



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño de un control
Automatizado de un Domo para
espectroscopia**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecatrónico

P R E S E N T A

Ricardo Rodriguez Rivera

DIRECTOR DE TESIS

M. I. Miguel Ángel Robles Roldan



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

Agradecimientos

Quiero aprovechar estas líneas para agradecer a mi familia, principalmente a mis padres por su apoyo y paciencia para terminar este proyecto que representó un gran reto en mi vida, y por brindarme los medios y la libertad para continuar. A la Arq. Guadalupe Gonzalez Rosas, por ser mi compañera de vida, su apoyo constante, por motivarme a dar lo mejor de mí en cada paso de este recorrido.

A mi director de Tesis: M.I. Miguel Angel Robles Roldan por su apoyo, paciencia y confianza al tomar la decisión de apoyarme en este camino para titularme, por su esfuerzo, dedicación y sobre todo su gran vocación de enseñanza.

Al Centro de Ciencias de la Atmósfera:

Al Laboratorio de Espectroscopia, en especial al Dr Michel Grutter de la Mora, por su confianza y apoyos brindados para la conclusión de este proyecto. Por la libertad brindada y el buen ambiente de trabajo que pude encontrar en el espacio encontrado.

Al Dr Wolfgang Stremme, por siempre estar al pendiente del proyecto, brindarme su ayuda en la implementación, por brindarme el material y herramienta necesaria para su desarrollo y mantenimiento y por buscar la manera de apoyar a los alumnos que están en el laboratorio. A mis sinodales: Dr. Adrian Espinosa Bautista. M.I. Ulises Martin Peñuelas Rivas M.I. Jorge Armando Rodriguez Vera Ing. Neftali Florza Lopez

Y a cada persona que ha hecho más fácil o difícil el realizar este proyecto, porque han sido parte de mi aprendizaje y experiencia.

Índice

1. Introducción	6
2. Objetivos	7
2.1. Objetivo general	7
2.2. Objetivos particulares	7
3. Antecedentes	8
3.1. Domo instalado en el ICAyCC	8
3.2. Características del domo	9
4. Planteamiento del problema	12
5. Propuesta de prototipo	13
5.1. Sistema de potencia	14
5.2. Sistema de control principal	15
5.3. Sistema de comunicación	15
5.4. Sistema automático y sensores	16
6. Implementación del proyecto.	18
6.1. Sistema de potencia.	19
6.1.1. Filtrado por software de la señal de corriente de paro automático	21
6.2. Implementación de la Etapa de Potencia.	24
6.3. Sistema de comunicación.	32
6.4. Sistema automático.	35
6.4.1. Seguimiento por rastreador solar	35
6.4.2. Sensor de Lluvia	36
6.5. Sistema de control principal	37
6.5.1. Sensores críticos	39
6.5.2. Control de velocidad	39
6.5.3. Botón de reset	41
6.6. Sistema de comunicación (Procesamiento de datos y comandos)	41
7. Pruebas de funcionamiento	44
7.1. Velocidad y corriente	44
7.1.1. Resultados	44
7.2. Rotación del domo sin obstrucciones	46
7.2.1. Resultados	46
7.3. Rotación del domo con obstrucción	49
7.3.1. Resultados	49
7.3.2. Caso 1	49
7.3.3. Caso 2	49
7.4. Apertura del domo	51
7.5. Obstrucción para la apertura del domo	53
7.5.1. Resultados	53

7.6. Cierre del domo	56
7.6.1. Resultados	56
7.6.2. Pruebas de obstrucción para el cierre de la escotilla del domo	56
7.7. Pruebas del sistema automático	58
7.7.1. Resultados	59
8. Características del prototipo implementado	61
9. Conclusiones	62
10. Trabajo a futuro	63
11. Anexos	64
11.1. Tipos de domos	64
11.1.1. Domo semiesférico con apertura horizontal	65
11.1.2. Domo semiesférico de apertura tangencial	65
11.1.3. Domo semiesférico estático	65
11.1.4. Domo semicilíndrico estático	66
11.1.5. Domo semiesférico con doble eje de rotación	67
11.1.6. Domo cilíndrico	67
11.1.7. Telescopio robótico	68
11.2. Pruebas del sensor ultrasónico con diferentes formas	68
11.3. Filtros Digitales	71
11.3.1. Filtro media	71
11.3.2. Filtro mediana	72
12. Bibliografía	73

Índice de ilustraciones

1.	Dibujo representativo del experimento infrarrojo de absorción solar, instalado en el Observatorio Atmosférico de la UNAM.	8
2.	Domo marca Robodome, tipo Robo-dome sobre el cual se basa el presente trabajo.	9
3.	Estructura del domo, diferentes vistas.	9
4.	Motores de rotación y forma de sujeción.	10
5.	Corte transversal de la estructura de la escotilla del domo	11
6.	Diagrama de bloques de la propuesta del prototipo.	13
7.	Diagrama de bloques del sistema de potencia.	14
8.	Diagrama de bloques del sistema principal.	15
9.	Diagrama de bloques del sistema de comunicación.	16
10.	Diagrama de bloques del sistema automático.	17
11.	Prototipo del sistema completo para el funcionamiento del domo.	18
12.	Motores del domo con su ubicación real	19
13.	La gráfica muestra el comportamiento de la corriente en el motor de la escotilla del domo, alimentados a 13V y 11V al abrir y cerrar.	20
14.	La gráfica muestra el comportamiento de la corriente en motores de rotación para 13 V y 11 V.	21
15.	Gráfica de cambio de velocidad de los motores vs el consumo en su corriente.	21
16.	Gráfica de acondicionamiento de señal de corriente por medio de un filtro paso bajas digital.	23
17.	Diagrama del integrado L298 (imagen tomada de la hoja de datos).	24
18.	Diagrama de conexión en paralelo de un circuito integrado L298.	25
19.	Señales necesarias para controlar la tarjeta de potencia, simuladas en el software de electrónica Proteus.	26
20.	Simulación en Proteus del esquema y funcionamiento del sistema de potencia para mover tanto los motores de rotación como de la escotilla.	27
21.	Diagrama de conexión de los diodos para proteger el integrado L298, a causa del regreso de corriente de los motores por la inercia de su movimiento.	28
22.	Diagrama del circuito utilizado para implementar el LED del indicador de fallo en los módulos H.	29
23.	a) Esquema del circuito realizado por software(Eagle). b) Primer placa impresa en CNC con sus componentes soldados. c) Placas conectadas en serie.	29
24.	Prototipo del módulo de potencia para los motores de giro.	30
25.	Segunda tarjeta electrónica prototipo con ocho módulos H comerciales para apertura y cierre del domo.	31
26.	a) Elementos que conforman el circuito para la comunicación RS232 con la computadora. b) Xbee, dispositivo electrónico que nos permite mandar datos de manera inalámbrica. c) Dispositivo bluetooth HC06.	32
27.	Diagrama de bloques del sistema de comunicación.	33
28.	Diagrama de flujo del sistema de comunicación.	34
29.	Diagrama del sistema de seguimiento al rastreador.	35
30.	Plano del sistema automático. Se aprecia la variación de la distancia conforme al movimiento del rastreador en relación con el domo.	36
31.	Ubicación de sensores instalados en el domo.	37

32.	Diagrama de bloques del sistema de control principal.	38
33.	Circuito donde del sistema de control principal.	38
34.	Diagrama de bloques, funcionamiento del control de velocidad.	39
35.	Gráfica de correspondencia. Muestra la velocidad de domo con los valores que proporciona el potenciómetro instalado en la tarjeta principal.	40
36.	Diagrama de bloques: funcionamiento del domo, giro en ambos sentidos.	42
37.	Diagrama de bloques para cerrar el domo de forma emergente.	43
38.	Diagrama de bloques para cerrar el domo de forma emergente.	43
39.	Diagrama de bloques para incrementar la rapidez con el comando velocidad.	43
40.	Gráfica de velocidad de giro del domo, en relación con el porcentaje del valor registrado por el potenciómetro.	45
41.	Gráfica de corriente de consumo, en relación con el porcentaje del valor registrado por el potenciómetro.	46
42.	Gráfica de corriente. Muestra la rotación en sentido antihorario(valores negativos) con diferentes velocidades. Asimismo, se presenta cómo se obtuvo la corriente máxima.	47
43.	Gráfica de corriente. Muestra la rotación en sentido horario(valores positivos), con diferentes velocidades. Asimismo, se presentó cómo se obtuvo la corriente máxima.	47
44.	Gráfica de corriente. Con un retardo en la lectura, muestra la rotación en sentido antihorario(valores negativos) con diferentes velocidades, a fin de obtener estabilidad de corriente. Asimismo, la figura exhibe las diferencias en la corriente promedio de cada una.	48
45.	Gráfica de corriente. Con un retardo inicial en la lectura, muestra la rotación en sentido horario (valores positivos) con diferentes velocidades, a fin de obtener estabilidad de corriente. Asimismo, la figura exhibe las diferencias en la corriente promedio de cada una.	48
46.	Gráficas de corriente con obstrucción. Muestran la rotación en sentido antihorario (valores negativos), con diferentes velocidades y con retardo en la lectura. Lo dicho permite observar el incremento de corriente cuando el domo se atora.	50
47.	Gráficas de corriente con obstrucción. Muestran la rotación en sentido horario (valores positivos) con diferentes velocidades y con retardo en la lectura	51
48.	Gráfica de corriente. Muestra, con diferentes velocidades, la apertura de la escotilla del domo, así como el desglose de su corriente máxima y corriente promedio.	52
49.	Gráficas de corriente de apertura con obstrucción para diferentes velocidades.	54
50.	Gráficas de corriente de apertura con obstrucción y retardo para diferentes velocidades.	55
51.	Gráfica de corriente. Muestra pruebas para el cierre de escotilla, con diferentes velocidades, a fin de obtener tanto la corriente máxima como la corriente promedio.	56
52.	Gráficas de corriente. Muestran pruebas con obstrucción para el cierre de escotilla, con diferentes velocidades. Los datos también se comparan con su corriente nominal de funcionamiento.	58
53.	Gráfica de distancia registrada por el sensor ultrasónico.	59
54.	Pruebas realizadas con el prototipo semi leva de madera.	60
55.	a) Borne extra en la tarjeta de control principal del domo para conectar un sensor de fin de carrera. b) Brújula HMC6352. c) Sensor de Luz.	63
56.	La imagen presenta los seis primeros domos enlistados líneas arriba.	64
57.	Imágenes de telescopios semiesféricos de apertura horizontal.	64

58.	Imágenes de centros de observación que cuentan con domos semiesféricos de apertura tangencial.	65
59.	Imágen con distintas marcas y modelos de domo semiesféricos estáticos.	66
60.	La fotografías muestran nuevas implementaciones y modelos de domos semiesféricos estáticos.	66
61.	Imágenes con distintas marcas y modelos de domos semicilíndricos estáticos.	66
62.	Domos semiesféricos con doble eje de rotación	67
63.	El Observatorio Paranal emplea varios domos estáticos Very Large Telescope(VLT).	67
64.	Las fotografías muestran telescopios robóticos manejados vía remota a través de Internet.	68
65.	La fotografía muestra la estructura interior, donde se elaboró el sistema automático.	69
66.	La gráfica de barras muestra la distancia registrada con el sensor ultrasónico, dada la estructura interna inicial del domo.	69
67.	EL primer prototipo para el sistema automático permitió registrar una distancia de referencia.	70
68.	Esta gráfica de barras fue registrada por el sensor ultrasónico, con ayuda del primer prototipo.	70
69.	Las gráficas de barras representan las lecturas del sensor ultrasónico, implementando la estructura triangular del primer prototipo, al darle una vuelta al domo.	71
70.	Gráficas comparativas de señal	72
71.	Funcionamiento del filtro mediana.	72
72.	Gráficas comparativas de señal	73

Índice de tablas

1.	Tabla de configuración para los motores.	25
2.	Cuadro de verdad.	33
3.	Corriente límite de funcionamiento en la tarjeta electrónica prototipo, perteneciente al bloque del sistema principal.	41
4.	Cuadro descriptivo sobre los comandos aceptados por el microcontrolador.	42
5.	Cuadro de valores de la velocidad con su correspondiente valor de pwm y porcentaje equivalente.	45
6.	Tabla descriptiva de los diferentes comandos utilizados para controlar las funciones programadas del domo.	61

1. Introducción

La luz solar es la fuente primordial de energía para nuestro planeta. Observando cómo es absorbida a su paso por la atmósfera, es posible estudiar la composición de la atmósfera, a lo cual se le conoce como análisis espectroscópico de la composición atmosférica. Los datos que arrojan tales análisis se pueden utilizar para medir contaminantes en la atmósfera, y en consecuencia estudiar el comportamiento del efecto invernadero.

Un componente fundamental para realizar estos análisis es un sistema de rastreo solar que dirija la luz solar en constante movimiento a los equipos de monitoreo, normalmente fijos. Este sistema de rastreo requiere un domo que lo proteja de los efectos de la intemperie a la vez que permite el libre paso de la luz solar.

El Observatorio Atmosférico del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAYCC), cuenta con un espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), un sistema de rastreo alt-azimutal y un domo de la marca Home-Dome tipo RoboDome. Con el uso y el paso del tiempo, el sistema de movimiento del domo comenzó a presentar fallas, lo cual abrió la posibilidad de hacer mejoras y motivó el diseño que se presenta en este trabajo de tesis.

El presente trabajo consiste en el diseño de un nuevo sistema de control para el domo, que permita a los investigadores realizar mediciones de manera sencilla y cómoda. Las necesidades que deseables del sistema de control del domo para obtener la funcionalidad requerida son las siguientes: 1) cierre de emergencia en caso de lluvia; 2) paro en caso de sobrecarga; 3) manejo remoto; 4) combinación de funcionamiento automático/manual; 5) funcionamiento aun en caso de falla parcial; 6) facilidad operativa, y 7) eficiencia en el uso de energía. El presente trabajo intentó cubrir dichos puntos y en gran parte logró solventarlos, claro, con sus respectivas limitaciones. En los casos en que no se consiguió el objetivo, se hacen las observaciones pertinentes para que puedan ser cubiertos a futuro.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Diseñar y construir el reemplazo del sistema de control para un domo de seguimiento solar marca Homo-Dome, tipo RoboDome, para su uso en mediciones de espectrometría.

2.2. Objetivos particulares

- Realizar un diseño robusto contra fallas por sobrecarga y que facilite su mantenimiento correctivo o actualización.
- Contar con un funcionamiento automático para una ejecución continua.

3. Antecedentes

El Observatorio Atmosférico del ICAyCC, UNAM, cuenta con un espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR). Dado que trabaja con percepción remota pasiva, la fuente de luz es el Sol. Por esta razón, se necesita de un sistema de rastreador solar que dirija la luz del Sol a un punto fijo durante todo el día. Para esto, el rastreador mueve automáticamente dos motores con espejos (que corresponden a los ángulos cenital y acimutal), que dirigen el haz de luz proveniente del Sol hacia la entrada del espectrómetro (véase figura 1). Además del seguidor solar y del espectrómetro, se necesita de un domo motorizado que proteja al rastreador de la lluvia y el polvo durante la noche. Asimismo, el domo se debe mover a la par que el rastreador para garantizar que nunca se le haga sombra a los espejos

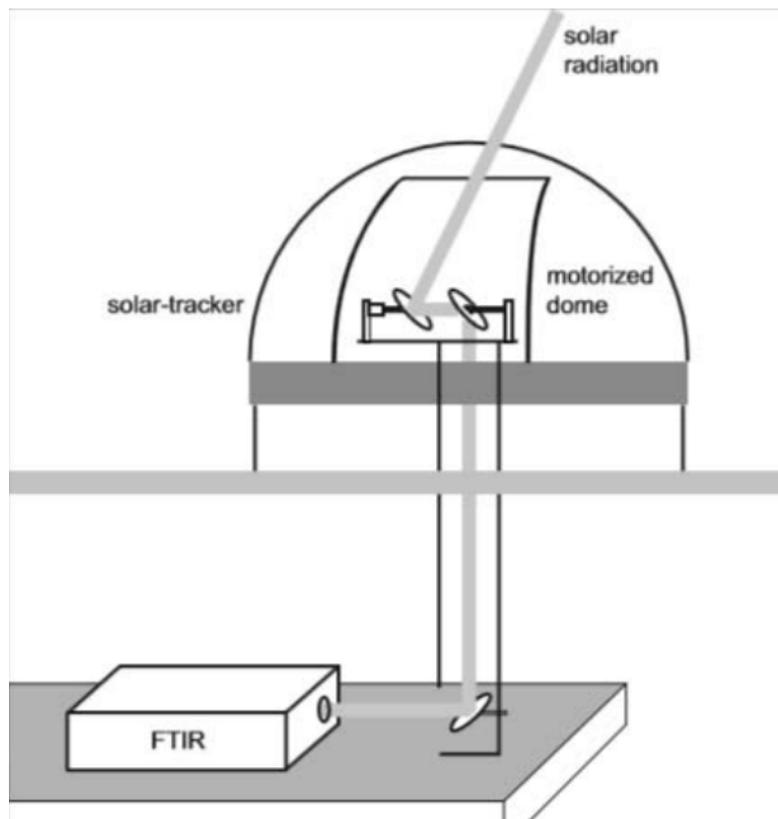


Figura 1: Dibujo representativo del experimento infrarrojo de absorción solar, instalado en el Observatorio Atmosférico de la UNAM.

3.1. Domo instalado en el ICAyCC

El presente proyecto llevó a cabo una serie de modificaciones en un domo de apertura tangencial marca Homo-dome, tipo Robo-dome (que se muestra en la figura 2).



Figura 2: Domo marca Robodome, tipo Robo-dome sobre el cual se basa el presente trabajo.

3.2. Características del domo

Cuenta con una estructura de fibra de vidrio, en forma de cúpula semiesférica (véase figura 3). La brida en su interior conecta la base con el domo para darle movimiento. Asimismo, contiene rodamientos sobre los cuales descansa. Por último, presenta dos motores encargados de hacerlo girar sobre su propio eje.

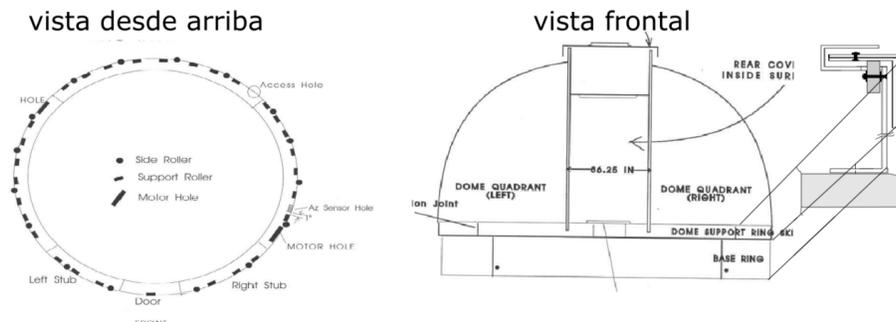


Figura 3: Estructura del domo, diferentes vistas.

Los motores que controlan el giro son moto-reductores. Funcionan con 12 V de corriente directa, aco-

plados a un sistema de accionamiento por fricción, con contacto directo a la base del domo. Están fijos a dos placas móviles, unidas con un resorte, que funciona como suspensión para un mejor contacto con la base del domo (véase figura 4).

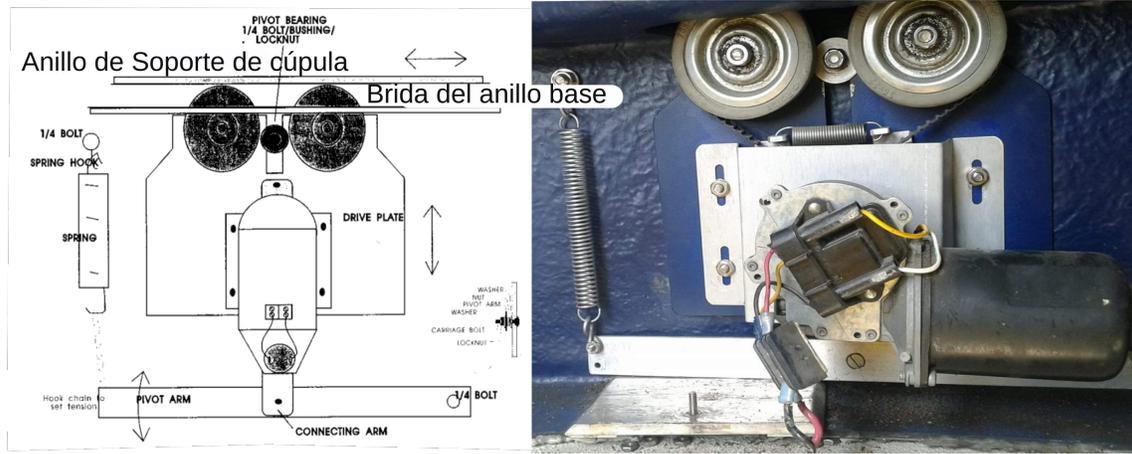


Figura 4: Motores de rotación y forma de sujeción.

Además, el domo cuenta con una escotilla fragmentada en tres piezas móviles, estilo persianas, capaces de contraerse cuando el domo abre o cierra (véase figura 5). Lo anterior se da gracias a un cable de acero de $\frac{3}{4}$ de pulgada, el cual jala o suelta (según sea el caso), con ayuda de un tornillo sin fin y de poleas que guían el cable. Por otra parte, el domo tiene un punto fijo en su rotación que hace contacto con dos placas, las cuales alimentan el motor de apertura. Por ende, el domo siempre tiene que estar en dicho punto (Home) cuando se quiera abrir o cerrar.

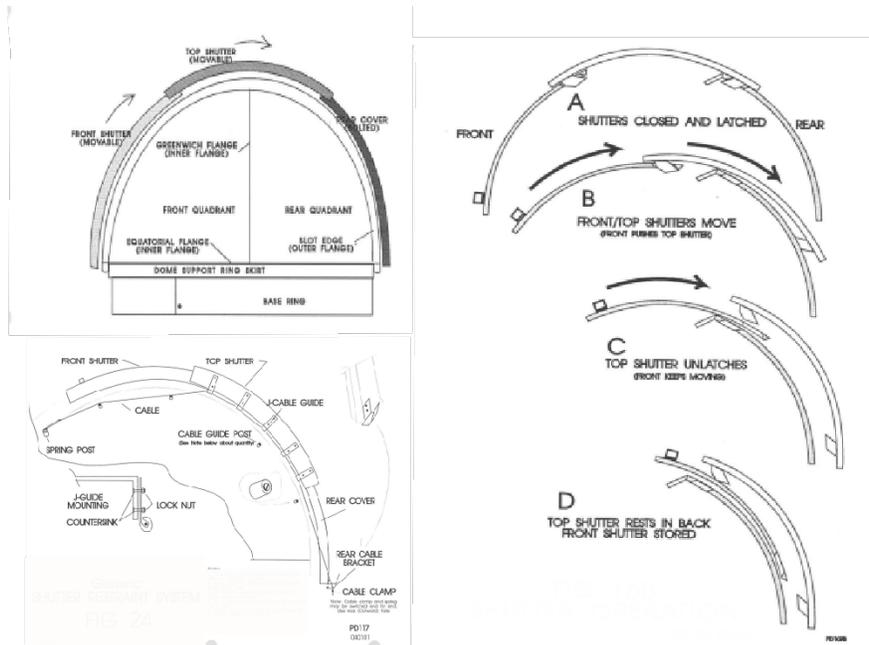


Figura 5: Corte transversal de la estructura de la escotilla del domo

4. Planteamiento del problema

Debido a desgaste por uso y conexiones erróneas, el sistema del domo comenzó a presentar fallos en el sistema de control original. La falla principal era que constantemente las tarjetas electrónicas se quemaban hasta quedar inservibles, a causa de la demanda de potencia de los motores. Fue entonces que se planteó la necesidad de elaborar un nuevo diseño. En este nuevo diseño se consideró reutilizar la infraestructura ya instalada del domo: la cúpula y los motores. Un punto deseable para el nuevo diseño era que cumpliera al menos con las mismas características que el anterior, añadiendo ciertas mejoras, de forma que evitara fallas y lo convirtieran en una herramienta más eficiente. Tomando en cuenta los propósitos mencionados, se establecieron las siguientes pautas de diseño:

- Generación de un sistema de potencia modular para su correcto funcionamiento, incluso en caso de falla, aislando posibles cortos circuitos por exceso de corriente.
- Comunicación permanente con una computadora, lo cual facilitará su uso de manera remota.
- Creación de un control a corta distancia con ayuda de un dispositivo móvil.
- Funcionamiento de forma automática para seguir al rastreador solar.
- Cierre total en caso de lluvia.
- Cierre total en el menor tiempo posible.

5. Propuesta de prototipo

Para facilitar su implementación, se tomó como base un diseño modular del sistema, conformado por cuatro partes (véase figura 6):

- 1) sistema de potencia, dividido en dos bloques: uno para el motor de apertura, otro para los motores de giro;
- 2) sistema de control principal: facilita manejar los demás sistemas;
- 3) sistema de comunicación: permite al usuario manejar el equipo, y;
- 4) sistema automático.

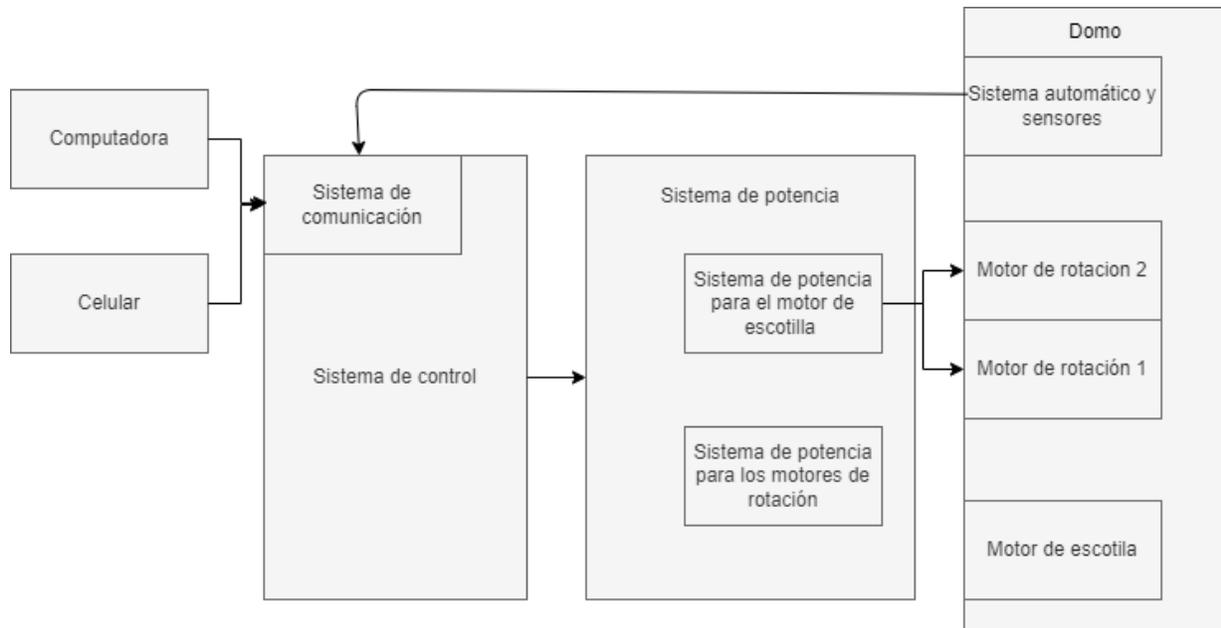


Figura 6: Diagrama de bloques de la propuesta del prototipo.

5.1. Sistema de potencia

Su función es alimentar los motores con la potencia necesaria, así como brindar la posibilidad de variar su velocidad y sentido de giro. Además, el sistema de potencia estará programado para detener su funcionamiento si existe una sobrecarga. Se pretende que cualquier sobrecarga sólo perjudique a una parte y no a la totalidad del sistema. Permitiendo al sistema seguir en funciones, mientras se reemplaza la pieza dañada. Para conseguir lo anterior, se planea la construcción de un sistema modular. Consiste en usar múltiples módulos de salida de potencia que alimenten tanto al motor de apertura, como a los motores de giro (véase figura 7).

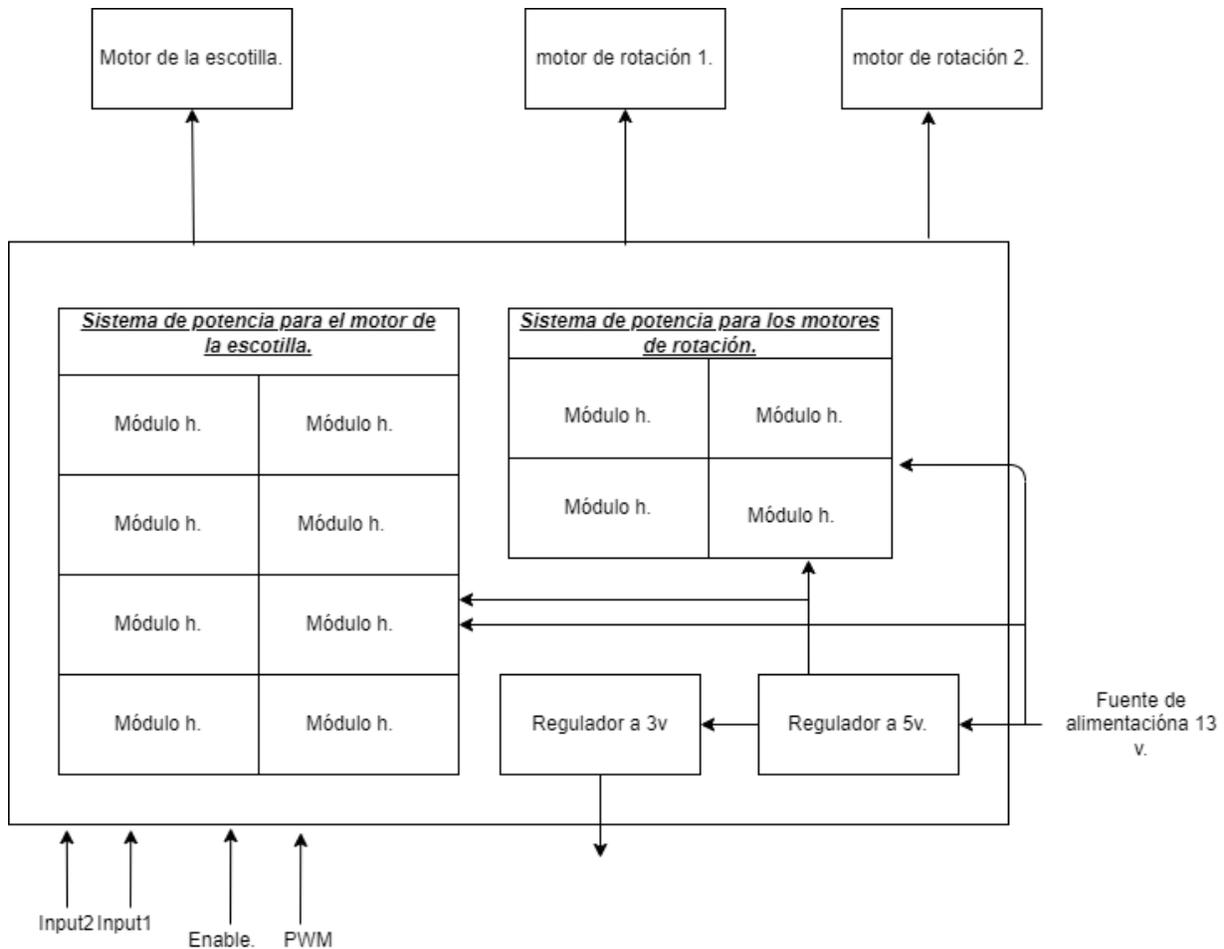


Figura 7: Diagrama de bloques del sistema de potencia.

5.2. Sistema de control principal

El sistema de control principal se encarga de procesar los datos provenientes de los sensores, enviar señales de control hacia los motores, así como manejar la información recibida del usuario por medio de la tarjeta de comunicación (véase figura 8).

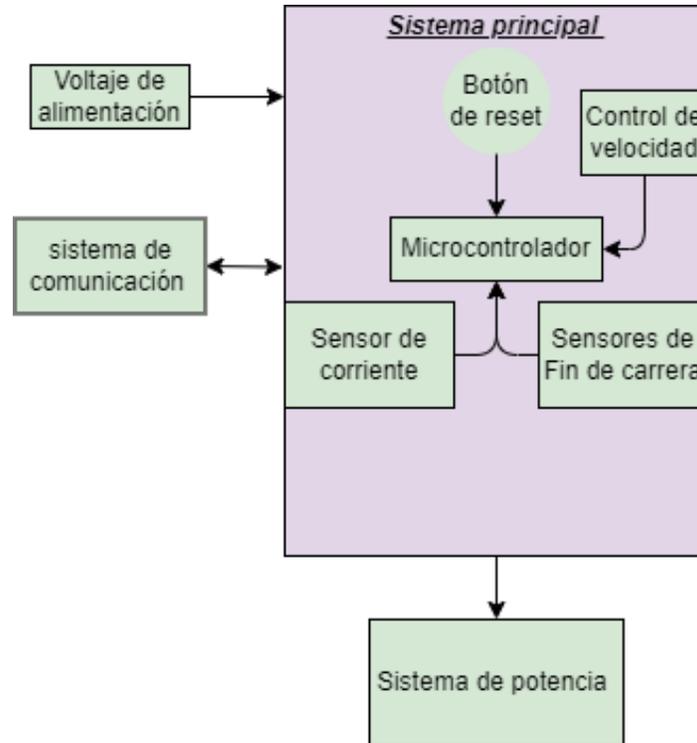


Figura 8: Diagrama de bloques del sistema principal.

5.3. Sistema de comunicación

Encargado de permitir la interacción entre usuario y domo por 3 vías: 1) la computadora; 2) un dispositivo móvil (celular), y 3) el sistema automático. Estas 3 vías se pueden considerar como 3 maneras de funcionamiento. La primera únicamente emite comandos con la computadora. La segunda recibe datos del sistema automático, gracias a los cuales el domo se mueve, sin perder por ello el control con la computadora. Por último, tenemos la comunicación con el celular. Permite controlar el domo a cierta distancia, con la intención de monitorear su funcionamiento de forma directa (véase figura 9).

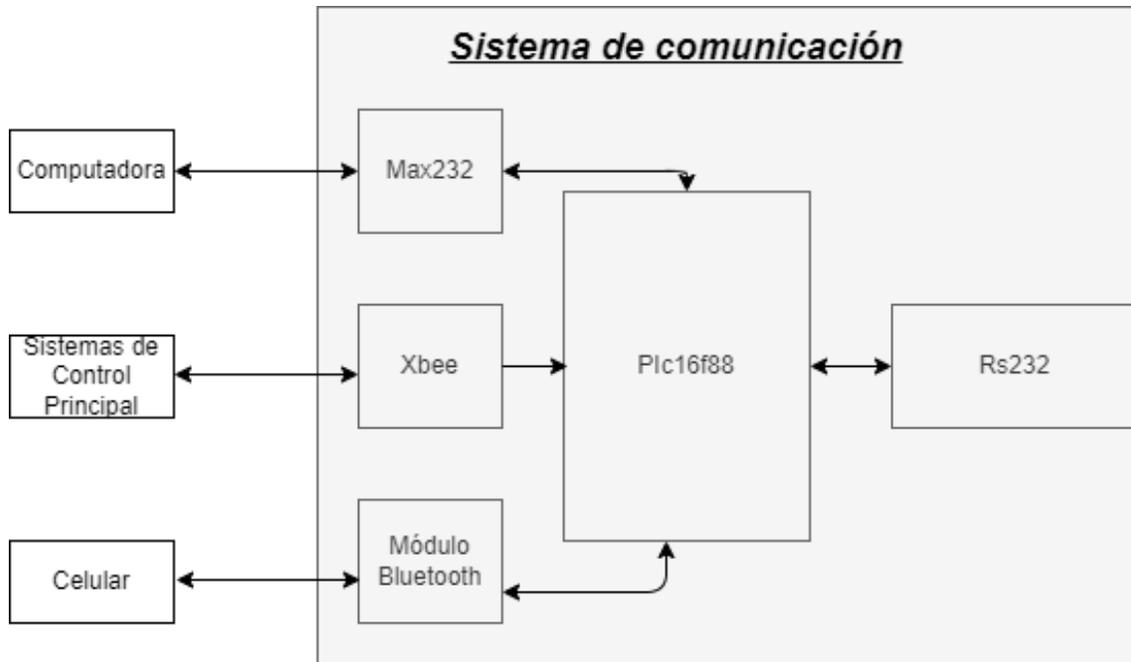


Figura 9: Diagrama de bloques del sistema de comunicación.

5.4. Sistema automático y sensores

Mediante una conjunto de sensores y otros componentes, el sistema automático debe permitir el movimiento sincronizado con el rastreador. Así, el domo modifica estratégicamente su posición para recibir la luz del Sol. Con la finalidad de proteger el rastreador, la escotilla del domo se cierra cuando las condiciones meteorológicas son adversas (véase figura 10).

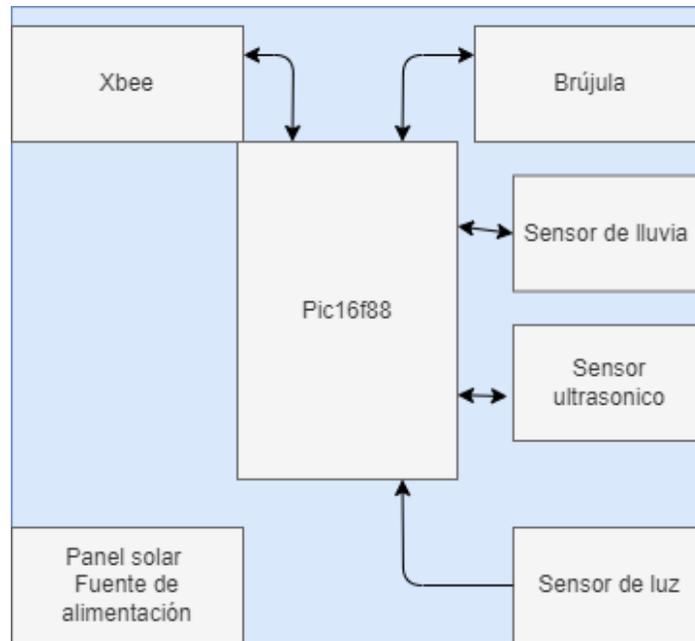


Figura 10: Diagrama de bloques del sistema automático.

6. Implementación del proyecto.

El desarrollo del proyecto se realizó por (sub)sistemas, a fin de comprobar el funcionamiento correcto de cada uno. Una vez hecho esto se procedió con el acoplamiento de las partes. A continuación, se describe de forma detallada la implementación de cada uno de los sub-sistemas. De manera general, los circuitos PCB se diseñaron en el software diseño electrónico Eagle y se manufacturaron con ayuda de una máquina de Control Numérico por Computadora (CNC). Los sistemas de potencia, de comunicación y de automatización y sensores se implementaron en tarjetas perforadas. Todos los circuitos, a excepción del sistema automático, se montaron sobre una superficie de madera para fijarlas y colocarlas en el cuarto de control ubicado debajo del domo(ver figura 11).

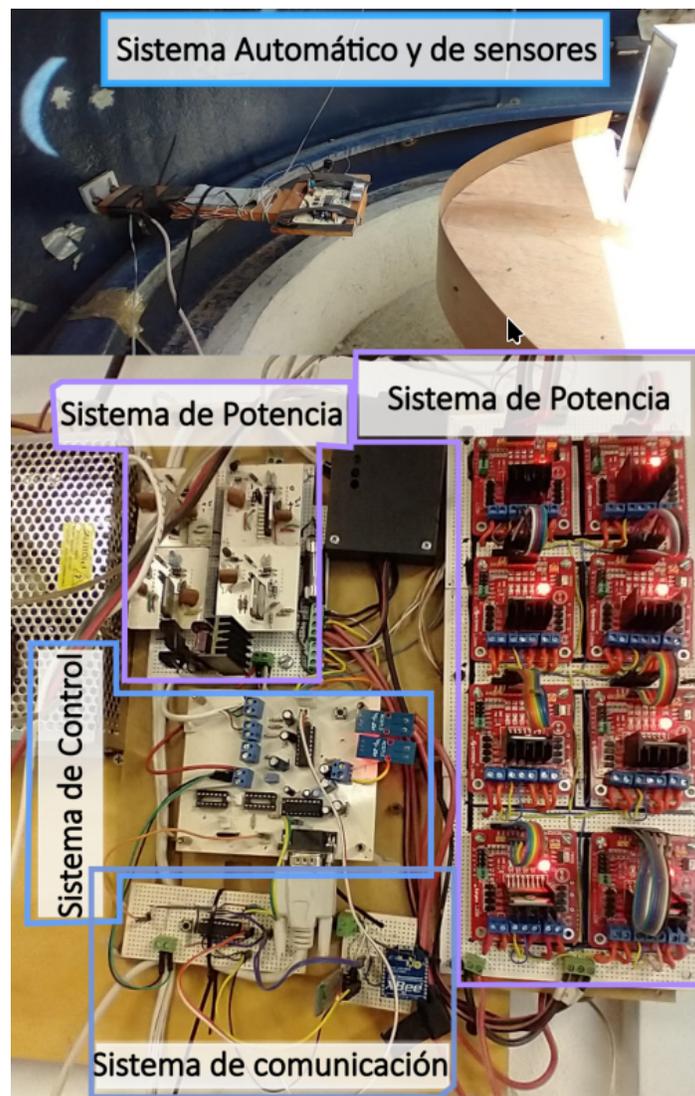


Figura 11: Prototipo del sistema completo para el funcionamiento del domo.

6.1. Sistema de potencia.

El sistema de potencia se compone de dos partes principales: - los motores. 2 para girar la estructura completa del domo y uno para abrir y cerrar la escotilla. - la etapa de potencia permite moverlos. Anteriormente estaba compuesta por relevadores, pero por fallas mecánicas e incluso por malas conexiones, estos se llegaron a quemar junto con los circuitos del domo. Para evitar este inconveniente se realizó una caracterización del sistema de motores y estructura del domo, la cual se describe a continuación (véase figura 12).

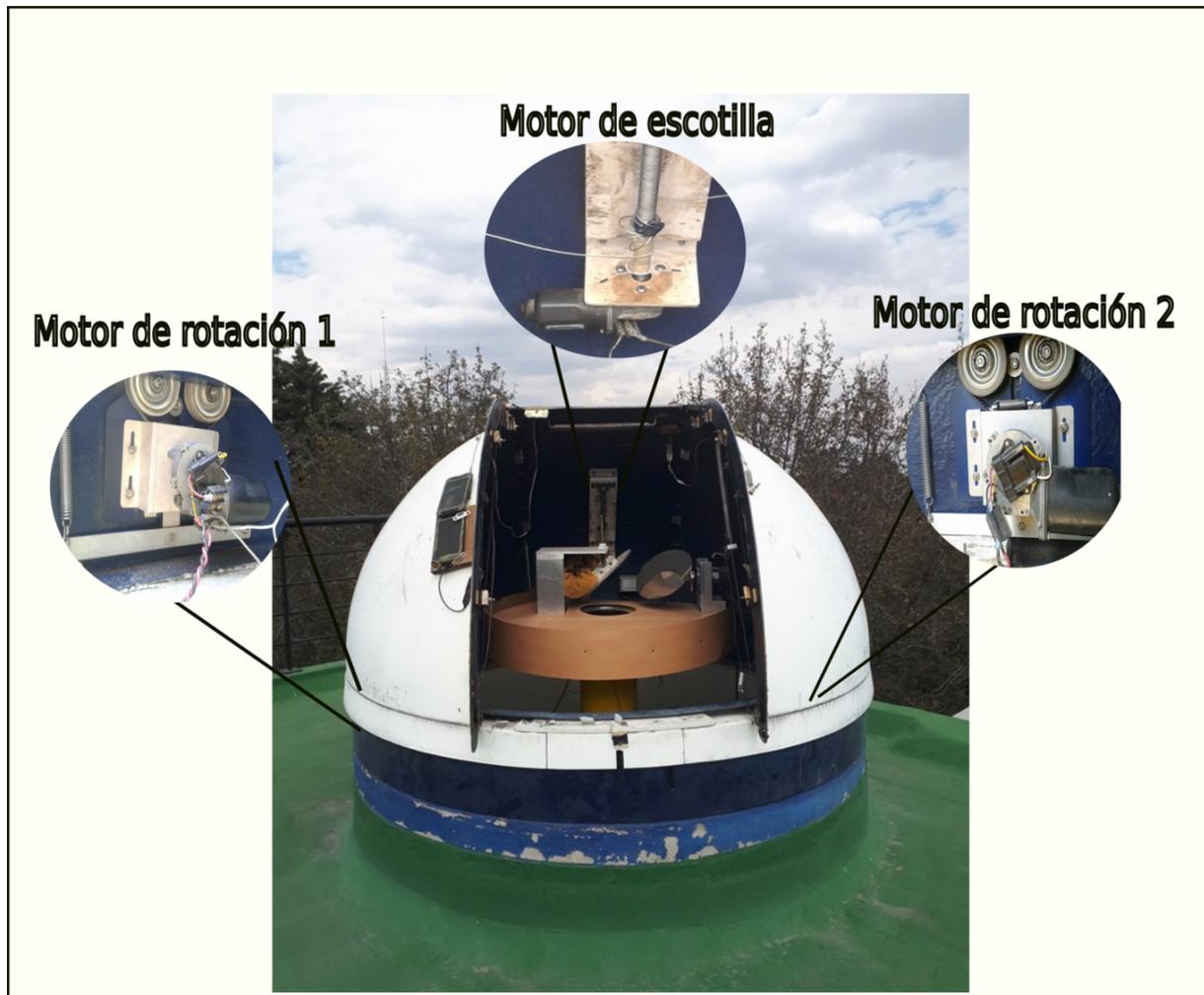


Figura 12: Motores del domo con su ubicación real

El sistema original funcionaba a 24 V, razón por la cual se hicieron pruebas en el nuevo sistema con diferentes voltajes, desde 24, 16, 13 y 11. A partir de estas pruebas se pudo observar que con una tensión mayor a 16 V, el sistema suministró una cantidad considerable de corriente. Ello ocasionó un sobrecalentamiento en el sistema de alimentación (bloque del sistema de potencia). Con relación a su velocidad, el desempeño del domo no cambió mucho. No se requieren, por tanto, velocidades muy

grandes en su aplicación. El domo funciona óptimamente con 11 V.

El sistema de potencia tiene la función de alimentar los motores con la corriente necesaria. Fue importante conocer, primero, la cantidad que consumen los motores en su modo de trabajo habitual. Con ayuda de un amperímetro ACS712, se obtuvieron datos sobre el consumo de corriente al abrir y cerrar la escotilla del domo con 11 V y 13 V. En la imagen 13 se analiza la corriente para la apertura y cierre de escotilla. Cuando funciona a su máxima velocidad, emplea mayor cantidad de corriente.

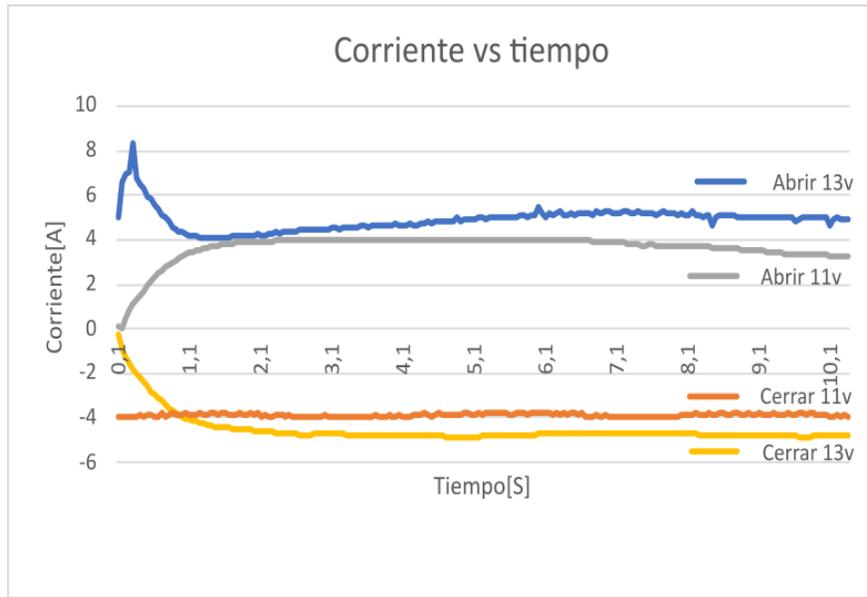


Figura 13: La gráfica muestra el comportamiento de la corriente en el motor de la escotilla del domo, alimentados a 13V y 11V al abrir y cerrar.

A continuación, se midió la corriente que consumen los motores de rotación en ambos sentidos (horario y antihorario) con los mismos voltajes antes mencionados. Como se observa en la figura 14, la corriente baja considerablemente si se compara con la consumida cuando funciona a 13 V.

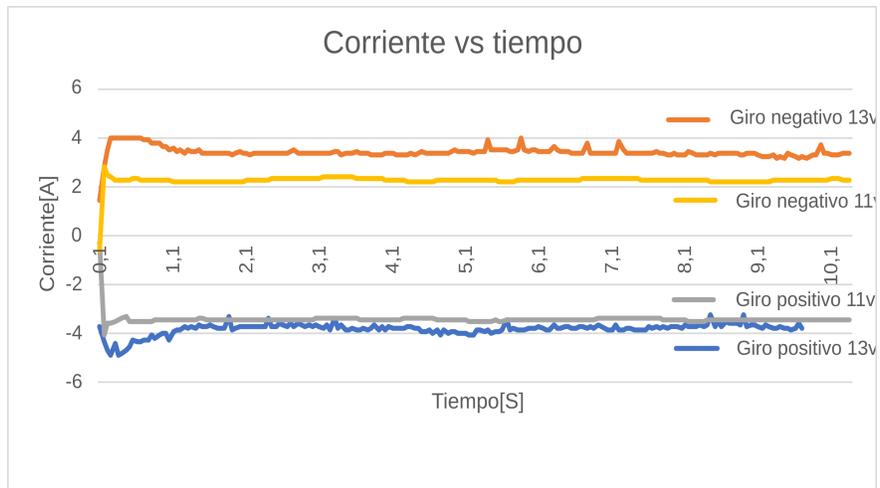


Figura 14: La gráfica muestra el comportamiento de la corriente en motores de rotación para 13 V y 11 V.

Por otro lado, se observó que, en el rango estudiado, a mayor velocidad la corriente aumenta de manera casi proporcional (véase figura 15).

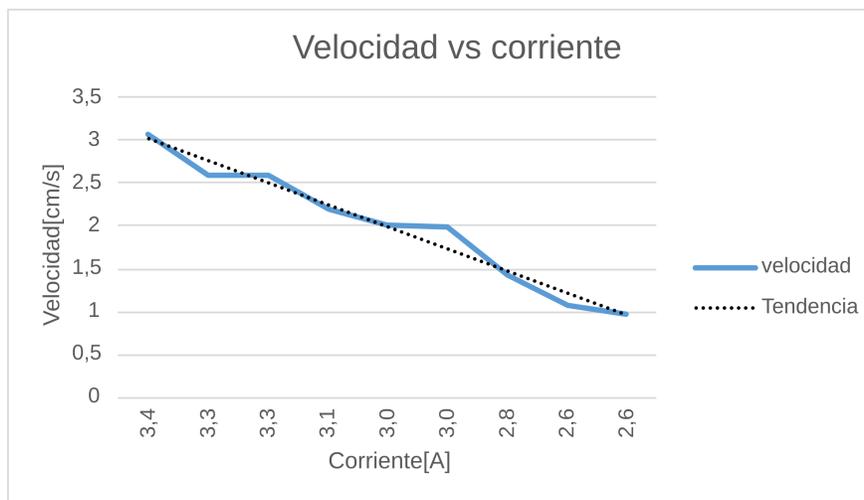


Figura 15: Gráfica de cambio de velocidad de los motores vs el consumo en su corriente.

6.1.1. Filtrado por software de la señal de corriente de paro automático

Los datos de la corriente considerados en la gráfica de velocidad contra corriente consumida se obtuvieron al emplear el sensor de corriente ACS712, instalado en el bloque del sistema de control (para más detalles, véase Anexo 5). Dicho sensor permite una frecuencia de muestreo alta que generaba mucho ruido. Para eliminarlo, se modificó el tiempo de muestreo como se explica a continuación.

El sistema de medición de corriente toma una lectura cada 14.2 milisegundos; sin embargo, tal lapso

de muestreo no es eficiente. Se realizó un análisis de la información obtenida para los periodos de 14.2 ms y 111 ms, asumiendo que son suficientes 9 Hz de frecuencia de muestreo. Se registró una señal con menos picos o saltos exagerados; sin embargo, no era suficiente. Fue preciso eliminar los saltos de corriente causados por el ruido; de lo contrario, podría ocasionar errores en el procesamiento de datos.

Para conseguir una señal más estable y detectar con precisión excesos de corriente, producidos por falla mecánica en el sistema, se implementó un filtro digital paso bajas. Dicho filtro se programó en el microcontrolador de la tarjeta principal. A grandes rasgos, se hace un promedio ponderado entre los valores anteriores y el valor actual. Su cálculo podría describirse de esta manera: el valor actual se obtiene al multiplicar el valor anterior (n-1) por una constante k menor a 1 y se suma al registro leído por el sensor multiplicado por 1-k (véase ecuación ??).

$$Y'_n = y'_{n-1} \cdot k + y_n \cdot (1 - k)$$

Donde: * k Valor constante que puede tener un valor entre 0 a 1; éste se elige, dependiendo del efecto de filtrado deseado. * Y'_n Valor de la señal después de aplicarle el filtro. * y'_{n-1} : Valor anterior de la señal filtrada. * y_n : Valor actual leído por el sensor de corriente.

Con ello se eliminó el ruido por completo, asegurando una medición de corriente más fiable. Por añadidura, la implementación fue muy sencilla: se programó en una sola línea y no exigió tanta memoria del microcontrolador. Se probaron otros filtros digitales (para más detalles, ver anexo 11.3) que dieron el mismo resultado pero por la capacidad de memoria, el filtro digital paso bajas fue la mejor opción. Como puede observarse en la figura 16, el ruido disminuyó considerablemente al realizar el procesamiento descrito.

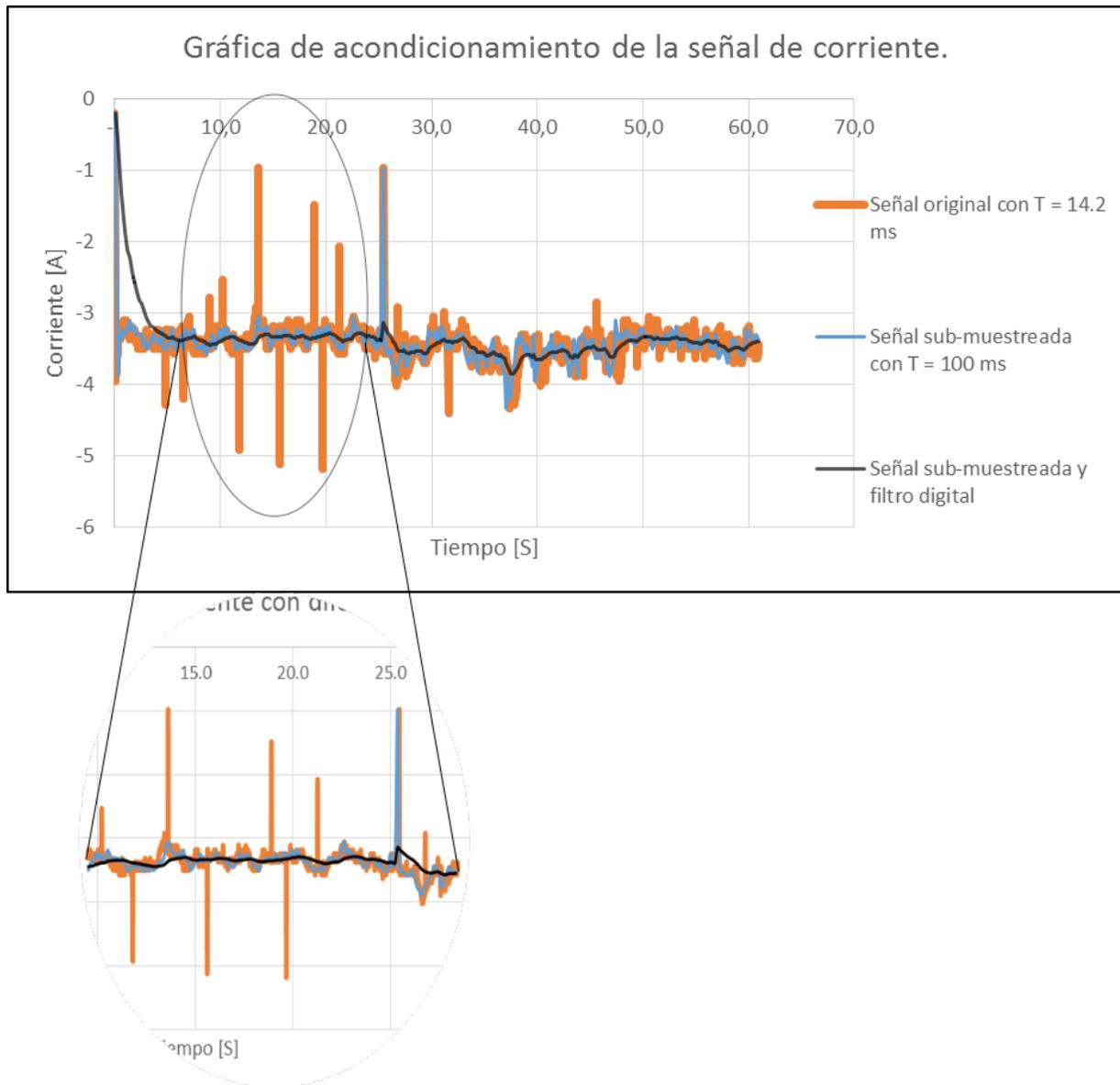


Figura 16: Gráfica de acondicionamiento de señal de corriente por medio de un filtro paso bajas digital.

6.2. Implementación de la Etapa de Potencia.

El (sub)sistema de potencia se implementó con varios módulos de puente H, los cuales describiremos a detalle a continuación. Este sistema está basado en el circuito integrado para manejo de motores de C.D. (L298N). Se optó por éste dada la facilidad con que se pueden adquirir, son económicos y su uso es muy sencillo dada la información que existe sobre los integrados. A partir de este integrado, se diseñó una pequeña tarjeta que puede trabajar en conjunto con otras iguales, todo para suministrar la potencia que se requiere manejar. El L298N consta de 2 canales que se controlan con tres entradas lógicas: dos que controlan el sentido de giro IN1, IN2; y un Enable (ENA) que permite activar/desactivar el canal para que el motor se mueva (véase figura 17). Si se requiere, el pin Enable puede conectarse a una señal PWM para controlar la velocidad de giro del motor.

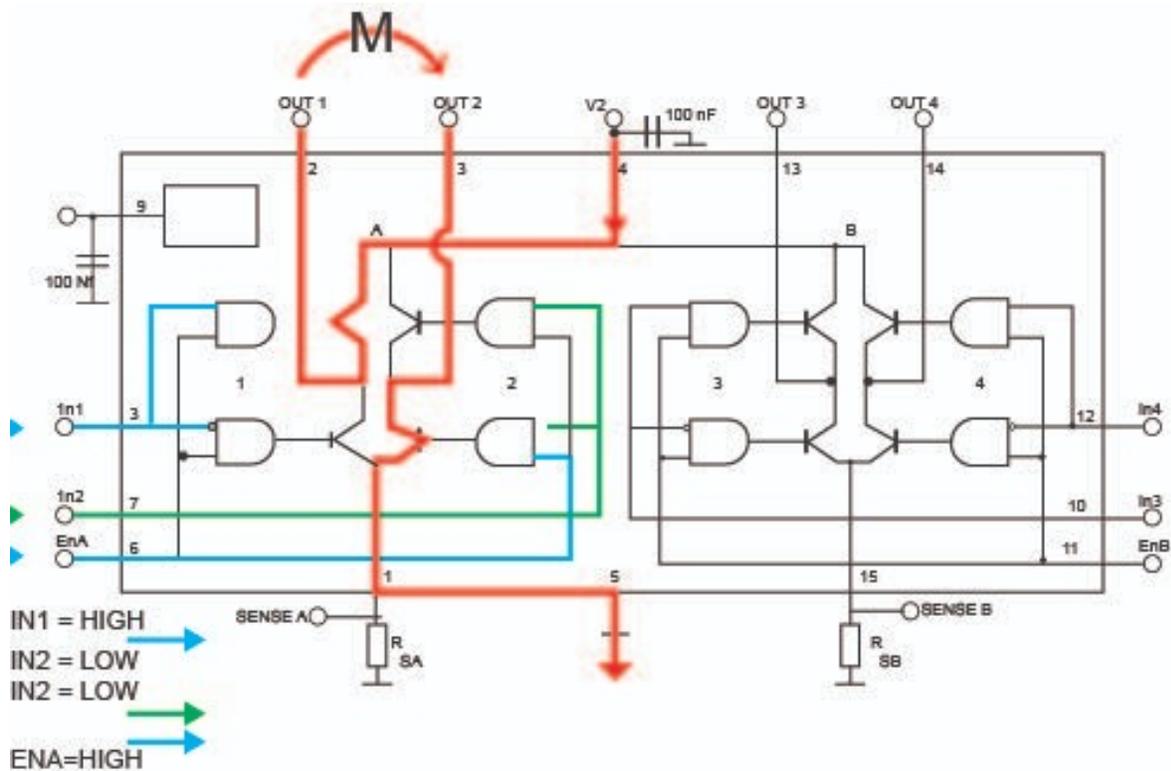


Figura 17: Diagrama del integrado L298 (imagen tomada de la hoja de datos).

Cada canal del puente H soporta máximo 1 A, sin embargo cada integrado cuenta con dos canales independiente y es posible conectarlos en paralelo para incrementar su capacidad de corriente (para llegar a 2A). En la figura 18 se muestra el diagrama de conexión en paralelo.

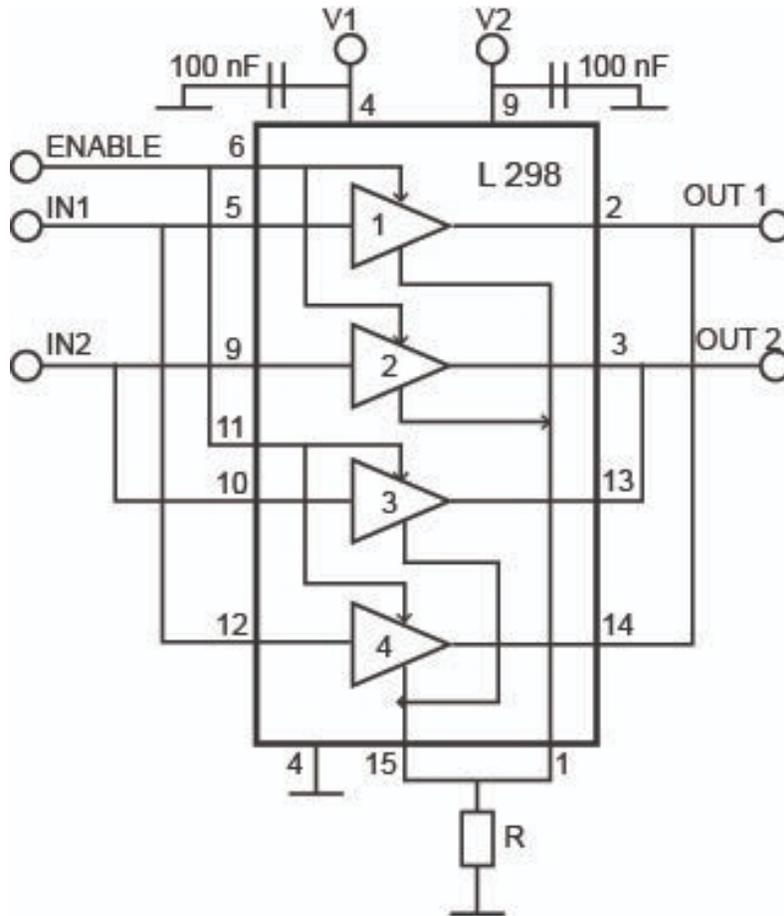


Figura 18: Diagrama de conexión en paralelo de un circuito integrado L298.

Si queremos que el motor gire hacia un sentido, tendremos que poner en alto la entrada IN1 y en bajo la entrada IN2. Así, se moverá en sentido contrario, poniendo en bajo ahora a IN1 y en alto a IN2, tal y como se muestra en la tabla de la Figura 4.8.

Giro	IN1	IN2
Sentido horario	1	0
Sentido anti horario	0	1
Motor apagado	0	0
Motor bloqueado	1	1

Cuadro 1: Tabla de configuración para los motores.

Siguiendo la conexión mencionada, se requiere de un bus de control para cada movimiento. Sin embargo, debido a la disponibilidad de los pines y a que sólo se cuenta con un canal PWM, fue necesario implementar una conexión que permitiera el control de los 2 movimientos necesarios (rotación y escotilla) con un único bus.

La conexión implementada quedó de la siguiente manera: se alimenta el PWM en una de las entradas (IN1), en la otra entrada (IN2) se conecta una señal de dirección (horario/antihorario), y la entrada de Enable se utiliza para seleccionar la señal de control activa (escotilla o rotación). De esta manera podemos seleccionar el motor que queremos mover, ya sea de la escotilla o de los motores de rotación, con señales independientes, pero compartiendo el mismo bus de control. Para controlar los motores de rotación, basta con activar el pin Enable 1, poniéndolo en un nivel lógico alto. Para controlar el motor de la escotilla, sólo hay que poner en nivel lógico alto el pin Enable 2. Ahora, para que giren en sentido anti-horario, se activa la señal PWM y el pin IN2 se pone en bajo. Si queremos que el domo gire en sentido horario, sólo requerimos poner el pin IN2 en alto y la señal PWM invertirla, con una simple operación (PWM-256). Ya que compartimos el mismo bus, para controlar la rotación del motor de la escotilla se sigue exactamente el mismo procedimiento. Conectada al pin IN1, la señal PWM generará un tren de pulsos con 1 y 0. El pin IN2 estará en 0 lógico para el primer caso (giro sentido antihorario). De acuerdo con la tabla de la figura 7.8, cuando las dos señales coinciden en 0 el motor se detendrá; cuando coincidan en 1 y 0, el motor girará tanto como dure en esta posición, con el PWM. De igual forma, para que gire en sentido horario, el pin IN2 se pondrá en alto al invertir el PWM; cuando en tren de pulsos coincida con la señal IN2 en alto, se detendrá. Por último, cuando las dos señales queden en uno y cero, girará el tiempo que dure en ese estado y así trabajará con el PWM (véase figura 19).

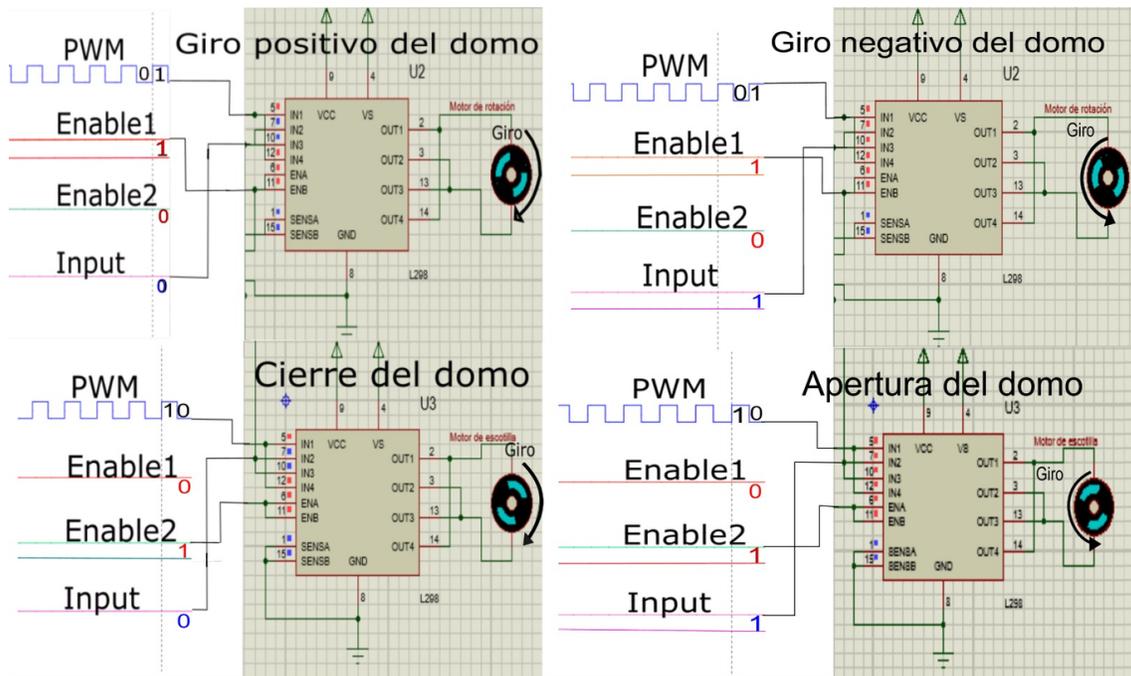


Figura 19: Señales necesarias para controlar la tarjeta de potencia, simuladas en el software de electrónica Proteus.

Lo explicado anteriormente se puede apreciar en una simulación hecha en el software Proteus, donde se utiliza un microcontrolador PIC16f88 como control para dos L298. Uno que controla el motor de apertura y otro que controla el motor de rotación, con las configuraciones ya mencionadas (véase Figura 20).

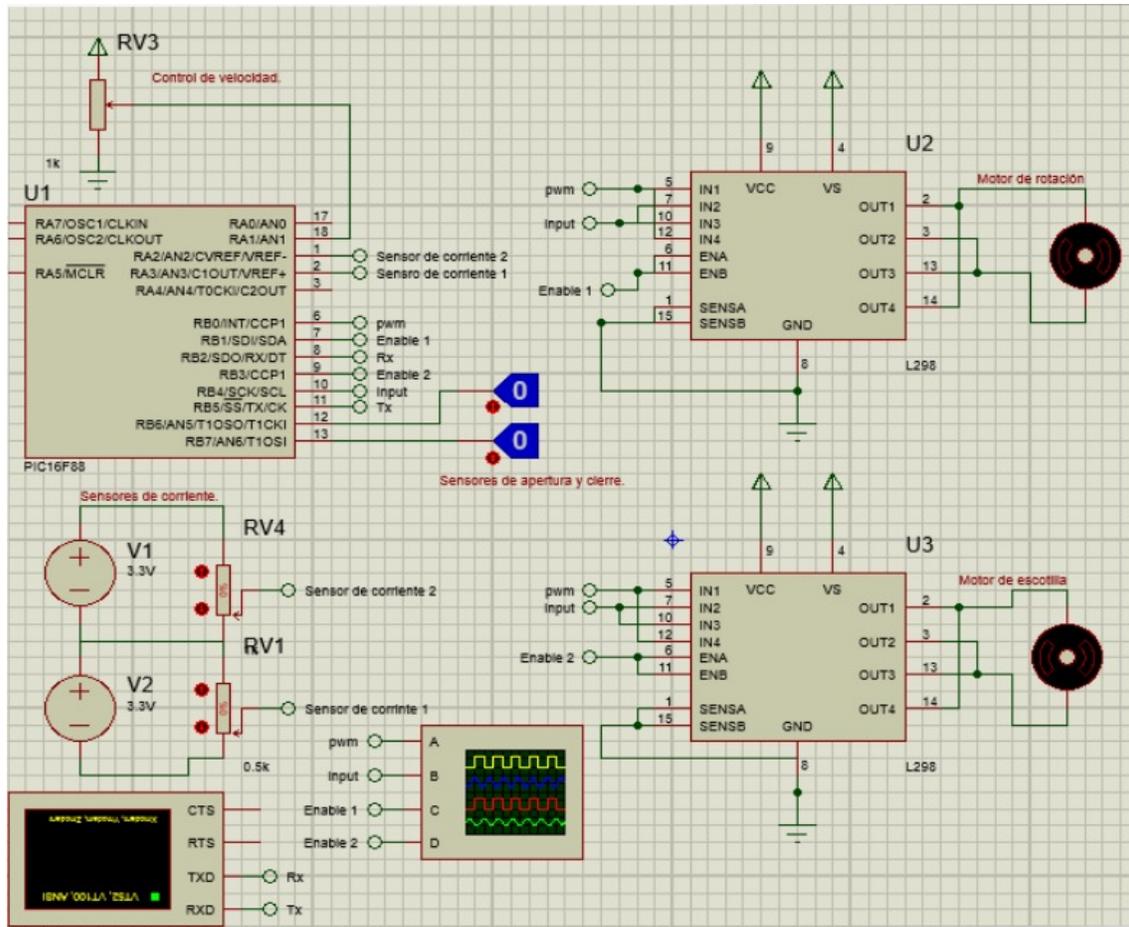


Figura 20: Simulación en Proteus del esquema y funcionamiento del sistema de potencia para mover tanto los motores de rotación como de la escotilla.

Por otro lado, cada módulo H cuenta con un arreglo de diodos (véase figura 21). Lo anterior ayuda a proteger los puentes, pues cuando los motores giran en uno u otro sentido puede producirse una corriente inversa por la inercia del giro; cuando éstos se detienen podrían dañarse los puentes H. De esta forma cada tarjeta queda protegida, asegurando su funcionamiento si alguna otra llega a fallar.

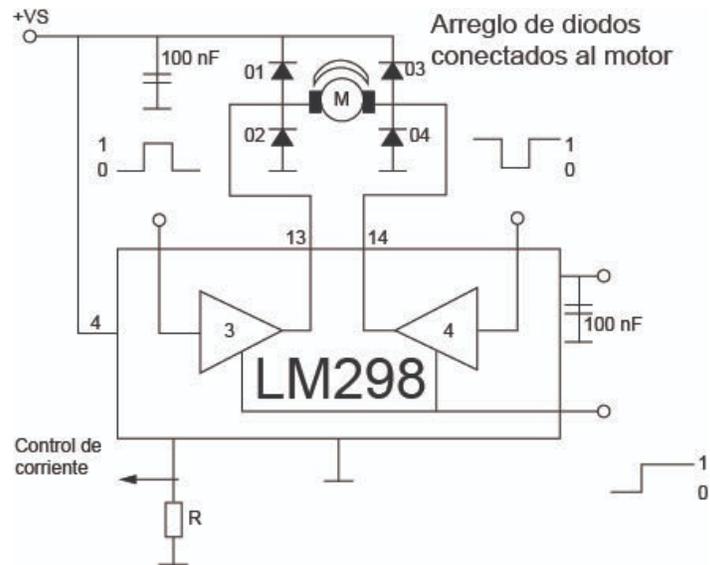


Figura 21: Diagrama de conexión de los diodos para proteger el integrado L298, a causa del regreso de corriente de los motores por la inercia de su movimiento.

Al conectar dos o más módulos H en paralelo es complicado identificar si alguno llega a descomponerse, debido a que el sistema continuará funcionando a pesar de la falla. Se debe contar con una forma de ubicar este fallo antes de que los demás módulos también fallen. Para solventar la problemática, se utilizó un LED en cada módulo H para indicar el momento en el que un puente H está activo. Si un LED se mantiene apagado cuando el módulo correspondiente está en funcionamiento, quiere decir que ese módulo ya no funciona y hay que repararlo o, en su defecto, cambiarlo. Para agregar tal característica, se implementó una configuración con un arreglo de dos diodos rectificadores 1N0007, un transistor 2n339 y un LED, haciendo uso de la salida de sensado de corriente en el puente H. Con ayuda de los diodos, se generó un voltaje de 2.5v del pin de sensor de corriente del puente H hacia la base del transistor; con ello dejamos tenemos un diferencial de potencial de 5V hacia una resistencia y un LED cuando hay corriente. Gracias a ello, el LED se enciende cada vez que los motores son activados, lo cual indica que el puente H está funcionando correctamente (véase Figura 22).

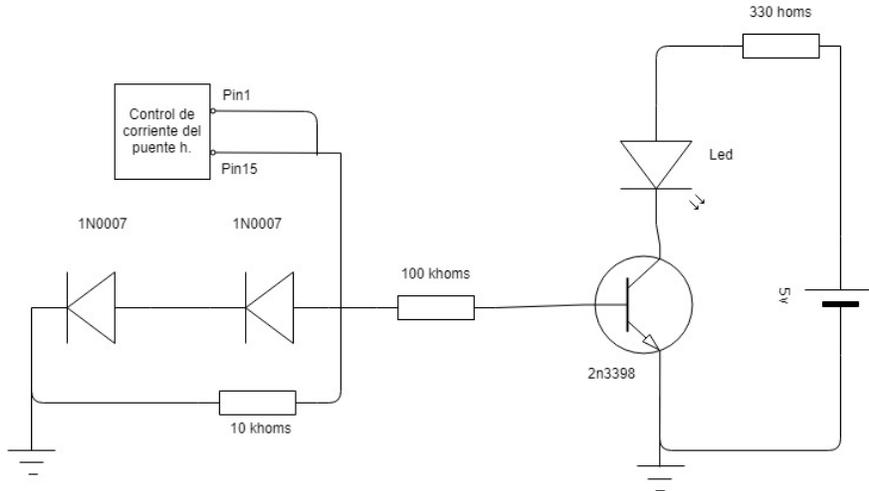


Figura 22: Diagrama del circuito utilizado para implementar el LED del indicador de fallo en los módulos H.

Al implementar lo anterior en un circuito que nos facilita su instalación y manipulación, quedó de la siguiente manera (véase Figura 23):

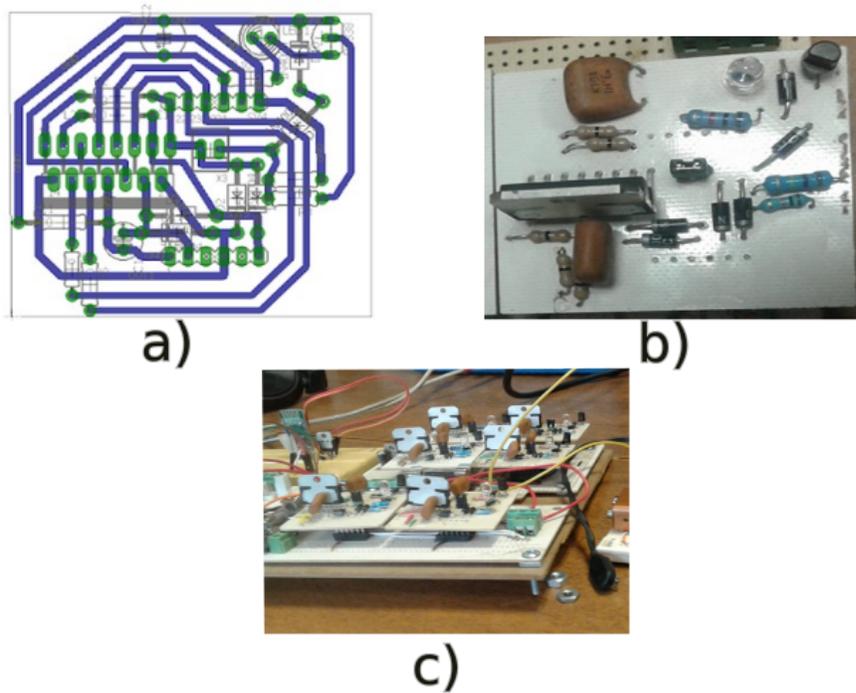


Figura 23: a) Esquema del circuito realizado por software(Eagle). b) Primer placa impresa en CNC con sus componentes soldados. c) Placas conectadas en serie.

Para manejar la corriente en los motores de rotación y en el motor de la escotilla, se diseñaron dos

tarjetas de potencia, una para cada uno. Estas tarjetas sirven como base para conectar más de un módulo H. En consecuencia, los módulos pueden conectarse de forma sencilla y manual para suministrar la potencia requerida. De hecho, se pueden añadir tantos como sean necesarios. La ventaja de estas tarjetas es que, si llega a fallar algún módulo H, puede ser reemplazado o reparado sin interrumpir el funcionamiento general del domo. En los motores de rotación se ocuparon cuatro módulos H (véase figura 24).

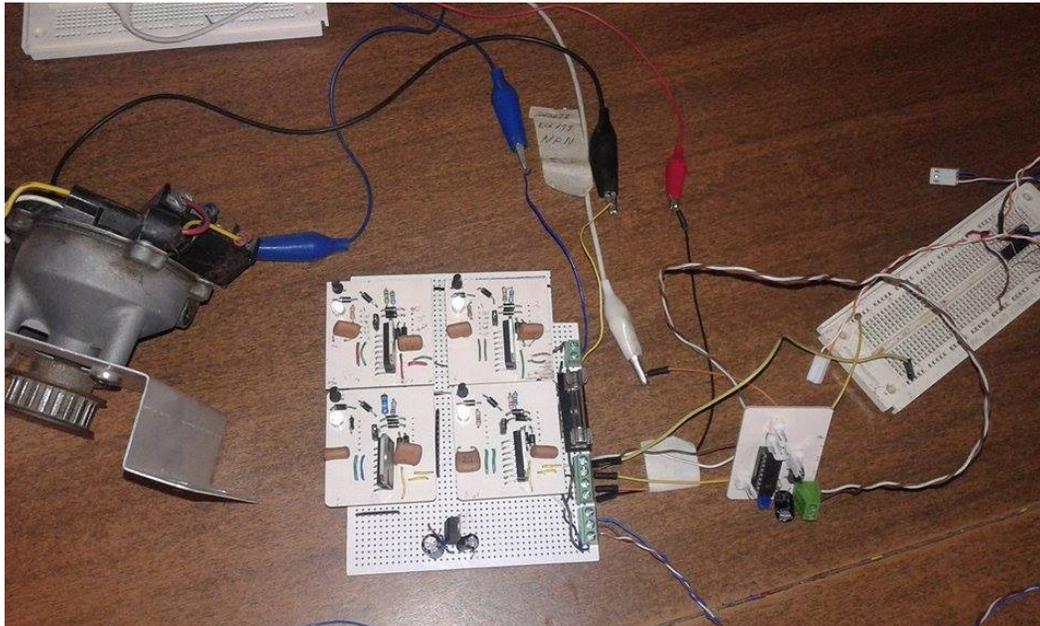


Figura 24: Prototipo del módulo de potencia para los motores de giro.

Para la apertura de la escotilla, se optó por utilizar ocho tarjetas comerciales modificadas dado que son más económicas y fáciles de conseguir; además, se pueden adaptar de manera sencilla y tienen la posibilidad de durar mucho más tiempo, en tanto cuentan con disipadores de calor.

Por todo ello, se colocaron ocho módulos L298N comerciales en paralelo, tal y como se muestra en la Figura 25. Ello permite proveer una corriente de hasta 16 [A], lo cual nos permite un rango de seguridad de 10 amperios, en caso de falla parcial. Esto es muy importante, ya que usarlos al límite reduce considerablemente su tiempo de vida. Desde esa óptica, aseguramos su durabilidad y funcionamiento sin problemas, en caso de que una o dos tarjetas lleguen a dañarse.

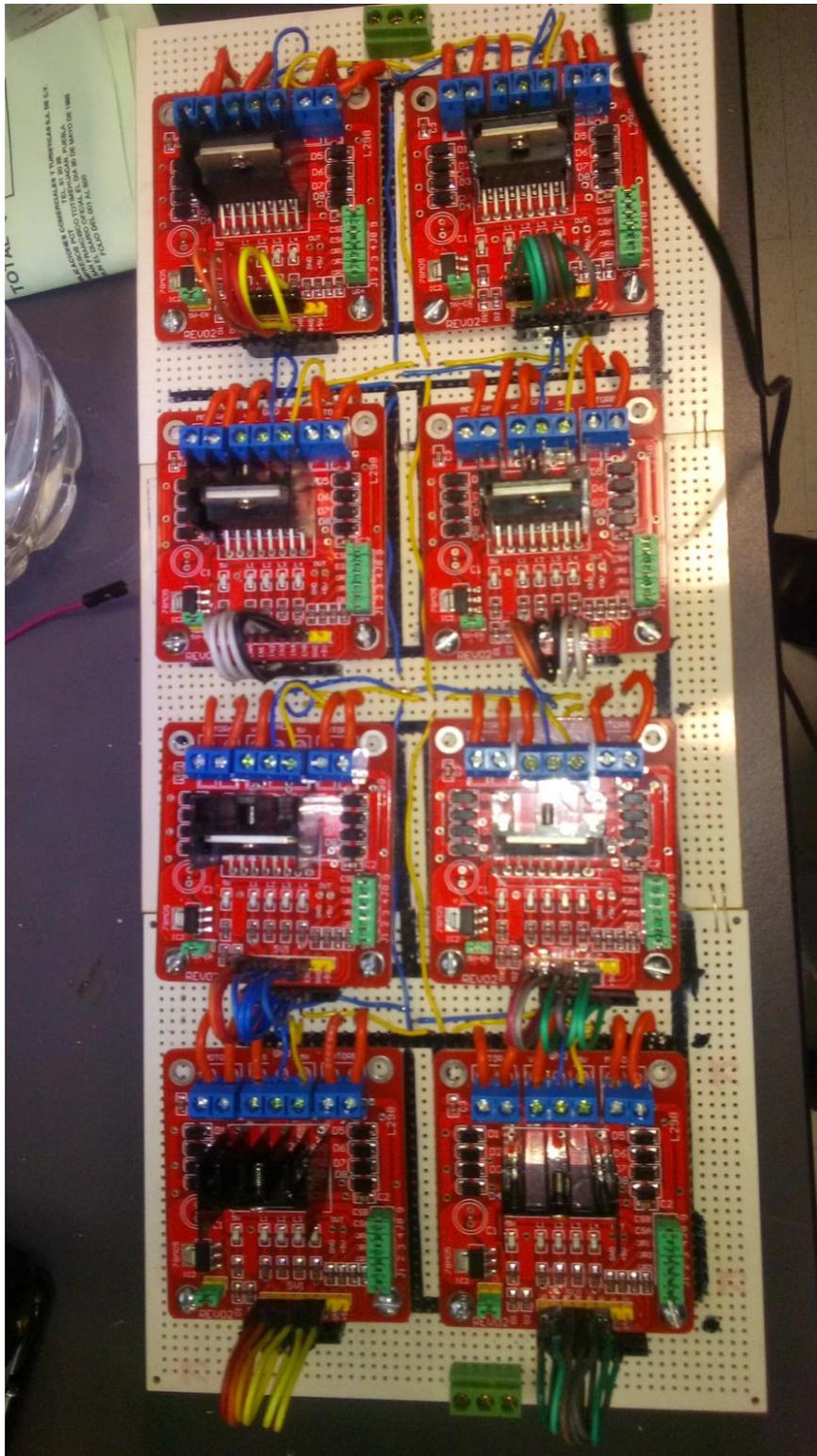


Figura 25: Segunda tarjeta electrónica prototipo con ocho módulos H comerciales para apertura y cierre del domo.

6.3. Sistema de comunicación.

Este sistema, hace posible la interacción entre usuario, sensores y domo. En términos generales, multiplexa la comunicación entre tres dispositivos: 1) computadora; 2) sistema automático, y 3) celular. El objetivo primordial de esta tarjeta es permitir 3 modos operativos.

El primero para recibir la información de cualquier computadora, se utilizó un circuito integrado max232 configurado para este fin (véase figura 26 a).

El segundo canal, comunica el sistema automático con el sistema de control principal de manera inalámbrica, por radiofrecuencia con ayuda de dos módulos xbee (véase figura 26 b). De este modo se evita el uso de cables que de alguna manera perjudique el giro del domo. Los xbee, configurados como receptores y emisores, se conectan directamente a un pic16f88. Lo que facilita su uso y su implementación.

La tercera con un celular mediante un módulo bluetooth HC-06 (véase figura 26 c). Permite la vinculación con cualquier móvil que cuente con dicha tecnología. Sólo es necesario buscar, en el dispositivo, el módulo HC-06 y enlazarlo. A través de su sincronización, se establece el intercambio de información con el pic16f88.

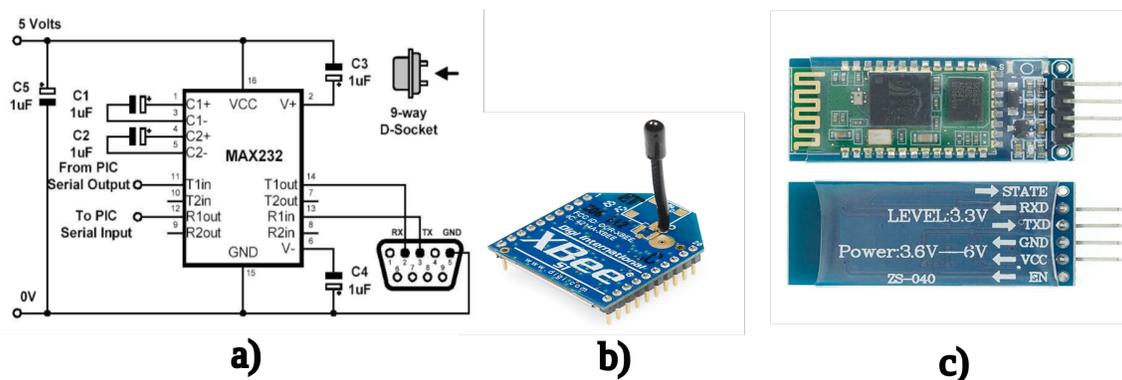


Figura 26: a) Elementos que conforman el circuito para la comunicación RS232 con la computadora. b) Xbee, dispositivo electrónico que nos permite mandar datos de manera inalámbrica. c) Dispositivo bluetooth HC06.

Es posible controlar el canal de comunicación por medio de comandos en forma de cadena de texto. Para cada uno de los 3 modos, corresponden los siguientes comandos: blue, cpu y automa. La palabra blue habilita el enlace a través de bluetooth. La instrucción cpu establece contacto con la computadora y automa transmite al sistema automático (véase figura 27).

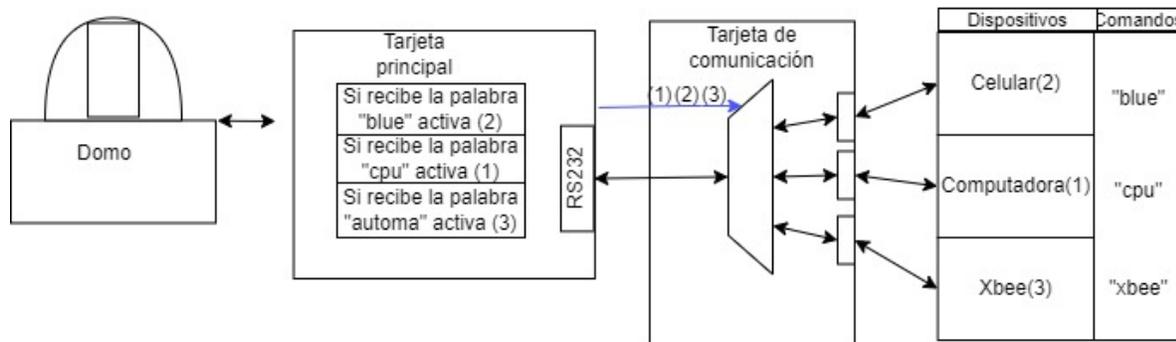


Figura 27: Diagrama de bloques del sistema de comunicación.

Como se aprecia en el diagrama de la figura 27, las terminales del microcontrolador del sistema principal activan los canales de comunicación. A través de una computadora, celular u otro dispositivo compatible, el usuario que escriba el comando blue activará el pin blue y desactivará el pin xbee. De este modo comenzará la comunicación entre celular y computadora. Cuando escriba el comando automa, accionará el pin xbee y desactiva el pin blue. Ello vinculará el dispositivo con la tarjeta instalada en el domo y establecerá un funcionamiento automático. De igual manera, en caso de eventos extraordinarios que requieran de un manejo más personalizado, es posible controlarlo todo con el dispositivo enlazado. Cuando se escriba el comando cpu, los pines xbee y blue cambiarán su estado a cero. Así, el flujo de información sólo procederá de la computadora. Si se presenta alguna otra combinación en los estados de los pines, funcionará únicamente la computadora. Tal condicionamiento evitará posibles errores (véase tabla 2).

Entradas		Salidas		
Pin blue	Pin xbee	PC(1)	Blue(2)	Auto(3)
X=0	Y=0	1	0	0
X=1	Y=0	1	1	0
X=0	Y=1	1	0	1
X=1	Y=1	1	0	0

Cuadro 2: Cuadro de verdad.

La tarjeta de comunicación cuenta con un microcontrolador pic16f88 dedicado a transmitir información. A fin de enlazar los diferentes dispositivos, se crearon tres buses por software adicionales al que se incluye de fábrica por hardwa. La descripción del funcionamiento se detalla en el diagrama que se muestra a continuación.

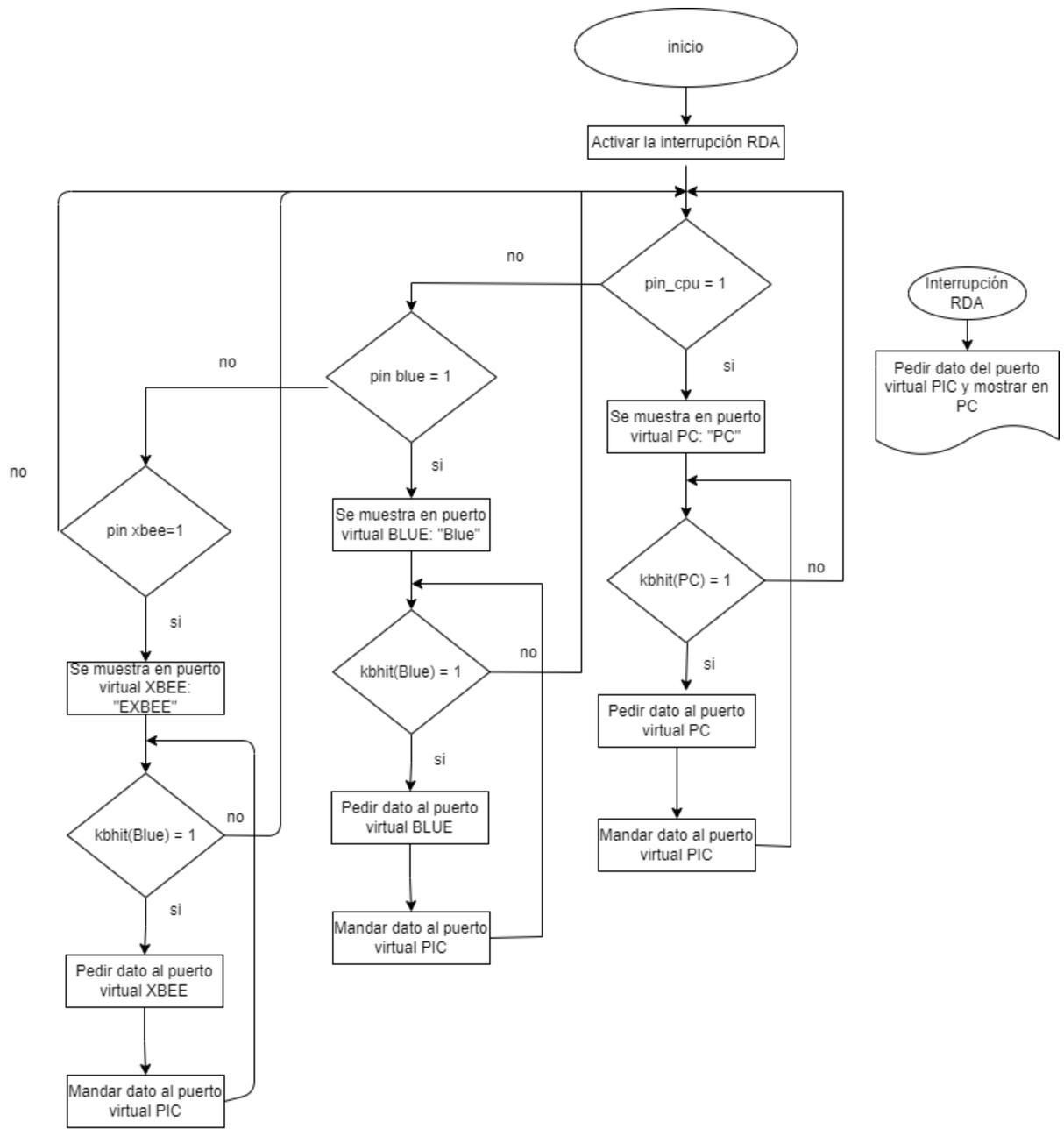


Figura 28: Diagrama de flujo del sistema de comunicación.

6.4. Sistema automático.

Este sistema permite sincronizar automáticamente la posición del domo con la del rastreador de manera que permite la correcta recepción de la luz solar. Además, en caso de lluvia, el sistema automático permite al domo cerrarse con velocidad máxima a fin de proteger el rastreador.

6.4.1. Seguimiento por rastreador solar

Básicamente se implementó un seguidor del rastreador solar que ya se encontraba en funcionamiento, es decir, se utiliza el rastreador para moverse a la par. Para lograr esto, se construyó e instaló una semi leva parecida al tipo espiral hecha de triplay y formáica, la cual, con ayuda de un sensor ultrasónico de distancia, puede utilizarse como leva de seguimiento, como se ilustra en la figura 29. Previamente se probaron una amplia gama de figuras geométricas y se obtuvieron resultados no deseados (véase Anexo 2).

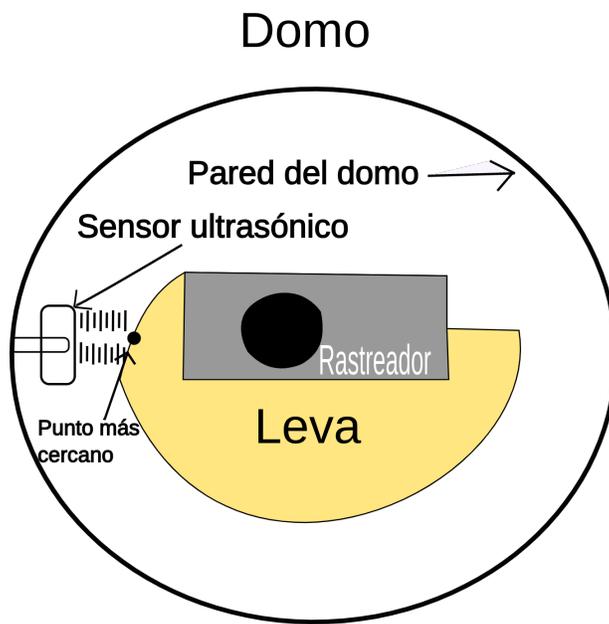


Figura 29: Diagrama del sistema de seguimiento al rastreador.

La idea fue colocar esta forma de semileva en la base del rastreador, de manera que la distancia de la pared del domo al punto más próximo de la figura permitiera conocer la posición relativa del domo con respecto del rastreador. Se utilizó el sensor de distancia para conocer la distancia de la pared del domo al punto más cercano de la base en cada momento. Si la base gira en sentido horario, el sensor medirá una distancia menor a 10 cm. Esto indicará que se debe realizar un movimiento en el sentido horario también para mantener una posición adecuada. Similarmente, si la base se mueve en sentido antihorario, el sensor detectará una distancia mayor a 14 cm. Indicando así que se debe rotar en sentido antihorario.

En resumen, a causa de la geometría de la leva, existen 3 casos según la distancia medida: 1) si es menor a 10 cm, éste debe girar en sentido horario; 2) si es mayor a 14 cm, el domo debe girar en sentido anti-horario 3) entre 10 y 14 cm, el domo se encuentra en una posición adecuada y no requiere

movimiento.

En la figura 30 se ilustran estos 3 casos.

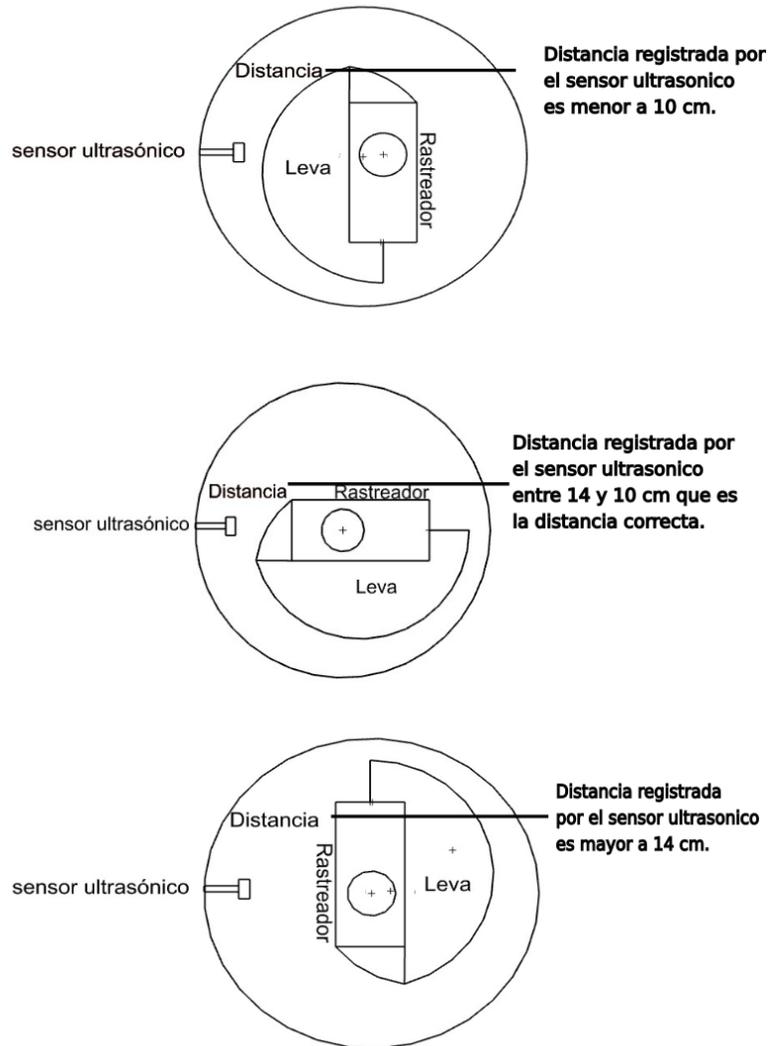


Figura 30: Plano del sistema automático. Se aprecia la variación de la distancia conforme al movimiento del rastreador en relación con el domo.

6.4.2. Sensor de Lluvia

Se utilizó el sensor de lluvia YL-83 para proteger al equipo de rastreo y medición en caso de precipitación. Este sensor cuenta con una placa niquelada, colocada en la parte superior del domo (como se puede observar en la figura 31) de manera que, en cuanto detecte las primeras gotas, mande una señal para cerrar la escotilla. Se programó, con una interrupción, por lo que No importa qué proceso se esté realizando; en cuanto se detecte la presencia de lluvia, se cerrará a máxima velocidad.

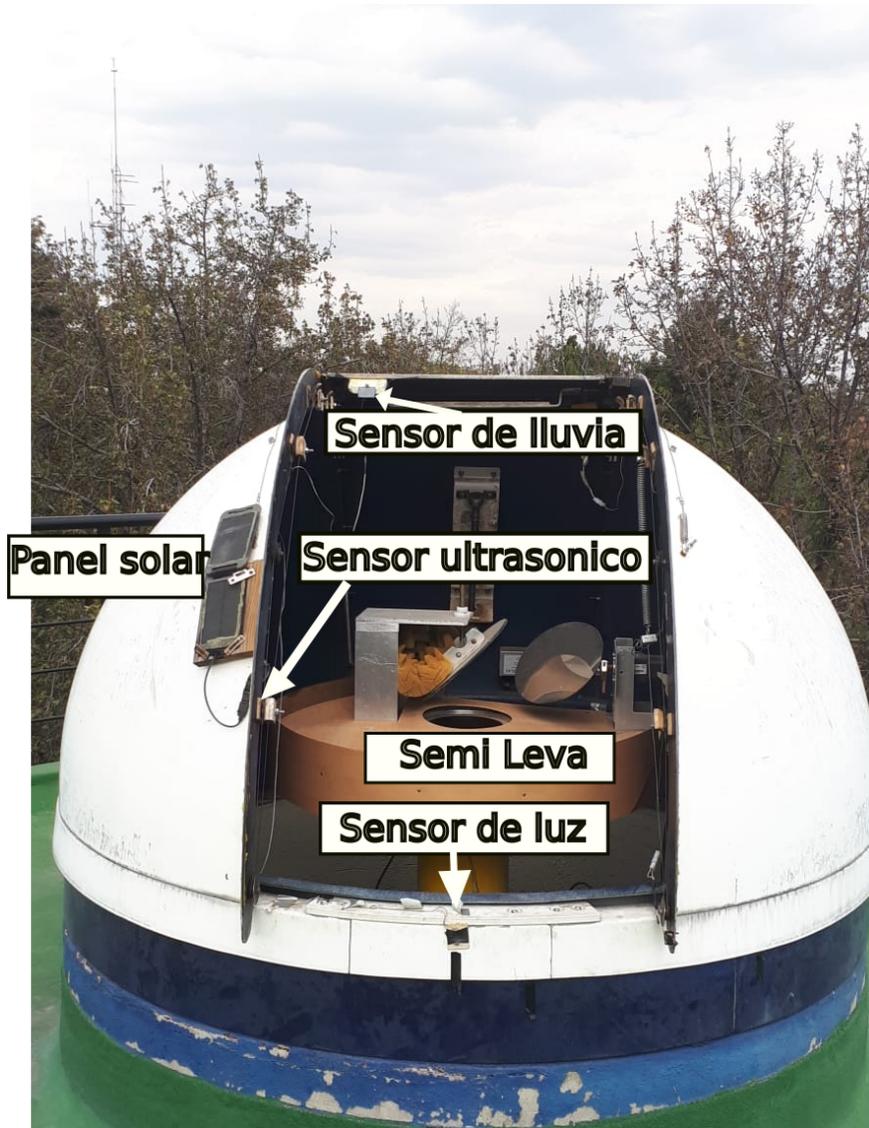


Figura 31: Ubicación de sensores instalados en el domo.

Otro elemento a destacar es que en el PCB donde se conectan los sensores del sistema automático, existen tres botones: uno para reiniciar el sistema y dos para salir del modo automático. En caso de emergencia o mantenimiento, pasará del modo bluetooth o cpu, si se presiona cualquiera de los interruptores en cuestión.

6.5. Sistema de control principal

El sistema de control principal procesa los datos de sensores, comandos del usuario y manda las señales para controlar el giro de los motores del domo. Este sistema mide la corriente de los motores y analiza las lecturas. En caso de presentarse un consumo excesivo de corriente, efectuará paros de emergencia. También recibe la información de los sensores en el domo, los cuales habilitan varias funciones: paro

automático de la escotilla en apertura/cierre, cierre automático en caso de detección de lluvia, o rotación automática. En la figura 33 se muestra el diagrama de bloques de este sistema.

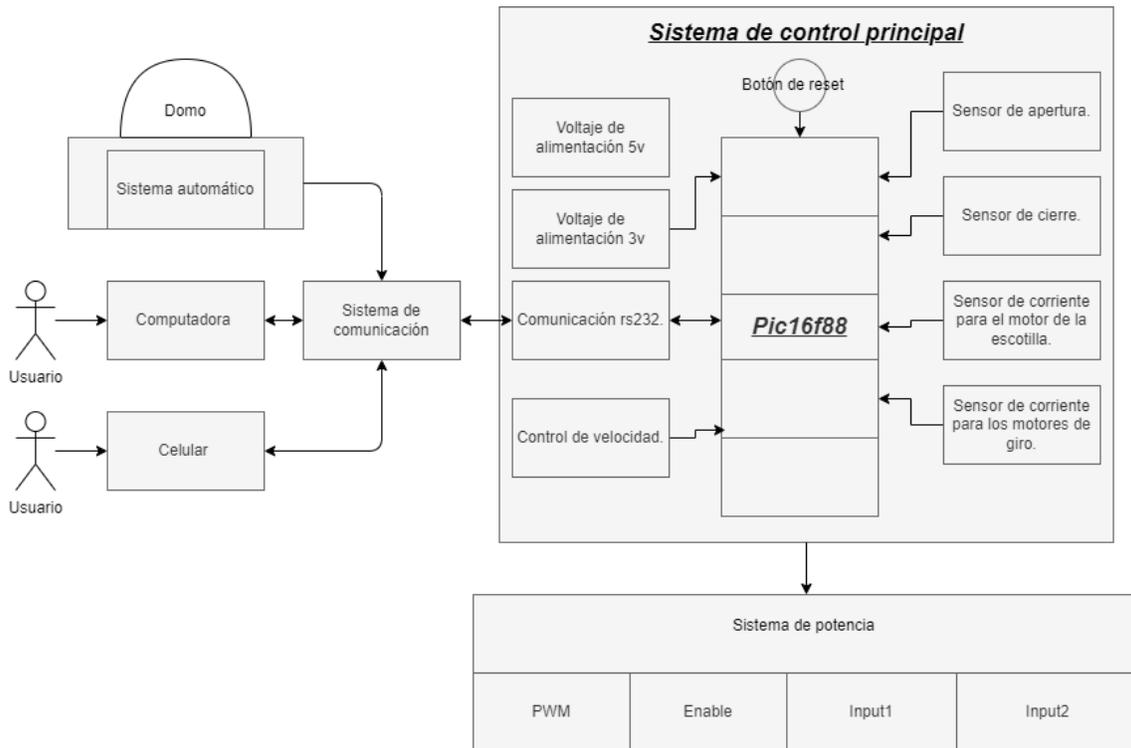
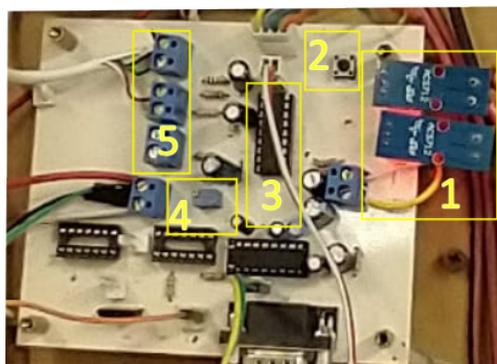


Figura 32: Diagrama de bloques del sistema de control principal.

Este sistema consta de dos sensores de corriente, uno para los motores de giro y otro para el de la escotilla; un potenciómetro para controlar la velocidad de los motores; sensores de fin de carrera para la escotilla y; todo controlado por un PIC16f88. Una fotografía del circuito correspondiente se puede observar en la figura 33.



1. Sensores de corriente
2. Bóton de reset
3. Pic16f88
4. Potenciómetro para controlar la velocidad
5. Sensores de fin de carrera

Figura 33: Circuito donde del sistema de control principal.

6.5.1. Sensores críticos

Los dos sensores de fin de carrera se instalaron en la escotilla. Se consideran críticos dado que sirven para detectar el momento en el que la escotilla llega a alguno de los extremos. Es entonces que se debe detener el motor de la escotilla. Fueron conectados al microcontrolador por medio de un cable largo y un filtro analógico pasa bajas, a fin de evitar ruido. El filtro se diseñó a partir de un condensador electrolítico de 100 microfarad y una frecuencia de corte de $f_c=1$ Hz, pues eso tarda en realizar una lectura. Con objeto de efectuar los cálculos necesarios, se utilizó la ecuación 6.5.1:

$$f_c = \frac{1}{2\pi CR}$$

Donde:

- f_c - Valor de la frecuencia de corte
- C - Valor del capacitor para el filtro
- R - Valor de la resistencia para el circuito de filtrado

El único dato faltante es la resistencia, la cual se despejó de la 6.5.1, quedando la ecuación 6.5.1.

$$R = \frac{1}{2\pi C f_c}$$

El resultado de la resistencia es 1.59k cuyo valor comercial más cercano es 1.5 k Ω .

6.5.2. Control de velocidad

El potenciómetro de la tarjeta electrónica del sistema principal varía la velocidad de los motores, tanto los de rotación como el de la escotilla. Al girar o rotar su perilla, el componente permite al usuario ajustar la velocidad de funcionamiento del domo, dependiendo de sus necesidades. Por medio de uno de sus canales analógicos, el potenciómetro se conecta directamente con el microcontrolador. Lo anterior determina el valor del ciclo de trabajo del pwm y, según sea el caso, aumenta o disminuye la velocidad (véase figura 34).

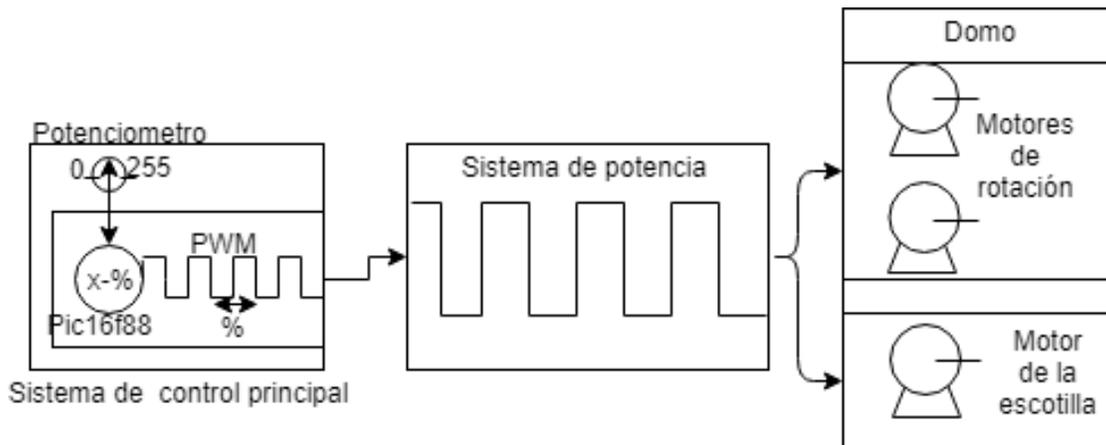


Figura 34: Diagrama de bloques, funcionamiento del control de velocidad.

Dado que usa un convertidor A/D de 8 bits, la señal del potenciómetro proporciona al microcontrolador valores de 0 a 255. El microcontrolador retoma estos valores para generar la señal PWM de manera proporcional. Es decir, 0 a 255 equivale a una señal de 0 a 100 por ciento. En adelante, cuando se aluda a la velocidad, se mencionará el valor A/D —correspondiente a la señal del potenciómetro— con la finalidad de que el texto sea más entendible. La gráfica de la figura 35 muestra la relación los valores del ADC con la velocidad real del domo.

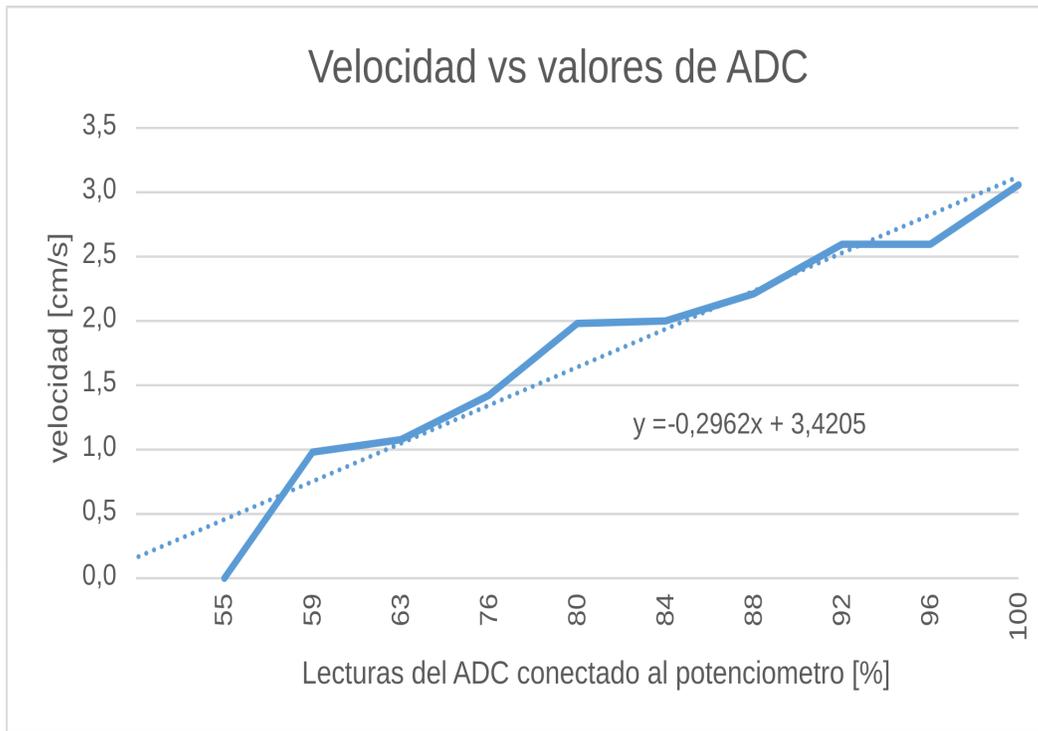


Figura 35: Gráfica de correspondencia. Muestra la velocidad de domo con los valores que proporciona el potenciómetro instalado en la tarjeta principal.

Como se mencionó anteriormente, el sistema principal usa dos sensores de corriente, modelo ACS712: uno para los motores de rotación y otro para el de la escotilla. Los sensores mandan una serie de valores, que representan la corriente consumida por los motores, al microcontrolador haciendo uso de un canal analógico para cada uno. En ese sentido, el programa del microcontrolador contiene un valor límite para la corriente (véase tabla 3). Si en algún momento el valor de la corriente es superado, el sistema manda una señal de paro a fin de evitar daños y proteger, principalmente, la tarjeta de potencia en caso de sobrecarga. Asimismo, manda un mensaje de aviso a la interfaz de usuario, informando sobre la sobrecarga y el paro de motores. De esta manera, el usuario verificará el incidente.

Corriente límite de funcionamiento			
Giro antihorario	200 ¡PWM ¡255	-3.6	A
Giro horario	200 ¡PWM ¡255	2.6	A
Apertura	200 ¡PWM ¡255	3	A
Cierre	200 ¡PWM ¡255	-6.8	A

Cuadro 3: Corriente límite de funcionamiento en la tarjeta electrónica prototipo, perteneciente al bloque del sistema principal.

Respecto del valor límite definido para detener los motores, fueron necesarias varias pruebas. A través de ellas, se observó el comportamiento de la corriente. En algunos casos, el pico de arranque de los motores superó al pico de obstrucción. A causa de este problema, fue necesario caracterizar el comportamiento de la corriente, eliminando el pico inicial de lectura.

6.5.3. Botón de reset

La tarjeta del sistema de control cuenta con un botón de reset. Este botón reinicia el sistema en caso de que haya algún error de funcionamiento.

6.6. Sistema de comunicación (Procesamiento de datos y comandos)

El sistema de comunicación consta de un microcontrolador PIC16f88 (microcontrolador de flujo de datos), un módulo de comunicación por radiofrecuencia Xbee, un módulo de comunicación bluetooth y un circuito integrado para comunicación RS232 (MAX232). Este sistema se encarga de entablar la comunicación del usuario con el sistema de control, los datos y comandos son procesados por el microcontrolador de flujo de datos para realizar las acciones correspondientes. El microcontrolador recibe cadenas de caracteres alfanuméricos por medio del protocolo de comunicación RS232. De estos caracteres, se definieron ciertas cadenas (llamadas comandos) separadas por el carácter de nueva línea ('/n'). Estos comandos representan las diferentes acciones del domo y se describen en la siguiente tabla 4.

Comando	Descripción de la acción
números positivos	Cantidad de segundos que girará en sentido antihorario.
números negativos	Cantidad de segundos que girará en sentido horario.
abrir	Abre en su totalidad la escotilla. (velocidad media)
cerrar	Cierra la escotilla de forma total. (velocidad media)
cerrarm	Cierra la escotilla de forma total, con la velocidad máxima del motor.
velocidad	Responde con el valor actual del control de velocidad.
d	Interrumpe, de manera emergente, cualquier operación realizada en el domo, con ayuda de la interfaz de usuario.
cpu	Establece la comunicación del domo con una computadora via el puerto RS232. Eliminando el sistema de movimiento automático
blue	Habilita la comunicación del domo con un dispositivo via bluetooth y una computadora. Eliminando el sistema de movimiento automático
automa	Activa el sistema automático, para que el domo se mueva autónomamente siguiendo el rastreador solar

Cuadro 4: Cuadro descriptivo sobre los comandos aceptados por el microcontrolador.

El domo asume los números positivos o negativos como el tiempo que tardará en girar en segundos. Con un valor positivo, la cúpula girará en sentido antihorario; con valores negativos, hará lo propio en dirección horaria. El proceso se describe en el diagrama de bloques mostrado a continuación(ver fig. 36).

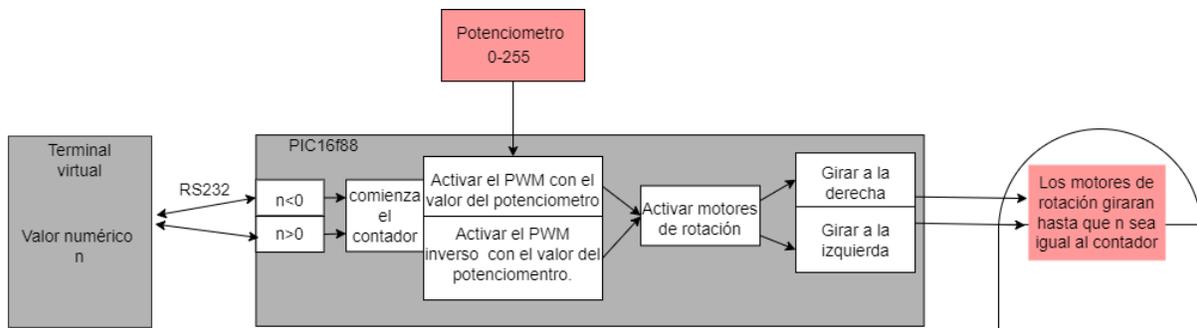


Figura 36: Diagrama de bloques: funcionamiento del domo, giro en ambos sentidos.

Por su parte, los comandos cerrar y abrir encienden el motor de la escotilla, haciéndolo girar en un sentido o en otro según sea el caso, activando el PWM y el enable2. Como consecuencia, el motor plegará o contraerá la escotilla hasta que los sensores de fin de carrera indiquen que cerró o abrió por completo. Se controla la velocidad usando PWM, estableciendo el valor por medio del potenciometro. El proceso se describe en el siguiente diagrama de bloques(vease figura 37).

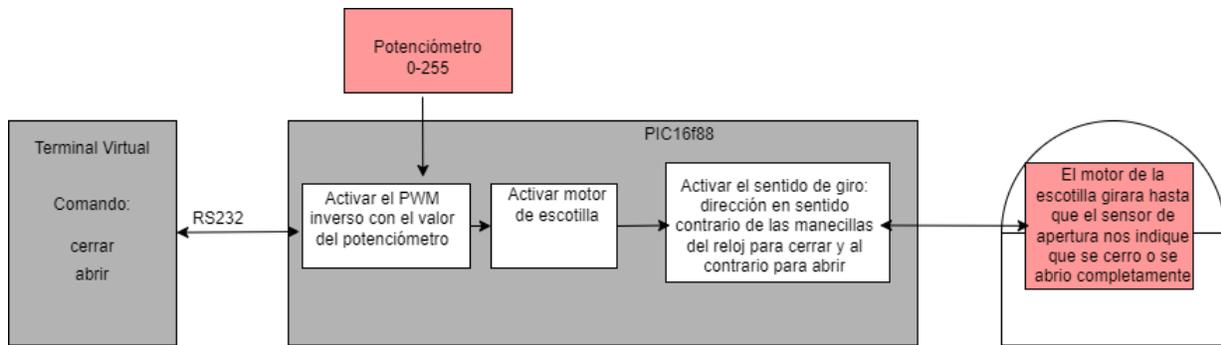


Figura 37: Diagrama de bloques para cerrar el domo de forma emergente.

El comando cerrarm no toma en cuenta el valor del potenciómetro para fijar la velocidad, sino que actúa mediante una cifra predeterminada en el programa. Lo anterior le permite plegar a máxima velocidad la escotilla, a fin de cerrarla en el menor tiempo posible. Es la instrucción empleada en caso de emergencia. Así actuará en caso de lluvia inesperada o cualquier otro fenómeno meteorológico que ponga en riesgo el equipo de rastreo (véase figura 38).

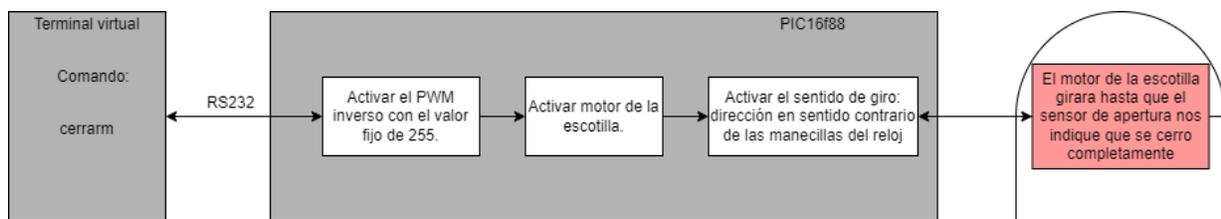


Figura 38: Digrama de bloques para cerrar el domo de forma emergente.

El comando velocidad arroja el valor actual del potenciómetro en la terminal. Sirve para cuantificar la rapidez con la cual giran los motores y poder manipular dicha cifra hasta que la bóveda presente una movilidad óptima (véase figura 39).

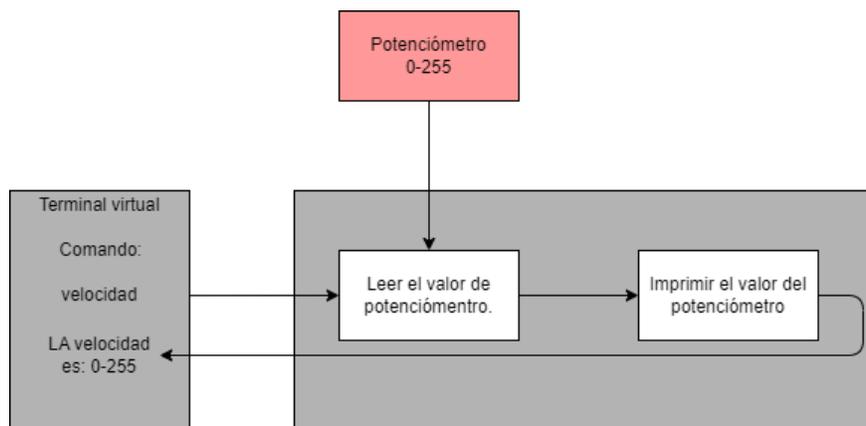


Figura 39: Diagrama de bloques para incrementar la rapidez con el comando velocidad.

7. Pruebas de funcionamiento

Se realizaron diferentes pruebas de funcionamiento para conocer los límites y el funcionamiento de los motores del domo. Como se mencionó en el capítulo previo, el sistema es capaz de detener los motores cuando la corriente crece a consecuencia de alguna falla, como por ejemplo una obstrucción. Para ello, es importante obtener un valor de corriente que permita detectar cuándo eso sucede. A partir de este momento, a dicha cifra se le denominará corriente límite. Con este objetivo, fueron necesarias varias pruebas para caracterizar el funcionamiento completo del domo. Con miras a verificar la corriente de consumo, se realizaron numerosas pruebas de rotación en condiciones normales y con obstrucción. Así como pruebas similares de apertura y cierre de la escotilla y los experimentos realizados fueron: 1) prueba de velocidad; 2) rotación en sentido horario; 3) rotación en sentido horario con obstrucción; 4) rotación en sentido antihorario; 5) rotación en sentido antihorario con obstrucción; 6) apertura de escotilla; 7) apertura de escotilla con obstrucción; 8) cierre de escotilla; 9) cierre de escotilla con obstrucción, y 10) rotación con sensor ultrasónico y estructura de semi leva central.

A continuación, se hace un listado de las condiciones en que se realizaron las pruebas. Se eligió un rango de velocidad de entre 3 y 1 m/s que, en correspondencia con el convertidor A/D, da un parámetro de 255 y 160. En tal rango, el domo funciona correctamente. Con velocidades menores, el movimiento es imperceptible, razón por la cual ya no es viable su función. Sin mencionar que en ocasiones presenta algunos problemas de desplazamiento. Dentro de este rango, para las velocidades en las que se midió la corriente, se eligieron los valores del convertidor: 255, 225, 200, 170, 160. Dichas cifras corresponden, respectivamente, a los siguientes porcentajes: 100, 88, 78, 66 y 62. Las pruebas de rotación se efectuaron en un lapso de 50 segundos. Con la intención de recabar integralmente los datos, los experimentos de apertura y cierre de escotilla consideraron el período de tiempo que ésta tarda en ejecutar ambos movimientos. En miras de obtener la corriente nominal, cada prueba se repitió ocho veces.

Se utilizó un amperímetro ACS712 para medir la corriente y una brújula electrónica para localizar los puntos problemáticos (en donde se encontraran obstáculos). Todos los experimentos aludidos pueden corroborarse en el Anexo 5 del presente trabajo.

7.1. Velocidad y corriente

El objetivo de los experimentos que se describirán a continuación fue relacionar la velocidad de movimiento del domo con el valor del ADC. Ello facilita la comprensión, toda vez que se trata de valores enteros. Consiste en girar el domo durante 50 segundos, utilizando los siguientes porcentajes de PWM: 100, 96, 88, 208, 200, 81 y 66. Dichos valores corresponden a la velocidad que va, aproximadamente, de 3 m/s a 1.7 m/s. Con cada dígito se registró su desplazamiento y, por ende, se supo el tiempo exacto que tardó. En consecuencia, fue posible calcular la velocidad del domo en m/s, obteniendo su velocidad con diferentes valores de pwm. De hecho, la modulación por ancho de pulsos funciona con la variación del potenciómetro instalado en el módulo de la tarjeta principal. Los valores registrados por este último van de 0 a 255 y con base en ellos trabaja.

7.1.1. Resultados

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas, pudo elaborarse la tabla 5. Dicha tabla dio pie a la elaboración de un par de gráficas: la primera versa sobre la velocidad contra los valores del potenciómetro (figura 40); la otra, sobre el consumo de corriente contra los valores del potenciómetro (figura 41).

En la primera se puede observar cómo aumenta la velocidad cuando se incrementan los valores del potenciómetro, con un acrecentamiento lineal y con una pendiente alta aproximada de 0.29, a diferencia de la gráfica de la corriente, que es lineal, pero con una pendiente más baja.

Corriente	Velocidad	pwm	Porcentaje pwm
2.26	3 cm/s	255	100
2.1	2.6 cm/s	245	96
2.1	2.2 cm/s	225	88.2
2.07	2 cm/s	208	81.5
2.06	1.9 cm/s	200	78.4
1.93	1.7 cm/s	180	70.58
1.84	1.4 cm/s	170	66.6
1.6	1.1 cm/s	160	62.7

Cuadro 5: Cuadro de valores de la velocidad con su correspondiente valor ded pwm y porcentaje equivalente.

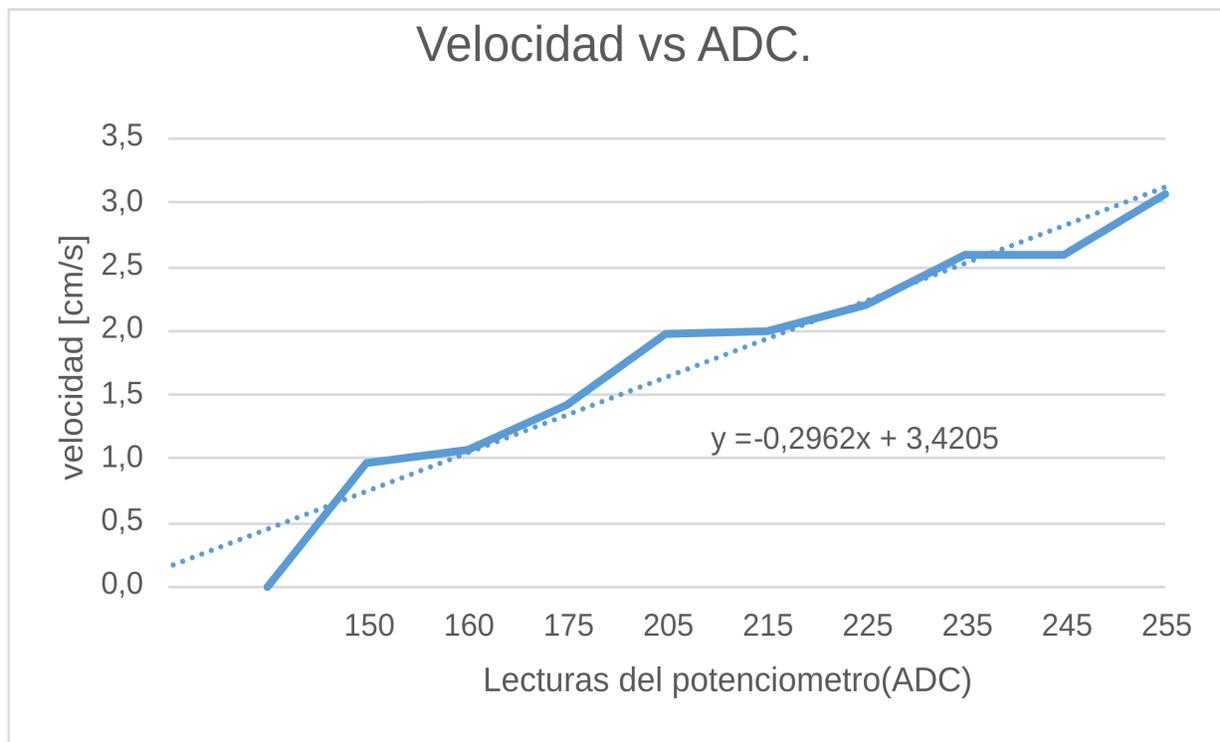


Figura 40: Gráfica de velocidad de giro del domo, en relación con el porcentaje del valor registrado por el potenciómetro.

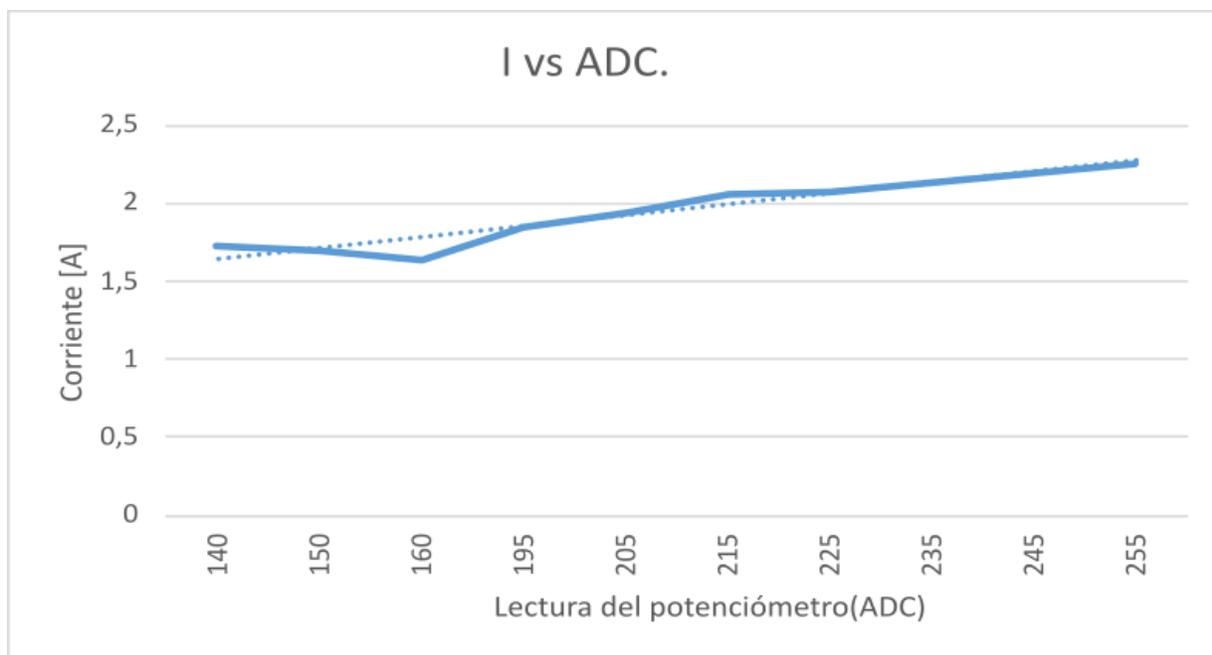


Figura 41: Gráfica de corriente de consumo, en relación con el porcentaje del valor registrado por el potenciómetro.

7.2. Rotación del domo sin obstrucciones

El objetivo de estos experimentos fue obtener la corriente de trabajo al girar el domo en condiciones normales. Las pruebas consisten en rotar —varias veces y en ambos sentidos— la bóveda con base en las velocidades mencionadas al inicio del capítulo.

7.2.1. Resultados

Con base en las pruebas, se observó al inicio de cada lectura un incremento en la corriente. Esto se debió a la demanda de energía que necesitan los motores para comenzar su movimiento. A través de tales experimentos, se verificó que el incremento en la corriente solo se presenta al inicio de las lecturas y basta con eliminar los primeros datos. En la figura 42 se registran los valores máximos a los que llega el pico de corriente, cuando el domo gira en sentido antihorario. Además, la figura muestra cómo se estabiliza el resto de la señal, transcurridos un par de segundos. Algo similar sucede con el comportamiento del giro en sentido horario. Como se aprecia en la figura 43, aun cuando cambien ligeramente los niveles de corriente, se presenta un pico similar al inicio de la lectura, para después estabilizarse.

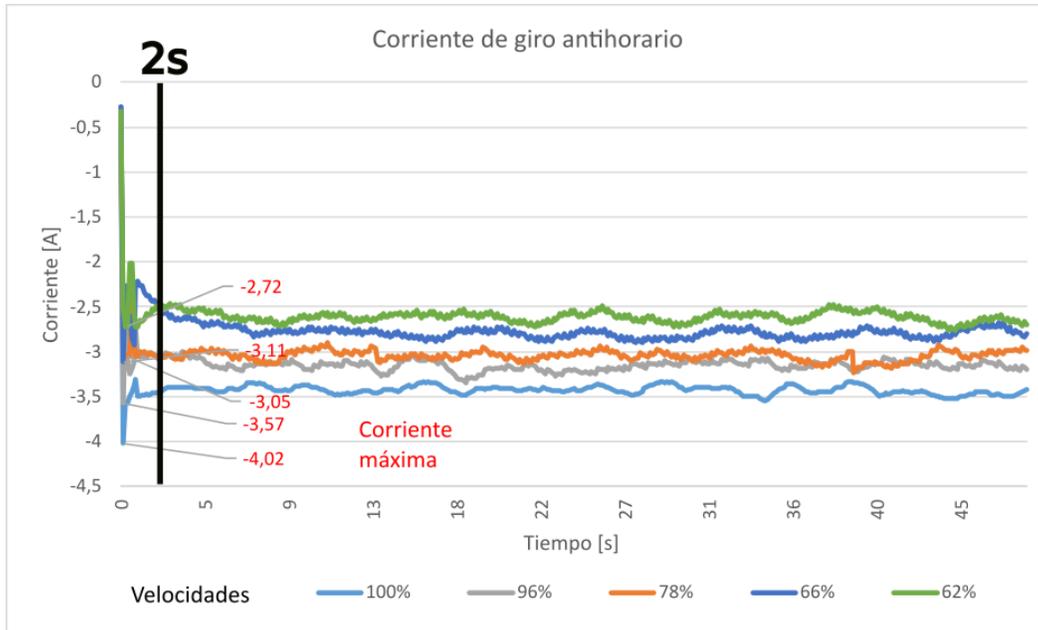


Figura 42: Gráfica de corriente. Muestra la rotación en sentido antihorario (valores negativos) con diferentes velocidades. Asimismo, se presenta cómo se obtuvo la corriente máxima.

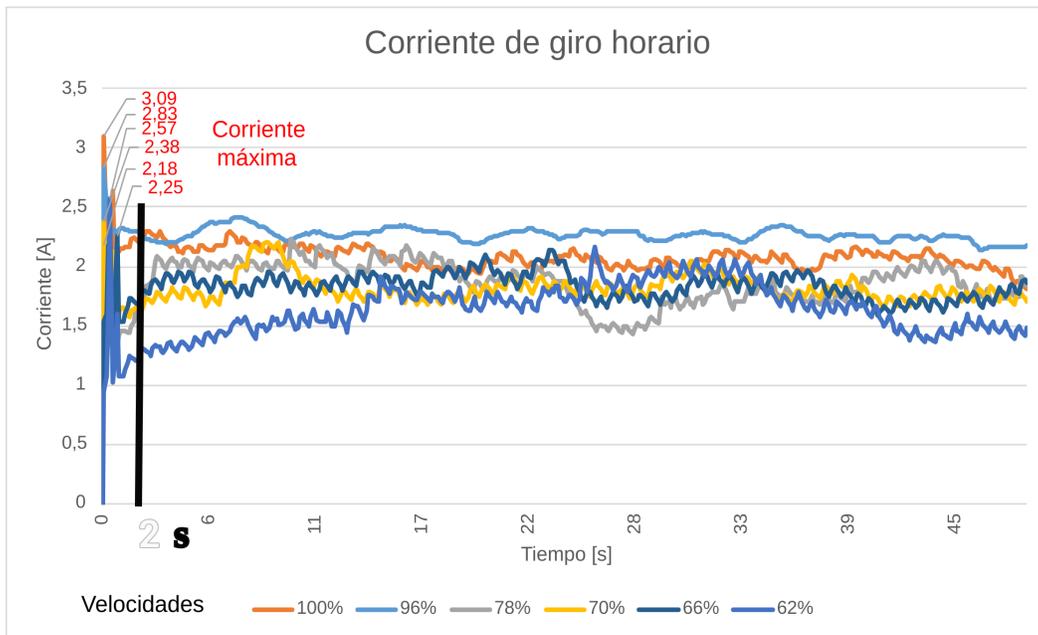


Figura 43: Gráfica de corriente. Muestra la rotación en sentido horario (valores positivos), con diferentes velocidades. Asimismo, se presento cómo se obtuvo la corriente máxima.

Con el objetivo de ignorar las alteraciones descritas, se usó un retardo en el microcontrolador antes de

comenzar la lectura de corriente. Iniciado el contador programado en PIC, cuando este llegue a dos segundos, el dispositivo comenzará con las lecturas. Así se evitará el pico de inicio y sólo se registrará el lapso que interesa analizar. En las figuras 44 y 45, se muestran las gráficas donde la señal ya no tiene el pico inicial, gracias al método descrito.

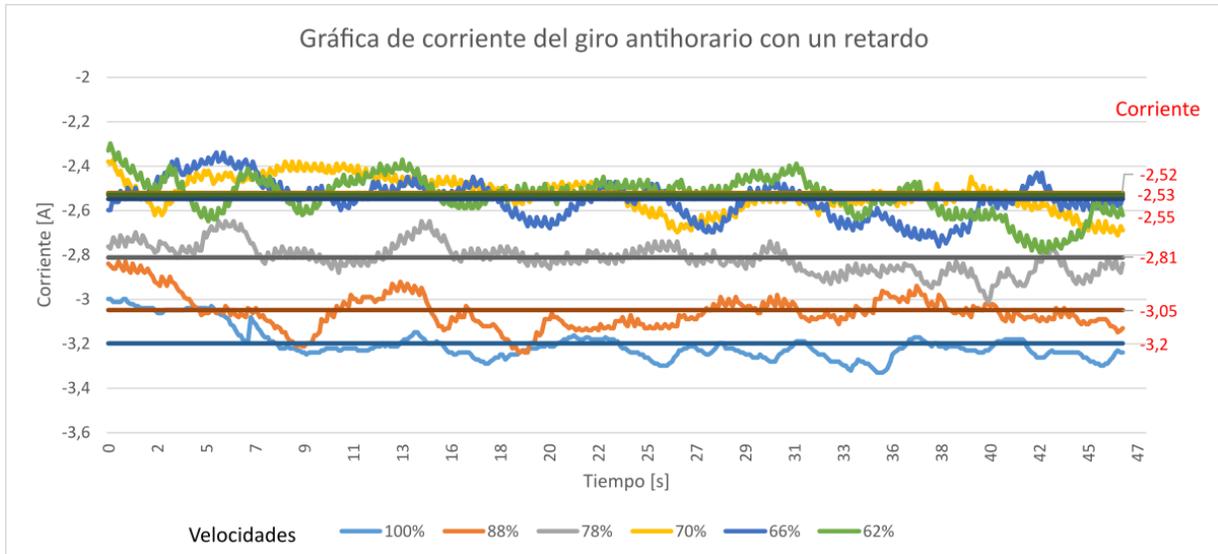


Figura 44: Gráfica de corriente. Con un retardo en la lectura, muestra la rotación en sentido antihorario (valores negativos) con diferentes velocidades, a fin de obtener estabilidad de corriente. Asimismo, la figura exhibe las diferencias en la corriente promedio de cada una.

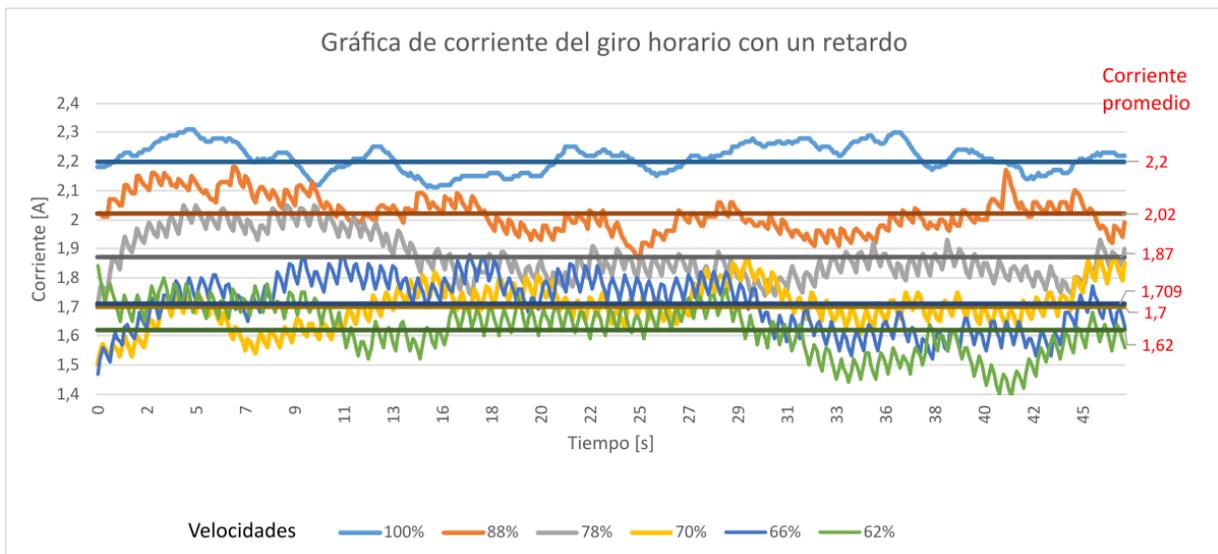


Figura 45: Gráfica de corriente. Con un retardo inicial en la lectura, muestra la rotación en sentido horario (valores positivos) con diferentes velocidades, a fin de obtener estabilidad de corriente. Asimismo, la figura exhibe las diferencias en la corriente promedio de cada una.

Al descartar el tiempo de muestreo inicial, la señal del consumo de corriente de trabajo fue estable, sin picos elevados de corriente.

7.3. Rotación del domo con obstrucción

El objetivo es obtener el límite de corriente en funcionamiento normal. Además, se pretende detectar posibles obstrucciones, a partir de un incremento de corriente. Por último, con base en la obstrucción simulada, se diseñará una gráfica en donde se identifiquen puntos límite. Las pruebas consistieron en rotar el domo tanto en sentido horario como en sentido antihorario, con una pequeña obstrucción que detuviese su movimiento, simulando una falla. Lo anterior es de suma relevancia, toda vez que la estructura de la bóveda provoca que, con frecuencia, haya problemas en su desplazamiento o se detenga. Los experimentos descritos a continuación coadyuvaron en la identificación de dichas fallas. ¿La meta? Detener a tiempo los motores y protegerlos. Todas las pruebas se realizaron bajo las velocidades mencionadas al inicio del capítulo.

7.3.1. Resultados

Como se observó en las pruebas de velocidad, cada vez que esta magnitud física disminuyó, la corriente promedio, lo hizo de forma proporcional. En esa misma línea de ideas, podría deducirse que el límite de corriente en cada velocidad también variará en ese mismo sentido. De esta manera, se identificaron un par de casos, los cuales se explican a continuación.

7.3.2. Caso 1

Para el rango de velocidad que va de 3 a 1.9 m/s, se realizaron 24 pruebas, divididas en 4 bloques, con los siguientes valores porcentuales del potenciómetro: 100, 96, 81 y 78. En este rango, las pruebas tienen un comportamiento similar en la corriente, tanto en el giro horario como en el antihorario. En cada uno, puede observarse que el límite de corriente 1 —definido en las gráficas de las figuras 46 y figura 47— está por encima de la corriente nominal. Cuando los motores son obstruidos y, en consecuencia, la corriente aumenta, la línea del límite de corriente 1 delimita perfectamente este cambio. Para el giro antihorario, el tope de corriente definido para velocidades con un pwm mayores al 78% fue de -3.4A. Es plausible usar tal valor como límite, sin que se obstruya o afecte el movimiento, con velocidades mayores a 78 por ciento. Con relación al giro en sentido horario, el límite de corriente fue, para el mismo caso, de 2.6A. Lo expuesto puede apreciarse, respectivamente, en las figuras 46 y 47.

7.3.3. Caso 2

Con respecto a los valores pwm menores a 78%, la corriente disminuye considerablemente. El pico de corriente también lo hace, cuando los motores se obstruyen a dichas velocidades. Por esta razón, se definió un segundo límite de corriente. En adelante, a dicho valor se le denominará como límite de corriente 2, (véanse figuras 46 y 47). En cuanto al giro antihorario, el límite de corriente fue de -3A; respecto del giro horario, éste fue de 2.1 A.

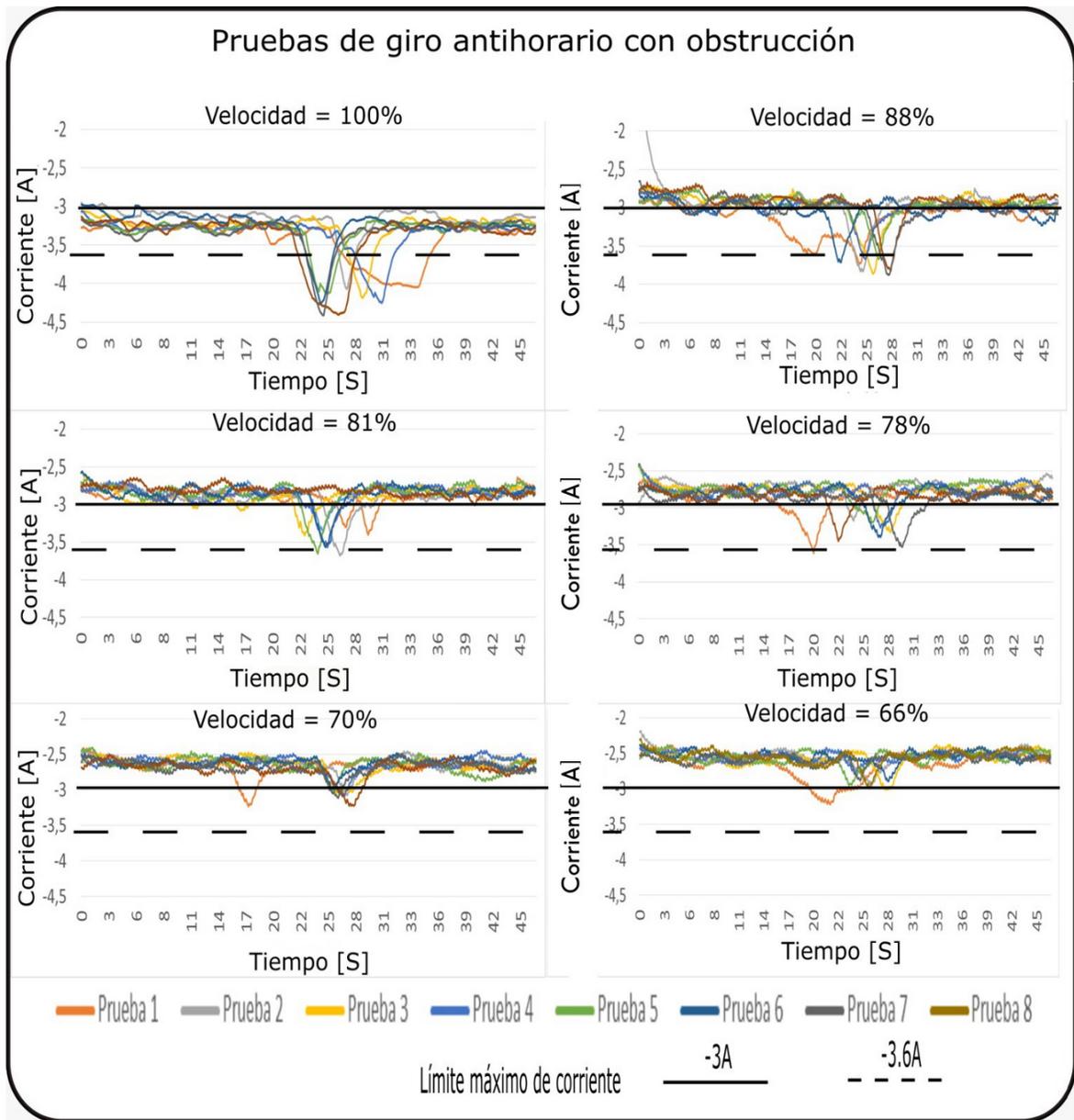


Figura 46: Gráficas de corriente con obstrucción. Muestran la rotación en sentido antihorario (valores negativos), con diferentes velocidades y con retardo en la lectura. Lo dicho permite observar el incremento de corriente cuando el domo se atora.

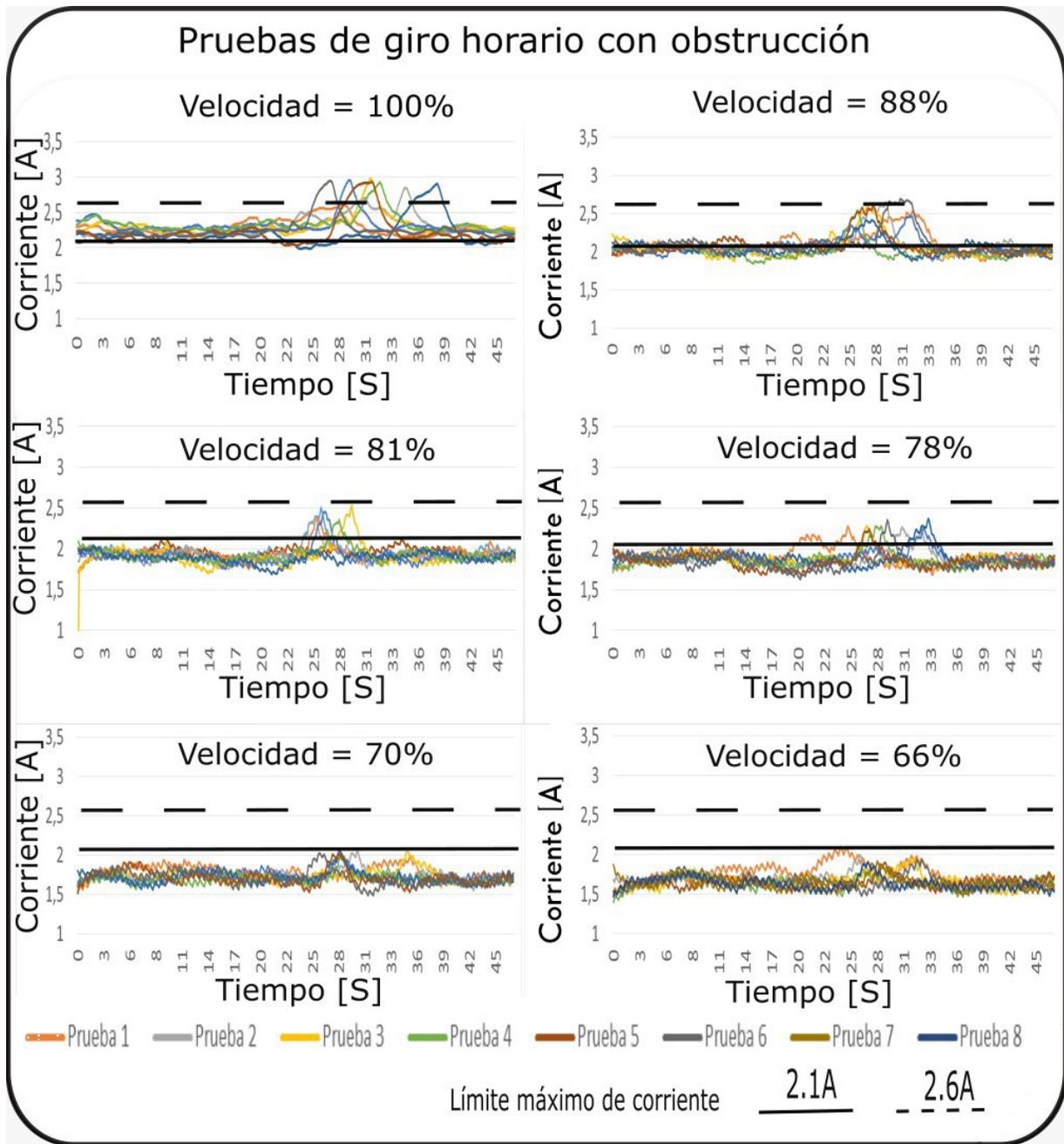


Figura 47: Gráficas de corriente con obstrucción. Muestran la rotación en sentido horario (valores positivos) con diferentes velocidades y con retardo en la lectura

7.4. Apertura del domo

Gracias a estos experimentos, se recopilieron datos que dan pie a la obtención de valores, sirven para detectar cuándo se atora el domo. Así, cada que dichas cifras sean rebasadas, los motores se apagarán

por medio de software. Con respecto a la apertura de la bóveda, se realizaron experimentos a diferentes velocidades, teniendo un funcionamiento considerado normal. Y con obstrucción se presente este tipo de fallas (véase figura 48).

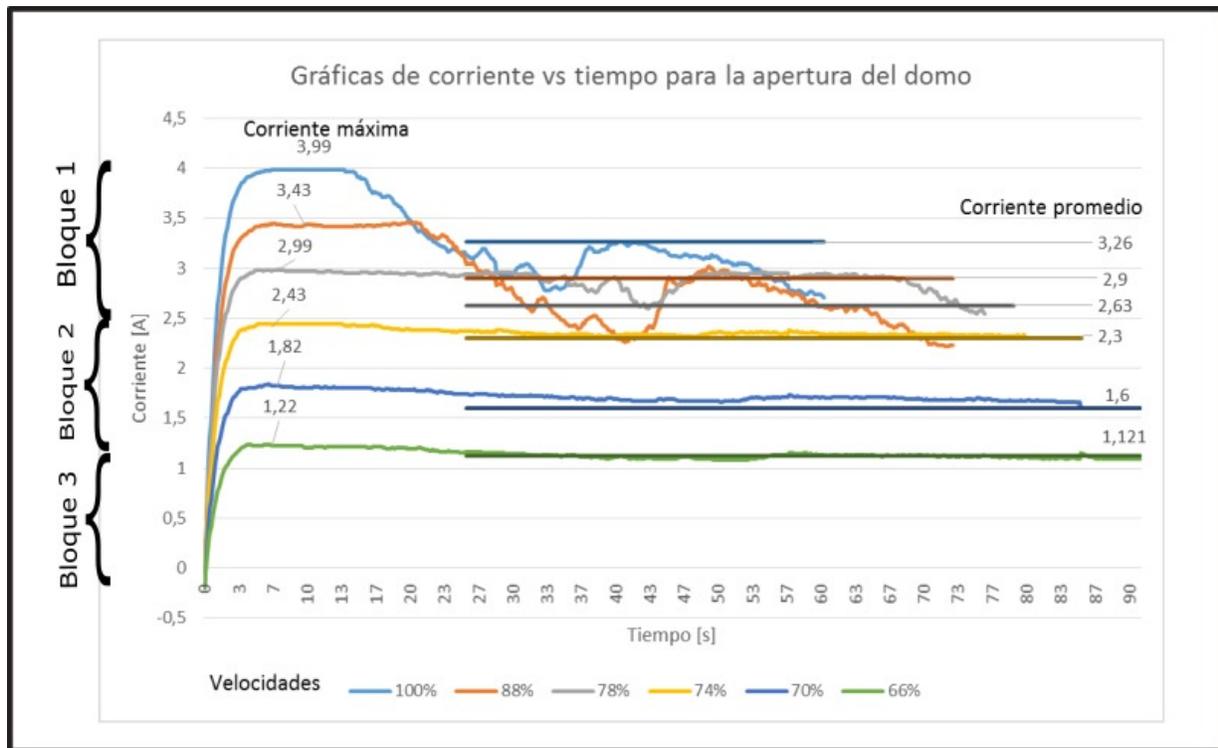


Figura 48: Gráfica de corriente. Muestra, con diferentes velocidades, la apertura de la escotilla del domo, así como el desglose de su corriente máxima y corriente promedio.

En las pruebas realizadas, se presenta un incremento inicial en la corriente; sin embargo, a largo plazo se observaron comportamientos fijos. Éstos fueron agrupados para su análisis en 3 de bloques, los cuales se desglosan a continuación.

- Bloque 1 Valores entre 100 y 78 por ciento. Como se observa en la figura 48, es necesario un consumo más alto de corriente, justo al arrancar el motor que abre la escotilla. Lo anterior se debe al diseño del domo. Cuando la escotilla está cerrada en posición inicial, el motor requiere mover todo el peso de la misma. El problema inicial se presenta porque se demanda al sistema una apertura rápida. Derivado de lo anterior, la potencia inicial se incrementa. De ahí el alza de corriente al inicio, la cual se estabiliza rápidamente. El peso disminuye cuando parte de la escotilla se encuentra en la parte de arriba, soportada por el domo.
- Bloque 2 Se considerará de 78 a 66 por ciento. Dentro de este margen, el domo presenta un consumo de corriente casi constante. La escotilla abre a menor velocidad; por ende, la potencia disminuye. De esta manera, se exige menos trabajo al motor de apertura y la corriente se mantiene lineal. Dicho de otra manera, la corriente promedio disminuye proporcionalmente, a medida que mengua la velocidad.

- Bloque 3 Su rango va de 66 hasta 0 por ciento. Se trata de la velocidad mínima, la cual es insuficiente para un funcionamiento adecuado del domo. Por esta razón, no se realizaron pruebas con los valores referidos.

7.5. Obstrucción para la apertura del domo

El objetivo, en este punto del trabajo, fue definir la corriente en caso de haber alguna obstrucción en la compuerta. Ello para programar la detención del motor de rotación, una vez alcanzado ese límite. El sistema original solía atascarse, tanto en los mecanismos de apertura como de cierre. Ello provocaba el desmontaje de todo el sistema para la restauración de su funcionamiento. Lo anterior, a su vez, ocasionaba una contrariedad significativa a los usuarios: les impedía la recolección de datos durante un tiempo considerable y valioso. Las pruebas, entonces, consistieron en abrir la escotilla de forma completa. A mitad del recorrido, el motor se obstruyó de forma manual, a fin de simular situaciones en donde se presentaran problemáticas similares, sea por un elemento externo, por fallo en el mecanismo o, incluso, si acaso el sensor de apertura llegase a fallar y, por lo tanto, el motor de la escotilla continuara su funcionamiento. El rango de las velocidades para estas pruebas fue de 3 a 1.1 m/s y se eligieron los siguientes valores porcentuales de PWM: 100, 88, 81, 78, 70 y 66.

7.5.1. Resultados

En primera instancia se describirá el segundo bloque, es decir, velocidades menores a 78 por ciento. En dicho rubro fue fácil identificar el cambio de corriente cuando el domo se atoraba. Como se corroboró en ensayos previos, la corriente se comporta de manera casi constante; por ende, es relativamente sencillo identificar cuándo ocurren cambios de corriente. Algo muy diferente ocurre con el primer bloque de velocidad, definido de 100 a 78 por ciento. Los resultados arrojan que en la obstrucción la corriente en los motores es igual a la corriente pico de arranque (como se puede ver en la figura 49).

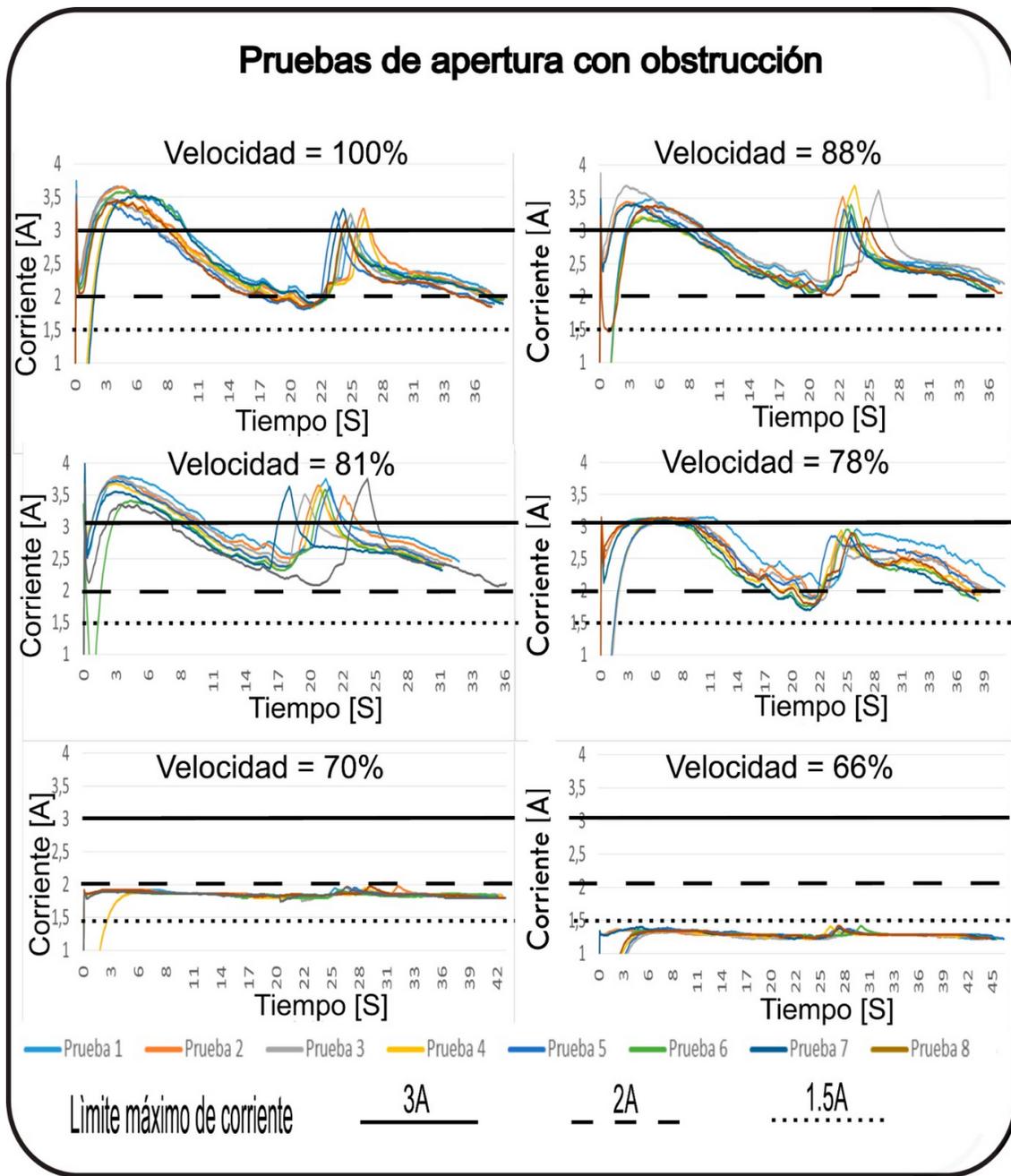


Figura 49: Gráficas de corriente de apertura con obstrucción para diferentes velocidades.

Siguiendo la estrategia empleada por las pruebas de rotación, se implementó un retraso de 25 segundos en el inicio para solventar dicha problemática. Eliminando tal periodo, puede identificarse fácilmente la corriente que corresponde al momento en que la escotilla se atore, como se puede observar en la figura 50).

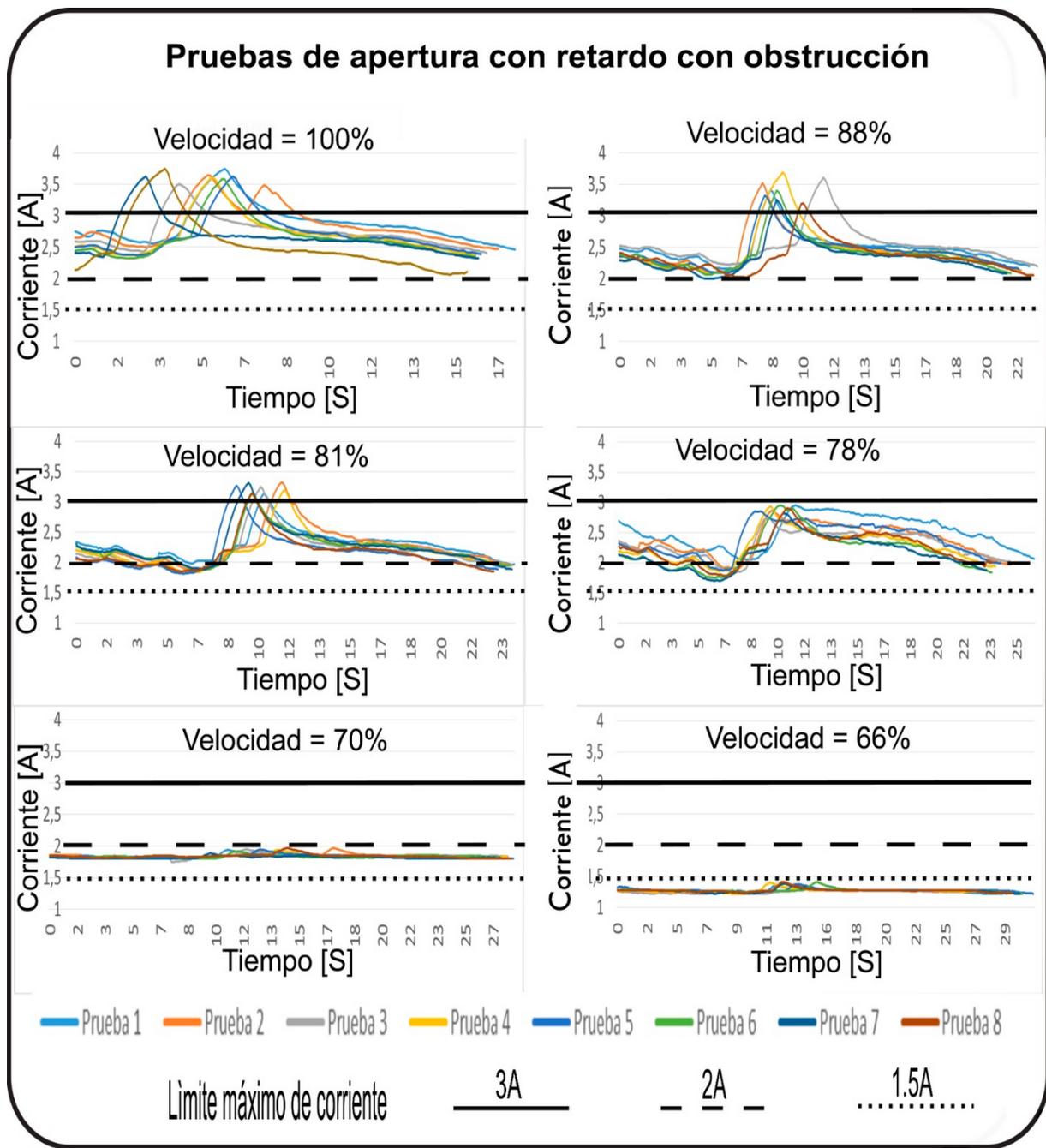


Figura 50: Gráficas de corriente de apertura con obstrucción y retardo para diferentes velocidades.

Se estableció, con los datos obtenidos, que la corriente límite que detendrá el motor de la escotilla para el primer bloque en 3 A. En el caso de magnitudes cercanas al valor del potenciómetro 180, el límite de corriente se definió en 2 A; para valores cercanos a 66%, 1.5 A.

7.6. Cierre del domo

Esta prueba se centró en la demanda de energía del motor de la escotilla durante el cierre, así como posibles obstrucciones. Se realizaron dos tipos de ensayos: 1) bajo condiciones normales, sin obstrucciones, y 2) con obstrucción. Primero se cerró el domo a diferentes velocidades, con un movimiento constante. Acto seguido, se realizaron pruebas deteniendo el motor, a fin de simular situaciones en donde la escotilla sufriera contratiempos parecidos que dañasen o pusieren en riesgo sus componentes. A partir de dicha caracterización, se fijó un valor de detección de picos de corriente, en caso de obstrucción.

7.6.1. Resultados

A diferencia de las pruebas de apertura, la corriente no presentó cambios notables. El comportamiento fue estable, con valores promedio muy parecidos. Tal estabilidad dio pie a la identificación de cualquier anomalía a partir del más leve movimiento en su cambio de corriente. En las pruebas de obstrucción, la señal no necesitó de un retardo de lectura, toda vez que no hubo picos de arranque. De hecho, las gráficas de corriente son muy similares para distintas velocidades. Lo expuesto se verifica si se saca un promedio. Es importante considerar esta disminución para definir de manera correcta los cambios en la corriente (véase figura 51).

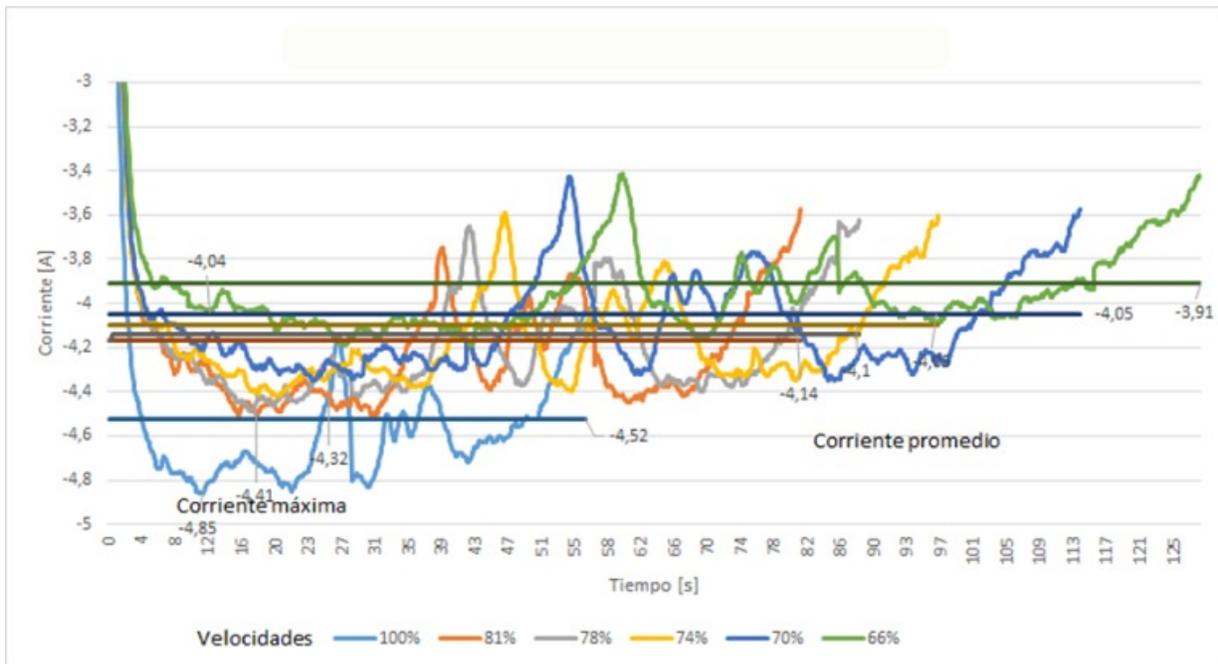


Figura 51: Gráfica de corriente. Muestra pruebas para el cierre de escotilla, con diferentes velocidades, a fin de obtener tanto la corriente máxima como la corriente promedio.

7.6.2. Pruebas de obstrucción para el cierre de la escotilla del domo

Los ensayos consistieron —en diferentes ocasiones y con distintas velocidades— en cerrar del domo, obstruyendo o deteniendo la escotilla para simular situaciones similares. Al igual que con los ensayos de

apertura (véase inciso 6.5), estas pruebas se dividieron en dos bloques: el primero agrupó los rangos porcentuales de 100 a 81. El primer valor corresponde a la velocidad máxima; el segundo se adjudicó a partir del cambio de corriente registrado en la prueba anterior. En la figura 52 pueden verificarse los incrementos de corriente, mientras la escotilla del domo es obstaculizada durante sus procesos de cierre. Como en las pruebas anteriores, queda de manifiesto una disminución de la corriente proporcional a la velocidad. Entonces, para valores porcentuales de pwm que oscilen entre 100 y 78, es posible identificar un límite de corriente 1 con un valor de -6.8 A. Para velocidades menores, se adjudicó el límite de corriente 2, con un valor de -5.5 A.

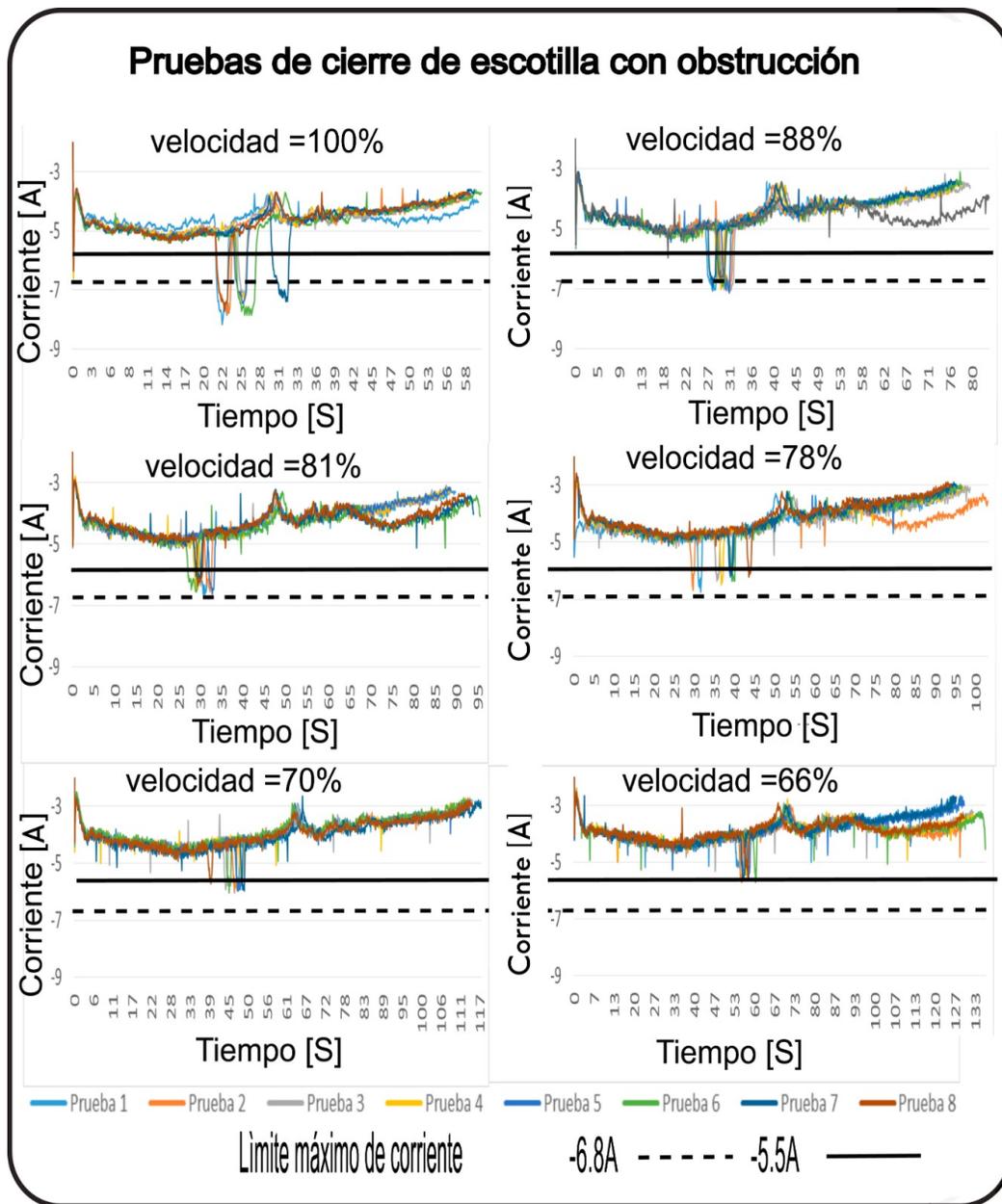


Figura 52: Gráficas de corriente. Muestran pruebas con obstrucción para el cierre de escotilla, con diferentes velocidades. Los datos también se comparan con su corriente nominal de funcionamiento.

7.7. Pruebas del sistema automático

El objetivo de las pruebas fue cuantificar la distancia de la pared de la base del rastreador. Con los valores registrados, se esperaba identificar tres rangos, los cuales servirían como parámetro en los procesos de orientación de la cúpula. El rango central, permite hacer ajuste fino en la posición adecuada. Los rangos extremos corresponden a posiciones inadecuadas del domo. Esta prueba consistió en girar el domo y

registrar la distancia entre sensor y la base del rastreador.

7.7.1. Resultados

Como se puede apreciar en las gráfica de la figura 53, se obtuvieron tres rangos de distancia perfectamente definidos. El primer rango —identificado en la figura bajo la denominación distancia correcta— tiene una separación de 10 a 15 cm. En dicho parámetro, el domo se encuentra en posición ideal con respecto al rastreador. Por otra parte, cuando el domo gira en sentido horario, la distancia se incrementa significativamente, lo cual define al segundo rango: valores mayores a 15 cm. Ahora bien, mientras el domo gire en sentido antihorario con respecto a la base, la distancia se mantendrá siempre menor a 10 cm. Así se sabe, en todo momento, en qué posición se encuentra el domo (véase figura 54)

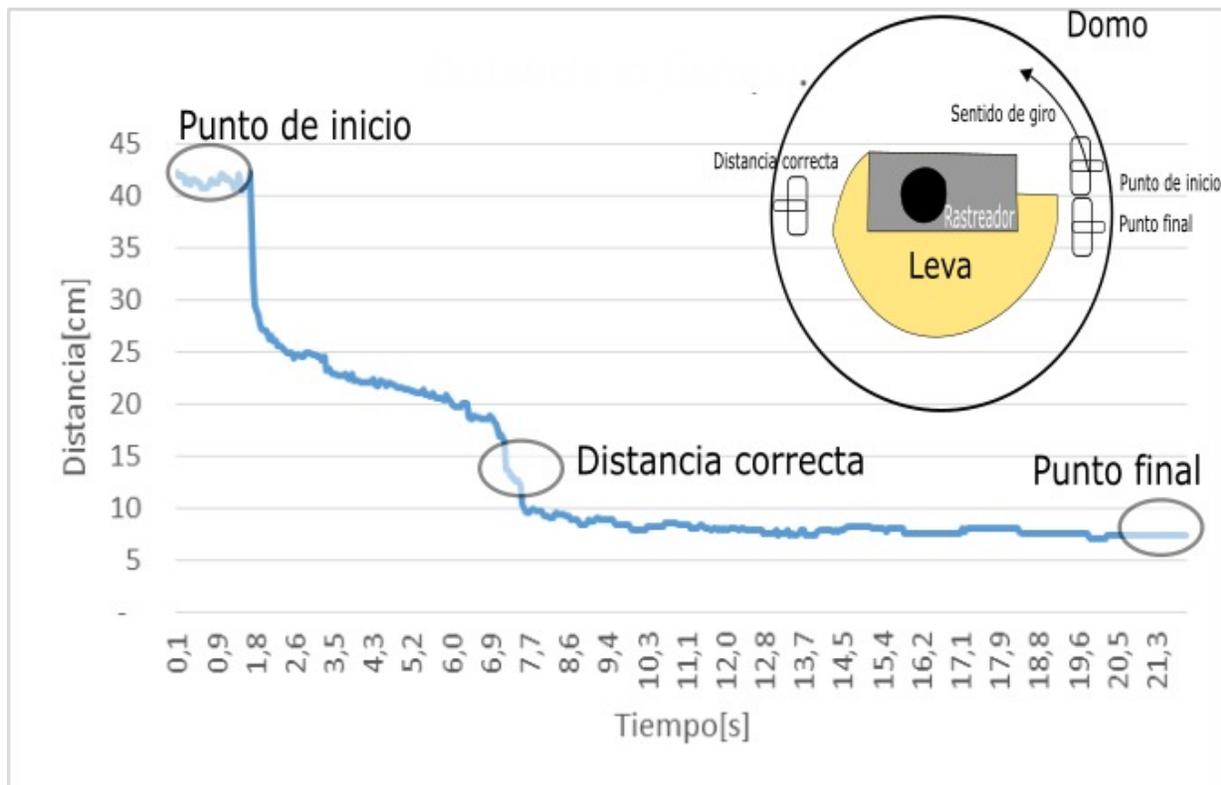


Figura 53: Gráfica de distancia registrada por el sensor ultrasónico.

Graficas de distancia

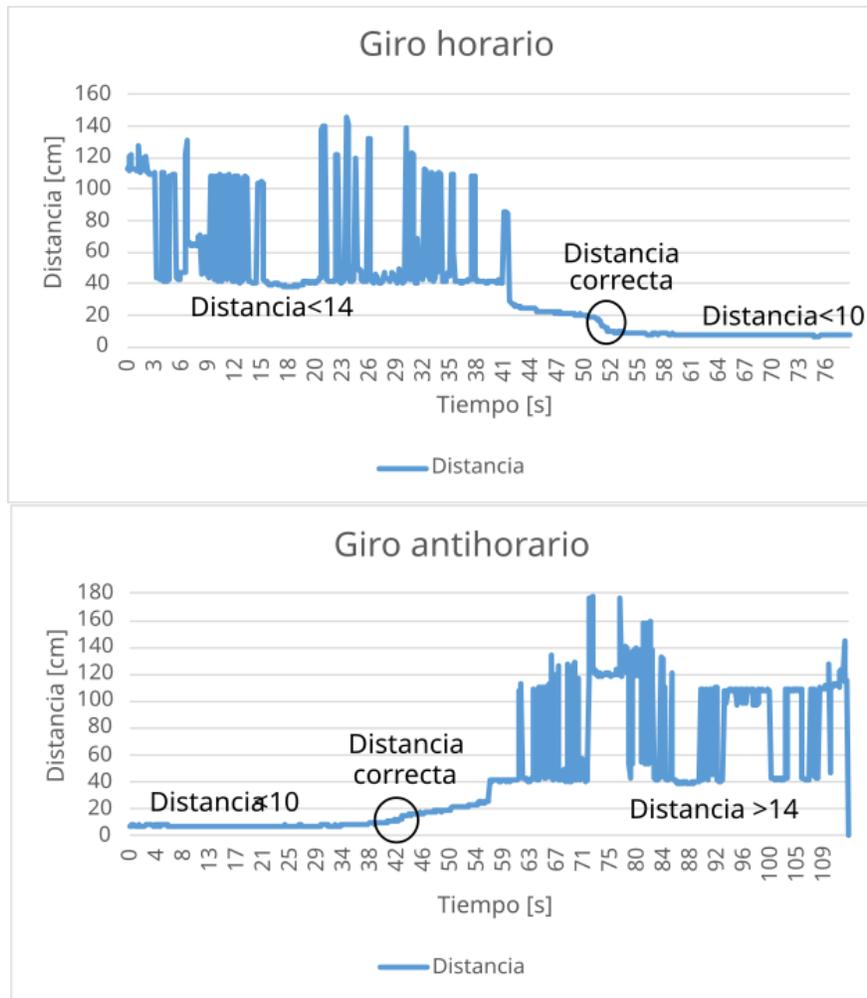


Figura 54: Pruebas realizadas con el prototipo semi leva de madera.

8. Características del prototipo implementado

El prototipo implementado tiene 3 modos de operación:

- 1) El modo manual permite instrucciones por comandos para auxiliar en el ajuste de la posición. Este modo se utiliza en una computadora de escritorio fija que se encuentra en un cuarto de control ubicado debajo del domo.
- 2) El modo control remoto permite el uso de comandos manuales vía bluetooth como auxiliar en mantenimientos. Es similar al modo manual pero permite su manejo con con dispositivo portátil. Solo basta instalar una terminal y vincularla al Bluetooth del domo y se podrá usar.
- 3) El modo automática permite el movimiento del domo, siguiendo al rastreador, de forma autónoma (sin intervención de un operador). Facilita la labor de los operadores ya que el domo, al funcionar de forma automática en conjunto con el rastreador para recolectar datos, les permitirá ocupar el tiempo que dedicaban a la operación del equipo a otras actividades. También en el modo automático se cuenta con un sensor de lluvia que es de bastante ayuda, ya que logra cerrar la escotilla del domo justo cuando empieza a llover, resguardando el equipo.

A continuación se muestra una tabla (Tabla 6) con los comandos que facilitan el control del domo en la terminal de una PC o desde cualquier dispositivo con bluetooth

Comando	Descripción
números positivos	El domo los lee como la cantidad de segundos que girará en sentido antihorario. 32000
números negativos	El domo los lee como la cantidad de segundos que girará en sentido horario. -32000
abrir	Abre en su totalidad la escotilla.
cerrar	Cierra la escotilla de forma total.
cerrarm	Cierra la escotilla de forma total, con la velocidad máxima del motor.
velocidad	Muestra en pantalla del dispositivo vinculado el valor actual del control de velocidad.
d	Interrumpe, de manera emergente, cualquier operación realizada en el domo, con ayuda de la interfaz de usuario.
cpu	Establece la comunicación del domo con una computadora.
blue	Habilita la comunicación del domo con un celular y una computadora.
automa	Fija la comunicación con el sistema automático, para que el domo trabaje autónomamente.

Cuadro 6: Tabla descriptiva de los diferentes comandos utilizados para controlar la funciones programadas del domo.

9. Conclusiones

Se logró desarrollar un sistema con características superiores al original: estructura modular, sensores para detener el domo de forma automática en caso de alta demanda de corriente, un sistema de control multivia (RS232, bluetooth, y radio frecuencia), manejo a base de comandos simples, funcionamiento (modo) automático, control desde una computadora y dispositivos con bluetooth.

Después de dos años consecutivos de prueba, tanto los módulos H utilizados para los motores de rotación, como los utilizados en el motor de la escotilla siguen en funcionamiento. Lo que demuestra la eficiencia de la estructura del diseño implementado.

Se mejoró la continuidad de las mediciones, dado que cuando existe una falla, en lugar de detener totalmente el funcionamiento del sistema —como solía suceder—, ahora solo falla un módulo, el cual puede cambiarse o repararse a la par de que el sistema siga dando servicio.

La implementación del sistema automatico, disminuyo el tiempo que se le tiene que dedicar para mover mover el domo a la posición deseada, de igual manera es importante mencionar que al lograr que el domo siga al rastreador, disminuyó de manera importante la posibilidad de que se pierda o se desconfigure su posición respecto al rastreador, dando como resultado mayor fiabilidad a las mediciones realizadas.

Gracias a la estructura de semileva implementada en el mismo, no se producen movimientos innecesarios que puedan llegar a dañar el equipo utilizado dentro del domo.

Implementar el control vía bluetooth, facilitó de manera considerable el mantenimiento y pruebas de funcionamiento, ya que al permitir la manipulación a corta distancia del domo, se puede observar la respuesta que tiene el domo a las instrucciones enviadas.

Se logró alargar la vida util de los motores y por ende a todos los demás sistemas electrónicos. Esto gracias a los diferentes sensores de corriente y de fin de carrera que permiten detener los motores antes de que se dañen.

Las características con las que se dotó, al sistema de movimiento y control para el domo solar *Robo-Dome*, permiten un control automatico, robusto y de fácil mantenimiento.

10. Trabajo a futuro

- Agregar un sensor de fin de carrera para indicar un punto de Home, en caso de ser necesario (véase figura 55.a).
- Brújula electrónica (HMC6352) que con ayuda del sensor de corriente nos indique el punto exacto donde se llegen a parar los motores de rotación. Incluso puede servir para mover el domo de forma independiente al rastreador (véase figura 55.b).
- Agregar un sensor de luz (fotorresistencia) para que el domo se abra en las mañanas y se cierre en las noches de manera automática (véase figura 55.c).
- Finalmente el proyecto podría mejorar con una interfaz gráfica programada en Python para que se comunique con el rastreador y lo pueda activar solo cuando las condiciones sean las adecuadas.

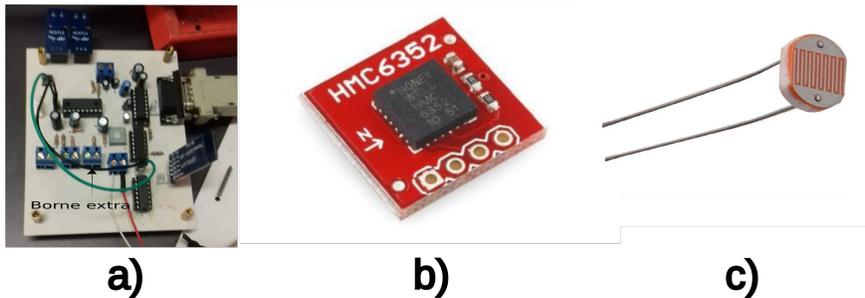


Figura 55: a) Borne extra en la tarjeta de control principal del domo para conectar un sensor de fin de carrera. b) Brújula HMC6352. c) Sensor de Luz.

11. Anexos

11.1. Tipos de domos

En el estudio de la atmósfera con dispositivos tecnológicos, es necesario en primera instancia ubicarlos en lugares estratégicos, si es que se desea facilitar sus tareas. El problema radica, entonces, en contar con el equipo adecuado para protegerlos. En este sentido, los estudios atmosféricos han empleado, desde hace tiempo, los domos. Tales estructuras aseguran su propio bienestar, sin entorpecer su trabajo, gracias a la diversidad de sus modelos. Dentro de su amplia gama, unos se enfocan en las necesidades propias de cada medición y otros en el espacio requerido para cada herramienta. Entre otras cosas, los domos cuentan con un sistema de gajos rotatorios. Éstos permiten la apertura y cierre de la cúpula. Por añadidura, la estructura facilita su rotación total con respecto a su eje vertical. Los diseños para domos de observación son variados, al igual que sus proveedores; aun así, podríamos clasificarlos según su forma, apertura y ejes de rotación, tal y como se enumeran a continuación: * Domo semiesférico con apertura horizontal (véase figura 56, inciso a). * Domo semiesférico con apertura tangencial (véase figura 56, inciso b). Domo semiesférico estático —sin rotación— (véase figura 56, inciso c). * Domo semicilíndrico estático (véase figura 56, inciso d). * Domo semiesférico con doble eje de rotación (véase figura 56, inciso e). * Domo cilíndrico (véase figura 56, inciso f). * Domos semiesféricos de apertura horizontal (véase figura 57, incisos a y b).



Figura 56: La imagen presenta los seis primeros domos enlistados líneas arriba.



Figura 57: Imágenes de telescopios semiesféricos de apertura horizontal.

11.1.1. Domo semiesférico con apertura horizontal

Este tipo de domo es uno de los más viejos. Cuenta con una pequeña ventana cubierta por dos piezas robustas llamadas obturadores que sirven para cerrarlo (véase figura 56, inciso a). En su apertura se deslizan los obturadores hacia los extremos, en forma horizontal, a través de una guía. Por ende, el domo debe rotar para que el telescopio cubra todo el campo de visión del cielo. Uno de los proveedores de este domo es Observa Dome, empresa con mucha experiencia en su fabricación. Posee un laboratorio donde estudian la resistencia a nieve, viento y terremotos, todo con base en el método de elementos finitos. México cuenta con uno; instalado en Nuevo León, concretamente en el Planetario Alfa. Fue inaugurado en el año 2000 (véase figura 56, inciso a). La estructura de esta clase de domo debe tener vigas cilindradas para darle forma. Generalmente, se usan carcasas metálicas con placas de aluminio. La gran desventaja del modelo son los obturadores. Su robustez dificulta la apertura cuando hay circunstancias meteorológicas adversas; por ejemplo, un entorno cubierto de nieve.

11.1.2. Domo semiesférico de apertura tangencial

Este modelo difiere del anterior, en tanto la apertura del obturador se realiza al deslizarse la superficie del domo. (véase figura 58).



Figura 58: Imágenes de centros de observación que cuentan con domos semiesféricos de apertura tangencial.

Puede encontrarse con mayor facilidad en el mercado. En comparación con otros modelos, existen más proveedores que los fabrican; entre otros, destacan Astrodome, Homedome y Scopedome. La principal diferencia entre los proveedores aludidos radica en el diseño, en concreto la ubicación de la guía del obturador del domo. Astrodome y Homedome, de un lado, posicionaron las guías en el exterior de la semiesfera Scopedome. En cambio, Scopedome diseñó un modelo de guías para tener una semiesfera con superficie continua, todo ello una vez cerrado el domo (véase figura 58). El modelo se fabrica principalmente en fibra de vidrio, razón por la cual es más liviano que los diseños metálicos. Eso mismo da la oportunidad de seleccionar un motor de menor potencia para la apertura y cierre del domo, característica con la cual se observa todo el campo de visión. Al igual que con los domos semiesféricos con apertura horizontal, estas estructuras requieren de un motor que los haga girar sobre un eje vertical.

11.1.3. Domo semiesférico estático

Grover Brotherston —fundador de la empresa Astro Haven y diseñador de modelos de domos para telescopios— hizo sus primeros diseños basado en los domos de tipo semiesférico, con apertura tangencial (véase figura 59, inciso a). En sus optimizaciones, buscó la manera de eliminar el costo elevado del equipo que hace girar la estructura.

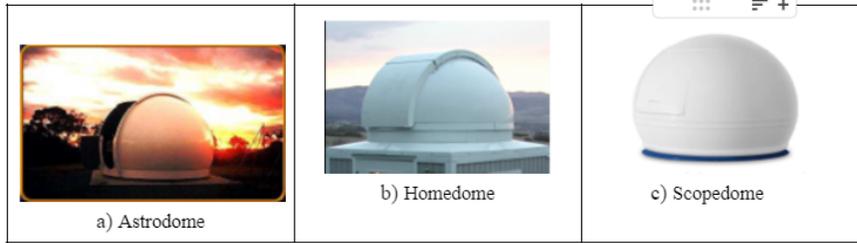


Figura 59: Imágen con distintas marcas y modelos de domo semiesféricos estáticos.

Para ello, diseñó los nuevos modelos estáticos, en donde la apertura admitía la observación de todo el campo de visión. El problema era encontrar la manera de abrir y cerrar el domo. Grover Brotherston diseñó un sistema de correas para tal efecto (véase figura 60, inciso a). Otros diseños de este estilo de domos se pueden encontrar en las cúpulas de los Very Large Telescope (vlt), del cerro Paranal (véase figura 60, inciso b). La principal diferencia con los de Astro Haven es que la apertura y cierre se realizan por medio de pistones hidráulicos.

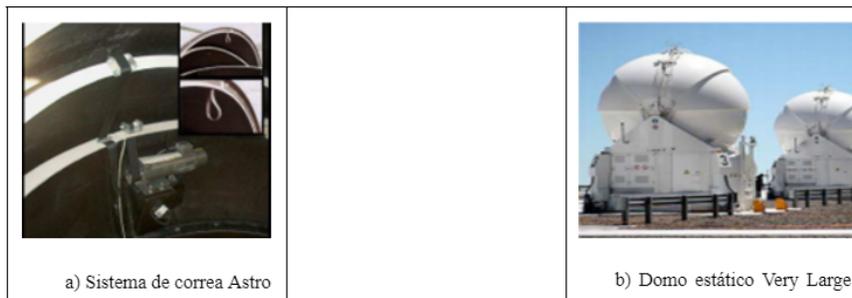


Figura 60: La fotografías muestran nuevas implementaciones y modelos de domos semiesféricos estáticos.

11.1.4. Domo semicilíndrico estático

Al igual que con el domo semiesférico estático, la bóveda semicilíndrica estática no gira su estructura. Con sólo abrirlo, se puede observar la estructura. A diferencia de los presentados anteriormente, las cúpulas semi cilíndricas tienen varios tipos de diseños (véase figura 61). A pesar de ello, son los menos usados.

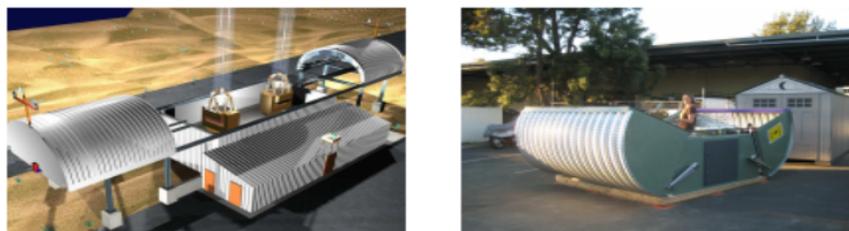


Figura 61: Imágenes con distintas marcas y modelos de domos semicilindricos estáticos.

11.1.5. Domo semiesférico con doble eje de rotación

Aparecido con la incorporación de los nuevos telescopios gigantes de más de 30 metros de diámetro, este diseño cuenta con doble eje de rotación: uno es el vertical fijo, que mueve la base de la estructura. El otro, móvil; está inclinado con respecto a la vertical y es coaxial al eje de visión del telescopio (véase figura 62).

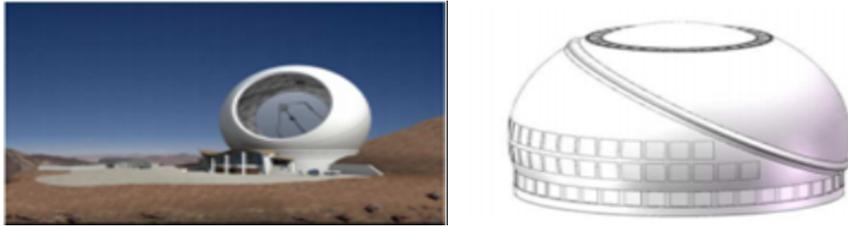


Figura 62: Domos semiesféricos con doble eje de rotación

11.1.6. Domo cilíndrico

El domo cilíndrico cuenta con obturadores capaces de desplazarse hacia los lados, de forma similar al domo semiesférico con apertura horizontal. La figura 7.8 muestra una fotografía del observatorio Paranal, el cual emplea varios domos estáticos Very Large Telescope (vlt). En la imagen, se aprecia con claridad la forma cilíndrica del domo, la cual debe rotar para realizar la observación de todo el campo visual. Asimismo, este tipo de estructura presenta una buena ventilación. Sin embargo, su forma implica una serie de problemas, como la acumulación de hielo o nieve en las ventanas laterales, así como el amontonamiento de lo segundo en la parte superior del domo. Tales imponderables podrían dificultar su apertura



Figura 63: El Observatorio Paranal emplea varios domos estáticos Very Large Telescope (VLT).

11.1.7. Telescopio robótico

Sistema diseñado para trabajar de manera autónoma, sin necesidad de personal de operación presente en sus instalaciones. El operador puede estar en cualquier lugar del mundo, supervisando o esperando los datos con su computadora personal conectada a Internet. Ahora bien, es importante saber que los usuarios de los telescopios robóticos no manejan directamente el telescopio desde sus ordenadores; envían instrucciones a un sistema informático, que las almacena y ejecuta cuando procede. El primer telescopio robótico manejado a través de Internet inició sus operaciones en diciembre de 1993, en Oxenhope, Yorkshire Pennines, Inglaterra. El tipo de domo del telescopio no cabe en las categorías mencionadas con antelación (véase figura 7.9, inciso a). Con todo, tiene similitudes con el domo semicilíndrico estático con apertura lateral. Lamentablemente, las condiciones ambientales de la zona brindaron pocas noches claras, aspectos que dificultaron la observación. Frecuentemente, el sistema no pudo operar por semanas. Ello obligó al equipo encargado a generar un nuevo proyecto, el cual se denominó Bradford Robotic Telescope (brt). Fue ubicado en el Observatorio de Teide, del Instituto de Astrofísica de Islas Canarias, España. El domo utilizado fue de tipo semiesférico, con apertura horizontal (véase figura 64, inciso b).

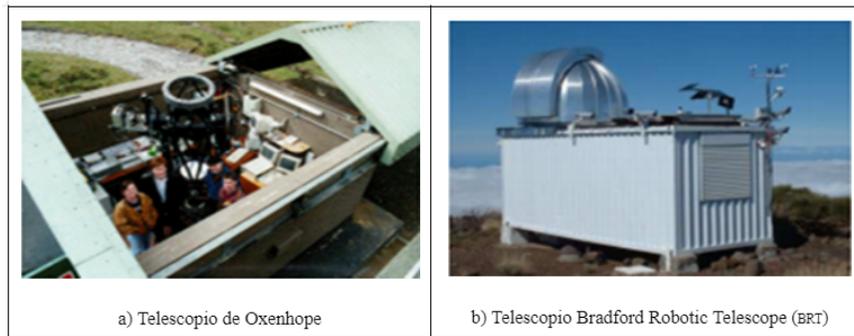


Figura 64: Las fotografías muestran telescopios robóticos manejados vía remota a través de Internet.

11.2. Pruebas del sensor ultrasónico con diferentes formas

El sistema automático del domo se basó tanto en las lecturas de un sensor ultrasónico, como en la geometría de una semi leva instalada en el rastreador, las cuales auxilia en el seguimiento del mismo. Sin embargo, para llegar a esta figura, se probaron otras formas, las cuales se describen a continuación. La primera prueba consistió en implementar el sensor ultrasónico. Para ello, se midió la distancia entre éste y la forma del rastreador (véase figura 65). Por su propia configuración, las medidas del sensor no proporcionaron, por sí mismas, un rango de referencia que permitiera conocer la posición exacta del rastreador. No tenía un diseño adecuado para que la onda ultrasónica del sensor regresara y de esta manera se efectuara una lectura correcta (véase figura 66).

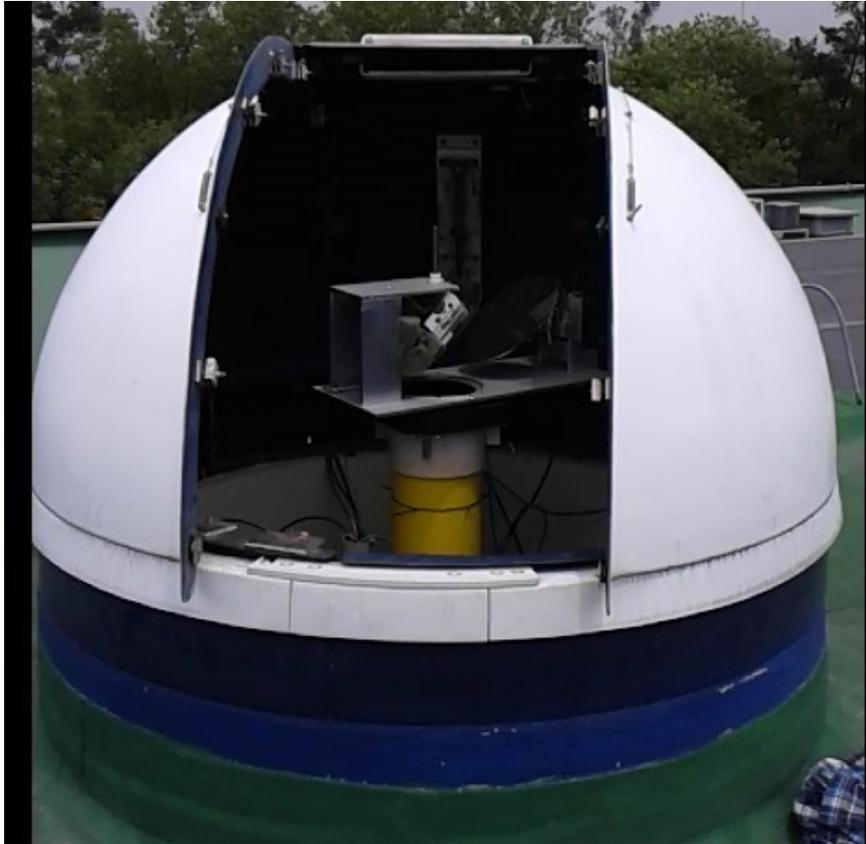


Figura 65: La fotografía muestra la estructura interior, donde se elaboró el sistema automático.

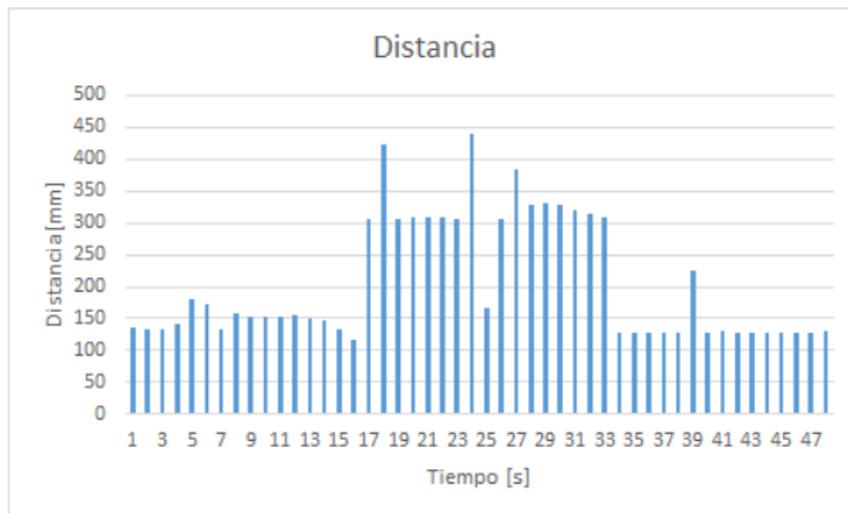


Figura 66: La gráfica de barras muestra la distancia registrada con el sensor ultrasónico, dada la estructura interna inicial del domo.

Por todo ello, se creó una estructura triangular acoplada a uno de los costados del rastreador. Se fabricó de unícel, por ser un material fácilmente manejable y ligero, todo con la intención de no entorpecer el giro del rastreador (véase figura 7.13).

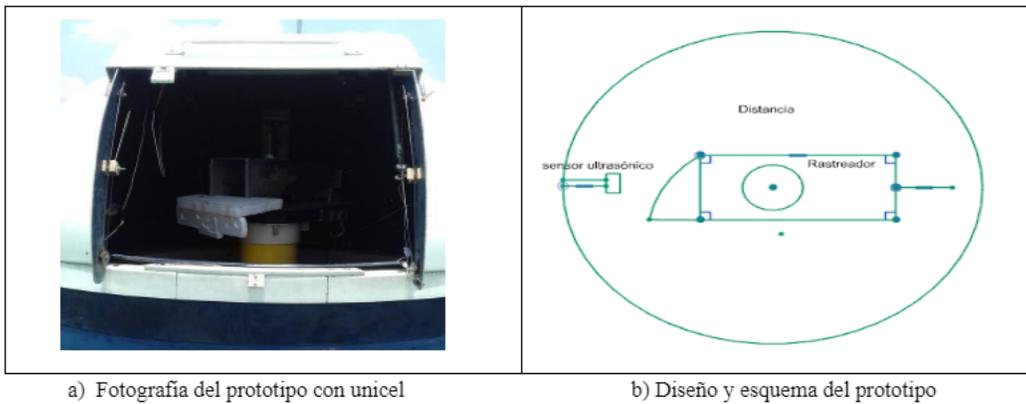


Figura 67: EL primer prototipo para el sistema automático permitió registrar una distancia de referencia.

El sistema de sensor ultrasónico con estructura triangular otorgó resultados favorables. Proporcionó un rango de valores ordenados con una secuencia incremental, la cual varía con el giro del rastreador: 7 a 20 cm. En la siguiente gráfica, pueden observarse dos valores que se disparan. Son a causa de las uniones en la estructura, pues éstas no eran perfectas. Había pequeños espacios que, aunque no muy grandes, afectaron las mediciones y ocasionaron que el domo se perdiera (véase figura 68).

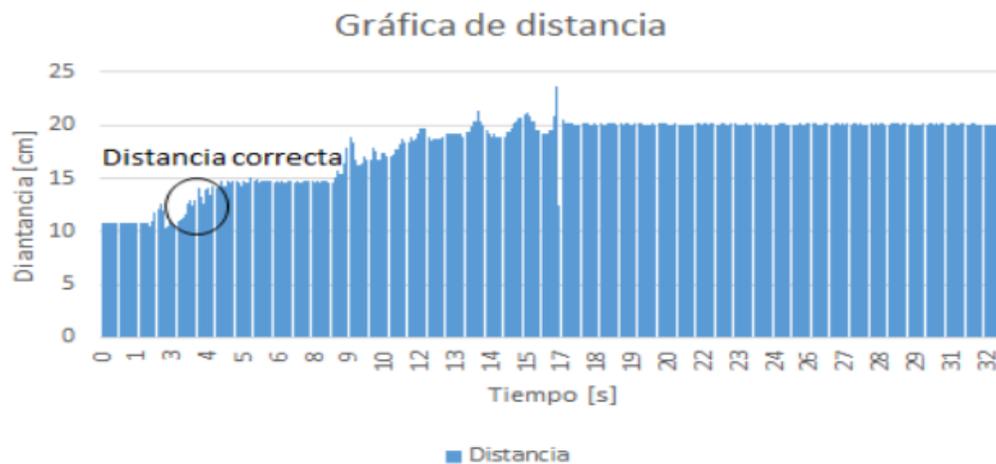


Figura 68: Esta gráfica de barras fue registrada por el sensor ultrasónico, con ayuda del primer prototipo.

Con estos valores, se escogió el rango de 10 a 14 cm, posición óptima para que el domo permitiera el paso de luz. Si la bóveda sale de dicho parámetro, siendo la distancia menor, entonces girará. Un problema importante en el diseño es cuando el rastreador se mueve lejos de la estructura. Como queda de

manifiesto en la siguiente gráfica (figura 69), es difícil saber en qué lado está: los valores se incrementan y son tan parecidos, que resulta imposible establecer un punto de comparación. Las cifras centrales en la imagen corresponden a la distancia respecto de la estructura triangular. Los demás, registros de la distancia fuera de ella.

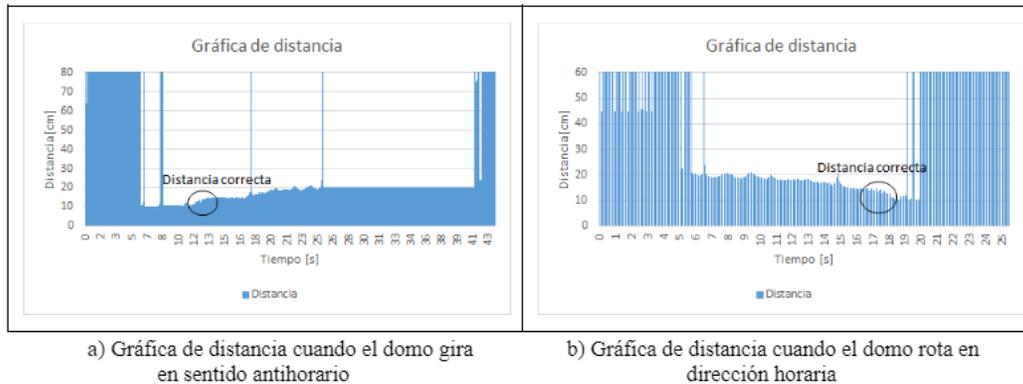


Figura 69: Las gráficas de barras representan las lecturas del sensor ultrasónico, implementando la estructura triangular del primer prototipo, al darle una vuelta al domo.

Con un sencillo algoritmo, se logró que el domo siguiera al rastreador. Se hizo con base en la distancia. Simplemente se establecieron dos puntos de comparación: si resultaba mayor a 14 cm, el domo debía moverse. Lo mismo pasaba si medía menos de 10 cm, sólo que se movería en sentido opuesto. Así hasta que la distancia se situara dentro del rango deseado

11.3. Filtros Digitales

Un filtro digital hace referencia a un procedimiento matemático programable en computadora. Puede modificar una señal de entrada a partir de una secuencia de números de la misma. Con ayuda de una operación matemática, obtiene otra secuencia conocida como señal de salida o respuesta. El objetivo es separar la señal de interés de aquéllas que se combinen desafortunadamente, como el ruido o interferencias provocadas por otros sistemas. En el presente proyecto de tesis se hizo uso de filtros digitales. De hecho, se evaluaron un par. El primero fue el filtro media; el segundo, el filtro mediana. Son procedimientos matemáticos básicos, pero de gran utilidad destinados a depurar señales de manera sencilla.

11.3.1. Filtro media

El filtro media requiere recopilar 10 elementos $[x_1 \dots x_{10}]$ de la señal de entrada. Así obtiene el promedio. Éste reemplazará al primer elemento en la nueva señal $[y_1]$. El segundo elemento de la señal de salida $[y_2]$ estará compuesto por el promedio de 10 elementos de entrada, comenzando por el segundo $[x_2 \dots x_{11}]$. Y así consecutivamente (véase ecuación 4).

$$\sum_1^n y = \frac{(x_1+x_2+\dots+x_n)}{n}$$

Basta con programar el algoritmo en el microcontrolador para que se filtre la señal de corriente. Las gráficas que se muestran a continuación (figura 70) reflejan cómo mejora la señal de manera significativa, al aplicar el filtro media a la señal del sensor de corriente.

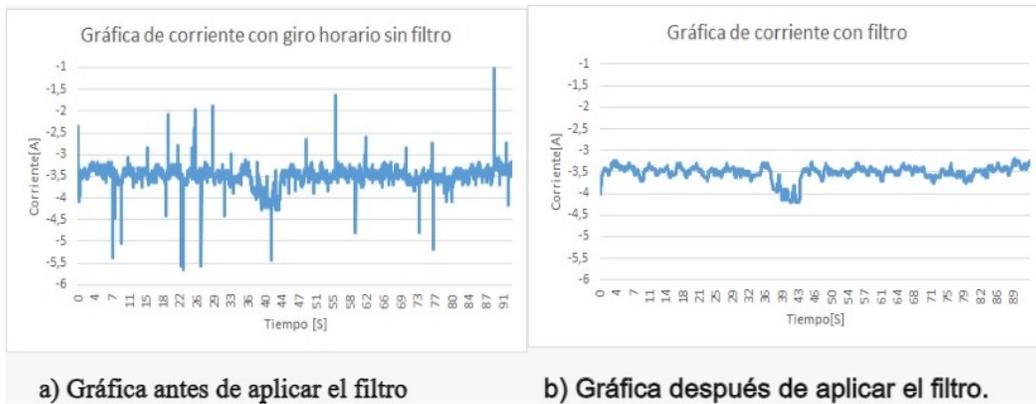


Figura 70: Gráficas comparativas de señal

11.3.2. Filtro mediana

El filtro mediana principia con una muestra de datos de entrada. En este caso se consideraron 10. A partir de ellos, se calculó el valor central de la muestra. La respuesta del filtro o señal de salida sería igual a dicho valor central (véase figura 71)

Funcionamiento

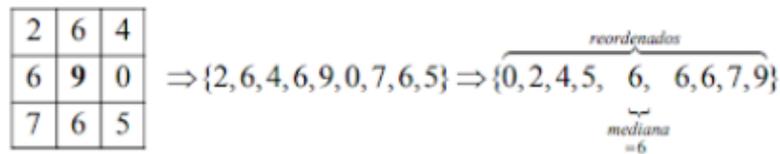


Figura 71: Funcionamiento del filtro mediana.

Para la señal de salida y_1 , se tomaron los 10 primeros registros de la señal de entrada $[x_1 \dots x_{10}]$. Así se obtuvo el valor central. Para la siguiente cifra de salida de la señal, se tomó la misma cantidad de registros de la muestra anterior, sólo que esta vez comenzó a partir del segundo valor arrojado por el sensor $[x_2 \dots x_{11}]$. El proceso se repetirá la cantidad de veces que sea necesario (véase ecuación 6).

$$Y_n = \text{Mediana}(x_1 + x_2 + \dots + X_n)$$

Basta con programar un algoritmo en el microcontrolador que filtre la señal de corriente. Como se advierte en las siguientes gráficas (figura 7.18), la señal del sensor de corriente mejora de manera significativa cuando se aplica este filtro. De hecho, se utilizó la misma señal que en el filtro anterior (véase figura 72).

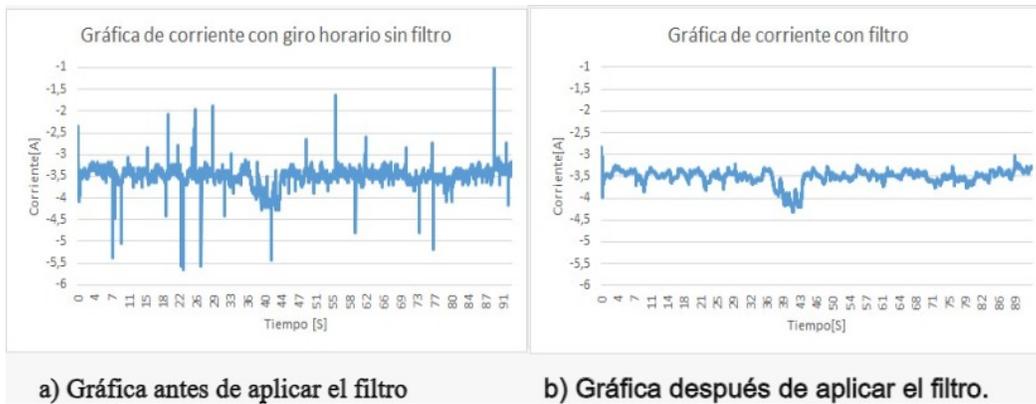


Figura 72: Gráficas comparativas de señal

12. Bibliografía

- Acha, S., Pérez, J., Castro, M. et al. (2002). Electrónica digital. Introducción a la lógica digital: Teoría, problemas y simulación. México: Alfaomega.
- Bolton, W. (2013). Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. México: Alfaomega.
- González, M y Montaña, L. (2015). La espectroscopia y su tecnología: Un repaso histórico y su importancia para el siglo xxi. Latin-American Journal of Physics Education. 9 (4), pp. 4602-1 - 4602-14
- Herrera, B. (2016). Determinación de columnas totales de amoníaco sobre la Ciudad de México a partir de espectroscopia FTIR de absorción Solar [Tesis de licenciatura no publicada]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pazmiño, J., Piedra, W y Quintuña, P (2004). La mecatrónica: sistemas de automatización en serie. Universitas-XXI, Revista de Ciencias Sociales y Humanas [en línea], (5), pp. 149-161. Disponible en <https://drive.google.com/file/d/1FOahJG59F8haUQjoj4RKcv_DQVHgL5AW-/view> [Fecha de consulta: 15/08/22].
- Rivera, D. (2022). Determinación de columnas verticales de formaldehído sobre la Ciudad de México utilizando espectroscopia de absorción óptica diferencial [Tesis de licenciatura no publicada]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sánchez, C (2010). Selección de un domo para telescopio robótico [Tesis de licenciatura no publicada]. Universidad de Chile. Disponible en <<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103781>> [fecha de consulta: 17/09/22].
- Sancho, J. (2012). Características generales de la Espectroscopía (Descifrando las claves de la interacción materia-radiación). Strong, R. (2001). Update on the development of a near earth object observatory and its role in education.
- Wolfram, E., Otero, L., Raponi et al. (2003). Espectrorradiómetro computarizado para estudios de aerosoles y especies contaminantes en la atmósfera [en línea]. Anales AFA, 15(1). Recuperado de <https://afan.df.uba.ar/journal/index.php/analesafa/article/view/580> [fecha de consulta: 01/08/22].

- Home Dome. (n.d.). Robo Dome. <https://homedome.com/robodome/>[fecha de consulta: 01/08/22].
- STMicroelectronics. (n.d.). L298N datasheet* AllDataSheet. <https://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/pdf/22440/STMICROELECTRONICS/L298N.html>[fecha de consulta: 01/08/22].
- Honeywell. (n.d.). HMC6352 datasheet. SparkFun. <www.sparkfun.com/datasheets/Components/HMC6352.pdf> de consulta: 01/08/22].
- AG Electrónica. (n.d.). HC-SR04 Ultrasonic Module datasheet*. <https://agelectronica.lat/pdfs/textos/U/ULTRASONIC-HC-SR04.PDF> [fecha de consulta: 01/08/22].