

Diseño e Implementación de Sistema Robótico de Dos Grados de Libertad para Aplicaciones de Seguimiento Solar

Luis Rafael Islas-Estrada¹, Ian Sait Gutiérrez-Hernández², Arturo Matamoros-Balderas³, Diego A. Flores-Hernández⁴

¹Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Laboratorio de Sistemas Dinámicos Aplicados, México. Email: lislase1400@alumno.ipn.mx

²Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Laboratorio de Sistemas Dinámicos Aplicados, México. Email: igutierrezh1500@alumno.ipn.mx

³Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Laboratorio de Sistemas Dinámicos Aplicados, México. Email: amatamorosb1500@alumno.ipn.mx

⁴Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Laboratorio de Sistemas Dinámicos Aplicados, México. Email: dfloreshe@ipn.mx

Resumen

Los sistemas de seguimiento solar se alinean con respecto al Sol a lo largo del día para mantener elevada la eficiencia de conversión de la tecnología solar, lo que implica un gasto energético. Para resolver el compromiso entre la precisión y consumo energético, se implementó la metodología VDI-2206 para resolver el problema de forma concurrente. A partir del diseño obtenido, se realizó una simulación multicuerpo que permitió validar el funcionamiento del robot y reducir el error de seguimiento. Posteriormente, se fabricó el sistema y se realizaron pruebas experimentales bajo condiciones reales de operación, obteniendo un consumo energético promedio de 38.43 Wh y un error de seguimiento mixto de 0.3638°. Finalmente, se concluye que se desarrolló un sistema de alta precisión y bajo consumo energético para aplicaciones solares.

Palabras clave: sistema robótico; seguimiento solar; VDI-2206; simulación multicuerpo; diseño concurrente.

Abstract

Solar Tracking Systems align themselves with respect to the Sun throughout the day to keep the conversion efficiency of solar technology high, which implies energy expenditure. To resolve the compromise between accuracy and power consumption, the VDI-2206 methodology was implemented to solve the problem concurrently. From the obtained design, a multibody simulation was carried out that allowed validating the robot operation and reducing the tracking error. Subsequently, the system was manufactured, and experimental tests were carried out under real operating conditions, obtaining an average energy consumption of 38.43 Wh and a mixed tracking error of 0.3638°. Finally, it is concluded that a high precision and low energy consumption system for solar applications was developed.

Keywords: robotic system; solar tracking; VDI-2206; multibody simulation; concurrent design.

1. Introducción

Actualmente, a causa del acelerado cambio climático y la latente crisis energética global, el uso de sistemas robóticos ha cobrado gran relevancia para asistencia en la generación de energía limpia. La tecnología solar presenta mayores ventajas, en los últimos años algunos grupos de investigación han logrado incrementar considerablemente su eficiencia de conversión con valores superiores al 25% [1]. Los sistemas robóticos posibilitan mantener valores elevados de conversión a lo largo del día mediante la acción de seguimiento, alineando la tecnología solar en posición perpendicular

al Sol el mayor tiempo posible. Consecuentemente, se requiere energía para la acción de seguimiento, lo que implica una reducción en la ganancia energética total del sistema [2]. Por lo que, se genera un compromiso entre la precisión de seguimiento solar y el gasto energético. Este problema ha motivado que se busquen soluciones desde diferentes enfoques, algunos se han centrado en el desarrollo de nuevas estrategias de control para reducir el error de seguimiento y otros en algoritmos que reduzcan el consumo energético, de forma independiente [3-5]. Sin embargo, debido a la complejidad del problema es necesario un enfoque que contemple las afectaciones mutuas y que busque una

solución balanceada. El presente trabajo resuelve el problema desde un enfoque concurrente, mediante el diseño e implementación de un sistema robótico de seguimiento solar de dos ejes en configuración azimut-elevación, que considera la precisión y el gasto energético de forma simultánea. Se empleó la metodología VDI-2206 [6], la cual permitió mejorar la eficiencia del robot en la acción de seguimiento. Se realizó una simulación multicuerpo para validar el funcionamiento. Por último, el robot se fabricó y se realizaron pruebas experimentales con resultados satisfactorios, lo que indica que el sistema robótico desarrollado es de bajo consumo energético y alta precisión de seguimiento.

2. Metodología de diseño

La metodología desarrollada por la Asociación de Ingenieros Alemanes para el diseño de productos mecatrónicos, denominada VDI-2206, tiene como propósito principal resolver problemas complejos de ingeniería desde un enfoque innovador [6]. El proceso de diseño inicia con los requerimientos del sistema, después entra al ciclo de diseño y finaliza con el sistema desarrollado. Se compone de las siguientes cinco etapas:

1. *Diseño del Sistema*: se definen las funciones que el sistema debe cumplir, se agrupan en módulos y se selecciona el concepto solución.
2. *Diseño del Dominio Específico*: se detalla cada uno de los componentes aplicando las técnicas y métodos específicos desde las disciplinas mecánica, electrónica e informática.
3. *Integración del Sistema*: se realiza la integración de *hardware* y después de *software*. Comienza con el nivel componente, después nivel módulo y finaliza con el nivel sistema. En esta etapa se realizan las modificaciones pertinentes para asegurar una integración sinérgica y se aplican estrategias de control.
4. *Análisis de modelos*: se desarrollan diferentes modelos a lo largo del proceso de diseño empleando herramientas de modelado y simulación.
5. *Aseguramiento de las propiedades*: es un proceso constante de validación y verificación en los diferentes niveles de desarrollo. Esto permite que los requerimientos se revisen a lo largo del proceso de diseño.

3. Problema de seguimiento solar

Existen múltiples algoritmos que permiten calcular la trayectoria solar, principalmente se basan en ecuaciones astronómicas [2]. La Figura 1 muestra la trayectoria desde la perspectiva del robot, donde θ es el ángulo azimutal y α el de elevación.

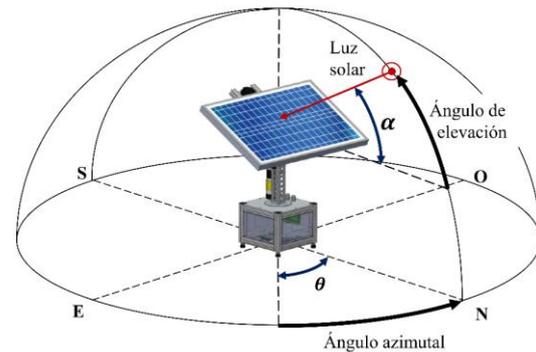


Figura 1. Trayectoria solar. Fuente: elaboración propia.

El ángulo de declinación se expresa como:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360}{365}(n - 81)\right) \quad (1)$$

donde n representa el número de día del año, considerando el 1 de enero como el primero y el 31 de diciembre como el día 365. El ángulo de elevación se determina con la siguiente expresión:

$$\sin \alpha = \sin \delta \cdot \sin \Lambda + \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos \Lambda \quad (2)$$

donde ω es el ángulo horario y Λ es la latitud. El ángulo azimutal se determina por:

$$\sin \theta = \frac{\sin \omega \cdot \cos \delta}{\cos \alpha} \quad (3)$$

4. Desarrollo del sistema robótico

En el desarrollo de sistemas de seguimiento solar se requiere al menos la localización, las condiciones meteorológicas, las especificaciones de la tecnología solar, las características físicas y las características de comportamiento [7]. Para el caso de estudio se considera un robot de dos ejes en configuración azimutal-elevación, con un método de seguimiento en lazo abierto, calculando la trayectoria solar con el algoritmo SPA (*Solar Position Algorithm*) y una estrategia de seguimiento paso-a-paso. En la Tabla 1 se presentan los principales requerimientos.

Tabla 1. Principales requerimientos.

Atributo	Valor
Ubicación	México
Latitud [Λ]	-99.0728°
Rango movimiento azimutal	0° a 210°
Rango movimiento elevación	0° a 90°
Temperatura ambiental	5° a 30° C
Capacidad de carga mínima	6.14 kg
Error de seguimiento máximo	0.5°

Fuente: elaboración propia.

En cuanto al gasto energético, se considera que un robot de seguimiento debe consumir máximo el 3% de la energía que genera con la tecnología solar [8]. Por lo tanto, se definió que el robot empleará tecnología fotovoltaica monocristalina para el análisis energético.

4.1. Diseño del sistema

A partir de los requerimientos, se desarrolló un modelo donde se definieron las funciones que describen el comportamiento del sistema. Posteriormente, se construyó la arquitectura física del sistema, donde se representan las relaciones que existen entre las entradas y salidas de los sistemas y módulos. El sistema robótico se compone de seis sistemas y cinco módulos. En la Figura 2 se presenta la arquitectura, donde las líneas de color azul representan señales de datos, las de color rojo indican entradas y salidas de tipo energía y las de color verde representan conexiones físicas del sistema.

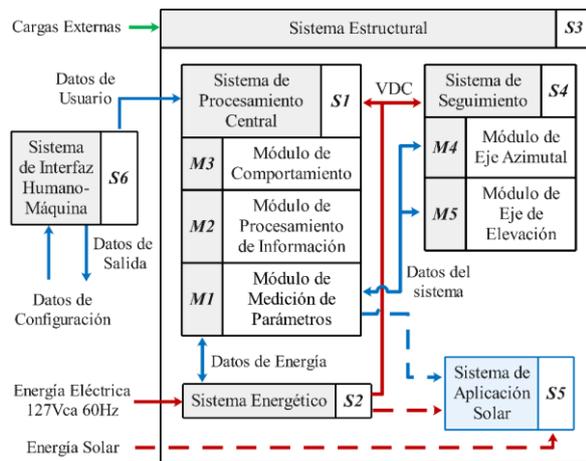


Figura 2. Arquitectura física propuesta del sistema robótico. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se describe brevemente cada sistema:

- *Sistema de Procesamiento Central (S1)*: es responsable de la gestión de las estrategias que modifican el comportamiento, las estrategias de control, seguimiento de trayectoria y de energía.
- *Sistema Energético (S2)*: se encarga de gestionar el suministro y la distribución de energía eléctrica requerido por cada uno de los componentes.
- *Sistema Estructural (S3)*: protege el sistema de las cargas internas y externas, permite la conexión física y la integración de los otros sistemas y módulos.
- *Sistema de Seguimiento (S4)*: realiza la tarea de seguimiento mediante el movimiento azimutal y de elevación del robot.
- *Sistema de Aplicación Solar (S5)*: desempeña las funciones del dispositivo solar que requiere el seguimiento solar.

Los requerimientos, las funciones y la arquitectura física definen y acotan el espacio solución del problema de diseño, lo que permite construir conceptos solución que representan las principales características físicas y funcionales que el sistema robótico tendrá. Se propusieron dos conceptos, después se evaluaron con el método de toma de decisiones multicriterio denominado Proceso Analítico Jerárquico (PJA), el cual permite tomar decisiones complejas con base en criterios. Para el caso de estudio se consideraron los siguientes criterios: eficiencia de los mecanismos de transmisión, capacidad de carga, característica autobloqueante de los mecanismos y eficiencia de seguimiento.

4.2. Diseño del dominio específico

En esta fase se detalla cada uno de los componentes que conforman los sistemas y los módulos. Se emplean modelos y simulaciones computacionales para validar el cumplimiento de las funciones y requerimientos.

4.2.1. Modelo del sistema robótico

Para el desarrollo del modelo cinemático se empleó la metodología de Denavit-Hartenberg, se presenta una configuración de dos juntas de tipo revoluta, donde q_1 es la variable azimutal y q_2 la de elevación. En la Figura 3 se muestra el esquema del robot con los marcos de referencia correspondientes.

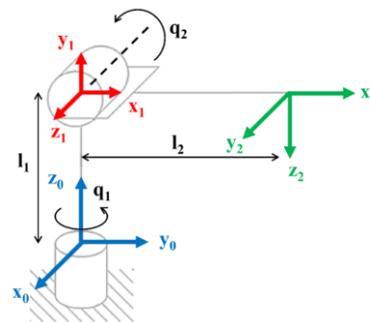


Figura 3. Marcos coordenados según la convención de Denavit-Hartenberg. Fuente: elaboración propia.

Se asignaron los ejes z_0 y z_1 como los ejes de rotación de q_1 y q_2 , respectivamente. Se asignó el origen O_0 en el punto de intersección del eje z_0 y la base fija, siendo que el eje x_0 se encuentra apuntado hacia la izquierda y y_0 complementando para formar un sistema de mano derecha (SMD). Como z_0 y z_1 se intersecan, x_1 es la normal común al plano formado por z_0 y z_1 y su dirección positiva se pone hacia la derecha; O_1 se ubica en la articulación y se pone y_1 para completar el marco de referencia. El efector final considera los dispositivos solares, se instala en el centro de los eslabones y se alinea con el eje x_1 , por lo que, el último marco coordenado se establece con z_2 colineal con x_1 y se

definen x_2 y y_1 completando los marcos de referencia. En la Tabla 2 se muestran los parámetros de Denavit-Hartenberg considerados para el análisis cinemático. Por simplicidad se consideró la siguiente notación: $\cos(q_i) = c_i$ y $\sin(q_i) = s_i$, para $i = 1, 2$.

Tabla 2. Parámetros de Denavit-Hartenberg del robot.

Eslabón	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$\pi/2$	l_1	q_1
2	l_2	$\pi/2$	0	q_2

Fuente: elaboración propia.

La matriz de transformación homogénea está dada por:

$$T_2^0 = \begin{bmatrix} c_1 c_2 & s_1 & -c_1 s_2 & l_2 c_1 c_2 \\ c_2 s_1 & -c_1 & -s_1 s_2 & l_2 c_2 s_1 \\ s_2 & 0 & -c_2 & l_1 + l_2 s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde el vector de posición se expresa como $\bar{P} = (P_x P_y P_z)^T$, para $P_x = l_2 c_1 c_2$, $P_y = l_2 c_2 s_1$ y $P_z = l_1 + l_2 s_2$. La cinemática inversa está dada por:

$$q_1 = \arctan\left(\frac{P_y}{P_x}\right) \quad (5)$$

$$q_2 = \text{atan}\left(\frac{P_z - l_1}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}}\right) \quad (6)$$

El modelo dinámico del sistema robótico permite relacionar las fuerzas aplicadas en las articulaciones accionadas con el movimiento esperado. De esta forma, la ecuación de movimiento en el análisis de dinámica se utiliza para encontrar los pares y las fuerzas de los actuadores requeridas para realizar el seguimiento de la trayectoria solar. Se emplea la formulación de Lagrange para establecer la ecuación dinámica de sistema robótico. De forma general el Lagrangiano se considerará como:

$$\mathcal{L}(q, \dot{q}) = \sum_{i=1}^2 (K_i - P_i) \quad (7)$$

donde K corresponde a la energía cinética, y P a la energía potencial del sistema. La energía cinética total se expresa como:

$$K_T = K_1 + K_2 \quad (8)$$

$$K_T = \frac{1}{2} I_1 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{v}_2^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{q}_2^2 \quad (9)$$

Siendo que K_1 y K_2 representan la energía cinética del primer y segundo eslabón, respectivamente. Ahora bien, la energía potencial del eslabón 1 es cero, por lo

que, la energía potencial total del sistema se puede definir como:

$$U_T = U_2 \quad (10)$$

$$U_T = m_2 g (l_1 + l_2 c_2) \quad (11)$$

Entonces, la ecuación (7) se expresa como:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} I_1 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{q}_1^2 - \dot{q}_1^2 s_2^2 + \dot{q}_2^2) + \frac{1}{2} I_2 \dot{q}_2^2 m_2 g (l_1 l_2 c_2) \quad (12)$$

Donde, el modelo del par de cada articulación se puede definir de la siguiente forma:

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} \quad (13)$$

Por lo tanto, los pares se expresan como:

$$\tau_1 = I_1 \ddot{q}_1 + m_2 l_2^2 \ddot{q}_1 - m_2 l_2^2 (2 \dot{q}_1 s_2 c_2 + s_2^2 \ddot{q}_1) \quad (14)$$

$$\tau_2 = (m_2 l_2^2 + I_2) \ddot{q}_2 + m_2 l_2^2 \dot{q}_1^2 s_2 c_2 + m_2 l_2 s_2 \quad (15)$$

De esta forma, el modelo dinámico del robot queda definido por la siguiente expresión:

$$\tau = M(q) \ddot{q} + c(q, \dot{q}) + g(q) \quad (16)$$

donde $M(q) \ddot{q}$ es la matriz de masa de orden $n \times n$, el término $c(q, \dot{q})$ es del producto de la velocidad y $g(q)$ es el término asociado a la gravedad. A continuación, se detalla cada uno de ellos:

$$M(q) = \begin{bmatrix} I_1 \ddot{q}_1 + m_2 l_2^2 - m_2 s_2^2 & 0 \\ 0 & m_2 l_2^2 + I_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$c(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -2m_2 l_2^2 \dot{q}_1 s_2 c_2 \\ m_2 l_2^2 \dot{q}_1^2 s_2 c_2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$g(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ m_2 g l_2 s_2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Los parámetros obtenidos son los siguientes: $l_1 = 63.5$ mm, $l_2 = 86.09$ mm, $l_{cm1} = 41.37$ mm, $l_{cm2} = 34.5$ mm, $m_1 = 1.596$ kg, $m_2 = 4.081$ kg y $g = 9.81$ Kg·m/s².

4.2.2. Diseño del sistema de seguimiento

Este sistema está compuesto de elementos de transmisión mecánica, actuadores y sensores para cada eje de movimiento.

Diseño del mecanismo de elevación: se evaluaron los siguientes tipos de transmisión: engranes de ejes paralelos, ejes planetarios, engranes armónicos, corona sin-fin, correas de transmisión y husillo de bolas. Los criterios fueron los siguientes: 1) eficiencia de transmisión, 2) propiedad de autobloqueo, 3) holgura, 4) requisito de componentes adicionales y 5) espacio necesario para la instalación. Se determinó que el mecanismo corona sin-fin satisface en mayor proporción los criterios, con una relación de engranaje de 27:1, cuenta con la condición auto bloqueante, tiene un husillo de cuerda única y un cambio de orientación del sentido de giro de 90°. La corona es de bronce y el husillo de acero inoxidable. En la Figura 4 se ilustran las cargas aplicadas en el mecanismo de elevación en la posición crítica, cuando $q_2 = 0$, donde τ_2 representa el par aplicado en la junta de elevación, W_{cm2} es la carga debido a la estructura del eslabón, y W_{ds} considera los dispositivos solares y la estructura para sujetarlos. Entonces, el par se define como:

$$\tau_2 = FS \cdot (l_{cm2}W_{cm2} + l_2W_{ds}) \quad (20)$$

donde FS representa el factor de seguridad debido a las cargas ocasionadas por el viento, con un valor de 1.2. Debido a que los valores nominales de las cargas son $W_{cm2} = 1.00$ N y $W_{ds} = 35.38$ N, se requiere un par mínimo τ_2 de 3.70 Nm.

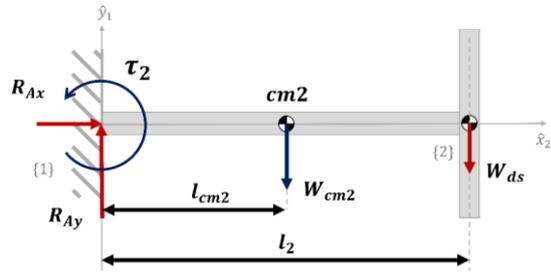


Figura 4. Esquema de las cargas aplicadas en el eslabón de elevación. Fuente: elaboración propia.

Diseño del mecanismo azimutal: a partir de la ecuación (14), el par τ_1 en cualquier posición es igual a cero cuando está en reposo. Por lo que, se puede considerar despreciable para el análisis y no es necesario un mecanismo auto bloqueante para ahorrar energía cuando el robot no esté en movimiento. Entonces, se seleccionó una transmisión de engranes con ejes paralelos, con una relación de 3.8:1 y un ángulo de presión de 20°. El material del engrane es de una aleación de aluminio y el piñón de bronce endurecido.

Selección de actuadores: considerando los pares calculados para cada eje, se seleccionan los actuadores. Considerando que tuvieran una alta eficiencia energética y un bajo consumo energético, por lo que, se determina que los actuadores deben ser motores de corriente continua (CC). Los siguientes tipos de

actuadores se evaluaron: motor CC excitado, motor CC a pasos, motor CC sin escobillas, y motor CC con escobillas de imán permanente. Como criterios de selección se consideró: 1) el rango de potencia, 2) el voltaje de operación, 3) la eficiencia, 4) el torque, y 5) la velocidad. El motor CC con escobillas de imán permanente es el que obtiene la mejor ponderación. El motor seleccionado es un motorreductor 5202 Series Yellow Jacket con una relación de engranes de 188:1, velocidad nominal de 30 RPM y un rango de tensión de operación de 5-12V. Para reducir la complejidad del sistema energético y los elementos para el control de los actuadores se seleccionó el mismo motor para ambos ejes del robot. Ambos motores cuentan con un encoder de tipo magnético de efecto Hall con una resolución de 5,264 pasos por revolución con una sensibilidad de 0.068°. También, se seleccionó el controlador VNH2SP30 para ambos ejes, el cual incluye funciones para el cambio de dirección de giro, la modulación de velocidad por PWM y cinco modos de protección. Por último, se diseñó una tarjeta electrónica para ensamblar el controlador y facilitar las conexiones con los actuadores y las tarjetas de procesamiento (ver Figura 5).

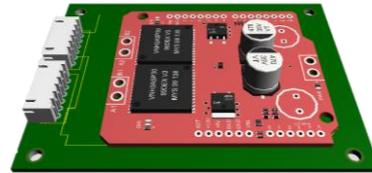


Figura 5. Tarjeta electrónica para el controlador dual de los actuadores eléctricos. Fuente: elaboración propia.

4.2.3. Diseño del sistema estructural

En el análisis estructural se consideró que los elementos tuvieran una alta resistencia al impacto, resistencia ambiental, baja densidad y alta rigidez. Los dispositivos solares y su estructura se alinearon para mantener el centro de gravedad en el eje de elevación, esto con el propósito de simplificar el cómputo de la estrategia de control, lo que a su vez se refleja como un ahorro en el consumo energético. La base del sistema se utiliza para contener y proteger los componentes electrónicos (ver Figura 8), entre ellos: fuentes de energía, controlador de motores, tarjetas de conexión y sensores. Las cargas del robot se distribuyen sobre cuatro pies niveladores con base de nylon y vástago de acero galvanizado, con una capacidad de carga máxima de 80kg. También, se emplean para nivelar el sistema en una superficie de instalación irregular sin la necesidad de anclaje u obras civiles adicionales.

4.2.4. Diseño del sistema energético

Se considera la potencia eléctrica requerida por cada componente electrónico y actuadores del robot, lo

que define los requisitos de tensión y corriente de alimentación. Se determinó emplear fuentes eléctricas conmutadas CA-CC para el suministro energético por su alta eficiencia y bajo consumo en condiciones sin carga. Una para los elementos de potencia y otra para los elementos que procesan las señales de datos. Cada fuente tiene una eficiencia del 88% y una potencia de consumo sin carga menor a 0.6W. La primera tiene tensión nominal de salida de 12V, una corriente máxima de salida de 12.5A y potencia de 150W. La segunda una tensión nominal de salida de 5V, una corriente máxima de salida de 6A y potencia de 30W. Para la distribución energética, se calculó alambre calibre AWG-18 para los actuadores y alambre calibre AWG-22 para los elementos de medición y tarjetas electrónicas. Para distribuir la energía eléctrica se diseñó una tarjeta electrónica con conectores rápidos (ver Figura 6).

4.2.5. Diseño del sistema de procesamiento central

Las aplicaciones de seguimiento solar tienen grandes periodos de inactividad debido a que el movimiento de la Tierra alrededor del Sol tiene una velocidad baja, por lo que, es necesario considerar que los componentes electrónicos también sean de bajo consumo energético en esos tiempos de espera. Para definir el hardware de procesamiento se emplearon los siguientes criterios: 1) potencia eléctrica, 2) modos de suspensión, 3) puertos de entrada y salida (E/S), 4) memoria, 5) velocidad de procesamiento y 6) conectividad. Se seleccionó un procesador ATmega2560, con una velocidad de 16 MIPS, 54 pines de E/S digitales, 16 puertos de E/S analógicos, memoria SRAM de 8 KB y FLASH de 256 KB, tensión de operación de 5 VCD y seis modos de suspensión. La medición de la potencia eléctrica se realizará con sensores OKY3312, los cuales operan con una tensión de 5V, tienen un error de 1.5% a 25°C y una sensibilidad de salida de 66-185 mV/A. El error de seguimiento se medirá con un sensor de apuntamiento solar SolarMems ISS-T60, el cual tiene un campo de visión de 120° y una precisión mayor a 0.06°. Además, se diseñó una tarjeta electrónica para la conexión de los componentes E/S de datos (ver Figura 6).

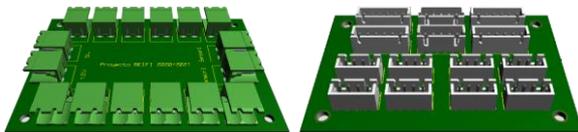


Figura 6. Tarjetas electrónicas para la distribución de energía eléctrica y para conexión de datos en el robot. Fuente: elaboración propia.

4.3. Integración del sistema

La integración es fundamental para el desarrollo de sistemas complejos, la metodología de diseño realiza la integración de los elementos físicos (*Hardware*) y

posteriormente de la información y datos (*Software*), buscando así una coordinación armónica entre todos los componentes que conforman el sistema robótico.

4.3.1. Integración de *Hardware*

A partir de la arquitectura física (Figura 2) se desarrolló una ruta de integración, inicia con la integración a nivel componentes para formar módulos y después integra a nivel módulo para generar sistemas. En cada proceso de integración se realizan validaciones que permiten asegurar la funcionalidad y rendimiento del sistema. En la Figura 7 y Figura 8 se muestra el diseño integrado del sistema robótico.

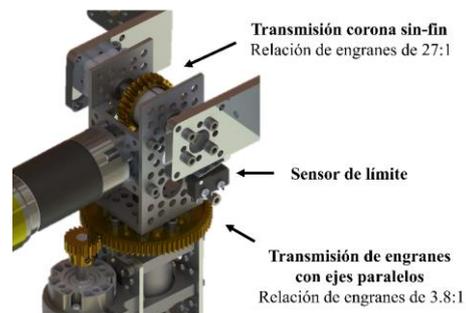


Figura 7. Mecanismos de las transmisiones en los ejes azimutal y de elevación. Fuente: elaboración propia.

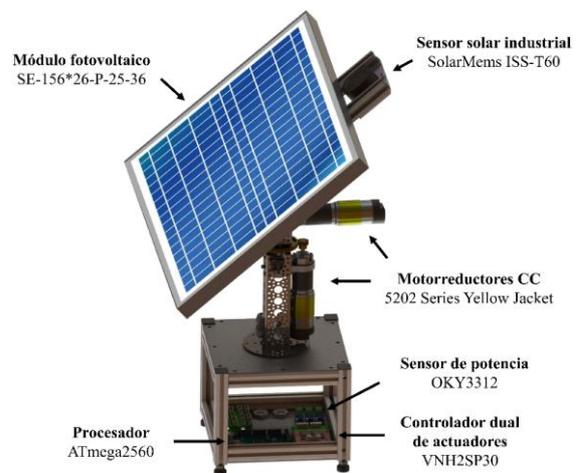


Figura 8. Modelo tridimensional del sistema robótico integrado. Fuente: elaboración propia.

4.3.2. Integración de *Software*

Para garantizar que el sistema funcione correctamente, se definió y programó una rutina de operación para la acción de seguimiento solar. En la Figura 10 se muestra el diagrama de flujo que representa el comportamiento general del sistema. Se parte de que el sistema robótico está orientado en la posición inicial (en dirección al Sol al amanecer). El período de operación está limitado entre el amanecer y el atardecer, fuera de este periodo el sistema entra en un modo de suspensión de la mayoría de sus funciones para ahorrar energía. Durante

la operación se identifica el siguiente punto en la trayectoria y se acciona la transmisión y actuador del eje azimutal, seguido del eje de elevación, para llegar a la posición deseada. Se realiza la medición de los parámetros de consumo de potencia y posición, y se registran en la computadora a través de la interfaz humano-máquina. El sistema espera hasta que sea necesario realizar el movimiento al siguiente punto suspendiendo las funciones secundarias de las tarjetas. Finalmente, cuando el robot concluye la trayectoria regresa al punto de inicio de manera continua.

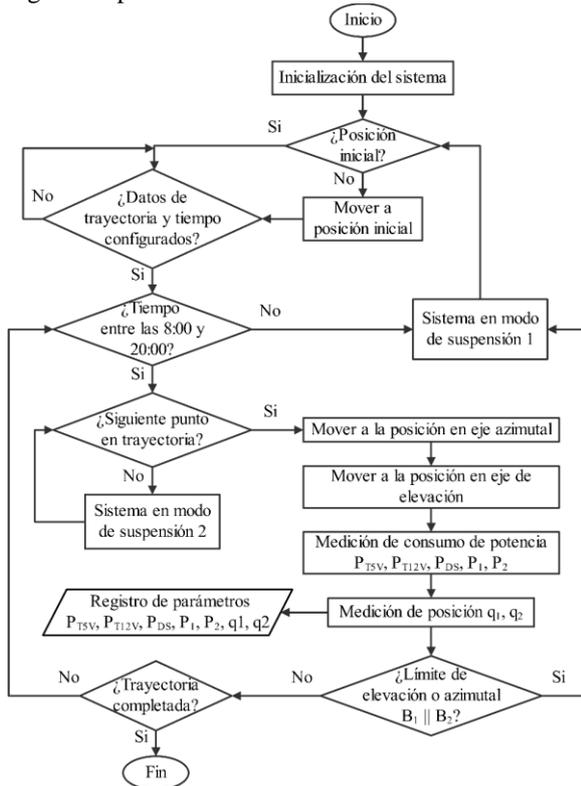


Figura 10. Diagrama de flujo del comportamiento general del sistema robótico. Fuente: elaboración propia.

4.3.3. Implementación

Se fabricaron los elementos diseñados, se adquirieron los componentes comerciales y se realizó el proceso de ensamble. El espacio de trabajo se construye con los rangos de movimiento de los ejes, teniendo de 0°-360° para el eje azimutal y 0°-90° para el eje de elevación. Considerando las reducciones mecánicas en los ejes de movimiento, la velocidad angular en el eje azimutal es de 11.31 rpm y 1.59 rpm en el eje de elevación.

4.4. Resultados

La trayectoria solar se calculó para la simulación y experimentación el día 13 de julio de 2022, en la Ciudad de México, México. Se realizó una simulación multicuerpo en Simulink® y MATLAB® R2021b en la versión académica para validar el funcionamiento, se

simularon dos estrategias de control para reducir el error, un controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y un Proporcional-Derivativo (PD). En la Figura 11 se muestran las gráficas de los errores obtenidos en la simulación, el controlador PD tiene un error azimutal promedio de 0.040° y un error de elevación promedio de 0.034°. Por otro lado, el controlador PID tiene errores promedio de 0.019° y 0.020° para el eje azimutal y de elevación, respectivamente.

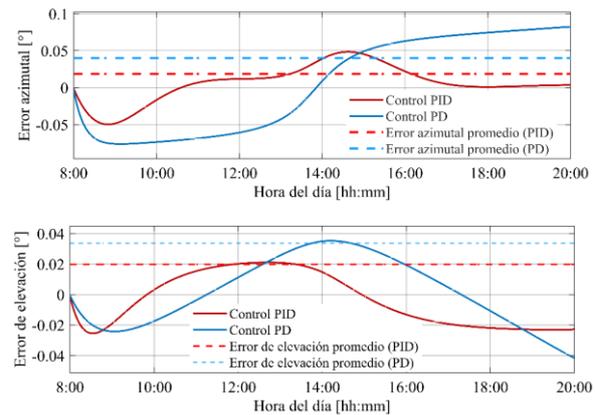


Figura 11. Gráfica de los errores de simulación. Fuente: elaboración propia.

Las pruebas experimentales iniciaron a las 17:50 horas y terminaron a las 20:00 horas. En la Figura 12 se muestra el sistema robótico en el ambiente de experimentación bajo condiciones reales de operación. La temperatura promedio del día fue 24.50°C, con una irradiancia promedio de 656.16 W/m².



Figura 12. Pruebas experimentales del sistema robótico. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 13 se muestran los errores de seguimiento registrados por el sensor SolarMems ISS-T60, donde el error promedio para el eje azimutal fue de 0.3188° y para el eje de elevación de 0.1752°. La Figura 14 muestra la medición de la potencia eléctrica en el eje azimutal y en el eje de elevación, el promedio de la potencia fue de 4.32 W y 17.64 W para la acción de movimiento azimutal y de elevación, respectivamente.

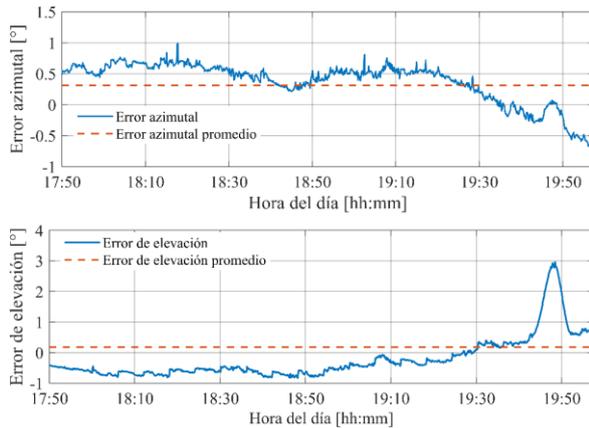


Figura 13. Gráfica de los errores experimentales medidos con el sensor de apuntamiento solar. Fuente: elaboración propia.

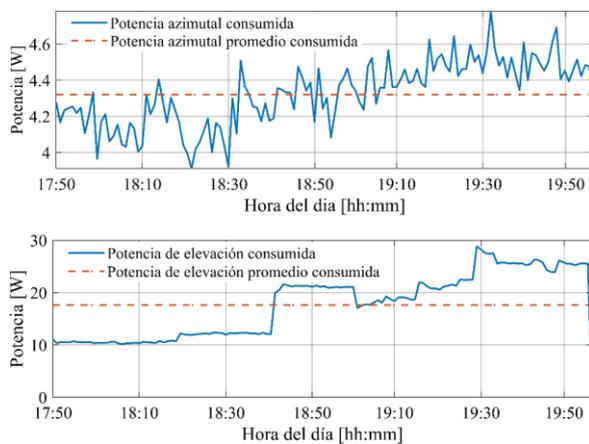


Figura 14. Gráfica de consumo energético experimental. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 3 se muestra el resumen de los resultados obtenidos en las pruebas experimentales.

Tabla 3. Resumen de resultados obtenidos en las pruebas experimentales.

ε_a [°]	ε_e [°]	E_a [Wh]	E_e [Wh]
0.3188	0.1752	6.15	32.28

Fuente: elaboración propia.

4.5. Conclusiones

En este artículo, se describió el diseño, implementación y pruebas de un sistema robótico utilizado para aplicaciones de seguimiento solar. El proceso se realizó empleando la metodología de diseño mecatrónico VDI-2206. Cada módulo del sistema fue diseñado, integrado y validado para satisfacer un conjunto de requerimientos de diseño específicos. Los resultados muestran que se cumplieron los objetivos planteados en un inicio ya que tanto el consumo energético como el error de seguimiento se mantuvieron en niveles bajos, adecuados para aplicaciones solares con mayor eficiencia de conversión como la tecnología fotovoltaica de concentración.

4.6. Agradecimientos

Este proyecto fue apoyado por la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional de México a través de los proyectos SIP-20221156 y SIP-20220630.

5. Referencias

[1] Pilar. Sánchez. “Récord mundial de eficiencia del 25.54% para una célula comercial de silicio, y sin plata”. PV Magazine, 2021 [en línea]. Disponible en: <https://www.pv-magazine.es/2021/09/10/record-mundial-de-eficiencia-del-2554-para-una-celula-comercial-de-silicio-y-sin-plata/>

[2] Flores-Hernández, D. A., Palomino-Resendiz, S. I., Luviano-Juárez, A., Lozada-Castillo, N., Gutiérrez-Frías, O.: A Heuristic Approach for Tracking Error and Energy Consumption Minimization in Solar Tracking Systems. IEEE Access 7, 52755-52768 (2019).

[3] Lee, C.Y., Chou, P.C., Chiang, C.M., Lin, C.F.: Sun tracking systems: A review. Sensors, 9(5), 3875–3890 (2009).

[4] Farajdadian, S., Hosseini, S.H.: Optimization of fuzzy-based MPPT controller via metaheuristic techniques for stand-alone PV systems. International Journal of Hydrogen Energy 44(47), 25457-25472 (2019).

[5] Alexandru, C., Pozna, C.: Different tracking strategies for optimizing the energetic efficiency of a photovoltaic system. In: IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, Vol. 3, pp. 434-439. IEEE (2008).

[6] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2206 – Design Methodology for mechatronic systems. VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung (2004).

[7] Flores-Hernández, D. A., Luviano-Juárez, A., Lozada-Castillo, N., Gutiérrez-Frías, O., Domínguez, C., & Antón, I. (2021). Optimal strategy for the improvement of the overall performance of dual-axis solar tracking systems. Energies, 14(22), 7795.

[8] Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, K., & Sharifi, A. (2009). A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. Renewable and sustainable energy reviews, 13(8), 1800-1818.

[9] Ozcelik, S., Prakash, H., & Chaloo, R. (2011). Two-axis solar tracker analysis and control for maximum power generation. Procedia Computer Science, 6, 457-462.