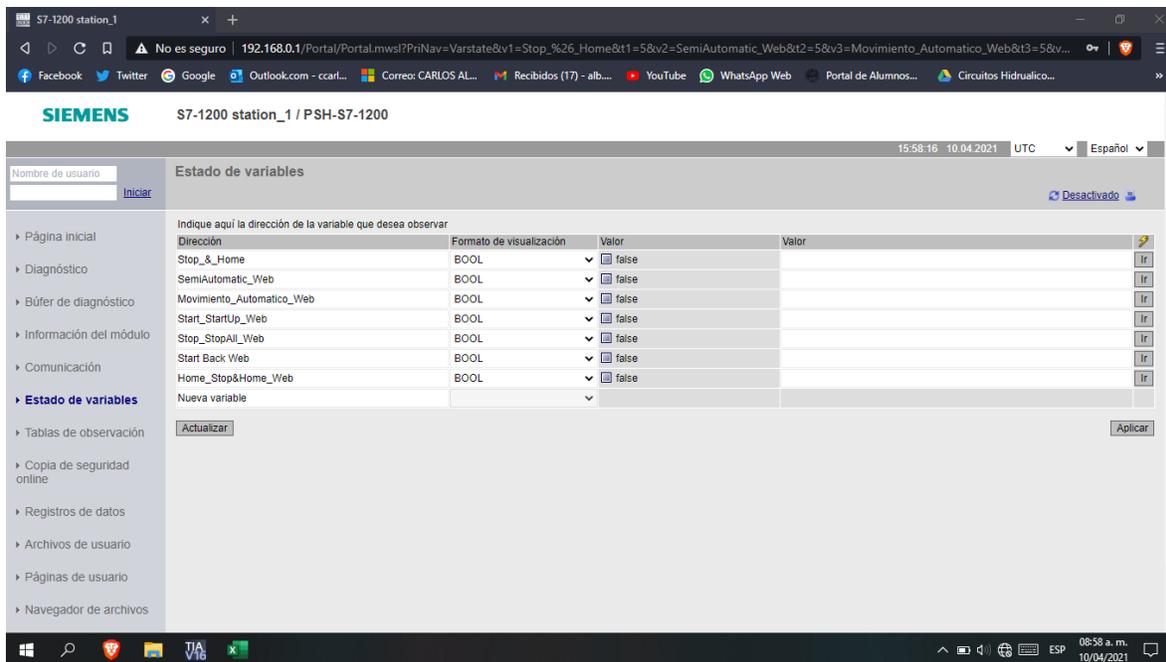
En este segmento se encuentra el bloque de función para la activación del servidor web del equipo. Una vez el equipo está conectado a la red, es posible configurar y ejecutar el sistema de control desde una computadora remota a través de la página web del PLC, el usuario tiene la posibilidad de escoger qué tipo de movimiento desea realizar (automático, semiautomático, manual, movimiento a home); ingresar datos, analizar los datos del equipo y monitorear estados de las distintas tareas, entre otras funciones. En la **Figura 299** se muestra la llamada a la subrutina, mientras que las **Figuras 30** y **31** se muestran tanto la página principal del web-server, así como los tipos de variables que se pueden modificar y/o monitorear.



**Figura 29.** Llamada a subrutina de servicio a Webserver



**Figura 30.** Página principal del Servido tipo WEB



**Figura 31.** Variables internas del programa configurables desde computadora remota

## Segmento 5. Tipos de movimiento

Esta sección se compone de los segmentos del 5 al 8, con la finalidad dirigir el sistema a distintas funciones como son: movimiento automático, movimiento semiautomático, movimiento manual y movimiento a “home”. Además de los movimientos mencionados anteriormente, el equipo cuenta con un estado de reposo al momento de iniciar y cuando aún no ha sido seleccionada alguna de las funciones, que se puede considerar como un estado más de los distintos tipos de movimientos del equipo (sin hacer nada). Para ingresar a uno de estos segmentos es necesario cumplir con una serie de condiciones seleccionadas en el segmento 2. En la **Figura 32** se puede observar el fragmento de código de dicho segmento.

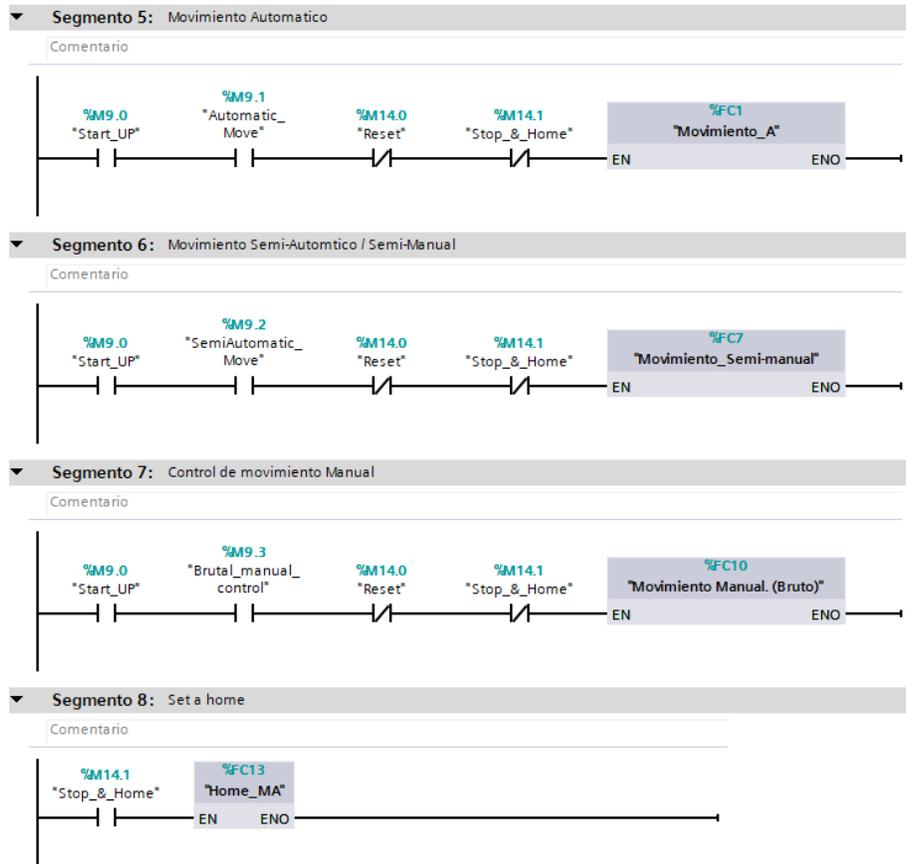
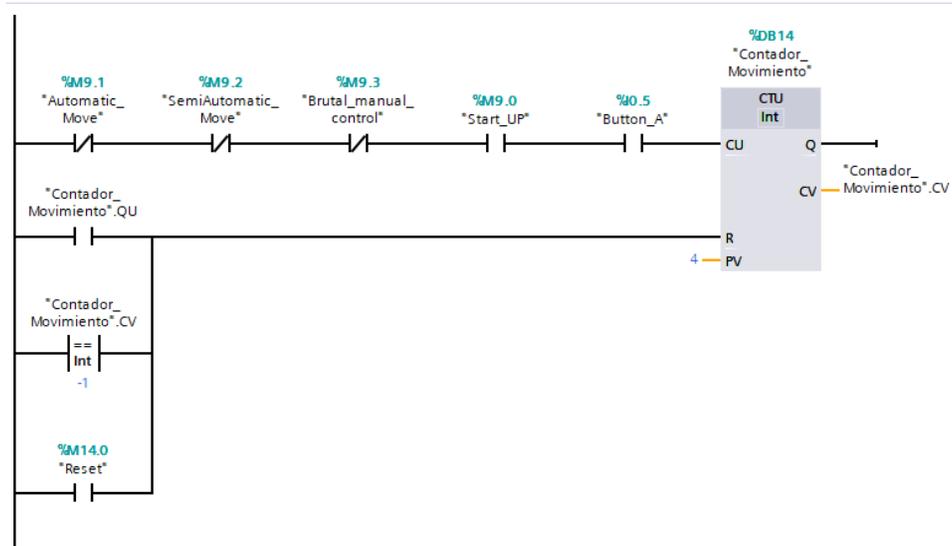


Figura 32. Tipos de movimientos

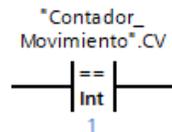
### 4.3.2 Selección de movimientos

Como se menciona en el punto anterior, este es un submenú donde se encuentran las secuencias para el llamado de los tipos de movimiento. Consta de un sistema de decisión basado en entradas físicas y software. Es programado un contador, el cual toma la función de un sistema "toggle" (palanca o switch) y una serie de segmentos con distintas condiciones, donde una de estas es una función de "igualdad" ligada al contador con un numero definido (estados finitos con incremento secuencial). La **Figura 3333** muestra las condiciones necesarias por poder realizar un cambio de estado por contador. Estas condiciones son las distintas "banderas" o bits correspondientes a la activación de cada uno de los movimientos, los cuales evitan que, una vez que alguno es activado, no es posible volver a cambiar el contador a un estado seleccionado previamente, solo se puede seleccionar estados incrementales, esto es manejado por motivos de seguridad. Debido a lo anterior, se desarrollaron distintas secuencias para entrar o salir de algún modo de

movimiento del equipo. En la **Figura 3434** se muestra una función de comparación del contador con el entero “1”, indicando que se está seleccionando el modo de “Movimiento Automático”.



**Figura 33.** Condiciones de incremento de contador

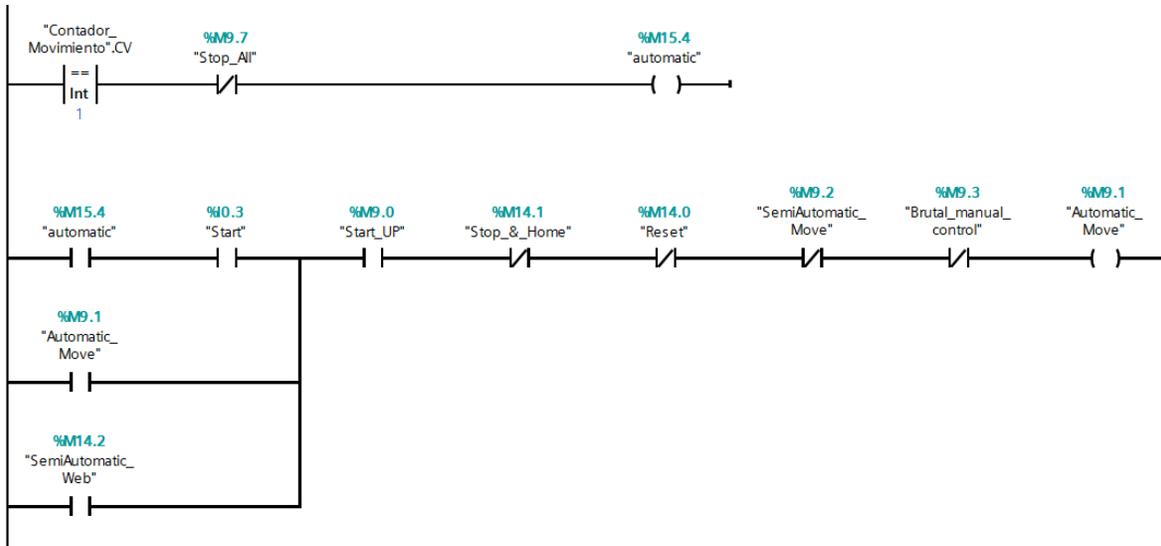


**Figura 34.** Función de comparación con el entero "1"

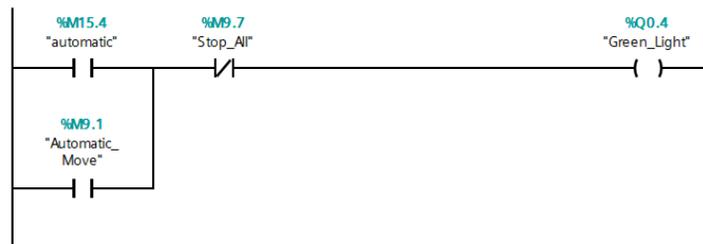
Se implementó un juego de luces indicadoras, para dar a conocer al operador en qué modo de operación se encuentra, es decir cada vez que el operador cambia de modo se enciende una luz diferente, el orden y código de colores son los siguientes:

- |   |   |                |   |                            |
|---|---|----------------|---|----------------------------|
| 1 | → | Automático     | → | Verde.                     |
| 2 | → | Semiautomático | → | Amarillo.                  |
| 3 | → | Manual         | → | Rojo.                      |
| 4 | → | Stop           | → | Ningún color es encendido. |

En las Figuras **Figura 355** y **Figura 366** se muestra el segmento del código correspondiente al inicio para el modo automático y el encendido de su luz correspondiente. Cabe mencionar que el resto de los segmentos cuentan con la misma estructura y funcionamiento.

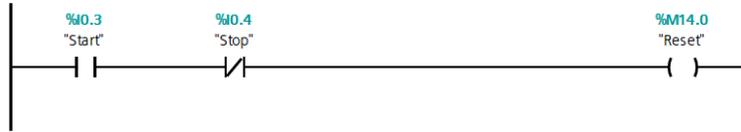


**Figura 35.** Condiciones para operar en Movimiento Automático



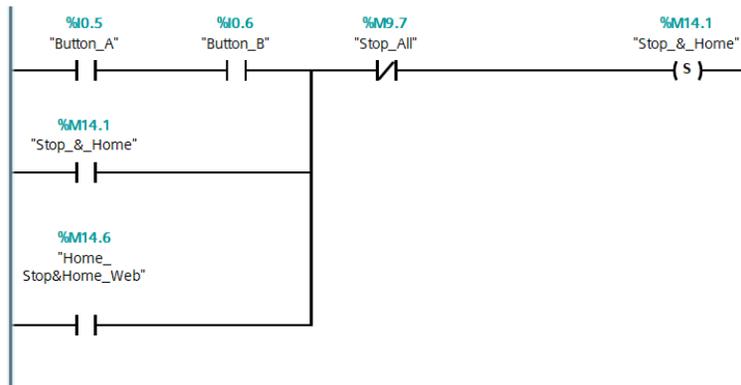
**Figura 36.** Código de encendido de luz indicadora para operador

Otra forma para realizar el cambio de selección activando una secuencia de escape, donde es necesario presionar los botones “Start” y “Stop” de manera simultánea, esto activará el bit llamado “reset” (reinicio) y desactivará la secuencia o modo de movimiento que esté en funcionamiento. Una vez este sea activado el equipo se detendrá de manera automática en el punto que se haya accedido a esta secuencia. Es de vital importancia que el operador del equipo pueda hacer uso de esta maniobra para detener el equipo de forma rápida, por lo que es posible acceder a esta secuencia en cualquier momento que se desee. La **Figura 377** muestra el código para acceso inmediato a la secuencia “reset”.



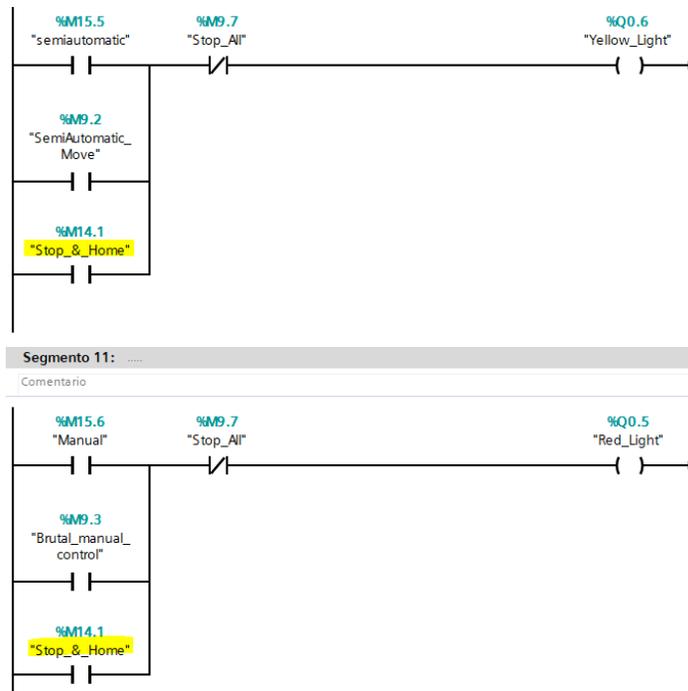
**Figura 37.** Secuencia de Reset

Por último, fue desarrollado un modo de movimiento que, al igual que “reset”, funciona en cualquier momento que sea presionado una secuencia de botones específica. El propósito de este último modo de movimiento es regresar el equipo a su posición de inicio o “home”, en caso de ser necesario. Para activarlo es necesario presionar simultáneamente los botones con indicadores de “flechas” (botón blanco y botón negro de la botonera). En la **Figura 388** se puede observar el segmento de activación de esta función.



**Figura 38.** Código para envío a "home" desde mando físico

Cuando este es activado el equipo vuelve a su posición de inicio o home de manera automática. Una vez este acaba su movimiento, el sistema se detiene y vuelve a estado de reposo en espera de recibir nuevas indicaciones. Cuando este es iniciado se activan los indicadores led amarillo y rojo, como se muestra en el segmento de código de la **Figura 399**, con el fin de que el usuario se percate de que este modo ha sido activado.



**Figura 39.** Activación de luces indicadoras de mando a "home"

Aunado a esto, en cada segmento correspondiente a un estado de movimiento existe una función con terminación "web", propuesto para poder activar estas funciones directamente del servidor web, sin tener la necesidad de estar frente al equipo o la utilización de un control manual. En la **Figura 4040** se muestra el diagrama de secuencias correspondiente a la selección de movimientos donde se incluyen las condiciones requeridas para la operación de cada uno de ellos.

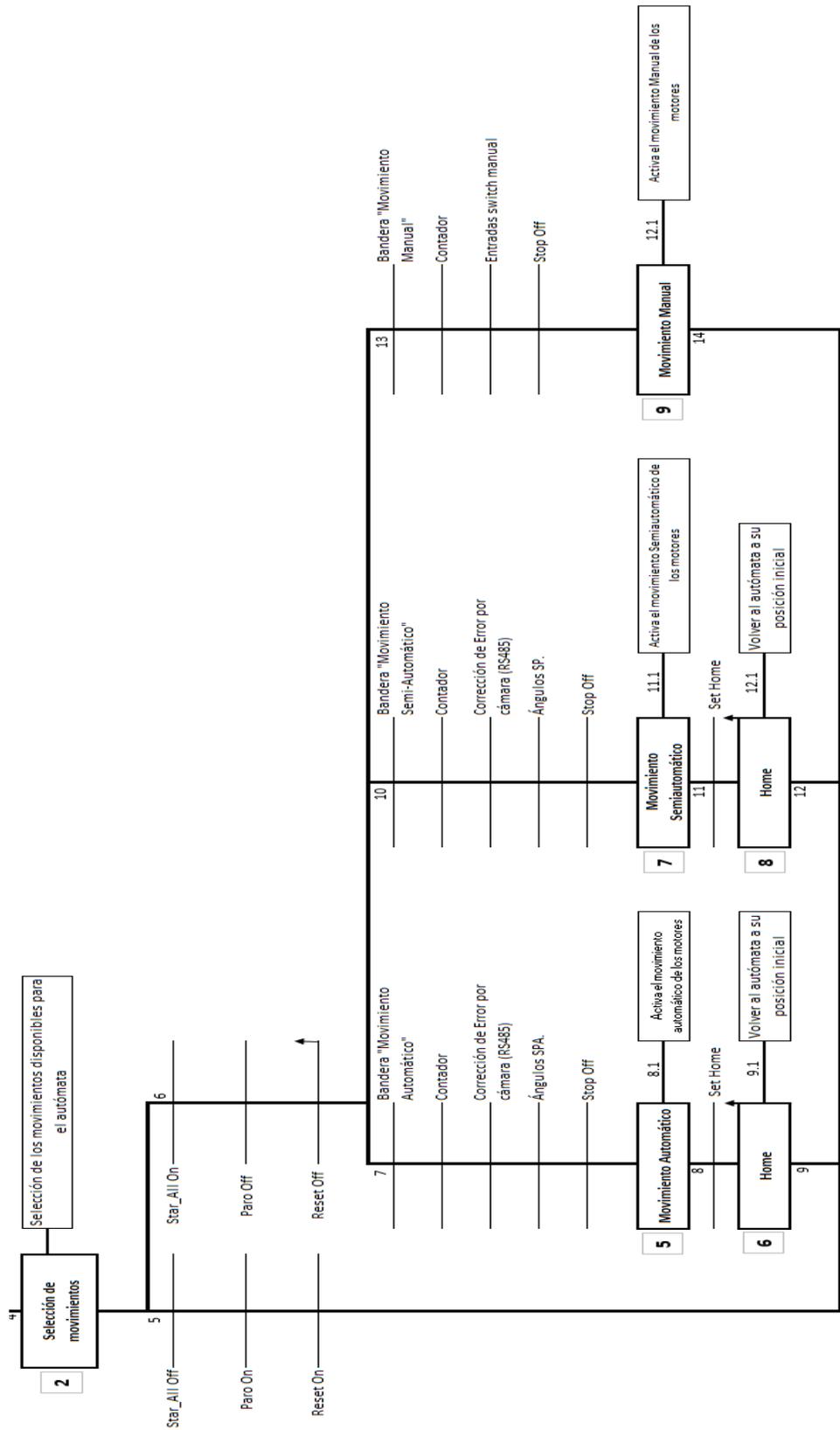
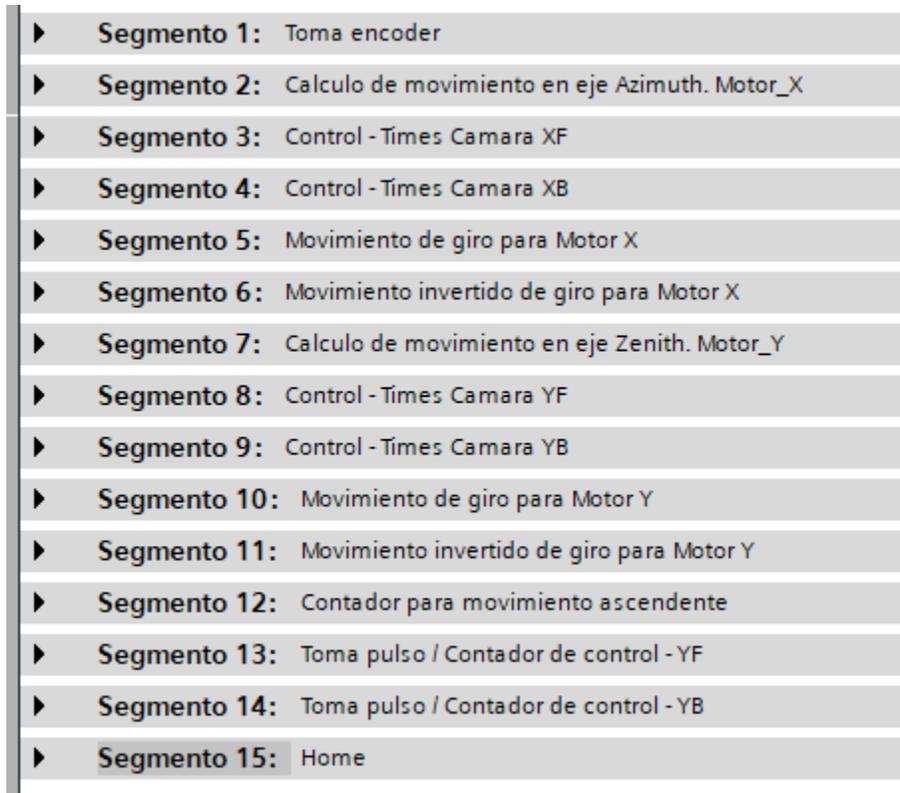


Figura 40. Diagrama de secuencias de "Movimientos"

### 4.3.3 Movimiento automático

La programación del movimiento automático consta de 15 segmentos, como se muestra en la **Figura 4141**. Los cuales muestran funciones de movimiento o submenús, que trabajan en conjunto para realizar el seguimiento solar deseado, donde todos los segmentos son regidos por el control encontrado en los cálculos angulares acimutal y cenital, encontrados en los segmentos 2 y 7.



▶	Segmento 1: Toma encoder
▶	Segmento 2: Calculo de movimiento en eje Azimuth. Motor_X
▶	Segmento 3: Control - Times Camara XF
▶	Segmento 4: Control - Times Camara XB
▶	Segmento 5: Movimiento de giro para Motor X
▶	Segmento 6: Movimiento invertido de giro para Motor X
▶	Segmento 7: Calculo de movimiento en eje Zenith. Motor_Y
▶	Segmento 8: Control - Times Camara YF
▶	Segmento 9: Control - Times Camara YB
▶	Segmento 10: Movimiento de giro para Motor Y
▶	Segmento 11: Movimiento invertido de giro para Motor Y
▶	Segmento 12: Contador para movimiento ascendente
▶	Segmento 13: Toma pulso / Contador de control - YF
▶	Segmento 14: Toma pulso / Contador de control - YB
▶	Segmento 15: Home

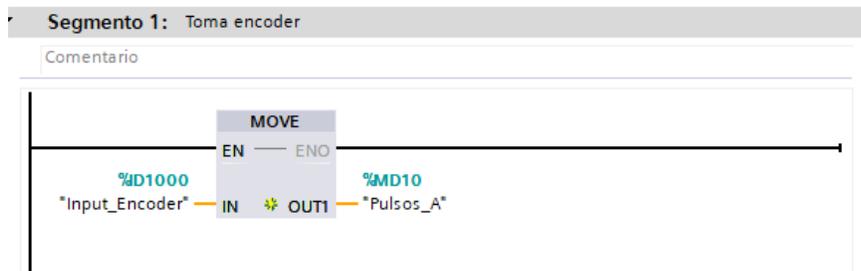
*Figura 41. Segmentos movimiento automático*

#### 4.3.3.1 Lectura de pulsos por encoder

El encoder utilizado en el eje acimutal es del tipo incremental con mil pulsos por revolución y las señales en cuadratura A, B desfasadas 90° una de otra. Como el encoder se encuentra conectado directamente al eje del motor; entrega pulsos a una alta velocidad. Por lo que se requirió activar la opción de contador rápido HSC1(High Speed Counter), en la **Figura 4242** como se muestra la activación y tipo de configuración para el contador de alta velocidad, posteriormente es necesario continuar con la configuración de las entradas que

serán necesarias para el sensor. En este caso se hace uso de las dos primeras entradas: I0.0 e I0.1, que fueron configuradas en modo “contaje” o acumulador en una fase de servicio de contador A/B cuádruple y les fue dada la dirección inicial ID1000 e ID1003, respectivamente.

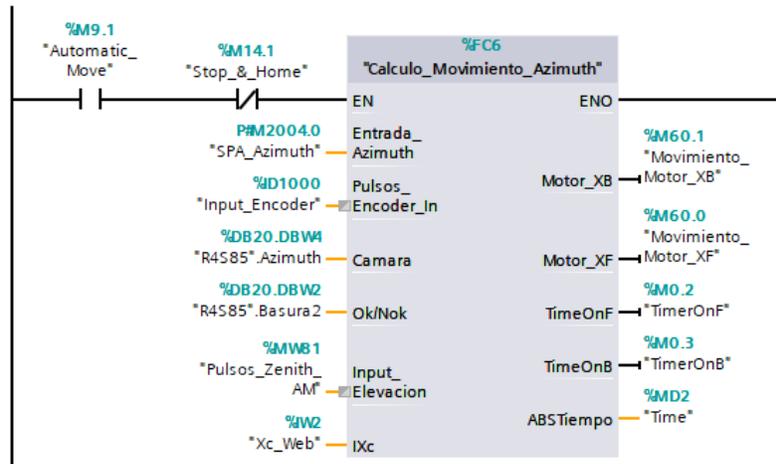
**Figura 42.** Configuración de encoder en modo HSC1



**Figura 43.** Llamada a la actualización del acumulador de encoder acimut

El cuadro de función mostrado en la **Figura 43** tiene la tarea de tomar los datos del encoder del eje acimutal y colocarlos en una variable de memoria, con la finalidad de fijar una posición específica del eje acimutal en todo el ciclo de programa.

#### 4.3.3.2 Cálculo de movimiento en eje acimutal



**Figura 44.** Llamado de la función de movimiento en eje acimutal

El cuadro de función presentado en la **Figura 4444**, es una subrutina toma una serie de valores como entradas para realizar cálculos específicos programados en SCL:

Entradas:

- Cálculo del Angulo de acimut del código SPA.
- Pulsos de encoder.
- Retroalimentación por cámara y conexión RS485.
- Bits indicadores.
- Pulsos en encoder de eje de elevación.

Aunado a esto, se generan una serie de salidas de los cálculos realizados dentro del código del cuadro de función.

Salidas:

- Bits de movimiento y dirección del motor.
- Bits para activar timers de control.
- Variable de tiempo para timers.

Para el correcto funcionamiento de estas entradas y salidas, se realizaron una serie de instrucciones dentro del cuadro de función, el cual desarrolla de manera lógica la secuencia de movimientos de los motores tomando en cuenta la retroalimentación directa de los dispositivos externos y sensores

En la **Figura 455** se muestra el diagrama de secuencia del cuadro de función llamado "calculo\_movimiento\_acimut". Para iniciar este segmento es necesaria la activación del estado de movimiento automático. Una vez este es activado, el cuadro de función toma de sus entradas la señal de los bits indicadores, mostrados en el cuadro como Ok/Nok. Cuando la cámara tiene una detección verificada de posición solar dentro de la imagen capturada envía un valor "1" (Ok), este valor activa seguimiento por cámara iniciando así el control por visión artificial, cuando el valor es "0" (Nok), entra en operación el modo de seguimiento por cálculo de vector solar a través de la rutina SPA.

Debido a lo anterior mencionado, es posible dividir este cuadro de función en 2 segmentos distintos, estos los podemos definir como:

- Control por cámara de visión
- Control por código SPA.

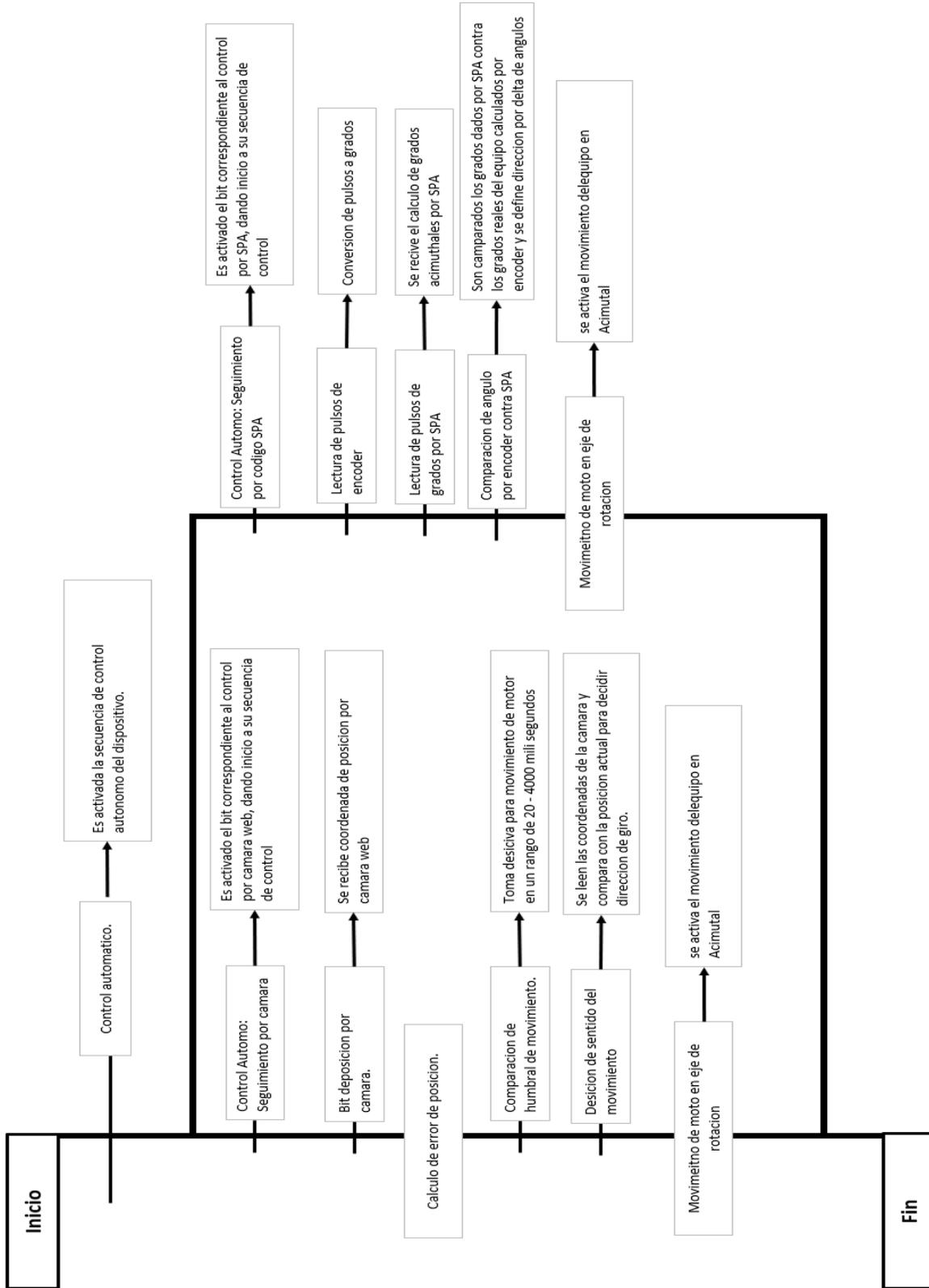


Figura 45. Mapa de función, movimiento acimutal

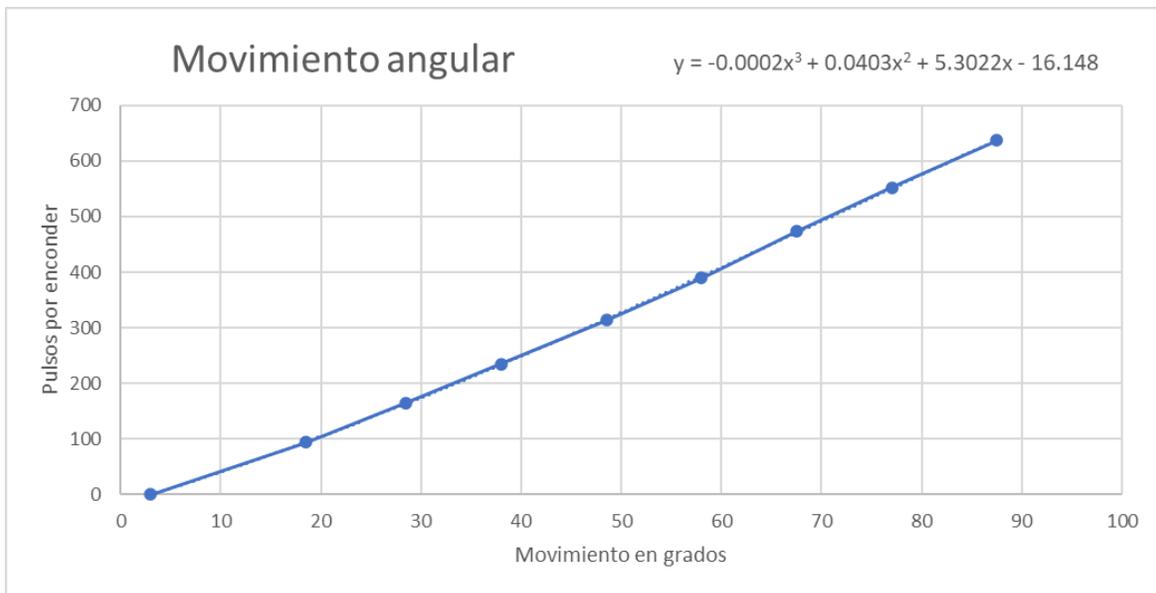
### 4.3.3.1 Cálculo de movimiento en eje cenital

El funcionamiento del movimiento cenital cuenta características similares movimiento del eje acimutal como se muestra en la **Figura 466**.



Figura 46. Mapa de función, movimiento cenital

Pero existen dos diferencias dependientes del hardware utilizado, un encoder por pulsos incrementales de 1 solo canal y un actuador lineal para provocar un movimiento angular. Para obtener la posición actual del eje cenital se requirió el uso de un registro de posición que fuera capaz incrementar y decrementara la posición dependiendo de la dirección de movimiento del motor mismo, es decir si se mueve el motor en un sentido los pulsos de entrada incrementan el registro y si el motor se mueve en sentido inverso los mismos pulsos de entrada ahora decrementan el registro posición, además se requirió caracterizar el equipo para obtener un modelo de conversión entre los pulsos del acumulador en el registro de posición y la posición angular real del equipo, debido al actuador lineal; la curva de caracterización se muestra en la **Figura 477**. Debido a esto es necesario realizar una serie de operaciones matemáticas las cuales modelan el movimiento angular del equipo por medio de los pulsos.



**Figura 47.** Curva característica del eje cenital

```
#Grados := 90 - #Grados_Zenith;
#Pulsos := ((-0.0002) * (#Grados * #Grados * #Grados)) + (0.0403 * SQR(#Grados)) + (5.3022 * #Grados) - 16.148;
#Pulsos_Round := ROUND(#Pulsos);
```

**Figura 48.** Conversión de ángulo a pulsos de encoder

#### 4.3.3.2 Control por cámara

Como se comentó en el punto anterior, la cámara manda una señal de manera continua al PLC, esta información se recibe aproximadamente 3 veces por segundo y se guarda en la cola de memoria configurada para esto. Los datos recibidos son tres:

- Valor que indica posición solar dentro de la imagen capturada (Ok/Nok)
- Posición horizontal del sol en pixeles dentro de la imagen
- Posición vertical del sol en pixeles dentro de la imagen

Con el valor definido como #Ok/Nok, se toma la decisión de realizar el control por cámara o por SPA. Si el control es por cámara de visión se utilizan los valores de la posición solar relativa a la imagen en pixeles. La cámara se encuentra colocada para que los valores de la posición horizontal(X) de la imagen capturada concuerden con eje de rotación acimut, por lo que se utiliza un valor dentro de variable de control(#IXc) para mantener la posición horizontal del sol en ese punto. El rango de valores horizontales de la posición en pixeles va desde 1 hasta 1920 pixeles, por lo que el centro de la imagen corresponderá a #IXc=960, como la cámara no tiene una alineación perfecta con respecto a la estructura y a la normal de apuntamiento al sol el valor de #IXc es configurable para que la posición dentro de la imagen corresponda a una alineación paralela al vector de apuntamiento o normal del equipo.

La cámara manda una señal del número de pixeles en los cuales se encuentra el sol, en caso de ser detectado. El código toma esta señal y le resta un valor definido previamente como #IXc que almacena el valor 793 pixeles (previamente calibrado), de modo que, al restar el valor obtenido por la cámara con este, nos proporcione el error en pixeles de posición en el eje acimutal, como se muestra en la **Figura 499**.

```
IF #IXc = 0 THEN
    #Xc := 793;
END_IF;

#Error := #Camara - #Xc;
```

**Figura 49.** Error de apuntamiento eje acimutal

Una vez calculado el error pasa a una nueva función, para calcular el tiempo de encendido del relevador que controla el movimiento de acimut, este tiempo tiene valores de

milisegundos, según el error obtenido. Esto es realizado mediante una regla de 3, como se muestra en la **Figura 500**.

```
#Tiempo := ((#Error * 20) / 3) * (#Fn2);  
#Tabs := ABS(#Tiempo);
```

*Figura 50. Cálculo de tiempo de encendido de motor, eje de acimut*

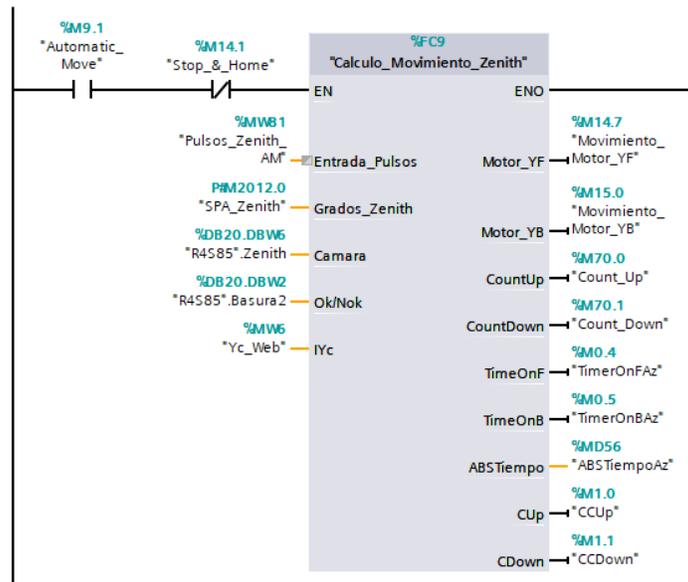
Posteriormente este tiempo se limita un rango de operación de 20 a 4000 ms, donde 20 mS es el tiempo mínimo requerido para el relevador alcance a accionar el movimiento del motor y se logre mover solo un poco y 4000mS el tiempo máximo de encendido. Una vez se haya alcanzado el tiempo, el equipo realizará una nueva lectura y repetirá el ciclo hasta llegar al objetivo una vez cada 5 segundos. Logrando mover el equipo al punto central del sol ó posición óptima de concentración solar.

Un procesamiento similar al eje de acimut se realiza para el eje cenital, que no se incluye debido a que se redundaría en la información presentada.

#### 4.3.3.3 Control por código SPA

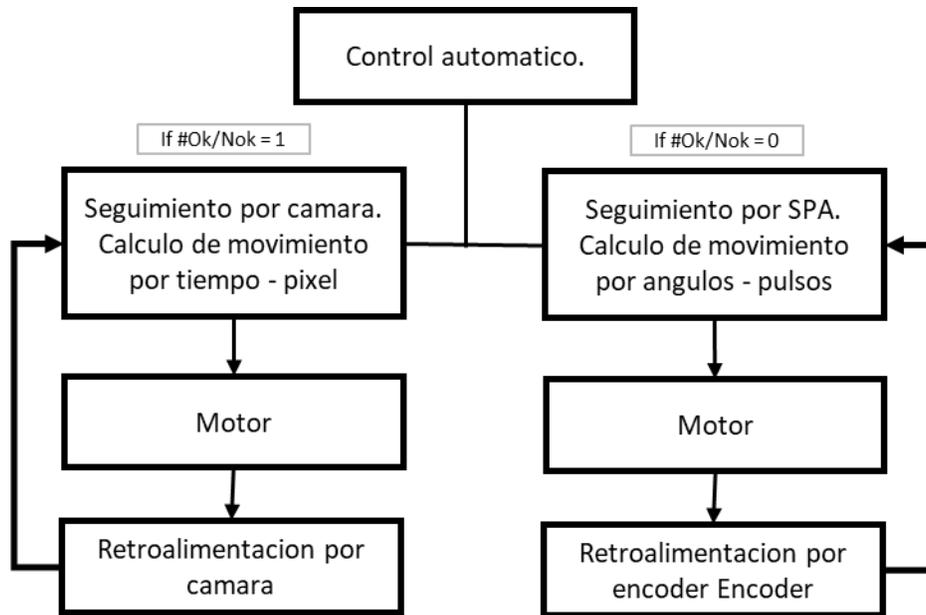
El control por SPA entra de manera automática al iniciar la secuencia de control automático en conjunto de la bandera del bit Ok/Nok apagada (bit en 0), como es posible observar en la **Figura 5151**, en el segmento Ok/Nok.

Este segmento de código inicia con la lectura de los pulsos obtenidos del encoder y transformándolos en grados. Una vez la razón de pulsos es transformada en su equivalente en grados, se compara contra la razón obtenida por SPA, de modo que el equipo buscara acercarse al ángulo del algoritmo de posición solar, generando una retroalimentación constante de los grados por encoder, hasta que el delta de ambos datos (SPA y encoder) sea lo más cercano a cero.



**Figura 51.** Llamada a cuadro de función de control por cálculo SPA

En resumen, el movimiento automático opera con la información proporcionada por el sistema de visión artificial si se tiene una confirmación de posición válida Ok/Nok=1, en caso contrario Ok/Nok=0 (que es el caso por defecto) el sistema automático opera con el procesamiento matemático de posición solar entregado por el algoritmo SPA. La **Figura 5252** muestra un mapa conceptual de este movimiento.

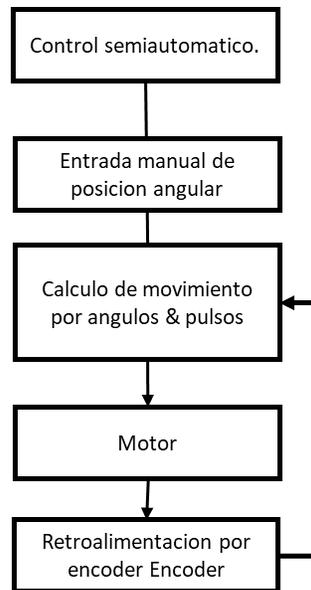


**Figura 52.** Mapa conceptual, movimiento automático

#### 4.3.4 Movimiento semiautomático.

El movimiento semiautomático guarda muchas similitudes con el movimiento automático, con la diferencia de la eliminación de retroalimentación por cámara y por código SPA. En este movimiento es cargado un ángulo en concreto de manera manual por el usuario y el equipo realizara una serie de cálculos para llegar al punto indicado. Estos consisten en la transformación de los pulsos del encoder en grados y comparando ambos factores (grados deseados por el usuario contra grados calculados mediante los pulsos de encoder) para definir el sentido y la dirección de giro.

De este modo, podemos definir un diagrama de función como el mostrado en la **Figura 5353**, donde se genera una retroalimentación constante por el encoder hacia el sistema de control sobre la posición del equipo hasta llegar al punto deseado.



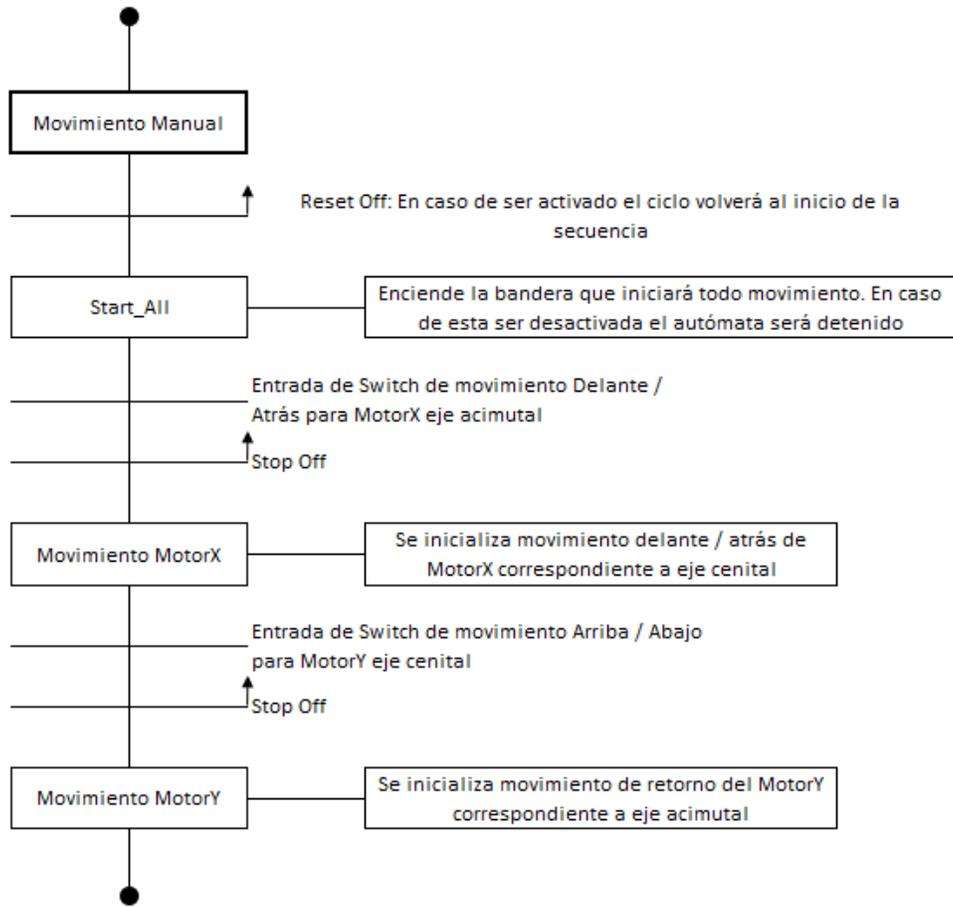
**Figura 53.** *Movimiento semiautomático*

#### 4.3.5 Movimiento manual.

El movimiento manual consta de una serie de secuencias simples. Consta de un código de 7 segmentos, donde es definido la secuencia de movimientos mediante un contador el cual tiene la finalidad de funcionar como un sistema toogle o palanca, el cual cambiará de estado presionando un botón.

Aquí tenemos un funcionamiento de menú, al igual que en el apartado “selección de movimientos”. En este estaremos controlando al equipo con el mando de control mostrado en la **Figura 188** control físico. Tendremos la opción de cambiar entre el movimiento de elevación o cenital mediante el botón de color verde, o “Start”. Para ser capaces mover el dispositivo es necesario presionar los botones blanco y negro, o fleja adelante o fleja atrás, de este modo el equipo se moverá por el tiempo en que mantengamos presionado el botón.

De esta manera, podemos definir un diagrama de secuencias como el mostrado en la **Figura 5454**.



**Figura 54.** *Movimiento manual*

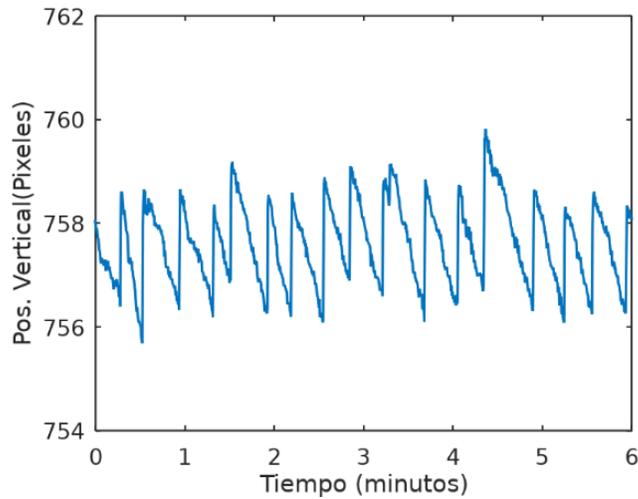
## CAPITULO 5

### RESULTADOS

Se realizaron una serie de pruebas para verificar la precisión de control alcanzada por el sistema de visión de artificial, así como la robustez del sistema de control de motores por medio de relevadores, con una metodología ON/OFF controlando el tiempo de encendido en base a la respuesta del motor. Se realizó la validación del correcto funcionamiento del equipo, operándolo de forma continua y posteriormente evaluando las capturas del seguimiento realizado por la cámara de visión.

#### 5.1 Movimiento en eje de elevación.

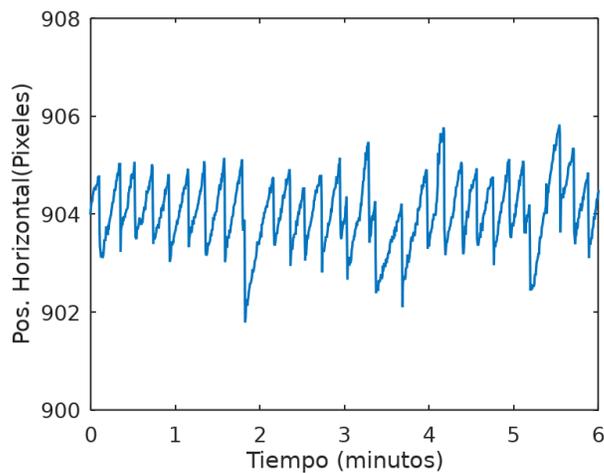
En la imagen de la **Figura 55** se muestra las correcciones de posición realizadas por el eje de elevación o cenital en modo automático, empleando la retroalimentación por visión artificial. Se puede observar como el centroide del sol se desplaza de la parte superior a la parte inferior lentamente de forma continua, mientras que las correcciones por el actuador se realizan de abajo hacia arriba, manteniendo la posición del centroide entre los pixeles 755 a 760 aproximadamente, es decir en rango de 5 pixeles o lo que es lo mismo 1.87 miliradianes de rango. También se puede observar que se realizan poco más de 3 ajustes por minuto.



**Figura 55.** Corrección de motor de elevación

## 5.2 Movimiento en eje de acimutal.

En la imagen de la **Figura 56** se muestra las posiciones del centroide del sol en el eje acimutal, con el equipo funcionando en movimiento automático con retroalimentación por cámara de visión, donde se puede apreciar el movimiento aparente del sol de forma continua con dirección hacia arriba y presentando corrección de posición en dirección hacia abajo; se puede observar que la posición del sol se mantiene dentro de los píxeles 902 al 906 con un rango de 4 píxeles o 1.496 miliRadianes. También se aprecia que el sistema realiza 5 ajustes o correcciones a la posición acimutal por minuto.



**Figura 56.** Corrección de motor - acimutal

Una vez que es validado el funcionamiento del equipo, son realizadas pruebas con la finalidad de estresar al equipo y al sistema de control para validar el comportamiento y la eficacia de este.

Una prueba de robustez del sistema de control por visión artificial fue la de simular oclusiones en la cámara, que regularmente pueden ser causadas por nubes o incluso aves que se interpongan entre la luz solar y la cámara. Estas oclusiones son emuladas con una placa de lámina sujeta a un mástil cubriendo la zona de visión de la cámara como se muestra la imagen de la **Figura 57** por un lapso de 2 minutos de oclusión cada 5 minutos.

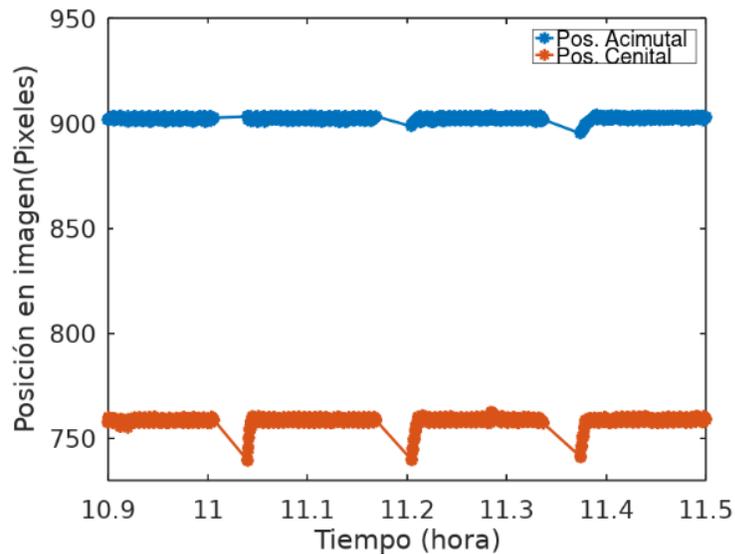


**Figura 57.** Obstrucción de cámara, simulación paso de nubes

Cuando se obstruye la visión de la cámara el equipo entra en el estado de seguimiento por SPA, dejando de lado el seguimiento por cámara al no poder detectar el sol, validando el funcionamiento correcto del código. De este modo, el equipo continúa en funcionamiento hasta volver a detectar el sol y reanudar el seguimiento basado en cámara de visión.

En la **Figura 58** se muestra el seguimiento solar reflejado por la cámara, destacando de color azul las correcciones realizadas por el eje acimutal y de naranja las correcciones en el eje de elevación. La línea gruesa que se muestra en el eje acimutal representa la lectura

de posición de acimut en la cámara de visión, mientras que la misma línea presenta una ausencia de información representada con zonas llanas o líneas delgada, que es tiempo de 2 minutos de obstrucción a la cámara. Cuando se obstruye la cámara el Movimiento automático sede el control a la posición calculada por SPA, por lo tanto, el primer dato cuando se despeja la cámara muestra el valor de posición del control por SPA, y si tenemos una discrepancia de posiciones, el control por visión las ajusta de forma automática. Y como se puede apreciar en el eje Acimutal no presenta grandes discrepancias entre el valor de SPA y el sistema de visión, mientras que en el eje Cenital se tiene aproximadamente 30 pixeles de diferencia, que son corregidos inmediatamente por el control de visión.



**Figura 58.** Obstrucción de visión artificial

Bajo este modo de movimiento, se confirma el funcionamiento del equipo. El fin de esta modalidad es generar un movimiento de seguimiento por el código SPA, donde el equipo sea capaz de moverse hacia la dirección del sol, y al detectarlo cambie su modo de seguimiento a uno más preciso, el seguimiento por cámara, y sea capaz de mantenerlo incluso después de ser obstruido por distintos rangos de tiempo.

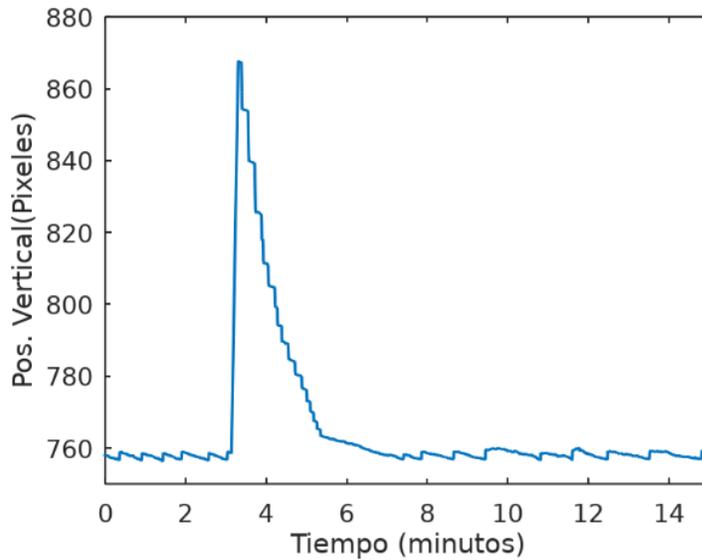
Posteriormente se realizaron pruebas con la finalidad de medir la respuesta del equipo en caso de que éste se detenga bruscamente en medio del seguimiento, como puede suceder cuando se pierde energía en los actuadores o cuando hay un movimiento con el control

manual. Para ello se mantuvo el equipo en funcionamiento en Movimiento automático por medio de cámara y fue detenido o cambiado de posición en repetidas ocasiones mediante el botón de paro o “stop” y se puso en marcha momentos después.

Con ello se logró estresar el mecanismo y verificar el funcionamiento del código en función del sistema de corrección por tiempo, el cual asemeja a la modulación de ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés), modulando el tiempo de encendido de los motores por intervalos de tiempo de 20 a 400 ms.

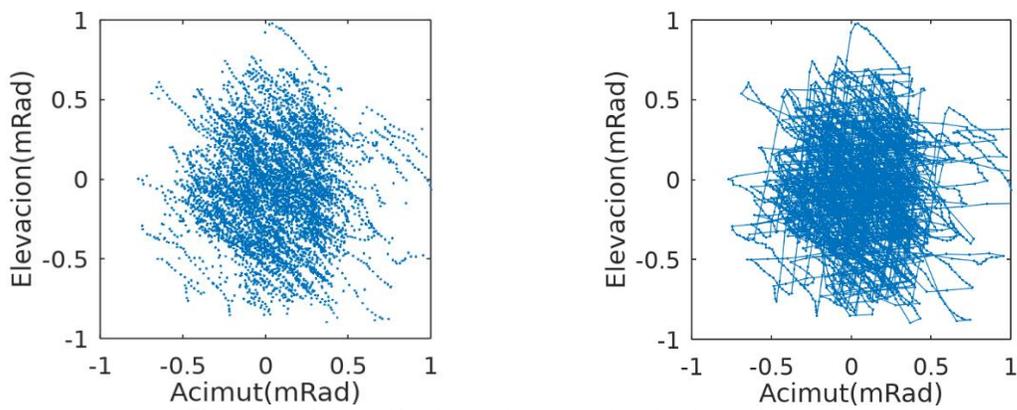
Bajo estas condiciones se expresa la gráfica de la **Figura 59**, que muestra el seguimiento del sol captado por la cámara en función de pixeles por tiempo (pixel \* tiempo), donde se observa un “pico” o elevación en el llano del seguimiento, siendo este el momento en el cual es detenido el equipo por 120 segundos para, posteriormente volver a ponerse en marcha.

En el primer tramo de la pendiente descendente de esta grafica se observa en la sección de los 860 hasta 800 pixeles que existe una pendiente con una inclinación pronunciada, lo cual indica que los “saltos” realizados por el equipo son movimientos largos en comparación con el siguiente segmento de los 800 a los 760 pixeles. Esto es debido los rangos de tiempo propuestos en el código de control (20 a 400 ms), los cuales rigen el movimiento del equipo, de modo que, al detectar distancias mayores a 600 pixeles de error, el equipo realiza saltos de 400 ms hasta relocalizar al equipo en un rango menor a 599 pixeles, disminuyendo el tiempo de encendido de los motores, por lo tanto, disminuyendo la pendiente mostrada en la gráfica.



**Figura 59.** Prueba 1, Stop / Seguimiento

En la gráfica de la **Figura 60** se presentan los datos capturados por la cámara, expresados en los movimientos de corrección de los ejes de elevación y acimut (elevación\*acimut). En esta vemos una serie de puntos, los cuales representan al sol y como el equipo es capaz de mantenerlo en un punto en concreto, donde el error máximo es 1 mrad para ambos ejes, lo que indica el correcto funcionamiento del equipo y la precisión que este alcanza al momento de realizar seguimiento del sol.



**Figura 60.** Corrección de movimiento, ejes de elevación y acimutal.

## **CAPITULO 6**

### **CONCLUSIONES**

La realización del código y adaptación al equipo tomo un tiempo más allá de lo esperado, con una serie de inconvenientes, sin embargo, este se concluyó con éxito superando las expectativas.

Para la implementación de rutinas de movimiento dirigidas por código SPA se requirió el uso de una banda muerta o de inactividad para detener los actuadores en un punto muy cercano al valor calculado. Además, el PLC no era capaz de leer las señales de los sensores, debido a su bajo nivel de energía. Para solucionar esto se implementó un sistema para reacondicionar la señal eléctrica a los niveles requeridos por el PLC para que este pudiese leerlo de manera correcta.

Una vez que estos puntos fueron cubiertos, se instaló una cámara de visión la cual retroalimenta al PLC por medio de comunicación RS-485 con un sistema de visión basado en Raspberry.

Este sistema nos proporciona la capacidad de obtener retroalimentación de manera visual. Una vez fue asegurada la retroalimentación se trabajó en lograr ajustar la resolución de esta, logrando un error de  $\pm 1$  mrad, donde, se vio necesaria la reducción de energía del eje de elevación, de 24 volts a 12 volts, y la realización de un sistema semejante a PWM en función de tiempo para los relevadores de salida.

Con esto se logró realizar un sistema de seguimiento solar por medio de PWM utilizando un sistema de drivers de relevadores, obteniendo un desplazamiento máximo dentro de 1 mili-radian(mrad) de error en los ejes de elevación y acimut.

## CAPITULO 7

### Bibliografía

Javier Alfonso Jiménez Aljure. (2016). *Diseño de un seguidor solar automático para un arreglo básico de paneles fotovoltaicos*. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América.

Ricardo Daniel Defas Brucil, Andrés Patricio Guzmán Herrera. (2016). *Diseño e implementación de un módulo didáctico para la integración de redes de campo industrial: modbus, profibus, para actuadores eléctricos*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.

Jorge Arturo Pelayo López, Alfredo Luna Soto, Francisco Bernabe Ramos, Benjamín Guzmán Flores. (2017). *Comparativa entre la eficiencia de un sistema fotovoltaico con seguimiento solar y la de un sistema fotovoltaico fijo*. Revista Iberoamericana de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Vol. 6, 1-26.

Celso de La Cruz. (2012). *Seguidor solar adaptativo basado en un controlador lógico programable para paneles fotovoltaicos*. Perú: Universidad Continental.

DOMINGO HERIBERTO GUARDADO GUTIÉRREZ, VÍCTOR EULISES RIVERA CHÁVEZ. (2012). *Implementación de seguidor solar en dos ejes para el Sistema Fotovoltaico de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UES*. El Salvador: UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.

John A. Duffie, William A. Beckman. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.

Ecuaciones, material gráfico e información extraída de: Camilo A. Arancibia Bulnes, David Riveros Rosas. (2012). *Aplicaciones Térmicas de la Energía Solar*. Ciudad de México, México: Centro de Investigación en Energía e Instituto de geofísica, UNAM.

Swanson, R.M.. (2003). *Photovoltaics Concentrators*. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering . E.U.A: Ed. John Wiley & Sons Ltd.

Octavio García Valladares, Isaac Pilatowsky Figueroa.. (2017). *Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industrial*. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Energías Renovables.

Siemens. (20). S7-1500, ET 200MP, ET 200SP CM PtP - *Configuraciones para acoplamientos punto a punto*. Alemania: Edición Siemens.

Gong, B., Li, Z.N., Wang, Y.G., Li, Q.S. (2008). *Wind tunnel test study on the wind load shape coefficient of heliostat*. Changsha, China: J. Hunan University.

R. Angel, B. Cuerden, and A. Whiteside. (2014). *Lightweight dual-axis tracker designs for dish-based HCPV*, *Proc. the CPV-10*, International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems.

Luque-Heredia, G. Quéméré, R. Cervantes, O. Laurent, E. Chiappori, and J. Ying-Chong. (2012). *The sun tracker in concentrator photovoltaics*. Springer Series in Optical Science.

Ibrehim R. & Afshin A. (2008). *Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications*. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory.