



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias de la Electrónica



Licenciatura en Ingeniería en Mecatrónica

***SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR PARA
MEDICIÓN DE RADIACIÓN DIRECTA***

TEMA DE TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

LICENCIADO EN INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

PRESENTA:

ABEL JORDI GONZÁLEZ UVERA

DIRECTOR:

DR. ISRAEL VIVALDO DE LA CRUZ

ASESOR:

DR. GERMÁN ARDUL MUÑOZ HERNÁNDEZ

FEBRERO 2019

Resumen

El recurso energético solar está teniendo una tendencia creciente de aprovechamiento en el área de conversión directa de energía. Con el paso del tiempo se ha desarrollado tecnología cada vez mejor con la que se ha logrado mejorar la eficiencia del proceso de captación y uso de dicho recurso, siendo posible gracias al trabajo realizado en investigación y generación de conocimiento relacionado con el tema, que además ha traído grandes aportes a otras áreas como la climatología y meteorología.

Una variable muy importante de cuantificar dentro de estos temas es la radiación solar directa, para ello se ocupa un dispositivo llamado pirheliómetro el cual debe acoplarse a un sistema de seguimiento solar con un buen desempeño en términos de posicionamiento y rastreo de la trayectoria solar, pues la veracidad de la medición está en función de ello.

Este trabajo busca desarrollar un sistema de seguimiento solar para la medición de la radiación solar directa, basándose en la arquitectura de un robot manipulador tipo esférico. Existen empresas extranjeras que se dedican a la producción de dichos sistemas; los costos de los instrumentos son elevados.

En la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla no existe dicho instrumento; en el laboratorio de energía solar de la Facultad de Ciencias de la Electrónica se han realizado investigaciones para medición de radiación solar, pero únicamente enfocadas a la radiación global. También se ha trabajado en el tema de seguimiento solar pero solamente en la parte de captación de energía (sistemas con seguimiento solar con poca exactitud). Por lo que, es importante aumentar las herramientas que se tienen en la institución para el estudio del comportamiento del recurso solar.

Contenido

Lista de figuras.....	v
Lista de tablas.....	x
Nomenclatura.....	xi
Capítulo 1 Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Justificación.....	3
1.3. Estructura de la tesis	7
Capítulo 2 Marco teórico	8
2.1. Energía solar	8
2.2. Trayectoria solar.....	16
2.3. Sensores de orientación angular	28
2.4. Cinemática de robots manipuladores.....	32
2.5. Análisis y control de un sistema lineal de segundo orden	54
Capítulo 3 Fabricación del seguidor solar	64
3.1. Simulación de las ecuaciones de seguimiento solar	64
3.2. Diseño mecánico	68
3.3. Obtención del modelo cinemático del sistema	78
3.4. Implementación del método de control Resolved Motion Rate Control en condiciones de simulación.....	87
3.5. Diseño y fabricación circuitos eléctricos.....	91
3.6. Obtención de las funciones de transferencia del sistema	97
3.7. Implementación de controlador PID.....	107
3.8. Implementación de control de seguimiento de trayectoria solar.....	113

Capítulo 4 Pruebas y resultados	121
4.1. Caracterización de actuadores eléctricos	122
4.2. Ajustes al control de posicionamiento del seguidor solar basados en pruebas realizadas	139
4.3. Implementación de brújula y medidor de nivel de agua como instrumentos para la localización de la posición de casa del seguidor solar.	144
4.4. Mediciones de radiación solar directa	145
Capítulo 5 Conclusiones y trabajo futuro	149
Referencias bibliográficas	151
Apéndice A	154
Apéndice B	157
Apéndice C	159
Apéndice D	181
Apéndice E	192
Apéndice F.....	195

Lista de figuras

Figura 1.1. Sistema de seguimiento para concentrador solar	5
Figura 1.2. Sistema de seguimiento solar para 4 concentradores solares.....	5
Figura 1.3. Sistema de seguimiento solar para panel de captación solar.	6
Figura 2.1. Componentes de la radiación solar.	10
Figura 2.2. Piranómetro termoeléctrico.	11
Figura 2.3. Principales componentes de un piranómetro.....	12
Figura 2.4. Principales componentes de un pirheliómetro.	13
Figura 2.5. Sensor de termopila.	14
Figura 2.6. Registros de radiación solar en Universidad Veracruzana, 23, 24 y 25 de septiembre de 2006 [7].	16
Figura 2.7. Vector solar típico mostrando el acimut y la elevación solar para un punto arbitrario en el planeta [4].....	17
Figura 2.8. Vista geométrica de la trayectoria solar vista en un punto Q durante el solsticio de invierno, equinoccio y solsticio de verano [4].	17
Figura 2.9. Esquema que representa el sistema astronómico formado por el Sol y la Tierra. En este esquema también se muestra la posición de la Tierra al comienzo de cada estación (solsticios y equinoccios) a lo largo de un ciclo anual [7].	19
Figura 2.10. Mapa de trayectoria solar para una zona específica del planeta.	20
Figura 2.11. Gráfica de la declinación solar a lo largo del año.	23
Figura 2.12. Sistema de seguimiento solar para panel fotovoltaico.	25
Figura 2.13. Tipos de plataformas de seguimiento solar existentes [4].	27
Figura 2.14. Sistema de seguimiento solar con pirheliómetro para medir la radiación solar directa (fotografía de Yasser Alemán, 2015).	28
Figura 2.15. Señales de los canales de un codificador incremental desfasadas 90°.	30
Figura 2.16. Esquema de mecanismo de codificador incremental y sus respectivas señales de salida.	30
Figura 2.17. Sistema de ejes coordenados de un acelerómetro	31
Figura 2.18. Articulaciones y eslabones de un manipulador de cadena cinemática abierta.....	33

Figura 2.19. Ejemplo de articulaciones de tipo rotacional y prismática.	34
Figura 2.20. Robot manipulador en configuración esférica [11].	35
Figura 2.21. Espacio de trabajo de un robot manipulador en configuración esférica.	36
Figura 2.22. Sistemas de coordenadas con orígenes coincidentes en dos dimensiones [12].	37
Figura 2.23. Identificación de las componentes de un vector [12].	38
Figura 2.24. Representación de un punto p en el espacio con dos sistemas de referencia trasladados, pero no rotados [12].	42
Figura 2.25. Dos sistemas de referencia con orientación diferente y una traslación entre ambos [12].	43
Figura 2.26. Convención Denavit-Hartenberg para un robot manipulador [12].	45
Figura 2.27. Técnica de control Resolved Motion Rate Control [12].	53
Figura 2.28. Tipos de respuesta de un sistema de segundo orden [15].	57
Figura 2.29. Análisis gráfico de la respuesta de un sistema de segundo orden. ..	58
Figura 2.30. a) Señal analógica en tiempo continuo; b) señal cuantificada en tiempo continuo; c) señal de datos muestreados; d) señal digital [17].	60
Figura 2.31. Gráfica de la función $f(hT)$ [17].	63
Figura 3.1. Gráfica de la ecuación del tiempo durante el transcurso del año 2018 [8].	65
Figura 3.2. Gráficos de la trayectoria solar a lo largo del año en la ciudad de Puebla, México.	66
Figura 3.3. Analema solar, Burgos 26 de agosto de 2011-26 de agosto de 2012. (Foto de Arnáiz).	66
Figura 3.4. Gráfica de analema solar con la posición del Sol a las 10 am, correspondiente a la ciudad de Puebla, México.	67
Figura 3.5. Simulación de analema solar de la ciudad de Puebla, México en la esfera celeste.	68
Figura 3.6. Robot manipulador en configuración esférica [11].	69
Figura 3.7. Seguidor solar para pirheliómetro.....	70

Figura 3.8. Dibujo del diseño propuesto de seguidor solar para pirheliómetro basado en la arquitectura de robot esférico. Realizado en el programa Solidworks versión 2016.....	70
Figura 3.9. Distancia d_3 , que representa el tercer grado de libertad del manipulador tomada como un valor constante.	71
Figura 3.10. Sujetadores de pirheliómetro.....	72
Figura 3.11. Disco.....	72
Figura 3.12. Sujetador de motor de segunda articulación.	73
Figura 3.13. Pieza A del primer eslabón.....	73
Figura 3.14. Pieza B del primer eslabón.....	73
Figura 3.15. Primer eslabón del sistema (ensamblaje de piezas A y B).	74
Figura 3.16. Segundo eslabón.	74
Figura 3.17. Sujetador de motor de la primera articulación del sistema.	74
Figura 3.18. Patas de soporte del sistema.	75
Figura 3.19. Base del robot.....	75
Figura 3.20. Ubicación del centro de masa del sistema, simulando manufactura de todas sus piezas en aluminio.	76
Figura 3.21. Ubicación del centro de masa del sistema, simulando la manufactura de la base en acero al carbón AISI 1018.....	77
Figura 3.22. Asignación de sistemas de coordenadas del seguidor solar.....	78
Figura 3.23. Seguidor solar en primera configuración singular.....	85
Figura 3.24. Seguidor solar en segunda configuración singular.	86
Figura 3.25. Espacio de trabajo del sistema.....	87
Figura 3.26. Entorno de simulación Simscape Multibody y diagrama del método de control Resolved Motion Rate Control.....	88
Figura 3.27. Gráficas de las señales de control para los motores.	90
Figura 3.28. Gráfico de la posición angular de elevación para una trayectoria de 0 a 40 grados.....	90
Figura 3.29. Gráfico de la posición angular de acimut para una trayectoria de 0 a 16 grados.....	91
Figura 3.30. Diagrama eléctrico del circuito de potencia.	92

Figura 3.31. Análisis de malla en transistores de potencia.....	93
Figura 3.32. Análisis de malla de transistores gatillo.....	95
Figura 3.33. Análisis de malla para determinar el valor de R3.....	96
Figura 3.34. Circuito de protección contra cortos circuitos.....	97
Figura 3.35. Diagrama a bloques del método de control Resolved Motion Rate Control.....	98
Figura 3.36. Respuesta del sistema electromecánico a una entrada escalón, en articulación correspondiente al ángulo de acimut.....	101
Figura 3.37. Respuesta del sistema electromecánico a una entrada escalón, en articulación correspondiente al ángulo de elevación.....	101
Figura 3.38. Aproximación de la curva de respuesta del sistema electromecánico correspondiente a la articulación de acimut, ante una entrada escalón.....	103
Figura 3.39. Aproximación de la curva de respuesta del sistema electromecánico correspondiente a la articulación de elevación, ante una entrada escalón.....	104
Figura 3.40. Gráfica de la respuesta deseada del sistema de acimut bajo un control de tipo PID para su posicionamiento.....	108
Figura 3.41. Gráfica de la respuesta deseada del sistema de elevación bajo un control de tipo PID para posicionamiento.....	111
Figura 3.42. Esquema general del sistema de seguimiento solar.....	114
Figura 3.43. Líneas del campo magnético terrestre en el año 2018 a lo largo del planeta [21].....	116
Figura 3.44. Consulta de la declinación magnética en el sitio web de la Agencia Nacional Oceanográfica y Atmosférica (NOAA).....	117
Figura 3.45. Circuito de acondicionamiento de señal del pirheliómetro.....	118
Figura 4.1. Pruebas de medición de radiación solar directa.....	121
Figura 4.2. Estructura usada para caracterización de los motores.....	123
Figura 4.3. Gráfico de voltaje contra corriente.....	124
Figura 4.4. Gráfico de voltaje vs eficiencia.....	125
Figura 4.5. Gráfico de voltaje contra torque.....	126
Figura 4.6. Circuito con transistor en configuración emisor común.....	127
Figura 4.7. Gráfico de valores de ciclo de trabajo contra corriente.....	130

Figura 4.8. Gráfico de valores de ciclo de trabajo contra torque.....	130
Figura 4.9. Señales del codificador del motor visualizadas en un osciloscopio. .	131
Figura 4.10. Gráfico de voltaje contra corriente.....	134
Figura 4.11. Gráfico de voltaje contra eficiencia.....	134
Figura 4.12. Gráfico de voltaje contra torque.	135
Figura 4.13. Gráfico de ciclo de trabajo contra voltaje.....	137
Figura 4.14. Gráfico de ciclo de trabajo contra torque.	137
Figura 4.15. Señales del codificador del motor visualizadas en un osciloscopio.	138
Figura 4.16. Gráficos de errores de posición con ajuste de control PID del sistema.	141
Figura 4.17. Gráfico de trayectoria en acimut para apuntar el robot al Sol, con una posición deseada de 161.81° , partiendo de la posición de casa.	142
Figura 4.18. Gráfico de trayectoria en elevación para apuntar el robot al Sol, con una posición deseada de 47.44° , partiendo de la posición de casa.	143
Figura 4.19. Gráfico de radiación solar directa en Ciudad Universitaria (BUAP) bajo condiciones de cielo mayoritariamente despejado.	146
Figura 4.20. Gráfico de radiación solar directa en Ciudad Universitaria (BUAP) bajo condiciones de cielo nublado.	147
Figura 4.21. Gráfico de radiación solar directa en Ciudad Universitaria (BUAP), bajo condiciones de cielo con mínima nubosidad.	148
Figura F1. Sistema de Seguimiento Solar para la Medición de Radiación Directa	195
Figura F 2. Circuito de control	Figura F 3. Seguidor solar
.....
Figura F 4. Fuente de voltaje	Figura F 5. Brújula y nivel de burbuja.....
.....
Figura F 6. Partes del seguidor solar
.....
Figura F 7. Esquema general de conexiones.	200
Figura F 8. Puertos de conexión del circuito amplificador del pirheliómetro.	201
Figura F 9. Puertos de conexión de actuadores eléctricos.	201
Figura F 10. Pines de conexión M2A/M2B.	202

Figura F 11. Circuito amplificador de señal de pirheliómetro.	202
Figura F 12. Conexión del pirheliómetro al puerto de entrada del circuito amplificador de señal.	203
Figura F 13. Sitio web de Arduino.	204
Figura F 14. Página de descarga de la librería Time.h.	205
Figura F 15. Fragmento de código fuente a modificar, previo a realizar seguimiento solar.	207

Lista de tablas

Tabla 2.1. Parámetros Denavit-Hartenberg.	48
Tabla 3.1. DH de robot esférico.	79
Tabla 3.2. Tabla de verdad del circuito de la figura 3.34.	97
Tabla 3.3. Comparativa de parámetros de las funciones de transferencia de los sistemas de acimut y elevación obtenidos mediante software y calculados de manera teórica.	106
Tabla 4.1. Datos de caracterización de corriente, torque y eficiencia.	124
Tabla 4.2. Datos de corriente y torque aplicando un barrido en el ciclo de trabajo de la señal PWM a una frecuencia de 110Hz.	129
Tabla 4.3. Datos de caracterización de corriente, torque y eficiencia.	133
Tabla 4.4. Datos de corriente y torque aplicando un barrido en el ciclo de trabajo de la señal PWM a una frecuencia de 88 Hz.	136

Nomenclatura

A	Ampere
cm	Centímetros
I	Corriente (amperes)
Hz	Hertz
M	Mega ohms
K	Kilo ohms
m	Metro
μm	Micrómetro
V	Voltaje (volts)
μV	Microvolt
mm	Milímetro
n	Nano faradio
Ω	Ohm
W	Watts
R	Resistencia (ohms)
R _g	Resistencia variable (ohms)
s	segundo
t	Tiempo (segundos)
v	Velocidad lineal (m/s)
q	Posición angular (grad)
\dot{q}	Velocidad angular (grad/s)

Capítulo 1 Introducción

La energía es el primer factor para el desarrollo de una nación. Una enorme cantidad de energía es extraída, distribuida, convertida y consumida en la sociedad diariamente; 85% de la producción de dicha energía es dependiente de los combustibles fósiles. Como ya es bien sabido, los combustibles fósiles son limitados y su uso trae consecuencias negativas como el calentamiento global debido a la emisión de gases de efecto invernadero; es por ello, que en la actualidad ha crecido la tendencia por la obtención de energía a partir de recursos renovables [1].

La meteorología y climatología se basan fundamentalmente en el tiempo ambiental, tanto a escala local como a nivel global. Los profesionales de estas disciplinas se esfuerzan por comprender el funcionamiento de nuestro medio ambiente y por hacer previsiones tanto a corto (Meteorología) como a largo plazo (Climatología) [3]. Por lo que la radiación solar se convierte en un elemento vital para su estudio.

El sol irradia energía en forma de energía electromagnética y la cantidad de radiación electromagnética que llega a la tierra desde el sol se conoce como radiación solar. El término *irradiancia* se usa normalmente para definir la cantidad de energía solar por unidad de área recibida por unidad de tiempo. A medida que la energía electromagnética solar pasa a través de la atmósfera de la tierra, los niveles de energía solar son alrededor de 1000 W/m^2 cuando alcanza la superficie de la tierra [4].

La radiación solar es medida normalmente usando un piranómetro que observa el hemisferio completo por encima de él y responde a la radiación tanto del sol como del cielo, la radiación solar “global”. Sin embargo, es necesario también medir con precisión la radiación “directa” proveniente solamente del sol. Un pirheliómetro tiene una visibilidad de 5° , ligeramente mayor que el sol y su aureola, y no ve el resto del cielo, por lo tanto, es un instrumento diseñado para realizar dicha tarea. Para

realizar mediciones, el pirheliómetro debe enfocar adecuadamente el sol y esto se logra por medio de seguimiento solar (*solar tracking*) [3].

Un mecanismo de seguimiento solar se usa para aumentar la eficiencia de la generación de energía a través del sol. El módulo solar convencional es estacionario, por lo tanto, los rayos del sol que caen sobre él se encuentran en diferentes ángulos en diferentes instantes de tiempo y la duración de los rayos solares que inciden perpendicularmente a la superficie del módulo solar es muy pequeña. Por lo tanto, gran parte de la energía del sol se desperdicia. Esto disminuye la eficiencia del sistema ya que la máxima se obtiene solo durante el tiempo en que el sol se encuentra exactamente perpendicular a la superficie del módulo solar. Durante las horas de la mañana y de la tarde, la eficiencia es muy baja, casi insignificante. Esos factores conducen a un problema de muy bajo rendimiento [3].

Mediante el uso de un seguidor solar es posible rotar el módulo de acuerdo con el movimiento del sol y hacer que los rayos del sol caigan exactamente perpendiculares al módulo a lo largo del día [5].

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Diseñar un seguidor solar con una exactitud de posicionamiento menor que $\pm 0.7^\circ$ para pirheliómetro, que realizará su función a través de ecuaciones que describen la trayectoria del sol. El diseño de dicho seguidor solar se basará en la arquitectura de un robot manipulador tipo esférico cuyo efector final de sus eslabones será el pirheliómetro.

1.1.2. Objetivos específicos

- Desarrollar el modelo cinemático del sistema para conocer sus singularidades y la relación que existe entre sus coordenadas articulares con las coordenadas de referencia en las que se definirán las ecuaciones de seguimiento solar.
- Montar un método de control por movimiento resuelto para seguimiento de trayectorias y posicionamiento del robot basándose en el modelo cinemático.
- Realizar simulaciones en un software matemático del posicionamiento y trayectorias del robot.
- Manufacturar el sistema y realizar pruebas.
- Obtener el mapa de radiación solar directa de Ciudad Universitaria

1.2. Justificación

Como se mencionó anteriormente, un mecanismo de seguimiento solar es un esfuerzo por mejorar la eficiencia de la generación de energía, puesto que la aplicación más común que se le ha dado a este instrumento es la de posicionar sistemas de captación de energía solar, para su transformación a energía eléctrica. Por lo que un sistema de seguimiento solar para aplicaciones únicamente de estudio y medición de energía proveniente del Sol no ha tenido la misma prioridad de desarrollo que el antes mencionado.

El pirheliómetro que se acoplará al sistema fue producido por una empresa de Países Bajos llamada Kipp & Zonen, ellos son especialistas en el desarrollo de instrumentos para mediciones de radiación solar y mediciones atmosféricas en los sectores de Meteorología, Climatología, Industria, Energías Renovables, Agricultura y Salud Pública [3]. Por lo que, también ofrecen artículos complementarios para sus productos como es el caso de seguidores solares. Una de las causas de su fuerte posicionamiento en esta área se debe a la importancia que su país da al tema energético, en el ámbito cultural, académico y político.

En septiembre de 2013, los Países Bajos llegaron a un acuerdo energético con partes interesadas clave sobre acciones prioritarias para apoyar el crecimiento económico sostenible hasta 2020. Además de implementar el acuerdo, el gobierno debe establecer el escenario para un marco de política estable hasta 2030, que también es crucial para las energías renovables. Los Países Bajos han acelerado los procedimientos de permisos para las nuevas infraestructuras energéticas y están impulsando la reducción de los costos de tecnología con el respaldo renovable reformado. El país puede beneficiarse de nuevas interconexiones con los países vecinos, ya que las energías renovables se convierten en una parte integral de los mercados mayoristas y de equilibrio de la electricidad en la Unión Europea [1].

En México, el Servicio Meteorológico Nacional cuenta con una red de estaciones meteorológicas automáticas (EMA) diseminadas por todo el país. Parte del equipamiento de las 136 estaciones consta de productos Kipp & Zonen. Los datos de las EMA se transmiten cada 10 minutos a través del satélite geoestacionario GOES, operado por la Administración Nacional Oceanográfica y Atmosférica (NOAA) de los EE. UU [3]. Este dato brinda una idea del buen posicionamiento de dicha empresa y de la importancia que tiene el estudio de la radiación solar.

En el laboratorio de energía solar de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla se han realizado una serie de prototipos para seguimiento solar con la finalidad de generar energía eléctrica. En las figuras 1.1 y 1.2 se muestran prototipos para concentradores solares. El primero, es usado como equipo de laboratorio para caracterizar transistores de potencia sin cubierta siendo utilizados como celdas solares. El prototipo de la figura 1.3 consta de un panel con un principio de funcionamiento diferente al convencional, consiste en un sistema de tubería de cobre con un circuito cerrado de agua en su interior, el cual por efecto de termosifón genera la circulación del líquido transportando la energía en forma de calor a la parte superior. Las aplicaciones de este sistema son amplias, tales como; generación de vapor, calentador de agua, estufa solar o generación de energía eléctrica por gradientes de temperatura, entre otras. Y finalmente el prototipo de la figura 1.4 fue una modificación al de la figura 1.1 que consiste en un equipo de estudio solar de

posicionamiento autónomo usando GPS. Este equipo es desmontable con la oportunidad de acoplar celdas solares o lentes de Fresnel.



Figura 1.1. Sistema de seguimiento para concentrador solar



Figura 1.2. Sistema de seguimiento solar para 4 concentradores solares.



Figura 1.3. Sistema de seguimiento solar para panel de captación solar.



Figura 1.4. Sistema Autónomo de Seguimiento Solar SASS.

Debido a la practicidad de los diseños antes mencionados, sería posible acoplar el pirheliómetro para realizar mediciones, pero por desgracia estos no cumplen con las especificaciones técnicas requeridas para una correcta medición de radiación solar directa, pues a corde al manual de fabricante del pirheliómetro, el sistema de seguimiento solar debe de tener un error de posicionamiento menor a 0.7° .

Por lo anteriormente mencionado, es importante el desarrollo de este proyecto pues para lograr la exactitud de posición deseada, se requiere considerar aspectos ignorados en el diseño de los prototipos anteriores, como por ejemplo el estudio de sus movimientos, velocidades y distancias a través de un modelo cinemático, el estudio y la simulación de las ecuaciones de seguimiento solar para saber que

sistema de coordenadas usar para su aplicación y con base en eso proponer un diseño mecánico óptimo, etc.

Otro aspecto importante que justifica el desarrollo de este proyecto es que se pretende hacer un diseño con un costo menor al de los seguidores solares comerciales diseñados para esta aplicación.

1.3. Estructura de la tesis

El trabajo está constituido por 5 capítulos con el siguiente contenido: en el capítulo 1 se da una breve introducción del tema referente al seguimiento solar y la radiación directa solar, así como la presentación de los objetivos y la justificación que se tuvo para el desarrollo de esta tesis; en el capítulo 2 referente al marco teórico, se hizo una recopilación de la información necesaria para un adecuado análisis y desarrollo del proyecto. Posteriormente en el capítulo 3 se aborda el proceso para el diseño y fabricación del sistema, realizando simulaciones de las ecuaciones de seguimiento solar, desarrollando el modelo cinemático del sistema para su aplicación en un control de trayectoria de movimiento resuelto y tomando en cuenta todos los criterios de diseño mecánico, teoría de control e instrumentación adecuados para el correcto funcionamiento del seguidor solar. En el capítulo 4 se documentaron todas las pruebas realizadas en la medición de radiación solar directa, así como los resultados obtenidos y las medidas adoptadas para la mejora del desempeño del dispositivo con base en un análisis de los resultados. Finalmente, en el capítulo 5 se abordaron las conclusiones a las que se llegó, posterior a la finalización del proyecto y el trabajo futuro propuesto para realizar mejoras en el sistema.

Capítulo 2 Marco teórico

2.1. Energía solar

Hoy en día como resultado del acelerado desarrollo industrial y socioeconómico, uno de los problemas de mayor trascendencia, y que ha afectado a las economías del mundo, es la problemática de los energéticos. La limitación de los recursos petrolíferos y su encarecimiento, permiten prever que en países en vías de desarrollo la posibilidad de ascender a niveles de vida más altos estará cada vez más condicionada. Lamentablemente, ni siquiera la estimación más optimista de reservas adicionales de combustibles puede o debe justificar un continuo consumo acelerado [6]. Esto enfrenta a la población a un serio problema, pues la energía en palabras prácticas es lo que se requiere para todo. La Real Academia de la Lengua Española la define como “eficacia, poder, virtud para obrar”, por lo que no existe acontecimiento alguno en rutina diaria que no implique el consumir energía.

La utilización de energía solar para diversos fines prácticos no es una idea reciente. El Sol figuró, naturalmente, entre los primeros intentos del hombre por explorar el mundo. Era tan obvia la dependencia del hombre con respecto al Sol, que sus primeras religiones y culturas se formaron alrededor de este cuerpo celeste [6].

La energía proveniente del Sol es prácticamente ilimitada y es indispensable para la vida en nuestro planeta pues gracias a ella existen plantas y animales de los que se obtiene alimento, y de ella derivan otro tipo de energías como la eólica, por mencionar alguna.

Haciendo una comparativa de las fuentes de energía provenientes de los combustibles fósiles con la energía solar, existen ventajas sustanciales en esta última, como por ejemplo el estar libre de contaminación, no requiere transporte y como se mencionó anteriormente, en términos prácticos es ilimitada.

2.1.1 Radiación solar

La radiación solar se propaga en forma de ondas electromagnéticas o fotones. La energía se produce en el Sol debido a la continua reacción termonuclear que en su interior se lleva a cabo a temperaturas de varios millones de grados. La reacción nuclear básica en el interior del Sol es la fusión nuclear en la cual cuatro protones (de Hidrógeno) se combinan para formar un átomo de Helio; como consecuencia de la cual, la masa “perdida” se estima que es de unas 4 Megatoneladas por segundo, la cual se convierte en energía de radiación electromagnética [7]. Este proceso tiene lugar en el núcleo de la esfera solar para luego ser transferida a su superficie a través de una sucesión de procesos radiactivos y convectivos, incluidos los fenómenos de emisión, absorción y “re-radiación”; de tal manera que la energía solar que nos llega a la Tierra es una parte de la radiada por el Sol en todas las direcciones desde la parte más externa de la esfera solar, llamada fotosfera [7].

Con el objetivo de poder aprovechar la energía solar que incide sobre la superficie de la Tierra, es conveniente examinar de manera sucinta la naturaleza de la radiación que emana del Sol, así como las características de esta energía al alcanzar la superficie de la Tierra.

No toda la radiación solar extraterrestre que intercepta la Tierra llega a la superficie de ésta, aún en condiciones de cielo despejado. Solo la radiación solar extraterrestre con una longitud de onda comprendida entre $0.29 \mu\text{m}$ y $2.3 \mu\text{m}$ es transmitida con atenuaciones a la superficie de la Tierra. Esta atenuación se debe principalmente a los fenómenos de absorción por O_3 , H_2O y CO_2 , así como por la dispersión de otros componentes en la atmósfera: moléculas de aire, polvo, vapor de agua, etc. [6].

Al nivel de la superficie terrestre, llegan dos tipos de flujos de onda: el flujo que proviene directamente del Sol atenuado por absorción y esparciación en las diferentes capas de la atmósfera y el flujo que se esparce en cada volumen elemental de la atmósfera en la dirección del punto de observación. El primero se le

conoce como **radiación solar directa** y el segundo como **radiación solar difusa (o esparcida)**.

La **radiación solar global** se define como la “suma” de estos dos flujos que inciden en una superficie horizontal sobre la superficie terrestre [7], es decir:

$$G_h = G_b \cos(Z = \text{ángulo cenital}) + G_d$$

donde G_h es la radiación solar global, G_b la radiación directa y G_d radiación difusa.

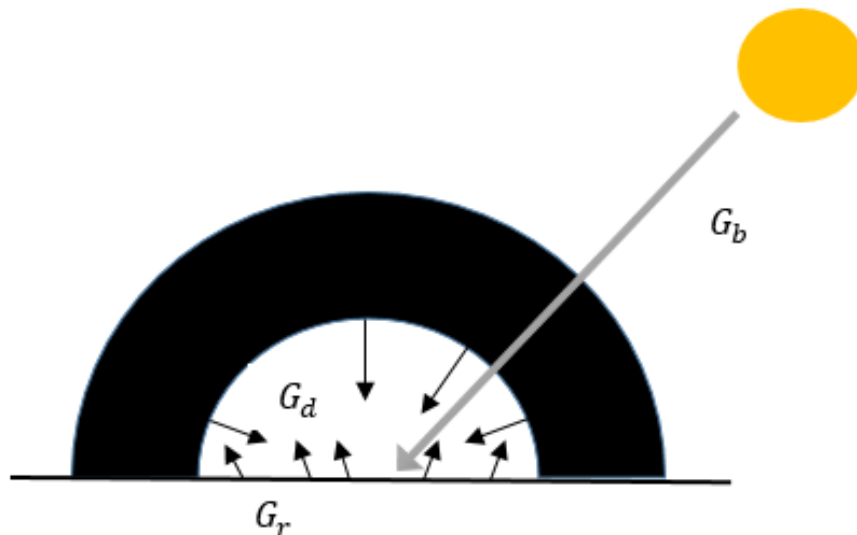


Figura 2.1. Componentes de la radiación solar.

2.1.2 Instrumentos para medir la radiación solar

Una vez que se tiene una idea clara sobre la naturaleza de la energía solar, su propagación en forma de ondas electromagnéticas y su definición según el tipo de comportamiento que tiene en la atmósfera terrestre debido a los procesos que experimenta, es necesario entender como cuantificarla, ya que, como cualquier otra magnitud física, se requiere de su medición para aprender a predecir o evaluar su comportamiento y de esta manera generar conocimiento sobre ella.

Existen distintos instrumentos para medir la radiación solar. Todos ellos, convirtiéndola en otro tipo de energía, dando como resultado una medida o lectura proporcional a la intensidad de la radiación. El instrumento más común, conocido

como *piranómetro*, se emplea para registrar la radiación total dentro de su campo de vista hemisférico [6] (radiación solar global). En la figura 2.2 se presenta la fotografía de un piranómetro típico. Este dispositivo junto con otros instrumentos de medición de radiación solar comparte un funcionamiento similar usando sensores de tipo termoeléctrico que generan una señal eléctrica útil para la obtención de datos correspondientes a la cuantificación de la radiación solar en función del tiempo.



Figura 2.2. Piranómetro termoeléctrico.

El parámetro físico (radiométrico) que mide el piranómetro es la densidad de flujo de radiación solar global, expresado en unidades de W/m^2 . Las características geométricas principales de este dispositivo son las siguientes (ver figura 2.3): el sensor consta de una superficie plana colocada horizontalmente, de tal manera que puede recibir radiación de todas direcciones, procurando que su campo de “visión” esté limitado al hemisferio celeste, evitando en todo momento, tener obstáculos en el horizonte a su alrededor. El efecto del viento y cualquier tipo de precipitación se evita colocando sobre los sensores uno o dos domos concéntricos de vidrio (o cuarzo) de transparencia cercana a 1 para todas las longitudes de onda del espectro actinométrico. Con estas características este instrumento es capaz de recibir en su sensor tanto radiación difusa como radiación directa [7].

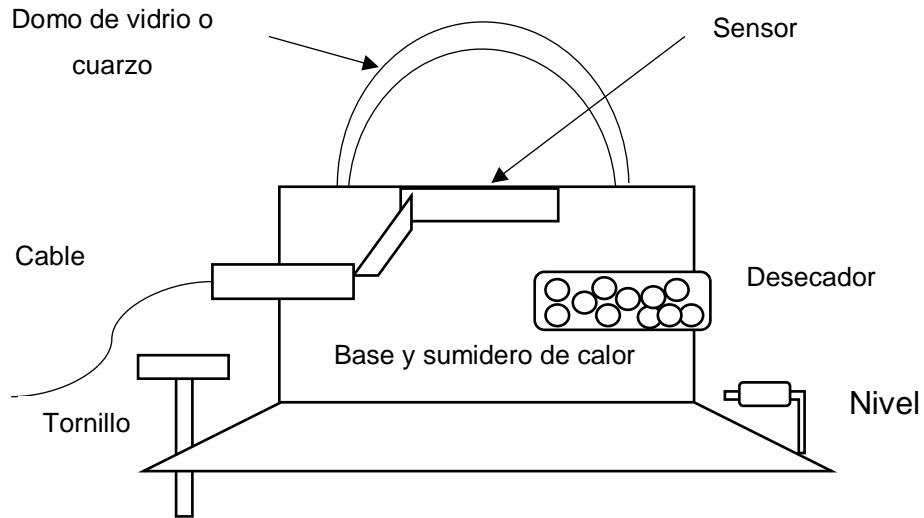


Figura 2.3. Principales componentes de un piranómetro.

El segundo instrumento que se utiliza para realizar mediciones de radiación proveniente del Sol es el *pirheliómetro*, este instrumento con un comportamiento similar al anterior, mide la radiación solar directa normal.

El campo de vista de este instrumento es igual a $5^{\circ}43'30''$. El pirheliómetro cuenta generalmente con un dispositivo electrónico que le permite seguir al Sol en forma continua, por lo que se puede llevar a cabo un registro de la radiación directa normal a lo largo del día [6].

El parámetro físico (radiométrico) que miden los pirheliómetros es la densidad de flujo de energía de radiación o irradiancia expresada en unidades de W/m^2 . Las características geométricas principales que tiene este dispositivo son las que se muestran en la figura 2.4. Por las limitaciones prácticas en los mecanismos de seguimiento, el pirheliómetro puede recibir energía de un cono de 5° a 7° de apertura, la cual es mayor que la del disco solar que corresponde aproximadamente a 0.5° [7].

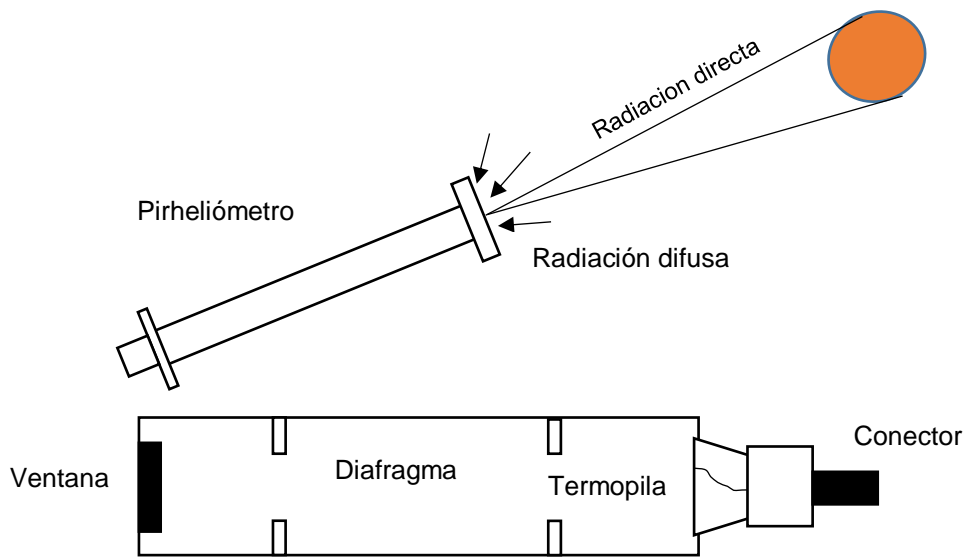


Figura 2.4. Principales componentes de un pirheliómetro.

La información que proporciona el pirheliómetro debe interpretarse cuidadosamente en el diseño de concentradores de enfoque que pueden alcanzar altas temperaturas de operación. La mayoría de estos concentradores enfocan únicamente al disco solar y no a la zona de aproximadamente 5° del disco y su aureola que ve un pirheliómetro. En el caso de cielo completamente despejado esta diferencia no representa ningún problema serio, dado que 1° de arco más allá del disco solar la densidad del flujo de energía disminuye hasta una milésima parte. Sin embargo, para un cielo brumoso la diferencia puede conducir a una sobreestimación del funcionamiento térmico de los concentradores [6].

Un tercer instrumento muy empleado y antiguo es el *heliógrafo de Campbell-Stokes* para medir las horas de asoleamiento en un lugar. El instrumento está constituido por una lente esférica que produce una imagen del Sol sobre papel tratado químicamente. El papel se quema cuando el valor de la radiación está por encima de los 120 W/m^2 . La longitud del papel quemado es un índice del número de horas de sol brillante. Debe apuntarse que el heliógrafo de Campbell-Stokes no mide la energía solar; solamente proporciona los intervalos de tiempo en el día en que la radiación está por encima de un mínimo establecido [6].

Como se mencionó anteriormente, el principio de funcionamiento central de los instrumentos de medición de radiación solar es mediante sensores termoeléctricos. El elemento fundamental de un sensor de este tipo es el termopar, con el que se construyen termopilas. Un termopar consiste en dos diferentes conductores, con los cuales se hace un par de juntas alternando los conductores formando un circuito cerrado, si las juntas se ponen en contacto con diferentes contenedores (reservorios) de calor a diferente temperatura, en este circuito se genera una fuerza electromotriz térmica, fenómeno que se le conoce como efecto Seebeck [7].

Una termopila es un conjunto de termopares conectados en serie de tal manera que la fuerza electromotriz total sea la suma de las fuerzas electromotrices de sus elementos. El arreglo de termopares se realiza de tal manera que se configuran áreas de “juntas frías”, T2, y áreas de “juntas calientes”, T1, ver figura 2.5 [7].

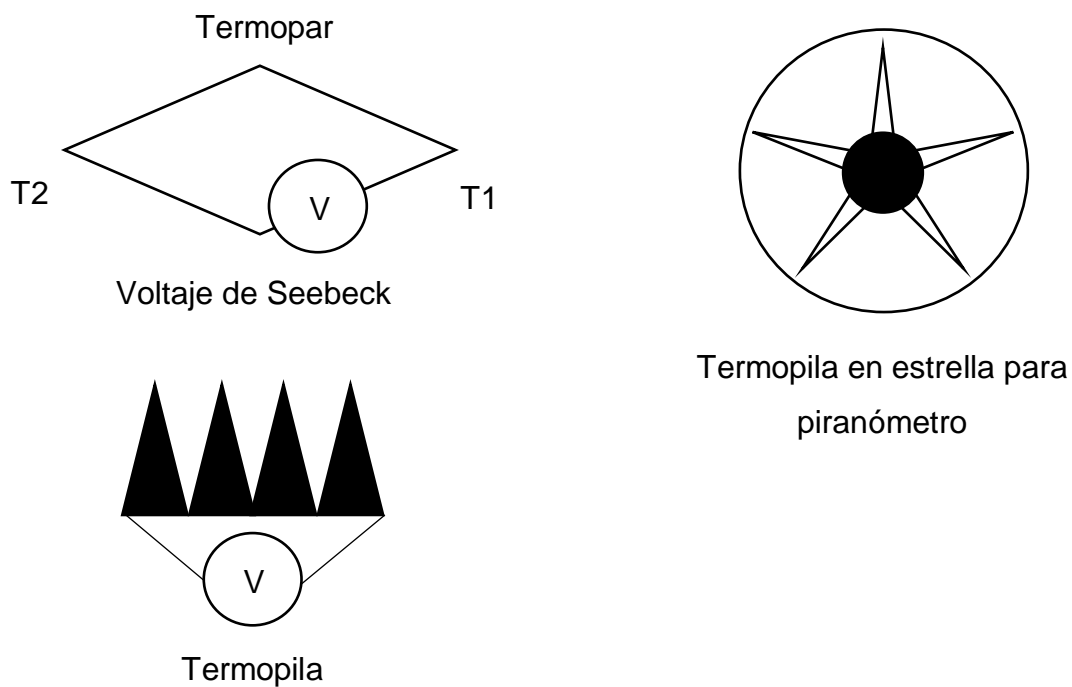


Figura 2.5. Sensor de termopila.

Si bien los sensores termoeléctricos son los mejores instrumentos para medir los flujos de energía de radiación, estos deben calibrarse respecto de instrumentos que por sus características físicas y de diseño sean capaces de medir en forma absoluta

estos flujos con un alto grado de exactitud de tal manera que se les pueda considerar instrumentos estándar de referencia [7].

Recientemente expertos en solarimetría han hecho uso de sensores con otros principios de funcionamiento como los de tipo fotovoltaicos que constan de un fotodiodo de silicio. Dichos sensores han sido caracterizados y comparados con instrumentos estándar de referencia y su desempeño ha dado resultados favorables. Tal y como lo menciona Muhlia [7], dentro de su estudio para esta aplicación, estos sensores se han sometido a comparaciones con piranómetros de primera clase bajo diferentes condiciones de cielo (despejados, nublados, etc.) y han dado como resultado un alto grado de correlación estadística, lo cual permite decir que las mediciones pueden tener una precisión dentro de un $\pm 2\%$ en días despejados y hasta un $\pm 5\%$ en días nublados; además de que se han aprovechado otras características de estos sensores como lo es su constante de tiempo (aproximadamente $10 \mu s$). Con esto, se han construido “Piranómetros con Banda Rotatoria”, que son instrumentos que permiten medir casi simultáneamente la radiación global y la difusa, a partir de lo cual es posible calcular la radiación directa haciendo uso de las ecuaciones 2.1 y 2.2.

$$G_h = G_b \cos(Z) + G_d \quad 2.1$$

De donde se tiene que:

$$G_b = \frac{G_h - G_d}{\cos(Z)} \quad 2.2$$

En esta fórmula G_b es la radiación directa normal, G_h es la radiación global y G_d es la radiación difusa.

En la figura 2.6 se observa un ejemplo de gráficas típicas de las mediciones de los tres tipos de radiación.

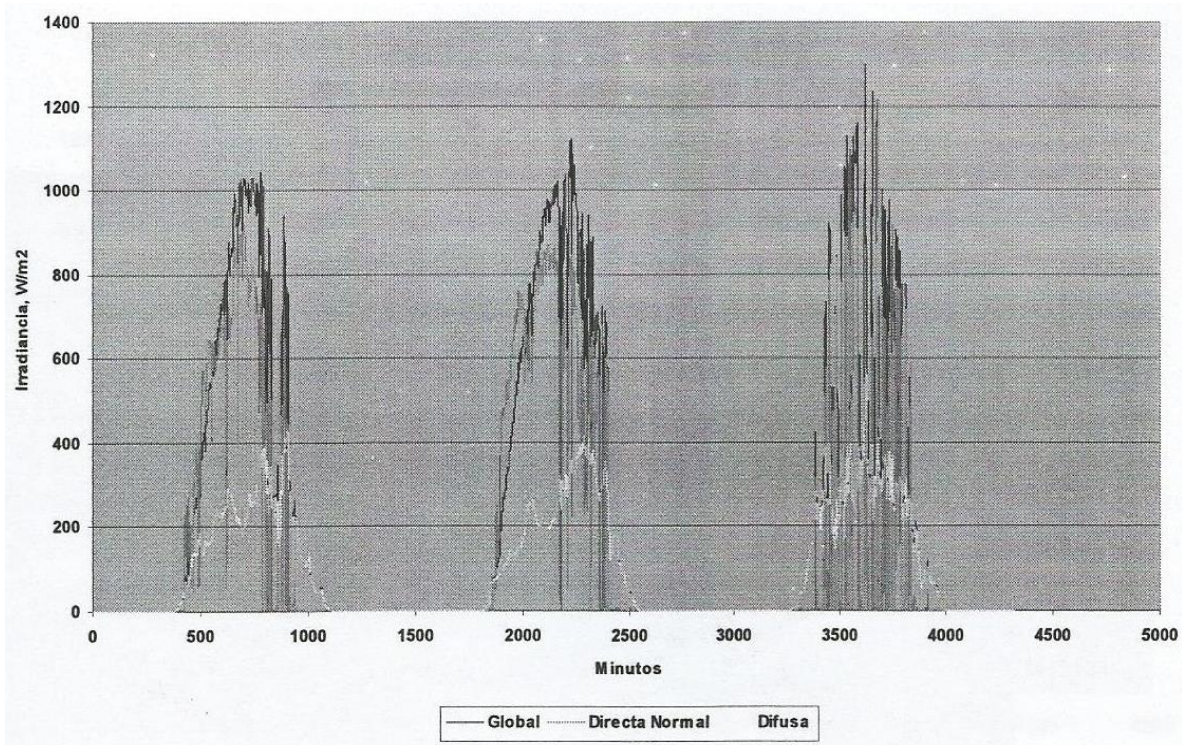


Figura 2.6. Registros de radiación solar en Universidad Veracruzana, 23, 24 y 25 de septiembre de 2006 [7].

2.2. Trayectoria solar

Como es claramente sabido, el Sol sale por el oriente y se oculta en el poniente, sin embargo, esta acepción es un tanto no objetiva pues la trayectoria solar cambia significativamente en función del día del año y la ubicación geográfica.

Para establecer un marco de referencia sobre la posición geográfica del Sol desde cualquier punto sobre la superficie de nuestro planeta, Prinsloo [4] explica que la altitud solar es el ángulo entre el plano horizontal y la línea que apunta al Sol desde el punto de observación, este ángulo varía durante el día, es cero durante la puesta de Sol y 90° cuando éste se encuentra normal a la superficie, usualmente durante el mediodía solar. El acimut o azimut solar es el desplazamiento angular desde el norte geográfico hasta el haz de proyección de la radiación solar en el plano horizontal. Ambos ángulos se pueden apreciar en la figura 2.7.

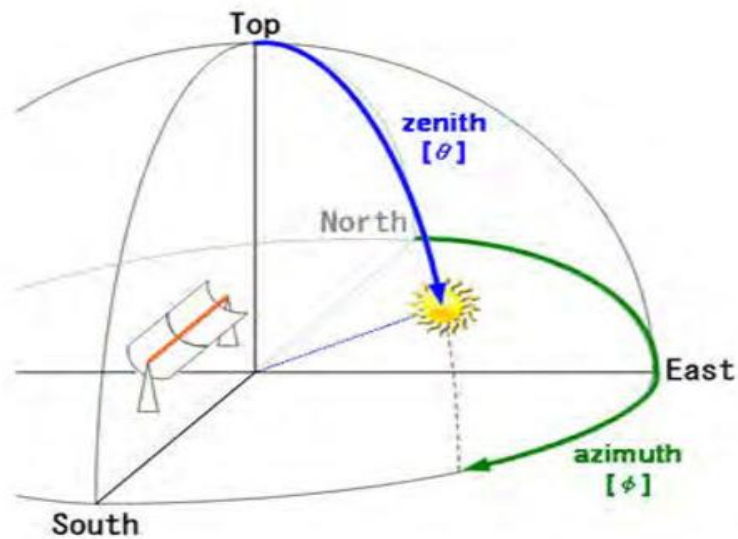


Figura 2.7. Vector solar típico mostrando el acimut y la elevación solar para un punto arbitrario en el planeta [4]

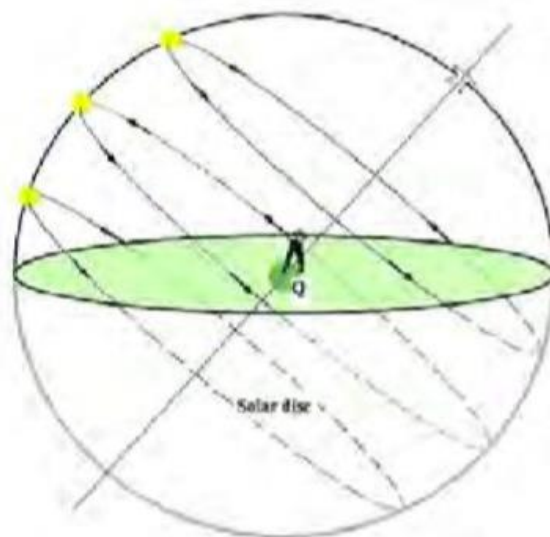


Figura 2.8. Vista geométrica de la trayectoria solar vista en un punto Q durante el solsticio de invierno, equinoccio y solsticio de verano [4].

Conforme el Sol se mueve en el cielo, la trayectoria puede ser vista como si el Sol estuviera siguiendo la circunferencia de un disco que está desplazado del

observador en varios ángulos, justo como se ilustra en la figura 2.8. Esta imagen presenta una vista geométrica de la trayectoria solar de un observador en un punto arbitrario Q sobre la superficie del planeta durante los intervalos de solsticio de invierno, equinoccio y solsticio de verano [4].

Los discos solares en la figura 2.8 son conocidos como “Discos Diurnos”. El Sol entonces se mueve sobre el disco de la esfera celeste en trayectorias circulares concéntricas centradas en los polos celestes, y conforme la Tierra rota de oeste a este, el Sol parece moverse de este a oeste a través de sus discos diurnos.

Desde la perspectiva del observador, el disco solar en movimiento sigue una trayectoria hacia arriba y abajo del eje Polar en ciclos anuales. Estos cambios de posición se dan en un ángulo fijo o inclinación con respecto al observador, y el disco solar cambia de posición en incrementos diarios que se encuentran en función de la fecha en el calendario [4].

El cambio de la trayectoria solar debido a la fecha del año es consecuencia de que la Tierra se mueve en una trayectoria elíptica en uno de cuyos focos se encuentra el Sol, la distancia media de la Tierra al Sol es de 149.6 millones de kilómetros, desde esta distancia, el disco solar subtiende un ángulo de aproximadamente 32' de arco. La distancia entre el Sol y la Tierra varía día con día, de tal manera que a lo largo del año la variación total es de aproximadamente $\pm 1.7\%$ [7].

Si se considera que la Tierra gira alrededor de su eje polar y que su órbita está en el plano de la eclíptica (donde suceden los eclipses), el ángulo que forma este eje con este plano es de $23^{\circ} 26' 45''$ y permanece (casi) constante a lo largo del año; a este ángulo se le llama oblicuidad del eje terrestre respecto del plano de la eclíptica [7].

Como consecuencia de estas peculiaridades geométricas existen también las estaciones durante un año, como se observa en la figura 2.9.

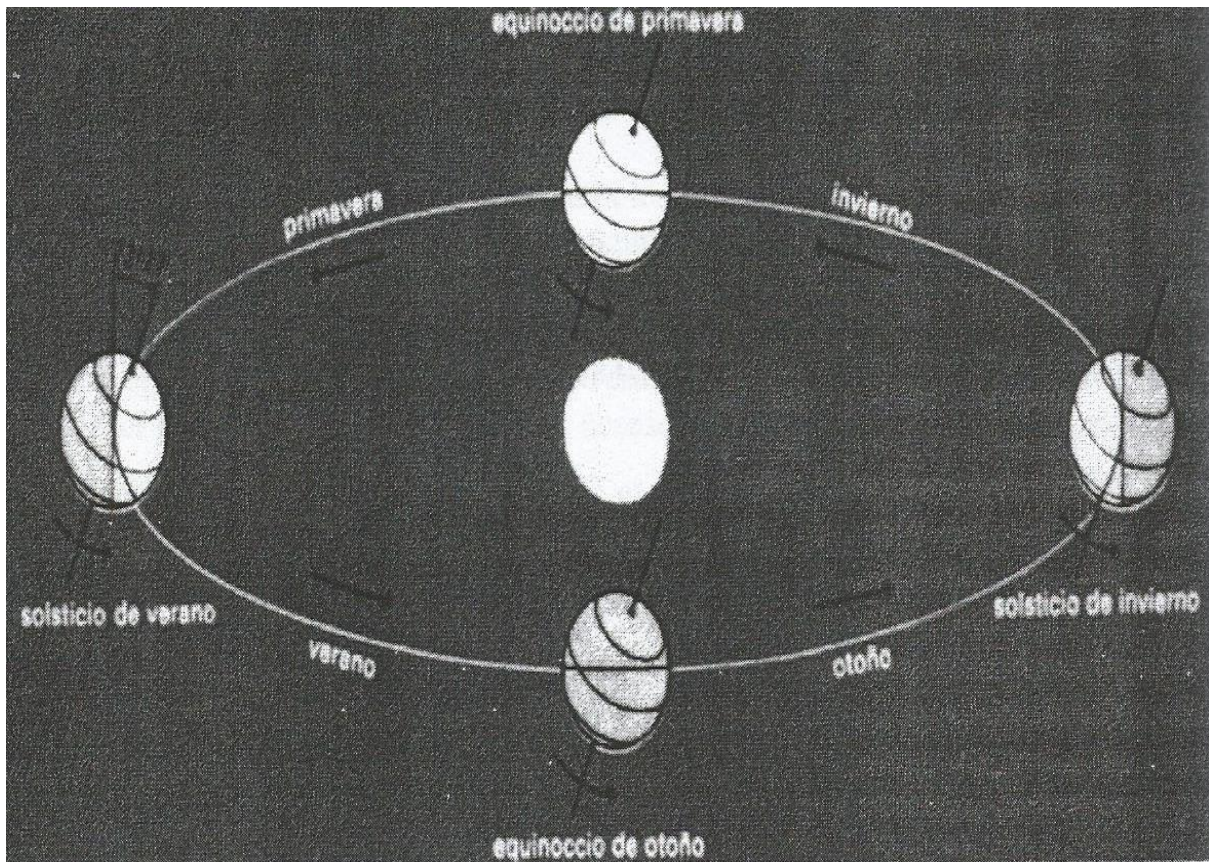


Figura 2.9. Esquema que representa el sistema astronómico formado por el Sol y la Tierra. En este esquema también se muestra la posición de la Tierra al comienzo de cada estación (solsticios y equinoccios) a lo largo de un ciclo anual [7].

En resumen, la trayectoria solar se ejecuta en ciclos anuales y se debe a la oblicuidad del eje de nuestro planeta, provocando así un cambio en la posición del disco solar en incrementos diarios. En la figura 2.10 se muestra una representación gráfica de este fenómeno, en la imagen se aprecia el cambio de posición que tiene el disco solar especificando los meses en que se lleva a cabo para una ubicación específica en la Tierra.

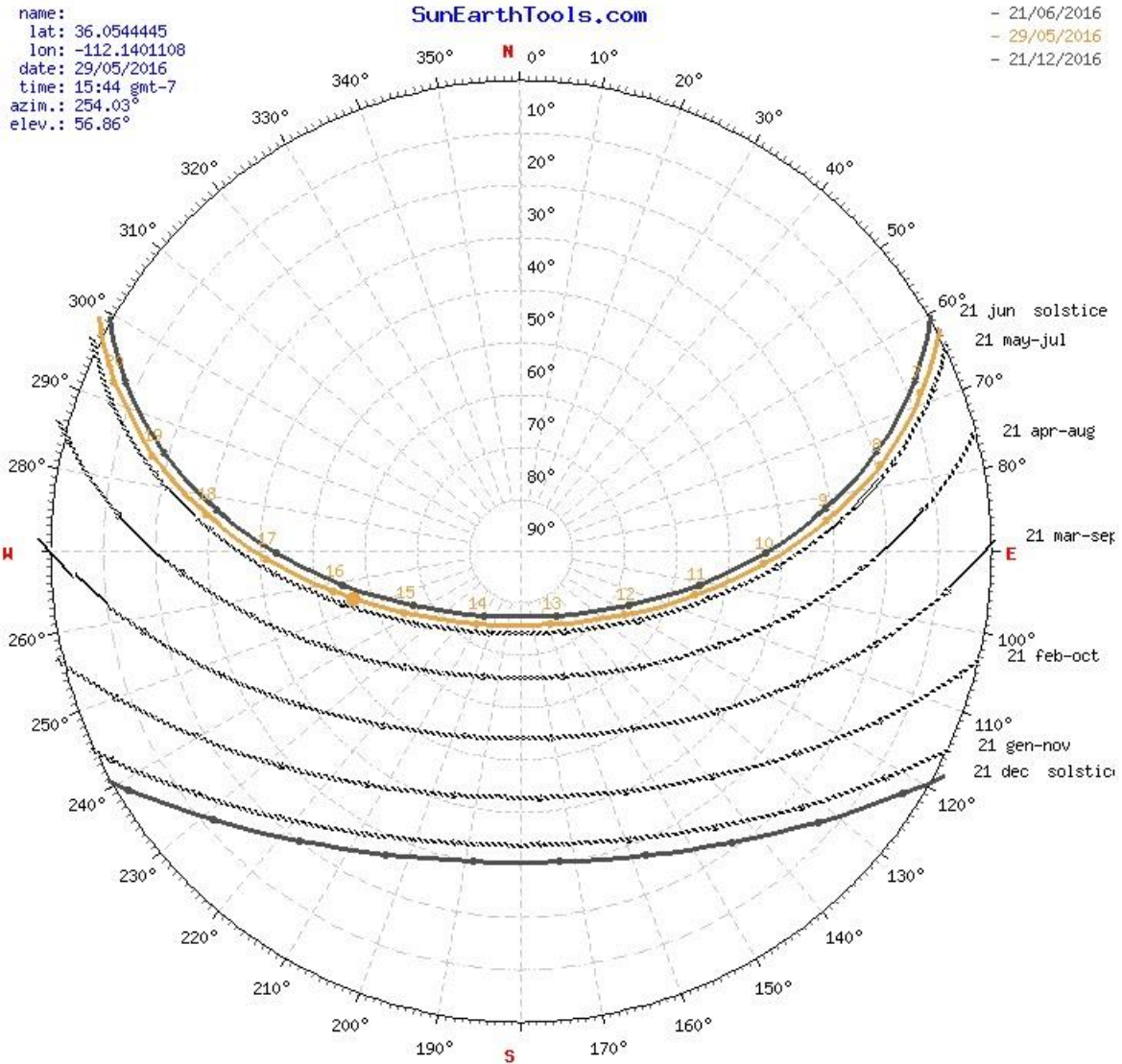


Figura 2.10. Mapa de trayectoria solar para una zona específica del planeta.

2.2.1 Ecuaciones de seguimiento solar

En el continuo estudio del movimiento de la Tierra alrededor del Sol, se han desarrollado algoritmos para determinar la posición solar en la esfera celeste a cualquier hora y fecha a lo largo del año.

Como se mencionó anteriormente, para conocer la posición del Sol es necesario conocer el valor de dos ángulos. Para poder cuantificar estos ángulos se recurre a dos sistemas de coordenadas, por medio de las cuales se describe el movimiento

aparente del Sol respecto de un punto sobre la Tierra y respecto de la Tierra misma, estos sistemas son denominados Sistema de Coordenadas Local y Sistema de Coordenadas Geocéntrico, respectivamente [7].

Como se mencionó anteriormente, una de las variables a considerar para conocer la posición del Sol es el tiempo, existen medidas del tiempo distintas que es vital conocer:

- Hora Solar Local (HSL)
- Hora Local (HL)
- Hora Estándar Local Meridiana (HELM)

Las dos primeras varían dependiendo de factores como la excentricidad orbital que depende de la trayectoria elíptica que sigue nuestro planeta alrededor del Sol como se mencionó con anterioridad y de ajustes humanos como las zonas horarias y el Horario de Verano.

La HELM es una referencia usada para las distintas zonas horarias y es obtenida mediante la ecuación 2.3 [8].

$$HELM = 15^\circ * \Delta T_{GMT} \quad 2.3$$

Donde ΔT_{GMT} es la diferencia en horas que existe desde el Meridiano de Greenwich o Meridiano Cero, correspondiente a la referencia para la medición de zonas horarias hasta la ubicación del planeta en donde se busca la posición solar.

Muñoz [8] documenta que para poder corregir los efectos de la excentricidad orbital y la inclinación terrestre a la hora del seguimiento solar es necesario hacer uso de una ecuación llamada Ecuación del Tiempo (ET), descrita por la ecuación 2.4.

$$ET = 9.87 \text{sen}(2B) - 7.53 \text{cos}(B) - 1.5 \text{sen}(B) \quad 2.4$$

Donde B corresponde a la ecuación 2.5

$$B = \frac{360}{365}(d - 81) \quad 2.5$$

donde la variable d corresponde al número de días del año que han transcurrido; por ejemplo, $d=1$ para el 1 de enero.

La Corrección del Tiempo (CT) es otro factor utilizado para contrarrestar los efectos de la variación entre zonas horarias con la HSL [8].

$$CT = 4(Longitud - HELM) + ET \quad 2.6$$

En la ecuación 2.6 el valor de 4 se refiere a que la Tierra gira 1° cada 4 minutos. Lo anterior se calcula de una manera sencilla sabiendo que el periodo de rotación es de 1440 minutos (24 horas), al dividir los 1440 minutos entre 360° equivalentes a una vuelta completa, se obtienen 4 minutos por grado.

El siguiente paso es calcular la Hora Solar Local, para posteriormente conociendo el comportamiento del tiempo en la ubicación específica poder hacer una relación entre dicho tiempo y la posición solar. Para ello se hace uso de una herramienta llamada relación Hora-Ángulo (HRA) [8]. La ecuación 2.7 corresponde al cálculo de la Hora Solar Local (HSL) y la ecuación 2.8 la HRA.

$$HSL = HL + \frac{CT}{60} \quad 2.7$$

$$HRA = 15^\circ(HSL - 12) \quad 2.8$$

El valor de 15° de la ecuación 2.8 corresponde a la cantidad de grados que se desplaza la Tierra en su rotación durante 1 hora, obtenido sabiendo que un ciclo completo de rotación (360°) lo realiza en 24 horas, por lo tanto, al dividir 360° entre 24 horas se obtiene el valor antes mencionado.

El ángulo de inclinación del eje de rotación terrestre es de 23.5° y es a raíz de este ángulo que surge el término declinación solar (δ) [8], un elemento a considerar en el seguimiento solar.

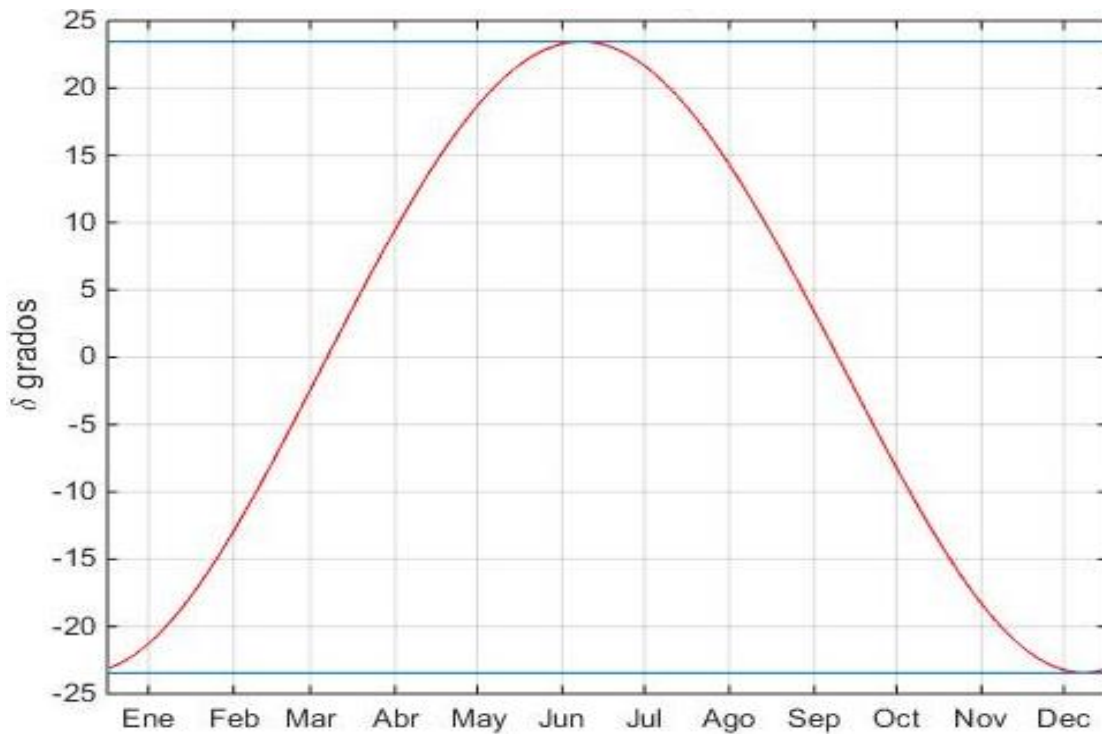


Figura 2.11. Gráfica de la declinación solar a lo largo del año.

En la figura 2.11 se muestra una gráfica del comportamiento de la declinación solar según la época del año. Y la expresión matemática que describe dicho fenómeno corresponde a la ecuación 2.9 [8].

$$\delta = \text{sen}^{-1}(\text{sen}(23.5) * \text{sen}\left(\frac{360}{365}(d - 81)\right)) \quad 2.9$$

Retomando el concepto ilustrado en la figura 2.7 sobre los ángulos de elevación solar y Azimut, necesarios para una correcta localización del Sol, las ecuaciones 2.10 y 2.11 corresponden a los cálculos para sus respectivas cuantificaciones.

El ángulo de elevación solar (α) está directamente relacionado con la declinación (δ), la latitud (L) y la relación hora-ángulo (HRA). Mientras que el ángulo azimutal (Φ) además de estar en función de las variables anteriores, también usa el ángulo de elevación solar para poder ser calculado, es importante tener en cuenta que, si la HLS es mayor a 12 horas, la ecuación 2.11 se debe ajustar al cambio de medio día aplicando la ecuación 2.12 [8].

$$\alpha = \text{sen}^{-1}(\text{sen}(\delta)\text{sen}(L) + \cos(\delta) \cos(L) \cos(HRA)) \quad 2.10$$

$$\Phi = \text{COS}^{-1}\left(\frac{\text{sen}(\delta) \cos(L) - \cos(\delta)\text{sen}(L)\cos(HRA)}{\cos(\alpha)}\right) \quad 2.11$$

$$\Phi_{>12} = 360^\circ - \Phi \quad 2.12$$

2.2.2 Sistemas de seguimiento solar

Las tecnologías solares son ampliamente caracterizadas dependiendo la forma en que capturan, convierten y distribuyen la luz solar.

Las técnicas solares activas, incluyen el uso de paneles fotovoltaicos, colectores térmicos solares con equipamiento eléctrico o mecánico para convertir la luz solar en distintas salidas funcionales.

Las técnicas solares pasivas, incluyen orientar un sistema hacia el Sol, seleccionando materiales con masas térmicas favorables [5].

Hablando del tema de conversión de energía, el problema básico es que los módulos solares son estacionarios, por lo tanto, durante la mañana y la tarde, los rayos solares inciden en un ángulo no favorable sobre dichos módulos. Esto reduce la capacidad de generación del sistema, haciendo que solo sea óptima mientras la incidencia de la luz solar sea de manera perpendicular sobre el módulo. Es por ello que Agarwal [5], menciona que un sistema de seguimiento solar es un esfuerzo para incrementar la generación de energía a través de un módulo solar, haciendo que éste reciba la luz solar de manera perpendicular todo el tiempo.

Basándose en la definición anterior, se puede dar una definición global para un sistema de seguimiento solar, tomando en cuenta que este no solo tiene aplicaciones de conversión de energía, también es ampliamente usado en áreas de estudio de la radiación solar como lo es la climatología y la meteorología. Por lo tanto, un sistema de seguimiento solar se puede definir como un dispositivo mecánico con la capacidad de hacer incidir sobre su elemento actuador (panel solar,

piranómetro, pirheliómetro, etc.) la luz solar de manera aproximadamente perpendicular en todo momento mientras se encuentre operando, como se aprecia en la figura 2.12.

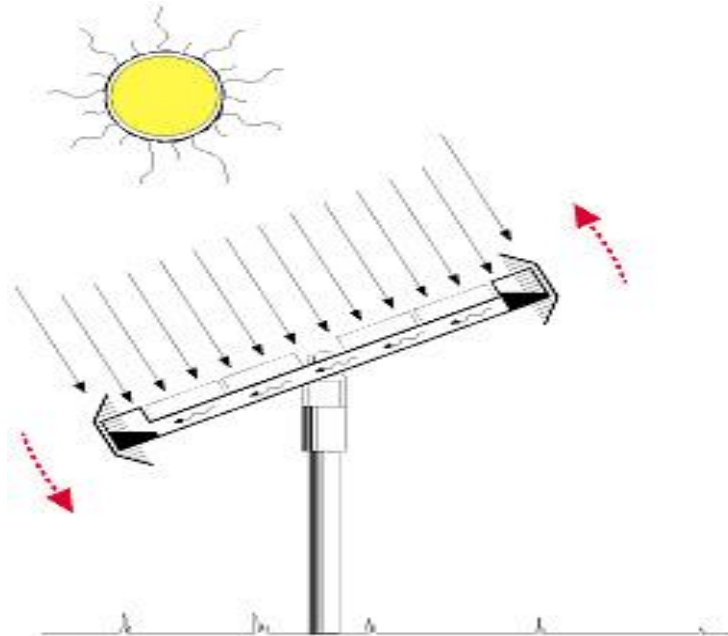


Figura 2.12. Sistema de seguimiento solar para panel fotovoltaico.

Los seguidores solares son ampliamente usados en estaciones de monitoreo solar que miden la radiación directa, difusa y global, en aplicaciones de predicción del tiempo para generar modelos climatológicos. Otras aplicaciones pueden incluir investigación de la química atmosférica, cuantificación de la contaminación ambiental y pruebas de materiales [3].

En general, una plataforma de seguimiento solar eléctrica incluye un sistema de control mecánico para manejar el movimiento del dispositivo colector solar. Este es usado para seguir al Sol en dos dimensiones y enfocar la luz solar. Según Prinsloo [4], un sistema completo, integrado de seguimiento solar típico incluye los siguientes elementos y componentes:

1. Subsistema de accionamiento mecánico transmisor/actuador: Actuadores lineales, engranajes de tornillo, controladores lineales y de giro y todos los elementos mecánicos necesarios para el óptimo posicionamiento.

2. Motores eléctricos: De corriente directa o alterna para manejar los componentes mecánicos por medio de controles de corriente, frecuencia o velocidad.
3. Almacenamiento de energía: Sistema de batería de respaldo para el almacenamiento de energía con sus correspondientes requisitos de potencia de arranque.
4. Subsistema de detección de movimiento: decodificadores lineales o rotatorios, sensores de inclinación, fotodiodos, etc.
5. Algoritmo de posición solar: algoritmo para calcular de manera continua el vector solar (obteniendo los ángulos de elevación y azimut solar).
6. Subsistema de unidad de control: dispositivo(s) programable para coordinar los modos de operación, así como la estrategia de control para posicionar el sistema de acuerdo con las coordenadas del algoritmo de posición solar o coordenadas del sensor.
7. Finales de carrera: dispositivos para prevenir movimientos más allá de los límites predefinidos, como medida de seguridad para evitar el daño al seguidor solar o su cableado.
8. Dispositivos de detección ambiental o atmosférica: detección de intensidad de luz, solarímetro, piranómetro, sensores de viento, temperatura, humedad y presión en el ambiente; esto para detectar riesgos o amenazas ambientales.
9. La carga útil: el subsistema colector, típicamente un elemento óptico, lente, reflector o sistema de recolección solar (módulo fotovoltaico o dispositivo montado mecánicamente en el punto focal).

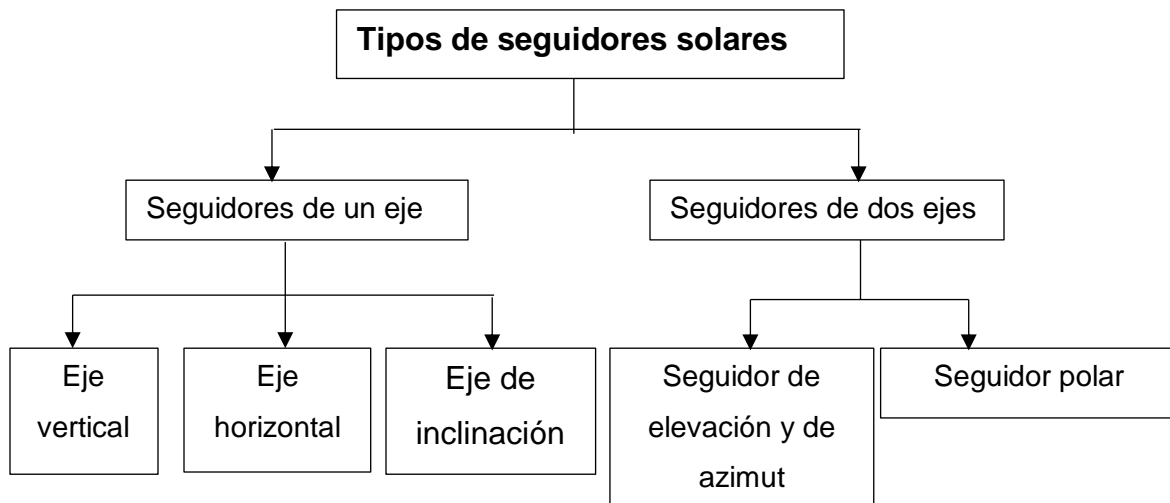


Figura 2.13. Tipos de plataformas de seguimiento solar existentes [4].

En la figura 2.13 se muestran los tipos de diseños de plataformas de seguimiento solar. En el diseño de un seguidor solar de solo un eje, el sistema impulsa al instrumento sobre un eje de rotación hasta que el rayo central del Sol y la abertura normal sean coplanares.

Hay típicamente tres tipos de seguidores solares de un eje. El seguidor de eje horizontal (el eje del seguimiento permanece paralelo a la superficie de la Tierra y siempre orientado en dirección este-oeste o norte-sur). Seguidor de eje inclinado (el eje de seguimiento está inclinado desde el horizonte por un ángulo orientado a lo largo de la dirección norte-sur). Y el seguidor de eje vertical (el eje de seguimiento es colineal con el eje de zenit) [4].

Los seguidores solares de dos ejes siguen al Sol en el plano horizontal y vertical. En estos sistemas de seguimiento solar, el colector solar debe poder girar libremente alrededor del acimut y los ejes de elevación. Dichos sistemas de seguimiento de dos ejes rastrean al Sol de modo que el vector solar es normal a la apertura para alcanzar una eficiencia de recolección cercana al 100% [4].

En la figura 2.14 se muestra una fotografía de un seguidor solar de dos ejes para pirheliómetro



Figura 2.14. Sistema de seguimiento solar con pirheliómetro para medir la radiación solar directa (fotografía de Yasser Alemán, 2015).

2.3. Sensores de orientación angular

Este tipo de sensores son usados en una amplia gama de aplicaciones académicas, comerciales e industriales. De hecho, después de la medición de la temperatura, la medición de la posición es la segunda propiedad más común para medir [9].

Por su principio de funcionamiento se pueden dividir en:

- Sensores de contacto
- Magnéticos
- Ópticos

El ejemplo más básico de estos sensores es el potenciómetro, este es un sensor de contacto que mide la diferencia de tensión entre sus terminales cuando sus contactos se deslizan sobre una pista con propiedades resistivas, por lo que la posición está en función del voltaje medido.

Para los sensores magnéticos, todos usan un principio de medición similar, cuando un imán se desplaza en relación con un detector magnético, el campo magnético cambia en proporción a su desplazamiento relativo. Una forma común es el

dispositivo de Efecto Hall. Estos dispositivos superan muchos inconvenientes de los ópticos, ya que son más tolerantes a la presencia de cuerpos extraños [9].

En un sensor óptico, el principio fundamental consiste en que un haz de luz brilla a través de, o sobre una rejilla; la luz resultante se mide usando un fotodetector y se genera una señal de posición [9]. Este tipo de sensores se conocen como *encoders* o *codificadores*.

De manera general, existen dos tipos de codificadores, el codificador absoluto y el incremental. El primero, mantendrá la información angular aun cuando se deje de suministrar energía al sistema. Esto tiene un beneficio ya que la última posición es conocida exactamente y está disponible inmediatamente después de aplicar energía al sensor [4]. Para el codificador incremental, se abundará con mayor profundidad en sus características y funcionamiento, debido a que es el sensor ocupado para este trabajo.

2.3.1 Codificador rotatorio incremental de cuadratura

Este tipo de sensores son típicamente magnéticos. Registran los cambios diferenciales en la rotación de un sistema en términos de pulsos magnéticos. Este decodificador no hace un seguimiento de la posición física del sistema, excepto si un módulo electrónico se conecta a la unidad que almacena los valores del sensor continuamente.

El codificador incremental detecta cambios de posición y reporta los pulsos a un sistema que hace un conteo de ellos, por ejemplo, un microcontrolador o contadores electrónicos. Dejando de suministrar energía eléctrica al sensor, este no es capaz de proveer información sobre la anterior posición registrada.

Para cuantificar el movimiento, el codificador convierte dos (o más) señales de corriente alterna en señales cuadradas llamadas A y B que se encuentran desfasadas 90° [4]. En las figuras 2.15 y 2.16 se muestran los principios de operación de un codificador de pulsos magnéticos.

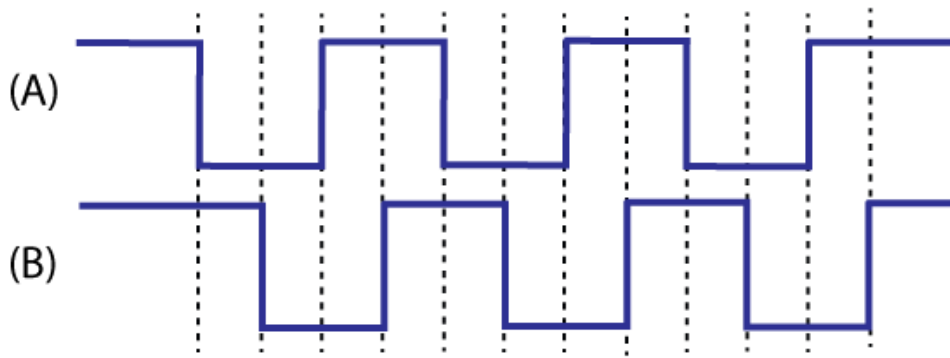


Figura 2.15. Señales de los canales de un codificador incremental desfasadas 90°.

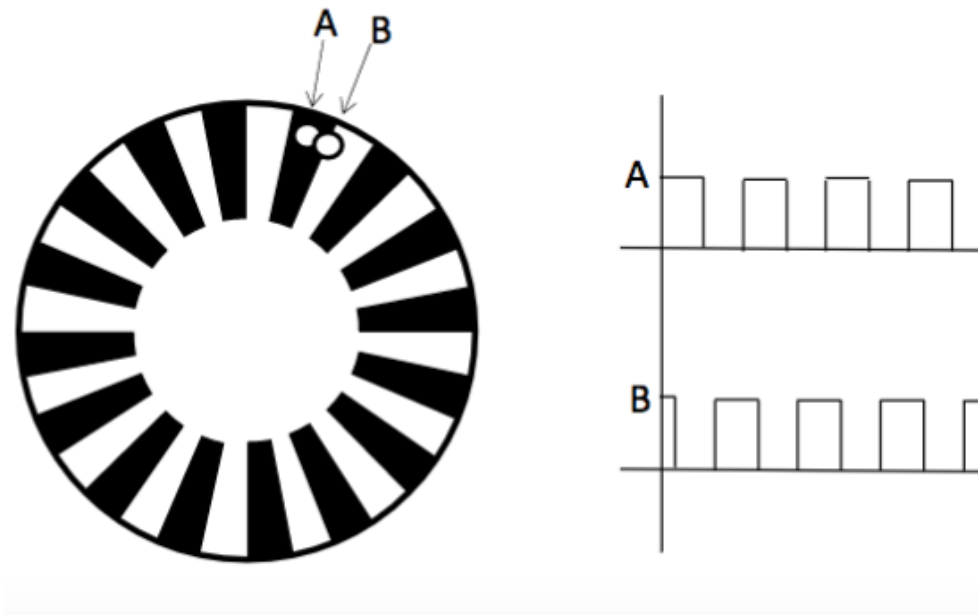


Figura 2.16. Esquema de mecanismo de codificador incremental y sus respectivas señales de salida.

2.3.2 Acelerómetro

Un sistema de seguimiento solar puede usar sensores de movimiento (acelerómetros) como dispositivos de retroalimentación para calcular de manera continua la posición, orientación y velocidad, sin la necesidad de usar referencias externas [4].

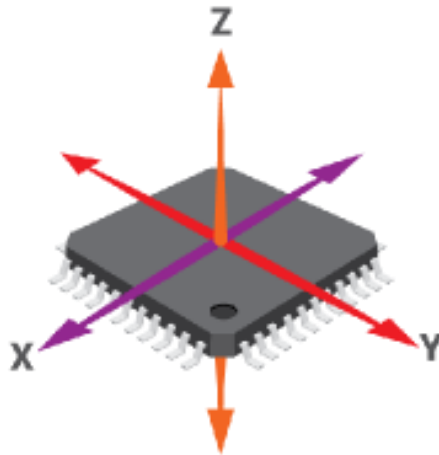


Figura 2.17. Sistema de ejes coordenados de un acelerómetro

Un acelerómetro es un instrumento destinado a medir aceleraciones. Esto no es necesariamente la aceleración de coordenadas (cambio de velocidad del dispositivo en el espacio), sino es el tipo de aceleración asociada con el fenómeno de fuerza experimentado por una masa que se encuentra en el marco de referencia del dispositivo [10]. Por lo cual, este instrumento es capaz de medir la aceleración debida a la gravedad de la Tierra viéndola como un vector en un sistema de ejes coordenados, como se muestra en la figura 2.17, y así poder conocer la inclinación del sensor debido a la descomposición del vector gravitatorio en sus respectivas componentes en x,y,z.

2.3.3 Magnetómetro

Según la Real Academia de la Lengua Española, un magnetómetro es un aparato que mide la inducción de un campo magnético en una dirección determinada. Por lo tanto, este instrumento como sensor de orientación angular, al igual que un acelerómetro, por medio de un sistema de coordenadas cuantifica la intensidad del campo magnético terrestre y por medio de su magnitud en cada componente se pueden hacer cálculos angulares. Debido a esto su modo de funcionamiento se puede comparar al de una brújula pudiendo ser usado para localizar alguno de los

puntos cardinales o la diferencia angular respecto a alguno de ellos, haciendo previamente cálculos para la localización del Norte geográfico a través del Norte magnético.

2.4. Cinemática de robots manipuladores

Cinemática es la parte de la física que estudia el movimiento de los sistemas mecánicos, sin tomar en cuenta las fuerzas que originan dicho movimiento; mientras que, la relación entre sus coordenadas articulares con las coordenadas cartesianas y la orientación de la herramienta de trabajo colocada en el extremo final del robot se le denomina cinemática directa [11].

Un robot es un manipulador multifuncional reprogramable diseñado para mover materiales, partes, herramientas o dispositivos especializados a través de movimientos variables programados para desempeñar una amplia variedad de tareas [12].

Al pensar en un robot, a la mayoría de las personas viene a la mente un robot humanoide, lo cual es una idea errónea ya que como se definió, éste puede ser de manera general cualquier máquina que funcione de manera autónoma y cumpla con las características antes mencionadas.

La mayoría de los robots industriales en la actualidad están diseñados para trabajar en ambientes que son peligrosos y muy difíciles para trabajadores humanos. Por ejemplo, la mano de un robot puede diseñarse para la manipulación de un objeto muy caliente o muy frío, que la mano humana no podría manipular de forma segura [13].

La definición de robot dada por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) es bastante similar a la antes establecida, el punto importante es que todas ellas coinciden en la capacidad de reprogramación y la multifuncionalidad de los robots.

El manipulador diseñado y estudiado en esta tesis corresponde a un robot de cadena cinemática abierta. Estos robots constan de dos elementos fundamentales: eslabones y articulaciones.

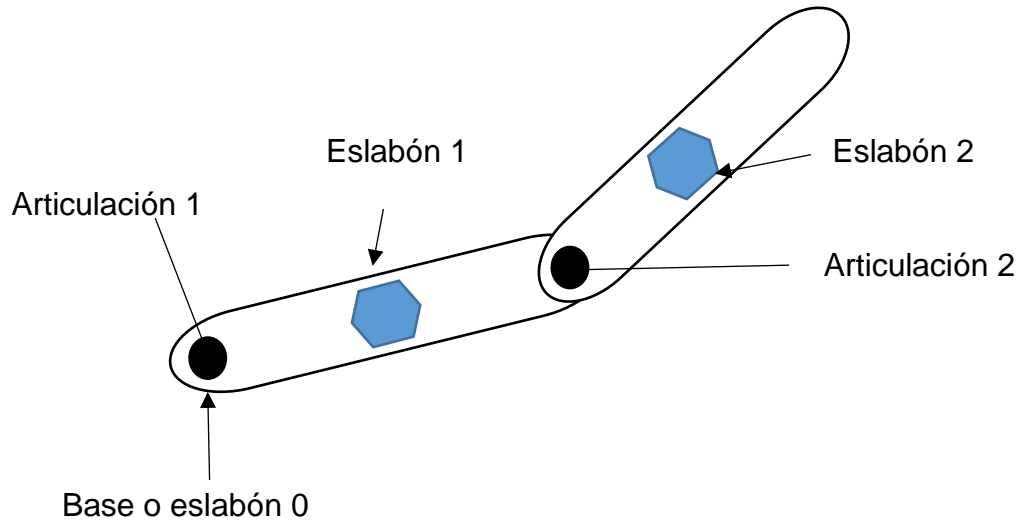


Figura 2.18. Articulaciones y eslabones de un manipulador de cadena cinemática abierta.

En la figura 2.18 se muestran los dos elementos antes mencionados en un robot de cadena cinemática abierta. Los eslabones son elementos mecánicos que constituyen la estructura del robot. Por medio de las articulaciones o uniones los eslabones pueden enlazarse entre sí para constituir la denominada cadena cinemática. Dicha cadena cinemática puede ser abierta o cerrada. Cuando el dispositivo cuenta con un conjunto determinado de articulaciones y eslabones, y se llega a un punto en el cual el último eslabón no se encuentra conectado a ningún otro elemento, se dice que dicho robot es de cadena cinemática abierta. En caso contrario el manipulador será de cadena cinemática cerrada.

Los eslabones de un robot manipulador presentan un movimiento relativo entre sí por medio de las articulaciones que los interconecta. Las articulaciones pueden ser de varios tipos, aunque las más comunes son las **rotacionales** y **traslacionales (prismáticas)**. Las articulaciones rotacionales permiten un movimiento relativo de tipo rotatorio entre dos eslabones, mientras que las prismáticas realizan un

movimiento relativo lineal [12]. En la figura 2.19 se puede apreciar un ejemplo de esto.

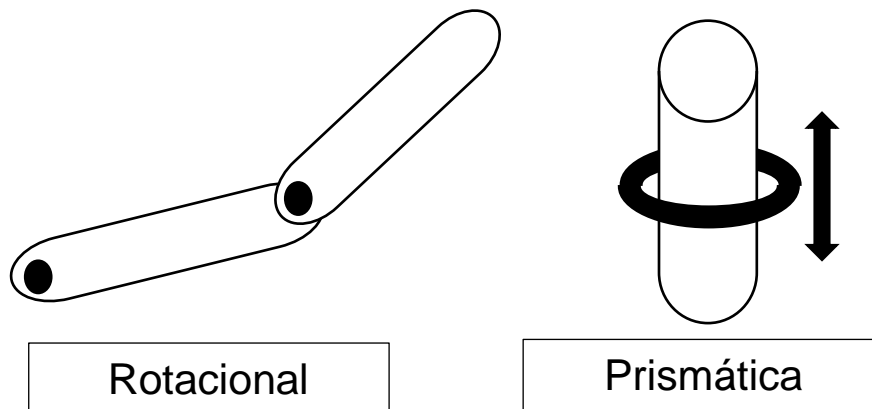


Figura 2.19. Ejemplo de articulaciones de tipo rotacional y prismática.

El efector final del manipulador es un elemento sumamente importante pues es el que llevará a cabo la tarea específica para la cual está siendo usado el robot. Un ejemplo de éste puede ser una tenaza. Para tareas más complejas Miranda Colorado [12], documenta el empleo de dispositivos más sofisticados como una mano mecánica antropomórfica, aunque dichos elementos son mucho más complicados para controlar y son un tema de gran interés en el campo de investigación de la robótica.

Los robots manipuladores tienen distintas clasificaciones dependiendo su sistema de coordenadas. Dentro de los objetivos de esta tesis es de mucha importancia abordar uno en especial llamado *de tipo esférico (RRP)*.

2.4.1 Robot manipulador tipo esférico (RRP)

Este manipulador posee básicamente 3 articulaciones, 2 de tipo rotacional RR y una de tipo lineal o prismática P. Las dos primeras corresponden a la base y el hombro del robot, mientras que la tercera, la parte del codo. En la figura 2.20 se puede apreciar este tipo de manipulador, para este ejemplo, la primera articulación

rotacional de la base hace que el robot pueda girar sobre su eje siguiendo una trayectoria circular horizontal, la segunda mueve el segundo eslabón describiendo una trayectoria igualmente circular pero vertical y finalmente la tercera articulación genera un desplazamiento lineal del brazo.

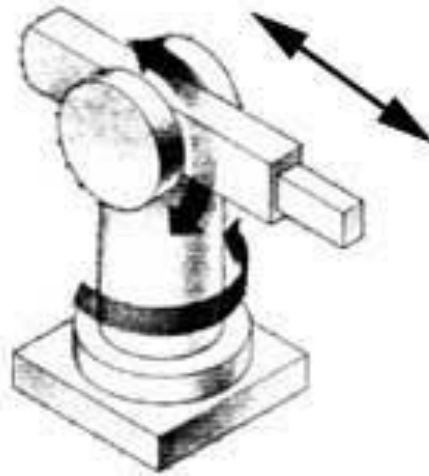


Figura 2.20. Robot manipulador en configuración esférica [11].

En esta configuración, su segunda articulación de revoluta y su articulación prismática forma un ángulo de 90 grados respecto al eje Z de la anterior [13] (por convención, en el sistema de coordenadas cartesianas se define el eje Z como el eje de movimiento de la articulación, pero esto se explicará a detalle en los siguientes capítulos). Esto quiere decir que dichas articulaciones son perpendiculares entre sí.

Reyes [11], menciona que dentro de los ejemplares más importantes de esta configuración se encuentra el robot Stanford, cuya principal aplicación es el mecanizado de piezas automotrices y la manipulación de objetos sobre el piso.

La arquitectura de esta configuración de robot manipulador es muy importante para la realización de este trabajo debido a que el sistema de referencia que puede ser usado para su posicionamiento y desplazamiento es de coordenadas esféricas que

como ya se explicó en la parte de seguimiento solar, son necesarias para la correcta ubicación y seguimiento del Sol en la esfera celeste.

El espacio de trabajo de la configuración esférica corresponde a una esfera hueca, cuyo radio se encuentra en función del desplazamiento lineal de la articulación prismática del codo [11]. En la figura 2.21a se muestra esta esfera de radio variable, donde θ corresponde al desplazamiento angular de la base del robot, Φ el del segundo eslabón y Z el desplazamiento lineal que define el radio de la esfera. En la figura 2.21b, se muestra el espacio de trabajo definido para esta configuración de manipulador (franja centrada en la esfera definida por línea continua), las áreas en línea punteada corresponden a las singularidades del robot.

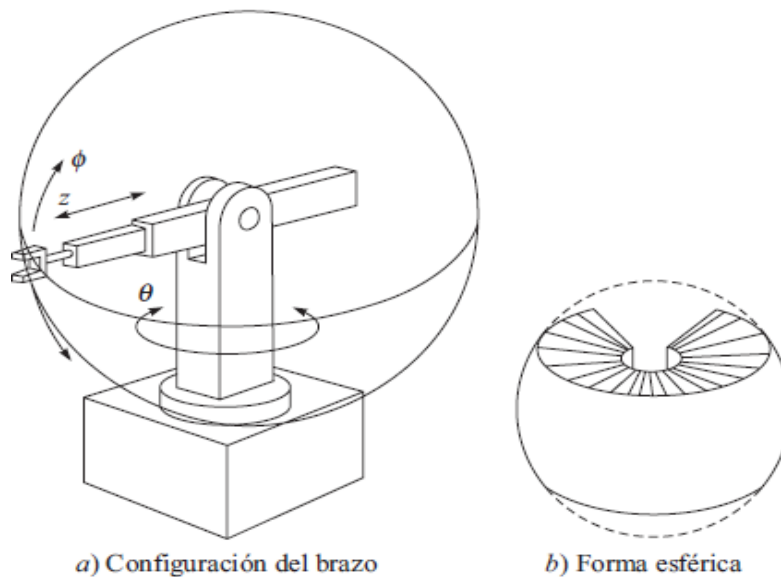


Figura 2.21. Espacio de trabajo de un robot manipulador en configuración esférica.

Una singularidad corresponde a una configuración de posición del robot que no está definida o es imposible que alcance debido a su arquitectura y puede llevar al manipulador a tener comportamientos no esperados; Miranda Colorado [12] menciona que cuando el robot entra en esta zona, se pierde uno o más grados de libertad, por lo tanto, habrá posiciones que no podrá alcanzar, además ejemplifica este fenómeno aludiendo al momento en el que el robot se encuentra justo en el límite de la frontera del espacio de trabajo, ya que sin importar lo que haga, él mismo

no podrá extenderse más allá de dichos límites; definiendo esta situación como *singularidades en la frontera del espacio de trabajo*.

2.4.2 Matrices de transformación homogénea

Como se mencionó con anterioridad, la cinemática es el área de la física que estudia los movimientos de sistemas mecánicos usando como referencia sistemas de coordenadas. Dentro de un manipulador de cadena cinemática abierta se pueden realizar análisis de posición desde diversos sistemas de referencia de coordenadas, usando por ejemplo cada articulación del robot como origen de cada uno de ellos o cualquier punto arbitrario en el espacio.

Supóngase que se tiene un conjunto de sistemas de referencia con orígenes no coincidentes y diferente orientación entre sí. Si se tienen distintos vectores y cada uno se expresa con respecto a un sistema de referencia distinto, es posible llevar a cabo operaciones entre ellos siempre que todos se expresen con respecto a un sistema de referencia común, lo cual se efectúa empleando *Matrices de Rotación* cuando los sistemas de referencia sólo difieren en su orientación y *Matrices de Transformación Homogénea* cuando los sistemas de referencia difieren tanto en la posición de su origen como en su orientación relativa [12].

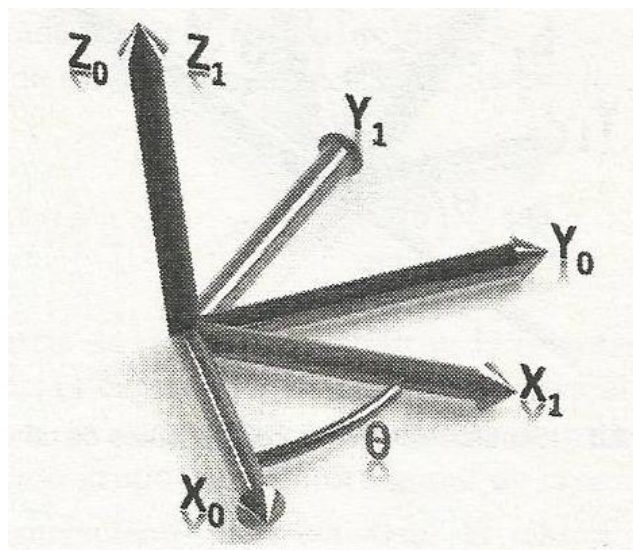


Figura 2.22. Sistemas de coordenadas con orígenes coincidentes en dos dimensiones [12].

En la figura 2.22 se pueden apreciar las siguientes propiedades de los sistemas de referencia:

- Los orígenes de los sistemas de referencia coinciden.
- Los ejes z_0 y z_1 son coincidentes.
- Los ejes x_1, y_1 presenta una rotación en un ángulo θ con respecto a los ejes x_0, y_0 .

Para entender el uso de estas herramientas matemáticas (matrices de rotación para este caso, pues ambos sistemas de referencia comparten origen), lo que se busca es poder hacer una relación de la orientación del sistema de referencia 1 respecto al sistema de referencia 0, para ello Miranda [12] propone el siguiente análisis matemático:

Tomar los ejes x_0, y_0, x_1, y_1 como vectores unitarios, y sea x_1^0 el vector de la representación de x_1 con respecto al sistema de coordenadas 0. Lo siguiente que se debe hacer es encontrar las componentes de dicho vector a lo largo del eje x e y del sistema 0. En la figura 2.23, las componentes de x_1 en el sistema de referencia 0 son a_1 y a_2 respectivamente, mientras que las componentes de y_1 son b_1 y b_2 . Por lo tanto, se obtienen las representaciones $x_1^0 = [a_1, a_2]^T$ y $y_1^0 = [-b_1, b_2]^T$.

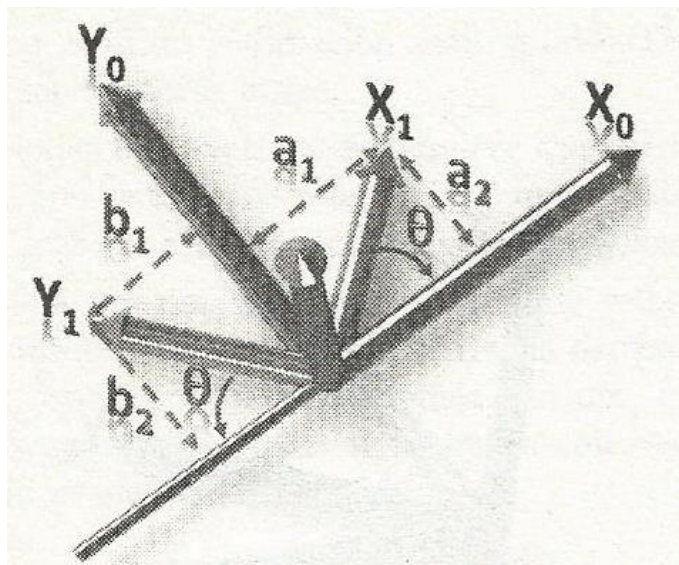


Figura 2.23. Identificación de las componentes de un vector [12].

Entonces de la figura 2.23 se puede inferir lo siguiente:

- La componente del vector x_1 en el eje x del sistema 0 es $a_1 = \|x_1\|\cos(\theta)$.
- La componente del vector x_1 en el eje y del sistema 0 es $a_2 = \|x_1\|\sin(\theta)$.
- La componente del vector y_1 en el eje x del sistema 0 es $-b_1 = \|y_1\|\cos(\theta+90)$
 $= -\|y_1\|\sin(\theta)$.
- La componente del vector y_1 en el eje y del sistema 0 es $b_2 = \|y_1\|\sin(\theta+90)$
 $= \|y_1\|\cos(\theta)$.

Recordar que previamente se definió a x_1, y_1 como vectores unitarios por lo tanto $\|x_1\|=\|y_1\|=1$. Entonces en un análisis completo se puede obtener el siguiente resultado:

$$x_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}, y_1^0 = \begin{bmatrix} \cos(\theta + 90^\circ) \\ \sin(\theta + 90^\circ) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad 2.13$$

Y utilizando el resultado anterior es posible construir la matriz de rotación siguiente:

$$R_1^0 = [x_1^0 \quad y_1^0]$$

Debido a lo anterior, la matriz R_1^0 es la representación de los vectores del sistema de referencia 1 respecto al sistema 0 por lo tanto:

$$R_1^0 = [x_1^0 \quad y_1^0] = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad 2.14$$

Miranda [12] también documenta que la mejor manera de construir una matriz de rotación es basándose en aspectos de álgebra lineal. Sean dos vectores unitarios \mathbf{a} y \mathbf{b} , el producto punto de ambos está dado por:

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = (\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \|\mathbf{a}\| \|\mathbf{b}\| \cos \alpha \quad 2.15$$

Donde α es el ángulo que existe entre los dos vectores, entonces al ser \mathbf{a} y \mathbf{b} vectores unitarios, su producto punto se reduce a $(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \cos \alpha$. Al hacer una comparación de este ejemplo con los vectores x_1^0, y_1^0 , es posible obtener lo siguiente:

$$x_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \text{sen } \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \|x_1\| \|x_0\| \cos \theta \\ \|x_1\| \|y_0\| \cos(90 - \theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_1, x_0) \\ (x_1, y_0) \end{bmatrix} \quad 2.16$$

$$y_1^0 = \begin{bmatrix} -\text{sen } \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \|y_1\| \|x_0\| \cos(\theta + 90) \\ \|y_1\| \|y_0\| \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (y_1, x_0) \\ (y_1, y_0) \end{bmatrix} \quad 2.17$$

Por lo tanto:

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} (x_1, x_0) & (y_1, x_0) \\ (x_1, y_0) & (y_1, y_0) \end{bmatrix} \quad 2.18$$

Hasta ahora se ha hecho un análisis del sistema de referencia 1 respecto del sistema 0, pero ¿Qué pasa en el caso contrario? Suponiendo que ahora se desea conocer la relación matemática de la rotación del sistema de referencia 0 respecto del sistema de referencia 1 se puede seguir la lógica del análisis previo y concluir lo siguiente:

$$R_0^1 = \begin{bmatrix} (x_0, x_1) & (y_0, x_1) \\ (x_0, y_1) & (y_0, y_1) \end{bmatrix} \quad 2.19$$

Y haciendo uso de la propiedad conmutativa del producto punto entre dos vectores donde $(a, b) = (b, a)$, se obtiene:

$$[R_0^1] = [R_1^0]^T = \begin{bmatrix} (x_1, x_0) & (x_1, y_0) \\ (y_1, x_0) & (y_1, y_0) \end{bmatrix} \quad 2.20$$

Para el caso tridimensional, se puede obtener la matriz de rotación dados los sistemas 0 y 1.

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} (x_1, x_0) & (y_1, x_0) & (z_1, x_0) \\ (x_1, y_0) & (y_1, y_0) & (z_1, y_0) \\ (x_1, z_0) & (y_1, z_0) & (z_1, z_0) \end{bmatrix} \quad 2.21$$

El desarrollo de todo el ejemplo anterior para entender el concepto de matrices de rotación se basó únicamente en la rotación sobre el eje Z del sistema de referencia 0, pero es de importancia precisar que la expresión matemática anterior se puede aplicar a los tres ejes coordenados $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$. De esta manera, las matrices de rotación básica son [12]:

$$R_{x,\theta} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\text{sen } \theta \\ 0 & \text{sen } \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad 2.22$$

$$R_{y,\theta} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \text{sen } \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen } \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad 2.23$$

$$R_{z,\theta} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\text{sen } \theta & 0 \\ \text{sen } \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 2.24$$

Hasta ahora se ha hecho un análisis bajo la consideración de una rotación de los ejes manteniendo orígenes en una posición común a ambos sistemas, lo cual no es de utilidad cuando se tiene un sistema cinemático donde los orígenes de los ejes coordenados no son comunes además de que poseen rotaciones, justo como cualquier robot manipulador, pues los movimientos que realiza su efector final poseen rotación y traslación. Como ya se mencionó anteriormente, para este caso se ocupan transformaciones homogéneas, nuevamente Miranda [12] hace el siguiente análisis de estas herramientas matemáticas partiendo de dos situaciones, la primera haciendo operaciones de traslación sin rotación y la segunda realizando ambas.

Para la primera situación, se realiza un análisis bastante sencillo pues al existir una traslación sin rotación, implica que los ejes de ambos sistemas son paralelos entre sí (ver figura 2.24) y todo se reduce a una usual suma de vectores.

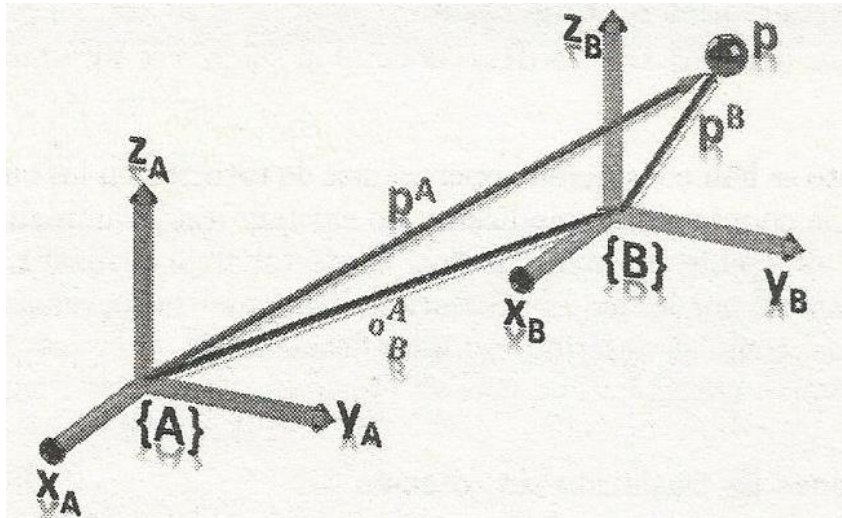


Figura 2.24. Representación de un punto p en el espacio con dos sistemas de referencia trasladados, pero no rotados [12].

Como se aprecia en la figura 2.24, existe un punto p en el espacio y dos sistemas de referencia $\{A\}$ y $\{B\}$. Al poseer ejes paralelos entre sí, es sencillo observar lo siguiente:

$$p^A = o_B^A + p^B \quad 2.25$$

Lo anterior se le conoce como mapeo de un vector de un sistema de referencia a otro, hasta ahora la única información adicional es el término o_B^A .

Para la situación donde existen operaciones de rotación y traslación, considerar la figura 2.25 donde los ejes de ambos sistemas de referencia no son paralelos y sus orígenes se encuentran trasladados uno con respecto a otro. Como es bien sabido para poder realizar la suma de vectores, estos deben estar representados en el mismo sistema de referencia, entonces se hace uso de las matrices de rotación incorporándolas a este análisis. Y así, la ubicación del punto p con respecto al sistema de referencia $\{A\}$ es:

$$p^A = o_B^A + R_B^A p^B \quad 2.26$$

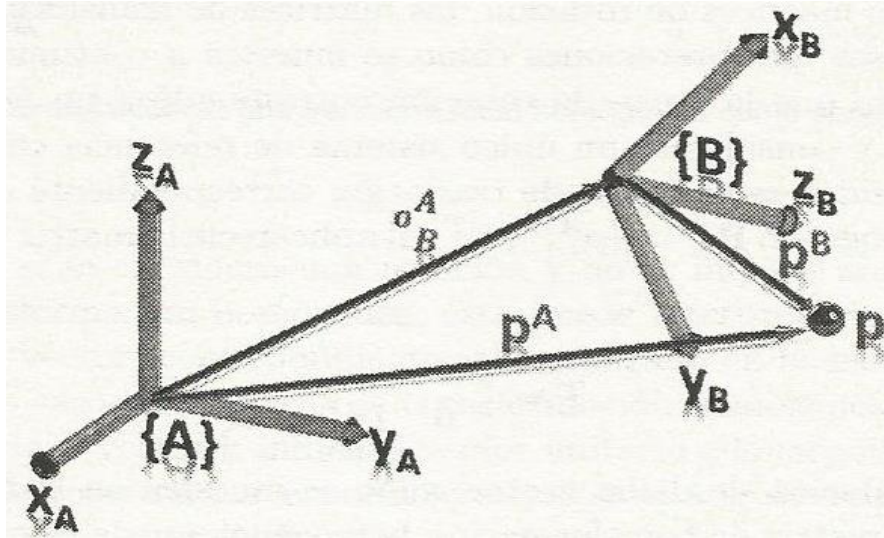


Figura 2.25. Dos sistemas de referencia con orientación diferente y una traslación entre ambos [12].

La ecuación anterior se puede ver como:

$$P^A = \begin{bmatrix} p^A \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_B^A & o_B^A \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^B \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_B^A & o_B^A \\ 0 & 1 \end{bmatrix} P^B = T_B^A P^B \quad 2.27$$

Donde la matriz T_B^A se denomina **Matriz de transformación Homogénea** y relaciona el sistema {B} con el sistema {A}. Esta matriz contiene la información sobre la orientación y la traslación de cierto sistema con respecto a otro. Los vectores P^A y P^B se llaman **vectores homogéneos** y se obtienen agregando un uno a los vectores respectivos p^A y p^B .

Retomando el ejemplo de la figura 2.25, la matriz de transformación homogénea que relaciona los sistemas {0} y {1} es:

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} (x1, x0) & (y1, x0) & (z1, x0) & a \\ (x1, y0) & (y1, y0) & (z1, y0) & b \\ (x1, z0) & (y1, z0) & (z1, z0) & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1^0 & o_1^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{4 \times 4} \quad 2.28$$

Donde a , b y c determinan la traslación a lo largo de los ejes x , y , z respectivamente, por ejemplo, la ubicación del origen del sistema de referencia $\{B\}$ con respecto al sistema $\{A\}$.

2.4.3 Convención Denavit-Hartenberg

El método de Denavit-Hartenberg es una herramienta ampliamente utilizada en el área de ingeniería, pues ofrece un procedimiento bastante sencillo a seguir para obtener el modelo cinemático directo, y su estructura de este último queda en términos de las transformaciones homogéneas [11], anteriormente analizadas.

Previamente se mencionó que un robot manipulador es un sistema de cadena cinemática abierta, por lo tanto, puede considerarse como un conjunto de cuerpos (eslabones), unidos mediante articulaciones, las cuales pueden ser de tipo rotacionales, prismáticas, cilíndricas, planares o esféricas.

Los eslabones se enumeran de una base móvil (eslabón 0) hasta el extremo final del brazo (eslabón n). El eje respecto al cual rota o se desplaza la articulación se define por una línea en el espacio, representando el eje con respecto al cual el eslabón se desplaza de manera relativa al eslabón anterior inmediato [12].

Jaques Denavit y Richard S. Hartenberg presentaron su procedimiento para la obtención de la representación mínima de la orientación y traslación de manipuladores: consiste en determinar una tabla de parámetros relacionados con los eslabones del robot.

Para su análisis, se deben hacer denotaciones a los tipos de articulaciones con sus variables respectivas, las de tipo rotacional con θ_i , para el tipo lineal o prismática por d_i ; este parámetro d_i también hace la función de representar el ancho del servomotor de la articulación rotacional más el espesor de la placa metálica del eslabón, en este caso se denota por el símbolo β_i ; la longitud del eslabón se representa con l_i y el ángulo de separación entre los ejes z_i y z_{i-1} se denota con α_i [11].

Es importante aclarar que la metodología Denavit-Hartenberg en la literatura no es única, esta diferencia está en función de la selección de los sistemas de referencia cartesianos en articulaciones y eslabones. Para este trabajo, de manera muy particular se toma la metodología que Reyes [11] presenta, donde describe paso a paso una serie de procedimientos a seguir de manera ordenada, como se explica a continuación.

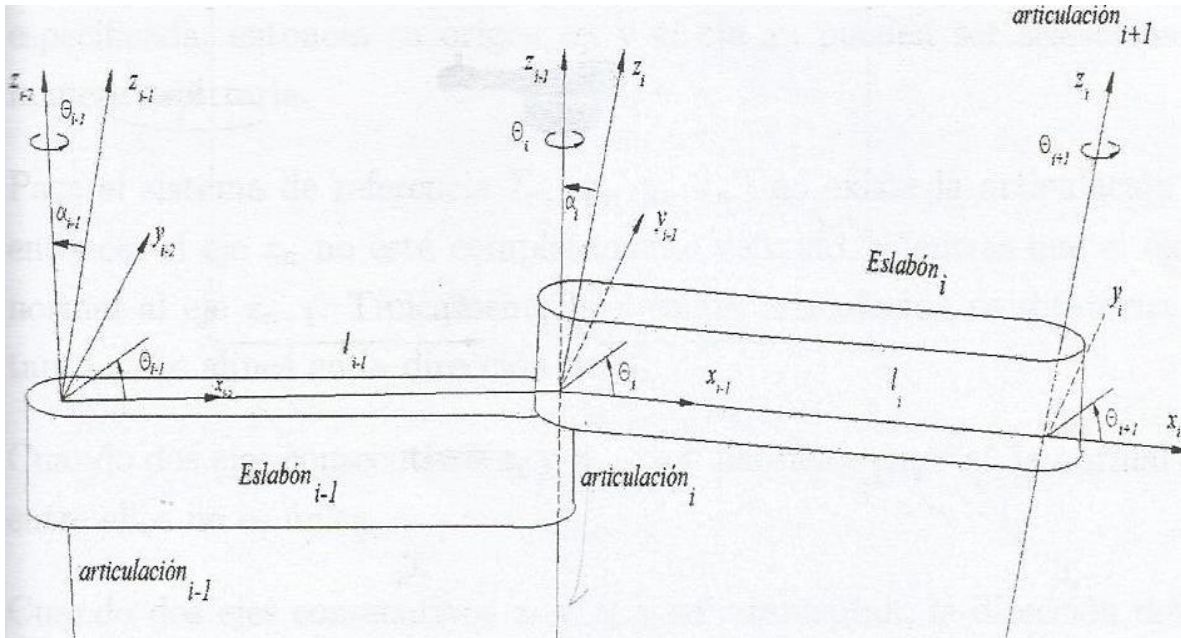


Figura 2.26. Convención Denavit-Hartenberg para un robot manipulador [12].

Primeramente, partir de la asignación de los ejes a cada articulación como se muestra en la figura 2.26, para ello, llevar a cabo los pasos siguientes:

- El eje z_i se asigna a la articulación $i + 1$. Es decir, z_0 es el eje de la articulación 1, z_1 es el eje de la articulación 2 y así sucesivamente.
- Localizar el origen o_i del sistema de referencia $\Sigma_i(x_i, y_i, z_i)$ en la intersección del eje z_i con la normal común a los ejes z_{i-1} y z_i .
- Selección del eje x_{i-1} sobre la normal que une los ejes z_{i-1} y z_i en dirección de la articulación $i - 1$ hacia la articulación i .

- Definir el ángulo de torsión α_i , este es el ángulo entre los ejes z_i y z_{i-1} y se mide con valor positivo en el sentido de las manecillas del reloj sobre el eje x_i .
- Seleccionar el eje y_i por la regla de la mano derecha.

Retomando la afirmación de que la convención Denavit-Hartenberg puede ser una representación no única, esta idea se da en los siguientes casos:

- Para el sistema de referencia $\Sigma_0(x_0, y_0, z_0)$ sólo la dirección del eje z_0 es especificada, entonces su origen o_0 y el eje x_0 pueden ser seleccionados de forma arbitraria.
- Para el sistema de referencia $\Sigma_n(x_n, y_n, z_n)$ no existe la articulación $n + 1$, entonces el eje z_n no está completamente definido, mientras que el eje x_n es normal al eje z_{n-1} . Típicamente la n -ésima articulación es rotatoria, por lo tanto z_n se alinea en la dirección de z_{n-1} .
- Cuando dos ejes consecutivos z_i y z_{i-1} son paralelos entre sí, la normal común entre los dos no es única.
- Cuando dos ejes consecutivos z_i y z_{i-1} se interceptan, la dirección del eje x_i es arbitraria.
- Cuando la articulación i -ésima es lineal o prismática, entonces la dirección de z_i es arbitraria.

Habiendo descrito los pasos de asignación de ejes, a continuación, se resumen los parámetros mencionados del i -ésimo eslabón:

1. l_i es la longitud del i -ésimo eslabón, es la distancia del eje z_{i-1} hacia el eje z_i , medida sobre el eje x_{i-1} .
2. α_i es el ángulo de torsión, el cual representa el ángulo entre los ejes z_{i-1} a z_i medido en el sentido de las manecillas del reloj sobre el eje x_i .

3. d_i se emplea en articulaciones lineales o prismáticas y representa el desplazamiento lineal. Cuando la articulación es rotacional, entonces representa el offset o espesor del servomotor, denotada por β_i .
4. θ_i es el desplazamiento rotacional de x_{i-1} a x_i medido alrededor del eje z_{i-1} . El signo positivo de θ_i es el sentido contrario a las manecillas del reloj.

Luego de tener en claro todas las condiciones anteriores sobre los ejes de sistemas de coordenadas de cada articulación del robot, Reyes [11] describe el algoritmo para obtener los parámetros de la convención Denavit-Hartenberg para el manipulador que particularmente se desea analizar:

1. Localizar la dirección de los ejes z_0, z_1, \dots, z_{n-1} .
2. Establecer el sistema de referencia cartesiano fijo $\Sigma_0(x_0, y_0, z_0)$ cuyo origen se coloca en el sistema de referencia en la base del robot. Los ejes x_0, y_0 son determinados de acuerdo con la regla de la mano derecha.

A partir de aquí, se inicia un proceso iterativo para definir el sistema de referencia $\Sigma_i(x_i, y_i, z_i)$ a través del sistema $\Sigma_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$, iniciando con el sistema de referencia $\Sigma_1(x_1, y_1, z_1)$, tal y como se muestra en la figura 2.27.

Llevar a cabo los pasos 3 al 5 para las articulaciones $i = 1, \dots, n - 1$.

3. Localizar el origen o_i en la intersección de la normal común que une al eje z_i con el eje z_{i-1} . Si ambos ejes se interceptan, colocar a o_i en la intercepción. Para el caso en que ambos ejes son paralelos:
 - Si la articulación i -ésima es rotacional, colocar el origen o_i sobre la articulación i -ésima, tal que $d_i = 0$.
 - Si la articulación i -ésima es prismática, colocar el origen o_i en un punto límite físico de la articulación i -ésima, por ejemplo, en un punto extremo.

4. Seleccionar el eje x_i a lo largo de la normal común que une a los ejes z_{i-1} y z_i , en dirección de la articulación $i - 1$ hacia la articulación i .
5. Determinar y_i por la regla de la mano derecha.
6. Establecer el sistema de referencia del extremo final $\Sigma_n(x_n, y_n, z_n)$.
 - Si la articulación n-ésima es rotatoria, se debe alinear el eje z_n con el eje z_{n-1} .
 - Si la articulación n-ésima es prismática, es conveniente seleccionar el eje z_n de forma arbitraria. El eje x_n debe cumplir el paso número 4.
7. Establecer una tabla con los parámetros de los eslabones, como se muestra en la tabla 2.1

Características de los eslabones	
l_i	Longitud del eslabón i-ésimo
d_i	Articulaciones lineales o prismáticas. También representa el espesor del servomotor.
α_i	Ángulo entre los ejes z_{i-1} y z_i medido con respecto al eje x_i
θ_i	Articulaciones rotacionales; representa el ángulo entre los ejes x_{i-1} y x_i medido alrededor del eje z_{i-1} .

Tabla 2.1. Parámetros Denavit-Hartenberg.

2.4.4 Cinemática directa

La cinemática directa se refiere al estudio analítico del movimiento de un sistema mecánico con respecto a un sistema de referencia cartesiano fijo, haciendo una relación entre las coordenadas articulares o generalizadas $q \in \mathbb{R}^n$, y los parámetros geométricos con coordenadas cartesianas $[x, y, z]^T \in \mathbb{R}^3$, a través de una función vectorial f_R continua y diferenciable en la variable de estado q , generalmente no lineal, es decir $f_R: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ tal que:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \theta \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} = f_R(l_i, q) \quad 2.29$$

Donde θ, ϕ, ψ corresponden a las variables de orientación del extremo final del robot, n indica el número de grados de libertad y la dimensión del vector de coordenadas articulares y m es la dimensión conjunta de las coordenadas cartesianas y la orientación de la herramienta de trabajo.

Dependiendo la aplicación del robot, se pueden requerir menos coordenadas de posición y orientación [11]. Para este trabajo en particular no son necesarias las coordenadas de orientación de la herramienta final del robot pues el instrumento de medición de radiación solar que contendrá está contemplado como un eslabón más de la cadena cinemática, además de que las ecuaciones de seguimiento solar están en el espacio de coordenadas articulares, por lo que su respectivo análisis en el espacio cartesiano se encuentra descrito en x, y, z . Por lo que, para este exclusivo caso, el análisis sería el siguiente:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = f_R(l_i, q) \quad 2.30$$

Previamente se mencionó que la metodología Denavit-Hartenberg es una herramienta muy sencilla y ampliamente usada para la obtención del modelo cinemático directo de un manipulador por medio del uso de transformaciones homogéneas. Reyes [11] menciona que en la representación Denavit-Hartenberg, cada transformación homogénea H_{i-1}^i se representa por el producto de cuatro matrices de transformación homogénea básicas, como se muestra a continuación:

$$H_{i-1}^i = H_{Rz_{i-1}}(\theta_i)H_{Tz_{i-1}}(d_i(\beta_i))H_{Tx_{i-1}}(l_i)H_{Rx_{i-1}}(\alpha_i) \quad 2.31$$

Donde $H_{Rz_{i-1}}$ y $H_{Rx_{i-1}}$ corresponden a las matrices de transformación homogénea de rotación, mientras que $H_{Tz_{i-1}}$ y $H_{Tx_{i-1}}$ las matrices de transformación homogénea de traslación respecto al eje z y eje x respectivamente.

Previamente se analizaron las matrices de rotación y vectores de traslación que en conjunto representan una transformación homogénea. Reyes [11] establece que la transformación homogénea se realiza con la siguiente notación:

$$H_{i-1}^i \begin{bmatrix} R_{i-1}^i & d_{i-1}^i \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Matriz de rotación} & \text{Vector de traslación} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \quad 2.32$$

Para propósitos de acoplamiento en dimensiones, el vector 0^T y el número 1 aparecen en el último renglón.

Entonces, haciendo uso de las ecuaciones 2.22, 2.23 y 2.24, la ecuación 2.31 quedaría de la siguiente manera:

$$H_{i-1}^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\text{sen } \theta_i & 0 & 0 \\ \text{sen } \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i(\beta_i) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\text{sen } \alpha_i & 0 \\ 0 & \text{sen } \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\text{sen } \theta_i \cos \alpha_i & \text{sen } \theta_i \text{sen } \alpha_i & l_i \cos \theta_i \\ \text{sen } \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \text{sen } \alpha_i & l_i \text{sen } \theta_i \\ 0 & \text{sen } \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i(\beta_i) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 2.33$$

Obteniendo la transformación homogénea total como $H_0^n = H_0^1 H_1^2 \dots H_{n-2}^{n-1} H_{n-1}^n$.

Por lo tanto, la cinemática directa es la forma general de transformaciones homogéneas que concatena los sistemas de referencia cartesianos asociados a los eslabones del robot, todos relativos al sistema fijo $\Sigma_0(x_0, y_0, z_0)$.

2.4.5 Cinemática diferencial

Esta parte de la física, al igual que la cinemática directa establece una relación, pero en este caso, esta relación es entre velocidades de articulaciones y las velocidades lineales y angulares correspondientes del elemento final del robot. Esta representación se da mediante una matriz llamada *Jacobiano* que depende de la configuración del manipulador y es de utilidad para los siguientes aspectos:

- Hallar las singularidades del robot.
- Análisis de redundancias.
- Determinar algoritmos de cinemática inversa para análisis de velocidad.

- Describir la relación entre las fuerzas aplicadas al efector final y los pares de torsión resultantes en las articulaciones.
- Derivar los algoritmos de dinámica.

El objetivo aquí es expresar la velocidad angular del efector final ω , la velocidad lineal, o simplemente la velocidad v , igual que una función de las velocidades de las articulaciones q , como:

$$t = J\dot{q} \quad 2.34$$

donde

$$J = \begin{bmatrix} J_\omega \\ J_v \end{bmatrix} \quad 2.35$$

y $t = [v^T \ \omega^T]^T$ es una rotación del efector final y la matriz jacobiana J es una función de las variables de articulación θ , únicamente [13].

La cinemática diferencial inversa representa la relación entre la velocidad articular \dot{q} con la velocidad lineal de movimiento v y la velocidad angular ω , expresada en términos de la matriz inversa del jacobiano del robot cuyo determinante es diferente a cero, si el determinante es cero se dice que no es de rango completo y se presentan problemas de singularidades [11].

$$\dot{q} = J^{-1}(q) \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad 2.36$$

Previamente se había dado un concepto de *singularidad* en función de espacio de trabajo y posición, pero otra forma de comprender este fenómeno físicamente es desde la cinemática diferencial pues Reyes [11] menciona que en una singularidad no es posible indicarle un movimiento al elemento final del robot ya que para una velocidad lineal v y una velocidad angular ω finitas puede corresponder una velocidad articular \dot{q} infinita.

2.4.6 Método de control *Resolved Motion Rate Control*

Los modelos cinemáticos de robots manipuladores son analizados con el propósito de desarrollar métodos de control de movimiento resuelto. Esto significa que el operador es capaz de hacer que el robot realice un movimiento deseado a través de los ejes en determinado espacio de coordenadas con cierta velocidad y trayectoria definidas. Este evento sugiere soluciones a problemas de coordinación y movimientos en espacios de trabajo restringidos.

Un control por velocidad es de hecho una de las dos formas más comunes de controlar un manipulador. Aquí, el operador busca especificar la dirección y velocidad con la que el robot se moverá usando una palanca de mando o un conjunto de interruptores. Este método es ampliamente usado en aplicaciones industriales donde una gran amplificación de la fuerza es necesaria. El otro método común es el control maestro-esclavo, donde el operador guía un modelo del manipulador por lo que el esclavo remoto seguirá una trayectoria específica y volverá a su posición de casa en un punto específico.

Cuando el manipulador es potenciado por motores eléctricos, actuadores hidráulicos, etc.; el problema de coordinación entre actuadores incrementa. Este problema es solucionado automáticamente en un tipo de control maestro-esclavo si el maestro y el esclavo son geoméricamente similares, ya que las señales de control de los actuadores pueden ser tomadas directamente de los transductores del maestro. En un control por velocidad, el problema se incrementa aún más ya que el operador tiene un arreglo de interruptores conectado uno a uno a los motores.

Un control por movimiento resuelto (Resolved motion) significa que los movimientos de varios motores están combinados y resueltos en movimientos controlables separados del elemento final del robot. Esto implica que muchos motores deben funcionar simultáneamente en diferentes velocidades y variaciones de tiempo para lograr el movimiento final de la mano. Esta idea hace pensar que el operador será capaz de especificar velocidades y direcciones para más de 2 o 3 motores al mismo tiempo. Si él estuviera controlando en coordenadas articulares, el resultado sería ineficiente. Por lo que tiene más sentido dejar el control directamente expresado en

coordenadas cartesianas, principalmente si este se va a realizar en periodos de tiempo muy cortos [14].

Como se ha analizado en la parte de cinemática diferencial, dado un conjunto de desplazamientos infinitesimales δq de las articulaciones del robot y de las coordenadas operacionales δx , el Jacobiano $J(q)$ permite establecer la relación entre ellos de la siguiente manera [12]:

$$\delta x = J(q)\delta q \quad 2.37$$

de la ecuación 2.37 se puede obtener lo siguiente:

$$\delta q = J^{-1}(q)\delta x \quad 2.38$$

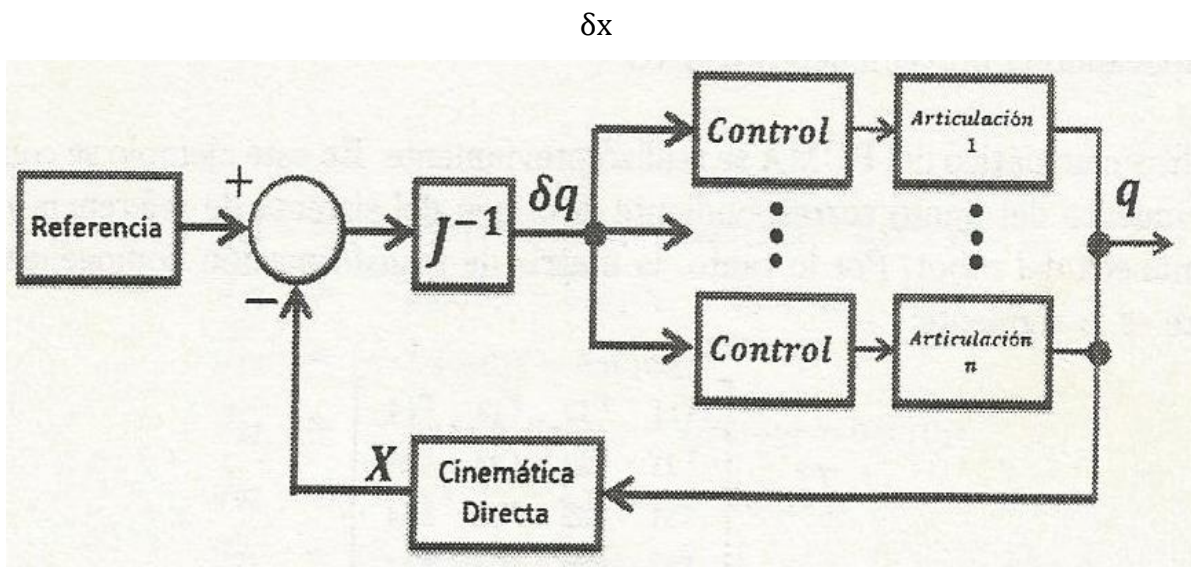


Figura 2.27. Técnica de control Resolved Motion Rate Control [12].

En la figura 2.27 se muestra el esquema del control de trayectorias denominado *Resolved Motion Rate Control* propuesto para este trabajo, en el cual Miranda [12] explica lo siguiente:

- *Referencia* genera la trayectoria que se desea en el efector final del manipulador, cuya salida debe estar expresada en términos del sistema de coordenadas cartesianas.

- *Cinemática directa* expresa la posición real del robot q dada en el sistema de coordenadas articulares en forma de coordenadas cartesianas.
- En el punto suma se obtiene la resta de la posición deseada menos la real que genera la señal δx , usada en la ecuación 2.37.
- El bloque J^{-1} realiza la operación matemática mostrada en la ecuación 2.38, para obtener a la salida δq , notar que aquí se hace una transformación de sistema de coordenadas al igual que en el bloque de cinemática directa, solo que en este caso hace lo opuesto, a la entrada se tienen coordenadas en el espacio de trabajo cartesiano y a la salida en el espacio de trabajo articular del robot.
- Los elementos δq se usan como señales independientes de error para controlar la posición deseada. Para un robot de n grados de libertad, se tendrán entonces n controles independientes
- En los bloques *Control* que como ya se mencionó, su cantidad está en función de los grados de libertad del robot, puede implementarse cualquier técnica de control que se desee. Una propuesta muy común es el uso de un controlador PID, el cual se explicará más adelante.

2.5. Análisis y control de un sistema lineal de segundo orden

Las teorías de control que se usan habitualmente son la teoría de control clásica, la teoría de control moderno y la teoría de control robusto.

El control ha desempeñado un papel muy importante en el avance de la ingeniería y la ciencia. El control se ha convertido en una parte imprescindible en los sistemas de vehículos espaciales, en robots, en procesos modernos de fabricación y en cualquier operación industrial que requiera el control de temperatura, presión, humedad, flujo, etc. [15].

En el tema referente a teoría de control, Ogata [15] define los siguientes términos que es indispensable comprender a qué refieren:

- *Variable controlada y señal de control o variable manipulada.* La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y se controla. La señal de control o variable manipulada es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada. Normalmente, la variable controlada es la salida del sistema. *Controlar* significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar la desviación del valor medido respecto del valor deseado.
- *Plantas.* Una planta puede ser una parte de un equipo, tal vez un conjunto de los elementos de una máquina que funcionan juntos, y cuyo objetivo es efectuar una operación particular. De manera general una planta es cualquier objeto físico que se va a controlar.
- *Procesos.* El Diccionario Merriam-Webster define un proceso como una operación o un desarrollo natural progresivamente continuo, marcado por una serie de cambios graduales que se suceden unos a otros de una forma relativamente fija y que conducen a un resultado o propósito determinados.
- *Sistemas.* Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado. Un sistema no está necesariamente limitado a los sistemas físicos. El concepto puede aplicarse a fenómenos abstractos y dinámicos, como los que se encuentran en la economía.
- *Perturbaciones.* Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se denomina interna, mientras que una perturbación externa se genera fuera del sistema y es una entrada.
- *Control retroalimentado.* El control retroalimentado se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia, y lo realiza tomando en cuenta esta diferencia.

En teoría de control, a menudo se usan las funciones de transferencia para caracterizar las relaciones de entrada-salida de componentes o de sistemas que se describen mediante ecuaciones diferenciales lineales invariantes en el tiempo.

La función de transferencia se define como el cociente entre la transformada de Laplace de la salida y la transformada de Laplace de la entrada, bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero [15].

Un sistema de segundo orden, como menciona Nise [16] posee una función de transferencia que puede ser descrita por el modelo general siguiente:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad 2.39$$

La frecuencia natural ω_n de un sistema de segundo orden, es la frecuencia de oscilación del sistema sin amortiguamiento.

Como es sabido, los comportamientos de sistemas de segundo orden son de carácter oscilatorio amortiguado, por lo que es necesario describir en forma cuantitativa este comportamiento, cualquiera que sea la escala de tiempo. Una definición viable para esta cantidad es aquella que compara la frecuencia de decaimiento exponencial con la frecuencia natural. Este cociente es constante sin importar la escala de tiempo de la respuesta.

Por lo tanto, el factor de amortiguamiento relativo ξ está dado por

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{\text{Frecuencia de decaimiento exponencial}}{\text{Frecuencia natural (rad/seg)}} \\ &= \frac{1}{2\pi} \frac{\text{Periodo natural (seg)}}{\text{Constante de tiempo exponencial}} \end{aligned} \quad 2.40$$

Dependiendo el valor de ξ y ω_n , el posicionamiento de los polos del sistema en el plano complejo puede variar, lo que ocasiona diferentes respuestas, las cuales pueden definir al sistema en cuatro tipos diferentes, como se muestra en la figura 2.28.

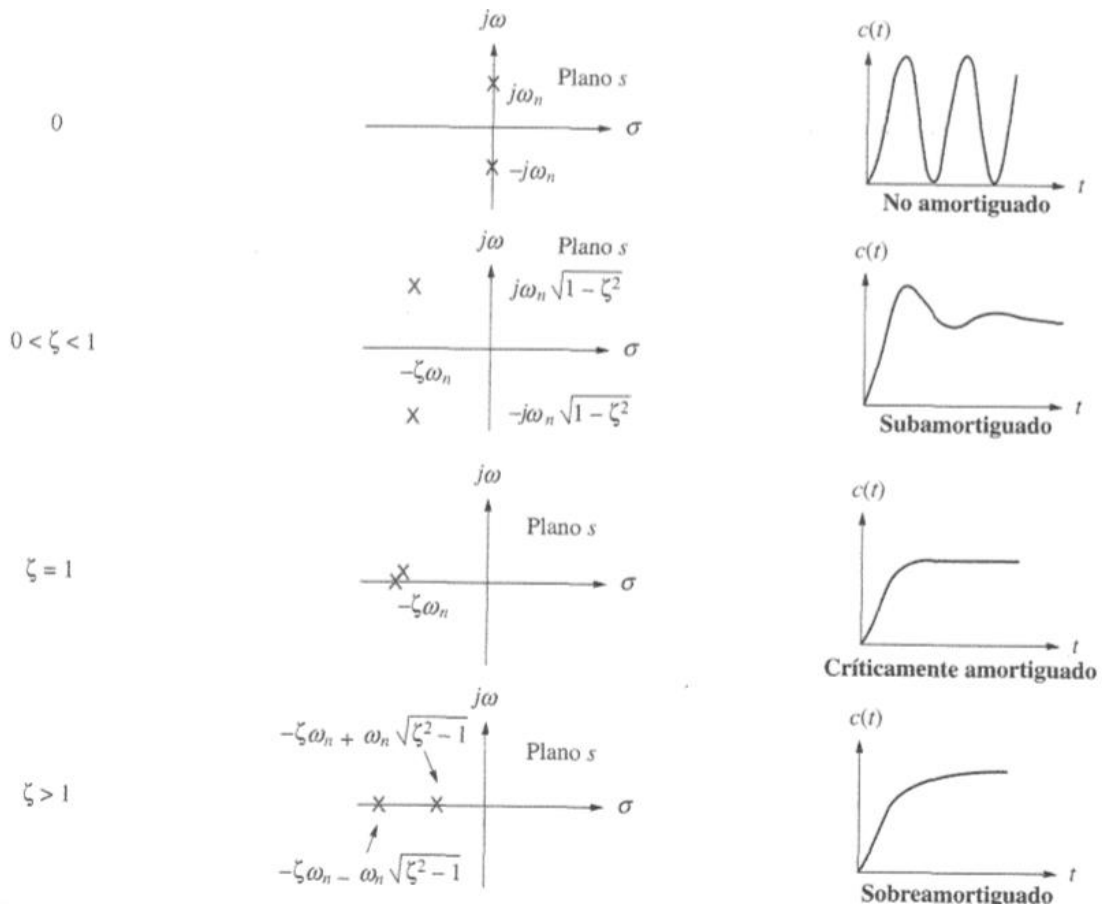


Figura 2.28. Tipos de respuesta de un sistema de segundo orden [15].

Conociendo la forma general de un sistema de segundo orden, mostrada en la ecuación 2.39 se puede obtener la función de transferencia del sistema a deseado por medio de un análisis gráfico de la respuesta a una entrada de tipo escalón.

Como ya es obvio, para poder llegar a la función de transferencia de un sistema a través de un análisis gráfico de la respuesta, es vital conocer los valores de ζ y ω_n . Para ello, Nise [16] documenta una serie de ecuaciones que relacionan los elementos anteriores con parámetros gráficos como los que se muestran en la figura 2.29.

Dichas ecuaciones son:

$$\%OS = \frac{C_{max} - C_{final}}{C_{final}} \times 100 \quad 2.41$$

donde %OS corresponde al porcentaje de sobretiro que tiene el sistema, C_{max} y C_{final} son el valor máximo y valor final que tiene la curva de la gráfica (ver figura 2.29).

$$\xi = \frac{-\ln(\%OS/100)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(\%OS/100)}} \quad 2.42$$

$$T_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} \quad 2.43$$

donde T_p corresponde al tiempo pico, aquel donde la curva logra su valor máximo. De la ecuación anterior, se puede despejar ω_n , teniendo como resultado

$$\omega_n = \frac{\pi}{T_p \sqrt{1 - \xi^2}} \quad 2.44$$

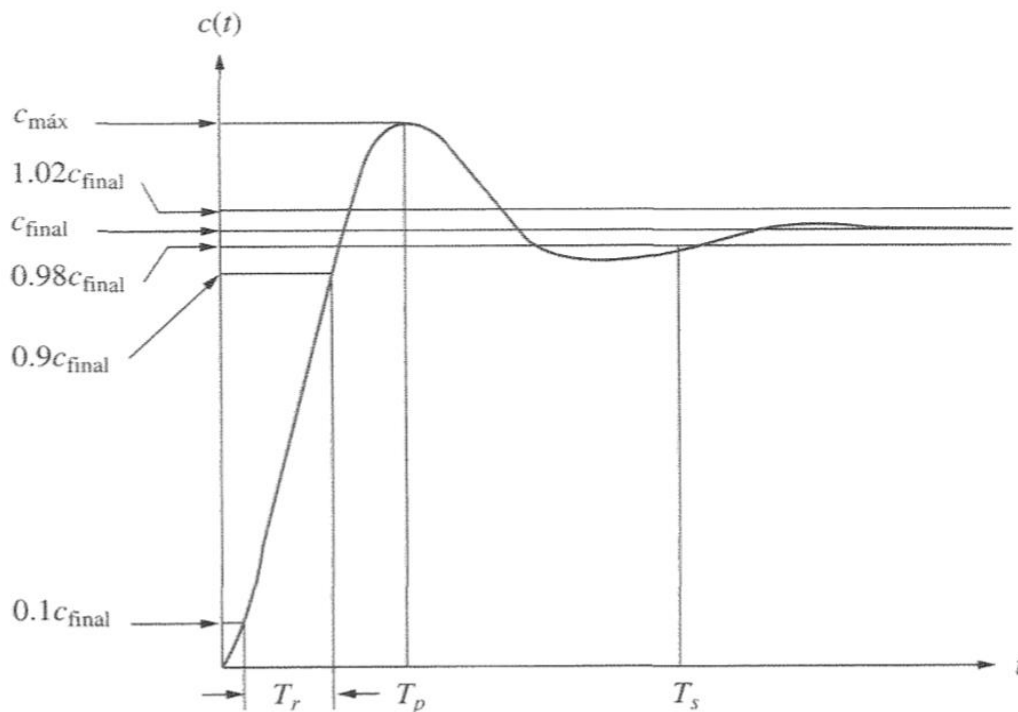


Figura 2.29. Análisis gráfico de la respuesta de un sistema de segundo orden [15].

2.5.1 Control PID

Es un mecanismo de control ampliamente usado en sistemas de control industrial. En particular, cuando el modelo matemático de la planta no se conoce y, por lo tanto, no se pueden emplear métodos de diseño analíticos. En el campo de los sistemas para control de procesos, es un hecho bien conocido que los esquemas de control PID básicos y modificados han demostrado su utilidad para aportar un control satisfactorio [15].

El algoritmo del control PID consta de tres parámetros, proporcional (P), integral (I) y derivativo (D). Y consta de la siguiente estructura:

$$u(t) = k_p e(t) + k_d \dot{e}(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad 2.45$$

donde $u(t)$ es la salida del controlador, k_p, k_d, k_i son constantes correspondientes a la acción proporcional, derivativa e integral, respectivamente, $e(t)$ corresponde a la señal de error y $\dot{e}(t)$ la primera derivada con respecto al tiempo del error [12].

El control proporcional produce una señal de control proporcional al error entre el movimiento deseado y el real.

El control integral produce una señal de control proporcional a la integral del error respecto al tiempo. Este tipo de controlador puede considerarse como el retroactivo que suma todos los errores y luego responde.

El control derivativo es el que se encarga de generar una señal de control que es proporcional a la razón de cambio del error. Se conoce como un control anticipado que mide la razón de cambio del error existente, anticipa el error más grande entrante y aplica la corrección antes de que el error mayor pueda llegar [13].

2.5.2 Control PID en tiempo discreto

Recientemente, la aplicación de control por computadora ha hecho posible el movimiento “inteligente” en robots industriales, la optimización de economía de

combustible en automóviles y el refinamiento en la operación de máquinas de uso doméstico.

La tendencia actual de controlar sistemas dinámicos en forma digital en lugar de analógica se debe a la disponibilidad de computadoras digitales de bajo costo y las ventajas de trabajar con señales digitales en lugar de señales en tiempo continuo.

Una señal en tiempo continuo es aquella que se define sobre un intervalo continuo de tiempo. Una señal analógica, es una señal definida en un intervalo continuo de tiempo cuya amplitud puede adoptar un intervalo continuo de valores. La figura 2.30 (a) muestra una señal analógica en tiempo continuo y la figura 2.31 (b) una señal cuantificada en tiempo continuo (cuantificada solo en amplitud).

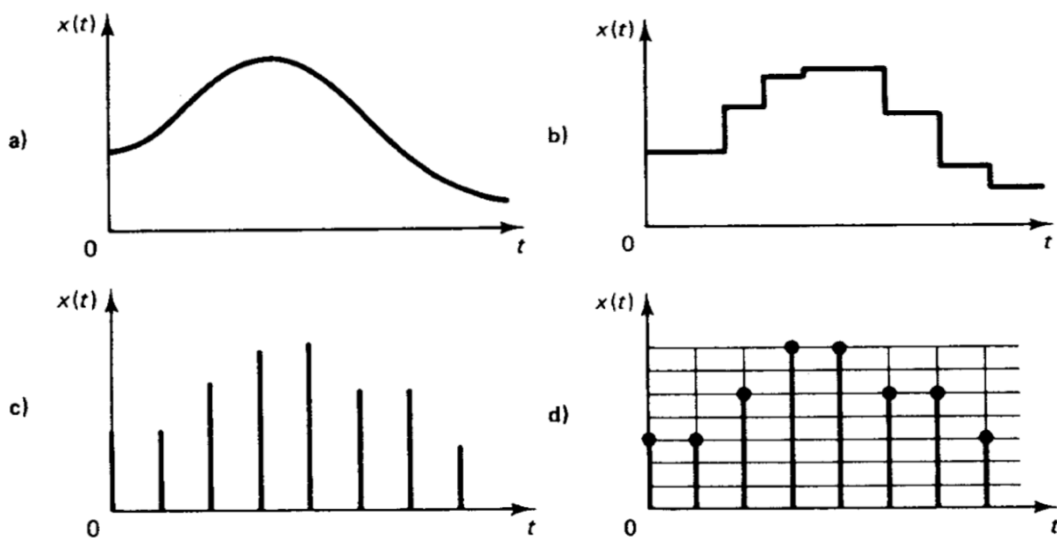


Figura 2.30. a) Señal analógica en tiempo continuo; b) señal cuantificada en tiempo continuo; c) señal de datos muestreados; d) señal digital [17].

Una señal el tiempo discreto es una señal definida sólo en valores discretos de tiempo (esto es, aquellos en los que la variable independiente t está cuantificada). En una señal en tiempo discreto, si la amplitud puede adoptar valores en un intervalo continuo, entonces la señal se denomina *señal de datos muestreados*. Este tipo de señal se puede generar muestreando una señal analógica en valores discretos de

tiempo. Ésta es una señal de pulsos modulada en amplitud. La figura 2.30 (c) muestra una señal de datos muestreados.

Una señal digital (figura 2.30 (d)) es una señal en tiempo discreto con amplitud cuantificada. Dicha señal es posible representarla mediante una secuencia de números, por ejemplo, binarios. El uso de un controlador digital requiere de la cuantificación de las señales tanto en amplitud como en tiempo [17].

En la figura 2.30 (b) se observa la señal analógica muestreada a intervalos periódicos por un aparato llamado *muestreador y retén de orden cero* que da una aproximación en escalera a la señal digital.

Un objetivo importante dentro del control digital es deducir un modelo matemático para la computadora digital representada por un muestreador y retén de orden cero. Se debe representar la computadora como una función de transferencia similar a la de cualquier subsistema, pero, cuando se muestrean señales, se dificulta el uso de la transformada de Laplace, por lo tanto esta última puede ser sustituida por otra transformada conexas llamada *transformada z* y su respectiva *transformada z inversa* que es una herramienta para dar solo los valores de la función de tiempo en los instantes de muestreo [16].

El esquema de control PID analógico ha sido usado de manera exitosa en muchos sistemas de control industrial por más de medio siglo. Otra forma de ver la acción de control PID de ecuación 2.45 es la siguiente:

$$m(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad 2.46$$

donde $e(t)$ es la entrada al controlador (señal de error actuante), $m(t)$ es la salida del controlador (la señal manipulada), K es la ganancia proporcional, T_i , es el tiempo integral (o tiempo de reajuste) y T_d el tiempo derivativo (o tiempo de adelanto).

Para obtener la función de transferencia del controlador PID digital, se puede discretizar la ecuación 2.46. Ogata [17] explica cómo hacerlo, mediante el siguiente proceso:

Primeramente, se debe aproximar el término integral mediante un método de sumatoria trapezoidal y el término derivativo mediante la diferencia de dos puntos, todo esto para obtener la transformada z inversa de la ecuación 2.46.

$$m(kT) = K \left\{ e(kT) + \frac{T}{T_i} \left[\frac{e(0) + e(T)}{2} + \frac{e(T) + e(2T)}{2} + \dots + \frac{e((k-1)T) + e(kT)}{2} \right] + T_d \frac{e(kT) - e((k-1)T)}{T} \right\}$$

o bien

$$m(kT) = K \left\{ e(kT) + \frac{T}{T_i} \sum_{h=1}^k \frac{e((h-1)T) + e(hT)}{2} + \frac{T_d}{T} [e(kT) - e((k-1)T)] \right\} \quad 2.47$$

Entonces definir

$$\frac{e((h-1)T) + e(hT)}{2} = f(hT), \quad f(0) = 0$$

En la figura 2.31 se muestra la función $f(hT)$, entonces

$$\sum_{h=1}^k \frac{e((h-1)T) + e(hT)}{2} = \sum_{h=1}^k f(hT)$$

Al tomar la transformada z de esta última ecuación, se obtiene

$$Z \left[\sum_{h=1}^k \frac{e((h-1)T) + e(hT)}{2} \right] = Z \left[\sum_{h=1}^k f(hT) \right] = \frac{1 + z^{-1}}{2(1 - z^{-1})} E(z)$$

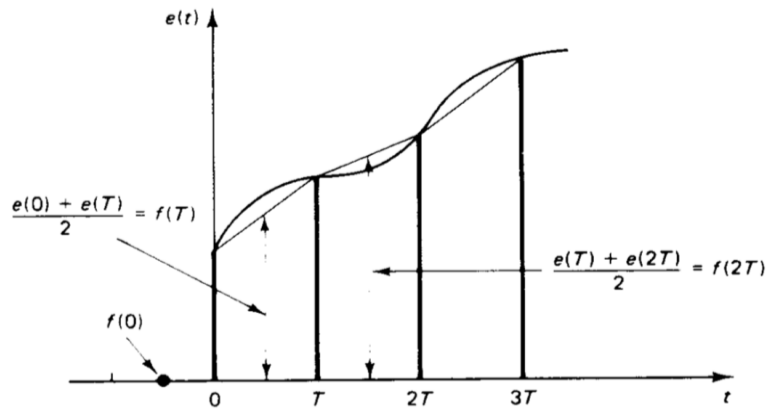


Figura 2.31. Gráfica de la función $f(hT)$ [17].

Por lo tanto, la transformada z de la ecuación 2.47 da como resultado

$$M(z) = K \left[1 + \frac{T}{2T_i} \frac{1 + z^{-1}}{1 - z^{-1}} + \frac{T_d}{T} (1 - z^{-1}) \right] E(z)$$

Esta última ecuación se puede describir como:

$$\begin{aligned} M(z) &= K \left[1 - \frac{T}{2T_i} + \frac{T}{T_i} \frac{1}{1 - z^{-1}} + \frac{T_d}{T} (1 - z^{-1}) \right] E(z) \\ &= \left[K_p + \frac{K_I}{1 - z^{-1}} + K_D (1 - z^{-1}) \right] E(z) \end{aligned}$$

donde

$$K_p = K - \frac{KT}{2T_i} = K - \frac{K_I}{2} = \text{ganancia proporcional}$$

$$K_I = \frac{KT}{T_i} = \text{ganancia integral}$$

$$K_D = \frac{KT_d}{T} = \text{ganancia derivativa}$$

La función de transferencia para el controlador digital se convierte en

$$G_D(z) = \frac{M(z)}{E(z)} = K_p + \frac{K_I}{1 - z^{-1}} + K_D (1 - z^{-1}) \quad 2.48$$

Capítulo 3 Fabricación del seguidor solar

3.1. Simulación de las ecuaciones de seguimiento solar

En el capítulo 2 se presentó el cálculo necesario para conocer la posición del Sol y se explicó que por medio de las ecuaciones 2.10 y 2.11 es posible conocer los ángulos de azimut y elevación solar necesarios.

Previo a la aplicación real de las ecuaciones de seguimiento solar se procedió a la simulación en el entorno de Matlab versión 2017 para observar su comportamiento mediante gráficos y así facilitar su análisis.

3.1.1. Visualización de la ecuación del tiempo

La ecuación del tiempo describe la diferencia entre la aparente hora solar y la hora solar media. Si la órbita terrestre fuera perfectamente circular, y no hubiera inclinación del planeta, el medio día solar ocurriría exactamente cada 24 horas. Pero debido a la naturaleza elíptica de la órbita y la inclinación de la Tierra, se introducen variaciones en el tiempo durante cada día [18].

La gráfica de la figura 3.1 ilustra como el tiempo del medio día solar cambia durante el transcurso del año. Se pueden apreciar valores negativos, esto quiere decir que, durante esas fechas, el medio día solar ocurre después de las 12 pm en punto. Contrariamente, en valores positivos indica que el medio día solar ocurre previo a las 12 pm.



Figura 3.1. Gráfica de la ecuación del tiempo durante el transcurso del año 2018 [8].

3.1.2. Gráficos de la trayectoria solar durante el año

El graficar las trayectorias del Sol en diversas épocas del año, brinda herramientas de análisis bastante importantes para conocer distintos fenómenos, por ejemplo, fechas en que los días son más cortos o largos.

En la figura 3.2, se puede apreciar la trayectoria solar en el transcurso del año correspondiente a la posición de la ciudad de Puebla, México en el globo terrestre.

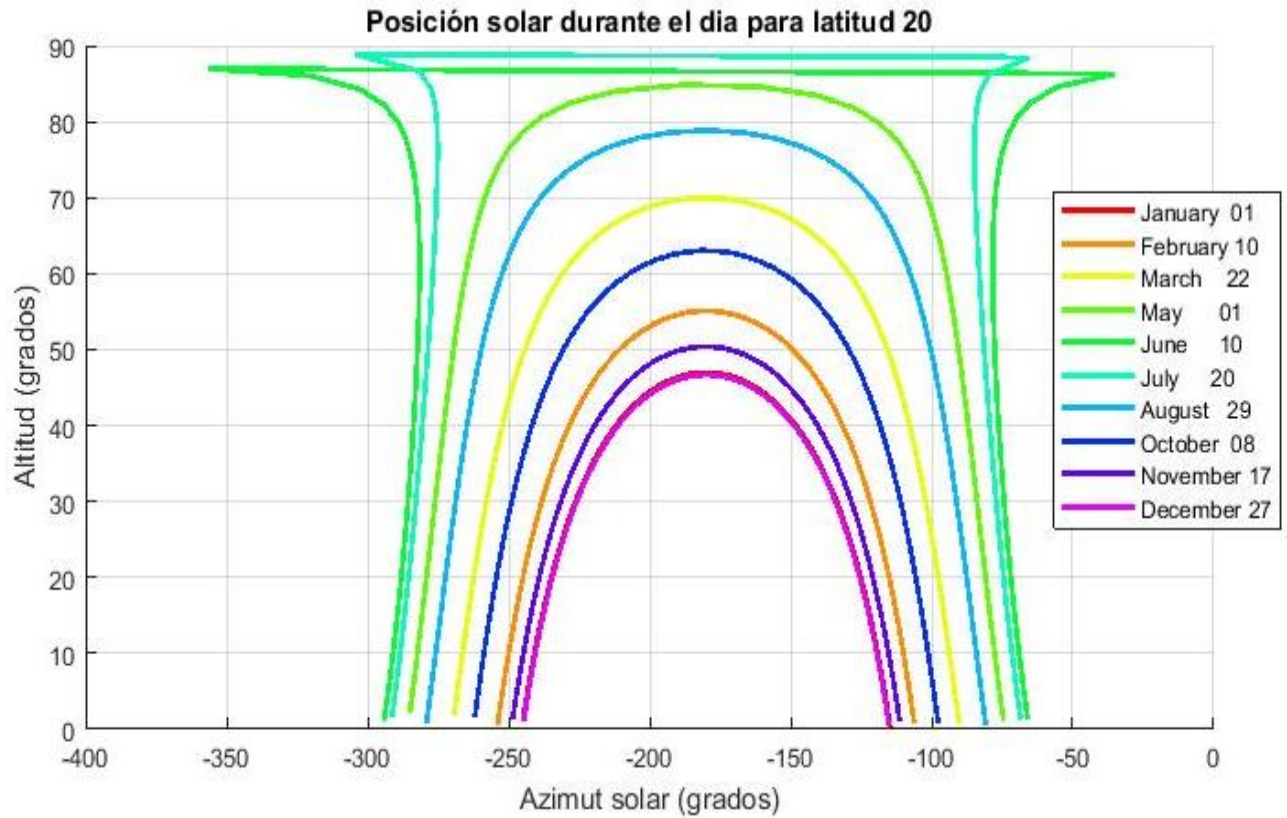


Figura 3.2. Gráficos de la trayectoria solar a lo largo del año en la ciudad de Puebla, México.

3.1.3. Analema Solar



Figura 3.3. Analema solar, Burgos 26 de agosto de 2011-26 de agosto de 2012. (Foto de Arnáiz).

La analema solar es un fenómeno que resulta de la excentricidad y oblicuidad de la órbita terrestre. Si se posicionara una cámara en un punto fijo y se tomara una fotografía del Sol en intervalos de 24 horas durante el transcurso del año, el resultado sería la visualización de un símbolo con una forma peculiar como el que se observa en la figura 3.3. La analema representa la diferencia entre la aparente hora solar contra la hora solar media [18].

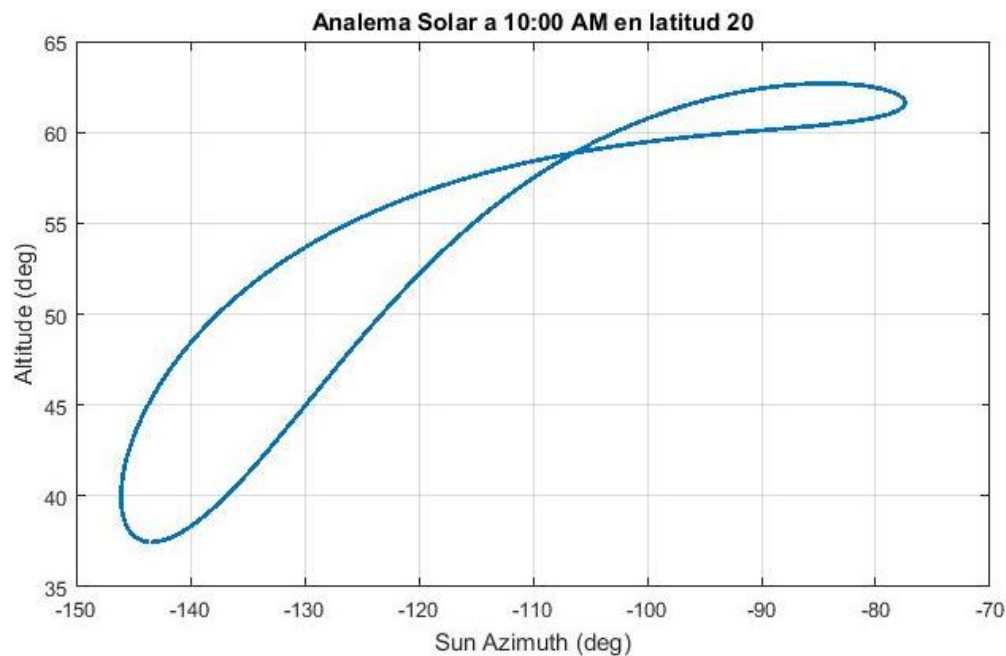


Figura 3.4. Gráfica de analema solar con la posición del Sol a las 10 am, correspondiente a la ciudad de Puebla, México.

En la figura 3.4 se aprecia una gráfica de la analema solar en la ciudad de Puebla, Mex., que corresponde a la posición del Sol a las 10 am en el transcurso del año. Haciendo una comparativa con la imagen de la figura 3.3, se pueden ver diferencias en la inclinación de la forma y la presencia de una curvatura inferior (figura 3.4), que se deben obviamente a que ambas formas corresponden a la posición solar en distintos puntos del planeta.

La figura 3.5 corresponde a una captura de pantalla de una animación por computadora hecha en el software Matlab versión 2017 de la trayectoria solar sobre

la esfera celeste en la ciudad de Puebla, además de la analema solar a las 10 am de cada día durante el transcurso de un año.

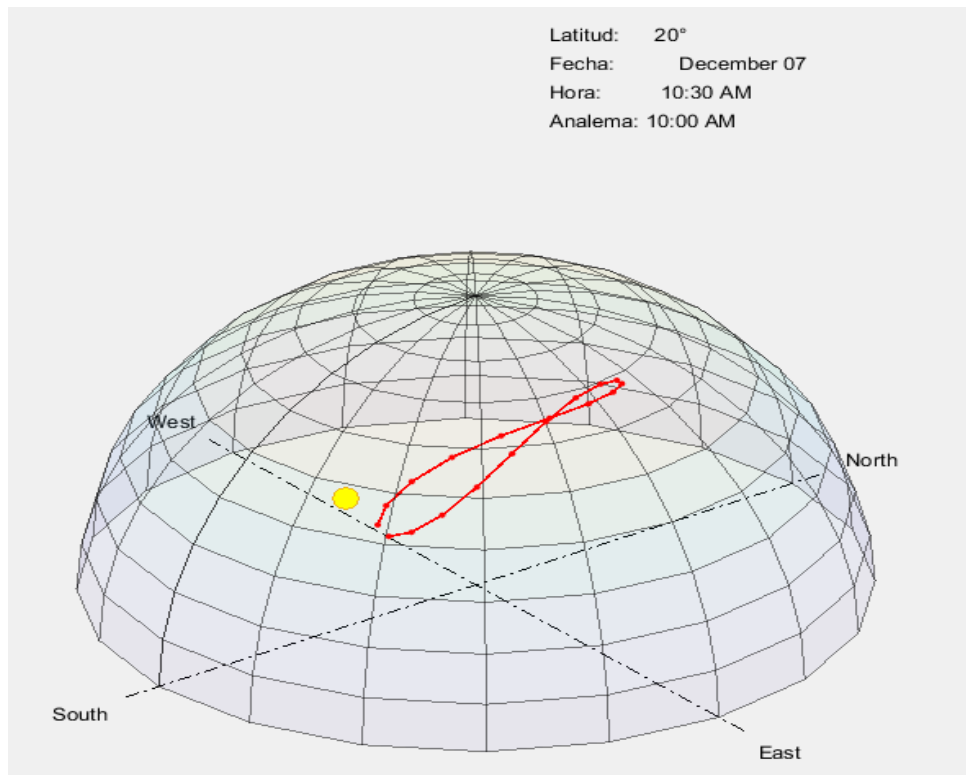


Figura 3.5. Simulación de analema solar de la ciudad de Puebla, México en la esfera celeste.

3.2. Diseño mecánico

Debido al sistema de coordenadas esféricas usado en las ecuaciones de seguimiento solar, se planteó basar el diseño del seguidor solar en la arquitectura de un robot manipulador esférico (RRP).

Reyes [11] explica que la configuración esférica de robots manipuladores presenta dos articulaciones rotacionales (base y hombro) y la articulación del codo corresponde al tipo prismática o lineal, como se muestra en la figura 3.6. Los ejes de movimiento de las articulaciones son mutuamente perpendiculares entre sí. Además de que el espacio de trabajo corresponde a una esfera hueca, cuyo radio

se encuentra en función del desplazamiento lineal de la articulación prismática del codo.

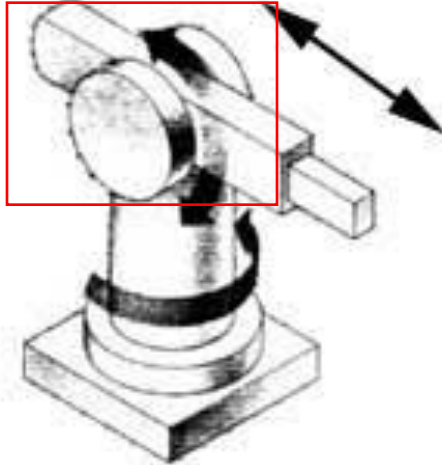


Figura 3.6. Robot manipulador en configuración esférica [11].

La articulación del robot de la figura 3.6 encerrada en el cuadro rojo, realiza la función de variar el ángulo de elevación del brazo, como se puede apreciar, se encuentra centrada en la base del robot, este diseño no sería óptimo para el seguidor solar pues reduce en gran medida el espacio de trabajo, impidiendo que alcance posiciones en las que esta articulación forme ángulos cercanos a los 90 grados respecto a la horizontal. Estas posiciones son necesarias pues como se aprecia en la figura 3.2, el ángulo de elevación solar toma valores cercanos a dicho ángulo.



Figura 3.7. Seguidor solar para pirheliómetro.

El mecanismo de la figura 3.7 corresponde a un seguidor solar comercial. Como se puede apreciar, la articulación que varía el ángulo de elevación del brazo (el pirheliómetro) se encuentra desfasada del eje central de la base del robot, permitiendo de esta manera que el pirheliómetro varíe su posición angular libremente. Basándose en esta arquitectura, se planteó el diseño que se muestra en la figura 3.8.

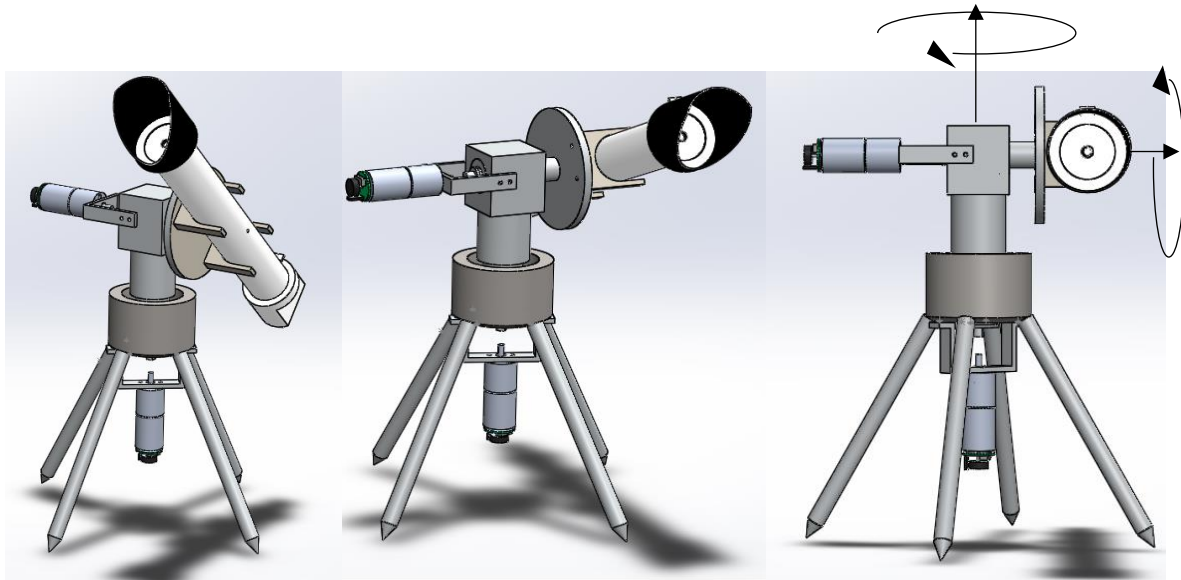


Figura 3.8. Dibujo del diseño propuesto de seguidor solar para pirheliómetro basado en la arquitectura de robot esférico. Realizado en el programa Solidworks versión 2016.

Previamente se mencionó que la configuración esférica posee una articulación de tipo lineal correspondiente al codo para poder así variar el radio de la esfera que describe el espacio de trabajo. Para los fines de un seguidor solar, este grado de libertad no es necesario pues como se explicó en el capítulo 2 en la parte de la trayectoria solar, la longitud del vector solar no es de importancia pues lo que se busca únicamente es apuntar el dispositivo en dirección al Sol, por lo cual los únicos parámetros que se requieren son los ángulos de elevación y azimut. Lo anterior no quiere decir que se eliminará este grado de libertad del sistema, pues esto ocasionaría complicaciones en los cálculos cinemáticos que se explicarán más adelante; simplemente se tomará como un valor constante correspondiente a la distancia d_3 entre la punta del pirheliómetro y el eje de la articulación correspondiente al ángulo de elevación, como se muestra en la figura 3.9.

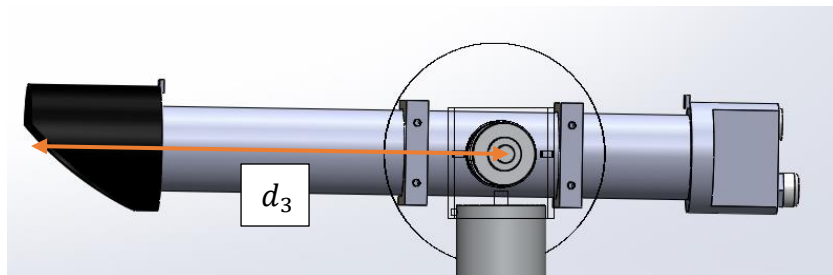


Figura 3.9. Distancia d_3 , que representa el tercer grado de libertad del manipulador tomada como un valor constante.

3.2.1. Piezas y ensamble del sistema.

En un inicio se planeó que el sistema fuera manufacturado al 100% en aluminio, debido a las características que este material posee y que son de gran importancia para la aplicación del seguidor solar.

- Baja densidad, lo que provoca que el sistema sea ligero y fácil de transportar.
- Alta resistencia a la corrosión, pues el seguidor durante su uso estará expuesto a la humedad del ambiente y en ocasiones a lluvia.

- Es económico.
- Fácil de maquinar y estético.

En el software de CAD SolidWorks versión 2016 se realizó el dibujo de las piezas y su correspondiente ensamblaje. El diseño consta de las siguientes 13 piezas:

- Sujetadores de pirheliómetro (figura 3.10). Corresponden a dos piezas que mantienen al pirheliómetro unido al sistema.

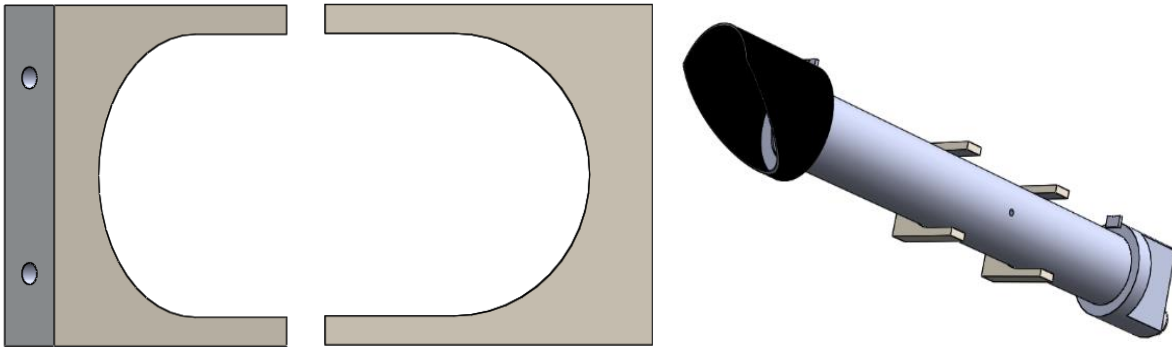


Figura 3.10. Sujetadores de pirheliómetro.

- Disco (figura 3.11). Pieza donde se anclan los sujetadores de pirheliómetro.

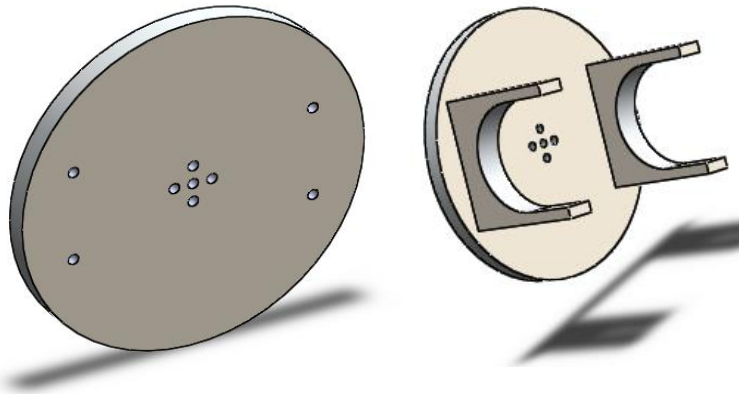


Figura 3.11. Disco

- Sujetador de motor de segunda articulación (figura 3.12). Corresponde a la pieza que fija el motor que se encarga de variar el ángulo de elevación solar.

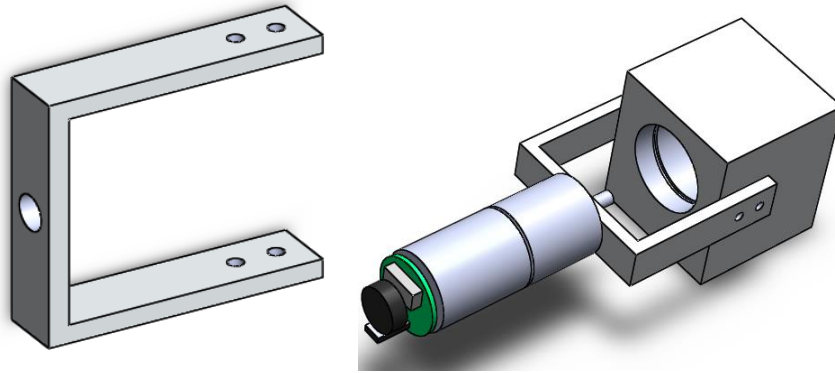


Figura 3.12. Sujetador de motor de segunda articulación.

- Pieza A del primer eslabón (figura 3.13).

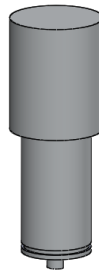


Figura 3.13. Pieza A del primer eslabón.

- Pieza B del primer eslabón (figura 3.14).

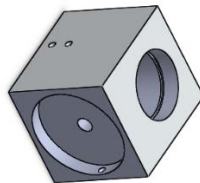


Figura 3.14. Pieza B del primer eslabón

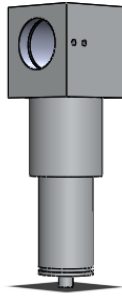


Figura 3.15. Primer eslabón del sistema (ensamblaje de piezas A y B).

- Segundo eslabón del sistema (figura 3.16).

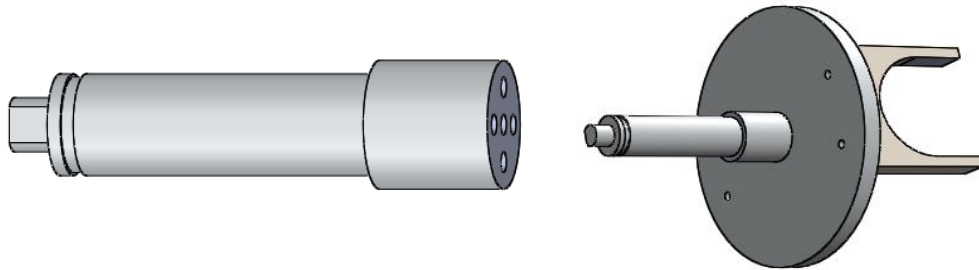


Figura 3.16. Segundo eslabón.

- Sujetador de motor de la primera articulación (figura 3.17). Sujetador que mantiene fijo el motor que varía el ángulo de acimut.

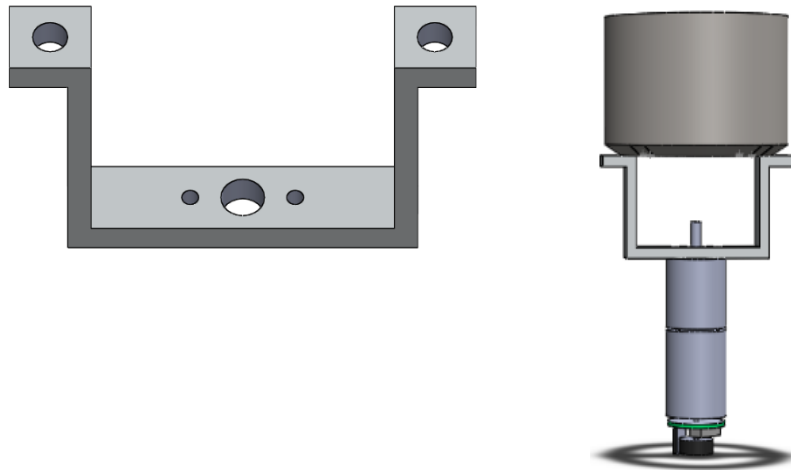


Figura 3.17. Sujetador de motor de la primera articulación del sistema.

- Patas (figura 3.18). Corresponden a 4 piezas que forman una estructura cuadrípode para darle soporte al robot.

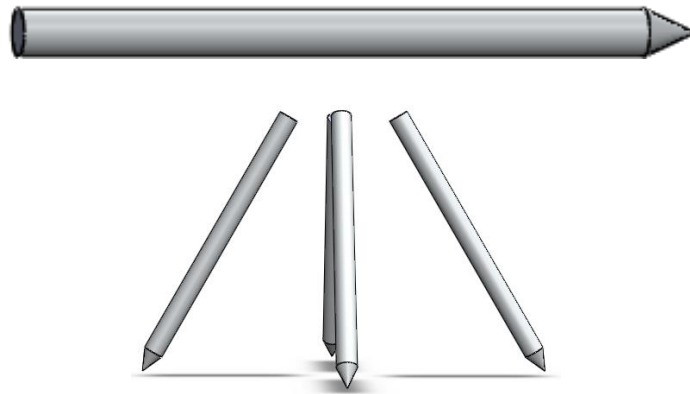


Figura 3.18. Patas de soporte del sistema.

- Base (figura 3.19). Pieza donde se unen las 4 patas de soporte y donde se acopla la primera articulación para el primer eslabón.

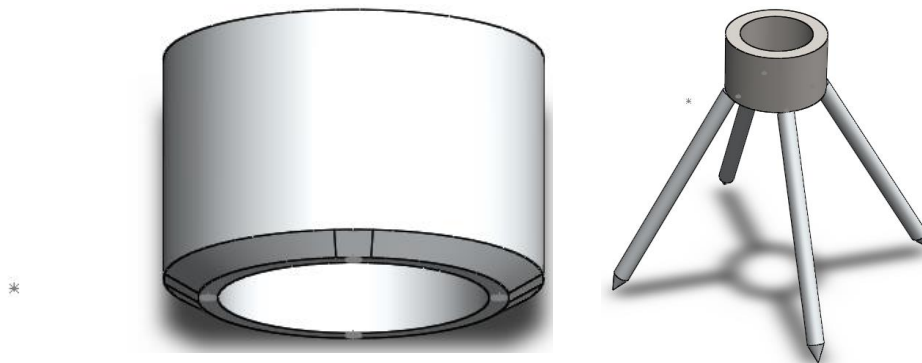


Figura 3.19. Base del robot.

3.2.2. Cálculo de centro de masa

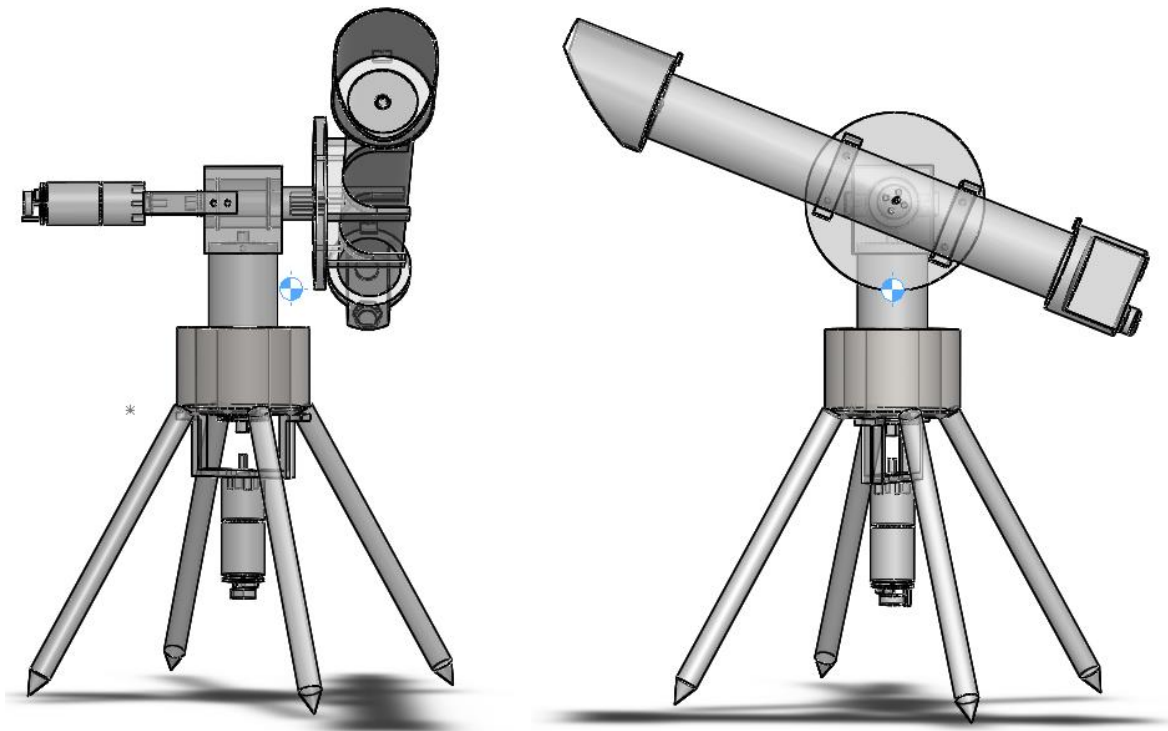


Figura 3.20. Ubicación del centro de masa del sistema, simulando manufactura de todas sus piezas en aluminio.

Previamente se mencionó que la primera propuesta de diseño del sistema correspondía a manufacturar todas sus piezas en aluminio, en el software SolidWorks es posible definir materiales a las piezas y en condiciones de simulación realizar el cálculo del centro de masa. En la figura 3.20 se aprecia que, si el sistema se fabricara al 100% en aluminio, la ubicación del centro de masa estaría considerablemente desfasada del centro del robot. Si se procediera a manufacturar el sistema bajo estas condiciones, no habría problemas en la estabilidad del robot pues su centro de masa se encuentra dentro del área que abarca el cuadrípode que le da soporte al sistema, además de que las inercias provocadas por el robot en movimiento son mínimas pues el seguimiento solar es extremadamente lento.

Para ubicar el centro de masa en una posición óptima cercana al centro del robot (en el eje de acción del primer grado de libertad) y a una altura menor respecto al

piso, se propuso que la base del sistema (figura 3.19) se manufacturara en acero al carbón AISI 1018, haciendo esto la posición del centro de masa sería la que se muestra en la figura 3.21.

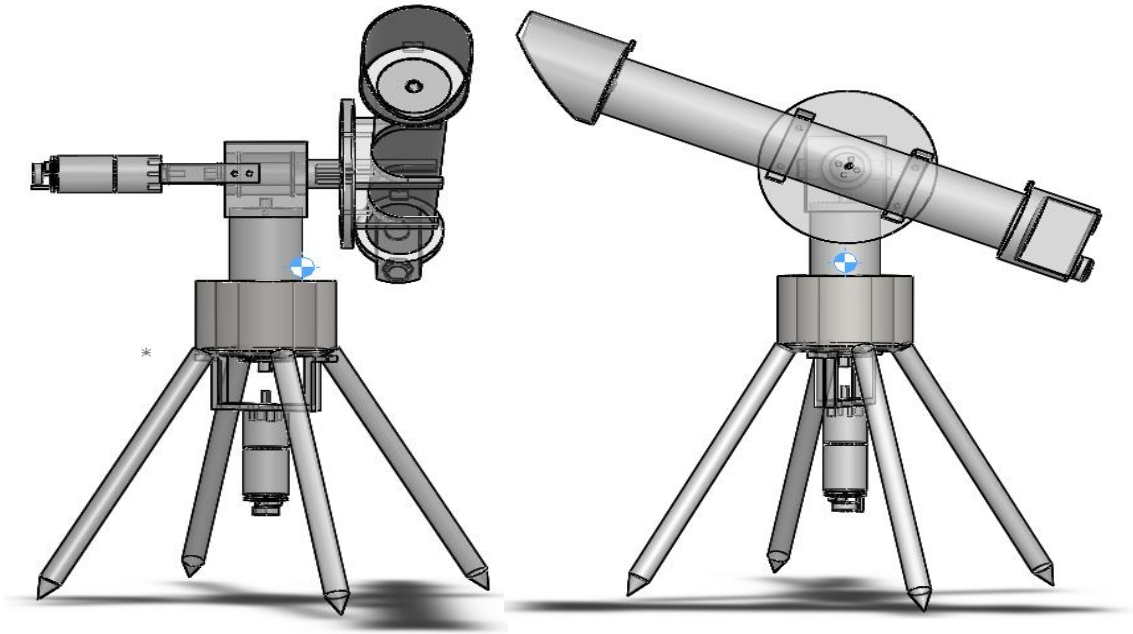


Figura 3.21. Ubicación del centro de masa del sistema, simulando la manufactura de la base en acero al carbón AISI 1018.

La elección de este nuevo material para la base se debe a que posee una densidad mayor a la del aluminio (7.87 g/cm^3) [19], lo que genera una mayor masa que físicamente varía la posición del centro de masa del sistema acercándolo al centro del robot, además de que es de fácil maquinado y un acero económico.

Como se observa en la figura 3.21, el centro de masa bajo este diseño se encuentra a una altura menor y más cercana al eje de acción de la primera articulación que a su vez corresponde al centro del robot por lo que se considera este diseño como definitivo para el maquinado de las piezas.

3.3. Obtención del modelo cinemático del sistema

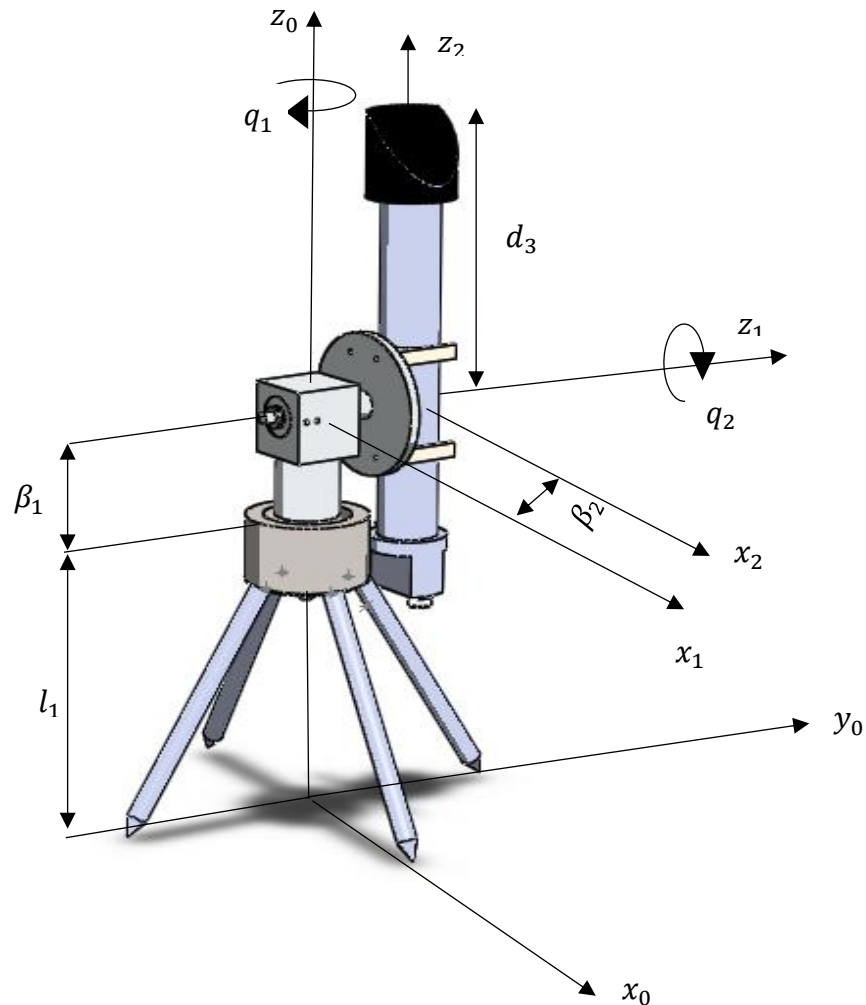


Figura 3.22. Asignación de sistemas de coordenadas del seguidor solar.

3.3.1. Tabla de parámetros Denavit-Hartenberg

Siguiendo los pasos para la asignación de sistemas de coordenadas a los eslabones del robot de la metodología Denavit-Hartenberg, se colocaron los ejes como se muestra en la figura 3.22. En esta imagen se puede apreciar que los motores eléctricos no forman parte del análisis para la asignación de sistemas de coordenadas, porque debido a la arquitectura del sistema, los motores fueron colocados en lugares donde no hay interferencia con dichos ejes, por lo que sus

dimensiones no afectan los parámetros necesarios dentro de la metodología Denavit-Hartenberg.

Para llevar a cabo de manera completa la metodología Denavit-Hartenberg es necesario el hallazgo de 4 parámetros en cada sistema de ejes coordenados, Reyes [11] da el siguiente análisis para poder obtenerlos:

5. l_i es la longitud del i-ésimo eslabón, es la distancia del eje z_{i-1} hacia el eje z_i , medida sobre el eje x_{i-1} .
6. α_i es el ángulo de torsión, el cual representa el ángulo entre los ejes z_{i-1} a z_i medido en el sentido de las manecillas del reloj sobre el eje x_i .
7. d_i se emplea en articulaciones lineales o prismáticas y representa el desplazamiento lineal. Cuando la articulación es rotacional, entonces representa el offset o espesor del servomotor, denotada por β_i .
8. θ_i es el desplazamiento rotacional de x_{i-1} a x_i medido alrededor del eje z_{i-1} . El signo positivo de θ_i es el sentido contrario a las manecillas del reloj.

Por lo que la tabla de parámetros de la convención Denavit-Hartenberg para el sistema de la figura 3.22 es la siguiente:

Eslabón	l_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$-\frac{\pi}{2}$	$l_1 + \beta_1$	q_1
2	0	$\frac{\pi}{2}$	β_2	q_2
3	0	0	d_3	0

Tabla 3.1. DH de robot esférico.

3.3.2. Cálculo de matrices de transformación homogénea

Retomando la forma de las ecuaciones 2.31 y 2.33, las matrices de transformación homogénea para el seguidor solar en configuración esférica tienen la siguiente estructura:

$$H_0^1 = H_{R_{z_0}}(q_1)H_{T_{z_0}}(l_1 + \beta_1)H_{T_{x_0}}(0)H_{R_{x_0}}\left(-\frac{\pi}{2}\right) \quad 3.1$$

donde

$$\begin{aligned} H_0^1 &= \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\text{sen } q_1 & 0 & 0 \\ \text{sen } q_1 & \cos q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 + \beta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) & -\text{sen}\left(-\frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & \text{sen}\left(-\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\text{sen } q_1 \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) & \text{sen } q_1 \text{sen}\left(-\frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ \text{sen } q_1 & \cos q_1 \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) & -\cos q_1 \text{sen}\left(-\frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & \text{sen}\left(-\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) & l_1 + \beta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos q_1 & 0 & -\text{sen } q_1 & 0 \\ \text{sen } q_1 & 0 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & l_1 + \beta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad 3.2$$

Para H_1^2

$$H_1^2 = H_{R_{z_1}}(q_2)H_{T_{z_1}}(\beta_2)H_{T_{x_1}}(0)H_{R_{x_1}}\left(\frac{\pi}{2}\right) \quad 3.3$$

donde

$$H_1^2 = \begin{bmatrix} \cos q_2 & -\text{sen } q_2 & 0 & 0 \\ \text{sen } q_2 & \cos q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \beta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & -\text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & \text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos q_2 & -\text{sen } q_2 \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & \text{sen } q_2 \text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ \text{sen } q_2 & \cos q_2 \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & -\cos q_2 \text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & \text{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & \beta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos q_2 & 0 & \text{sen } q_2 & 0 \\ \text{sen } q_2 & 0 & -\cos q_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \beta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 3.4$$

Para H_2^3

$$H_2^3 = H_{R_{z2}}(0)H_{T_{z2}}(d_3)H_{T_{x2}}(0)H_{R_{x2}}(0) \quad 3.5$$

donde

$$H_2^3 = \begin{bmatrix} \cos(0) & -\text{sen}(0) & 0 & 0 \\ \text{sen}(0) & \cos(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(0) & -\text{sen}(0) & 0 \\ 0 & \text{sen}(0) & \cos(0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(0) & -\text{sen}(0) \cos(0) & \text{sen}(0) \text{sen}(0) & 0 \\ \text{sen}(0) & \cos(0) \cos(0) & -\cos(0) \text{sen}(0) & 0 \\ 0 & \text{sen}(0) & \cos(0) & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 3.6$$

Y finalmente $H_0^3 = H_0^1 H_1^2 H_2^3$, donde

$$H_0^3 = \begin{bmatrix} \cos q_1 & 0 & -\text{sen } q_1 & 0 \\ \text{sen } q_1 & 0 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & l_1 + \beta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos q_2 & 0 & \text{sen } q_2 & 0 \\ \text{sen } q_2 & 0 & -\cos q_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \beta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

por lo tanto, la transformación homogénea del sistema está dada por

$$H_0^3 = \begin{bmatrix} \cos q_1 \cos q_2 & -\text{sen } q_1 & \cos q_1 \text{sen } q_2 & -\beta_2 \text{sen } q_1 + d_3 \text{sen } q_2 \cos q_1 \\ \text{sen } q_1 \cos q_2 & \cos q_1 & \text{sen } q_1 \text{sen } q_2 & \beta_2 \cos q_1 + d_3 \text{sen } q_2 \text{sen } q_1 \\ -\text{sen } q_2 & 0 & \cos q_2 & l_1 + \beta_1 + d_3 \cos q_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 3.7$$

3.3.3. Cinemática directa y cinemática diferencial del seguidor solar

Reyes [11] explica que la cinemática directa de un robot manipulador corresponde a los primeros tres elementos de la última columna de la transformación homogénea, por lo tanto, el vector que relacionará el sistema de coordenadas cartesianas con el sistema de coordenadas articulares, está dado por la ecuación 3.8.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\beta_2 \text{sen } q_1 + d_3 \text{sen } q_2 \cos q_1 \\ \beta_2 \cos q_1 + d_3 \text{sen } q_2 \text{sen } q_1 \\ l_1 + \beta_1 + d_3 \cos q_2 \end{bmatrix} \quad 3.8$$

La cinemática diferencial directa es la derivada con respecto al tiempo de la cinemática directa [11].

$$\frac{d}{dt}[x \ y \ z]^T = \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = \frac{d}{dt}f_R(q) = \frac{\partial f_R(q)}{\partial q}\dot{q} = J(q)\dot{q} \quad 3.9$$

donde $\frac{\partial f_R(q)}{\partial q}$ es el jacobiano del robot o jacobiano analítico

$$J(q) = \begin{bmatrix} J_v(q) \\ J_w(q) \end{bmatrix} \quad 3.10$$

En palabras simples, el jacobiano del robot se calcula obteniendo las derivadas parciales del vector de cinemática directa respecto a las variables correspondientes a los grados de libertad, es decir derivar dicho vector respecto a q_1 , q_2 y d_3 para este caso específico, por lo tanto:

$$J(q) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_R}{\partial q_1} & \frac{\partial f_R}{\partial q_2} & \frac{\partial f_R}{\partial d_3} \end{bmatrix} \quad 3.11$$

donde

$$\frac{\partial f_R}{\partial q_1} = \frac{\partial}{\partial q_1} \begin{bmatrix} -\beta_2 \operatorname{sen} q_1 + d_3 \operatorname{sen} q_2 \cos q_1 \\ \beta_2 \cos q_1 + d_3 \operatorname{sen} q_2 \operatorname{sen} q_1 \\ l_1 + \beta_1 + d_3 \cos q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\beta_2 \cos q_1 - d_3 \operatorname{sen} q_1 \operatorname{sen} q_2 \\ -\beta_2 \operatorname{sen} q_1 + d_3 \cos q_1 \operatorname{sen} q_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad 3.12$$

$$\frac{\partial f_R}{\partial q_2} = \frac{\partial}{\partial q_2} \begin{bmatrix} -\beta_2 \operatorname{sen} q_1 + d_3 \operatorname{sen} q_2 \cos q_1 \\ \beta_2 \cos q_1 + d_3 \operatorname{sen} q_2 \operatorname{sen} q_1 \\ l_1 + \beta_1 + d_3 \cos q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_3 \cos q_1 \cos q_2 \\ d_3 \cos q_2 \operatorname{sen} q_1 \\ -d_3 \operatorname{sen} q_2 \end{bmatrix} \quad 3.13$$

$$\frac{\partial f_R}{\partial d_3} = \frac{\partial}{\partial d_3} \begin{bmatrix} -\beta_2 \operatorname{sen} q_1 + d_3 \operatorname{sen} q_2 \cos q_1 \\ \beta_2 \cos q_1 + d_3 \operatorname{sen} q_2 \operatorname{sen} q_1 \\ l_1 + \beta_1 + d_3 \cos q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{sen} q_2 \cos q_1 \\ \operatorname{sen} q_2 \operatorname{sen} q_1 \\ \cos q_2 \end{bmatrix} \quad 3.14$$

por lo tanto, el jacobiano del sistema queda expresado de la siguiente manera:

$$J(q_1, q_2, d_3) = \begin{bmatrix} -\beta_2 \cos q_1 - d_3 \sin q_1 \sin q_2 & d_3 \cos q_1 \cos q_2 & \cos q_1 \sin q_2 \\ -\beta_2 \sin q_1 + d_3 \cos q_1 \sin q_2 & d_3 \cos q_2 \sin q_1 & \sin q_1 \sin q_2 \\ 0 & -d_3 \sin q_2 & \cos q_2 \end{bmatrix} \quad 3.15$$

Retomando la expresión $\begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = J(q)\dot{q}$ de la ecuación 3.9, se despeja \dot{q} :

$$\dot{q} = J^{-1}(q) \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad 3.16$$

La ecuación anterior es importante pues si se desea que el robot se mueva con una cierta velocidad en el espacio, se pueden determinar las velocidades de las articulaciones necesarias en cada instante a lo largo de la trayectoria de modo que se tenga la velocidad deseada. Por lo que es importante saber dónde no está definida la inversa del jacobiano, es decir, para qué valores de q , la matriz J se vuelve singular [12].

Previamente en el capítulo 2 se explicó lo que era una singularidad desde un enfoque gráfico, meramente articular del robot y ahora se ha dado una explicación matemática de este fenómeno. Por lo que para conocer en qué condiciones el sistema entra una configuración singular, es necesario saber para qué valores de q , el determinante de la matriz jacobiana toma el valor de cero.

Calculando el determinante del jacobiano del sistema, expresado en la ecuación 3.15 e igualando con cero se obtiene

$$\det[J(q_1, q_2, d_3)] = -d_3^2 \sin q_2 = 0 \quad 3.17$$

Haciendo un análisis de la expresión anterior, se puede observar que la entrada a una configuración singular únicamente está en función de las variables de dos articulaciones (d_3 y q_2). Dicha condición se cumple para los siguientes casos:

- $d_3 = 0$

- $q_2 = n\pi, \forall n \in \mathbb{Z}$

En la figura 3.9 se visualiza la distancia correspondiente a d_3 , que como se mencionó, para fines del posicionamiento del seguidor solar, no se requiere de su variación, debido a que para ubicar el Sol en la esfera celeste únicamente es necesario conocer el valor de los ángulos de elevación y azimut del vector solar, sin importar su longitud. Por lo tanto, el valor de d_3 tendrá un valor constante mayor que cero, dicho esto, las condiciones del sistema para entrar a una configuración singular corresponden únicamente a

$$q_2 = n\pi, \quad \forall n \in \mathbb{Z} \quad 3.18$$

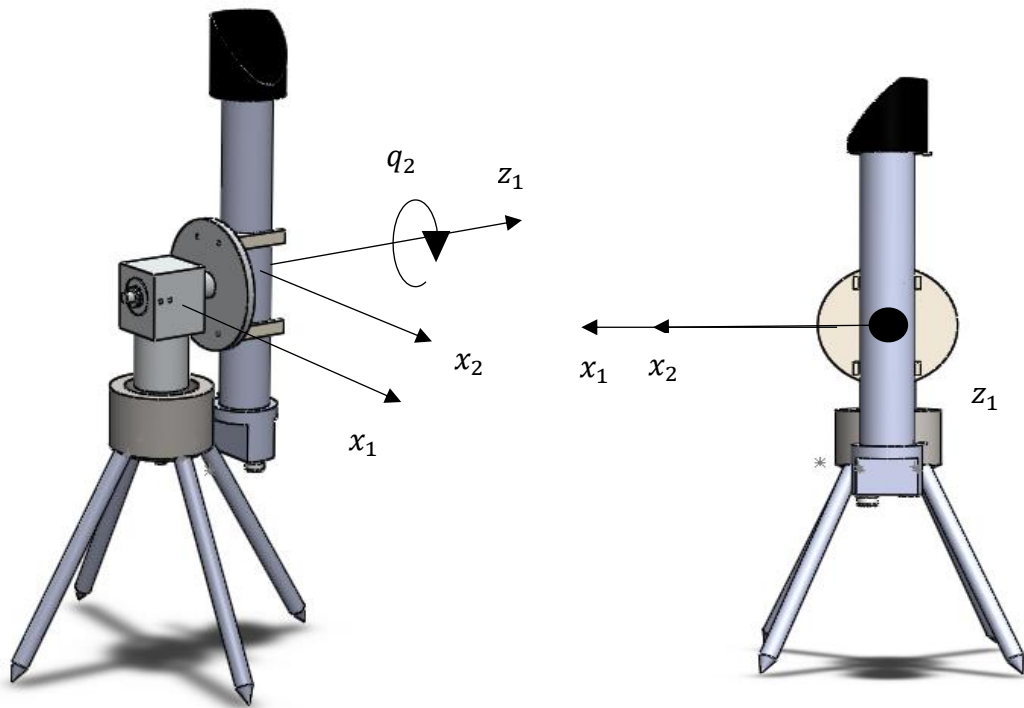


Figura 3.23. Seguidor solar en primera configuración singular.

Basándose en las instrucciones de Reyes [11] para hallar la tabla de parámetros Denavit-Hartenberg, q_2 para el seguidor solar es el desplazamiento rotacional de x_1

a x_2 medido alrededor del eje z_1 . En las figuras 3.23 y 3.24 se puede apreciar que, para dichos eventos, el robot se encuentra en una singularidad, puesto que para el primer caso (figura 3.23), el ángulo q_2 es cero, que para la ecuación 3.18 correspondería a la condición cuando $n = 0$. Para el segundo evento, de la figura 3.24, $q_2 = \pi$ que correspondería a la condición cuando $n = 1$ en la ecuación 3.18.

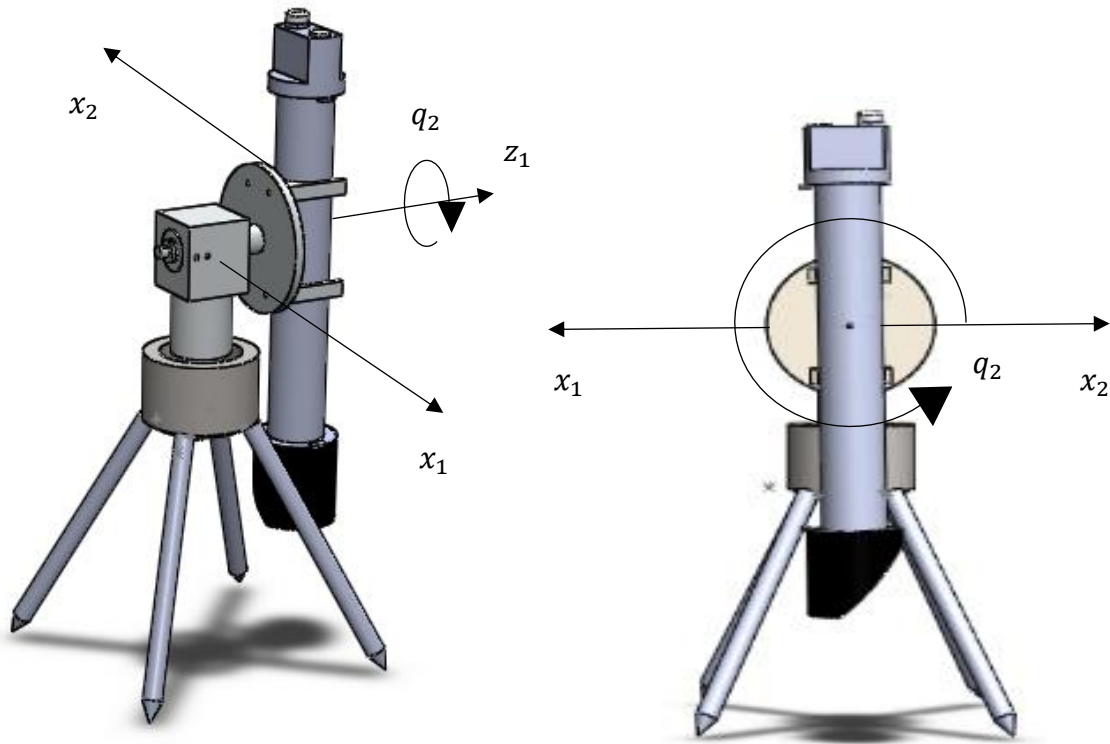


Figura 3.24. Seguidor solar en segunda configuración singular.

Una vez definidas las singularidades del sistema, es prudente hacer una comparativa de las imágenes 3.23, 3.24 y 3.25 con la imagen 2.21, en esta última se muestra el espacio de trabajo de un robot esférico y se puede apreciar que éste no está definido en los polos norte y sur de la esfera, al igual que el seguidor solar.



Figura 3.25. Espacio de trabajo del sistema.

3.4. Implementación del método de control Resolved Motion Rate Control en condiciones de simulación

Como se definió en el capítulo 2, el controlar trayectorias de un robot manipulador implica la aplicación de un adecuado método de control de movimiento resuelto; también se documentó que Resolved Motion Rate Control es un método de este tipo que hace uso de la cinemática directa y diferencial del manipulador para su ejecución.

Previo a la implementación física del método de control, se procedió a realizar simulaciones en el entorno Simulink del software MatLab versión 2017 haciendo uso de la herramienta Simscape Multibody.

Simscape Multibody provee simulaciones en un entorno 3D de sistemas mecánicos, como robots, etc. Se pueden modelar sistemas multicuerpo usando bloques de programación que representan cuerpos, articulaciones, restricciones, elementos de fuerza y sensores [20]. En la figura 3.26 se aprecia el entorno de simulación, en él se puede hacer uso de gráficos, visualizar el entorno de programación además de simulaciones de los movimientos del sistema mecánico.

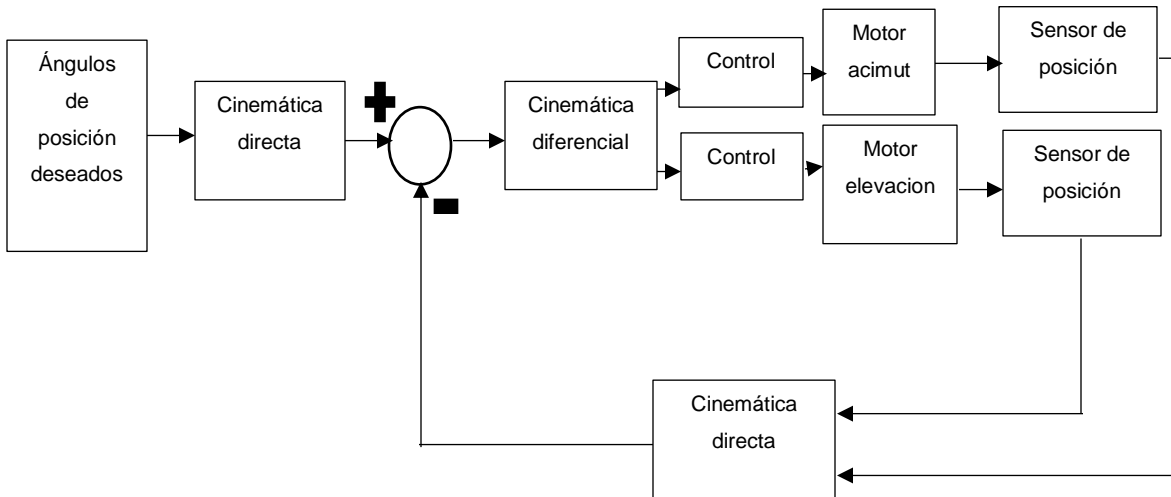
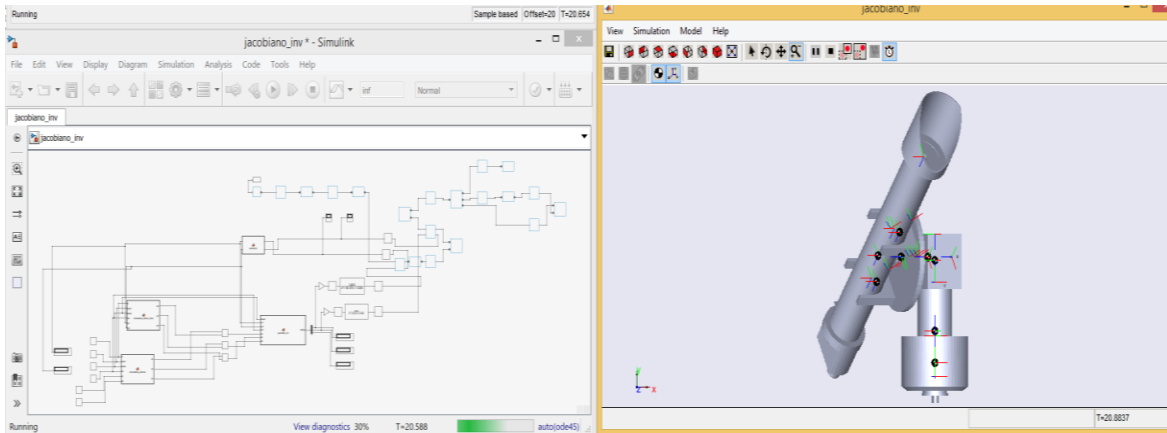


Figura 3.26. Entorno de simulación Simscape Multibody y diagrama del método de control Resolved Motion Rate Control.

El diagrama de la figura 3.26 representa el método de control Resolved Motion Rate Control que se implementó en Simulink.

Por el momento, los bloques de nombre *Control* y los de los motores, corresponden a bloques de ganancia unitaria, pues en este punto no es importante simular el

desempeño de un de control PID ni la función de transferencia del sistema, por ahora la prioridad es la simulación del comportamiento del método de control.

En la figura 3.27 se observa el comportamiento de las señales de control para un cambio de trayectoria en acimut de 0 grados hasta 10 grados, donde la gráfica deltaQ1 corresponde a la señal de control para el motor que varía la posición del ángulo de acimut y la gráfica deltaQ2 correspondiente al ángulo de elevación. Aunque en este evento solo hubo un cambio en la posición de acimut mientras que la de elevación se mantuvo constante, se puede apreciar que deltaQ2 también tuvo variaciones, este fenómeno en la simulación del movimiento se visualiza con el eslabón del pirheliómetro variando su posición inicial en 0 grados, inclinándose hacia arriba y posteriormente declinándose hasta alcanzar nuevamente su posición en 0, mientras que se realiza el desplazamiento en acimut de 0 a 10 grados. Se supondría que, si solo se solicita la variación de posición en una articulación, la otra permanecería estática, en este método de control no sucede así porque es un control por movimiento resuelto, que como ya se explicó en el capítulo 2, este tipo de controles generan trayectorias coordinando los movimientos en sus articulaciones de manera conjunta.

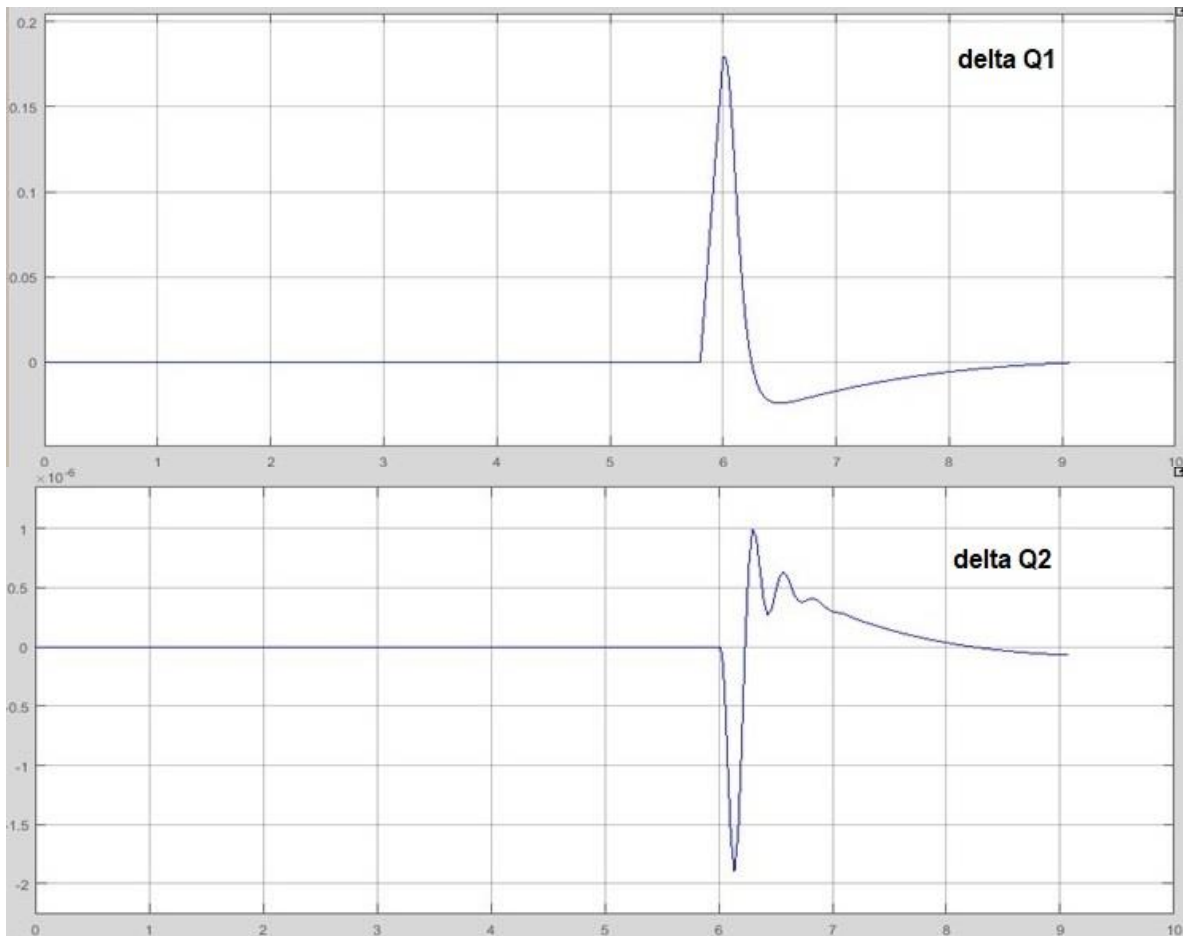


Figura 3.27. Gráficas de las señales de control para los motores.

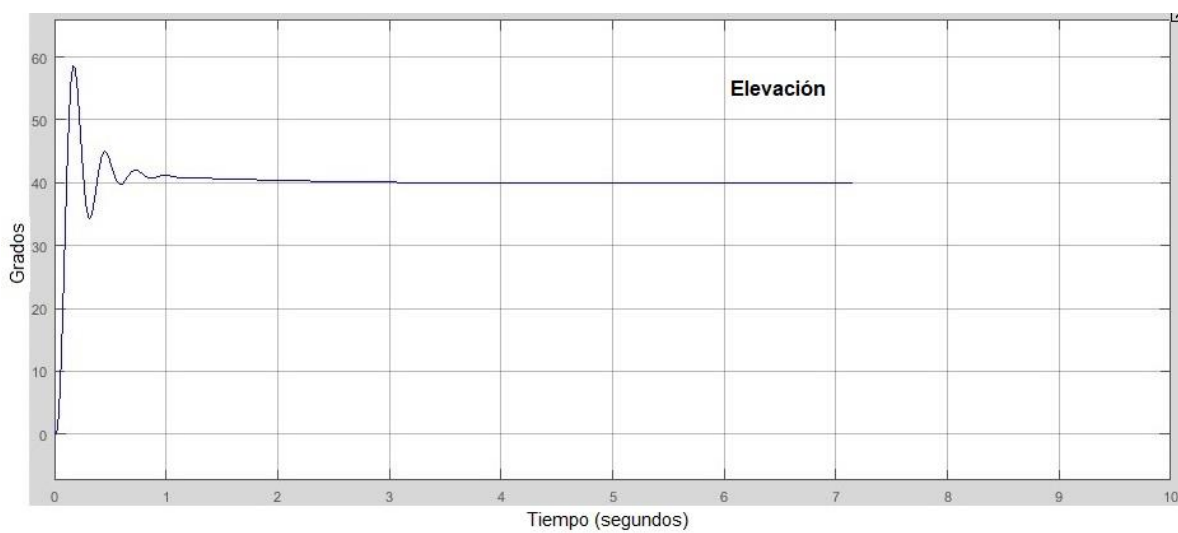


Figura 3.28. Gráfico de la posición angular de elevación para una trayectoria de 0 a 40 grados.

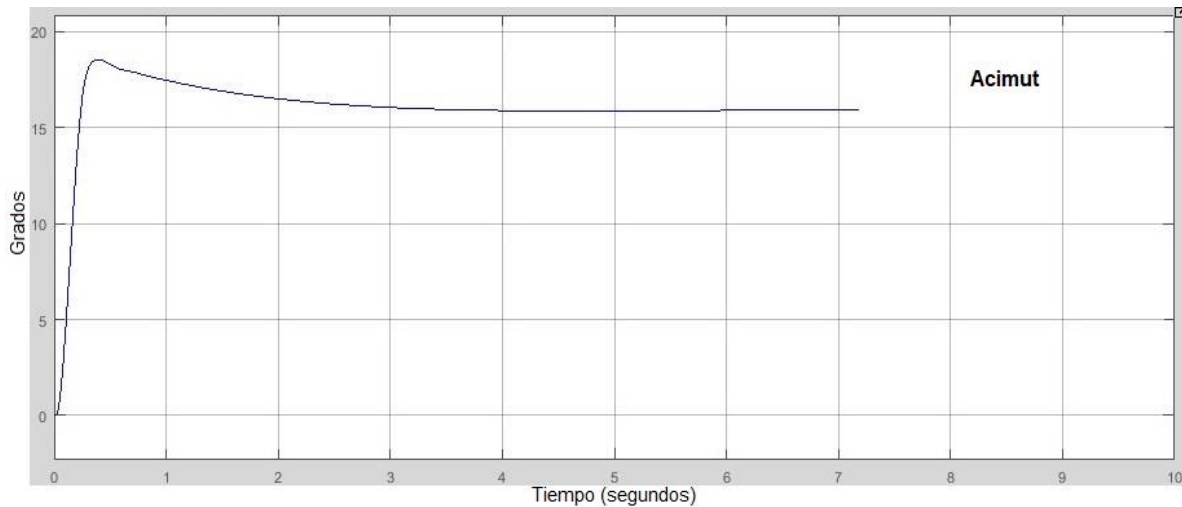


Figura 3.29. Gráfico de la posición angular de acimut para una trayectoria de 0 a 16 grados.

En las figuras 3.28 y 3.29 se pueden apreciar gráficos de las posiciones angulares cuando se define una trayectoria de 0 a 16 grados en acimut y de 0 a 40 grados en elevación, de dichos gráficos se puede concluir que el método de control se comporta de manera adecuada pues el robot alcanza los valores de posición deseados, aunque en ambas gráficas se aprecien comportamientos subamortiguados. Lo anterior se debe a que no se ha definido un control para compensar dicho comportamiento, pues como se mencionó anteriormente, el objetivo de este análisis es únicamente para el desempeño del control de trayectorias por lo que los bloques correspondientes a las funciones de transferencia de los actuadores y los bloques de control solo son de tipo proporcional de ganancia unitaria.

3.5. Diseño y fabricación circuitos eléctricos

Para un adecuado control de los motores, es necesario implementar un circuito manejador de potencia, cuya función principal consiste en relacionar dos etapas: la señal de control y la señal de alimentación del motor. Esto debe hacerse ya que la

señal PWM para regular la velocidad, proviene de una placa Arduino 2560, basada en el microcontrolador AtMega y debido a las características de amperaje que los puertos del microcontrolador poseen, no es suficiente para alimentar un motor. De esta manera, el circuito manejador de potencia funciona como un relevador cuyo control se realiza con señales de magnitudes de voltaje y amperaje pequeñas para una aplicación que requiere de valores de voltaje y corriente mayores.

En la figura 3.30 se muestra el diagrama eléctrico del circuito manejador de potencia implementado, mejor conocido como *Puente H*. La elección de este circuito se basó en las características que posee desde el punto de vista electrónico. Estas características son:

- Saturación de los transistores de potencia con valores de corriente pequeños.
- Resistencia a aumentos drásticos de corriente producidos por una demanda de torque mayor en el motor.
- Protección contra cortos circuitos
- Aislamiento del neutro de ambas etapas, para evitar la presencia de corrientes parásitas en la señal de control o en el microcontrolador mismo, debidas a la naturaleza inductiva del motor.

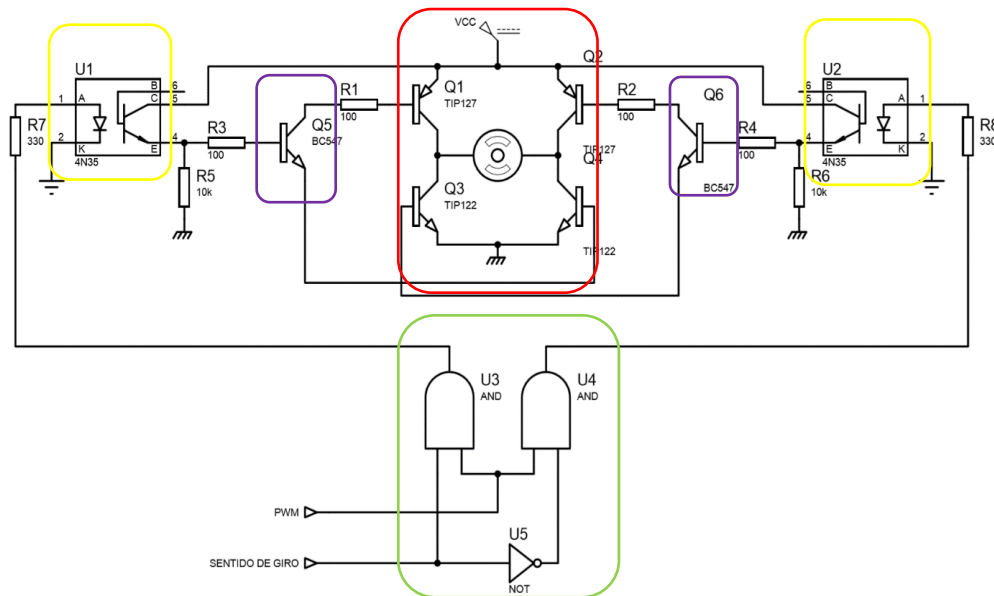


Figura 3.30. Diagrama eléctrico del circuito de potencia.

El circuito de la figura 3.30 está conformado por los siguientes subsistemas:

- Transistores de potencia (cuadro rojo): su función es tomar las configuraciones de corte y saturación comportándose como interruptores para permitir el suministro de voltaje V_{DD} al motor (voltaje nominal del motor).
- Transistores gatillo (cuadros en morado): funcionan como activadores para los transistores de potencia.
- Optoacopladores (cuadros amarillos): son los elementos que relacionan las señales de control con las señales de potencia manteniéndolas aisladas físicamente una de otra.
- Circuito de protección contra cortos circuitos (cuadro verde): como su nombre lo indica, evita que se produzcan cortos circuitos en la etapa de los transistores de potencia.

La elección de los valores de resistencias de base de los transistores se basó en un análisis de las diferentes mallas del circuito eléctrico, como se muestra a continuación:

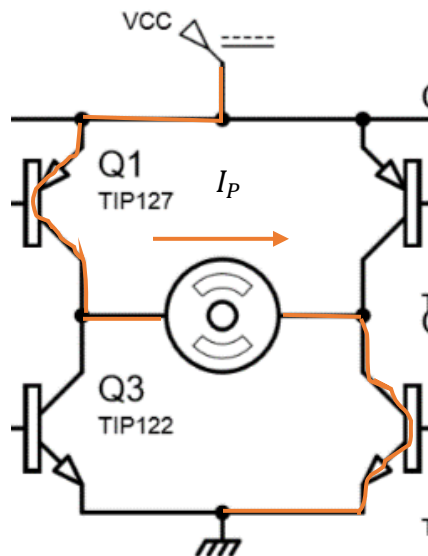


Figura 3.31. Análisis de malla en transistores de potencia.

En la figura 3.31 se puede observar la trayectoria y dirección de la corriente I_p para hacer girar el motor en una dirección, como se mencionó se requiere que los transistores de potencia se encuentren en saturación para emular un comportamiento de un interruptor, por lo tanto, el voltaje colector-emisor es cero para cualquiera de los cuatro, bajo este supuesto se analiza la malla de la siguiente manera:

$$V_{CC} - R_M I_p = 0 \quad 3.19$$

donde $R_M = 90\Omega$ corresponde al valor de resistencia medido en el motor y $V_{CC} = 5.5v$ corresponde al voltaje nominal del motor, calculado previamente. De esta manera

$$5.5v - 90\Omega I_p = 0 \quad 3.20$$

despejando I_p y desarrollando la ecuación se obtiene

$$I_p = \frac{5.5V}{90\Omega} = 0.06 A \quad 3.21$$

En las ecuaciones del transistor, es ampliamente sabido que la relación entre las corrientes de base I_B , colector I_C y emisor I_E está dada por las siguientes expresiones:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \quad 3.22$$

$$I_E \approx I_C \quad 3.23$$

donde β es un parámetro que varía según el transistor y se obtiene de la hoja de datos del fabricante. Partiendo de lo anterior es posible hacer el análisis de la malla que se muestra en la figura 3.46.

Tomando en cuenta la ecuación 3.23 se puede considerar I_{G1} como una sola corriente que fluye por el colector y el emisor del transistor Q5 de la figura 3.32, y calcular su valor haciendo uso de la ecuación 3.22 donde I_{G1} corresponde a I_B del transistor de potencia Q1, I_p corresponde a $I_E \approx I_C$ y $\beta=1000$ (información de la hoja de datos del transistor TIP127).

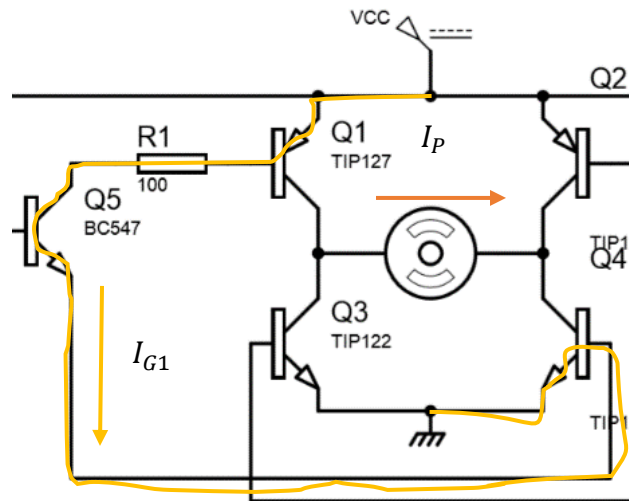


Figura 3.32. Análisis de malla de transistores gatillo.

$$I_{G1} = \frac{I_P}{\beta} = \frac{0.06 \text{ A}}{1000} = 0.06 \text{ mA} \quad 3.24$$

Conociendo el valor de I_{G1} es posible determinar el valor de R1 mediante el siguiente análisis:

$$V_{CC} - 0.7v - I_{G1}R1 - 0.7v - 0.7v = 0 \quad 3.25$$

$$5.5v - 2.1v - I_{G1}R1 = 0 \quad 3.26$$

$$3.4v - I_{G1}R1 = 0 \quad 3.27$$

donde los dos términos de 0.7v de la ecuación 3.25 corresponden a las caídas de tensión de la base y emisor de los transistores Q1, Q4 y Q5.

Despejando R1 y desarrollando la ecuación, se tiene:

$$R1 = \frac{3.4v}{I_{G1}} = \frac{3.4v}{0.00006 \text{ A}} = 56\,666\Omega \quad 3.28$$

Por lo tanto, se requiere un valor máximo de $56\,666\Omega$ en R1 para lograr la saturación de los transistores de potencia correspondientes. Como se puede apreciar en la figura 3.32 se definió R1 con un valor de 100Ω .

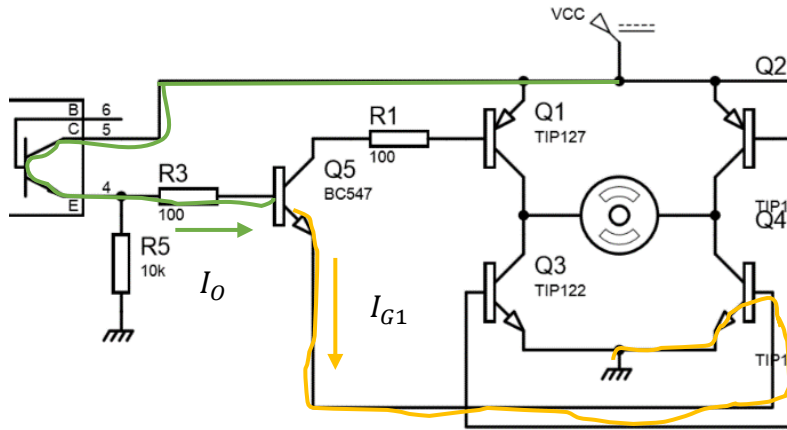


Figura 3.33. Análisis de malla para determinar el valor de R3.

Para determinar el valor de R3, nuevamente se retoma la ecuación 3.23 y se propone una corriente I_O que fluye por el colector y el emisor del transistor interior del optoacoplador como se muestra en la figura 3.33. Cabe mencionar que dicha corriente I_O también es la corriente de base del transistor Q5, por lo tanto, haciendo uso de la ecuación 3.22

$$I_O = \frac{I_{G1}}{\beta} = \frac{0.00006 \text{ A}}{110} = 0.54 \mu\text{A} \quad 3.29$$

donde el valor de β se obtuvo de la hoja de datos del transistor.

Conociendo el valor de I_O es posible hallar finalmente R3 mediante el siguiente análisis:

$$V_{CC} - 0.7v - I_O R3 - 0.7v - 0.7v = 0 \quad 3.30$$

$$5.5v - 2.1v - I_O R3 = 0 \quad 3.31$$

$$R3 = \frac{3.4v}{I_O} = \frac{3.4v}{0.54 \mu\text{A}} = 6233333.3 \Omega \quad 3.32$$

donde nuevamente los términos de 0.7v corresponden a las caídas de voltaje entre base y emisor de los transistores Q4, Q5 y el transistor interno del optoacoplador.

El resultado de la ecuación 3.32 indica que R3 debe tener un valor menor a 6233333.3Ω para asegurar la saturación. Al igual que R1, se le dio el valor de 100Ω .

Como se mencionó anteriormente, el circuito manejador de potencia incluye un subsistema para protección contra corto circuito, que se muestra en la figura 3.34.

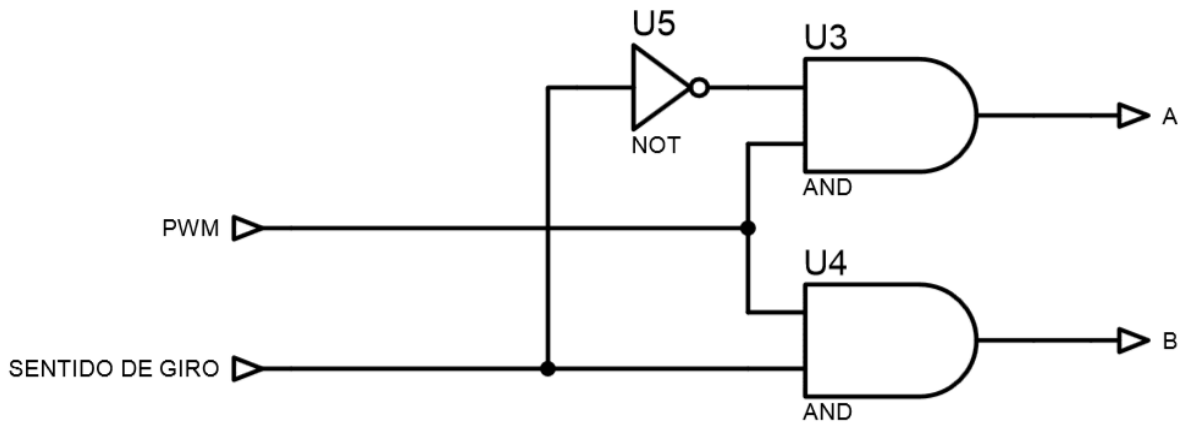


Figura 3.34. Circuito de protección contra cortos circuitos.

PWM	Sentido de giro	A	B
0	0	0	0
0	1	0	0
1	0	1	0
1	1	0	1

Tabla 3.2. Tabla de verdad del circuito de la figura 3.34.

La tabla 3.2 muestra el comportamiento de las salidas A y B del circuito de la figura 3.34, como se puede apreciar los casos cuando cada salida se activa ocurren solo en un evento que no es el mismo para ambas. Lo anterior asegura que las señales correspondientes al sentido de giro del motor no se activarán al mismo tiempo, evitando así una saturación en los cuatro transistores, que desencadenaría un corto circuito.

3.6. Obtención de las funciones de transferencia del sistema

Como se explicó previamente en el capítulo 2, el método de control Resolved Motion Rate Control propuesto para este trabajo, requiere información del modelo cinemático del sistema, además del modelo matemático de sus elementos electromecánicos. En la figura 3.35, el modelo matemático corresponde a los bloques *Motor acimut* y *Motor elevación*.

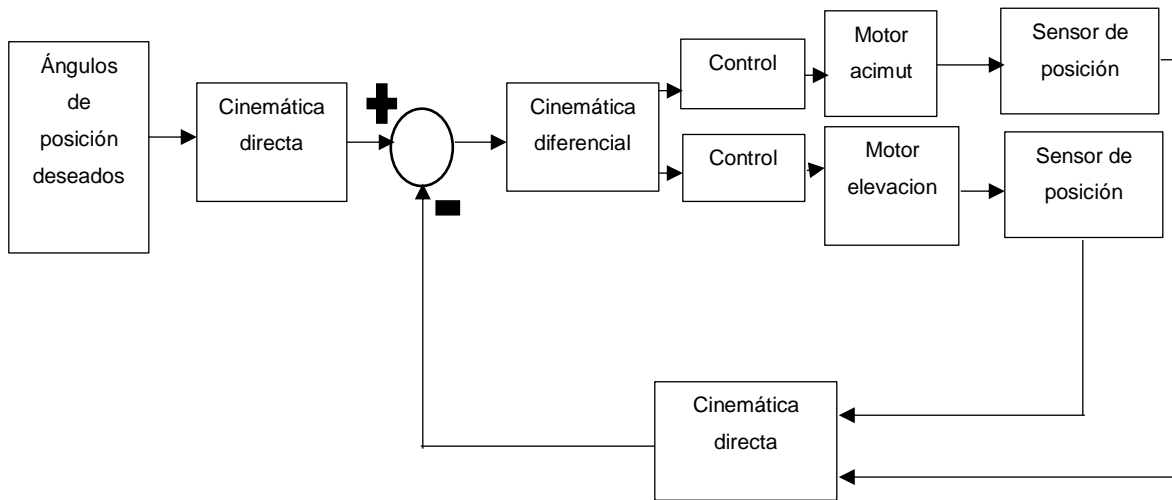


Figura 3.35. Diagrama a bloques del método de control Resolved Motion Rate Control.

La información del modelo matemático de los elementos electromecánicos del robot es necesaria para el análisis del método Resolved Motion Rate Control en los siguientes casos:

- Condiciones de simulación, pues el modelo matemático es una representación del comportamiento físico del sistema en movimiento y por lo tanto brinda una idea de las posibles correcciones o modificaciones que se deben hacer al sistema para que su desempeño se dé bajo las características deseadas.
- Aplicación en condiciones reales, ya que el modelo matemático es una herramienta para el diseño y la implementación de controladores como por ejemplo compensadores o controles PID, que harán al sistema trabajar bajo los requerimientos necesarios para su aplicación.

Para el sistema de seguimiento solar propuesto, se requiere de la obtención de dos modelos matemáticos independientes entre sí que corresponden a los elementos electromecánicos relacionados con el movimiento de acimut y los elementos electromecánicos en el ángulo de elevación. Los modelos matemáticos consisten en el cálculo de las funciones de transferencia que como se mencionó en el capítulo 2, son expresiones que determinan una relación entre los componentes de entrada y salida del sistema.

Un motor es un componente electromecánico que produce una salida de desplazamiento para una entrada de voltaje, es decir, una salida mecánica generada por una entrada eléctrica [16]. Para este trabajo se implementaron 2 motorreductores de corriente directa, que son una clase particular de sistema electromecánico.

En la literatura, están muy bien documentada la teoría para la deducción de la función de transferencia de un servomotor de corriente directa con carga controlado por armadura, Nise [16] brinda la siguiente expresión:

$$\frac{\theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{\frac{K_t}{R_a J_m}}{s \left[s + \frac{1}{J_m} \left(D_m + \frac{K_t K_b}{R_a} \right) \right]} \quad 3.33$$

donde

- $\theta_m(s)$ es la posición angular del motor.
- $E_a(s)$ es el voltaje de entrada.
- K_b una constante de proporcionalidad llamada constante de fuerza contraelectromotriz, que relaciona el voltaje con la velocidad angular del motor.
- K_t es una constante de proporcionalidad, llamada constante de par del motor y relaciona el torque producido en el eje del motor con la corriente demandada.
- R_a la resistencia de armadura del motor.

- J_m la inercia equivalente en la armadura e incluye la inercia de armadura y la inercia de carga reflejada por armadura.
- D_m el amortiguamiento viscoso equivalente en la armadura e incluye el amortiguamiento viscoso de la armadura y el de la carga reflejado por la armadura.

Como se observa, la ecuación 3.33 posee elementos difíciles de calcular de manera experimental como la inercia de armadura y el coeficiente de amortiguamiento viscoso. Debido a la aplicación del sistema, se requiere de un adecuado modelo matemático que represente lo mejor posible el comportamiento mecánico, por ello se optó por otro método de obtención de las funciones de transferencia que no involucre el cálculo teórico de las variables antes mencionadas.

En el capítulo 2 se explicó la obtención de funciones de transferencia por un método gráfico haciendo un análisis de distintos elementos en la curva del sistema generada por la respuesta ante una entrada de tipo escalón. Para obtener dicha curva se graficó en un osciloscopio el voltaje referente a la fuerza contraelectromotriz de cada motor con carga mecánica (debida al acoplamiento con los eslabones del seguidor solar) ante una entrada escalón con valor de 5.5 v, correspondiente al voltaje nominal de los motores. Los valores obtenidos se muestran en las figuras 3.36 y 3.37.

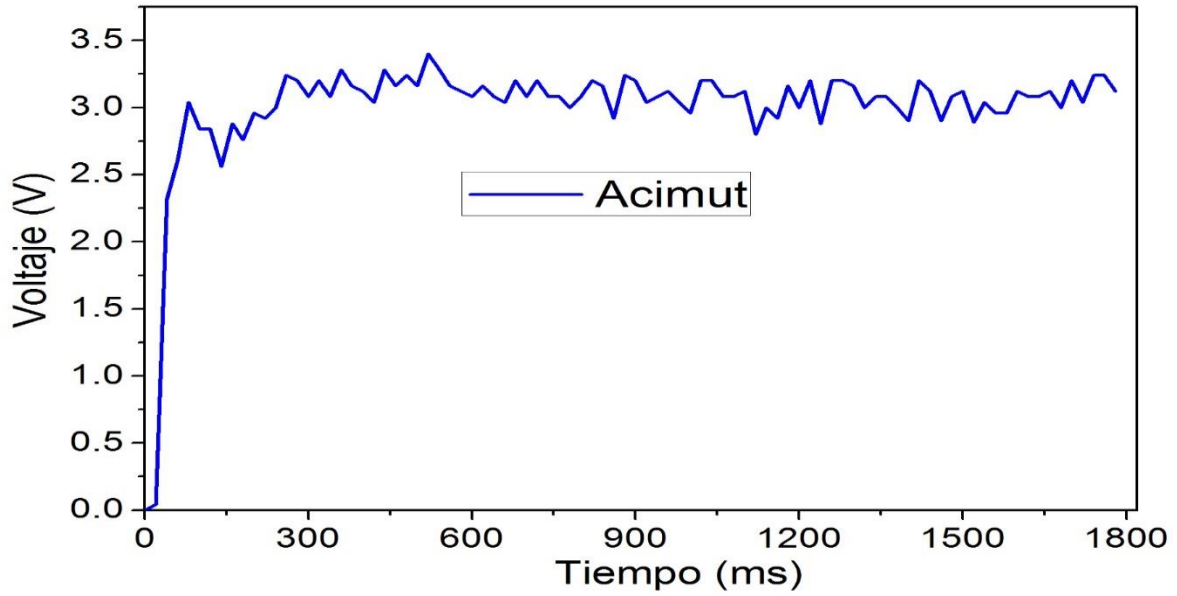


Figura 3.36. Respuesta del sistema electromecánico a una entrada escalón, en articulación correspondiente al ángulo de acimut.

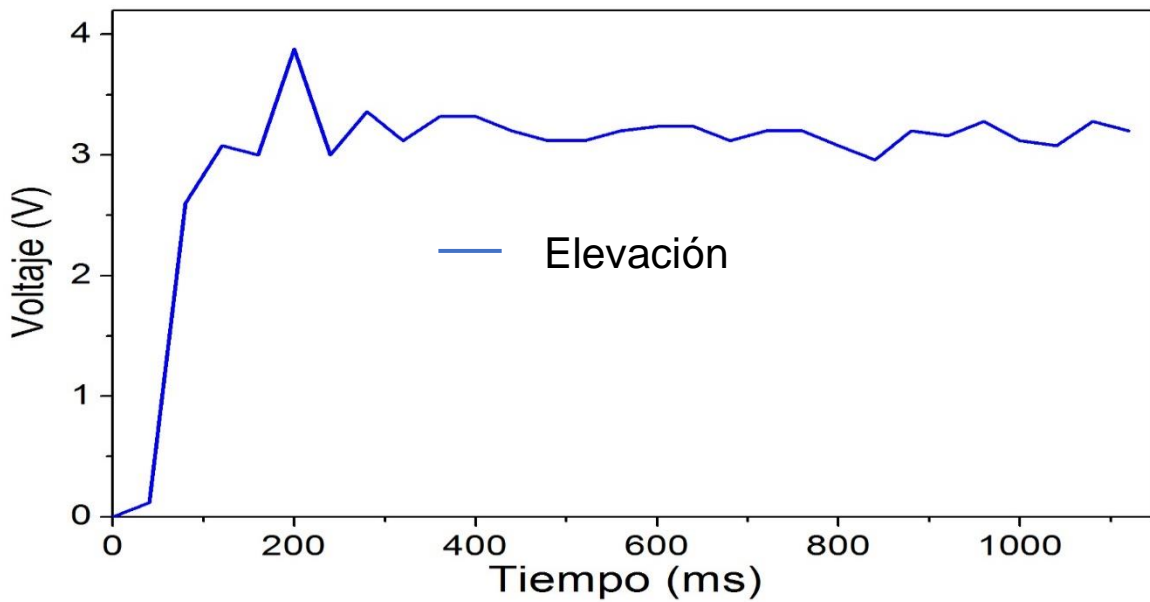


Figura 3.37. Respuesta del sistema electromecánico a una entrada escalón, en articulación correspondiente al ángulo de elevación.

En ambas imágenes se puede apreciar que las curvas tienen un comportamiento correspondiente a un sistema de segundo orden, debido a la presencia de sobretiro

previo a la estabilización, por lo que sus funciones de transferencia deben poseer la siguiente estructura:

$$G(s) = k \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\omega_n\zeta s + \omega_n^2} \quad 3.34$$

Para la obtención de la función de transferencia por método gráfico, es necesario primeramente obtener el valor de la variable k de la ecuación 3.34. Debido a que la velocidad de los motores se controla con una señal PWM cuyo intervalo en el microcontrolador está definido de 0 a 255, donde 0 corresponde a un ciclo de trabajo de 0% y 255 a un ciclo de trabajo del 100%, podría decirse que un valor de PWM de 255 corresponde a un suministro de voltaje nominal del motor (5.5v), por lo tanto sabiendo que la entrada escalón tiene una magnitud de 255 y el valor final de las respuestas es de aproximadamente 3v para acimut y 3.2v para el ángulo de elevación(ver gráficas de las figuras 3.36 y 3.37), se tiene

$$k_{acimut} = \frac{3}{255} = 0.01176 \quad 3.35$$

$$k_{elevación} = \frac{3.2}{255} = 0.01254 \quad 3.36$$

El siguiente paso consistió en hacer una aproximación de las curvas de las figuras 3.36 y 3.37 para apreciar con mayor claridad sus características y llevar a cabo el método gráfico adecuadamente. Las curvas de las figuras 3.38 y 3.39 muestran dichas aproximaciones, realizadas con la herramienta System Identification, del software MATLAB.

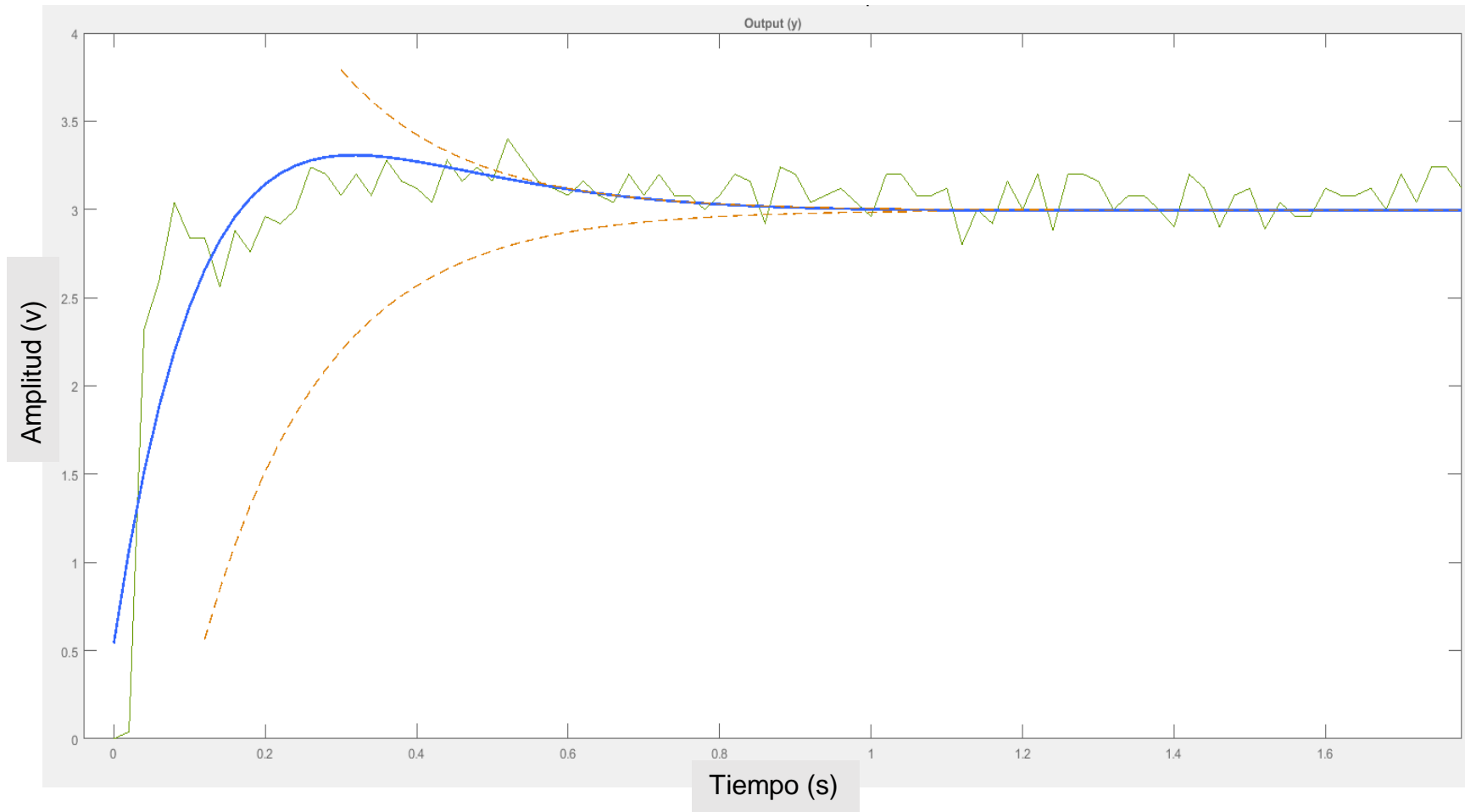


Figura 3.38. Aproximación de la curva de respuesta del sistema electromecánico correspondiente a la articulación de acimut, ante una entrada escalón.

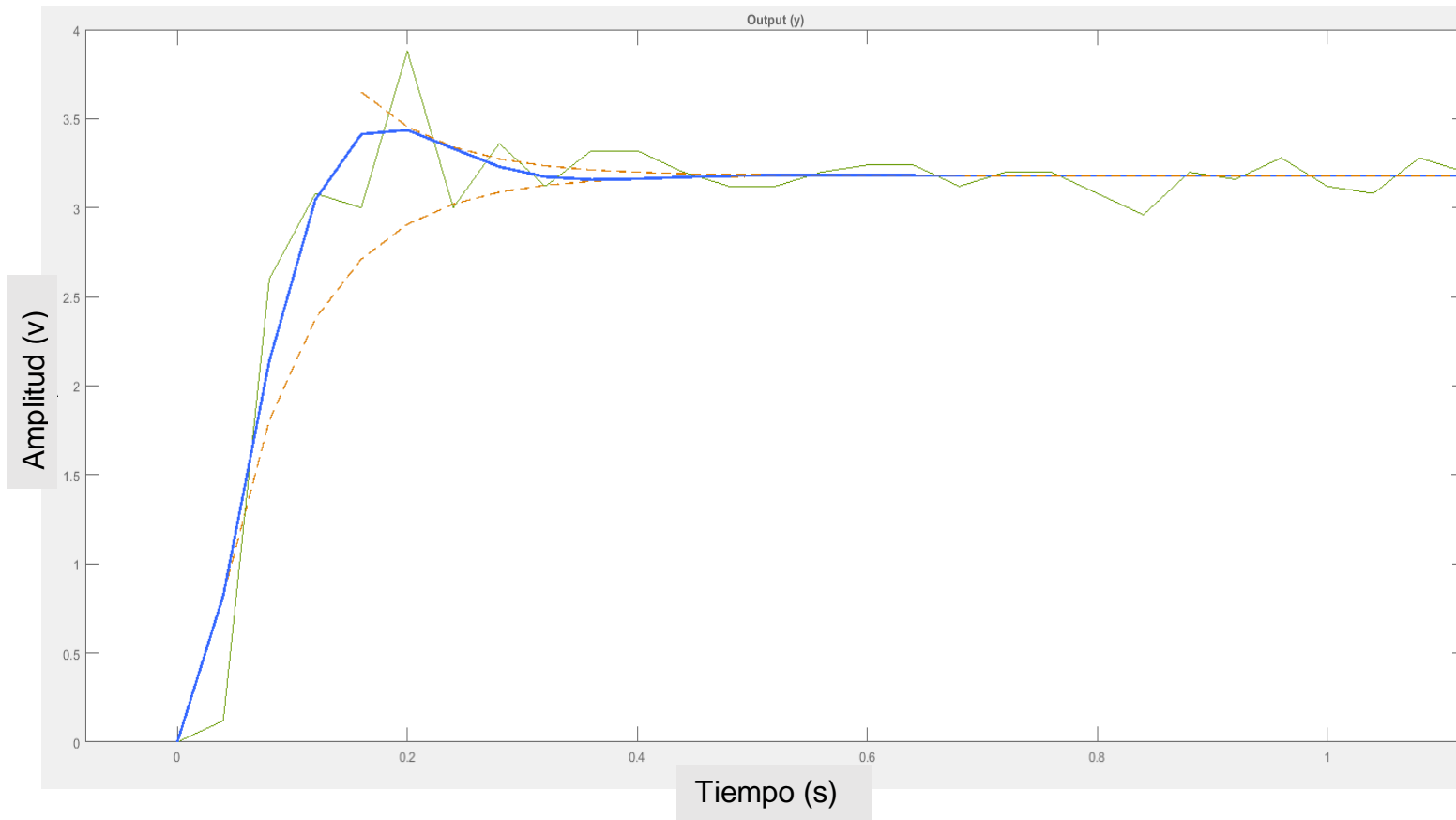


Figura 3.39. Aproximación de la curva de respuesta del sistema electromecánico correspondiente a la articulación de elevación, ante una entrada escalón.

Tomando en cuenta el proceso para la obtención de la frecuencia natural del sistema ω_n y el factor de amortiguamiento ζ documentado en el capítulo 2, es necesario calcular el porcentaje de sobretiro (%OS) que posee cada curva. Para ello es necesario el cálculo de los parámetros C_{max} y C_{final} y sustituirlos en la ecuación 2.41.

Para el caso de la figura 3.38, correspondiente al sistema en acimut, se consideró $C_{max} = 3.2v$, y $C_{final} = 3v$, por lo tanto

$$\%OS_{acimut} = \frac{3.2 - 3}{3} * 100 = 6.6 \quad 3.37$$

Para la curva de la figura 3.39, que corresponde al sistema en elevación, $C_{max} = 3.4$, y $C_{final} = 3.2$, por lo tanto

$$\%OS_{elevacion} = \frac{3.4 - 3.2}{3.2} * 100 = 6.2 \quad 3.38$$

Posteriormente, haciendo uso de la ecuación 2.42 es posible calcular el valor de ζ

$$\zeta_{acimut} = \frac{-\ln(6.6/100)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(6.6/100)}} = 0.65 \quad 3.39$$

$$\zeta_{elevacion} = \frac{-\ln(6.2/100)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(6.2/100)}} = 0.66 \quad 3.40$$

Y finalmente el valor de ω_n , haciendo uso de la ecuación 2.44, sabiendo que el valor de T_p corresponde al tiempo en el que C_{max} se lleva a cabo, que para el sistema de acimut se definió $T_p = 0.36s$ y para el sistema en elevación $T_p = 0.22s$. Por lo tanto

$$\omega_{n_{acimut}} = \frac{\pi}{0.36\sqrt{1 - 0.65^2}} = 11.48 \quad 3.41$$

$$\omega_{n_{acimut}} = \frac{\pi}{0.22\sqrt{1 - 0.66^2}} = 19 \quad 3.42$$

Y así, haciendo uso de la forma general de la función de transferencia de un sistema de segundo orden de la ecuación 3.34, se obtienen las funciones de transferencia para los sistemas de acimut y elevación respectivamente.

$$G(s)_{acimut} = \frac{1.54}{s^2 + 14.92s + 131.79} \quad 3.43$$

$$G(s)_{elevacion} = \frac{4.52}{s^2 + 25.08s + 361} \quad 3.44$$

Para corroborar los resultados, nuevamente se hizo uso de la aplicación System Identification de MATLAB, ya que dicha herramienta tiene la capacidad de calcular funciones de transferencia por medio de aproximaciones gráficas y posteriormente se realizó una comparativa de los resultados obtenidos mediante software y aquellos hallados teóricamente mostrada en la tabla 3.3.

Datos de software	Datos teóricos
$k_{acimut} = 0.01175$	$k_{acimut} = 0.01176$
$k_{elevacion} = 0.01247$	$k_{elevacion} = 0.01254$
$\omega_{nacimut} = 7.07106$	$\omega_{nacimut} = 11.48$
$\omega_{nelevacion} = 22.3606$	$\omega_{nelevacion} = 19$
$\zeta_{acimut} = 0.9$	$\zeta_{acimut} = 0.65$
$\zeta_{elevacion} = 0.612$	$\zeta_{elevacion} = 0.66$

Tabla 3.3. Comparativa de parámetros de las funciones de transferencia de los sistemas de acimut y elevación obtenidos mediante software y calculados de manera teórica.

Como se aprecia en la tabla 3.3, los valores obtenidos son bastante similares, y sus diferencias se deben a que ambos métodos (software y teórico) se basan en un análisis gráfico por lo que hacen uso de aproximaciones para la obtención de las variables deseadas.

Para la implementación futura de dichos datos, se tomarán como definitivos aquellos obtenidos mediante software, por lo que, nuevamente haciendo uso de la ecuación 3.34, las funciones de transferencia de los sistemas de acimut y elevación quedan definidas como

$$G(s)_{acimut\ software} = \frac{0.5875}{s^2 + 12.815s + 50} \quad 3.45$$

$$G(s)_{elevacion\ software} = \frac{6.235}{s^2 + 27s + 500} \quad 3.46$$

3.7. Implementación de controlador PID

En el capítulo 2 se explicaron las características de cada componente de un controlador PID (componentes proporcional, integral y derivativa) y los efectos que tiene cada una sobre la respuesta del sistema.

La elección del controlador PID y no un PI para el seguimiento solar se debe totalmente a que las ecuaciones de seguimiento solar están en función del tiempo por lo tanto las coordenadas de posicionamiento solar varían. Esto provoca variaciones en las posiciones deseadas del seguidor solar, que en consecuencia generan cambios en el error y la componente derivativa se encarga de mantener dicho error al mínimo corrigiéndolo con la misma velocidad con la que se produce.

3.7.1. Controlador PID en sistema de acimut

Para el cálculo de las ganancias se hizo uso de una aplicación del software MATLAB versión 2017 llamada PID Tuner. Esta herramienta realiza el cálculo de las ganancias basándose en la función de transferencia de la planta y el comportamiento que el diseñador desea para su sistema a través de una gráfica modificable por medio del cursor de la PC.

En la figura 3.40 se muestra la curva de la respuesta deseada del sistema de acimut ante una entrada escalón, como se puede ver, se requiere un comportamiento subamortiguado con un porcentaje de sobretiro pequeño, para este caso de 9% y una respuesta relativamente rápida, puesto que el seguimiento solar es lento.

Los valores de las ganancias calculadas por PID Tuner para la respuesta de la figura 3.40 fueron $k_p = 288$, $k_i = 1391$ y $k_d = 14.46$. Por lo que la función de transferencia del controlador PID para el sistema de acimut en tiempo continuo está dada por

$$C_{acimut}(s) = 288 + \frac{1391}{s} + 14.46s \quad 3.47$$

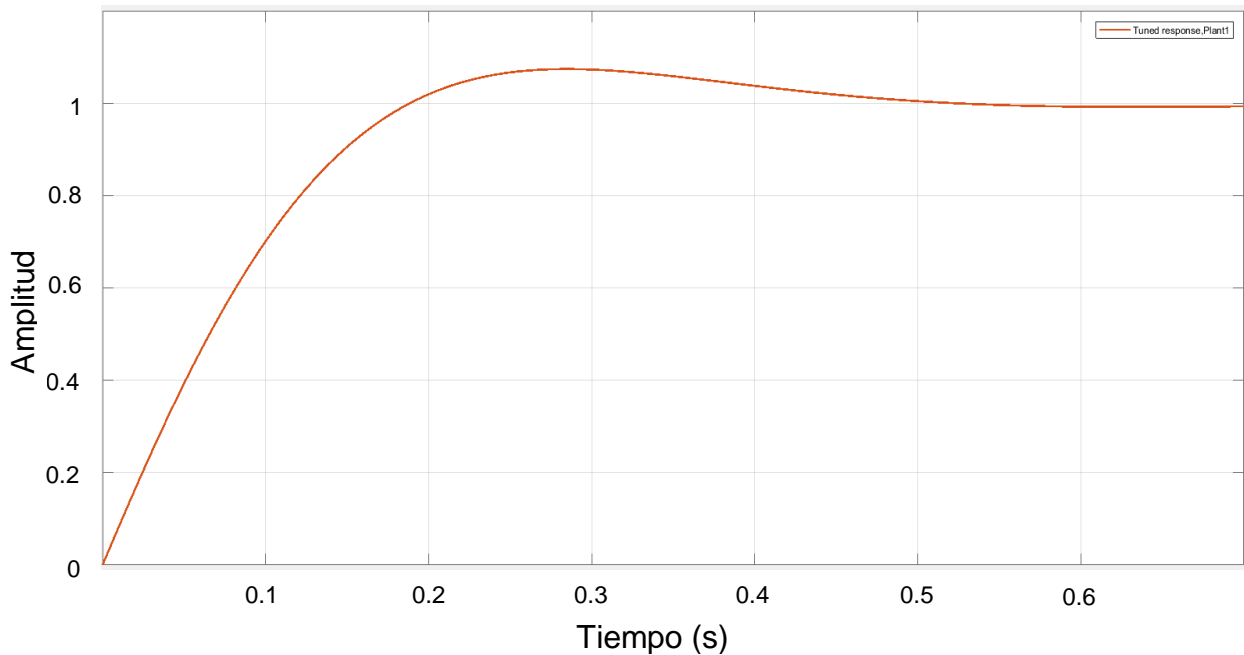


Figura 3.40. Gráfica de la respuesta deseada del sistema de acimut bajo un control de tipo PID para su posicionamiento.

El siguiente paso consiste en hallar la función de transferencia del controlador PID en tiempo discreto y obtener su respectiva ecuación de diferencias para su implementación en el microcontrolador. Para esto, es conveniente retomar la ecuación 2.48

$$C_{acimut}(z) = K_p + \frac{K_I}{1 - z^{-1}} + K_D(1 - z^{-1}) \quad 3.48$$

donde

$$K_p = K - \frac{KT}{2T_i} = K - \frac{K_I}{2} = \text{ganancia proporcional} \quad 3.49$$

$$K_I = \frac{KT}{T_i} = \text{ganancia integral} \quad 3.50$$

$$K_D = \frac{KT_d}{T} = \text{ganancia derivativa} \quad 3.51$$

y a su vez, donde K corresponde a la ganancia proporcional del controlador PID en tiempo continuo, es decir $K = k_p = 288$.

$T = 0.2$ s corresponde al periodo de muestreo del microcontrolador.

T_i es el tiempo integral, que corresponde al cociente de la ganancia proporcional entre la ganancia integral, en tiempo continuo. Es decir $T_i = \frac{k_p}{k_i} = \frac{288}{1391} = 0.207$.

T_d , el tiempo derivativo que es igual al cociente de la ganancia derivativa entre la ganancia proporcional del controlador en tiempo continuo. Es decir $T_d = \frac{k_d}{k_p} = \frac{14.46}{288} = 0.05$.

Por lo tanto, sustituyendo los valores en las ecuaciones 3.49, 3.50 y 3.51 se tiene

$$K_p = 288 - \frac{288(0.2)}{2(207)} = 148.86 \quad 3.52$$

$$K_i = \frac{288(0.2)}{0.207} = 278.26 \quad 3.53$$

$$K_D = \frac{288(0.05)}{0.2} = 72 \quad 3.54$$

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación 3.48, la función de transferencia del sistema en acimut en tiempo discreto está dada por

$$C_{acimut}(z) = 148.86 + \frac{278.26}{1 - z^{-1}} + 72(1 - z^{-1}) \quad 3.55$$

Posteriormente se procede a desarrollar la ecuación anterior para obtener la ecuación de diferencias

$$C_{acimut}(z) = \frac{148.86(1 - z^{-1}) + 278.26 + 72(1 - z^{-1})^2}{1 - z^{-1}} \quad 3.56$$

La ecuación de diferencias devuelve como resultado el valor de la señal PWM que se aplicará a los motores, dicha señal corresponde al producto de la señal de error y el controlador PID, por lo tanto

$$PWM_{acimut}(z) = C_{acimut}(z)E_{acimut}(z) \quad 3.57$$

$$PWM_{acimut}(z) = \frac{148.86(1 - z^{-1}) + 278.26 + 72(1 - z^{-1})^2}{1 - z^{-1}} E_{acimut}(z) \quad 3.58$$

$$PWM_{acimut}(z)(1 - z^{-1}) = [499.12 - 292.86z^{-1} + 72z^{-2}]E_{acimut}(z) \quad 3.59$$

$$\begin{aligned} PWM_{acimut}(z) - PWM_{acimut}(z)z^{-1} \\ = 499.12E(z) - 292.86E(z)z^{-1} + 72E(z)z^{-2} \end{aligned} \quad 3.60$$

$$\begin{aligned} PWM_{acimut}(z) \\ = PWM_{acimut}(z)z^{-1} + 499.12E(z) - 292.86E(z)z^{-1} \\ + 72E(z)z^{-2} \end{aligned} \quad 3.61$$

por lo tanto, la ecuación de diferencias queda dada por

$$\begin{aligned} pwm_{acimut_k} = pwm_{acimut_{k-1}} + 499.12e_{acimut_k} - 292.86e_{acimut_{k-1}} \\ + 72e_{acimut_{k-2}} \end{aligned} \quad 3.62$$

donde pwm_{acimut_k} corresponde a la señal PWM actual, $pwm_{acimut_{k-1}}$ la señal PWM anterior, $e_{acimut_{k-2}}$ el valor de la señal de error de dos periodos de muestreo atrás, $e_{acimut_{k-1}}$ el valor del error anterior y e_{acimut_k} el valor del error actual.

3.7.2. Controlador PID en sistema de elevación

Siguiendo el procedimiento anterior, el comportamiento deseado de la respuesta del subsistema de elevación ante la implementación de un control PID para posicionamiento del seguidor solar se muestra en la figura 3.41.

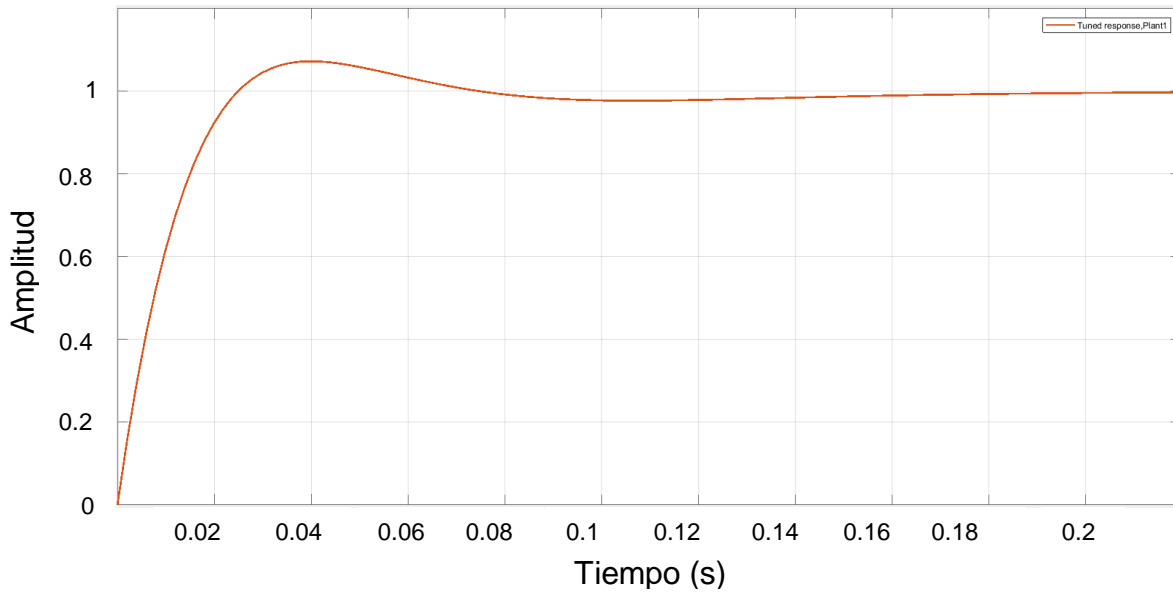


Figura 3.41. Gráfica de la respuesta deseada del sistema de elevación bajo un control de tipo PID para posicionamiento.

Al igual que en acimut, se desea un comportamiento subamortiguado con un sobretiro muy pequeño. Los valores de las ganancias calculadas por PID Tuner fueron $k_p = 694.2$ y $k_i = 9010$, y $k_d = 13.37$ por lo tanto la función de transferencia del controlador PI para posicionamiento del robot en tiempo continuo está dada por

$$C_{elevación}(s) = 694.2 + \frac{9010}{s} + 13.37s \quad 3.63$$

Calculando T_i y T_d

$$T_i = \frac{k_p}{k_i} = \frac{694.2}{9010} = 0.077 \quad 3.64$$

$$T_d = \frac{k_d}{k_p} = \frac{13.37}{694.2} = 0.019 \quad 3.65$$

Retomando las ecuaciones 3.49, 3.50 y 3.51 para calcular las ganancias del controlador PID en tiempo discreto y tomando el tiempo de muestreo en 0.2s, se tiene

$$K_P = K - \frac{KT}{2T_i} = 694.2 - \frac{694.2(0.2)}{2 * 0.077} = -207.35 \quad 3.66$$

$$K_I = \frac{KT}{T_i} = \frac{694.2(0.2)}{0.077} = 1803.11 \quad 3.67$$

$$K_D = \frac{KT_d}{T} = \frac{694.2(0.019)}{0.2} = 65.95 \quad 3.68$$

Por lo tanto, la función de transferencia del controlador PID para el sistema de elevación, basándose en la ecuación 2.48, es la siguiente:

$$C_{elevación}(z) = -207.35 + \frac{1803.11}{1 - z^{-1}} + 65.35(1 - z^{-1}) \quad 3.69$$

Continuando con el cálculo de la ecuación de diferencias, se tiene que

$$PWM_{elevación}(z) = \left[-207.35 + \frac{1803.11}{1 - z^{-1}} + 65.35(1 - z^{-1}) \right] E_{elevación}(z) \quad 3.70$$

donde $PWM_{elevación}(z)$ corresponde a la señal PWM que se aplicará al motor en cuestión y $E_{elevación}(z)$ es la señal de error.

Desarrollando la ecuación 3.70

$$\begin{aligned} PWM_{elevación}(z)(1 - z^{-1}) \\ = [-207.35(1 - z^{-1}) + 1803.11 \\ + 65.35(1 - z^{-1})^2] E_{elevación}(z) \end{aligned} \quad 3.71$$

$$\begin{aligned} PWM_{elevación}(z) - PWM_{elevación}(z)z^{-1} \\ = [1661.11 - 76.65z^{-1} + 65.35z^{-2}] E_{elevación}(z) \end{aligned} \quad 3.72$$

$$\begin{aligned} PWM_{elevación}(z) \\ = PWM_{elevación}(z)z^{-1} + 1661.11E_{elevación}(z) \\ - 76.65E_{elevación}(z)z^{-1} + 65.35E_{elevación}(z)z^{-2} \end{aligned} \quad 3.73$$

Por lo tanto, la ecuación de diferencias está dada por:

$$\begin{aligned} pwm_{elevación_k} = pwm_{elevación_{k-1}} + 1661.11e_{elevación_k} - 76.65e_{elevación_{k-1}} \\ + 65.35e_{elevación_{k-2}} \end{aligned} \quad 3.74$$

donde $pwm_{elevación_k}$ es la señal de salida PWM, $pwm_{elevación_{k-1}}$ es la misma señal pero en el estado anterior, $e_{elevación_{k-2}}$ la señal de error medida dos periodos de muestreo atrás, $e_{elevación_{k-1}}$ la señal de error en un periodo de muestreo anterior y $e_{elevación_k}$ que corresponde a la señal de error en el estado actual.

En conclusión, el controlador PID, junto con el cálculo de las funciones de transferencia del sistema, forman una herramienta esencial para la inclusión de variables dinámicas al análisis llevado a cabo. Dicha inclusión es necesaria pues la exactitud de posicionamiento está en función de dichas variables, por ejemplo, las inercias producidas por el propio motor y los eslabones del sistema, además de las fricciones del motor y los rodamientos acoplados en las articulaciones.

3.8. Implementación de control de seguimiento de trayectoria solar.

En la figura 3.42 se muestra el esquema general del sistema de seguimiento solar, como se puede apreciar se hará uso de un microcontrolador Arduino Mega 2560 como controlador principal, es decir, que éste tendrá en su código de programación el control de trayectorias Resolved Motion Rate Control, así como las ecuaciones para el seguimiento solar, además de recibir y enviar señales a los periféricos mostrados en la imagen, para el correcto posicionamiento del dispositivo y el monitoreo de sus parámetros.

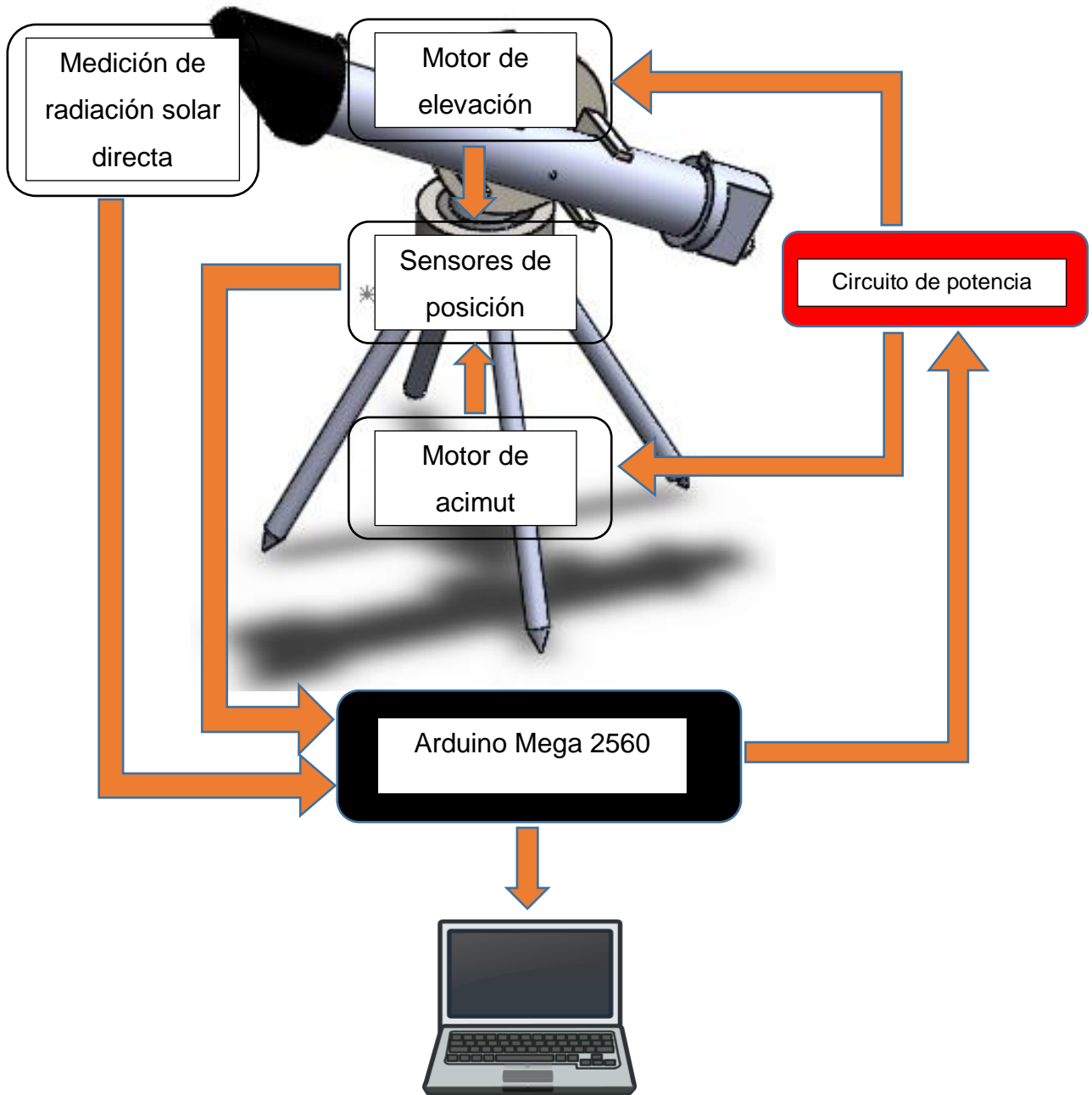


Figura 3.42. Esquema general del sistema de seguimiento solar.

EL Arduino Mega 2560 está basado en el microcontrolador ATMEGA 2560 el cual es un dispositivo de bajo poder que para la mayoría de las aplicaciones orientadas a la robótica no tendría un desempeño muy bueno debido a sus recursos limitados. Pero para este caso específico es de utilidad debido a que el seguimiento solar ocurre muy lentamente, por lo que el procesamiento de toda la información para

llevar a cabo el posicionamiento del robot y el seguimiento, no se lleva a cabo en tiempos muy cortos.

Otro aspecto para considerar en la elección del microcontrolador fueron sus periféricos, ya que éste posee 6 pines de interrupciones, de los cuales 4 son usados para el conteo de pulsos de los codificadores de los motores para el cálculo de la posición angular real del robot y los 2 restantes para la comunicación con un acelerómetro y magnetómetro necesarios para el posicionamiento inicial del seguidor solar.

Como se puede apreciar en el modelo cinemático del sistema y su aplicación en el control de trayectorias Resolved Motion Rate Control, todo el proceso es de carácter muy robusto, ya que son demasiadas operaciones que se deben resolver, pero es de importancia mencionar que todo el procedimiento para el hallazgo del modelo cinemático solo se realiza una vez, por lo que la aplicación de éste en el control de trayectorias solo requiere de los vectores de cinemática directa y diferencial previamente calculados, por lo que su implementación en el microcontrolador no requiere gran cantidad de memoria.

3.8.1. Posicionamiento inicial del seguidor solar

Previamente se explicó en el análisis de las ecuaciones de seguimiento solar que la posición inicial del robot en la cual los valores de los ángulos de acimut y elevación son 0° , sucede cuando el pirheliómetro se encuentra apuntando al norte geográfico y posee una inclinación de 0° respecto a la horizontal. Para ello se implementó el sensor minIMU 9-v5, basado en un magnetómetro y un acelerómetro que como ya se explicó en el capítulo 2, el primero funciona como una brújula digital, mientras que el segundo puede medir la aceleración de la gravedad, útil para calcular la inclinación.

Dicho sensor se acopló al sistema para realizar únicamente el posicionamiento autónomo en las coordenadas iniciales a las que se les dará el nombre de “posición de casa”, para futuras menciones. Y posteriormente usar los codificadores de

cuadratura previamente mencionados como sensores de posición para realizar el seguimiento solar.

El dato obtenido del magnetómetro corresponde al norte magnético, por lo tanto, es necesario conocer la variación angular que tiene este respecto al norte geográfico. A dicha variación se le conoce como declinación magnética.

La declinación magnética es un concepto importante, necesario para la navegación. Una brújula apunta en paralelo a las líneas del campo magnético terrestre, que se pueden apreciar en la figura 3.43. Si dicha brújula está apuntando a la derecha del norte verdadero, la declinación es positiva, en caso contrario si apunta a la izquierda del norte verdadero, se le llama declinación negativa.

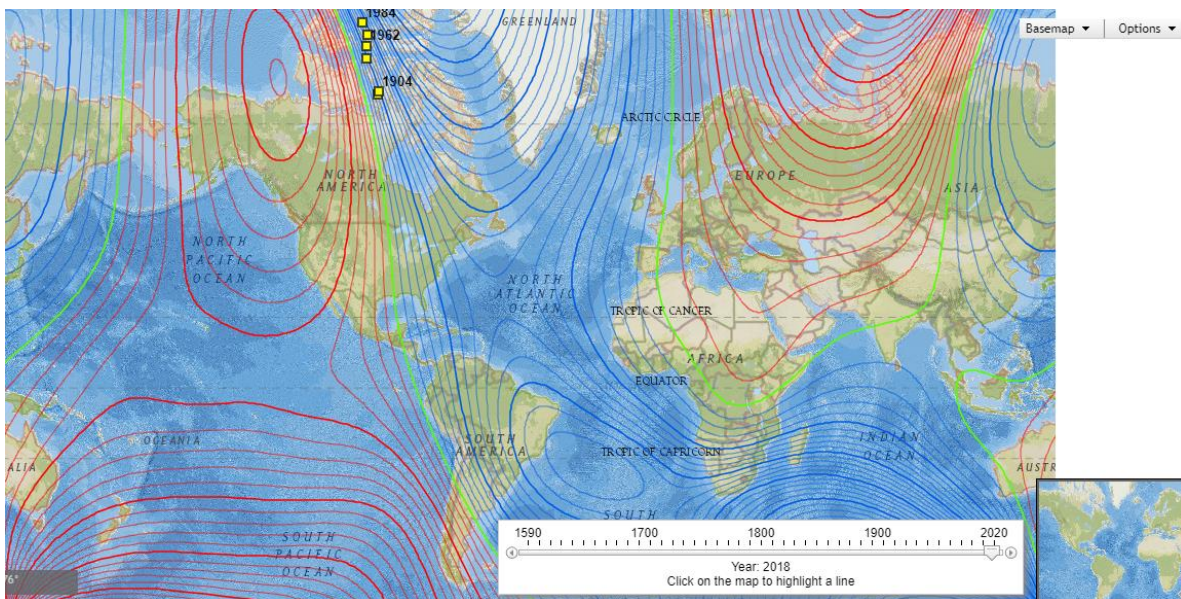


Figura 3.43. Líneas del campo magnético terrestre en el año 2018 a lo largo del planeta [21].

Conforme el campo magnético terrestre varía a lo largo del tiempo, las posiciones de los polos norte y sur magnéticos gradualmente cambian. Por lo tanto, la declinación magnética en una determinada locación también cambia a lo largo del tiempo [21].

Para el cálculo de la declinación magnética en el área de la ciudad de Puebla, se visitó el sitio web de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por

sus siglas en inglés) y ubicando la locación deseada, el sitio web devuelve el valor de la declinación magnética para el área específica, tal y como se muestra en la figura 3.44. Para la ciudad de Puebla, la declinación magnética en el año 2018 es negativa con un valor de 4°.

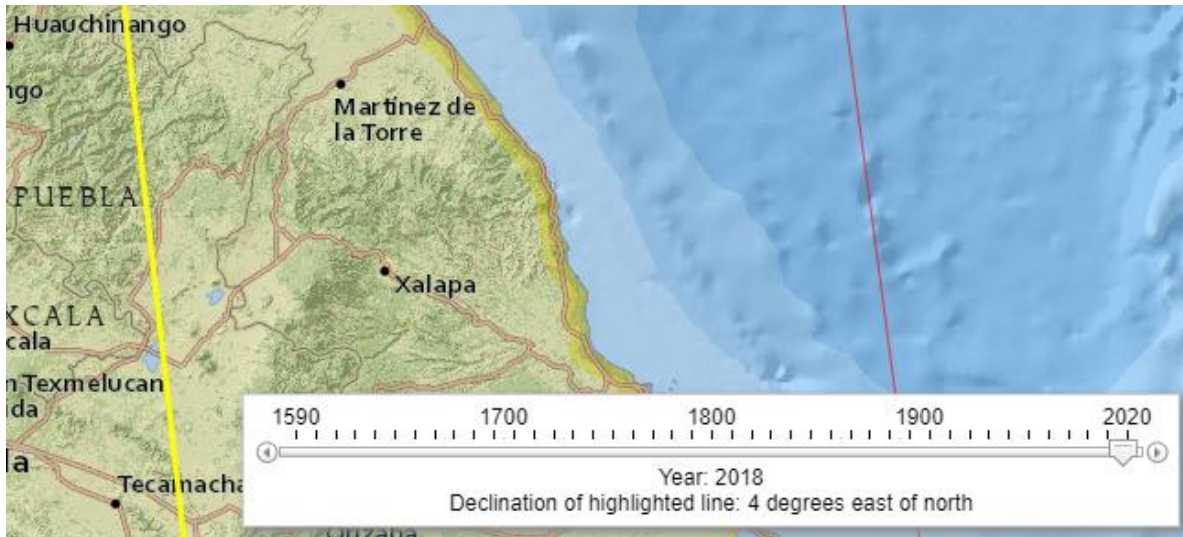


Figura 3.44. Consulta de la declinación magnética en el sitio web de la Agencia Nacional Oceanográfica y Atmosférica (NOAA).

3.8.2. Medición de radiación solar directa

El pirheliómetro usado es el modelo CH1 de la marca Kipp&Zonnen, el cual tiene una sensibilidad de $10 \mu\text{V} \times \text{watt}/\text{m}^2$. Como se puede analizar, los valores de voltaje que el dispositivo brinda como salida para su medición son muy pequeños, por lo que es necesaria la implementación de un circuito de instrumentación para acondicionar dicha señal y ser medida adecuadamente. Dicho circuito consiste en un amplificador de instrumentación que amplificará la señal en función de la ganancia con la que se diseñe, conectado en serie con un filtro pasa bajas para evitar la presencia de señales parásitas que puedan provocar mediciones de radiación erróneas. Dicho circuito se muestra en la figura 3.45.

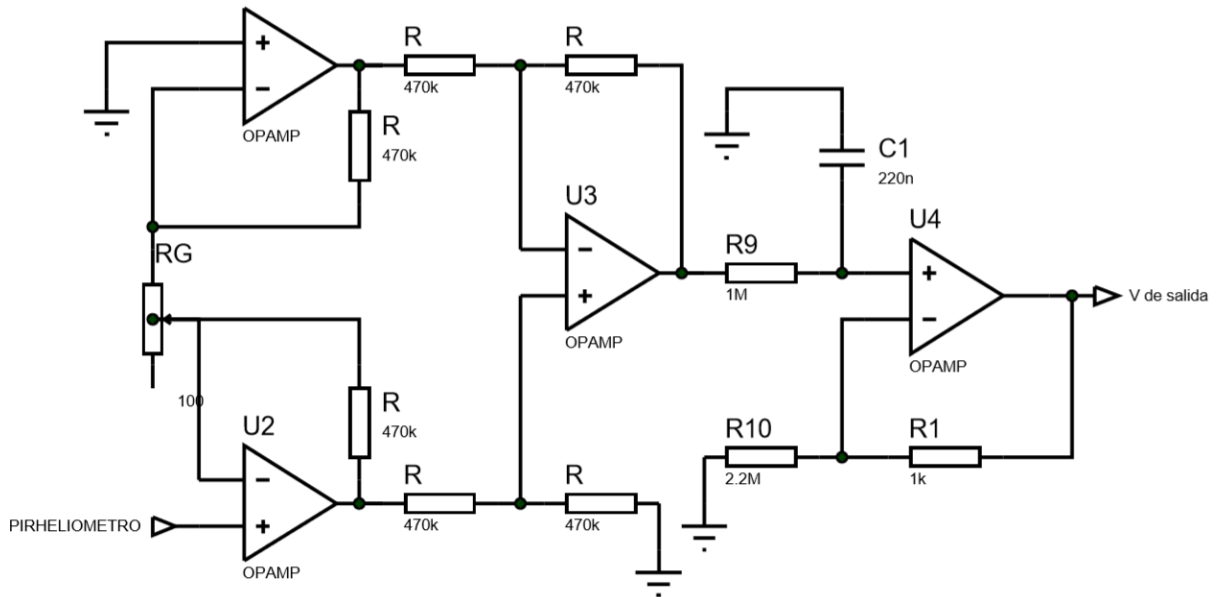


Figura 3.45. Circuito de acondicionamiento de señal del pirheliómetro.

Para el diseño del circuito de la figura 3.45 se partió primeramente por decidir el valor de la ganancia del amplificador de instrumentación, para ello se consideró que el valor límite de voltaje del convertidor analógico-digital del microcontrolador es de 5v, por lo tanto el rango de medición es 0v – 5v, pero para no manejar mediciones en el límite, el rango de medición de radiación se definió de 0v – 4.5v. Tomando como medida límite de radiación 1500 watts/m² para un día totalmente despejado con una incidencia de radiación solar directa alta y la sensibilidad del pirheliómetro en 10 μV / watt/m², se hizo la siguiente relación

$$10 \frac{\mu v}{\text{watt}/m^2} * \frac{1500 \text{ watt}}{m^2} = 15000 \mu v = 0.015 v \quad 3.75$$

Lo anterior quiere decir que en una medición de 1500 watt/m², a la salida del pirheliómetro existe un voltaje de 0.015v, que sería el valor límite de medición establecido y el cual se requiere amplificar al valor de 4.5v que corresponde al límite establecido para su lectura en el microcontrolador, dicho calculo consiste en la siguiente expresión:

$$V_{ADC} = k * V_{pirheliometro} \quad 3.76$$

$$4.5v = k * 0.015v \quad 3.77$$

donde V_{ADC} es el voltaje amplificado para su respectiva medición en el microcontrolador, k es el valor de ganancia del amplificador de instrumentación que se desea calcular y $V_{pirheliometro}$ el voltaje a la salida del pirheliómetro. Por lo tanto

$$k = \frac{4.5v}{0.0105v} = 300 \quad 3.78$$

Conociendo el valor de la ganancia deseada del amplificador, el siguiente paso es realizar el cálculo de las resistencias eléctricas para asegurar dicha ganancia. Para simplificar los cálculos se definió el mismo valor de las resistencias R mostradas en la figura 3.45, haciendo un análisis del circuito, la ganancia del amplificador está dada por la siguiente ecuación

$$k = 1 + \frac{2R}{R_g} = 300 \quad 3.79$$

donde R_g corresponde a una resistencia variable para determinar el valor de k . sustituyendo el valor de R usado en la figura 3.59 y despejando R_g , se tiene

$$R_g = \frac{2R}{k - 1} = \frac{2(470k\Omega)}{300 - 1} = \frac{940k\Omega}{299} = 3.143k\Omega \quad 3.80$$

Por lo tanto, es necesario implementar una resistencia con valor de 3.143 kΩ en el amplificador de instrumentación. Debido a que no existe comercialmente, se optó por el uso de un potenciómetro de precisión ajustado en ese valor.

Para el cálculo de los componentes de filtro pasabajas, la señal que se está digitalizando no es de alta frecuencia por lo que se definió una frecuencia de corte de 0.7 Hz. Para calcular la frecuencia de corte, Vivaldo [22] documenta el siguiente proceso:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_9 C_1} \quad 3.81$$

donde f_0 corresponde a la frecuencia de corte del filtro, R_9 y C_1 los valores de resistencia y capacitor mostrados en la figura 3.59.

Si $f_0 = 0.7 \text{ Hz}$ y se propone $C_1 = 220 \text{ nF}$ entonces

$$R_9 = \frac{1}{2\pi f_0 C_1} = \frac{1}{2\pi(0.7\text{Hz})(220\text{nF})} = 1.03 \text{ M}\Omega \quad 3.82$$

Y como no se requiere de ganancia en corriente directa, debido a que ya se contempló en el amplificador de instrumentación, se definió $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ y $R_{10} = 2.2 \text{ M}\Omega$ por lo tanto

$$k_{filtro} = 1 + \frac{R_1}{R_{10}} = 1 + \frac{1 \text{ k}\Omega}{2.2 \text{ M}\Omega} = 1.0004 \quad 3.83$$

Capítulo 4 Pruebas y resultados

Las pruebas consistieron en la realización de mediciones de radiación solar directa haciendo un continuo monitoreo del sistema para la observación de su funcionamiento y de esta manera poder realizar las modificaciones pertinentes para la mejora de su desempeño.

Cabe mencionar que las pruebas se llevaron a cabo en el periodo de noviembre de 2018 a febrero de 2019, pero también se hicieron trayectorias simulando días de primavera, verano y otoño para conocer su comportamiento en todos los casos posibles.



Figura 4.1. Pruebas de medición de radiación solar directa.

4.1. Caracterización de actuadores eléctricos

La caracterización es muy importante para conocer parámetros necesarios en el control del motor, así como conocer su desempeño y los límites de operación. Estas herramientas permiten hacer un diagnóstico sobre la elección del motor, determinando si es adecuado o es necesario incorporar otra opción.

Para esta aplicación se propuso el uso 2 motorreductores de corriente directa marca POLOLU con decodificador incremental de cuadratura integrado, la información del fabricante es la siguiente:

- Voltaje nominal: 6v
- Relación del reductor: 171.79:1
- Velocidad: 34 RPM
- Torque máximo: 1.42 Nm
- Corriente nominal: 250 mA
- Corriente máxima: 2.4 A
- Decodificador: 48 CPR (2 canales de 12 líneas cada uno)

Es necesario realizar la caracterización de cada motor, independientemente de que ambos sean de la misma marca y el mismo modelo, pues esto no garantiza que los parámetros obtenidos para cada motor sean coincidentes. Los objetivos de la caracterización consisten en la obtención del voltaje y corriente nominal, torque máximo y la frecuencia de trabajo óptima de operación para control por modulación de ancho de pulso (PWM), todo ello de manera experimental y comparar los resultados obtenidos con los que brinda el fabricante.

4.1.1. Motorreductor en acimut

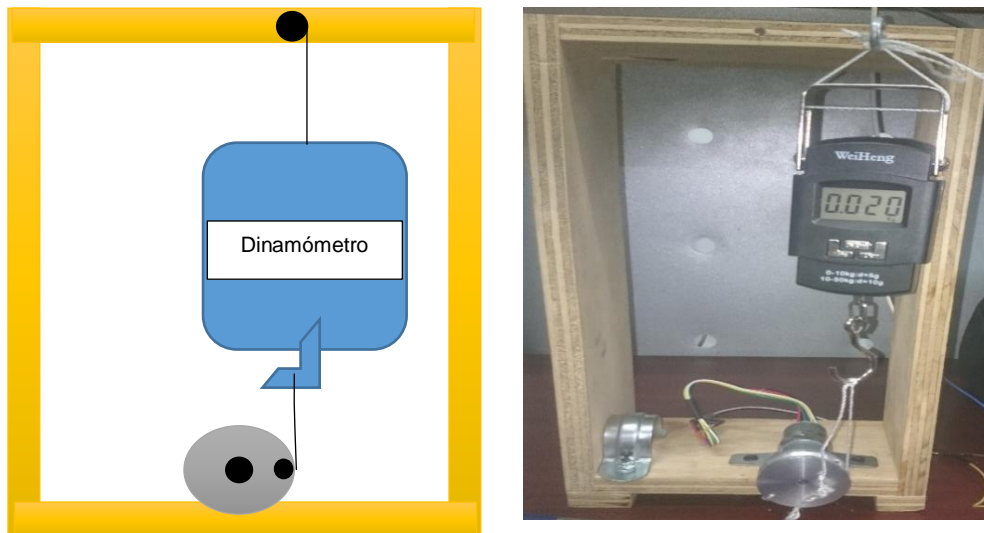


Figura 4.2. Estructura usada para caracterización de los motores.

Primeramente, se acopló el motor al sistema de la figura 4.2 que consiste en una estructura de madera con un sujetador del motor en la base inferior y un dinamómetro suspendido por correas sujetado de la parte superior de la madera y de la parte inferior a una polea de radio de 2cm acoplada al eje del motor.

Se realizaron mediciones de torque de paro y corriente del motor, aplicándole distintos voltajes en un rango de 0.5v a 7v en intervalos de 0.5v, para posteriormente calcular la eficiencia en cada caso, haciendo uso de la ecuación siguiente:

$$n = \frac{\tau}{V * A} \quad 4.1$$

donde τ representa el torque del motor, V el voltaje y A la corriente

V	I(A)	τ (Nm)	n
0.5	0.13	0.028439	0.437527
1	0.24	0.079434	0.330974
1.5	0.37	0.16181	0.291549

2	0.46	0.223592	0.243034
2.5	0.6	0.290277	0.193518
3	0.71	0.335387	0.157459
3.5	0.83	0.395208	0.136044
4	0.97	0.451106	0.116264
4.5	1.09	0.539366	0.109962
5	1.18	0.568786	0.096404
5.5	1.26	0.67862	0.097925
6	1.43	0.755112	0.088008
6.5	1.74	0.787474	0.069626
7	1.66	0.810029	0.06971

Tabla 4.1. Datos de caracterización de corriente, torque y eficiencia.

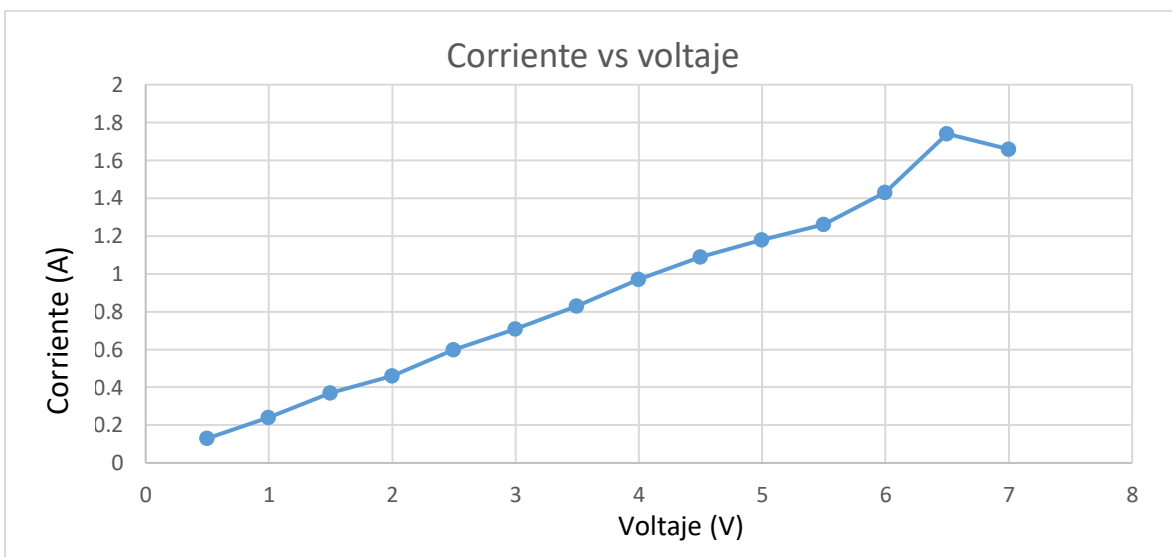


Figura 4.3. Gráfico de voltaje contra corriente.

Como se puede apreciar en la figura 4.3, el comportamiento de la corriente del motor en voltajes inferiores a 6.5v es de naturaleza lineal, el suministro de voltaje en la aplicación de este motor no debe exceder dicho valor para asegurar un desempeño óptimo.

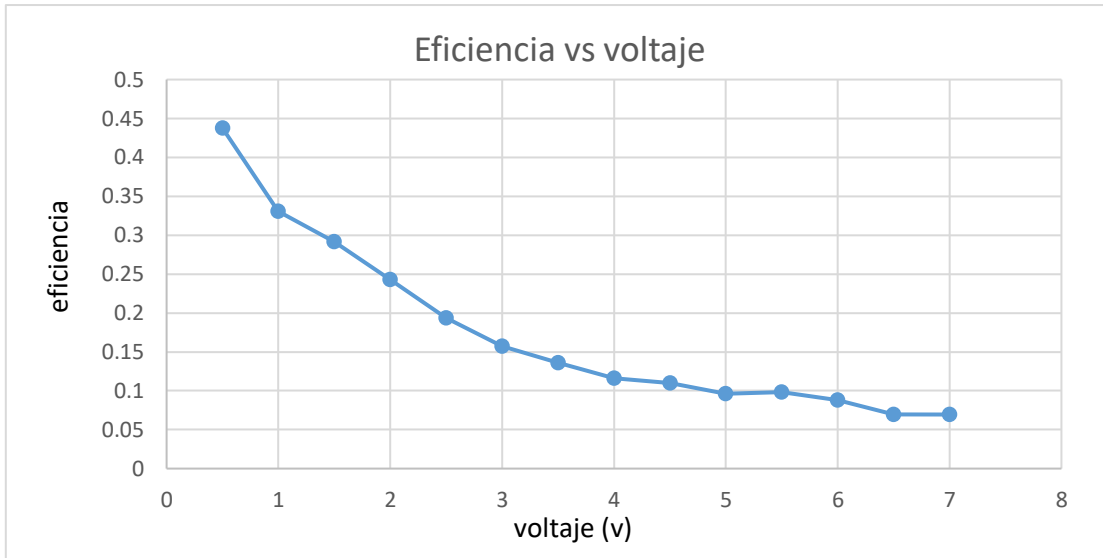


Figura 4.4. Gráfico de voltaje vs eficiencia.

Los datos de la eficiencia, son necesarios para conocer el parámetro de voltaje nominal del motor, en la figura 4.4 se presenta la gráfica de la eficiencia a distintos valores de voltaje; se puede observar que dicha variable decae conforme se incrementa la tensión, pero cabe mencionar que para el valor de voltaje de 5.5 v, el comportamiento de la curva es parecido a una línea horizontal y si se observa el valor correspondiente en la tabla 4.1, existe un pequeño incremento respecto al valor anterior, lo que implica la existencia de un pico en la gráfica. Este fenómeno ocurre en todos los motores eléctricos y el valor de voltaje donde se presenta corresponde al voltaje nominal, pues a pesar de la naturaleza decreciente de la eficiencia, en este punto hay un incremento drástico para posteriormente decaer a un ritmo mayor.

El siguiente paso consiste en la obtención del valor de frecuencia nominal. Debido a que el motorreductor se controlará con una señal PWM, es necesario conocer que

frecuencia es la adecuada para dicho tren de pulsos. El que cierta frecuencia sea la adecuada implica que, en dicho valor, el torque del motor posea un comportamiento lineal. La figura 4.5 muestra una gráfica de voltaje contra torque, se puede apreciar que para el valor de voltaje nominal en 5.5v se tiene un torque de 0.67 Nm, el siguiente paso es aplicar una señal PWM a distintas frecuencias con un ciclo de trabajo de 50% hasta hallar la frecuencia óptima, es decir, el valor de frecuencia en el cual se debe obtener un valor de torque igual a la mitad del que se tiene en el voltaje nominal, es decir 0.33 Nm, para asegurar la linealidad del torque del motorreductor.

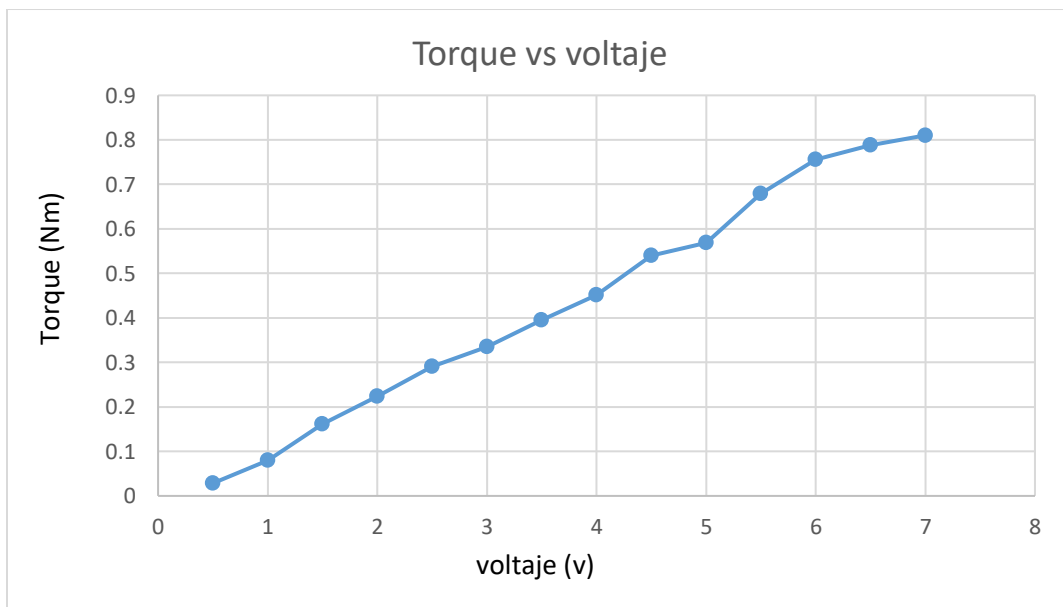


Figura 4.5. Gráfico de voltaje contra torque.

Partiendo del supuesto anterior, se aplicó una señal PWM al motor con un ciclo de trabajo al 50%, a un voltaje de 5.5v (voltaje nominal) y se hizo un barrido en el valor de la frecuencia, monitoreando el dinamómetro hasta encontrar el valor de torque en 0.33 Nm. Para la aplicación del PWM al motor, se montó un circuito con un transistor TIP122 en configuración de emisor común como se muestra en la figura 4.6. Donde V_{CC} es la señal PWM con valor de 5v, $V_{DD} = 5.5V$, $R_B = 330 \Omega$.

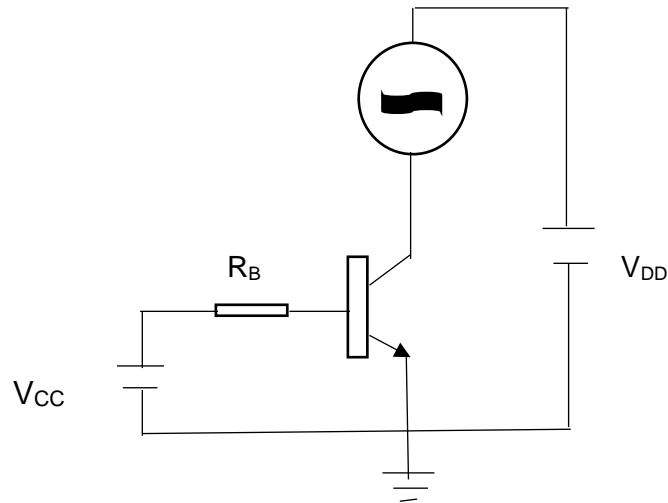


Figura 4.6. Circuito con transistor en configuración emisor común.

El valor de la resistencia de base R_B se calculó de manera que el transistor se encuentre en saturación cuando la señal $V_{CC} = 5v$ y en corte cuando ésta sea cero, pues se requiere que el circuito se comporte como un interruptor, controlado por la señal en V_{CC} . Sabiendo que el voltaje colector-emisor de un transistor en saturación es $0v$, se realizó el siguiente análisis:

$$V_{DD} = 5.5v = R_M I_C \quad 4.2$$

donde $R_M = 90 \Omega$ es la resistencia del motor que se obtuvo mediante la medición con multímetro, e I_C la corriente en el colector. Por lo tanto

$$I_C = \frac{5.5v}{90\Omega} = 0.06 A \quad 4.3$$

La hoja de datos del fabricante del transistor indica que éste posee una $\beta=1000$, este parámetro corresponde a una relación de ganancias entre las corrientes de base y de colector, dada por la siguiente ecuación:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \quad 4.4$$

donde I_B corresponde a la corriente de base del transistor. Por lo tanto

$$I_B = \frac{0.06 \text{ A}}{1000} = 0.06 \text{ mA} \quad 4.5$$

Lo anterior quiere decir que 0.06 mA es el valor mínimo requerido en la corriente de base para que el transistor entre en saturación. Sabiendo esto, es posible hacer el cálculo de la resistencia de base R_B analizando la malla correspondiente.

$$V_{CC} = 5 \text{ v} = I_B R_B + 0.7 \text{ v} \quad 4.6$$

donde el valor de 0.7 v corresponde a la caída de tensión entre la base y el emisor del transistor. Desarrollando la ecuación 4.6 se tiene lo siguiente:

$$I_B R_B = 4.3 \text{ v} \quad 4.7$$

$$R_B = \frac{4.3 \text{ v}}{I_B} = \frac{4.3 \text{ v}}{0.00006 \text{ A}} = 71666.6 \Omega \quad 4.8$$

por lo tanto, el valor de R_B para saturar el transistor debe ser igual o menor a 71.666 k Ω . Por cuestiones prácticas se consideró $R_B = 330 \Omega$.

Entonces, implementando el circuito de la figura 4.6 y aplicando barrido de frecuencia en la señal PWM bajo las condiciones previamente establecidas, se obtuvo una frecuencia óptima de operación de 110 Hz. En la tabla 4.2 se registraron los valores de torque y corriente en el motor para un barrido en el ciclo de trabajo de la señal PWM a la frecuencia nominal previamente obtenida.

En la figura 4.7 se puede apreciar la gráfica de ciclo de trabajo contra corriente y en la figura 4.8 una gráfica de ciclo de trabajo contra torque, ambas correspondientes

a los datos de la tabla 4.2. Se puede concluir que la frecuencia seleccionada para la señal PWM del motor es la óptima ya que los datos de las mediciones obtenidas tienen un comportamiento lineal en ambas gráficas y de esta manera se puede asegurar que, bajo el valor de voltaje y frecuencia suministrados a la señal de control, se está obteniendo la máxima eficiencia posible del actuador en términos de consumo de corriente y el torque que brinda.

Ciclo de trabajo %	I(A)	τ(Nm)
10	0.04	0.02
20	0.11	0.27
30	0.21	0.61
40	0.28	0.87
50	0.37	1.13
60	0.45	1.47
70	0.55	1.69
80	0.64	1.88

Tabla 4.2. Datos de corriente y torque aplicando un barrido en el ciclo de trabajo de la señal PWM a una frecuencia de 110Hz.

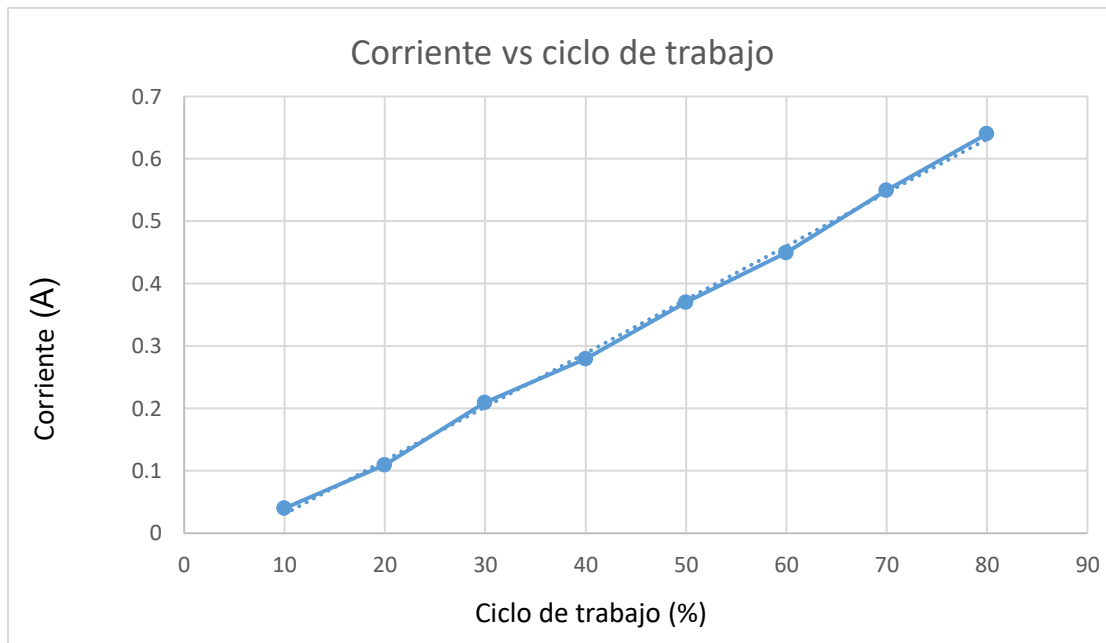


Figura 4.7. Gráfico de valores de ciclo de trabajo contra corriente.

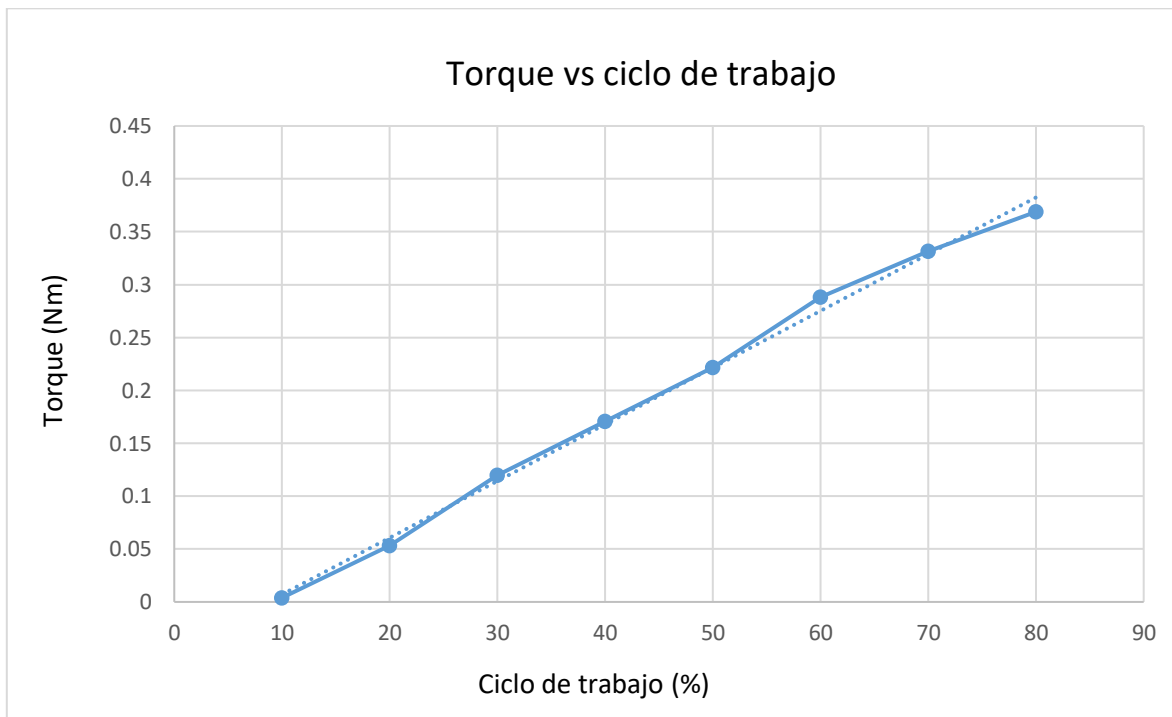


Figura 4.8. Gráfico de valores de ciclo de trabajo contra torque.

El paso final consiste en hallar de manera experimental la velocidad máxima de operación, para ello se suministró el voltaje nominal al motor y se graficaron las señales del codificador en un osciloscopio.

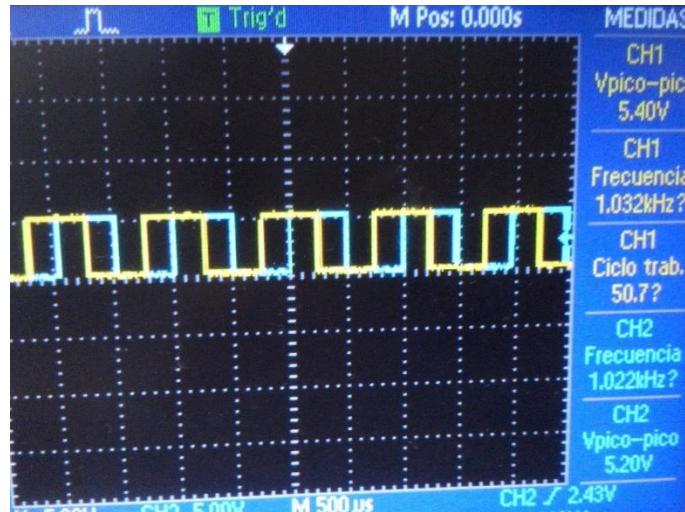


Figura 4.9. Señales del codificador del motor visualizadas en un osciloscopio.

En la figura 4.9 se puede apreciar las señales correspondientes a los 2 canales del codificador desfasadas 90° una respecto a otra, también se puede observar que la frecuencia de cada señal es de 1.02 kHz, de este supuesto, es posible calcular el periodo de una señal de la siguiente manera:

$$T = \frac{1}{F_C} = \frac{1}{1.02 \text{ kHz}} = 0.00098 \text{ s} \quad 4.9$$

donde T es el periodo de la señal de la figura 4.9 y F_C la frecuencia. Retomando la información de que cada canal del codificador posee 12 líneas, es posible calcular el tiempo T_R necesario para que el eje del motor de una vuelta completa multiplicando el periodo T por 12.

$$T_R = 0.00098\text{s} * 12 = 0.01176\text{s} \quad 4.10$$

con el valor anterior es posible calcular la velocidad V_M de la manera siguiente:

$$V_M = \frac{1 \text{ revolución}}{T_R} * 60 = \frac{1}{0.01176s} * 60 = 5102.04 \text{ rpm} \quad 4.11$$

En la ecuación anterior, V_M corresponde a la velocidad en el eje del motor, donde se encuentra posicionado el codificador, pero recordar que se requiere conocer la velocidad V_R en el eje del reductor mecánico, por lo que es necesario tomar en cuenta la relación de reducción de 171.79:1 que el fabricante brinda, como se muestra en la ecuación siguiente:

$$V_R = \frac{V_M}{171.79} = \frac{5102.04 \text{ rpm}}{171.79} = 29.70 \text{ rpm} \quad 4.12$$

Haciendo una comparativa de la velocidad máxima obtenida experimentalmente y la que el fabricante informa (34 rpm), se puede apreciar que hay una variación del 4.3 rpm, esta diferencia se debe a que el voltaje nominal que se definió experimentalmente y con el cual se realizaron las mediciones de la frecuencia del codificador, es inferior al marcado por el fabricante, por lo tanto, era de esperarse que la velocidad también difiriera en un valor cercano menor.

4.1.2. Motorreductor de elevación

Siguiendo el mismo procedimiento de caracterización, se obtuvieron los siguientes datos para el motorreductor de elevación.

V	I(A)	τ (Nm)	n
0.5	0.11	0.025497	0.437346
1	0.21	0.082376	0.392266

1.5	0.35	0.16279	0.310077
2	0.42	0.245166	0.288975
2.5	0.57	0.300083	0.206456
3	0.78	0.362846	0.155062
3.5	0.8	0.421686	0.148481
4	0.91	0.51583	0.141711
4.5	1.02	0.611935	0.133319
5	1.12	0.631548	0.112776
5.5	1.24	0.729615	0.116982
6	1.32	0.751189	0.094847
6.5	1.48	0.798261	0.082979
7	1.56	0.817875	0.074897

Tabla 4.3. Datos de caracterización de corriente, torque y eficiencia.

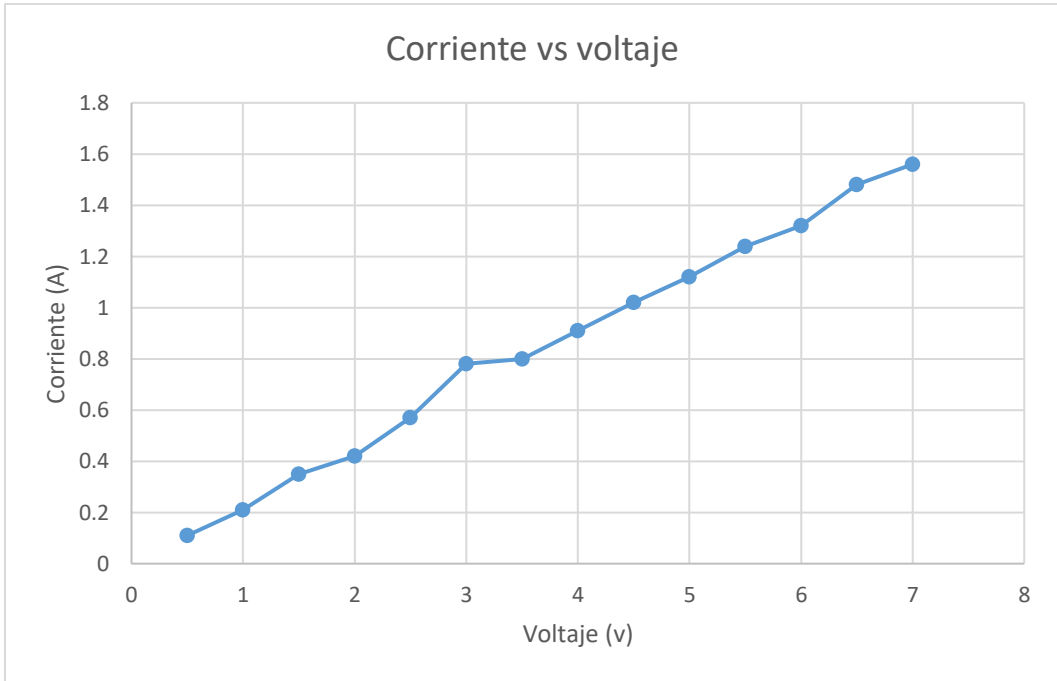


Figura 4.10. Gráfico de voltaje contra corriente.

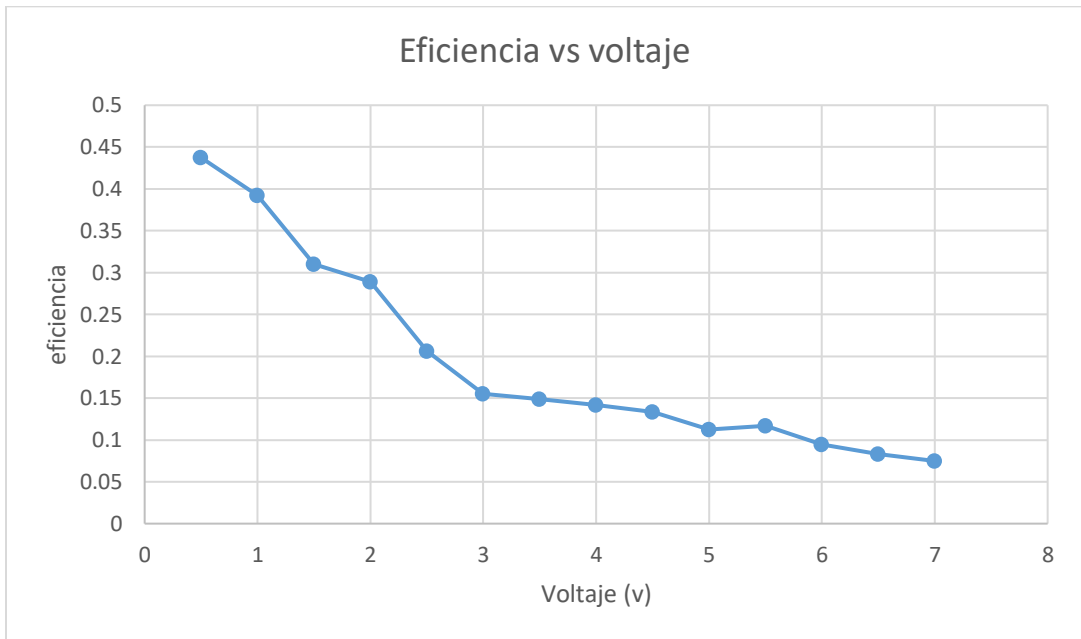


Figura 4.11. Gráfico de voltaje contra eficiencia.

Al igual que en la gráfica de corriente del motorreductor de acimut, en la figura 4.10 se puede observar un comportamiento aproximado a la linealidad en el intervalo de voltaje que no supera los 7 voltios. De igual manera la gráfica de la figura 4.11, correspondiente a la eficiencia, tiene un comportamiento decreciente con pequeño incremento abrupto en 5.5 v, que como ya se explicó anteriormente, corresponde al voltaje nominal de la señal de control del actuador.

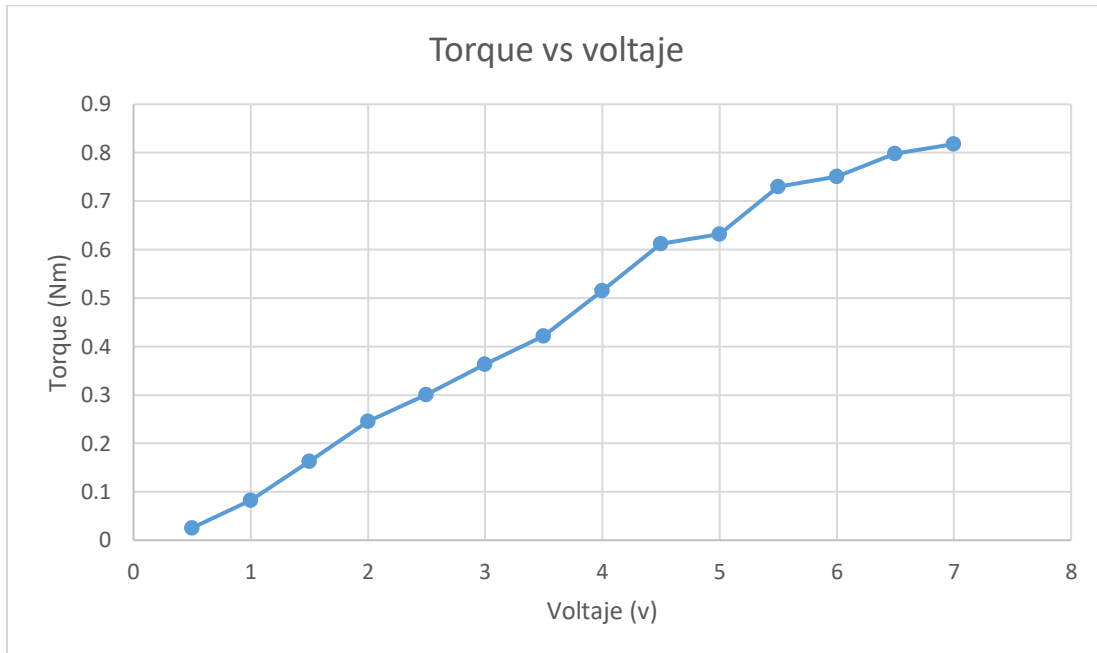


Figura 4.12. Gráfico de voltaje contra torque.

Siguiendo la metodología de caracterización, el siguiente paso consiste en hallar la frecuencia óptima de la señal de control del motor, para ello nuevamente se implementó el circuito de la figura 4.6, manejando un ciclo de trabajo constante al 50% y realizando un barrido en la frecuencia hasta hallar el valor óptimo, midiendo el torque del motor, que como ya se explicó anteriormente, éste debe corresponder la mitad del valor del torque medido cuando se aplica el voltaje nominal del motor. Para este caso, se puede apreciar en la tabla 4.3 y en la figura 4.12 que el valor del torque en el voltaje nominal es de 0.72 Nm, por lo que el valor de frecuencia óptima es aquel donde la medición del torque brinde un valor de 0.36 Nm.

La tabla 4.4 corresponde a los valores de torque y corriente obtenidos suministrándole al motor una señal PWM a 5.5 v (voltaje nominal) a una frecuencia de 88Hz (frecuencia óptima hallada), realizando un barrido en el ciclo de trabajo para corroborar que la corriente y el torque posean un comportamiento cercano a la linealidad. Dicho comportamiento se observa en las gráficas de las figuras 4.13 y 4.14 y justifica que la señal de control bajo las condiciones de voltaje y frecuencia dadas generará un desempeño adecuado del actuador, aprovechando al máximo sus recursos.

Ciclo de trabajo		
%	I(A)	τ (Nm)
10	0.05	0.02
20	0.12	0.06
30	0.2	0.15
40	0.29	0.21
50	0.39	0.31
60	0.47	0.38
70	0.54	0.43
80	0.66	0.44

Tabla 4.4. Datos de corriente y torque aplicando un barrido en el ciclo de trabajo de la señal PWM a una frecuencia de 88 Hz.

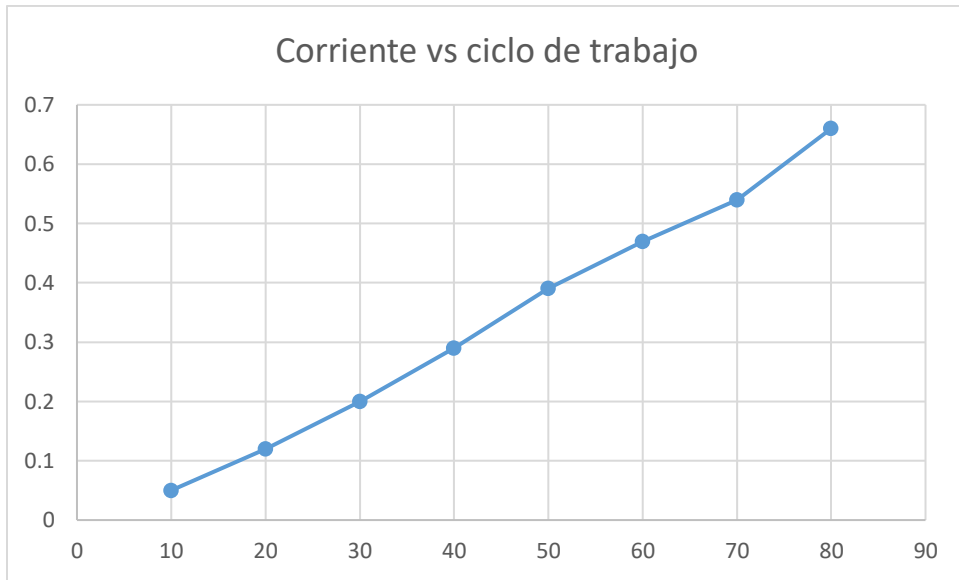


Figura 4.13. Gráfico de ciclo de trabajo contra voltaje.

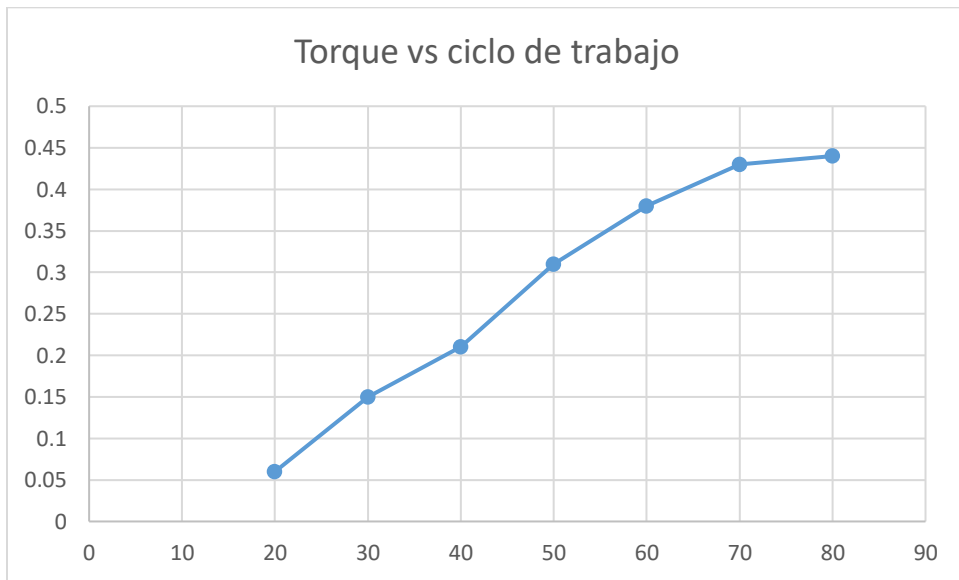


Figura 4.14. Gráfico de ciclo de trabajo contra torque.

El paso final, consistió en el cálculo de la velocidad máxima, siguiendo el método que se explicó en la caracterización del motorreductor de acimut y hacer una comparativa del valor obtenido experimentalmente con aquel que el fabricante brinda.

En la figura 4.15 se aprecian las señales del codificador graficadas en un osciloscopio, se puede observar el desfase de 90° entre ambas, propio de los codificadores incrementales de cuadratura, prestando atención a solo una señal en particular, se puede ver un valor de frecuencia de 990.1 Hz, que como ya se explicó anteriormente, es necesario para el cálculo de la velocidad.

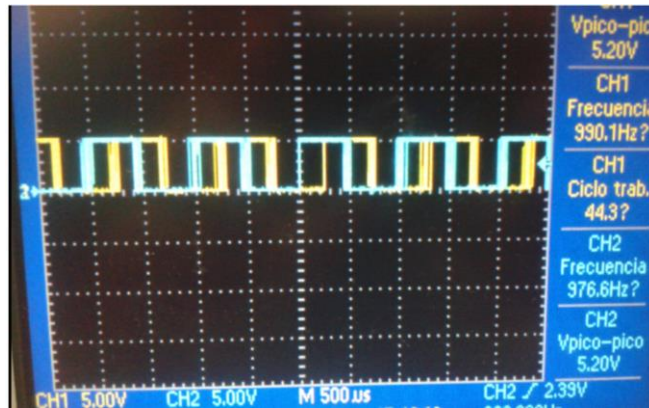


Figura 4.15. Señales del codificador del motor visualizadas en un osciloscopio.

Primeramente, se obtiene el periodo T de la señal:

$$T = \frac{1}{990.1\text{Hz}} = 0.001\text{s} \quad 4.13$$

Posteriormente se multiplica el valor del periodo T de la señal por 12, correspondiente al valor de las líneas que contiene dicho canal, para conocer el tiempo T_R que transcurre en una revolución.

$$T_R = T * 12 = 0.001\text{s} * 12 = 0.012\text{s} \quad 4.14$$

El siguiente paso consiste en calcular la velocidad V_M del motor.

$$V_M = \frac{1 \text{ revolución}}{0.012\text{s}} * 60 = 5000 \text{ rpm} \quad 4.15$$

Para finalmente hallar la velocidad V_R presente en el eje del reductor mecánico.

$$V_R = \frac{V_M}{171.79} = \frac{5000 \text{ rpm}}{171.79} = 29.1 \text{ rpm} \quad 4.16$$

De igual manera que la velocidad del motor de acimut, hay una diferencia pequeña entre la velocidad que el fabricante informa (34 rpm) y la obtenida experimentalmente, que como se comentó anteriormente, se debe a la designación de un nuevo valor de voltaje nominal inferior obtenido experimentalmente, por lo que el suministrar dicho voltaje de menor magnitud, genera una disminución en la velocidad del motor, ya que dichos parámetros son directamente proporcionales.

4.2. Ajustes al control de posicionamiento del seguidor solar basados en pruebas realizadas

Durante las primeras pruebas de posicionamiento del robot en las coordenadas del Sol, el desempeño no fue muy bueno. Para su análisis y corrección se dividió la trayectoria del robot en dos partes:

- **Trayectoria para ubicar el Sol.** Aquella en la que el robot parte de la posición de casa para localizar al Sol.
- **Trayectoria de seguimiento Solar.** Aquella que describe el Sol durante el día y en la cual se hace el seguimiento solar.

Primero se procedió a analizar el comportamiento del control de posición del sistema en la trayectoria de seguimiento solar. Aquí se observó un comportamiento amortiguado y lento en el que ambos errores de posición (de acimut y elevación) sobrepasaban el valor de $\pm 0.7^\circ$ límite propuesto en los objetivos y necesario para una correcta medición de la radiación directa. Debido a que la posición solar no es estática, cuando se presentaba un incremento en el valor del error en valores mayores a 1.5° , ambos controles al hacer la corrección de posición presentaban un comportamiento subamortiguado drástico consecuencia del incremento de la señal PWM de los motores, causado a su vez por la necesidad de superar la fuerza de fricción estática presente en el motor mismo y en los rodamientos, lo que aunado a

una respuesta lenta del control, provocaba sobretiros muy grandes y una estabilización tardía.

La respuesta anterior dió las herramientas para comprender que esos errores de posición mayores a 1.5° dado a que el sistema permanece estático y la posición solar varía a lo largo del tiempo se deben a que la ganancia derivativa de los controles PID es muy pequeña, pues como se documentó en el capítulo 2, esta ganancia se encarga de mantener el error al mínimo con la misma velocidad con la que se produce. También se concluyó que la ganancia integral era pequeña debido a que cuando ocurría la corrección de posición, el comportamiento tenía sobreimpulsos. Esta ganancia al integrar la señal de error actúa como un amortiguador para evitar que el robot sobrepase el valor deseado de posicionamiento y así mejorar el error en estado estacionario. Tomando en cuenta todo el análisis anterior, se aumentaron los valores de las ganancias dando intervalos cercanos a los ya obtenidos y observando el comportamiento del sistema. Las siguientes ecuaciones de diferencias de los controladores fueron las implementadas en el microcontrolador de manera definitiva como producto de los ajustes hechos por medio de las pruebas experimentales debido al desempeño óptimo que dieron como resultado en el seguimiento solar.

$$pwm_{acimut_k} = pwm_{acimut_{k-1}} + 899.12e_{acimut_k} + 95.86e_{acimut_{k-1}} + 72e_{acimut_{k-2}} \quad 4.17$$

$$pwm_{elevación_k} = pwm_{elevación_{k-1}} + 950.7e_{elevación_k} + 75.47e_{elevación_{k-1}} + 65.94e_{elevación_{k-2}} \quad 4.18$$

En la figura 4.16 se muestran las gráficas de error obtenidas al realizar seguimiento solar implementando las ecuaciones 4.17 y 4.18.

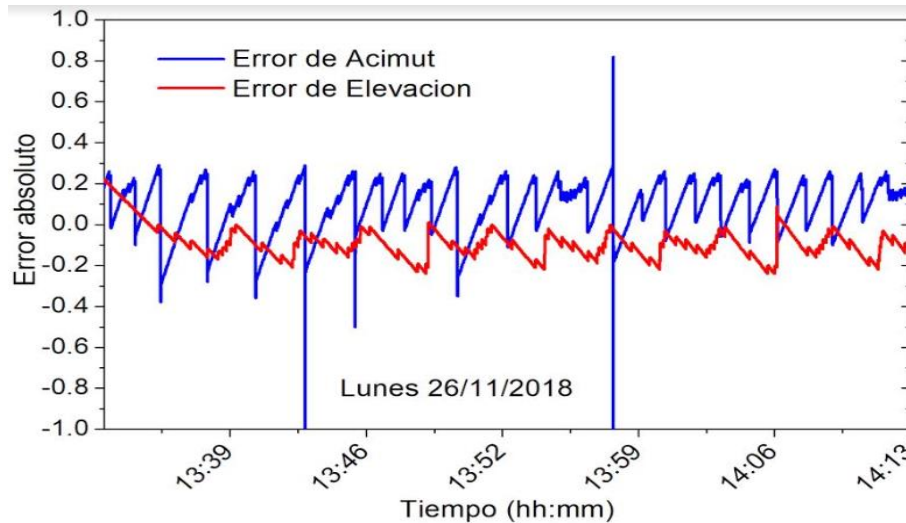


Figura 4.16. Gráficos de errores de posición con ajuste de control PID del sistema.

Como se puede apreciar, la gráfica del error de seguimiento solar en acimut posee picos que sobrepasan el valor límite establecido en 0.7° . Este comportamiento se debe a que la fuerza de fricción estática no es uniforme en todo el desplazamiento angular, consecuencia de la deformación de los acoplamientos mecánicos presentes en el sistema, cuya función es compensar la desalineación que pueda existir entre los ejes de los motores y su unión con los eslabones. Pero también puede apreciarse que el sistema lo corrige de manera instantánea debido a la rápida acción de la ganancia derivativa previamente ajustada. Lo anterior no produce alteraciones en la medición puesto que las lecturas de radiación solar directa se hacen cada 30 segundos.

Como se mencionó anteriormente, la trayectoria del seguidor solar se dividió en dos partes para su análisis y ajustes, hasta este punto se hicieron las correcciones prudentes para la trayectoria de seguimiento solar. El siguiente paso es analizar el comportamiento del control PID en la trayectoria para ubicar el Sol desde la posición de casa.

Para asegurar un correcto posicionamiento sin tener comportamientos no deseados a la hora de que el robot encuentra el Sol para comenzar el seguimiento, se tomó como antecedente el óptimo desempeño que presentó el control en una trayectoria

con una velocidad baja e intervalos de variación de la posición pequeños como lo es la trayectoria solar, por lo que se definió un comportamiento que emula la naturaleza de una entrada de tipo rampa, es decir, con una variación paulatina de la posición deseada en función del tiempo.

En las figuras 4.17 y 4.18 se muestran los gráficos de la respuesta del control para la trayectoria desde la posición de casa del robot hasta la posición del Sol con las siguientes coordenadas, acimut = 161.81° y elevación = 47.44° . De manera particular en la figura 4.17 se aprecia que el robot no parte de una posición de 0° . Esto se debe a que, de manera general para realizar seguimiento solar en zonas del hemisferio norte terrestre (como la ciudad de Puebla), el acimut solar se referencia con respecto al sur geográfico pues en estas áreas, las trayectorias solares se llevan a cabo en la parte sur de la esfera celeste.

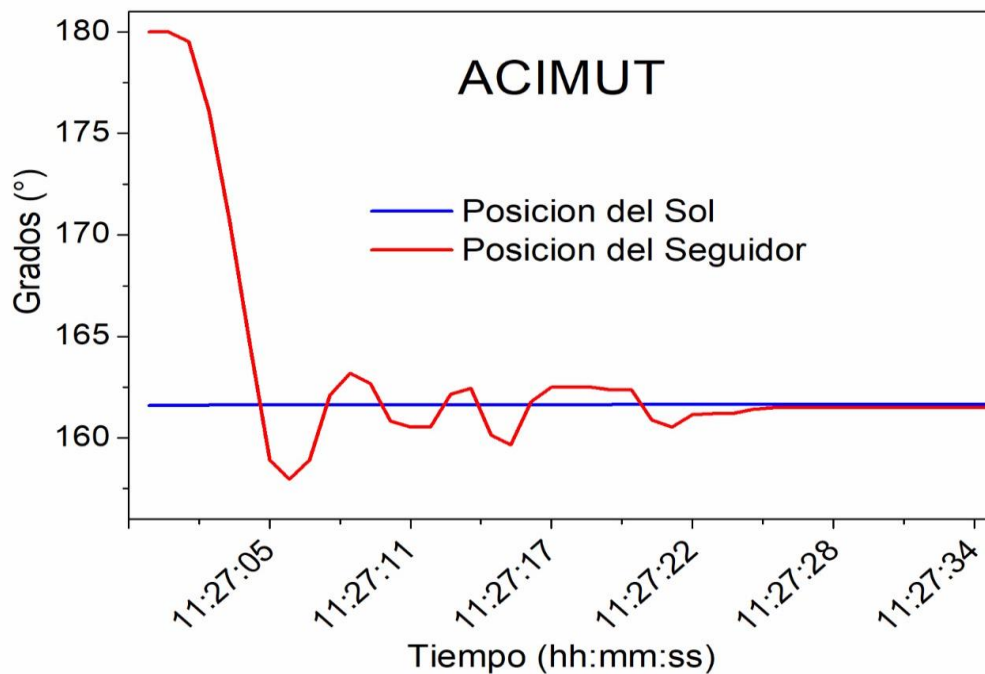


Figura 4.17. Gráfico de trayectoria en acimut para apuntar el robot al Sol, con una posición deseada de 161.81° , partiendo de la posición de casa.

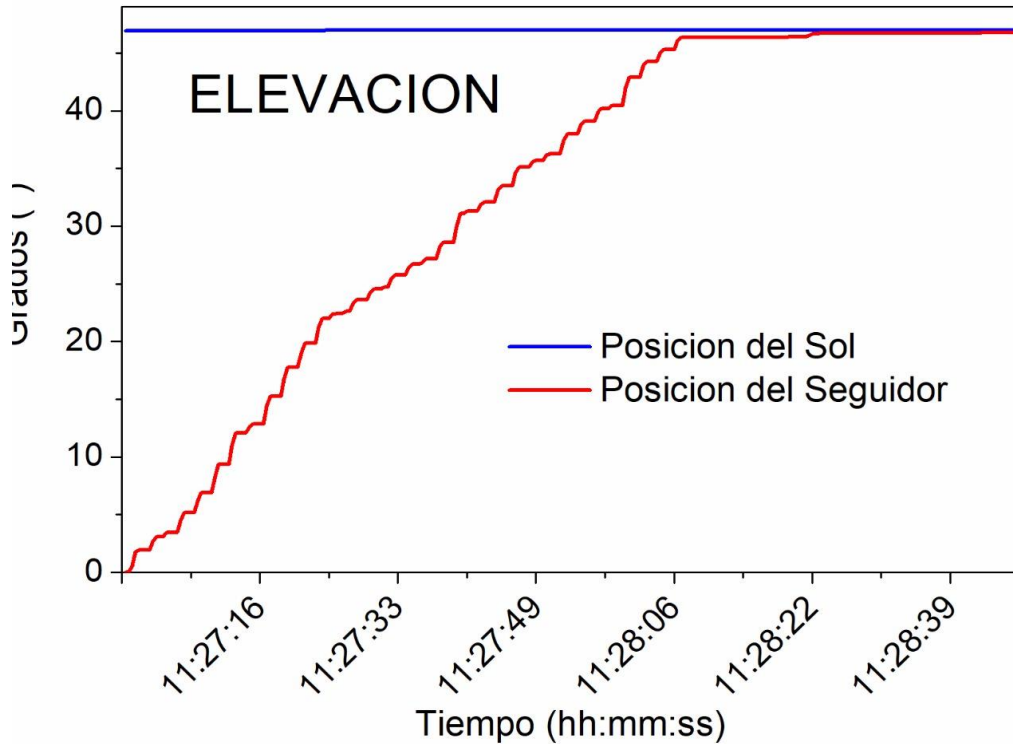


Figura 4.18. Gráfico de trayectoria en elevación para apuntar el robot al Sol, con una posición deseada de 47.44°, partiendo de la posición de casa.

Como se puede apreciar en los gráficos anteriores, la respuesta es muy buena y aunque en acimut presenta un comportamiento subamortiguado, tiene una pronta estabilización a partir de la cual comienza el seguimiento. Por lo que en el código de programación del microcontrolador se incorporaron dos casos, una definición de las coordenadas solares con un control de trayectorias tipo rampa para mover el robot desde la posición de casa hasta la posición solar y una vez alcanzadas las coordenadas solares, comenzar el seguimiento solar como previamente se hizo en las pruebas de los resultados de la figura 4.16.

4.3. Implementación de brújula y medidor de nivel de agua como instrumentos para la localización de la posición de casa del seguidor solar.

Como ya es sabido, la exactitud de posicionamiento del seguidor es vital para una correcta medición de la radiación directa solar, en la cual muchos factores juegan un papel importante. Desde el método de control de trayectorias, los controladores de los sistemas electromecánicos, las holguras mecánicas, desalineaciones entre eslabones, etc. Pero un factor muy importante a considerar es lograr la correcta alineación del pirheliómetro con el norte geográfico y la horizontal, pues es la posición de referencia para realizar el seguimiento ya que el sistema no cuenta con algún elemento que dé información de retroalimentación sobre un mal alineamiento con el Sol y poder así compensar dicho error. Es así que la forma general de funcionamiento del sistema de seguimiento solar puede entenderse como un sistema de control en lazo abierto pues no existe un elemento de retroalimentación como un sensor fotorresistivo por ejemplo, que informe sobre un mal posicionamiento. Lo anterior no debe confundirse con el método de control de trayectorias propuesto, pues este sí es un sistema en lazo cerrado, al usar los codificadores como elementos de retroalimentación.

Previamente se documentó el uso de un magnetómetro y acelerómetro para realizar esta tarea, pero en las pruebas los resultados no fueron favorables, debido a que el sensor propuesto no proporcionaba valores de lectura estables aun cuando el robot se mantuviera en reposo, ya que la precisión medida experimentalmente oscilaba entre $\pm 0.5^\circ$, por lo que al implementarlo con el método de control de trayectorias, generaba comportamientos oscilantes en el sistema y malos posicionamientos, que obviamente generaron resultados no favorables hablando de la exactitud al alinear el pirheliómetro con el Sol. Por consecuencia, se optó por el uso de otras herramientas. Una muy buena alternativa sería migrar a un sensor con un mejor desempeño y rangos de exactitud y precisión superiores, pero implicaría un estudio

muy riguroso y extenso de este tipo de dispositivos, por lo que, debido a los tiempos determinados para este proyecto, se decidió usar una brújula y un medidor de nivel de agua, que, aunque son herramientas con principios de funcionamiento básicos, tienen un desempeño sobresaliente.

Por lo anterior, la parte de posicionamiento autónomo del robot en la posición de casa se descartó, haciéndolo de manera manual con las herramientas previamente mencionadas. Este método brindó resultados muy buenos a la hora de medir la radiación solar, por lo que se pudieron obtener los primeros gráficos de dichas mediciones.

4.4. Mediciones de radiación solar directa

En la figura 4.19 se observa el gráfico de la radiación solar directa obtenido el lunes 26 de noviembre de 2018, bajo condiciones de cielo despejado previo a las 14 horas y con alta incidencia de nubes durante el resto de la tarde. Como se ha comentado, factores como una mala alineación del sistema y la presencia de nubes, tienen una fuerte influencia en el comportamiento del parámetro a medir.

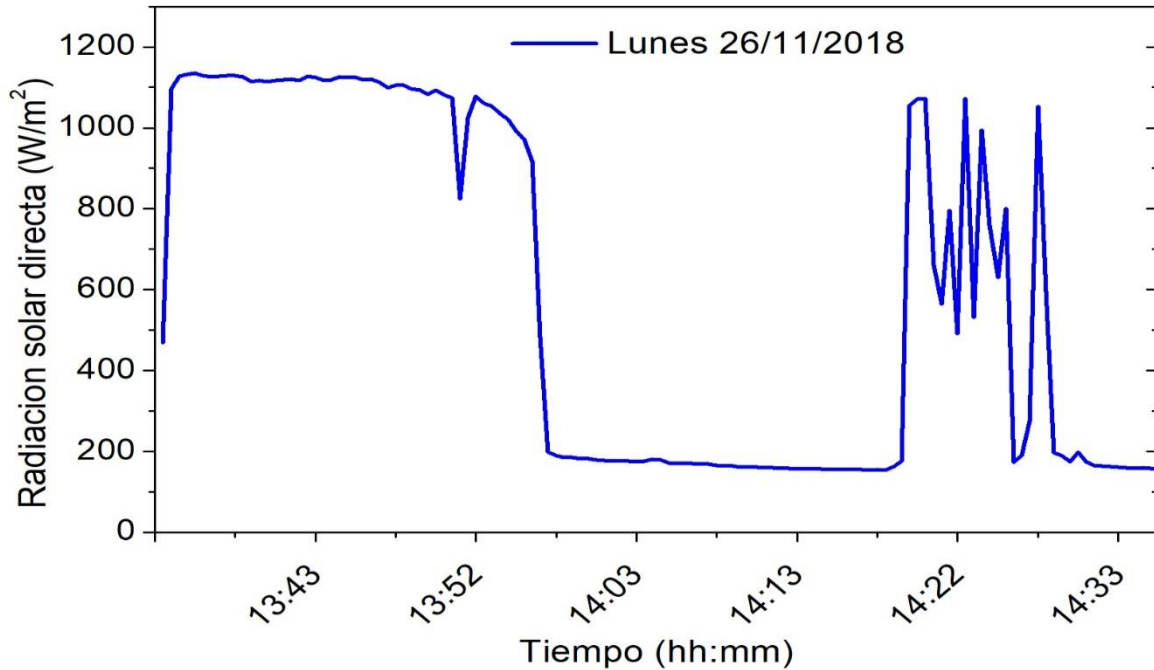


Figura 4.19. Gráfico de radiación solar directa en Ciudad Universitaria (BUAP) bajo condiciones de cielo mayoritariamente despejado.

En la figura 4.20, se puede apreciar un gráfico con los resultados obtenidos el día miércoles 28 de noviembre de 2018 bajo las condiciones de cielo nublado, haciendo una comparativa con el gráfico de la figura 4.19, se puede apreciar que el valor más alto de radiación directa registrado el lunes fue de 1110 W/m^2 , mientras que el miércoles fue de 900 W/m^2 , esto es consecuencia directa de las condiciones de nubosidad presentes en cada día, pues aunque los datos de la figura 4.19 se obtuvieron en un día con presencia de nubes, los valores máximos registrados ocurrieron con un cielo despejado, mientras que el día en que se realizaron las mediciones del gráfico de la figura 4.20, en ningún momento hubo un cielo completamente despejado.

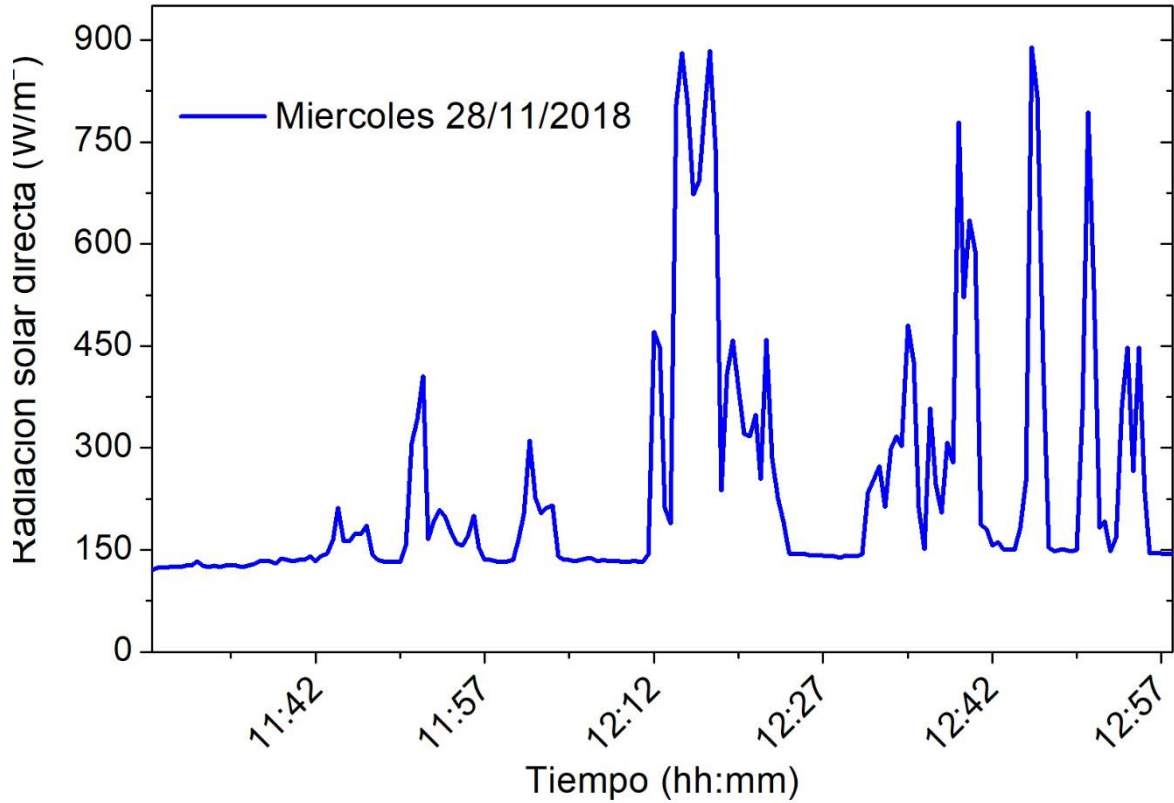


Figura 4.20. Gráfico de radiación solar directa en Ciudad Universitaria (BUAP) bajo condiciones de cielo nublado.

Finalmente, en la figura 4.21 se puede apreciar el gráfico de radiación solar directa obtenido en un periodo de tiempo mayor, iniciando la medición a las 13:00 hrs y finalizándolo a las 18:00 hrs del día 27 de enero de 2019 bajo condiciones de cielo con mínima nubosidad. En dicho gráfico, se puede observar el comportamiento decreciente del valor de radiación solar directa conforme las horas transcurren y se acerca el ocaso.

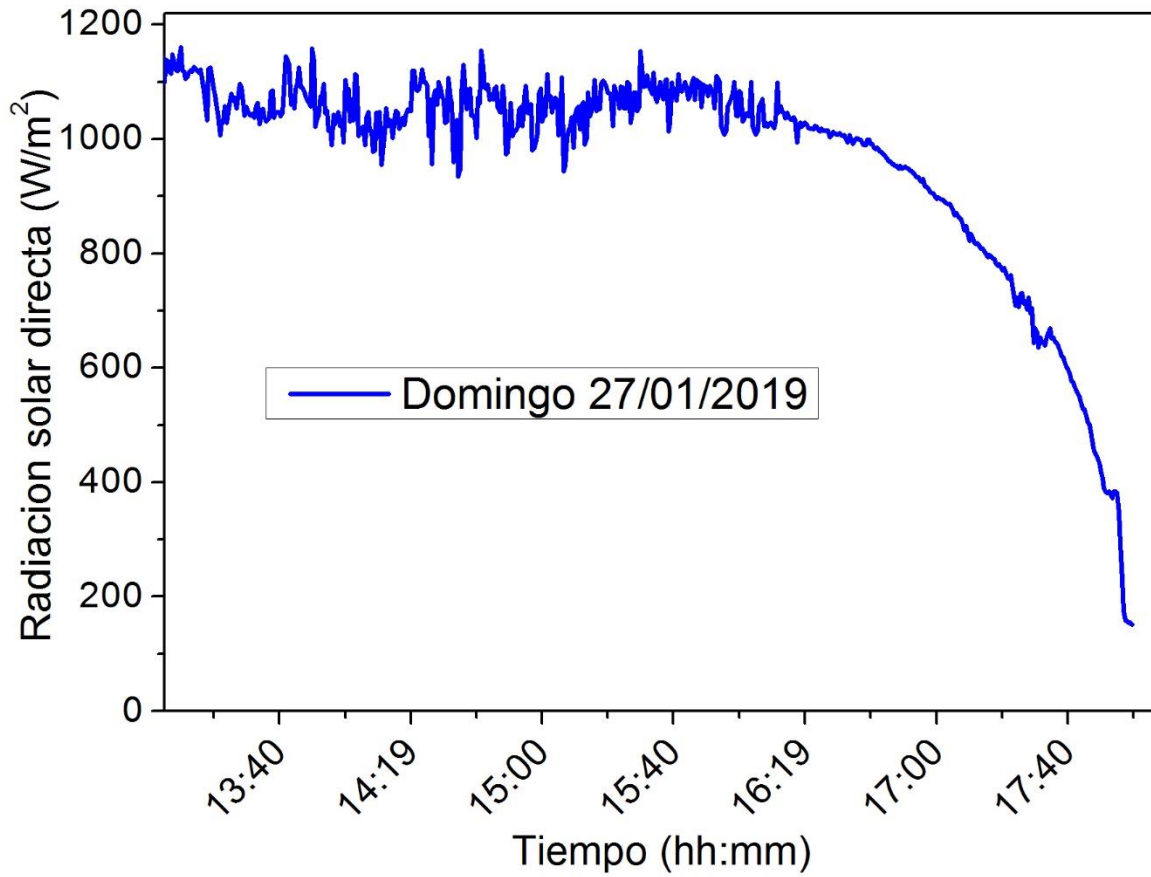


Figura 4.21. Gráfico de radiación solar directa en Ciudad Universitaria (BUAP), bajo condiciones de cielo con mínima nubosidad.

Capítulo 5 Conclusiones y trabajo futuro

Durante la puesta en marcha de este trabajo se puso en manifiesto el principal objetivo, la necesidad de desarrollar un sistema de seguimiento solar con un error en la exactitud de posicionamiento y seguimiento menor a $\pm 0.7^\circ$. De acuerdo con los resultados obtenidos se logró dicho objetivo general, así como los específicos.

De manera general, al final de esta tesis se tiene un seguidor solar que cumple las características necesarias para poder realizar mediciones de radiación solar directa con un pirheliómetro modelo CH1 de la marca Kipp&Zonnen mediante el uso de ecuaciones para conocer las coordenadas solares en la esfera terrestre. Y de manera particular se logró:

- Calcular las trayectorias del Sol a lo largo del año dependientes de los distintos factores como el eje de inclinación terrestre, la hora y las coordenadas geográficas del observador.
- Se tiene el análisis cinemático completo del sistema para comprender su arquitectura, conocer sus alcances y diseñar un adecuado control de posición y trayectorias.
- Se explica detalladamente el funcionamiento y la importancia del método de control de trayectorias por movimiento resuelto, para llevar a cabo su implementación de manera exitosa.
- Se aplican los conocimientos sobre teoría de control para obtener el modelo matemático del sistema, y de esta manera cimentar las bases para la implementación de un adecuado controlador para la planta.

Trabajo futuro

Como se mencionó en el capítulo 4, no se logró un posicionamiento autónomo del robot, debido al bajo desempeño del sensor propuesto para alcanzar la posición de casa, compuesto por un acelerómetro y magnetómetro. Es importante considerar como medida futura la investigación y el estudio de sensores de campo magnético, de aceleraciones o dispositivos con un principio de funcionamiento similar al propuesto inicialmente, con la finalidad de encontrar aquel cuyo desempeño y alcances se encuentren dentro de los márgenes para llevar a cabo la acción deseada.

En la parte mecánica, es prudente considerar como trabajo futuro, la adaptación de motorreductores con un sistema de engranes con holgura cero o fabricar un sistema mecánico con dichas características, ya que las holguras son uno de los principales problemas para lograr un correcto posicionamiento pues son diferencias angulares que los sensores de posición no detectan.

Otra posible alternativa al problema anterior consiste en la implementación de codificadores en los ejes de movimiento del sistema para hacer una comparativa con los acoplados a los ejes de los motores y conocer de esta manera el error de posición debido a las holguras de los motorreductores e implementar un control de posición de carácter compensador para mejorar en lo posible la exactitud del sistema.

Finalmente, en la parte del diseño del sistema y muy específicamente en la elección de los materiales es de relevancia hacer una mejora en el prototipo para su uso bajo condiciones de humedad o lluvia intensas, y poder realizar mediciones de radiación solar directa en condiciones ambientales adversas.

Referencias bibliográficas

- [1] I. E. Agency. [En línea]. Available: <http://www.iea.org>.. [Último acceso: 16 Mayo 2018].
- [2] K. M. T. S. S. y. A. S. M. Shfiul, «Desing and Construction of an Automatic Solar Tracking System,» de *6th Internatioanl Conference on Electrical and Computer Engineering (ICEE 2010)*, Dhaka, Bangladesh, 2010.
- [3] Kipp&Zonen, «SUN TRACKERS. For solar-tracking and PC-based positioning operations,» [En línea]. Available: www.kippzonen.com. [Último acceso: 25 Junio 2018].
- [4] G. Prinsloo y R. Dobson, SOLAR TRACKING-High precision solar position algorithms,programs and software for computing the solar vector,solar coordinates&sun angles in Microprocessor,PLC,Arduino,PIC and PC-based sun tracking devices or dynamic sun following hardware, ISBN:978-0-620-61576-1, 2015.
- [5] R. Agarwal, «Concept of Mechanical Solar Tracking System,» *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, Vols. %1 de %2e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X, pp. 24-27, 2014.
- [6] J. A. Manrique, ENERGÍA SOLAR-Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas, México, D.F: HARLA HARPER & ROW LATINOAMERICANA, 1984.
- [7] A. Muhlia V., «Notas del curso: Solarimetría,» de *30 Semana Nacional de Energía Solar*, Veracruz, Ver., 2006.
- [8] J. D. Muñoz Castro, Sistema Autónomo de Seguimiento Solar Asociado a un GPS. Tesis de Licenciatura, Puebla, México, 2016.

- [9] Zettlex, «Zettlex,» Celera Motion. A Novanta Company, [En línea]. Available: www.zettlex.com/es/articles/sensores-de-posicion. [Último acceso: 10 Julio 2018].
- [10] J. W. Jewett y R. Serway, *Physics for Scientists and Engineers*, ISBN 0-534-40842-7., 2004.
- [11] F. Reyes Cortés, *MATLAB Aplicado a la Robótica y Mecatrónica*, México, D.F.: Alfaomega, 2012.
- [12] R. Miranda Colorado, *Cinemática y Dinámica de Robots Manipuladores*, Ciudad de México: Alfaomega, 2016.
- [13] S. K. S. T. T. W. Bartenbach, *Introducción a la Robótica*, Indian Institute of Technology: McGraw-Hill, 2010.
- [14] D. E. Whitney, «Resolved Motion Rate Control of Manipulators and Human Prostheses,» *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, vol. 10, nº 2, pp. 47-53, 1969.
- [15] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*, Madrid: Pearson education, 2010.
- [16] N. S. Nise, *Sistemas de Control Para Ingeniería*, México: Compañía Editorial Continental, 2006.
- [17] K. Ogata, *Sistemas de Control en Tiempo Discreto*, Edo. de México: Edición en español por Prentice Hall Hispanoamericana, 1996.
- [18] I. The MathWorks, «Analyzing the Sun's Path,» MathWorks, [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/55510-analyzing-the-sun-s-path>. [Último acceso: 2 Agosto 2018].
- [19] «www.deinoxidable.mx,» [En línea]. Available: <http://www.deinoxidable.mx/AISI%201018.pdf>. [Último acceso: 5 Septiembre 2018].

- [20] «MathWorks,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/products/simmechanics.html>. [Último acceso: 5 Septiembre 2018].
- [21] N. O. a. A. Administration, «Historical Magnetic Declination,» NOAA, [En línea]. Available: https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/historical_declination/. [Último acceso: 12 Octubre 2018].
- [22] I. Vivaldo de la Cruz, Diseño, Construcción y Prueba de un Piranómetro. Tesis para el título de Licenciatura en Electrónica, Puebla: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2008.
- [23] R. A. Española, «Enclave RAE,» [En línea]. Available: dle.rae.es. [Último acceso: 18 Septiembre 2018].

Apéndice A

Motorreductores Eléctricos

172:1 Metal Gearmotor 25Dx56L mm LP 6V with 48 CPR Encoder



This gearmotor consists of a **low-power, 6 V** brushed DC motor combined with a **171.79:1** metal spur gearbox, and it has an integrated 48 CPR quadrature encoder on the motor shaft, which provides **8245.92 counts per revolution** of the gearbox's output shaft. The gearmotor is cylindrical, with a diameter just under 25 mm, and the D-shaped output shaft is 4 mm in diameter and extends 12.5 mm from the face plate of the gearbox.

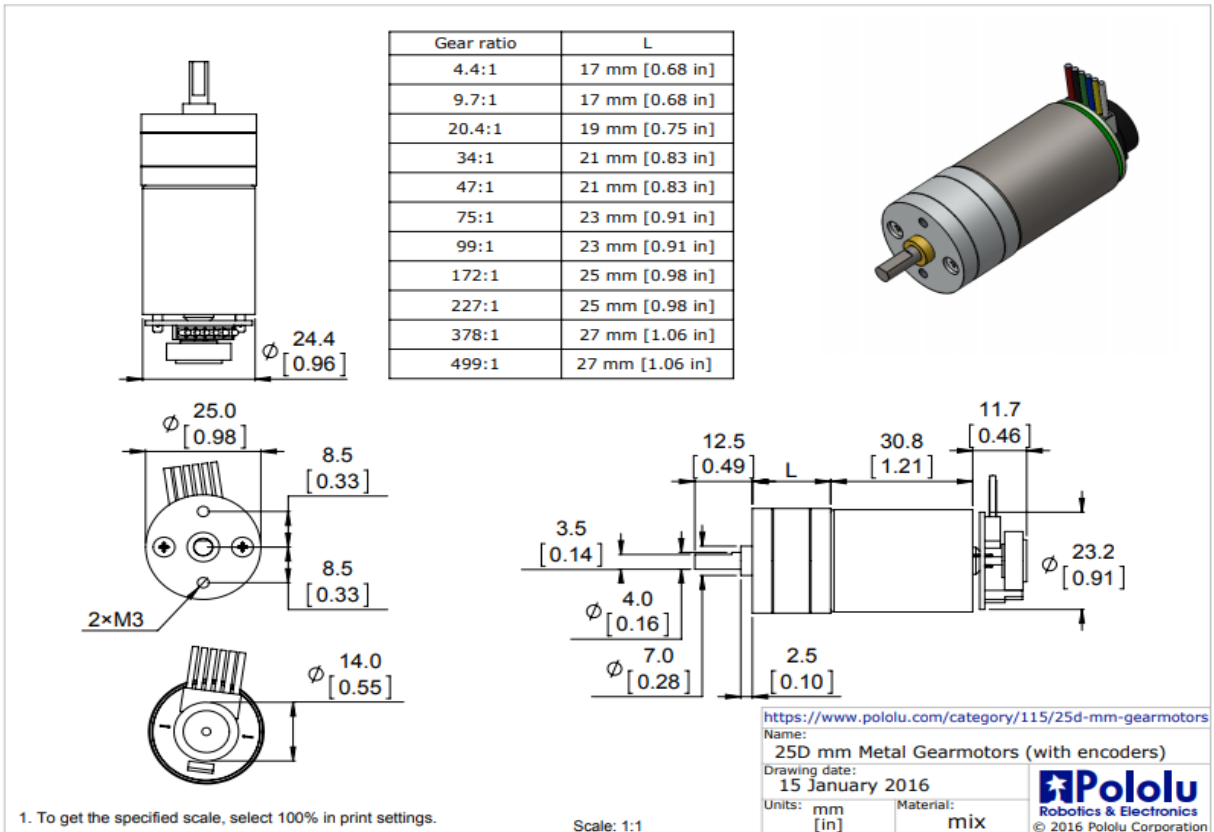
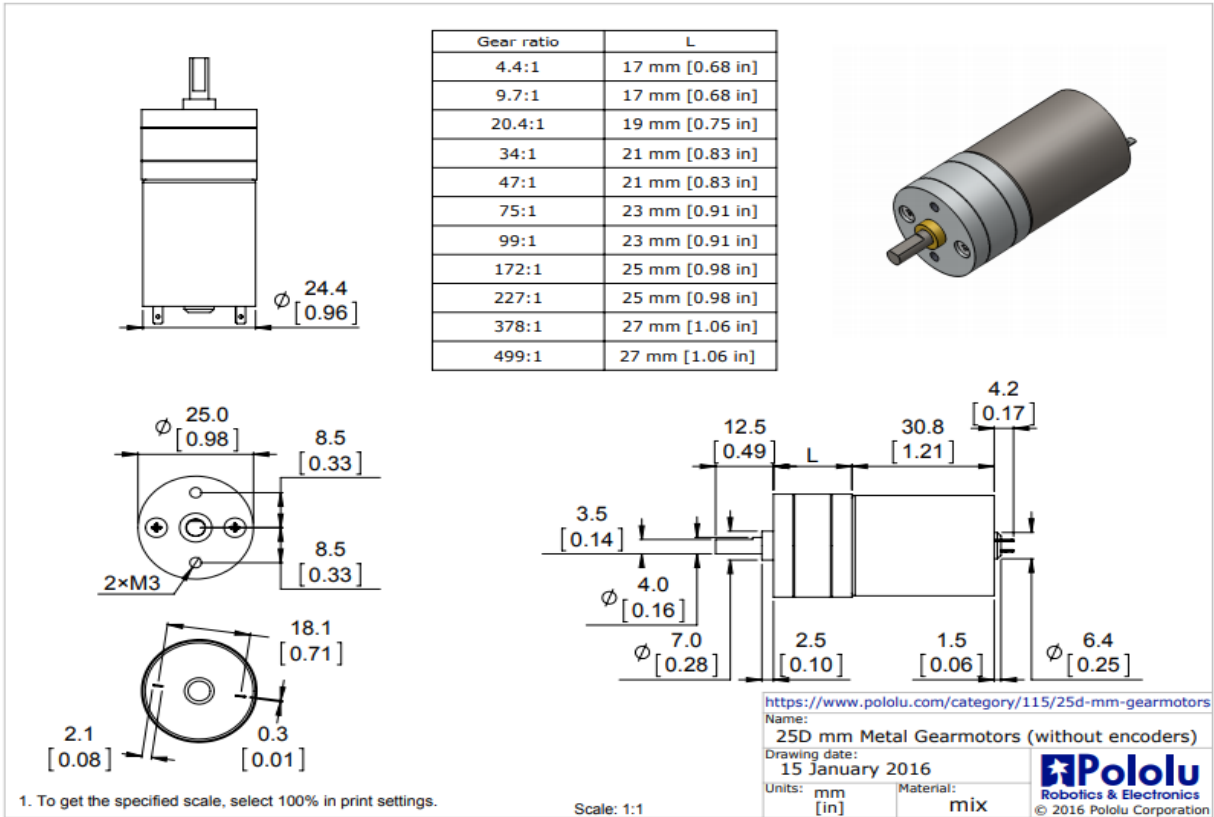
Key specs at 6 V: 34 RPM and 250 mA free-run, 200 oz-in (14.5 kg-cm) and 2.4 A stall.

Note: Stalling or overloading gearmotors can greatly decrease their lifetimes and even result in immediate damage. For these gearboxes, the recommended upper limit for instantaneous torque is 200 oz-in (15 kg-cm); we strongly advise keeping applied loads well under this limit. Stalls can also result in rapid (potentially on the order of a second) thermal damage to the motor windings and brushes, especially for the versions that use high-power (HP) motors; a general recommendation for brushed DC motor operation is 25% or less of the stall current.

In general, these kinds of motors can run at voltages above and below their nominal voltages; lower voltages might not be practical, and higher voltages could start negatively affecting the life of the motor.

Details for item #2288

$$\text{Exact gear ratio: } \frac{22 \times 20 \times 22 \times 22 \times 22 \times 22 \times 24}{12 \times 12 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10} \approx \mathbf{171.79:1}$$



Using the encoder (if applicable)

The versions of these gearmotors with encoders use a two-channel Hall effect sensor to detect the rotation of a magnetic disk on a rear protrusion of the motor shaft. The quadrature encoder provides a resolution of 48 counts per revolution of the motor shaft when counting both edges of both channels. To compute the counts per revolution of the gearbox output, multiply the gear ratio by 48. The motor/encoder has six color-coded, 8" (20 cm) leads terminated by a 1×6 female header with a 0.1" pitch, as shown in the main product picture. This header works with standard [0.1" male headers](#) and our male [jumper](#) and [precrimped wires](#). If this header is not convenient for your application, you can pull the crimped wires out of the header or cut the header off. The following table describes the wire functions:

Color	Function
Red	motor power (connects to one motor terminal)
Black	motor power (connects to the other motor terminal)
Green	encoder GND
Blue	encoder Vcc (3.5 – 20 V)
Yellow	encoder A output
White	encoder B output



Pololu



25D mm metal gearmotor with 48 CPR encoder: close-up view of encoder.

Apéndice B

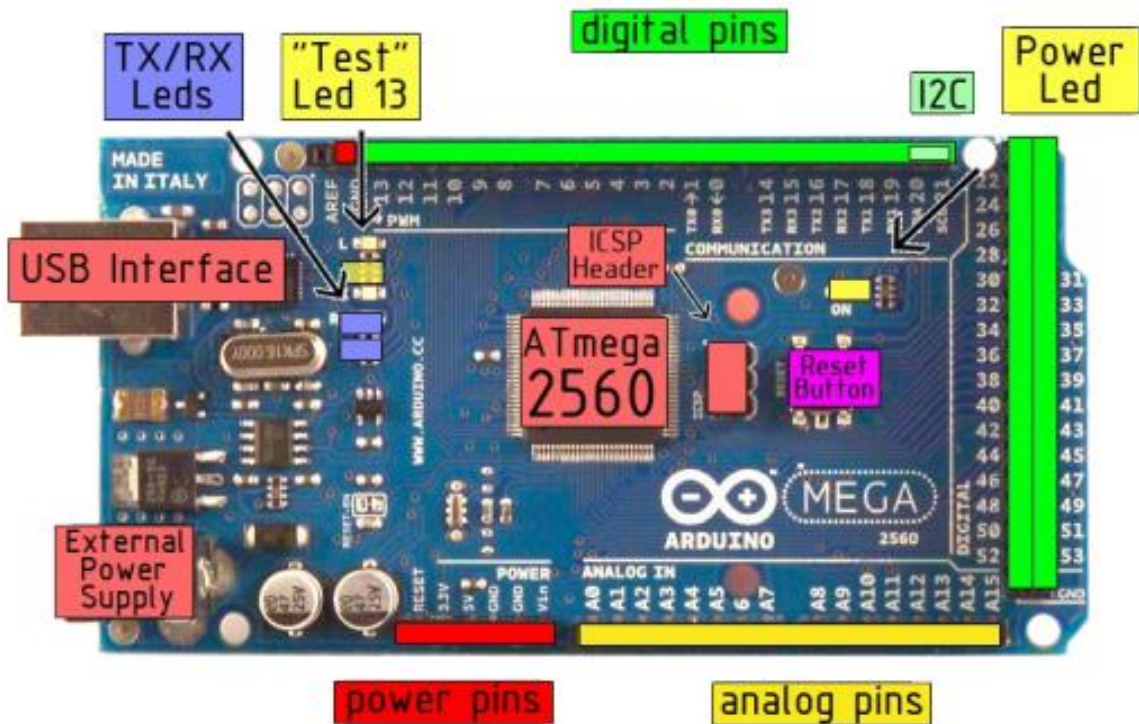
Arduino Mega 2560

Technical Specification

Summary

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 14 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

the board



Power

The Arduino Mega2560 can be powered via the USB connection or with an external power supply. The power source is selected automatically. External (non-USB) power can come either from an AC-to-DC adapter (wall-wart) or battery. The adapter can be connected by plugging a 2.1mm center-positive plug into the board's power jack. Leads from a battery can be inserted in the Gnd and Vin pin headers of the POWER connector.

The board can operate on an external supply of 6 to 20 volts. If supplied with less than 7V, however, the 5V pin may supply less than five volts and the board may be unstable. If using more than 12V, the voltage regulator may overheat and damage the board. The recommended range is 7 to 12 volts.

The Mega2560 differs from all preceding boards in that it does not use the FTDI USB-to-serial driver chip. Instead, it features the Atmega8U2 programmed as a USB-to-serial converter.

The power pins are as follows:

- **VIN.** The input voltage to the Arduino board when it's using an external power source (as opposed to 5 volts from the USB connection or other regulated power source). You can supply voltage through this pin, or, if supplying voltage via the power jack, access it through this pin.
- **5V.** The regulated power supply used to power the microcontroller and other components on the board. This can come either from VIN via an on-board regulator, or be supplied by USB or another regulated 5V supply.
- **3V3.** A 3.3 volt supply generated by the on-board regulator. Maximum current draw is 50 mA.
- **GND.** Ground pins.

Memory

The ATmega2560 has 256 KB of flash memory for storing code (of which 8 KB is used for the bootloader), 8 KB of SRAM and 4 KB of EEPROM

Input and Output

Each of the 54 digital pins on the Mega can be used as an input or output, using [pinMode\(\)](#), [digitalWrite\(\)](#), and [digitalRead\(\)](#) functions. They operate at 5 volts. Each pin can provide or receive a maximum of 40 mA and has an internal pull-up resistor (disconnected by default) of 20-50 kOhms. In addition, some pins have specialized functions:

- **Serial: 0 (RX) and 1 (TX); Serial 1: 19 (RX) and 18 (TX); Serial 2: 17 (RX) and 16 (TX); Serial 3: 15 (RX) and 14 (TX).** Used to receive (RX) and transmit (TX) TTL serial data. Pins 0 and 1 are also connected to the corresponding pins of the ATmega8U2 USB-to-TTL Serial chip .
- **External Interrupts: 2 (interrupt 0), 3 (interrupt 1), 18 (interrupt 5), 19 (interrupt 4), 20 (interrupt 3), and 21 (interrupt 2).** These pins can be configured to trigger an interrupt on a low value, a rising or falling edge, or a change in value. See the [attachInterrupt\(\)](#) function for details.
- **PWM: 0 to 13.** Provide 8-bit PWM output with the [analogWrite\(\)](#) function.
- **SPI: 50 (MISO), 51 (MOSI), 52 (SCK), 53 (SS).** These pins support SPI communication, which, although provided by the underlying hardware, is not currently included in the Arduino language. The SPI pins are also broken out on the ICSP header, which is physically compatible with the Duemilanove and Diecimila.
- **LED: 13.** There is a built-in LED connected to digital pin 13. When the pin is HIGH value, the LED is on, when the pin is LOW, it's off.
- **I²C: 20 (SDA) and 21 (SCL).** Support I²C (TWI) communication using the [Wire library](#) (documentation on the Wiring website). Note that these pins are not in the same location as the I²C pins on the Duemilanove.

The Mega2560 has 16 analog inputs, each of which provide 10 bits of resolution (i.e. 1024 different values). By default they measure from ground to 5 volts, though it is possible to change the upper end of their range using the AREF pin and [analogReference\(\)](#) function.

There are a couple of other pins on the board:

- **AREF.** Reference voltage for the analog inputs. Used with [analogReference\(\)](#).
- **Reset.** Bring this line LOW to reset the microcontroller. Typically used to add a reset button to shields which block the one on the board.

Apéndice C

Código fuente del sistema de seguimiento solar implementado en el software de Arduino

```
//*****LIBRERIAS
#include <math.h>
#include <Wire.h>
#include <LSM303.h>
#include <Time.h>
#include <TimeLib.h>
//*****VARIABLES DE MEDICION DEL TIEMPO
time_t actual;
double hora, minuto,segundo,segundoRobot, dia, minutoRobot,horaRobot,diaTime,horaTime;
int anio,mes;
//*****VARIABLES PARA INTERRUPCIONES DE LOS CODIFICADORES
const int channelPinA_cenit = 2;
const int channelPinB_cenit = 3;
const int channelPinA_acimut=19;
const int channelPinB_acimut=18;
volatile int ISRCounter_cenit = 10000;
volatile int ISRCounter_acimut =10000;
//*****VARIABLES PARA EL CONTROL DE MOTORES
int motor_acimut=4;
int dir_acimut=5;
int motor_cenit = 6;
int dir_cenit = 7;
//*****
//***** VARIABLES PARA EL CONTROL DE TRAYECTORIAS RMRC
//*****
unsigned long now1,lastTime=0;
int timeChange, sampleTime = 200;
double x0,y0,z0;
```

```

double q1encoder=0, q2encoder=0, q1real, q2real;
double Xretro =0, Yretro =0, Zretro=0;
double l1=212, beta1=70, beta2=77, d3encoder=211;
double deltaX=0, deltaY=0, deltaZ=0;
double deltaQ1=0 , deltaQ2=0, deltaD3=0;
double q1 =0, q2 =0,q1deseado,q2deseado,errorAcim =0,errorCeni=0, errorAcimP=0, errorCeniP=0;
int pwmAcimut_ant=0,pwmAcimut_act,pwmCeni_ant=0, pwmCeni_act;
double eAcimut_ant2=0 ,eAcimut_ant = 0, eAcimut_act, eCeni_ant2=0, eCeni_ant=0, eCeni_act;
int flag = 0, flag2=0, trigger =0, trigger1=0, trigger2 =0, trigger3=0, trigger4=0, trigger5=0, trigger6=0, trigger7=0;
double irradi=A1;
double rad ;
double rad1;
int counter=0;
//*****
//*****
//*****
void setup()
{
//HABILITACIÓN DEL PUERTO SERIAL Y VELOCIDAD DE TRANSMICIÓN DE DATOS
Serial.begin(115200);
setTime(11,45,0,29,11,2018);//*****VALORES INICIALES DE HORA Y FECHA
//***** *****INICIO DE PROTOCOLO DE COMUNICACION CON ACELEROMETRO
Y MAGNETOMETRO
Wire.begin();
compass.init();
compass.enableDefault();
compass.m_min = (LSM303::vector<int16_t>){-32767, -32767, -32767};
compass.m_max = (LSM303::vector<int16_t>){+32767, +32767, +32767};
//*****DECLARACION DE INTERRUPCIONES PARA CODIFICADORES DE LOS
MOTORES
pinMode(channelPinA_cenit, INPUT_PULLUP);
pinMode(channelPinA_acimut, INPUT_PULLUP);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(channelPinA_cenit), doEncodeA_cenit, CHANGE);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(channelPinB_cenit), doEncodeB_cenit, CHANGE);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(channelPinA_acimut), doEncodeA_acimut, CHANGE);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(channelPinB_acimut), doEncodeB_acimut, CHANGE);

```

```

//*****DECLARACION DE SALIDAS PARA CONEXION DE MOTORES Y
MEDICIÓN DE RADIACIÓN DIRECTA
pinMode(motor_acimut,OUTPUT);
pinMode(dir_acimut,OUTPUT);
pinMode(motor_cenit,OUTPUT);
pinMode(dir_cenit,OUTPUT);
pinMode(irrad,INPUT);
}

void loop()
{
//creación de un temporizador para establecer el periodo de muestreo en 0.2 segundos
now1=millis();
timeChange = (now1-lastTime);
if (timeChange >= sampleTime)
{
counter++;

horaFecha();//función para conocer la hora del día y la fecha adquisición del dato de radiación medida en el
//convertidor analogico-digital del microcontrolador y su conversión a las unidades correspondientes de
//Watt/m^2

rad = analogRead(A1);
rad1= rad*5/1023;
rad1 = rad1*1500/4.5;

//Declaración de las funciones para llevar a cabo el Método de control de trayectorias Resolved Motion Rate
//Control

lecturaEncodersBloque1();
sunTracking();
controlTrayectorias();
cinematicaBloque2();
cinematicaRetroBloque3();
puntoSumaBloque4();
jacobianoInv_Bloque5();
PID();
modulacionPulsos();

//Impresión en el monitor serial del software Arduino de las variables a monitorear
Serial.print(hora);
Serial.print(" ");

```

```

Serial.print(q1deseado);
Serial.print(" ");
Serial.print(q2deseado);
Serial.print(" ");
Serial.print(q1real);
Serial.print(" ");
Serial.print(q2real);
Serial.print(" ");
Serial.print(errorAcim);
Serial.print(" ");
Serial.print(errorCeni);
Serial.print(" ");
Serial.print(pwmAcimut_act);
Serial.print(" ");
Serial.print(pwmCenit_act);
Serial.print(" ");
Serial.print(rad);
Serial.print(" ");

//temporizador para mostrar el dato de la medición de radiación directa solar cada 30 segundos
if (counter >= 150)
{
Serial.print(rad1);
counter = 0;
}
else
{
Serial.print (" ");
}
Serial.print(" ");
lastTime = now1;
}}

//***** FUNCIONES DEL METODO DE CONTROL
//***** DE TRAYECTORIAS RMRC

void lecturaEncodersBloque1()
{

```

```

//Función que calcula la posición angular real del robot y evita que éste tome coordenadas en las que están
//definidas las singularidades cinemáticas del sistema
q1real = ((ISRCounter_acimut-10000)*7.5/171.79)+180;
q2real = (ISRCounter_cenit-10000)*7.5/171.79;
if (q1real >=360 && q1real < 720){q1real = q1real-360;}
if (q1real <= -360 && q1real > -720){q1real = q1real+360;}
if (q1real >720){q1real = q1real - 720;}
if (q1real < -720){q1real = q1real+720;}
while (q2real > 89.9)
{
digitalWrite(dir_cenit,LOW);
analogWrite(motor_cenit, 2);
q2real = (ISRCounter_cenit-10000)*7.5/171.79;
}}

void sunTracking()
{
//Función que mediante ecuaciones de seguimiento solar, calcula la posición del Sol en términos de
//coordenadas articulares
double delta_GW = -6, latitud = 19.4,longitud = -98;
double HELM,ET, CT, HSL, HRA,B, d,O, deg = 3.141519/180;
HELM = 15*delta_GW;// hora estandar local meridiana
B = (dia-81)*360/365 ;
ET = 9.87* sin(2*B*deg)-7.53 * cos(B*deg)-1.5 * sin(B*deg);//Ecuacion del tiempo para corregir los efectos de
excentricidad y el angulo de inclinacion del planeta
CT = 4*(longitud - HELM)+ ET;//correccion del tiempo usado para contrarrestar los efectos de la variacion entre
zonas horarias con la HSL
HSL = hora + (CT/60);//hora solar local
HRA = 15*(HSL - 12);//relación hora-angulo
d = asin(sin(23.5*deg)*sin(B*deg))*180/3.141519;//declinación terrestre
q2deseado= asin(sin(d*deg)*sin(latitud*deg)+cos(d*deg)*cos(latitud*deg)*cos(HRA*deg))*180/3.141519;
//Angulo de cenit
O = acos(((sin(d*deg)*cos(latitud*deg))-
(cos(d*deg)*sin(latitud*deg)*cos(HRA*deg)))/cos(q2deseado*deg))*180/3.141519;//angulo de acimut
if (HSL >12){q1deseado=360-O;}else{q1deseado= O;}// condicion de obtencion de angulo complementario de
//acimut para tiempo mayor a medio día solar
}

```

```

void controlTrayectorias()
{
//Función para definir posiciones angulares del robot en valores entre 0° a 360° y evitar valores negativos.
//Además de hacer una trayectoria del robot con un comportamiento de tipo rampa para hacer un
//posicionamiento y seguimiento solar óptimos
if (q1real < 0 && q1real >= -360){q1real = 360+q1real;}
else if (q1real < -360 && q1real >= -720){q1real = 720+q1real;}
else if (q1real >= 0 && q1real < 360){q1real = q1real;}
else if (q1real >= 360 && q1real < 720){q1real = 720-q1real;}
else {q1real = q1real;}

errorAcim = q1deseado-q1real;
errorCeni = q2deseado-q2real;
if ((abs(errorAcim)<0.7) && (abs(errorCeni)< 0.7)) {Serial.println(" Seguimiento solar");}
else {Serial.println (" Buscando posición solar");}
//Comportamiento de rampa para posicionamiento de Acimut
if (errorAcim > 1.5)
{
trigger4++;
if (trigger4 == 1)
{
q1 = q1real;
}
if (trigger4 > 1){trigger4 = 2;}
errorAcimP = q1-q1real;
while (errorAcimP < 0)
{
q1 = q1+0.1;
errorAcimP = q1-q1real;
}
if ((errorAcimP>=0) && (errorAcimP<1))
{
q1 = q1 + 0.9;
}
else {q1=q1;}
}
}

```

```

else if ((errorAcim > 0.4) && (errorAcim <= 1.5))
{
trigger++;
if (trigger == 1)
{
q1 = q1real;
}
if (trigger > 1){trigger = 2;}
errorAcimP = q1-q1real;
while (errorAcimP < 0)
{
q1 = q1+0.1;
errorAcimP = q1-q1real;
}
if ((errorAcimP>=0) && (errorAcimP<0.4))
{
q1 = q1 + 0.1;
}
else {q1=q1;}
}
else if ((errorAcim < -0.4) && (errorAcim > -1.5))
{
trigger1++;
if (trigger1 == 1)
{
q1 = q1real;
}
if (trigger1 > 1){trigger1 = 2;}
errorAcimP = q1-q1real;
while (errorAcimP > 0)
{
q1 = q1-0.1;
errorAcimP = q1-q1real;
}
if ((errorAcimP <= 0) && (errorAcimP > -0.4))

```

```

{
q1 = q1 - 0.1;
}
else { q1=q1;}
}
else if (errorAcim < -1.5)
{
trigger5++;
if (trigger5 == 1)
{
q1 = q1real;
}
if (trigger5 > 1){trigger5 = 2;}
errorAcimP = q1-q1real;
while (errorAcimP > 0)
{
q1 = q1-0.1;
errorAcimP = q1-q1real;
}
if ((errorAcimP <= 0) && (errorAcimP > -1))
{
q1 = q1 - 0.9;
}
else { q1=q1;}
}
else
{
q1 = q1deseado;
trigger = 0;
trigger1 = 0;
trigger4 = 0;
trigger5 = 0;
}
//comportamiento tipo rampa para posicionamiento en elevación
if (errorCeni > 1)

```

```

{
trigger6++;
if (trigger6 == 1)
{
q2 = q2real;
}
if (trigger6 > 1){trigger6 = 2;}
errorCeniP = q2-q2real;
while (errorCeniP < 0)
{
q2 = q2+0.01;
errorCeniP = q2-q2real;
}
if ((errorCeniP>=0) && (errorCeniP<0.5))
{
q2 = q2 + 0.1;
}
else {q2=q2;}
}
else if ((errorCeni > 0.4) && (errorCeni <= 1))
{
trigger2++;
if (trigger2 == 1)
{
q2 = q2real;
}
if (trigger2 > 1){trigger2 = 2;}
errorCeniP = q2-q2real;
while (errorCeniP < 0)
{
q2 = q2+0.01;
errorCeniP = q2-q2real;
}
if ((errorCeniP>=0) && (errorCeniP<0.4))
{

```

```

q2 = q2 + 0.01;
}
else {q2=q2;}
}
else if ((errorCeni < -0.4) && (errorCeni >= -1))
{
trigger3++;
if (trigger3 == 1)
{
q2 = q2real;
}
if (trigger3 > 1){trigger3 = 2;}
errorCeniP = q2-q2real;
while (errorCeniP > 0)
{
q2 = q2-0.1;
errorCeniP = q2-q2real;
}
if ((errorCeniP <= 0) && (errorCeniP > -0.5))
{
q2 = q2 - 0.01;
}
else { q2=q2;}
}
else if (errorCeni < -1)
{
trigger7++;
if (trigger7 == 1)
{
q2 = q2real;
}
if (trigger7 > 1){trigger7 = 2;}
errorCeniP = q2-q2real;
while (errorCeniP > 0)
{

```

```

q2 = q2-0.1;
errorCeniP = q2-q2real;
}
if ((errorCeniP <= 0) && (errorCeniP > -0.5))
{
q2 = q2 - 0.1;
}
else { q2=q2;}
}
else
{
q2 = q2deseado;
trigger2 = 0;
trigger3 = 0;
trigger6=0;
trigger7=0;
}}

void cinematicaBloque2()
{
//Función que realiza el cálculo de la cinemática directa del vector de posición solar, es decir, convierte las
//coordenadas esféricas del Sol a coordenadas en el espacio cartesiano
q1= 3.141519*(-q1)/180;
q2 = 3.141519*(90-q2)/180;
x0=-beta2*sin(q1)+d3encoder*cos(q1)*sin(q2);
y0=beta2*cos(q1)+d3encoder*sin(q1)*sin(q2);
z0=beta1+l1+d3encoder*cos(q2);
q1= 180*(-q1)/3.141519;
q2= 90- (180*q2/3.141519);
}

void cinematicaRetroBloque3()
{
//Función que realiza el cálculo de la cinemática directa del vector de posición real del robot, es decir, //convierte
las coordenadas esféricas del seguidor a coordenadas en el espacio cartesiano
q1encoder= 3.141519*(-q1real)/180;

```

```

q2encoder = 3.141519*(90-q2real)/180;
Xretro=-beta2*sin(q1encoder)+d3encoder*cos(q1encoder)*sin(q2encoder);
Yretro=beta2*cos(q1encoder)+d3encoder*sin(q1encoder)*sin(q2encoder);
Zretro=beta1+l1+d3encoder*cos(q2encoder);
}

void puntoSumaBloque4()
{
//Función que realiza la resta de los vectores de posición cartesianos solar y del robot para calcular el vector
//de diferencias de error de posición, correspondiente a la derivada de la posición del robot

deltaX = (x0-Xretro);
deltaY = (y0-Yretro);
deltaZ = (z0-Zretro);
}

void jacobianoInv_Bloque5()
{
//Función que calcula la cinemática diferencial inversa, es decir, convierte al vector de diferencias de error de
//posición del espacio de trabajo cartesiano al espacio de trabajo articular, es decir, la velocidad angular
//requerida en las articulaciones del robot

deltaQ1      =      -((deltaY*cos(q1encoder))/(d3encoder*sin(q2encoder)*pow(cos(q1encoder),2)      +
d3encoder*sin(q2encoder)*pow(sin(q1encoder),2))      -
(deltaX*sin(q1encoder))/(d3encoder*sin(q2encoder)*pow(cos(q1encoder),2)      +
d3encoder*sin(q2encoder)*pow(sin(q1encoder),2)))));

deltaQ2      =      -((deltaY*cos(q2encoder)*(beta2*cos(q1encoder)      +
d3encoder*sin(q1encoder)*sin(q2encoder)))/(pow(d3encoder,2)*pow(cos(q1encoder),2)*pow(cos(q2encoder),
2)*sin(q2encoder)      +      pow(d3encoder,2)*pow(cos(q1encoder),2)*pow(sin(q2encoder),3)      +
pow(d3encoder,2)*pow(cos(q2encoder),2)*pow(sin(q1encoder),2)*sin(q2encoder)      +
pow(d3encoder,2)*pow(sin(q1encoder),2)*pow(sin(q2encoder),3))      -
(deltaX*cos(q2encoder)*(beta2*sin(q1encoder)      -
d3encoder*cos(q1encoder)*sin(q2encoder)))/(pow(d3encoder,2)*pow(cos(q1encoder),2)*pow(cos(q2encoder),
2)*sin(q2encoder)      +      pow(d3encoder,2)*pow(cos(q1encoder),2)*pow(sin(q2encoder),3)      +
pow(d3encoder,2)*pow(cos(q2encoder),2)*pow(sin(q1encoder),2)*sin(q2encoder)      +
pow(d3encoder,2)*pow(sin(q1encoder),2)*pow(sin(q2encoder),3))      -
(deltaZ*sin(q2encoder))/(d3encoder*pow(cos(q2encoder),2) + d3encoder*pow(sin(q2encoder),2)))));

deltaD3      =      ((deltaZ*cos(q2encoder))/(pow(cos(q2encoder),2)      +      pow(sin(q2encoder),2))      -
(deltaX*(beta2*sin(q1encoder)      -
d3encoder*cos(q1encoder)*sin(q2encoder)))/(d3encoder*pow(cos(q1encoder),2)*pow(cos(q2encoder),2)      +
d3encoder*pow(cos(q1encoder),2)*pow(sin(q2encoder),2)      +
d3encoder*pow(cos(q2encoder),2)*pow(sin(q1encoder),2)      +
d3encoder*pow(sin(q1encoder),2)*pow(sin(q2encoder),2))      +      (deltaY*(beta2*cos(q1encoder)      +
d3encoder*sin(q1encoder)*sin(q2encoder)))/(d3encoder*pow(cos(q1encoder),2)*pow(cos(q2encoder),2)      +
d3encoder*pow(cos(q1encoder),2)*pow(sin(q2encoder),2)      +
d3encoder*pow(cos(q2encoder),2)*pow(sin(q1encoder),2)      +
d3encoder*pow(sin(q1encoder),2)*pow(sin(q2encoder),2)))));

eAcimut_act = deltaQ1*10;
eCenit_act = deltaQ2*10;

```

```
//saturación de la velocidad en un valor definido para asegurar intervalos de velocidad pequeños y evitar así
//comportamientos inestables en el control de trayectorias
```

```
if (eAcimut_act >0.09){eAcimut_act = 0.09;}
else if(eAcimut_act<-0.09){eAcimut_act =-0.09;}
else {eAcimut_act = eAcimut_act;}
if (eCenit_act >0.08){eCenit_act = 0.08;}
else if(eCenit_act<-0.08){eCenit_act =-0.08;}
else {eCenit_act = eCenit_act;}
}
```

```
void PID()
```

```
{
//Función que contiene las ecuaciones de diferencias de los controladores PID
pwmAcimut_act = pwmAcimut_ant/4 + 899.12*eAcimut_act + 95.86*eAcimut_ant + 72*eAcimut_ant2;
pwmCenit_act = pwmCenit_ant/4 + 950.7*eCenit_act + 75.47*eCenit_ant + 65.94*eCenit_ant2;
if (pwmAcimut_act > 145){pwmAcimut_act = 145;}
else if (pwmAcimut_act < -145){pwmAcimut_act = -145;}
else{pwmAcimut_act = pwmAcimut_act;}
if (pwmCenit_act > 160){pwmCenit_act = 160;}
else if (pwmCenit_act < -140){pwmCenit_act = -140;}
else{pwmCenit_act = pwmCenit_act;}
}
```

```
void modulacionPulsos()
```

```
{
//Función que controla las direcciones de giro de las articulaciones y envía la señal PWM a los motores
if (pwmAcimut_act > 0 ){digitalWrite(dir_acimut,HIGH);} else {digitalWrite(dir_acimut,LOW);}
if (pwmCenit_act > 0 ){digitalWrite(dir_cenit,HIGH);} else {digitalWrite(dir_cenit,LOW);}
eAcimut_ant2 = eAcimut_ant;
eAcimut_ant = eAcimut_act;
pwmAcimut_ant = pwmAcimut_act;
eCenit_ant2 = eCenit_ant;
eCenit_ant = eCenit_act;
pwmCenit_ant = pwmCenit_act;
pwmAcimut_act =abs(pwmAcimut_act);
pwmCenit_act = abs(pwmCenit_act);
}
```

```

pwmAcimut_act = 255-pwmAcimut_act; pwmCenit_act = 255-pwmCenit_act;
analogWrite(motor_acimut,pwmAcimut_act);
analogWrite(motor_cenit,pwmCenit_act);
}

void horaFecha()
{
//Función que cuenta el tiempo haciendo uso de la libreria Time.h de Arduino. Necesario en las ecuaciones de
//trayectoria solar
double residuo;
actual = now();
diaTime = day(actual);
mes = month(actual);
anio = year(actual);
horaTime = hour(actual);
minuto = minute(actual);
minutoRobot = minuto/60;
segundo = second(actual);
segundoRobot = segundo/3600;
hora = horaTime+minutoRobot+segundoRobot;
residuo = anio%4;
if (residuo == 0&& mes>2){diaTime = diaTime+1;}//año bisiesto
switch (mes)
{
case 1://enero
dia = diaTime;
break;
case 2://febrero
dia = 31+diaTime;
break;
case 3: //marzo
dia = 59+diaTime;
break;
case 4: //abril
dia = 90+diaTime;
break;

```

```

case 5: //mayo
dia = 120+diaTime;
break;
case 6://junio
dia = 151+diaTime;
break;
case 7://julio
dia = 181+diaTime;
break;
case 8://agosto
dia = 212+diaTime;
break;
case 9://septiembre
dia = 243+diaTime;
break;
case 10://octubre
dia = 273+diaTime;
break;
case 11://noviembre
dia = 304+diaTime;
break;
case 12://diciembre
dia = 334+diaTime;
break;
default:
Serial.println("valor invalido de dia del año");
dia = 1;
}}

//***** FUNCIONES PARA
//***** POSICION DE
//***** CASA

//Grupo de funciones para el posicionamiento autónomo del robot con el pirheliometro paralelo a la horizontal
//y alineado al norte geográfico. Haciendo uso de un magnetómetro y acelerometro. Descartadas debido a los
//resultados no óptimos obtenidos en la experimentación

void azimuthhome()

```

```

{
int i=0;
float ab_error;
for (i=0;i<=2;i++)
{
compass.read();
azimut = compass.heading()-4.4;
if (azimut <0)
{
azimut= 360+azimut;
}

if (azimut>=0 && azimut<90){cuadrante_azimut = 1;}else if (azimut>=90 &&azimut<180){cuadrante_azimut = 2;}
else if(azimut >=180 &&azimut<270){cuadrante_azimut = 3;}else if (azimut >=270 &&
azimut<360){cuadrante_azimut=4;}

else {Serial.println("Espacio de trabajo en acimut no definido");Serial.println(azimut);}

switch (cuadrante_azimut)
{
case 1:
if (azimut>180){azimut = azimut-360;}
error_azimut = 0-azimut;
ab_error = abs(error_azimut);
if (ab_error<0.02)
{
i=3;
Serial.println("calibracion de acimut completa");
Serial.println(azimut);
delay(3000);
}
else
{
i=0;
Serial.println("calibrando posicion de casa de acimut solar...");
if (error_azimut<0){digitalWrite(dir_acimut,LOW);}
else {digitalWrite(dir_acimut,HIGH);}
Serial.println(azimut);
}
}
}

```

```

digitalWrite(motor_acimut,LOW);
delayMicroseconds(ab_error*3500);
digitalWrite(motor_acimut,HIGH);
delayMicroseconds(8000);
}
break;

case 2:
digitalWrite(dir_acimut,LOW);
digitalWrite(motor_acimut,LOW);
delayMicroseconds(3000);
digitalWrite(motor_cenit,HIGH);
delayMicroseconds(7000);
i=0;
break;

case 3:
digitalWrite(dir_acimut,LOW);
digitalWrite(motor_acimut,LOW);
delayMicroseconds(3000);
digitalWrite(motor_cenit,HIGH);
delayMicroseconds(7000);
i=0;
break;

case 4:
if (azimut>180){azimut = azimut-360;}
error_azimut = 0-azimut;
ab_error = abs(error_azimut);
if (ab_error<0.02)
{
i=3;
Serial.println("calibracion de acimut completa");
Serial.println(azimut);
delay(3000);

```

```

}
else
{
i=0;
Serial.println("calibrando posicion de casa de acimut solar");
if (error_azimut<0){digitalWrite(dir_acimut,LOW);}
else {digitalWrite(dir_acimut,HIGH);}
Serial.println(azimut);
digitalWrite(motor_acimut,LOW);
delayMicroseconds(ab_error*3500);
digitalWrite(motor_acimut,HIGH);
delayMicroseconds(8000);
}
break;

default:
Serial.println("Espacio de trabajo en acimut no definido");
}}}

void cenithome()
{
int i=0;
float ab2_error;
for (i=0;i<=2;i++)
{
compass.read();
acelx = compass.a.x;
acely = compass.a.y;
acelz = compass.a.z;
if(acelx>=0 && acelz>=0){cuadrante_cenit = 1;}else if (acelx>=0 && acelz<=0){cuadrante_cenit =2;}
else if(acelx<=0 && acelz<=0){cuadrante_cenit = 3;}else if (acelx<=0 && acelz>=0){cuadrante_cenit =4;}
else{Serial.println("posicion indeterminada");}

switch(cuadrante_cenit)
{

```

```

case 1:
cenit =1+atan(accelx/accelz)*180/3.1415;
error_cenit = 0-cenit;
ab2_error = abs(error_cenit);
if (ab2_error<0.02)
{
i=3;
Serial.println("calibracion de angulo de elevacion solar completa");
Serial.println(cenit);
delay(3000);
}
else
{
i=0;
Serial.println("calibrando posicion de casa de angulo de elevacion solar...");
if (error_cenit<0){digitalWrite(dir_cenit,LOW);}
else {digitalWrite(dir_cenit,HIGH);}
Serial.println(cenit);
digitalWrite(motor_cenit,LOW);
delayMicroseconds(ab2_error*5000);
digitalWrite(motor_cenit,HIGH);
delayMicroseconds(8000);
break;

case 2:
digitalWrite(dir_cenit,LOW);
digitalWrite(motor_cenit,LOW);
delayMicroseconds(3000);
digitalWrite(motor_cenit,HIGH);
delayMicroseconds(7000);
i=0;
break;

case 3:
digitalWrite(motor_cenit,HIGH);

```

```

Serial.println("cuadrante_cenit 3, espacio de trabajo no definido");
i=0;
break;

case 4:
if(accelx>-11500)
{
cenit = 1+atan(accelx/accelz)*180/3.1415;
error_cenit = 0-cenit;
ab2_error = abs(error_cenit);
if (ab2_error<0.02)
{
i=3;
Serial.println("calibracion de angulo de elevacion solar completa");
Serial.println(cenit);
delay(3000);
}

else
{
i=0;
Serial.println("calibrando posicion de casa de angulo de elevacion solar...");
if (error_cenit<0){digitalWrite(dir_cenit,LOW);}
else {digitalWrite(dir_cenit,HIGH);}
Serial.println(cenit);
digitalWrite(motor_cenit,LOW);
delayMicroseconds(ab2_error*5000);
digitalWrite(motor_cenit,HIGH);
delayMicroseconds(8000);
}}
else {digitalWrite(motor_cenit,HIGH);Serial.println("Espacio de trabajo en cuadrante_cenit 4 no definido");i=0;}
break;
default:
Serial.print("Espacio de trabajo no definido");
}}}}

```

```
//***** INTERRUPTOS PARA
//***** CONTEO DE PULSOS DE
//***** ENCODERS
```

//Funciones para el conteo de pulsos de los codificadores de cuadratura de los motores, haciendo un llamado
//a la interrupción para evitar pérdida de datos durante la ejecución del resto de instrucciones dentro del //código
fuente

```
void doEncodeA_cenit()
{
if (digitalRead(channelPinA_cenit) == digitalRead(channelPinB_cenit))
{
ISRCounter_cenit++;
}
else
{
if (ISRCounter_cenit > 0) ISRCounter_cenit--;
}}
void doEncodeB_cenit()
{
if (digitalRead(channelPinA_cenit) != digitalRead(channelPinB_cenit))
{
ISRCounter_cenit++;
}
else
{
if (ISRCounter_cenit > 0) ISRCounter_cenit--;
}}
void doEncodeA_acimut()
{
if (digitalRead(channelPinA_acimut) == digitalRead(channelPinB_acimut))
{
ISRCounter_acimut++;
}
else
{
```

```
if (ISRCounter_acimut > 0) ISRCounter_acimut--;  
}  
}  
void doEncodeB_acimut()  
{  
if (digitalRead(channelPinA_acimut) != digitalRead(channelPinB_acimut))  
{  
ISRCounter_acimut++;  
}  
else  
{  
if (ISRCounter_acimut > 0) ISRCounter_acimut--;  
}}//*****FINAL DEL CÓDIGO
```

Apéndice D

Especificaciones de pirheliómetro



CH 1
Pyrheliometer

Instruction Manual

IMPORTANT USER INFORMATION

Reading this entire manual is recommended for full understanding of the use of this product.

Should you have any comments on this manual we will be pleased to receive



them at:

Kipp & Zonen B.V.
Delftechpark 36
2628 XH Delft Holland
P.O. Box 507 2600 AM Delft Holland
Phone +31 (0)15 2755210
Fax +31 (0)15 2620351
Email info@kippzonen.com
Web www.kippzonen.com

Kipp & Zonen reserve the right to make changes to the specifications without prior notice.

WARRANTY AND LIABILITY

Kipp & Zonen guarantees that the product delivered has been thoroughly tested to ensure that it meets its published specifications. The warranty included in the conditions of delivery is valid only if the product has been installed and used according to the instructions supplied by Kipp & Zonen.

Kipp & Zonen shall in no event be liable for incidental or consequential damages, including without limitation, lost profits, loss of income, loss of business opportunities, loss of use and other related exposures, however caused, arising from the faulty and incorrect use of the product. User made modifications can affect the validity of the CE declaration.

COPYRIGHT® 2001 KIPP & ZONEN

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, without permission in written form from the company.

Manual revision: 0706



DECLARATION OF CONFORMITY
According to EC guideline 89/336/EEC

We **Kipp & Zonen B.V.**
Delftechpark 36
2628 XH Delft
The Netherlands

Declare under our sole responsibility that the product

Type: **CH 1**
Name: **Pyrheliometer**

To which this declaration relates is in conformity with the following standards

Imissions	EN 50082-1	Group standard
	IEC 100-4-2	IEC 801-2 8 kV
	IEC 100-4-3	IEC 801-3 3 V/m
	IEC 100-4-4	IEC 801-4 1 kV
Emissions	EN 50081-1	Group standard
	EN 55022	

Following the provisions of the directive



B.A.H. Dieterink
President
KIPP & ZONEN B.V.

1. GENERAL INFORMATION

The pyrheliometer CH 1 is designed to measure the irradiance which results from the radiant flux from a solid angle of 5° . A drawing of the CH 1 is shown in figure 1.1. By aiming the pyrheliometer at the sun, the direct solar irradiance, perpendicular to the detector surface is measured. The CH 1 is designed for continuous outdoor use.

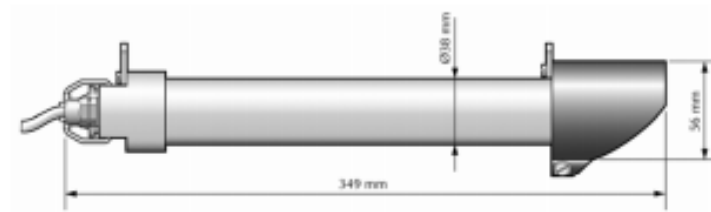


Fig. 1.1. Dimensions of the CH 1 pyrheliometer.

In terms of the ISO 9060 standard, which has been accepted by WMO, the CH 1 measuring specifications are in accordance with "first class" pyrheliometers. In order to obtain full first class specification, the pyrheliometer must periodically be compared to a higher standard (ISO 9060, 1990 E, specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation).

There are, however, specifications that are not within the ISO classification, most notably the opening and slope angle. These are chosen according to WMO recommendations (Revised Instruction Manual on Radiation Instruments and Measurements). The CH 1 is available with a number of options, which are described in Appendix A.

The sight is meant to check proper alignment.

Water vapour can be absorbed in the drying cartridge.

2. SPECIFICATIONS

2.1 ISO SPECIFICATIONS

Response time	95%	7 s
	99%	10 s
Zero offset: Caused by 5 K/H change in ambient temperature		3 W/m ² .
Non stability		< 1 % per year.
Non linearity		< 0.2 % (< 1000 W/m ²).
Spectral selectivity within 0.35 to 1.5 µm.		< 0.5 %.
Temperature response percentage deviation due to ambient temperature (relative to 20 °C)		< 1 %, -20 to +50. < 1.5 %, -40 to +70.
Tilt response		None.
Traceability		To WRR.

OVERALL ISO CLASSIFICATION: FIRST CLASS

REMARK: *IN ORDER TO OBTAIN FULL ISO FIRST CLASS CLASSIFICATION, THE PYRHELIOMETER MUST PERIODICALLY BE COMPARED TO A HIGHER STANDARD.*

2.2 NON-ISO SPECIFICATIONS

Sensitivity	7-15 $\mu\text{V}/\text{Wm}^2$.
Spectral range	0.2 to 4 μm , 50 % points (see Appendix B.1).
Impedance	50-70 Ω .
Irradiance	0-4000 W/m^2 .
Operating temperature	-40 to +80 °C.
Full opening angle	$5^\circ \pm 0.2^\circ$ (To WMO Recommendations).
Slope Angle	$1^\circ \pm 0.2^\circ$ (To WMO Recommendations).
Sight accuracy	$\pm 0.2^\circ$ from optical axis.
Materials	Anodised aluminum case, stainless steel screws.
Window material	Infrasil I-301.
Weight	700 grams.
Desiccant	Silica gel.
Cable length	10 m
Absorber coating	Kipp & Zonen carbon black.

3. INSTALLATION

In general the pyrheliometer will be used to measure direct solar irradiance. In this application it will be installed in a tracker, which will either be a manually adjustable mount (see options A.1) or a full- or semi-automatic tracking system.

For installing the CH 1 on a mount or tracking system, a clamp with the suitable 38 mm diameter hole is to be preferred. This clamp must not obstruct the sight. For optimal performance of the tracking system, please ensure that the centre of gravity of the pyrheliometer is in a good position.

If the pyrheliometer is used with a filter wheel, installation of the rain screen is no longer possible.

4. TRACKING

Tracking should have no less accuracy than $\pm 0.75^\circ$ from ideal (See B.2). If more than 0.75° deviation occurs the sun starts falling partially outside of the field of view.

5. ELECTRICAL CONNECTION

Figure 5.1 shows the circuit diagram of the CH 1. Cables of up to 200 m are allowed as long as the resistance of the cable remains lower than 0.1 % of the impedance of the readout equipment. A surge arrester is incorporated.

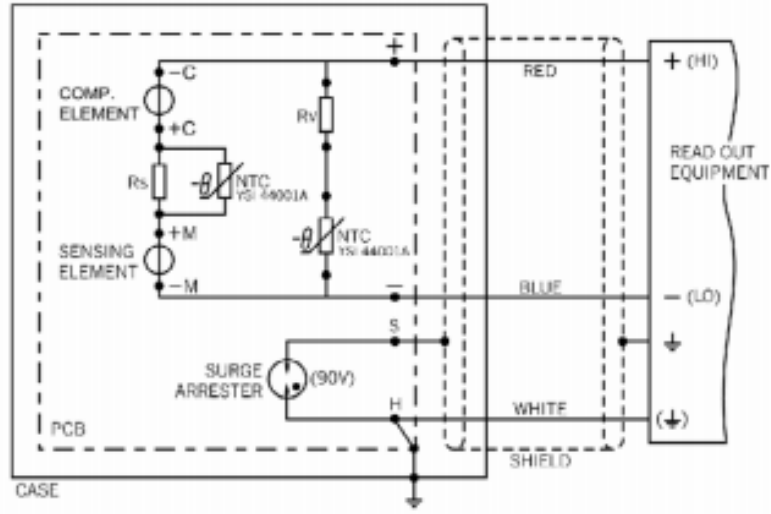


Fig. 5.1. Circuit diagram of the CH 1 pyrheliometer

6. AMPLIFICATION

Assuming that one wishes a measurement accuracy of 1 W/m^2 and the pyrheliometer has a typical sensitivity of 7 to $15 \text{ } \mu\text{V/Wm}^{-2}$ and an impedance of $70 \text{ } \Omega$, this implies certain specifications for amplification and data acquisition.

The amplifier should have a zero offset of less than 1 W/m^2 , that is (worst case) less than $7 \text{ } \mu\text{V}$.

Assuming that direct radiation is in the range of 0 to 1200 W/m^2 , the amplifier range should be 18 mV .

Non-linearity (of 1 Watt on a scale of 1200) should be less than 0.08% .

In case the signal is digitised, the resolution should be (worst case) smaller than $7 \text{ } \mu\text{V}$ or 1 W/m^2 .

The impedance of the amplifier should not be lower than 1000 times the output impedance of the pyrheliometer, which is at least $70 \text{ k}\Omega$.

7. MAINTENANCE AND OPERATION

For pyrheliometer operation, the most important aspects are:

**PROPER ALIGNMENT
PERFECTLY CLEAN WINDOW**



As part of the daily routine, inspection of alignment, window and drying cartridge are suggested.

As part of a monthly routine, inspection of leads and connections and replacement of drying cartridge could be performed.

Ensure that the silica gel is still coloured orange. When the orange silica gel in the drying cartridge is turned completely transparent (normally after several months), it must be replaced by active silicagel as supplied in the small refill packs. The content of one pack is sufficient for one complete refill.

On a yearly basis, a check on the calibration factor is advised. This can either be done by letting the pyrheliometer run parallel to a reference, or by performing an indoor calibration.

Apéndice E

Códigos fuente de la simulación del control de trayectorias Resolved Motion Rate Control en el entorno de Matlab

En la figura E1, se puede apreciar el diagrama del método de control Resolved Motion Rate Control. Para una mayor facilidad en el manejo de datos, se procedió a usar Simulink de Matlab para realizar las simulaciones de dicho control de trayectorias, debido a que es un entorno gráfico y facilita el orden de la información a través de bloques de programación.

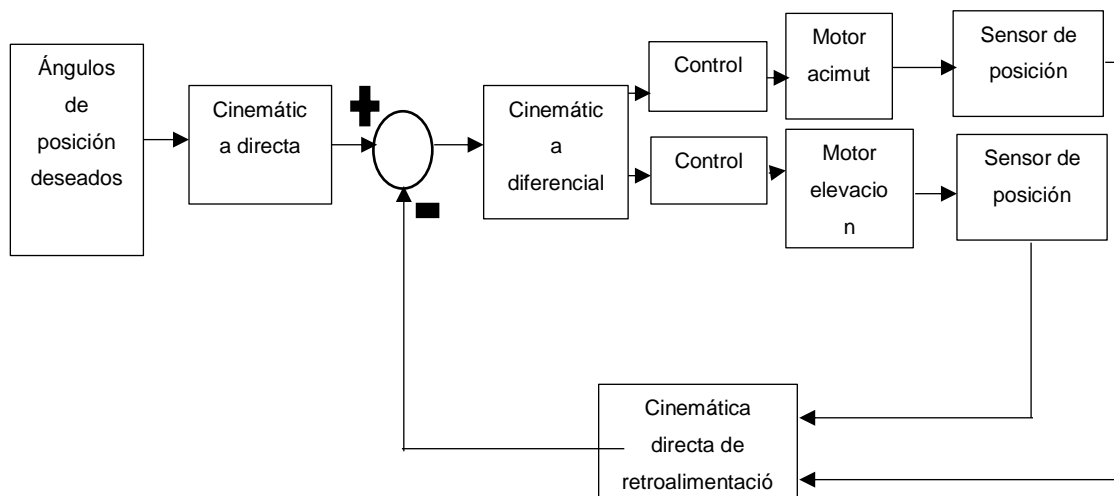


Figura E 1. Diagrama de bloques del método de control de trayectorias Resolved Motion Rate Control para el sistema de seguimiento solar.

Debido a que los bloques que contienen datos sobre las ecuaciones de seguimiento solar y la cinemática del robot poseen información robusta para realizar los cálculos necesarios, se optó por usar bloques de función dentro de las herramientas de Simulink para así poder programar cada uno en lenguaje M del entorno de Matlab. Cada bloque con el siguiente contenido:

- *Ángulos de posición deseados y Cinemática directa:* Estos bloques contienen las líneas de código necesarias para convertir las coordenadas deseadas en el espacio de trabajo articular del robot a coordenadas cartesianas.

El código implementado en ambos bloques anteriores es el siguiente

```
function [x0,y0,z0] = cinematica_directa(l1, beta1, beta2,d3, q1, q2)
%Donde l1, beta1, beta2,d3 son datos de la arquitectura del robot,
%calculados en la metodología Denavit-Hartenberg
%Y [x0,y0,z0] es el vector con las coordenadas de la posición deseada,
%ya definidas en el espacio cartesiano.

q1=pi*(-q1)/180;
q2=pi*(90-q2)/180;
x0=-beta2*sin(q1)+d3.*cos(q1).*sin(q2);
y0=beta2*cos(q1)+d3.*sin(q1).*sin(q2);
z0=beta1+l1+d3.*cos(q2);
```

- *Cinemática directa de retroalimentación:* La programación en este bloque se encarga de convertir las coordenadas de la posición real del robot definidas en el espacio articular al sistema de coordenadas cartesianas.

El código implementado en dicho bloque es el siguiente:

```
function [xr0,yr0,zr0]= cinematica_direct_retro(l1, beta1, beta2,dr3, qr1, qr2)
%Donde l1, beta1, beta2,dr3, qr1, qr2 son valores referentes a la
%arquitectura del robot y posición deseada.
% Y [xr0,yr0,zr0] corresponde al vector de la posición real del robot,
% definido en el espacio cartesiano

q1=pi*(-qr1)/180;
q2=pi*(90-qr2)/180;
xr0=-beta2*sin(q1)+dr3.*cos(q1).*sin(q2);
yr0=beta2*cos(q1)+dr3.*sin(q1).*sin(q2);
zr0=beta1+l1+dr3.*cos(q2);
```

- *Cinemática diferencial inversa:* Bloque de función que calcula la señal de control basándose en el diferencial de posición del robot respecto a la posición deseada.

```
function deltaq = jacobian_inv(beta2,qr1,qr2,dr3,dx,dy,dz)
%Donde qr1,qr2,dr3 son las coordenadas de posición real del robot definidas
%en el espacio articular
```

`%[dx,dy,dz]` el vector del diferencial de posición del robot respecto a la posición deseada, definido en el espacio cartesiano.
`%deltaq` es el vector de salida, que corresponde a la señal de control

```
qr1=pi*(-qr1)/180;
qr2=pi*(90-qr2)/180;
de=[dx;dy;dz];
jac_esferico=[-beta2*cos(qr1)-dr3.*sin(qr1).*sin(qr2)
dr3*cos(qr1).*cos(qr2) cos(qr1).*sin(qr2);dr3*cos(qr1).*sin(qr2)-
beta2*sin(qr1) dr3*cos(qr2).*sin(qr1) sin(qr1).*sin(qr2);0 -dr3*sin(qr2)
cos(qr2)];
jac_inverso = pinv(jac_esferico);
deltaq = jac_inverso*de
```

- *Control:* Dichos bloques no corresponden a bloques de función, si no a bloques PID dentro de las herramientas de simulink, en los que se agregaron las funciones de transferencia de los controladores PID independientes para cada actuador eléctrico de las articulaciones.
- *Motor Acimut y Elevación:* Bloques de funciones de transferencia en los que se agregaron las correspondientes a los sistemas electromecánicos de cada grado de libertad del robot.
- *Sensores de posición:* Bloques de la herramienta Simscape MultiBody de Simulink que calculan la posición angular del robot al establecer una comunicación con Solidworks, haciendo uso del gráfico del robot, mientras éste simula los movimientos en tiempo real.

Apéndice F

SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR PARA MEDICIÓN DE RADIACIÓN DIRECTA

Manual de operación

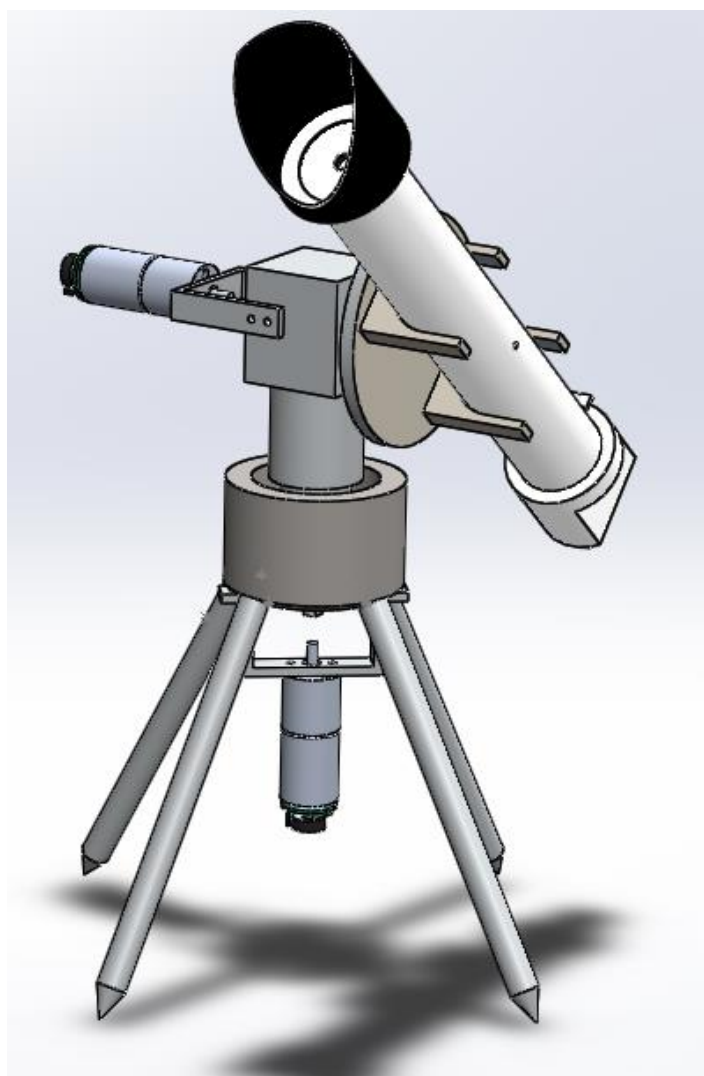


Figura F1. Sistema de Seguimiento Solar para la Medición de Radiación Directa

CONTENIDO

INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD IMPORTANTES

PREPARACIÓN

INSTALACIÓN DE SOFTWARE

SEGUIMIENTO SOLAR

INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD IMPORTANTES

- Todas las instrucciones de funcionamiento deben ser leídas antes de la operación del producto.
- No utilice el dispositivo cerca de fuentes de agua o humedad.
- Limpie con un paño seco únicamente. No utilice solventes o fluidos.
- Proteja los cables de alimentación para que no sean pisados o maltratados.
- Desconecte este aparato durante tormentas eléctricas.

ADVERTENCIA: Para reducir el riesgo de descarga eléctrica, no exponga el aparato a la cercanía con fuentes de líquidos como vasos, botellas, llaves de agua, grifos, etc.

SEGURIDAD ELÉCTRICA

- Los cables de alimentación del sistema deben ser conectados a una fuente de corriente alterna principal de 127 volts.
- Para prevenir una sobre carga, no comparta el mismo tomacorriente con otros componentes eléctricos.
- No coloque objetos pesados sobre los cables de conexión ya que podrían dañarlos.
- Sostenga los enchufes principales, no los cables, al momento de retirarlos del tomacorriente.
- Cuando el sistema se encuentre por largos periodos sin uso, manténgase desconectado.
- Mantenga el equipo alejado de los niños.

SEGURIDAD FÍSICA

- No bloquee el espacio de trabajo del sistema, deje una distancia libre mayor a 60 cm de radio alrededor del equipo.
- Guarde el sistema de seguimiento solar en un lugar ventilado y seco.
- No exponga el sistema a la intemperie si se encuentra en desuso.

PREPARACIÓN

CONTENIDOS



Figura F 2. Circuito de control

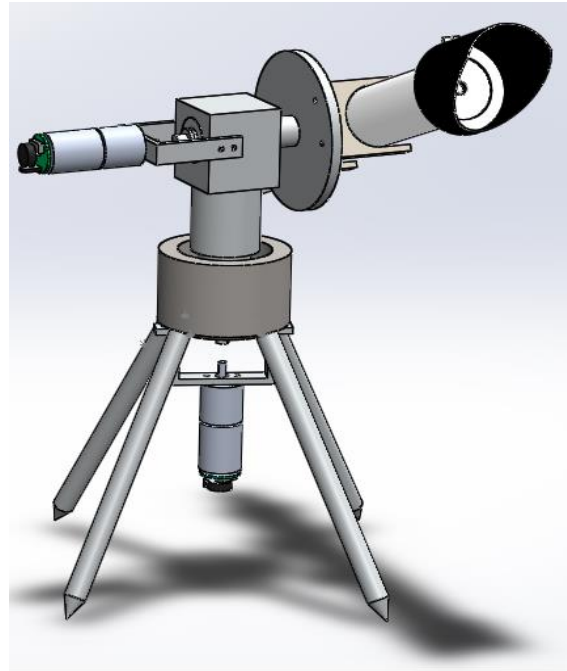


Figura F 3. Seguidor solar



Figura F 4. Fuente de voltaje



Figura F 5. Brújula y nivel de burbuja

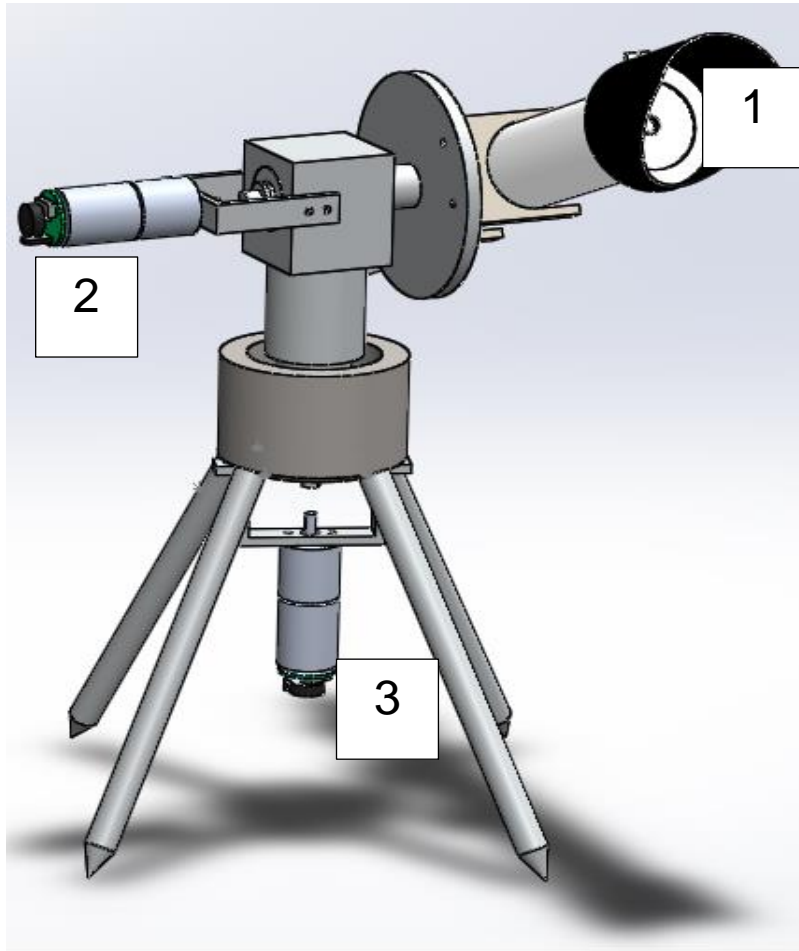


Figura F 6. Partes del seguidor solar

1. Pirheliómetro
2. Actuador eléctrico de elevación.
3. Actuador eléctrico de acimut.

CONEXIONES

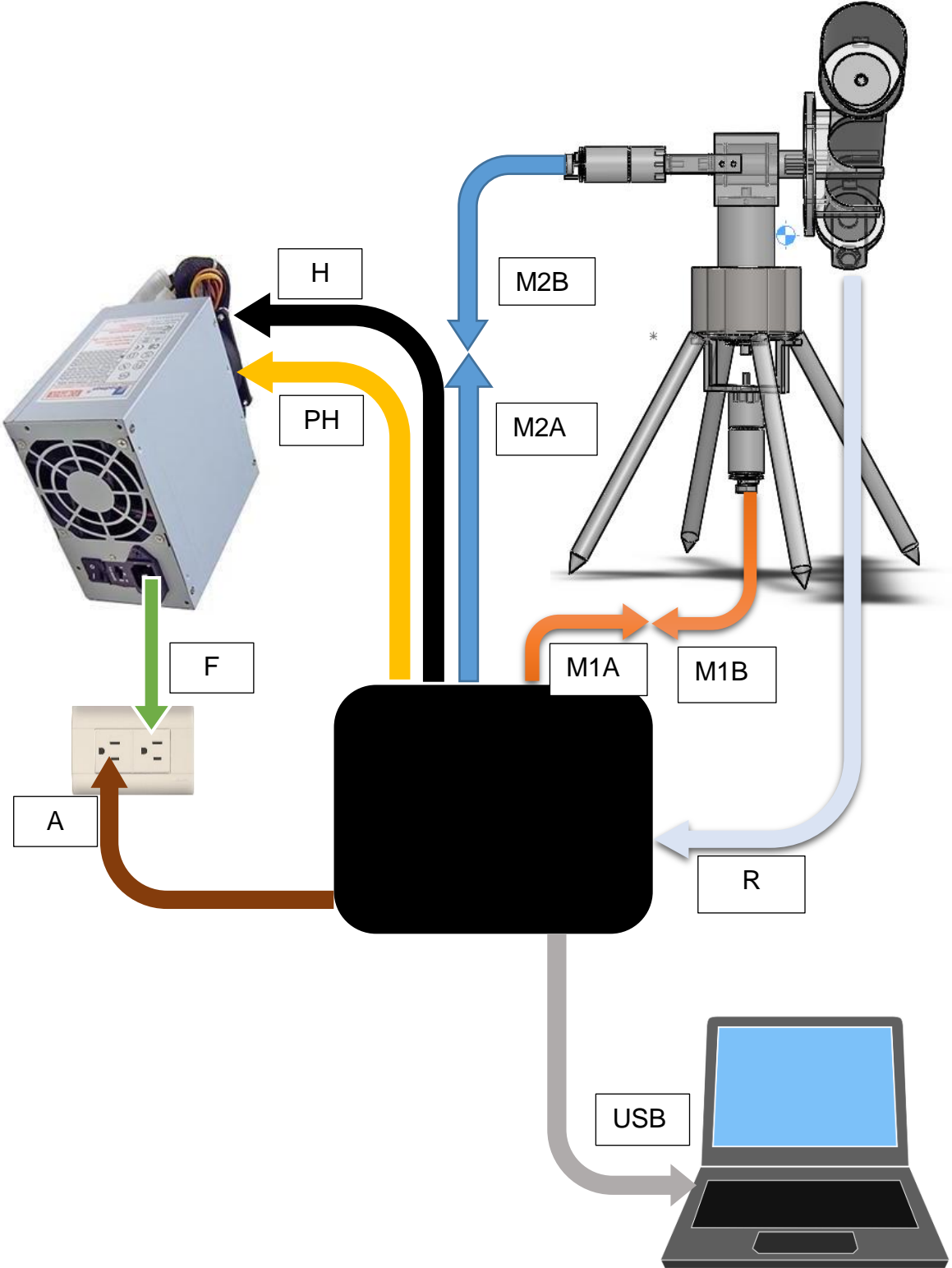


Figura F 7. Esquema general de conexiones.

A: cable de alimentación de los componentes del circuito de control. Conecte a un tomacorriente AC de 127 volts.

F: cable de alimentación de fuente de voltaje. Conecte a un tomacorriente AC de 127 volts.

PH: cables de alimentación del amplificador de voltaje de pirheliómetro. Conecte de la siguiente manera visualizando las etiquetas de cada cable:

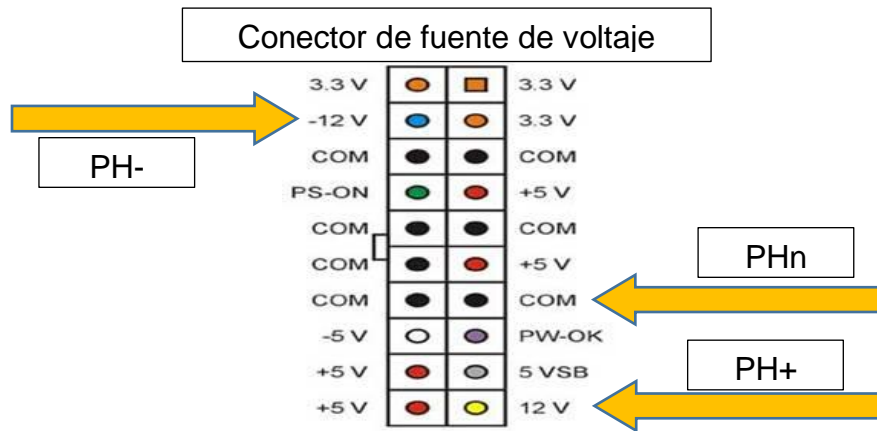


Figura F 8. Puertos de conexión del circuito amplificador del pirheliómetro.

H: Cables de alimentación de los actuadores eléctricos. Conecte de la siguiente manera visualizando los colores de cada cable.

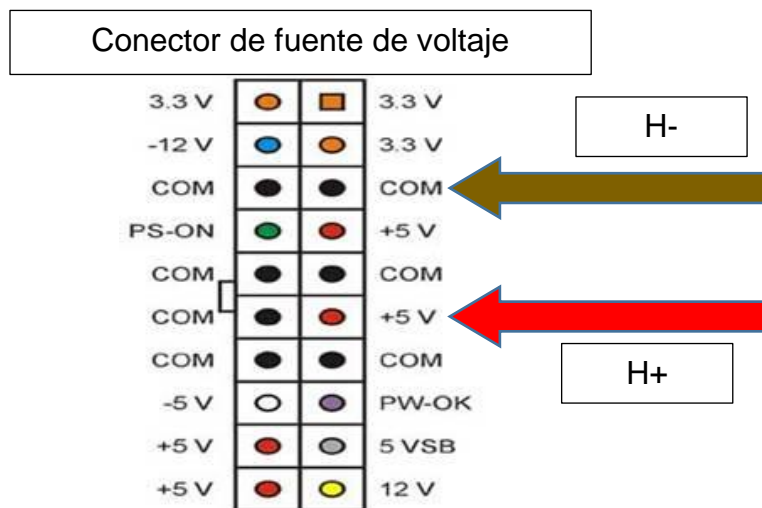


Figura F 9. Puertos de conexión de actuadores eléctricos.

M2A/ M2B: cables de control del actuador eléctrico de elevación. Conectar los pines haciendo coincidir los colores rojos de los cables, como se muestra en la siguiente figura:



Figura F 10. Pines de conexión M2A/M2B.

M1A/M1B: cables de control del actuador eléctrico de acimut. Conectar del mismo modo que las conexiones del actuador eléctrico de elevación, haciendo coincidir el color rojo de los cables en un extremo.

R: cables de señal del pirheliómetro. Para conectar, abra la caja protectora del circuito de control y localice el siguiente conector:

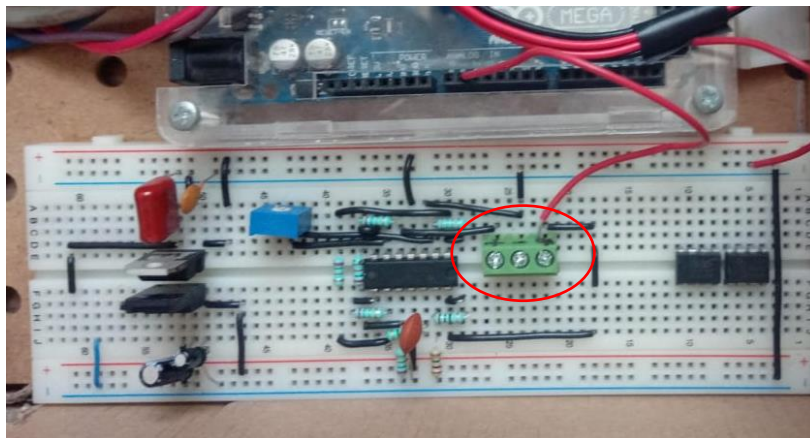


Figura F 11. Circuito amplificador de señal de pirheliómetro.

Conecte los cables del pirheliómetro como se muestra en la siguiente figura y ajuste nuevamente los tornillos para asegurar una buena conexión.

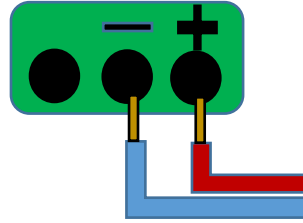


Figura F 12. Conexión del pirheliómetro al puerto de entrada del circuito amplificador de señal.

USB: cable de envío de datos al ordenador.

INSTALACIÓN DE SOFTWARE

ARDUINO

Entorno principal de programación.

Visite el sitio web <https://www.arduino.cc/en/main/software> y localice el siguiente menú:

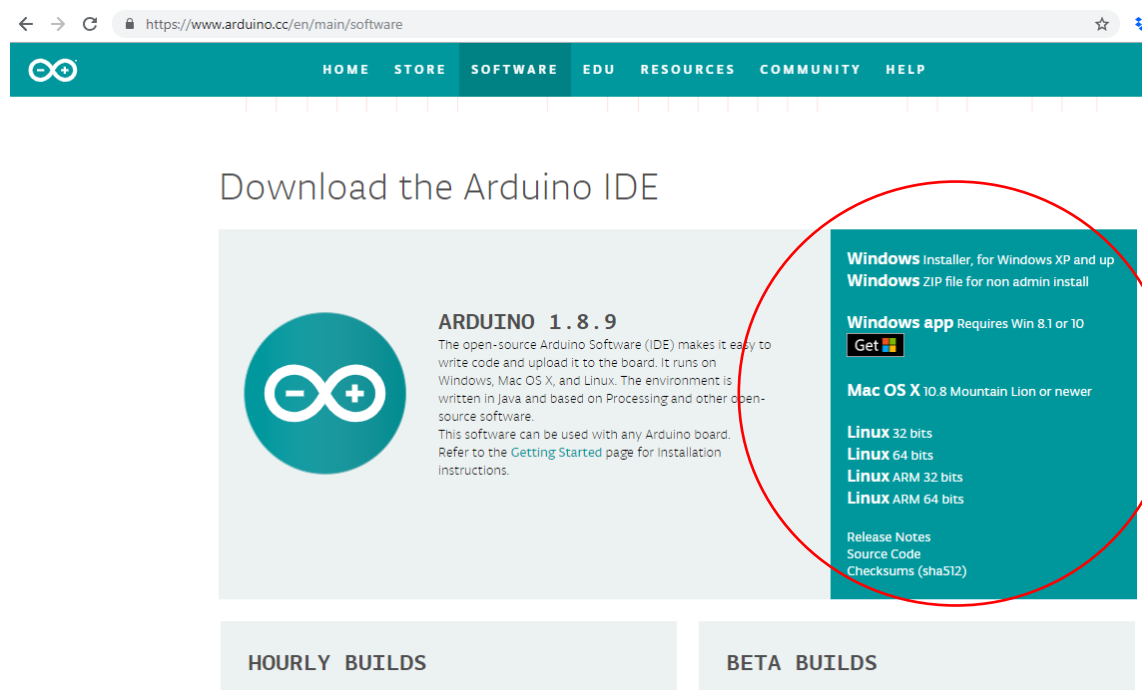


Figura F 13. Sitio web de Arduino.

Seleccione el archivo a descargar dentro de las opciones del círculo rojo basado en las especificaciones de su ordenador.

LIBRERÍA TIME ARDUINO

Esta librería se utiliza para medir el tiempo durante el seguimiento solar.

Visite el sitio web <https://github.com/PaulStoffregen/Time> y descargue el archivo dando click al botón que se muestra en la siguiente figura:

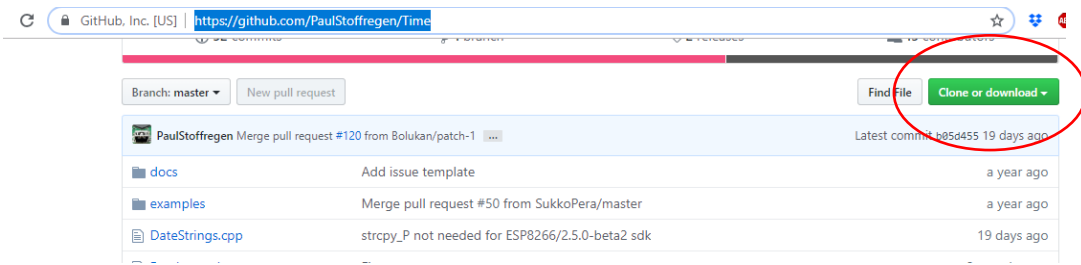


Figura F 14. Página de descarga de la librería Time.h.

Descomprima el archivo descargado y cópielo. Posteriormente vaya a la carpeta de archivos de Arduino que generó durante su instalación, accese a la carpeta “Libraries” y pegue ahí el archivo.

RUBY SOFTWARE

Programa para la adquisición y almacenamiento de los datos de radiación y posicionamiento del seguidor solar.

Visite el sitio web <https://www.ruby-lang.org/es/downloads/>, siga las instrucciones y descargue el programa RUBY basado en las características de su ordenador.

Una vez descargado, abra un archivo nuevo en el bloc de notas de su ordenador y escriba el código siguiente:

```
require 'serialport'  
  
filename = 'radiacion.txt'  
  
port_str = 2  
  
baud_rate = 9600  
  
data_bits = 8  
  
stop_bits = 1
```

```
parity = SerialPort::NONE

trap("INT") { puts "Apagando."; exit}

target = File.new(filename, 'w')

sp = SerialPort.new(port_str, baud_rate, data_bits, stop_bits, parity)

while(true) do

  message = (sp.gets)

  print message

  target.write(message)

end
```

Guarde el archivo en el escritorio con el formato "serial.rb". Este código sirve para entablar la comunicación entre Ruby y el puerto serial del computador para la recepción de información.

SEGUIMIENTO SOLAR

- Coloque el sistema de seguimiento solar sobre una superficie plana y nivelada con buena visibilidad del Sol.
- Oriente el pirheliómetro al sur y paralelo al piso haciendo uso de la brújula y el nivel de burbuja.
- Realice las conexiones del sistema como se explica en este manual.
- Corra en su computador el programa de Arduino y abra el archivo del código de control principal del seguidor solar.
- Diríjase a la línea 64 del código fuente y edite la hora y la fecha del vector que se muestra en la siguiente figura, siendo horas, minutos, segundos, día, mes y año respectivamente (para el ejemplo de la imagen corresponde a las 12:00 horas del día 14 de marzo de 2019).

```
//*****  
//*****  
void setup()  
{  
  Serial.begin(9600);  
  setTime(12, 0, 0, 14, 3, 2019); //*****  
  //*****  
  Wire.begin();  
}
```

Figura F 15. Fragmento de código fuente a modificar, previo a realizar seguimiento solar.

- Compile y cargue el código al seguidor solar.
- En su computador abra una ventana CMD o símbolo del sistema e ingrese el comando *cd desktop* y presione enter.
- Ingrese ahora el comando *ruby serial.rb* y presione nuevamente enter. Este comando ejecuta el archivo *serial.rb* que guarda la información recibida por el puerto serial y en ese momento visualizará al seguidor solar posicionándose. Este proceso toma aproximadamente 1 minuto.

Usted podrá monitorear en la pantalla del computador una tabla con las variables de posición solar, posición del seguidor solar, errores de posición, valor de radiación

medido y un texto que le informa si el robot está posicionándose o ya se encuentra realizando seguimiento solar. A su vez toda esta información esta siendo almacenada en un archivo de texto nombrado *radiación.txt* creado automáticamente y guardado en el escritorio del computador.

ADVERTENCIA: es importante que al finalizar el seguimiento solar copie la información almacenada en el archivo *radiación.txt* a otro destino para su futuro uso ya que, si no lo hace, al realizar una nueva medición de radiación perderá la información previa ya que el sistema guardará los nuevos datos.

FINALIZAR EL SEGUIMIENTO SOLAR

Para concluir un seguimiento solar y medición de radiación siga los siguientes pasos en orden consecutivo:

- Cierre la ventana CMD con la información monitoreada.
- Cierre el programa de Arduino.
- Desconecte el cable USB del computador.
- Desconecte el cable de A del tomacorriente.
- Desconecte el cable F del tomacorriente.
- Desconecte el resto de los cables sin importar el orden.
- Respalde la información generada en el archivo *radiación.txt* en su ordenador para evitar perderla al realizar una nueva medición.