

UNIVERSIDAD DE SONORA DIVISIÓN DE INGENIERÍA



POSGRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS Y TECNOLOGÍA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS
PARA UN SISTEMA DE CONTROL EMBEBIDO DE
HELIÓSTATOS

T E S I S

PRESENTADA POR

ELBERTH ANDRÉS ENRÍQUEZ MONTOYA

Desarrollada para cumplir con uno de los
requerimientos parciales para obtener
el grado de Maestro en Ingeniería

DIRECTOR DE TESIS
DR. VICTOR HUGO BENITEZ BALTAZAR

HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO.

NOVIEMBRE 2015

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



“El saber de mis hijos
hará mi grandeza”



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



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

Hermosillo, Sonora a 20 de octubre de 2015

ELBERTH ANDRÉS ENRÍQUEZ MONTOYA

Con fundamento en el artículo 66, fracción III, del Reglamento de Estudios de Posgrado vigente, otorgamos a usted nuestra aprobación de la fase escrita del examen de grado, como requisito parcial para la obtención del Grado de Maestro en Ingeniería.

Por tal motivo este jurado extiende su autorización para que se proceda a la impresión final del documento de tesis: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA UN SISTEMA DE CONTROL EMBEBIDO DE HELIÓSTATOS** y posteriormente efectuar la fase oral del examen de grado.

ATENTAMENTE

Dr. Victor Hugo Benitez Baltazar
Director de tesis y Presidente del jurado

M.C. Cuitlahuac Iriarte Cornejo
Codirector y Vocal del Jurado

M.C. Jesús Horacio Pacheco Ramírez
Secretario del Jurado

M.C. Guillermo Cuamea Cruz
Vocal del Jurado

c.c.p. Archivo

RESUMEN

Un campo de helióstatos está conformado por una torre central, donde se transforma la energía solar en eléctrica mediante un proceso termo-eléctrico, y un número finito de seguidores, llamados helióstatos, cuyo objetivo es el redireccionamiento del rayo solar hacia el blanco en la torre.

El desempeño del sistema de control de helióstatos está sujeto a diversas condiciones de operación y a factores de perturbación que pueden afectar la gestión de las operaciones del seguidor y ocasionar daños graves al equipo. Estos factores son: temperatura, viento, vibración, características mecánicas, sistema de control, entre otros.

El objetivo de este trabajo, es desarrollar un sistema que apoye a la realización de un banco de pruebas de helióstatos, donde se evalúen los seguidores en base a factores de perturbación y estados de operación. El banco de pruebas está diseñado para implementarse en la Plataforma Solar de Hermosillo (PSH), con el fin de realizar mejoras para futuros diseños de sistemas de control.

Este documento muestra las pruebas que se incluyeron en el banco, las cuales son: pruebas térmicas, que simulan las condiciones estresantes de calor a las que se encuentra el campo; prueba del error del sistema de control, evaluando diferentes intensidades del viento a la estructura, la vibración por efectos de viento o mecánicos del seguidor; y el error del controlador, calculando el error que existe en la posición del seguidor durante las operaciones de seguimiento.

Los resultados mostrados por los experimentos anteriores revelan que, las condiciones térmicas son un factor importante para el correcto funcionamiento del sistema; además que el entorno Arduino puede ser un candidato prometedor a futuras mejoras en los seguidores por su capacidad de soportar altas temperaturas de operación (hasta 80 grados Celsius) y desempeñar tareas importantes, en lugar del cRIO; por lo que hace falta realizar más pruebas para corroborar lo anterior.

En relación a los resultados de la prueba del error de control, se reveló información importante del sistema SCADA, el cual tiene varias fallas en su programación, resultando en un sistema asincrónico, por lo que el error aumenta a lo largo del tiempo. Con lo que respecta a la evaluación de viento y vibración, esta muestra correlación con el error de control, siendo que a mayor velocidad en las cargas de viento se obtiene como resultado un incremento del error y de la frecuencia de vibración de la estructura del helióstato.

ABSTRACT

A heliostat field consist of a central tower, where solar energy is transformed into electricity through a thermo-electric process; and a finite number of solar trackers, whose aim is to redirect the solar beam towards the target in the tower.

The heliostat control system performance is subject to several operating and stressful conditions that may affect the management operations of the solar tracker and cause serious damage to the equipment. These factors are: temperature, wind, vibration, mechanical characteristics, control system, among others.

The objective of this work is to develop a system to support the realization of various tests of heliostats, which are based in factors of disturbance and operating states. The test is designed to be implemented in the Plataforma Solar de Hermosillo (PSH), in order to make improvements for future designs of control systems.

This document shows the tests included in the bank tests, which are: thermal tests that simulate stressful conditions of heat, which are present in the field; error testing of the control system, assessing different intensities of wind on the structure, vibration by wind or heliostat mechanical effects; and the control error, calculating the error that exist in the position of the solar tracker during monitoring operations.

The results shown by the above experiments reveal that thermal conditions are important for the proper functioning of the system; Arduino system can be a promising candidate for future improvements in heliostats because of its ability to withstand high operational temperatures (up to 80 degrees Celsius) and play important tasks instead of using cRIO; so more testing is needed to corroborate this.

The results shown by the last tests revealed important information from the SCADA system, which has several mistakes in their programming, resulting in an asynchronous system, so the error increases over time and concluded that the system can be improved. With regard to the evaluation of wind and vibration, it shows

a correlation with error control, the wind loads being faster results in an increase in error and the frequency of vibration of the structure of the heliostat.

DEDICATORIAS

A Dios, porque me ha dado la oportunidad de vivir la experiencia del saber y por ayudarme a alcanzar mis metas y sueños.

A mis padres, Martín Enríquez Vega y Rosalba Montoya Ballesteros, por ser una inspiración y soporte de confianza y amor, gracias por su paciencia y comprensión; porque a pesar de las dificultades han realizado lo máximo para darme lo mejor. Reconozco su infinito esfuerzo por educarme y formarme, además por los valores que siempre me han inculcado. Los quiero, muchas gracias.

A mis abuelitos Sigifredo Montoya, Josefina Ballesteros, Fausto Enriquez y Josefina Vega, por ser un ejemplo a seguir, y que con su experiencias y enseñanzas me han ayudado a seguir adelante.

A mis hermanos, gracias por su ayuda y compañía, por saber que siempre estuvieron ahí cuando los necesité, sin importar la situación y las dificultades que viviéramos. Los quiero, Eduardo y Rosela Enríquez.

Dedico de igual manera a todos mis tíos, por ser parte de mi familia y de mis triunfos.

A todos mis grandes amigos y compañeros, por ser motivo de compañía y apoyo en mi recorrido.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por la vida y la salud brindada, por el estudio y los logros académicos y por mi familia.

Quiero agradecer a mis padres, Martín Enríquez y Rosalba Montoya, al igual que mis hermanos, Eduardo y Rosela Enríquez, por su confianza y su apoyo en esta etapa de mi vida.

Agradezco a mis maestros del posgrado por darme las herramientas que fueron esenciales para desarrollar mi trabajo.

Agradezco a mis directores de tesis, Victor Hugo Benitez y Cuitláhuac Iriarte, por orientarme y dirigirme en el camino de un investigador, apoyando con su experiencia y tiempo.

Del mismo modo quiero agradecer a mis amigos de la maestría en ingeniería industrial Ramón Armas, Patricia Shihemy, Iván Núñez y Javier Grijalva.

Quiero agradecer al profesor Jesús Pacheco y Gilberto Chávez por la ayuda brindada con el software LabVIEW.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Posgrado de Fortalecimiento de la Calidad en Instituciones Educativas (PROFOCIE) por su apoyo económico, sin el cual no hubiera podido lograr esta meta.

De igual manera agradezco al coordinador de la maestría, Alonso Pérez Soltero, por ayudarme cada semestre con lo que necesitaba.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Presentación	2
1.2. Planteamiento del problema	3
1.3. Objetivo general.....	4
1.4. Objetivos específicos.....	4
1.5. Hipótesis.....	4
1.6. Alcances y delimitaciones.....	4
1.7. Justificación.....	5
2. MARCO DE REFERENCIA.....	6
2.1. Energía solar	6
2.1.1. Energía eléctrica basada en sistemas solares	6
2.1.2. Tecnología fotovoltaica por medio de celdas (PV)	7
2.1.3. Sistemas de concentración solar de potencia (CSP).....	8
2.1.4. Ventajas y desventajas entre PV y CSP	8
2.2. Sistema de concentración térmica de torre central	9
2.2.1. Aire como medio transmisor en sistemas de torre central.....	10
2.2.2. La generación de energía eléctrica en sistema de torre central.....	10
2.2.3. El sistema de control (controlador) de torre central	12
2.2.4. Algoritmo de control	12
2.2.5. Sistemas embebidos por microcontroladores	14
2.2.6. Ejemplos de campos de concentración solar.....	15
2.3. Plataforma Solar de Hermosillo (PSH).....	17
2.4. Pruebas para el sistema de control embebido del helióstato.....	20
2.4.1. Factores de perturbación.....	20
2.4.2. Diseño de una prueba.....	21
2.4.3. Perturbación de temperatura.	23
2.4.4. Perturbación de viento	28
2.4.5. Perturbación de vibración	34
2.4.6. Evaluación del sistema de control.....	35
2.5. Entorno Arduino	39
3. METODOLOGÍA	41
3.1. Fase 1: Análisis del sistema de control de helióstatos con que cuenta la PSH ..	42
3.2. Fase 2: Diseño y aplicación de pruebas específicas para el sistema de control, contemplando factores de perturbación	43

3.3. Fase 3: Evaluación de las pruebas en base a criterios de confiabilidad y robustez	44
3.4. Fase 4: Determinación de alternativas de mejora para el sistema	45
3.5. Fase 5: Desarrollo de una guía de evaluación para la PSH	46
4. IMPLEMENTACIÓN	48
4.1. Pruebas térmicas.....	49
4.1.1. Prueba de temperatura: Evaluación del contenedor térmico.....	49
4.1.2. Prueba de temperatura: Evaluación del sistema embebido por estrés térmico	53
4.2. Prueba del error del sistema de control	56
4.2.1. Prueba preliminar: error de control	59
4.2.2. Prueba preliminar: vibración en la estructura del seguidor	67
4.2.3. Prueba preliminar: cargas de viento en campo	74
4.2.4. Prueba del sistema de control con vibración y viento, estado seguimiento	79
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	91
6. REFERENCIAS.....	94

1. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es un tema de discusión muy popular entre los grandes países en desarrollo: cómo optimizar este recurso para su máximo beneficio en las labores diarias de las personas, tanto en el trabajo como en el hogar. Dentro de esta discusión se observan varias opciones para generar esta energía, las cuales pueden ser: los combustibles fósiles, como es el caso del petróleo, para alimentar a motores de combustión interna y con esto generar electricidad (Lanzi, Verdolini y Haščič, 2011); energía eólica, la cual funciona con el principio del aprovechamiento del recurso del viento para hacer girar las turbinas de un motor y con esto la producción de electricidad (Cancino-Solórzano y Xiberta-Bernat, 2009); la energía solar, donde se aprovecha la radiación solar que posteriormente será convertida en energía eléctrica y para la cual existen varios métodos de transformación, como celdas fotovoltaicas y sistemas de concentración termosolar (Kanters, Wall y Dubois, 2014); sistemas hidráulicos, que obtienen energía por medio del agua, haciéndola fluir a través de turbinas generadoras, principalmente se encuentran en presas y ríos donde fluye libremente este recurso (Azofra et al., 2014); entre otros.

Un sistema de concentración termosolar es aquel que hace uso de la radiación proveniente del Sol para ser transformada en energía eléctrica. Dentro de estos sistemas podemos encontrar el campo de helióstatos, que está conformado de una torre receptora de radiación solar capaz de acumular dicha energía en calor y, que a su vez, desencadenará un proceso interno de evaporación de sal y agua para ser aprovechada por una turbina generadora, transformando la energía mecánica en eléctrica. De igual manera, el campo de helióstatos se conforma de un número finito de seguidores (helióstatos), cuyo objetivo es el seguimiento solar y redireccionamiento del haz de luz hacia el receptor en la parte superior de una torre (Pavlović et al., 2012 y Tuite, 2010).

El sistema de control embebido de helióstato es capaz de realizar operaciones específicas, dentro de las cuales se encuentran: home, posición manual, posición segura y seguimiento.

El sistema de control de helióstatos está sujeto a una serie de factores de perturbación (Bonanos, 2012). Dichos factores pueden afectar el sistema causando un inapropiado funcionamiento de los estados de operación del seguidor; además de esto, llegar a dañar componentes electrónicos y mecánicos del helióstato, impactando en costos de artículos estropeados y gastos innecesarios de mantenimiento. Factores ambientales, mecánicos y eléctricos se han tomado en cuenta para la realización de un banco de pruebas para el sistema de control de helióstatos.

En la siguiente sección se presentarán varios apartados, los cuales presentan la información general del proyecto de tesis. Apartados como: la presentación, el planteamiento del problema, objetivos generales y específicos, la hipótesis a validar, los alcances y delimitaciones de la problemática, y la justificación del proyecto, que se presentarán a continuación.

1.1. Presentación

La empresa Pirámide Estructural del Golfo S.A de C.V, localizada en Veracruz, se dedica al diseño y fabricación de bombas para aplicaciones especializadas, así como componentes mecánicos. Ha incursionado en años recientes en el desarrollo de helióstatos para plantas solares de potencia.

Dicha empresa ha requerido el apoyo de la Plataforma Solar Hermosillo (PSH), antes conocida como campo de pruebas de helióstatos (CPH), localizada en la carretera Hermosillo-Bahía de Kino, para el desarrollo de esta tecnología. En estas instalaciones se ha desarrollado tecnología termosolar para la producción de potencia eléctrica.

El control de los helióstatos ha sido implementado de dos maneras: por medio de tecnología embebida de microcontroladores, dada la facilidad de programación y bajo costo del dispositivo, y usando tecnología embebida de National Instruments (compactRIO).

Al trabajar con dispositivos electrónicos es necesario cumplir con una serie de factores para el desempeño en la comunicación del sistema y las operaciones específicas. El sistema de control de helióstatos cuenta con las siguientes operaciones:

- Home. Es el estado de operación donde el helióstato se encuentra normalmente por las noches (90 grados al horizonte); dependiendo de la estructura del helióstato, su descanso es horizontal.
- Posición segura. Este estado sucede automáticamente cuando los vientos sobrepasan ciertos límites de operación (mayores a 60 km/hr); el helióstato se desplaza hacia la posición *home* donde lleva acabo una menor resistencia al viento.
- Posición manual. Este estado de operación es para un ángulo en acimut y elevación fijos programados por el usuario.
- Seguimiento. Es el estado donde se mantiene el trabajo normal del helióstato. Mediante un vector de posición (especificación de posición del blanco) y los cálculos del vector solar, se redirigirá el rayo solar hacia el blanco seleccionado.

Perturbaciones como: ruido eléctrico, humedad, temperatura, entre otros aspectos mecánicos, son factores fundamentales que podrían afectar el cumplimiento de las operaciones del helióstato además de dañar el sistema embebido del seguidor solar.

1.2. Planteamiento del problema

El sistema de control de helióstatos hace uso de tecnología embebida para el desarrollo de operaciones específicas (home, posición segura, posición manual y seguimiento), para la concentración de energía solar. Perturbaciones como: temperatura, aspectos mecánicos, ruido eléctrico, entre otros, son factores que podrían afectar y dañar el sistema embebido y su comportamiento en el desempeño de las operaciones anteriores. La PSH carece de estudios para la evaluación del desempeño del sistema de control en base a sus operaciones y factores de perturbación.

1.3. Objetivo general

Determinar el desempeño del sistema de control de un helióstato por medio del desarrollo de pruebas, considerando factores mecánicos, ambientales y eléctricos que proporcionen conocimientos para la implementación de mejoras en el diseño de sistemas de control de seguimiento solar.

1.4. Objetivos específicos

1. Diseñar pruebas de desempeño del sistema de control de un helióstato en los siguientes estados de operación: home, posición segura, posición manual y seguimiento.
2. Determinar la influencia en el desempeño del sistema de control de los factores ambientales, mecánicos y eléctricos que causen un incorrecto funcionamiento y desempeño del sistema de control embebido.
3. Proponer alternativas y mejoras que permitan una operación óptima contra los factores ya antes determinados que ayuden a un correcto funcionamiento del helióstato y su sistema de control.
4. Entregar una guía de procedimientos para evaluar el desempeño del sistema de control de un helióstato.

1.5. Hipótesis

Con el diseño e implementación de un banco de pruebas al desempeño de un sistema de control de helióstato se tendrán criterios para la mejora en el diseño de estos.

1.6. Alcances y delimitaciones

El problema se delimitará hasta el desempeño del sistema de control de un solo helióstato dentro de la PSH, operando bajo condiciones externas de tipo: ambientales, mecánicas y eléctricas, que podrían llegar a afectar el correcto desempeño del sistema de seguimiento solar.

1.7. Justificación

La implementación de pruebas es una etapa crucial en la validación de un sistema, estas indican la eficiencia bajo determinadas circunstancias, también indican los errores que se presentarán en caso de no ser corregidas a tiempo; igualmente mostrarán un panorama más amplio del comportamiento del seguidor.

La correcta determinación de pruebas abarcará el sistema en general (la estructura, el entorno ambiental y la transferencia de datos), dando a conocer parámetros, límites y errores no evidentes, con el fin de ahorrar tiempo y costos en reparación o sustitución de material dañado. Esto representará un ahorro y una inversión significativa para la empresa en gastos de mantenimiento.

Una vez resueltos dichos problemas, el sistema de control del helióstato trabajará de forma más eficiente entre sus estados; del mismo modo, este podrá presentar más durabilidad y estabilidad en su desempeño.

2. MARCO DE REFERENCIA

Esta sección refiere a los conocimientos básicos necesarios para llevar a cabo el desarrollo del proyecto, contemplando temas como: energía solar, sistema de concentración térmica de torre central, el campo de helióstatos de la Universidad de Sonora (Plataforma Solar de Hermosillo) y las pruebas enfocadas al sistema de control embebido de helióstatos. Dentro de cada uno de los apartados se verán temas pertinentes en relación a la temática de helióstatos, sistema de control, factores de perturbación, pruebas para el sistema embebido, confiabilidad y robustez, entre otros tópicos a desarrollar.

2.1. Energía solar

El recurso más abundante y sostenible de energía es el Sol, que provee de más de 150,000 Terawatts de energía a la Tierra; la mitad de esta llega a la superficie terrestre, mientras que la otra es reflejada al espacio por la atmósfera. Solo una pequeña fracción de la energía de la superficie terrestre puede ser suficiente para satisfacer las expectativas de la demanda energética global. Una de las grandes oportunidades científicas y tecnológicas que se enfrenta el mundo, es el desarrollo de formas eficientes de recolectar, convertir, almacenar y utilizar la energía solar (Bose, 2010).

2.1.1. Energía eléctrica basada en sistemas solares

La generación de energía eléctrica por medio del Sol puede llevarse a cabo de forma directa por medio del uso de celdas fotovoltaicas (PV, por sus siglas en inglés), como se muestra en la figura 2.1, o indirecta por medio de un sistema de la recolección y concentración de energía solar o sistema de concentración solar de potencia (CSP, por sus siglas en inglés) o sistemas de concentración térmica, como se muestra en la figura 2.2, por medio de la producción de vapor el cual es utilizado para hacer girar turbinas generadoras de electricidad.

2.1.2. Tecnología fotovoltaica por medio de celdas (PV)

La tecnología fotovoltaica va desarrollada por medio de celdas fotovoltaicas, son dispositivos semiconductores que tienen la habilidad de absorber energía solar, tanto en radiación solar directa como indirecta, y en corriente eléctrica directa (DC), donde solo una pequeña porción de esta energía solar es convertida en eléctrica (del 6 al 20%), debido a la eficiencia de las celdas fotovoltaicas convencionales. El sistema de celdas fotovoltaicas tiene una amplia gama de aplicaciones, una de las principales es proveer de energía a comunidades apartadas geográficamente (Makki et al., 2015). Aunque la primera aplicación de estos dispositivos fue dirigida hacia naves espaciales, existen muchos más sistemas de aplicación en la vida diaria, tales como casas con paneles solares, bombas para extracción de agua, cohetes eléctricos, teléfonos de emergencia y telescopios; tal como lo mencionan Carrasco et al., (2006) y Liserre et al., (2010).

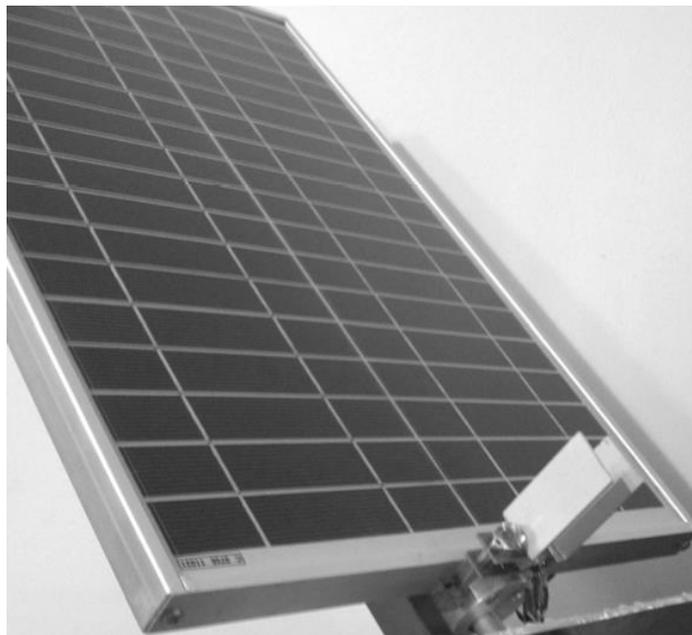


Figura 2.1. Celdas fotovoltaicas (PV) (Tudorache y Kreindler, 2010)

2.1.3. Sistemas de concentración solar de potencia (CSP)

En relación a sistemas de concentración solar de potencia, por medio del uso de dispositivos (espejos) y un sistema de seguimiento solar para concentrar gran cantidad de energía solar dentro de una pequeña área de recepción. La concentración de energía solar se ha implementado en diversas plantas de energía convencionales. Los sistemas principales de concentración térmica son los siguientes: a) canal parabólico, b) discos solares, c) Fresnel lineal y d) torre central de receptor solar.



Figura 2.2. Sistema de concentración térmica. Canal parabólico (CSP) (Camacho, Berenguel y Gallego, 2014)

2.1.4. Ventajas y desventajas entre PV y CSP

Ambas tecnologías, PV y CSP, tiene sus ventajas y desventajas, las cuales son:

- Las celdas fotovoltaicas son capaces de recolectar energía directa y difusa, por lo que los CSP pueden trabajar en días nublados.
- Los sistemas de concentración solar de potencia emplean un sistema de conversión de potencial, el cual entrega corriente alterna (AC). Las celdas fotovoltaicas producen corriente directa (DC), la cual debe transformarse

posteriormente en alterna haciendo uso de convertidores de directa-alterna. Esto puede ocasionar pérdidas de energía en un 4 y 12%.

- Los CSP poseen una capacidad inherente para almacenar temperatura por medio de almacenadores térmicos. Las baterías para la acumulación de energía eléctrica en sistemas PV son considerablemente costosas.
- El proceso de construcción e instalación de sistemas PV es más simple que el de sistemas CSP.
- Los sistemas fotovoltaicos requieren menos mantenimiento que los sistemas de concentración térmica (Camacho, Berenguel y Gallego, 2014).

2.2. Sistema de concentración térmica de torre central

Un campo solar de receptor central o sistema de concentración térmica de torre central (figura 2.3) consiste en un conjunto de helióstatos localizados dentro de un campo, donde cada uno de ellos se encarga de rastrear o seguir la posición solar sobre dos ejes (acimut y elevación). Los helióstatos reflejan constantemente la radiación solar hacia el receptor en la torre (Guo, Wang y Sun, 2013). El campo, es capaz de alcanzar grandes cantidades de energía y alta radiación de concentración solar, la cual será utilizada para la generación de energía eléctrica o procesos térmicos (Chong y Tan, 2012).

Una vez concentrado los rayos, el sistema en la torre genera electricidad a través de cambios térmicos; es por eso que el sistema de redireccionamiento del rayo juega un papel crucial para la concentración de energía; en otras palabras, los helióstatos son el núcleo del campo y sin ellos sería incapaz la acumulación térmica dentro de la torre (Zang et al., 2009).



Figura 2.3. Sistema de concentración térmica de torre central UNISON

2.2.1. Aire como medio transmisor en sistemas de torre central

Según Hennecke et al., (2009), las temperaturas por encima de 1000°C son concentradas dentro de un área focal muy pequeña, por lo que es necesario una gran cantidad de helióstatos para alcanzar esos números. Para que este proceso se lleve a cabo, el medio de transferencia de esta energía es un importante aspecto a considerar, por lo que se ha optado por el aire como medio de transmisión. El aire, como medio de transferencia, es libre, permisible, sin toxinas y no requiere protección del congelamiento durante el tiempo de no operación. Dicho lo anterior, este medio resulta ser una muy buena opción de transferencia para los sistemas de concentración térmica de torre central.

2.2.2. La generación de energía eléctrica en sistema de torre central

El aire es calentado a alta temperatura, por medio de helióstatos a un receptor volumétrico, la cual es usada para la generación de vapor dentro de una caldera (figura 2.4). Los parámetros del vapor pueden ser de hasta 100 bars de presión y 500°C , que son los rangos típicos para plantas convencionales medias de energía. Dicho vapor es conducido a través de una turbina generadora, donde después será regresado en forma condensada hacia el generador de vapor o caldera. Dentro de este proceso es necesario el uso de un almacenador térmico de vapor, que va

conectado en paralelo a la caldera; el aire caliente pasa a través de un recipiente llenando el almacenador, que está hecho de material cerámico, después se dispersa el aire entre caliente y helado dentro del almacenador, y por último, el aire caliente es expulsado de este y dirigido hacia la turbina generadora, donde se generará energía eléctrica de corriente alterna (AC).

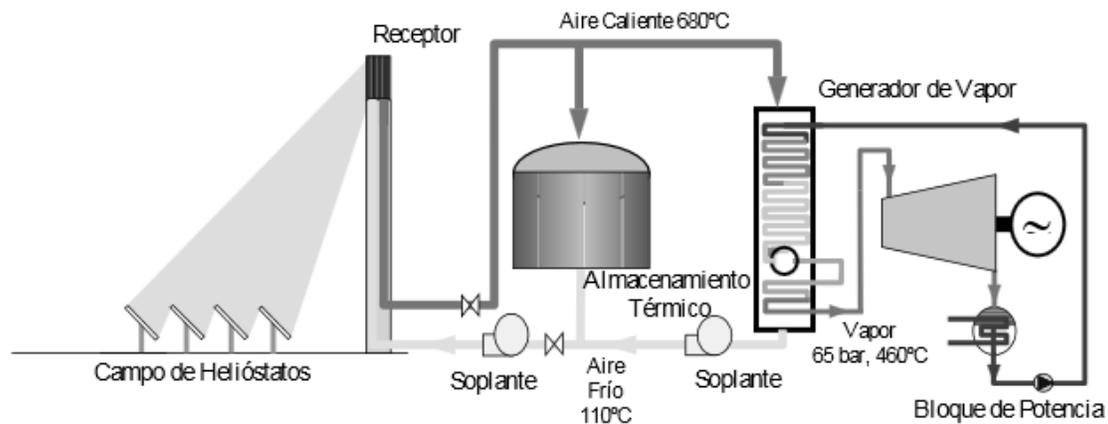


Figura 2.4. sistema de torre central con receptor volumétrico y aire como fluido térmico (Álvarez, 2001).

Una vez concluido con la fase anterior, el aire ahora helado es expulsado de la turbina de vapor y devuelto al condensador. Para descargar el almacenador, el aire frío del generador circula en sentido inverso a través de su recipiente y de vuelta al generador de vapor.

Este sistema ofrece varios beneficios, asegurando una alta eficiencia y la optimización de la energía solar disponible. Conceptos de diseño, operación y mantenimiento pueden beneficiar a la elaboración de este tipo de tecnología, y en consecuencia, un alto grado de confiabilidad y disponibilidad se pueden esperar (Hennecke et al., 2009). Además de esto, el sistema de almacenamiento de energía o almacenamiento térmico permite al sistema seguir suministrando de electricidad en días nublados o inclusive durante la noches, por esto es importante la energía térmica capturada a lo largo del día (Aharon, 2013).

2.2.3. El sistema de control (controlador) de torre central

El sistema de control es una de las partes más importantes en las plantas solares. Este sistema va conformado de tres niveles:

- El primer nivel. Enfocado al control, monitoreo y supervisión de todas las operaciones del proceso.
- El segundo nivel. Manejo y control de la posición de los reflectores o seguidores solares. Estos últimos comprenden una serie de PLCs o cualquier otro hardware que apoye al sistema en el control de los helióstatos.
- El tercer nivel. Comprende el desempeño del control local para cada reflector y el seguimiento de los datos de posición que han sido transmitidos por el segundo nivel.

2.2.4. Algoritmo de control

El algoritmo para el seguimiento solar puede ser clasificado en dos tipos, de lazo abierto (sin señal de retroalimentación) o lazo cerrado (con retroalimentación), dependiendo del modelo de control que se desee implementar o que se adapte más eficientemente al sistema (Lee, Chou, Chiang y Lin, 2009). El algoritmo de control va insertado dentro del controlador del sistema de helióstato, cumpliendo la función del cálculo del vector solar y el vector normal (Cornejo, 2013). El vector solar es aquel que une la locación particular en la tierra con el centro del disco solar, en otras palabras, es la dirección del rayo solar hacia la superficie receptora del seguidor. El vector normal se crea a partir del vector solar y la posición del helióstato, calculando la dirección particular de un objetivo en la torre o cualquier otro que se le indique al helióstato, para así completar el proceso de redireccionamiento del rayo solar. Todos estos cálculos son realizados por el controlador (Camacho, Berenguel y Gallego, 2014).

Control de lazo cerrado

Un control con retroalimentación, es aquel cuyo diseño se basa en los valores de las variables de control y la compensación directa correspondiente a su valor de salida,

con la finalidad de que el vector de salida del sistema pueda permanecer estable dentro de los estándares aceptables ante perturbaciones. Para retroalimentación, se utilizan sensores que monitorean el comportamiento del sistema, entregando la información del error o variabilidad hacia el controlador que decide y controla el estado (Van, Kang y Suh, 2013); el objetivo del control es lograr que este error sea nulo, o al menos, que se encuentre dentro de un rango aceptable.

Ejemplo de este ciclo se muestra en la figura 2.5, donde se pueden distinguir: el controlador o elementos de control, el proceso a realizar, el sensor, las señales de entrada y salida, y por último, la comparación de dichas señales o error de control. La señal de salida retroalimenta al sistema por medio de un sensor hacia la entrada del controlador, haciendo que éste desempeñe un proceso estable (Rairán-antolines y Fonseca-gómez, 2011).

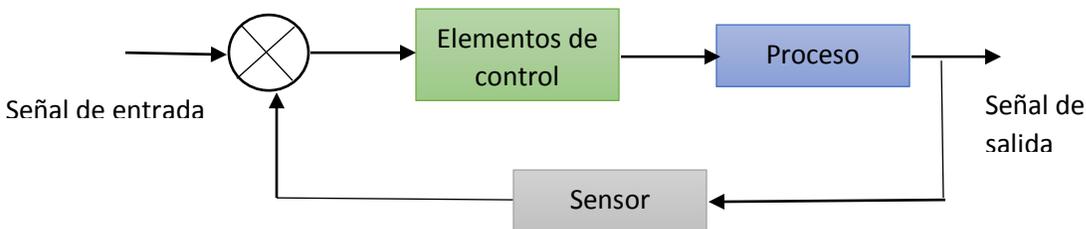


Figura 2.5. Control de lazo cerrado (elaboración propia).

Control de lazo abierto

Un control de lazo abierto, control fuera de línea o de ciclo abierto, proporciona un mejor sistema de gestión cuando no existe información proveniente de la salida del sistema. Este control requiere de una corrección para la estabilización del sistema, como lo hace el ciclo anterior. El control fuera de línea se basa en información pertinente de los estados de operación, por consiguiente, brinda una mejor gestión del mismo, implicando que solo una función de control sea elegida desde el inicio del modelado (Kogan, 2009).

Dentro de este ciclo, la información fluye unidireccionalmente y la salida del sistema no influye en los sensores de entrada (Sun, Ye y Fei, 2013). Un ejemplo de un control de lazo abierto se muestra en la figura 2.6, el cual consiste en controlador o

elemento de control que gestiona el desempeño de un proceso. En otras palabras, el control de lazo abierto es un algoritmo que calcula la salida más apropiada para el objetivo sin ninguna información de retroalimentación para la gestión del sistema.

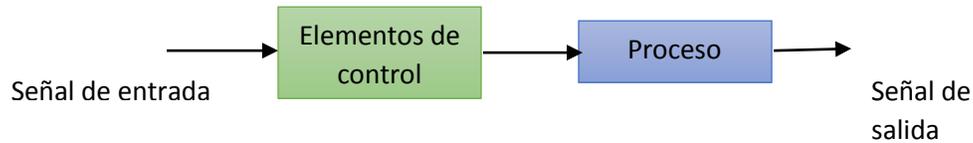


Figura 2.6. Control de lazo abierto (diseño propio)

Tal como lo expresa Mousazadeh et al., (2009), han sido revisados los pros y los contras de diversos tipos de seguidores solares basados en su sistema de control. Se ha demostrado que el dispositivo más eficiente y popular en el seguimiento solar es el que consta de la forma angular polar y del tipo acimut y elevación.

2.2.5. Sistemas embebidos por microcontroladores

Para definir qué es un sistema embebido por microcontroladores, primeramente se debe definir qué es un sistema. Un sistema es un conjunto organizado de objetos que procesa las entradas salidas, que permite alcanzar un propósito organizacional y responde a las necesidades de los clientes mediante el uso de seres humanos, facilitadores físicos e informáticos en un entorno físico (Ahram et al., 2012).

El sistema de control de helióstatos es implementado por tecnología embebida de microcontroladores. Un sistema embebido de procesamiento de información es aquel que está incrustado en un producto más grande, normalmente no son visibles para el usuario. La característica principal de los sistemas embebidos es estar conectados al ambiente por medio de sensores recolectando información y actuadores para el control de actividades; son sistemas independientes y eficientes, dedicados a una determinada aplicación. Ejemplos de estos sistemas son los dispositivos móviles, relojes, controles remotos, entre otros (figura 2.7) (Marwedel, 2011).



Figura 2.7. *Ejemplos de sistemas embebidos*

Un microcontrolador puede trabajar como un dispositivo independiente o puede formar parte de un sistema más complejo, es decir, como un componente. Los microcontroladores son una tecnología en constante desarrollo (Vagia y Tzes, 2013), además, en comparación a una computadora, son mucho más económicos (se pueden encontrar con precios desde los 5 dólares). Estos dispositivos son fácilmente configurables, permiten que el usuario pueda modificar o ampliar el programa mediante el uso de paquetes de software, permitiendo cambiar o adaptar los parámetros en su programación (Howlader et al., 2013).

2.2.6. Ejemplos de campos de concentración solar

Un ejemplo de un campo de concentración térmica es el proyecto Palen localizado en California (figura 2.8), donde Abengoa y BrightSource Energy se han unido para la construcción las dos torres más grandes de energía termosolar en el mundo. Abengoa estará encargada de la construcción y el mantenimiento de las plantas, mientras que BrightSource aportará con el terreno, donde se construirán las plantas, y la construcción de este. El proyecto consta de dos plantas, que se estima de ellas la generación de 250 MW (megawatts), que provean suficiente energía para prevenir la emisión de aproximadamente 17 millones de CO₂ por parte de plantas que utilizan

combustibles fósiles. La conclusión de las plantas será para el año 2016 (ABENGOA SOLAR, 2013).

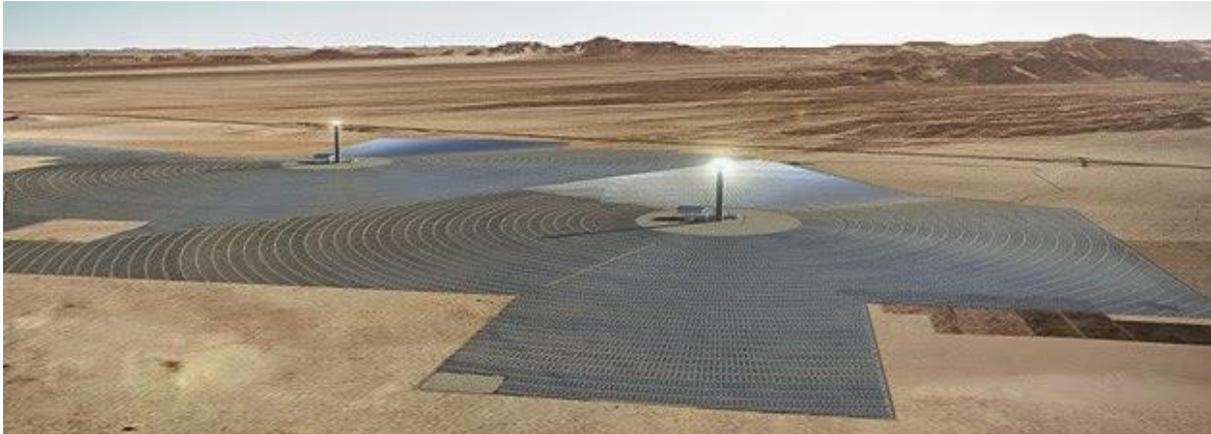


Figura 2.8. *Plantas de concentración térmica desarrolladas por Abengoa y BrightSource Energy (ABENGOA SOLAR, 2013).*

Otro ejemplo de campo de concentración térmica de torre central es la planta conocida como Gemasolar (figura 2.9) localizada en España y propiedad de la empresa Torresol Energy. Dicha planta es la primera en mantener la producción eléctrica durante un día completo (24 horas). Gracias a su vasta cantidad de seguidores solares (2650 helióstatos aproximadamente) y a su tanque aislado es posible aprovechar el calor de los rayos solares proporcionados por los helióstatos, para generar electricidad por 15 horas más sin la presencia del Sol. Este campo genera un máximo de 20 megawatts (TERRESOL ENERGY, 2015).



Figura 2.9. *Planta Gemasolar (TERRESOL ENERGY, 2015).*

2.3. Plataforma Solar de Hermosillo (PSH)

La PSH es una instalación para el desarrollo de energía solar, la cual permitirá iniciar las investigaciones científicas y tecnológicas de los sistemas termosolares de potencia eléctrica basadas en la arquitectura de torre central. El campo es el primer proyecto de un sistema de concentración solar de potencia de torre central realizado en toda Latinoamérica, inaugurado el 28 de octubre de 2011, cuenta con 13 helióstatos concentradores de 36 m², uno de 3 m² y 1 *cluster* de 9 mini-helióstatos, una torre central de 36 metros de altura, cuarto de control y laboratorio.

El control del campo de helióstatos se realiza con equipo de la marca National Instruments con hardware CompactRio (cRIO) y la plataforma de desarrollo de software LabVIEW, con un sistema de control supervisorio y adquisición de datos SCADA (Iriarte, 2013). En la figura 2.11 se puede observar una imagen de la PSH. Los estados de operación de los helióstatos se explican por medio de la tabla 2.1 y por medio de la figura 2.10.

Home (E1)	Estado de operación donde el helióstato se encuentra normalmente por las noches (90 grados al horizonte); dependiendo de la estructura del helióstato, su descanso es horizontal.
Seguimiento (E2)	Es el estado más recurrente en que opera el helióstato. Mediante un vector de posición (especificación de posición del blanco) y los cálculos del vector solar, se obtiene las posiciones en acimut y elevación para redirigir el rayo al blanco seleccionado.

Posición manual (E3)	Por medio de un operador, se selecciona manualmente las posiciones del helióstato, en acimut y elevación. Esta operación es más usada para calibraciones y reparación de fallas.
Posición segura (E4)	La posición segura entra en acción automáticamente cuando los vientos sobrepasan ciertos límites de operación (mayores a 60 km/hr), el helióstato se desplaza hacia la posición más cercana donde lleva acabo una menor resistencia al viento.

Tabla 2.1. Estados de operación en los que actúa el helióstato

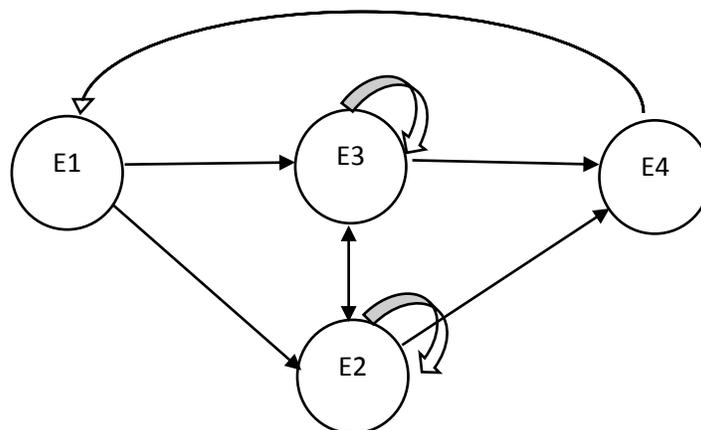


Figura 2.10. Gráfico de estados del helióstato (diseño propio).

La figura 2.10 muestra las operaciones de control por las que actúa cada seguidor, iniciando por el estado Home (E1) y pasando a su vez al estado seguimiento (E2) o el estado manual (E3) como lo muestra la figura 2.10. La posición segura del

helióstato actuará automáticamente cuando los vientos dentro de la PSH sobrepasen los 60 km/h, donde el controlador envía automáticamente a Home cada uno de los seguidores y estos permanecerán ahí hasta que las cargas de viento disminuyan y sean las idóneas para trabajar. Otras restricciones que existen son los sensores de final de carrera, que limitan las posiciones máximas (acimut y elevación) en el espacio rotativo de los seguidores; la temperatura de trabajo del cRIO que es de 0 a 55° C, y la potencia máxima de los actuadores (motores) que se encargan del movimiento en los ejes del seguidor, que es de 5 amperes.



Figura 2.11. *Plataforma Solar Hermosillo (Iriarte, 2013).*

En la PSH se tiene la necesidad de conocer la eficiencia de sus seguidores solares, debido a que dentro de la plataforma no se cuentan con pruebas para la verificación del comportamiento en sus helióstatos. A partir de esto, se crea la necesidad de un protocolo de pruebas para la evaluación de sus dispositivos en términos de

eficiencia, dando paso a mejores tecnologías que irán dirigidas a la optimización del campo de heliostatos.

2.4. Pruebas para el sistema de control embebido del heliostato

Dentro de este apartado se verán los criterios que se toman en cuenta para la realización de las pruebas dirigidas al sistema de control del heliostato. Se especifican los factores de perturbación que se desean evaluar y las pruebas específicas para cada uno de estos.

2.4.1. Factores de Perturbación

Una perturbación es un suceso que afecta adversamente el desarrollo de algún proceso. Si la perturbación se genera dentro del sistema, se le denomina perturbación interna, en caso contrario la perturbación es externa (figura 2.12). Estas perturbaciones son variables ajenas al sistema pero pueden influir en su funcionamiento y no son posibles de controlar (Vives, 2010).

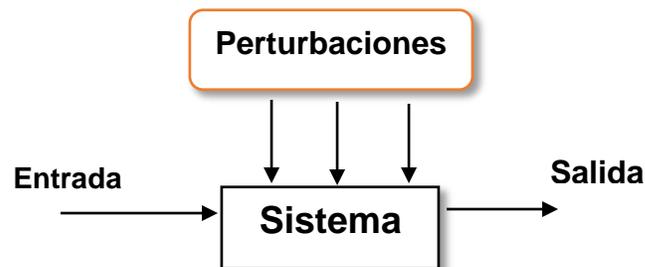


Figura 2.12. *Perturbaciones internas y externas del sistema* (diseño propio)

Existen varias fuentes de errores que aumentan la complejidad del sistema de control, tales como: tiempo, modelado matemático, latitud y longitud del lugar, posición del heliostato en el campo, ecuaciones variables en el tiempo, efectos de coseno, precisión del procesador, el intervalo y la estructura de control, mecánica y tolerancia de instalación (Camacho et al., 2014).

Por otro lado, Bonanos (2012) menciona que el sistema de control de helióstatos está sujeto a varios errores comunes, como la inclinación del eje rotacional, los efectos gravitatorios en la estructura, espejos desalineados, inclinación y desplazamiento de posición de referencia.

Para la corrección de estos errores es necesario conocer los elementos o factores de perturbación que afectan al sistema; por ejemplo, el efecto del aire podría ser una perturbación importante en el comportamiento del seguidor. Algunos expertos han desarrollado una serie de mediciones y pruebas para la determinación de las diferentes configuraciones que se les debe ajustar a los helióstatos, estos estudios fueron centrados en la durabilidad de los espejos, precisión del seguimiento, vibración, efectos dinámicos del aire y, en general, las características de operación y mantenimiento (Gong et al., 2013).

Otra perturbación que puede llegar a dañar al microcontrolador es el ruido eléctrico, este ocurre en ambientes industriales, cuando el voltaje de alimentación varía por un momento, cayendo o aumentando por los límites de operación del microcontrolador. Aunque la interrupción es corta, este ruido producido en ambientes eléctricos puede afectar desfavorablemente al comportamiento del microcontrolador y, por consiguiente, al sistema en el que actúa (Verle, 2009).

2.4.2. Diseño de una prueba

Para estudiar los factores de perturbación que pueden afectar el comportamiento del sistema de control de helióstatos, es necesario diseñar pruebas que puedan evaluar el comportamiento del mismo. Según Almog y Heart (2009), para el diseño de pruebas se han tomado en cuenta tres fases, las cuales son:

- Preparación. El plan, el diseño y la construcción de la prueba
- Ejecución. Puesta en marcha de la prueba o aplicación
- Verificación. Comparar los resultados obtenidos con la respuesta esperada

Cuando se va a evaluar un sistema embebido, es más importante desarrollar pruebas en tiempo real en su campo de operación que realizar pruebas individuales para cada unidad del sistema. En particular, un sistema embebido está diseñado

para desempeñar una o varias funciones. De acuerdo a lo último, los componentes del software y hardware se encuentran muy ligados, ya que si estos son examinados individualmente, limitan al sistema en términos de funcionamiento, por esto, es crucial en sistemas embebidos industriales dirigir o desarrollar pruebas de operación en el ambiente de trabajo en tiempo real, para conocer el comportamiento del sistema bajo los escenarios a los que se encuentra expuesto (Lochau y Goltz, 2010).

Para el diseño y elaboración de una prueba adecuada, es necesario tomar en cuenta varios criterios, los cuales van asociados a los sistemas de control embebidos; conocidos como robustez y confiabilidad.

Robustez y confiabilidad

La robustez es el grado al cual un sistema o componente puede trabajar correctamente en la presencia de entradas inválidas o condiciones ambientales de estrés. La robustez de un hardware y software se define como la habilidad del mismo para comportarse aceptablemente, expresado en términos de robustez, a pesar de las condiciones extrañas o imprevistas. La idea principal de las pruebas de robustez es investigar cómo el sistema reacciona ante diferentes tipos de problemas, los cuales pueden ser definidos como eventos inexplicables del ambiente o situaciones estresantes (Fernández et al., 2005).

La *confiabilidad* y la *confiabilidad en ingeniería* pueden diferenciarse (Wang, Loman y Vassiliou, 2004):

- La confiabilidad es la ausencia de fallas
- La confiabilidad en ingeniería es la disciplina de gestión e ingeniería que previene la creación de fallas

Estas definiciones implican que un proceso es confiable si este carece de fallas y que esto puede ser conseguido si las fallas son prevenidas. Por esto, es importante el conocimiento por medio de la literatura y trabajo en campo, para el entendimiento del mecanismo de las fallas y la gestión de mitigación o eliminación de estas. Esta definición implica que las fallas son creadas, principalmente por errores cometidos por personas encargadas de diseño y producción.

2.4.3. Perturbación de temperatura

Hoy en día los sistemas se enfrentan a la creciente posibilidad del sobrecalentamiento e incluso fallas térmicas. Estudios recientes han demostrado que el 50% de las fallas eléctricas son relacionadas al sobrecalentamiento de los componentes. Temperaturas seguras para los componentes se encuentran entre los 10 y 15 °C para prolongar el tiempo de vida del sistema. Temperaturas mayores a estas podrían aumentar el porcentaje de fallas, por lo que es de suma importancia mantener al sistema en condiciones adecuadas (Fu et al., 2011).

De acuerdo a Sulaiman (2011), temperaturas altas impactan directamente en todos los puntos clave del circuito incluyendo: tiempo de vida, confiabilidad, velocidad, potencia y costos. De igual forma, los sistemas estresados por temperaturas altas, disminuyen su velocidad de procesamiento e interconexiones, conduciendo a fallos con respecto al tiempo de respuesta.

Prueba de diagnóstico de fallos térmicos sin contacto

De acuerdo a la prueba mostrada por los autores Wang et al. (2011), la metodología consta de la evaluación de un sistema embebido, el cual, por medio de su funcionamiento, se somete a sí mismo al factor de calor. La tarjeta dispone de varios componentes como lo muestra la figura 2.13 (inductores, capacitores, resistencias, diodos, transistores y un circuito integrado), diseñada especialmente para que se sobrecaliente rápidamente y poder así observar las fallas provocadas por este factor.

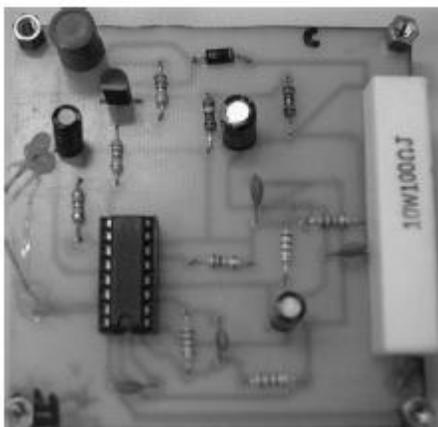


Figura 2.13. Tarjeta generadora de calor (Wang et al., 2011)

Este sistema se alimenta de una fuente de corriente directa (DC) y se ha calentado de forma rápida debido a los componentes que este posee. Por medio de una cámara de calor se tomaron imágenes secuenciadas, las cuales proporcionaron información de las secciones que generan mayor calor; además de esto, se demostró el valor en grados en que el sistema operará normalmente y su límite de quiebre, ya sea por la quemadura de algún dispositivo o que se desoldó alguna terminal del mismo.

Se alcanzó una temperatura máxima de 28.8 °C antes del punto de quiebre, donde la tarjeta no presentaba ninguna falla hasta este valor de temperatura. El componente que más se calentó fue la resistencia de mayor amperaje.

Los resultados del método de diagnóstico de fallos sin contacto para la tarjeta mostrada con anterioridad muestran que el método facilita la detección de fallas en las tarjetas y las operaciones del sistema. La utilización de una cámara térmica es de gran ayuda para localizar los componentes y la temperatura a la que estos dejaron de trabajar. Este método es rápido y proporciona resultados a corto plazo.

Prueba de vida a alta aceleración (HALT por su siglas en inglés)

Uno de los métodos más utilizados para conocer la confiabilidad en ingeniería para las tarjetas de computadora es el método de prueba de vida a alta aceleración (Rášo, n.d. y Barnard, 2012), el cual proporciona información importante acerca del ciclo promedio de vida para tarjetas. Este método consta de someter al sistema a varios factores de perturbación como: vibración, temperatura, humedad, polvo, entre otros, que podrían encontrarse en un ambiente normal de trabajo y dañar el mismo sistema.

De acuerdo a Anderson y Polkinghome (2000), mediante este método es posible conocer la confiabilidad del sistema y saber el tiempo en que este presentará fallas. Por medio del uso de cámaras para el rastreo de las fallas, e instrumentos de medición de temperatura o indicadores, se mostrará que ciertos componentes dan indicios de quemaduras o derretimiento en su soldadura, proporcionando información de los componentes de la tarjeta que se ven afectados, principalmente, en la prueba. Este método se desarrolló con el fin de prever futuras fallas.

El equipo requerido para la implementación de la prueba HALT es:

- Sistema embebido a evaluar.
- Cámara.
- Instrumentación, para las mediciones.
- Ambiente controlado, para la simulación de uno o varios factores de perturbación.
- Contenedor térmico con la capacidad de alcanzar $\pm 60 - 100^{\circ}\text{C}/\text{min}$.
- Retroalimentación del sistema (software y hardware).
- Mesa o soporte con capacidad de vibración.

Metodología para la prueba HALT (Summit, 2005):

1. Planear el pre-HALT plan.
2. Preparación del HALT.
3. Estrés por frío.
4. Estrés por calor.
5. Ciclo térmico rápido.
6. Estrés por vibración.
7. Combinación de ambientes térmicos y vibración.

De acuerdo a Porter (2004), planear el pre-HALT consiste en los preparativos antes de la prueba, donde se debe indicar el sistema a evaluar, las pruebas que se le desea aplicar, el rango de la prueba, conocimientos técnicos del sistema embebido, el equipo que se necesitará para la evaluación, entre otros aspectos básicos a delimitar.

Planeación de la prueba HALT. Una vez realizado el pre-HALT, la organización y la planeación son cruciales para el desarrollo de la prueba. Se ve el cronograma de actividades de las mismas.

Estrés por frío. Analiza la variable de la temperatura, que irá disminuyendo gradualmente simulando un ambiente helado, estresando al sistema por frío. Se evalúa el software por medio del procesamiento de operaciones del sistema, y el

hardware por el seguimiento con la cámara, observando alguna anomalía en los componentes de la tarjeta.

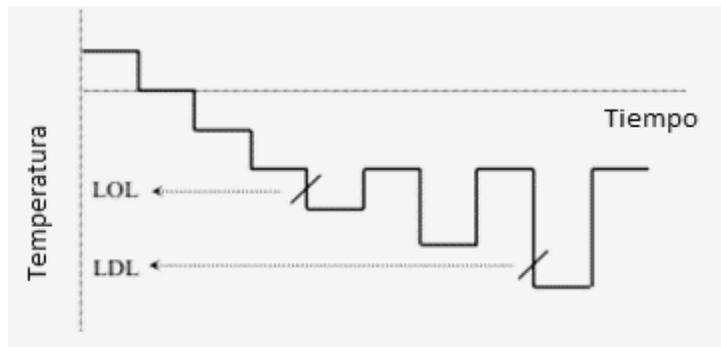


Figura 2.14. Límite de operación y destrucción (LOL y LDL) (Porter, 2004).

En la figura 2.14 se muestra la prueba de estrés por frío, donde LOL es el límite más bajo de operación, y a partir de este, el sistema inicia a presentar fallas. Disminuyendo la temperatura después del punto LOL seguirá el punto LDL, también llamado límite de la temperatura mínima o límite de destrucción, donde el sistema deja de funcionar.

Estrés por calor. Se estresa la tarjeta por calor al aumentar gradualmente la temperatura del sistema embebido en evaluación. Igualmente se evalúa el software y el hardware como en la prueba anterior.

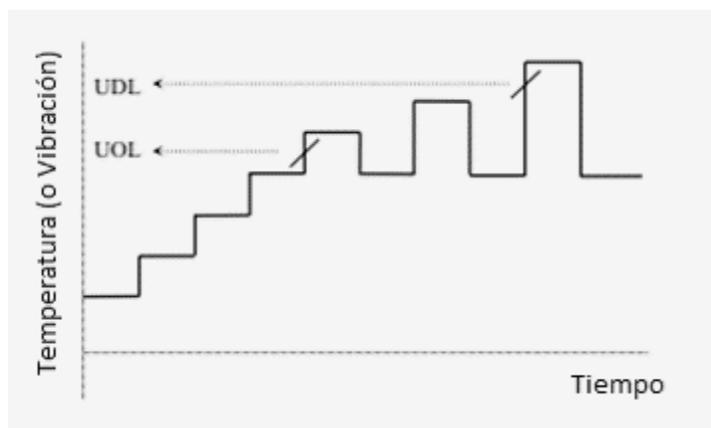


Figura 2.15. Temperatura/vibración máxima de operación y temperatura/vibración máxima de destrucción (Porter, 2004)

En la figura 2.15 se muestra el desarrollo de la prueba al sistema, por estrés por calor o vibración. El UOL es la temperatura o la frecuencia máxima de operación, donde el sistema comienza a mostrar fallas por calor o vibración hasta llegar a su punto UDL, conocido como límite de temperatura o frecuencia de destrucción, donde el sistema dejará de funcionar.

Ciclo térmico rápido, representado por la figura 2.16. En esta fase se somete el sistema a ciclos rápidos de temperatura, tomando como límites UOL y LOL en un lapso muy corto de tiempo. En otras palabras, se enfría el circuito para después aplicar calor. Este procedimiento se aplica varias veces hasta presenciar alguna anomalía.

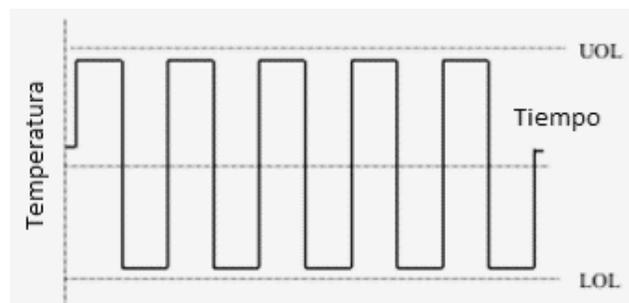


Figura 2.16. Límite inferior y superior de temperatura de destrucción (Porter, 2004)

Estrés por vibración. En esta fase se utiliza la mesa de trabajo donde se colocará el circuito, para aplicar diferentes frecuencias de vibración. Esta prueba es similar a la de estrés por calor, con la diferencia de que la vibración es la variable controlada (figura 2.15).

Combinación de ambiente térmico y vibración. Dentro de esta prueba se evalúan dos factores de forma paralela: la vibración de la mesa de trabajo hacia la placa, y la temperatura aplicada a la tarjeta. Se sigue un comportamiento parecido al de la figura 2.17, donde se indican dos pruebas en una.

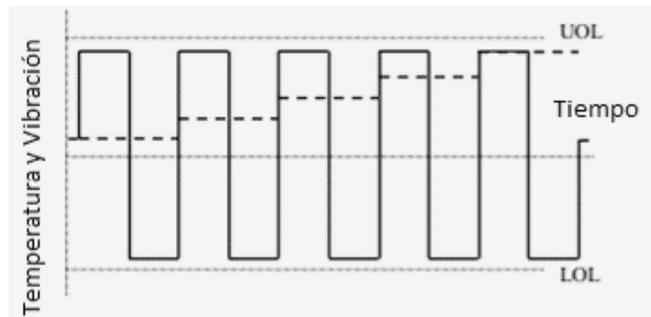


Figura 2.17. *Combinación de ambiente térmico y vibración (Porter, 2004)*

En las pruebas que hacen uso de la temperatura, es necesario crear una estabilización homogénea en el sistema por medio del incremento o decremento gradual de este factor de perturbación.

HALT hace uso de pocos días para evaluar el sistema, convirtiéndolo en un método muy rápido para la detección de fallas y tiempo de vida para el circuito.

2.4.4. Perturbación de viento

Grandes cargas de viento afectan el desempeño del mecanismo y la precisión del helióstato, además de generar vibración durante las operaciones de control donde ciclos de estrés ocurren frecuentemente bajo vientos de gran intensidad, provocando fallas relacionadas al desgaste en los componentes mecánicos del seguidor (Griffith et al., 2012). Por ello, es necesario predecir cargas de viento para desarrollar un helióstato en términos de un buen desempeño (Zang et. al., 2014 y Terrés-Nícoli et. al., 2014).

Según Roos (2012), uno de los requerimientos del diseño de los helióstatos, es la posibilidad de soportar tres tipos de cargas de viento:

- Viento de tormenta: En tormentas con valores de hasta 40 m/s en corrientes libres de velocidad, donde el helióstato debe ser capaz de soportarlas en su posición de reposo o descanso.
- Vientos moderados: A una velocidad de 22 m/s, donde el seguidor debe soportar cualquier posición y que el mecanismo sea capaz de desplazar al

helióstato a la posición de descanso con el fin de prepararlo para posibles tormentas.

- Vientos de operación: Con oscilaciones a una velocidad de 15 m/s, donde el mecanismo debe de ser capaz para permitir al seguidor en cualquier posición en relación al sol y que la carga resultante no debe guiar a altos ciclos de fatiga en el seguidor.

Generalmente las cargas de viento en la estructura del mecanismo del seguidor pueden obtenerse usando: túnel de viento, mediciones en campo y simulación numérica por computadora, aunque la mayoría de estas pruebas no son económicas y llevan bastante tiempo para realizarse (Zang et al., 2014).

Prueba de túnel de viento para helióstato

Hoy en día se han realizado varios estudios con cargas de viento, entre ellos la prueba de túnel de viento (figura 2.18), que es una forma efectiva del estudio de las cargas de viento en los helióstatos. Dichas cargas son estimadas para los seguidores, proporcionando detalles y datos adicionales que no se encuentran disponibles en las mediciones del campo (Sun et al., 2014 y Zang et al., 2014).

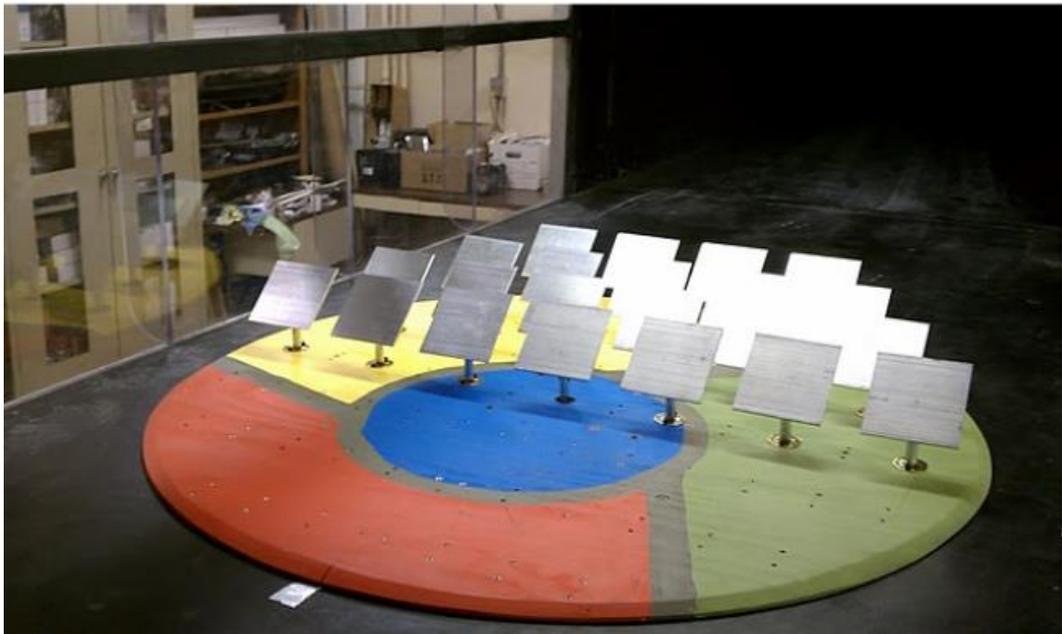


Figura 2.18. Modelo de un campo de helióstatos en un túnel de viento (Colorado State University y The Solar Energy Research Institute, n.d)

El túnel de viento es un facilitador de condiciones que recrea velocidad, turbulencias, intensidad del viento y frecuencia, con el fin de poder introducir y someter el helióstato a estos factores. Dentro de este túnel se encuentra un instrumento que sirve para la depuración y medición de los factores atmosféricos, conocido como anemómetro (figura 2.19).



Figura 2.19. *Anemómetro* (Nordelch, 2014)

Para poder realizar la prueba de túnel de viento, es necesario seguir una metodología, la cual Wang y Wu (2006) presentan a continuación:

1. Realizar un modelo a escala de las características del helióstato.
2. Introducir el modelo dentro del túnel de viento.
3. Someter el helióstato a diversas combinaciones climáticas en relación al viento (existen más de 130 condiciones diferentes) y a diferentes posiciones del mecanismo en las que se desea evaluar.
4. Obtener los resultados de las pruebas.
5. Simular en software de diseño los datos recopilados.
6. Implementar mejoras en el sistema helióstato.

El sistema a evaluar es el helióstato, el cual cumple con una serie de características: material, tipo de estructura, número de facetas o espejos, forma, medidas (altura,

ancho, peso), entre otros factores que deben tomarse en cuenta para el diseño de un modelo a escala.

Una vez completado el modelo a escala con las características del heliostato principal, se da paso a la evaluación ante factores atmosféricos (viento), donde se somete el mecanismo a diferentes estados de operación o diferentes posiciones, con el fin de que la prueba sea lo más completa posible, y con esto, recopilar la mayor cantidad de información proveniente del medio en que se encuentra.

Se combinan velocidades, presiones de aire, turbulencias, sentidos del viento, entre otras condiciones en conjunto, donde cada una de estas condiciones son medidas y registradas por un anemómetro localizado lo más cerca posible del sistema a evaluar y por acelerómetros instalados en la estructura del heliostato para conocer la vibración que se crea por medio de los factores atmosféricos.

Ya registrados, los datos de salida del túnel pasan a un software de diseño de elemento finito con el fin de conocer los esfuerzos que provocan las diferentes combinaciones de vientos, y así, poder conocer más a detalle las características que el heliostato original presenta al ser sometido ante condiciones similares; además, a partir de esto se pueden realizar mejoras para nuevos diseños en la estructura del sistema de heliostatos en comparación al inicial (Zang et al., 2014 y Wang y Wu, 2006).

Terrés-Nícoli, Mans y King (2014), en su metodología para la evaluación de cargas de viento sobre heliostatos, realizaron un modelo de un heliostato a escala para examinar su comportamiento dentro de un túnel de viento. Dicho modelo fue equipado con 58 tomas de presión con una resolución suficiente para capturar los bruscos cambios espaciales y temporales en la formación de viento debido a la naturaleza turbulenta del mismo. Un reporte histórico de fuerzas de viento se genera a partir de los datos en combinación con el análisis del modelo de la estructura y el modelo climático del sitio, todo esto con el fin de examinar las cargas críticas de los elementos estructurales que formarían parte del diseño de un nuevo heliostato.

Prueba de mediciones en campo

Otra forma de evaluar las cargas de viento sobre el sistema de helióstatos, son las mediciones en campo por condiciones normales en seguimiento. Para realizar este tipo de pruebas son necesarios varios anemómetros en el cálculo de la velocidad y dirección del viento. Estas pruebas son más sencillas y económicas que las de túnel de viento, que emplean una gran inversión en el modelo a escala del seguidor y el diseño, además de requerir un tiempo considerable.

Ejemplo de esta prueba es el trabajo de Sment y Ho (2014), donde se calculan las cargas de viento para varios helióstatos y se observa cómo estas afectan el sistema a diferentes posiciones o ángulos de inclinación en acimut y elevación. Al contrario de las pruebas de viento, donde se implementaba un modelo a escala del seguidor a evaluar, estas se realizan con los helióstatos originales, comparándolos en forma de hilera o fila, con el fin de conocer el efecto de las perturbaciones del viento al pasar de seguidor a seguidor hasta terminar con el último helióstato.

Para esta prueba, es necesario seguir varios pasos para el cálculo de las cargas de viento que incurren en el sistema. Estos pasos son:

1. Evaluar helióstatos.
2. Posicionar varios anemómetros en puntos específicos a evaluar, incluyendo una torre móvil o anemómetro móvil.
3. Evaluar los seguidores a distintas posiciones en acimut y elevación.
4. Registrar las distintas velocidades de viento que incurren en los seguidores por medio de los anemómetros.
5. Usar software de simulación de esfuerzo/deformación con base en los datos recabados por los anemómetros.

Primeramente, es necesario conocer los sistemas que se van a evaluar, ya sea uno solo o una hilera de seguidores, con el fin de conocer la posiciones que deberán tener los sensores de velocidad (anemómetros) dentro del campo. Es necesario conocer la estructura y sus componentes, por lo que se utilizará dicha información en el software de simulación de esfuerzo/deformación.

Una vez seleccionado y analizado el sistema, la siguiente fase es el posicionamiento de los sensores de velocidad, que estarán localizados en secciones importantes del heliostato, para tener un rango de precisión en la evaluación de la perturbación a diversos puntos del seguidor. Uno podría ser localizado por encima del heliostato (a 10m), el cual dará la lectura de velocidad y dirección del viento; otro podría colocarse justo donde termina el heliostato, para una rápida comparación de lecturas; y un último en el punto medio del seguidor, dando lecturas del comportamiento de las cargas de viento que inciden directamente en el centro del heliostato. Con estas tres diferentes posiciones, se conocerá más a detalle la velocidad de las cargas de viento en los diferentes puntos de los seguidores.

Una vez posicionados los medidores de viento, es necesario la evaluación de los seguidores en diferentes posiciones y observar en cuál ocurre un mayor estrés mecánico debido a la presión ejercida por la perturbación que incide en ellos. Es recomendable evaluar el sistema a distintas posiciones para ampliar más el rango de los datos para la simulación, y así conocer más a detalle el comportamiento del seguidor.

Los datos recopilados por los medidores serán llevados a evaluación en conjunto con las especificaciones de los heliostatos a un software de simulación, como lo es SolidWorks o algún otro.

Sment y Ho (2014) dan una muestra de su trabajo con pruebas desarrolladas a un campo de heliostatos bajo cargas de viento (figura 2.20) donde se pudo observar, por medio del software de diseño SolidWorks, cómo este factor ocurría, no solo en el comportamiento de los seguidores, sino también en los límites que se tenían para el correcto funcionamiento del sistema.

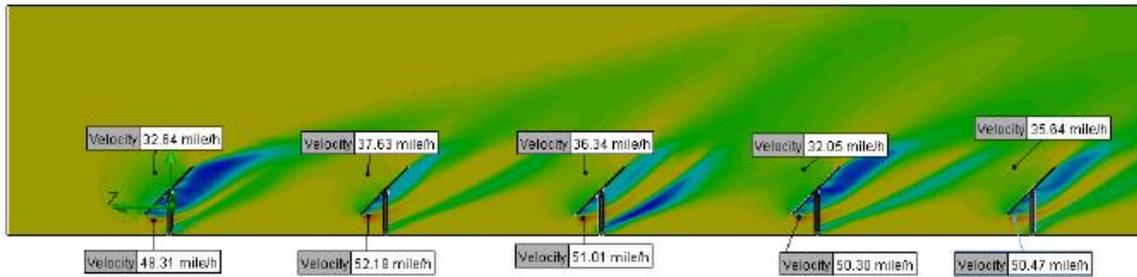


Figura 2.20. Simulación por medio de SolidWorks cargas de viento a una fila de Helióstatos, observando las velocidades a las que estos se encontraban sometidos (Sment and Ho, 2014)

2.4.5. Perturbación de vibración

El análisis de la vibración es un procedimiento de dos etapas que involucra la adquisición y la interpretación de los datos relacionados con la vibración de la maquinaria. Su finalidad es determinar las condiciones mecánicas de un aparato y señalar con precisión los eventuales defectos específicos.

Generalmente, la causa de la vibración reside en problemas mecánicos como son: desequilibrio de elementos rotativos, desalineación en acoplamientos, engranajes desgastados o dañados, rodamientos deteriorados, fuerzas aerodinámicas o hidráulicas, y problemas eléctricos. Estas causas son fuerzas que cambian de dirección o de intensidad, y son debidas al movimiento rotativo de las piezas de la máquina, aunque cada uno de los problemas se detecta estudiando las características de vibración.

La frecuencia de la vibración es la medida de la cantidad de ciclos completos que acontecen en un periodo de tiempo específico. La relación entre la frecuencia y el periodo de un patrón de vibración es expresada mediante la siguiente formula:

$$F = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

donde F es la frecuencia en Hertz y T es el periodo en segundos.

Las características de la vibración causada por el desplazamiento, velocidad y aceleración son medidas para poder determinar su severidad. Estas características son a menudo definidas como la amplitud de vibración con unidades en G (gravidades) donde 1 G es igual 9.8 m/s^2 .

La amplitud (figura 2.21) es la cantidad de movimiento que puede tener una masa desde una posición neutral. Es la intensidad de la vibración, y es indicativa de la severidad de la misma (González, 2011).

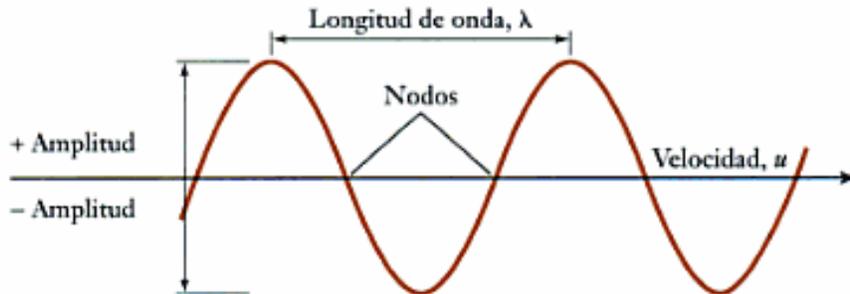


Figura 2.21. Amplitud de vibración (Martínez Álvarez et al., 2007).

Análisis de amplitud vs frecuencia (espectro)

El procedimiento de obtener y desplegar las amplitudes de vibración en el dominio de la frecuencia es, quizá, la más útil de todas las técnicas de análisis. Un espectro es una representación gráfica de la vibración en el dominio de la frecuencia, con la amplitud de la vibración (desplazamiento, velocidad y aceleración) en el eje Y y la frecuencia en el eje X (González, 2011).

2.4.6. Evaluación del sistema de control

Una forma de evaluar el desempeño del sistema de control es por medio del cálculo de una función basado en su error; en otras palabras, la diferencia entre el valor deseado (*set-point*) y el valor actual de la variable de control (*system's output*).

Una referencia comúnmente usada para la evaluación del desempeño del controlador es una función basada en la integración del error tal como: la integral del error cuadrado (ISE), o integral del error absoluto (IAE) (Arrieta et al., 2011).

Un problema en el diseño del sistema de control es la localización del valor apropiado de ganancia para el controlador. En general, un valor bajo de ganancia produce una respuesta baja del sistema, mientras que altos valores pueden causar una excesiva respuesta oscilatoria con la posibilidad de inestabilidad. En alguno de

esos extremos, existe un valor de ganancia que produce la mejor respuesta del sistema.

Para determinar la mejor respuesta, Shinnars (1992) menciona que la función esencial de un sistema de control con retroalimentación es la de reducir el error, $e(t)$. Para esto, cualquier criterio utilizado para medir la calidad de la respuesta del sistema debe tener en cuenta la variación $e(t)$ en todo el intervalo de tiempo. Por lo anterior se presentan cuatro criterios integrales:

La integral del error cuadrado (ISE por sus siglas en inglés) (ecuación 2.2) da menor importancia a errores pequeños, pero los errores grandes contribuyen fuertemente al valor de la integral. Consecuentemente, utilizando el ISE como criterio de comportamiento, se dará como resultado una respuesta de pobre estabilidad relativa debido a las oscilaciones de la señal de salida, acorde a la señal del sistema mostrado en la figura 2.22 (Moroto Solórzano, 2007).

$$\text{ISE} = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \quad (2.2)$$

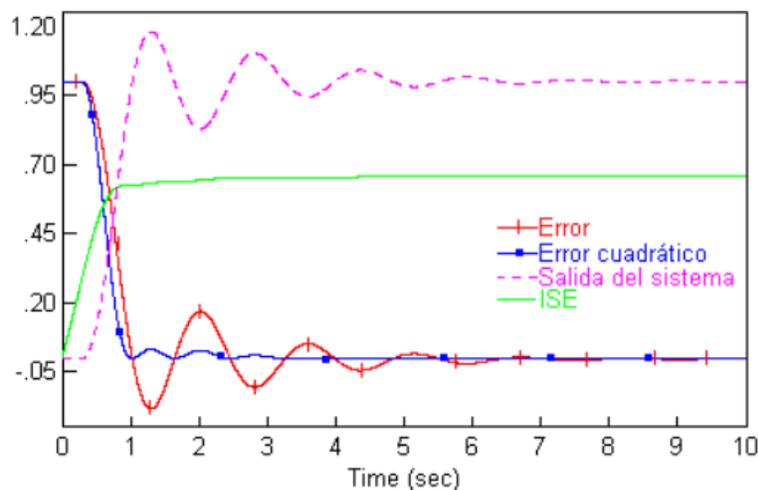


Figura 2.22. Representación del ISE (Moroto Solórzano, 2007)

Además, este criterio es fácilmente computable, tanto analítica como experimentalmente; aunque no es muy sensitivo, ya que variaciones de los parámetros no afectan significativamente el resultado final de la integral.

El criterio de la integral del error absoluto (IAE por sus siglas en inglés) se caracteriza por ser de fácil aplicación y proporciona un amortiguamiento y una respuesta aceptable a la salida. Sin embargo, este criterio no es capaz de optimizar sistemas altamente sobreamortiguados o altamente subamortiguados, además de ser difícil de evaluar analíticamente. IAE es más sensible a pequeños errores, pero menos sensible que el ISE a errores grandes (ecuación 2.3) (Moroto Solórzano, 2007 y Shinnars, 1992).

$$\text{IAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2.3)$$

La figura 2.23 presenta las gráficas de la evolución del error y la salida del sistema ante una entrada tipo escalón en el valor deseado, así como el valor absoluto del error y el valor integral IAE.

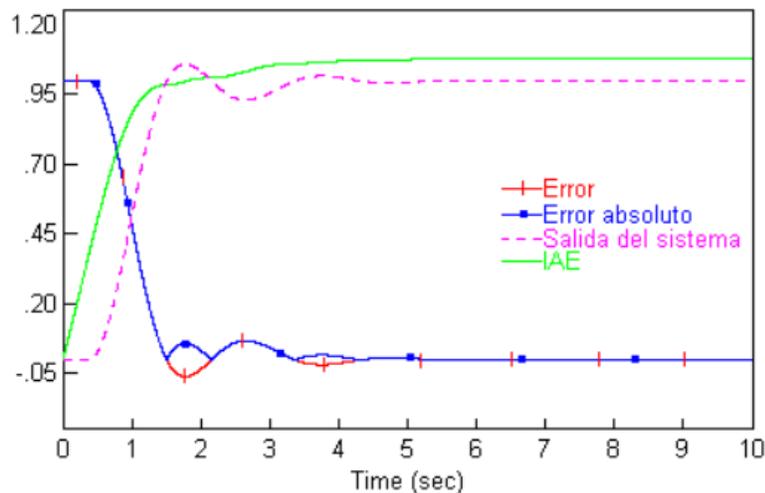


Figura 2.23. Representación del IAE (Moroto Solórzano, 2007)

La Integral del tiempo multiplicado por el error absoluto (ITAE por sus siglas en inglés) da menos importancia a los errores iniciales, pero penaliza fuertemente los errores que permanecen a lo largo del tiempo. La respuesta óptima definida por ITAE mostrará tiempos cortos de respuesta total (Acedo Sanchez, 2006). La figura 2.24, representa una ilustración del gráfico de un sistema empleando la integral del tiempo multiplicado por el error absoluto (Moroto Solórzano, 2007 y Shinnars, 1992).

$$\text{ITAE} = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (2.4)$$

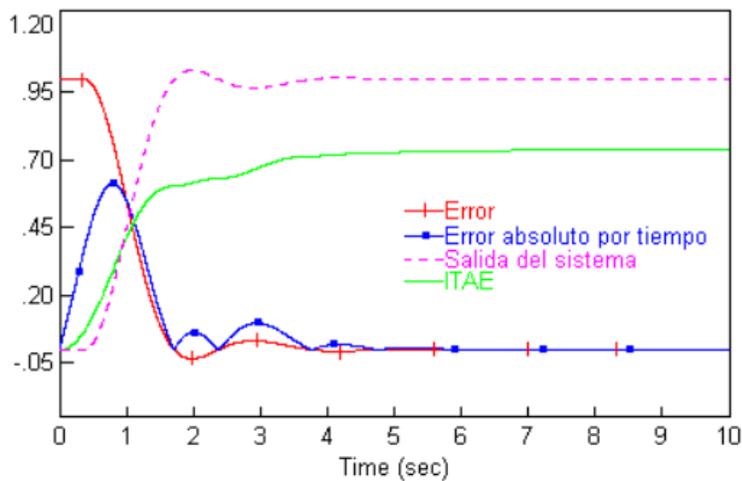


Figura 2.24. Representación del ITAE (Moroto Solórzano, 2007)

La integral del tiempo multiplicado por el error cuadrado (ITSE por sus siglas en inglés) tiene como objetivo el reducir al mínimo la carga de un error inicial muy grande debido a la referencia, y da más importancia al valor del error que el criterio ITAE (ecuación 2.5) (Wenge et al., 2010). La figura 2.25 ilustra la gráfica de ITSE.

$$\text{ITSE} = \int_0^{\infty} te(t)^2 dt \quad (2.5)$$

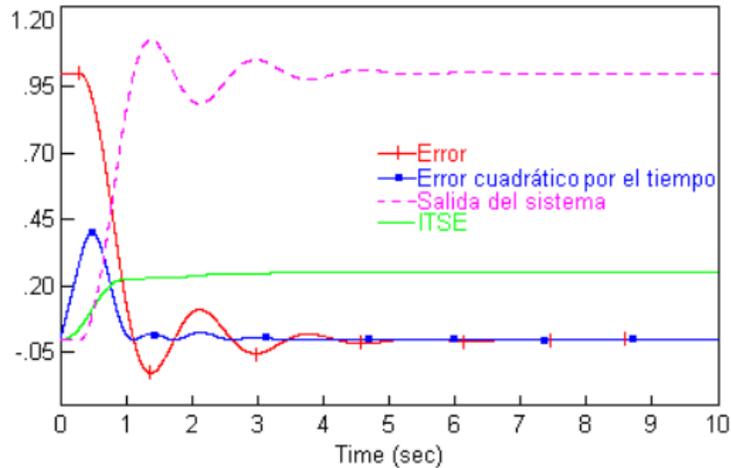


Figura 2.25. Representación del ITSE (Moroto Solórzano, 2007)

Ruiz (2003) menciona que el error está dado por la función: $e(t) = r(t) - y(t)$ donde $r(t)$ es la entrada al sistema en un tiempo determinado mientras que $y(t)$ será su salida en dicho tiempo.

Para cualquier criterio posible, la mejor respuesta corresponde a la minimización del valor del criterio seleccionado. IEA es más usado en simulación digital de un sistema pero es inaplicable para trabajos analíticos, ya que el valor absoluto de una función de error no es generalmente en forma analítica. Este problema es resultado por el criterio ISE. El ITAE e ITSE tienen un multiplicador de tiempo adicional de la función de error, el cual enfatiza la larga duración de este, además que esos criterios son más comunes en sistemas que requieren de un tiempo rápido de estabilización (Shinners, 1992)

2.5. Entorno Arduino

Arduino (figura 2.26) es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar. Se creó para artistas, diseñadores, aficionados y cualquiera interesado en crear entornos u objetos interactivos. Este dispositivo puede tomar información del ambiente a través de sus pines de entrada de toda una gran gama de sensores; además, puede afectar el

entorno en que lo rodea como son los indicadores visuales, motores y otros tipos de actuadores.

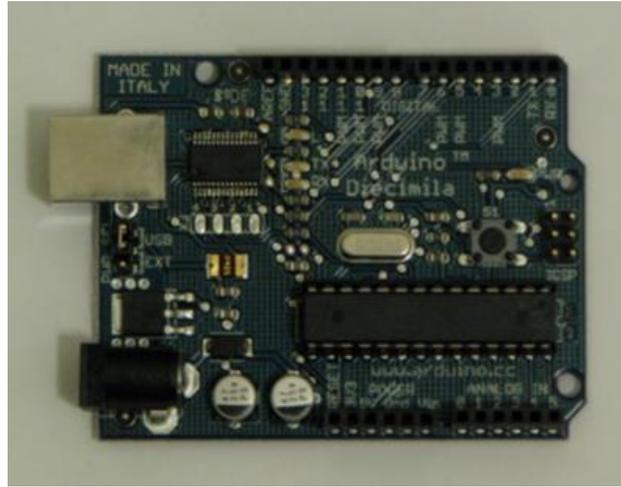


Figura 2.26. *Entorno Arduino* (Herrador, 2009)

El microcontrolador en la placa Arduino se programa mediante lenguaje de programación Arduino, que es muy parecido a lenguaje C. Los proyectos realizados con Arduino pueden ejecutarse sin la necesidad de un computador.

Esta plataforma aporta algunas ventajas para profesores, estudiantes y aficionados interesados: Baratos, multiplataforma (puede ser ejecutado en Windows, OSX y GNU/Linux), entorno de programación simple y claro, código abierto y software libre, hardware extensible (Herrador, 2009).

3. METODOLOGÍA

Dentro de este capítulo se mostrará la metodología a utilizar para la resolución exitosa del problema planteado. Debido al tipo y naturaleza de la investigación, se ha optado por un análisis cuantitativo por medio de un diseño experimental.

Un experimento se lleva a cabo para analizar si una o más variables independientes afectan a una o más variables dependientes y el por qué lo hacen. Dentro de un experimento, la variable independiente resulta de interés para el investigador, ya que hipotéticamente será una de las causas que producen el efecto supuesto.

En un experimento existen lo que son los grupo experimentales y los grupos de control, donde al primero se le expone a la variable independiente, mientras que al segundo permanece igual, con el fin de comparar las reacciones o consecuencias que esta variable provoca dentro del grupo experimental en relación al grupo de control (Hernández Sampieri et.al, 2006).

La metodología que se empleará para esta investigación se ilustra en la figura 3.1, la cual está compuesta por una serie de fases importantes que ayudarán a alcanzar los objetivos, las preguntas de la investigación y la hipótesis propuesta. Esta va desde el análisis del sistema de control de los helióstatos, el diseño y aplicación de pruebas, hasta el desarrollo de una guía para la Plataforma Solar de Hermosillo.

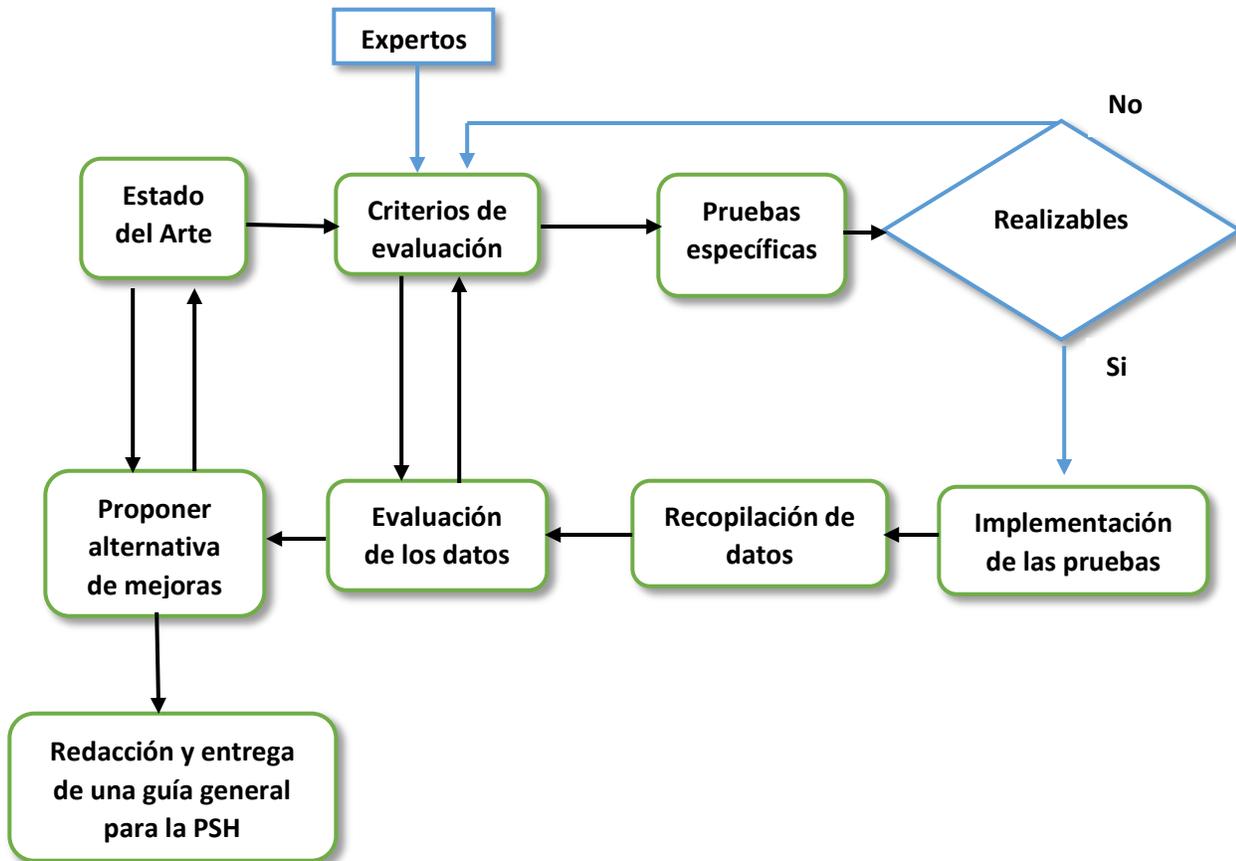


Figura 3.1. Representación detallada de la metodología general (elaboración propia)

3.1. Fase 1: Análisis del sistema de control de helióstatos con que cuenta la PSH

Dentro de esta fase se realizará la revisión del estado del arte contemplando: todos los componentes, dispositivos, software y hardware que sean utilizados en el sistema de control del helióstato; revisar todo lo referente helióstatos y factores de perturbación; además de manuales, formatos, códigos y cualquier otro elemento que vaya relacionado con éste y las operaciones de control que el seguidor desempeña (figura 3.2). En esta fase se definirán el tipo de pruebas en función de expertos y de la literatura.

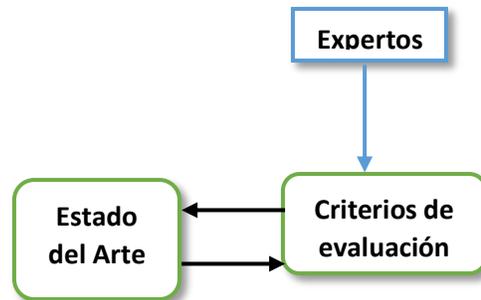


Figura 3.2. Fase 1 de la metodología.

3.2. Fase 2: Diseño y aplicación de pruebas específicas para el sistema de control, contemplando factores de perturbación

Diseñar e implementar pruebas específicas de desempeño (figura 3.3), tomando en cuenta los elementos que conforman al sistema (software y hardware). Se debe evaluar el controlador basándose en las operaciones que este realiza (Home, seguimiento, modo seguro, manual), por lo que es prudente hacer el diseño en base a criterios como: procesamiento de señales, transmisión de datos, entradas y salidas periféricas, conversor analógico-digital, criterios de sistemas de control, entre otros. Cualquier sistema es expuesto a perturbaciones o factores no controlables que minimizan el desempeño del controlador, por lo que, de igual manera se desea caracterizar las pruebas en base a dichas perturbaciones y con esto observar el desempeño que muestra el sistema.

El diseño y aplicación de pruebas es una fase relevante en la validación de cualquier sistema, su finalidad es conocer el comportamiento del mismo bajo ciertas circunstancias o escenarios.

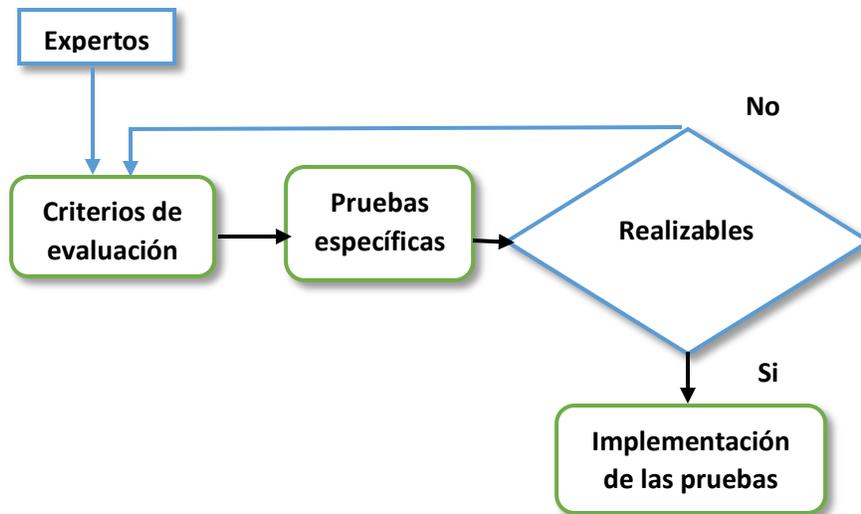


Figura 3.3. Fase 2 de la metodología.

Se aplicarán las pruebas tomando en cuenta los criterios mencionados y los factores de perturbación más relevantes proporcionados por la literatura, donde éstas se aplicarán en ambientes controlados y con herramientas de apoyo dependiendo de la prueba. Se han identificado distintas opciones, como lo son: pruebas térmicas, evaluando al controlador por medio de estrés por calor; pruebas del sistema basados en el error de control, identificando el error que se genera por medio de la señal de control y la salida del sistema; prueba de consumo energético, determinando el gasto energético, en potencia, que consume la PSH a lo largo de un día normal de trabajo; entre otras.

Dentro de esta fase se cumple con el objetivo específico 1 y la pregunta de investigación 1, que van relacionados con la determinación y el diseño de pruebas específicas para el sistema de control del helióstato, enfocadas en los estados de operación del seguidor.

3.3. Fase 3: Evaluación de las pruebas en base a criterios de confiabilidad y robustez

Una vez aplicadas las pruebas, la fase 3 de la metodología (figura 3.4) consiste en recopilar los datos obtenidos para ser sometidos a evaluación, donde se aplicarán los criterios de confiabilidad y robustez descritos en el capítulo 2 del documento. Debido

a que se realiza un número finito de pruebas, se debe de concluir de manera individual cada una de estas, donde se proporcione un análisis detallado de lo ocurrido al momento de la evaluación, además de una conclusión general del experimento.

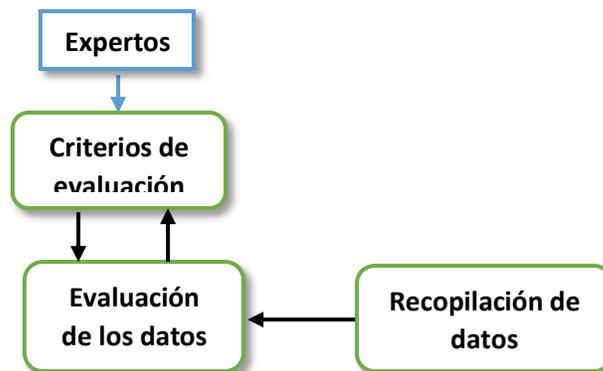


Figura 3.4. Fase 3 de la metodología.

La fase de evaluación es una etapa crucial en la metodología, ya que en ella se analizan las variables dependientes e independientes, en forma de los resultados de comportamiento del sistema, dando a conocer qué tan confiable y qué tan robusto es este ante diferentes factores externos, con el fin de proponer medidas que mejoren el desempeño del sistema.

Concluida esta fase, se dará respuesta a la pregunta de investigación 2 y se alcanzará el objetivo específico 2, los cuales están relacionados a la evaluación y la influencia en el desempeño del sistema bajo la presencia de los factores de perturbación.

3.4. Fase 4: Determinación de alternativas de mejora para el sistema

Una vez evaluado el sistema de control, se determinarán las medidas de mejora que aumenten la confiabilidad y la robustez del sistema (figura 3.5). Por medio de la revisión literaria o estado del arte se podrán seleccionar mejoras para el sistema que impacten en las operaciones del seguidor, además de proteger la integridad de los componentes eléctricos y mecánicos del helióstato.

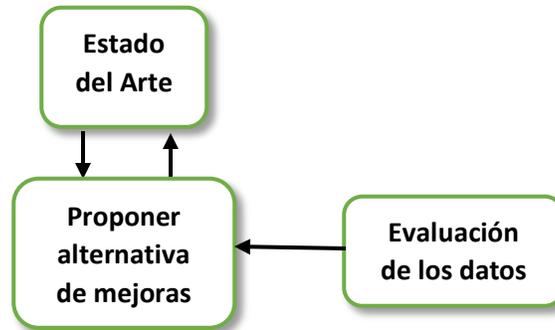


Figura 3.5. Fase 4 de la metodología.

Dentro de esta fase se resuelve la pregunta de investigación 3 y se cumple con el objetivo específico 3, los cuales van relacionados a la proposición de alternativas o mejoras que ayuden al desempeño del sistema de control de los seguidores. Hasta este punto de la investigación es posible responder la hipótesis planteada al inicio del documento.

3.5. Fase 5: Desarrollo de una guía de evaluación para la PSH

El desarrollo de una guía de evaluación (figura 3.6) es un documento resumiendo las fases anteriores análisis del sistema de control, diseño e implementación de pruebas específicas, evaluación y medidas de mejoras para el sistema.

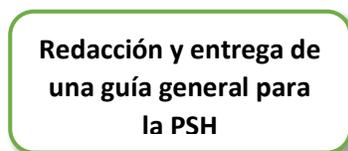


Figura 3.6. Fase 5 de la metodología.

El fin de desarrollar una guía de evaluación de helióstatos es el de: implementar mejoras en el diseño del sistema de los seguidores (en el sistema de control, la estructura y los actuadores de los seguidores); contemplar tecnologías más económicas, confiables y robustas, que sustituyan a las actuales; y además, conocer el estado actual de cada uno de los helióstatos que dispone la PSH.

Dentro de la fase 5 se da respuesta a la pregunta de investigación 4 y se alcanza el objetivo 4 de la investigación, relacionado al desarrollo y la entrega de una guía de evaluación y las consideraciones más importantes en ella a la PSH.

Se determinan varias pruebas importantes que contemplen los factores de perturbación mencionados en el capítulo anterior, los cuales irán enfocadas al sistema de control embebido de helióstato. Dichas pruebas son: pruebas de temperatura, donde se le aplicará el factor de calor al microcontrolador y se observará el comportamiento que este tiene, simulando el entorno físico del campo de helióstatos; pruebas del error de control, y si este tiene correlación con las cargas de viento y la vibración de la estructura; la prueba de consumo energético, dando a conocer el gasto que se tiene en consumo en un día normal de trabajo; entre otras.

Estos tipos de pruebas fueron fundamentados por la literatura en el capítulo dos de esta investigación, los cuales han sido adaptados a las condiciones en las que se encuentra el campo y los materiales a disposición. Por lo anterior, se muestran varias metodologías, las cuales son necesarias para la realización exitosa de las pruebas, cada una con sus propios materiales y requerimientos particulares.

4. IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo se llevó a cabo la fase de implementación o desarrollo de la propuesta metodológica planteada. Del mismo modo, se describen los ensayos del banco de pruebas para heliostatos junto con los pasos y requerimientos que deben tomarse en cuenta para el desarrollo y aplicación de las mismas. Dichas pruebas evaluarán distintos aspectos del sistema de control para representar claramente la eficiencia que este tiene bajo los factores externos de perturbación.

Las pruebas se han diseñado para obtener información sobre el sistema que se encuentra actualmente en la Plataforma Solar de Hermosillo, buscando desarrollar mejoras en los seguidores evitando daños en el material y reduciendo gastos de mantenimiento.

Las pruebas más importantes que se seleccionaron y que van contenidas en el banco son: pruebas térmicas y pruebas del sistema basados en el error de control.

Las pruebas térmicas tienen el fin de evaluar el desempeño del controlador mientras se incrementa el factor de temperatura. Estudios indican que ambientes con altos índices de este factor afectan el comportamiento del sistema embebido causando descontrol y daño en componentes importantes. Estas son las causas por las que se decidió realizar pruebas controlando el factor temperatura.

Las pruebas del sistema basados en el error de control evaluaron el desempeño del algoritmo de las operaciones de control de los heliostatos. Los factores de perturbación pueden encontrarse dentro del mismo, por lo que las pruebas del error de control son esenciales para la evaluación de perturbaciones. En la prueba del error de control se incluyen los factores de viento y vibración buscando encontrar correlación entre el error generado del sistema y los factores ambientales del campo, así como factores mecánicos del seguidor.

4.1. Pruebas térmicas

Como se mencionó anteriormente, las pruebas de temperatura son evaluaciones importantes para los sistemas embebidos; indican el momento en que un componente del circuito puede fallar causando retrasos, un consumo mayor de corriente, menor tiempo de vida del dispositivo o incluso un daño irreparable en la tarjeta electrónica.

Para tener un mejor control en el manejo del factor térmico, las pruebas de temperatura comienzan con la evaluación del instrumento de medición (recipiente térmico) que simula la temperatura del campo. El recipiente se alimenta por corriente alterna por lo que es necesario usar un variador de voltaje o Variac para su control. Al manipular el voltaje de alimentación del recipiente se varía su temperatura, ofreciendo un mejor control de las pruebas.

En la segunda prueba térmica se introduce una tarjeta o microcontrolador dentro del recipiente térmico para evaluar el estrés por calor. En esta prueba se utilizan los datos recabados de la evaluación de la prueba uno. Es posible simular el entorno físico del campo de helióstatos utilizando un contenedor térmico, donde se replican las características ambientales de trabajo en el que operan los seguidores.

En esta última prueba se evalúa el sistema embebido en cuatro diferentes aspectos: las operaciones de procesamiento de señales, las salidas periféricas del sistema, el envío de datos por puerto serial y el sistema de conversión analógico-digital.

4.1.1. Prueba de temperatura: Evaluación del contenedor térmico

En esta prueba se analizó la relación voltaje/temperatura dentro del contenedor térmico. Consistió en introducir un sensor para tomar las lecturas de temperatura dentro del recipiente térmico mientras se manipulaba el voltaje de alimentación del mismo, para poder así tener un control de la temperatura dentro del contenedor. El sensor fue calibrado con la temperatura controlada del ambiente de trabajo del laboratorio de la PSH.

Se localizaron los niveles de voltaje correspondientes a distintos grados de temperatura (30, 35, 40, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80 °C), obteniendo con ello la relación voltaje/temperatura del recipiente. El diagrama de la conexión del recipiente térmico para las pruebas de temperatura se observa en la figura 4.1.

Primero se conecta el variador de voltaje a la fuente de alimentación, enseguida se conecta un contenedor térmico. Después, por medio de un sensor de temperatura (termopar), se miden valores de temperatura así como la tensión de alimentación del contenido usando un multímetro con el que se obtuvo la relación voltaje/temperatura.

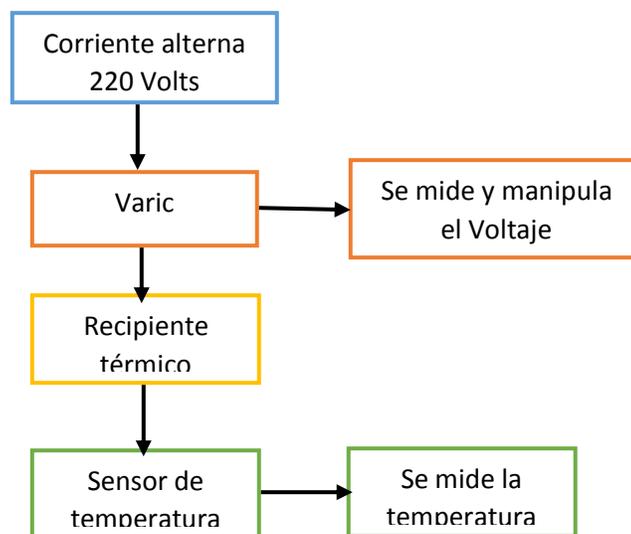


Figura 4.1. *Diseño de conexión del contenedor para la evaluación de las pruebas térmicas*

Por último, se conecta el recipiente térmico a la toma de corriente de 220 volt para que alcance su máxima temperatura y tomar notas del experimento. Las lecturas iniciaron por las temperaturas más bajas ya que es más sencillo estabilizarlas iniciando de 30 a 80 °C.

Desarrollo

Materiales requeridos para la prueba 4.1.1:

- Contenedor térmico.
- Multímetro con capacidad de medición de temperatura.
- Termopar.
- Variador de voltaje (Variac).
- Cuadernillo para realizar anotaciones.

Se realizó una tabla comparativa de voltaje/temperatura con información sobre las temperaturas mencionadas. Se tomaron las temperaturas, los voltajes y los tiempos en los cuales el recipiente térmico se mantuvo de manera estable.

Resultados

Se utilizó un rango de tolerancia para la prueba de temperatura de $\pm 0.8^\circ$.

<i>Temperatura ($^\circ\text{C}$), con tolerancia de $\pm 0.8^\circ$</i>	<i>Voltaje (Volts) en corriente alterna</i>	<i>Tiempo en el que el contenedor se mantiene en el valor deseado</i>
30	23.3	10 min
35	26.1	10 min
40	33.6	10 min
45	40.8	10 min
50	42.2	10 min
55	42.9	10 min
60	48.8	10 min
65	52	10 min
70	60	10 min
75	62.14	10 min
80	65	10 min

Tabla 4.1. *Relación voltaje/temperatura del contenedor térmico.*

Dentro de la tabla 4.1 se observan las relaciones de voltaje, temperatura y tiempo en que se mantiene dicha temperatura. El rango de temperatura/voltaje de la prueba fue

de 30 a 80 °C y de 23.3 a 65 volts respectivamente; adicionalmente, se observa en la tabla 4.1 que estos valores se mantuvieron estables alrededor de 10 minutos.

Una representación gráfica del comportamiento en temperatura/voltaje del contenedor térmico se muestra en la figura 4.2. El valor del tiempo no se muestra gráficamente, únicamente ayudó en el control y la duración de cada experimento para cada valor de temperatura y el cual indica que estos valores permanecieron estables durante el lapso de 10 minutos.

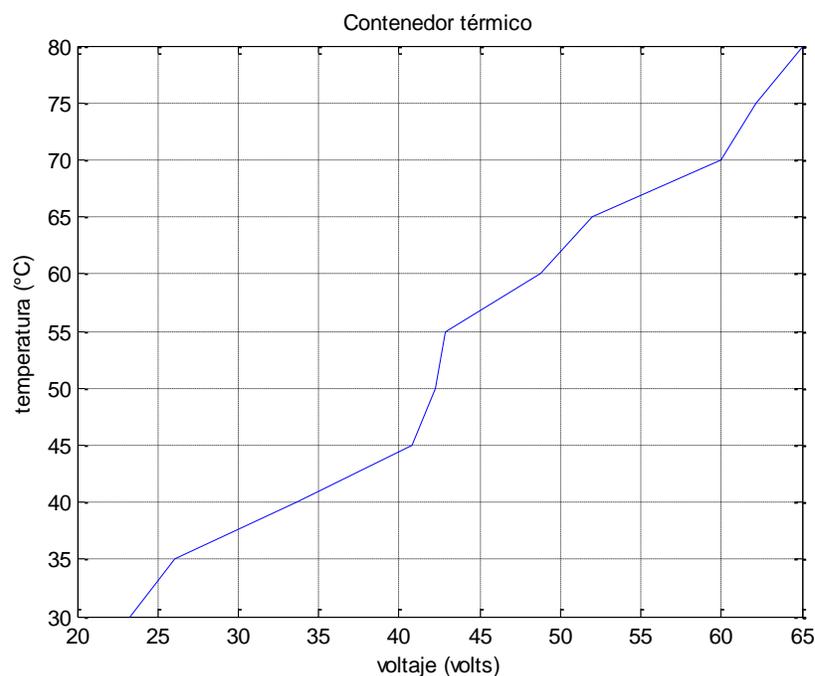


Figura 4.2. Comportamiento del contenedor térmico, relación voltaje/temperatura.

Para conocer la temperatura máxima dentro del contenedor se aplicó el voltaje completo por parte de la toma de corriente de 220 volts, dando como resultado una temperatura de 148 °C. Los resultados anteriores se tomarán en cuenta para realizar una segunda prueba de temperatura, enfocada al microcontrolador y con esto conocer su comportamiento en relación a las situaciones térmicas en las que se encuentra la PSH.

4.1.2. Prueba de temperatura: Evaluación del sistema embebido por estrés térmico

La prueba de temperatura del sistema embebido mostró el comportamiento que este tiene ante situaciones de estrés por calor. Para la implementación de esta se tomó en cuenta la evaluación realizada en la prueba anterior, donde se recopilaron las lecturas de voltaje/temperatura y tiempos de estabilización para cada valor de temperatura dentro del recipiente. Los valores incluyen los rangos en los que se evaluó el sistema embebido (de 30 a 80°C), por lo que es de suma importancia haber realizado correctamente la evaluación descrita en el apartado 4.1.1.

En esta prueba se evaluó una serie de operaciones que el microcontrolador debe de cumplir, mismas que se insertaron dentro del programa. Los aspectos evaluados fueron los siguientes: el convertidor analógico-digital del sistema, el procesamiento de señales, sus salidas periféricas y la entrega de datos por puerto serial.

Para iniciar el experimento es necesario seleccionar el microcontrolador a evaluar donde se implementa el algoritmo de control de las operaciones anteriores. El entorno Arduino fue seleccionado por su versatilidad y facilidad de programación. El desempeño del dispositivo se evaluó en un gráfico mostrando los datos de las operaciones que se encuentre realizando en tiempo real.

Se introdujo el dispositivo dentro del recipiente térmico, aislando la señal de salida periférica fuera del contenedor, para la evaluación del indicador visual del sistema. Además, se introdujo el termopar dentro del recipiente para así obtener una retroalimentación de la temperatura interna a la que fue sometido el micro. Por medio de esta prueba se conoció el comportamiento que tiene el sistema embebido bajo circunstancias de calor en relación a las alcanzadas dentro la PSH.

La prueba se diseñó para conocer la confiabilidad y la robustez que posee el microcontrolador al realizar ciertos tipos de operaciones, como lo son: el procesamiento de señales, la conversión analógica-digital, las salidas periféricas del sistema, y la comunicación serial, debido a situaciones de estrés por calor. La

evaluación de estos criterios se tomó en cuenta de acuerdo a las operaciones que realiza normalmente el sistema de control de los seguidores en el campo.

Desarrollo

En el desarrollo de esta prueba fue necesario la adición de nuevos materiales, componentes e información de la prueba anterior, como:

- Multímetro.
- Contenedor térmico.
- Termopar.
- Variador de voltaje (Variac).
- Microcontrolador (ATMEGA 328P-PV).
- Datos de temperatura de la prueba 1.
- Indicador diodo LED.
- Cable serial PC-microcontrolador.
- Algoritmo de control para microcontrolador.
- Computadora.
- Software gráficos.

Para la evaluación del procesamiento se programó una función coseno al microcontrolador donde posteriormente se envió la señal por medio del puerto serie del microcontrolador hacia una computadora donde se graficó; en la evaluación del ADC se tomó lectura de un patrón de señal continua (fuente de 5 voltios) conectado a una entrada analógica del micro, donde Arduino se encargó de procesar y enviar dicha señal de forma serial a una PC donde fue graficada; las señales de salida periféricas del microcontrolador fueron evaluadas por medio de indicadores visuales (diodo LED); es necesario tener conocimiento en lenguaje Arduino para crear un algoritmo que cumpla con las funciones mencionadas.

Resultados

Los resultados de la prueba térmica 4.1.2 fueron realizados en un ambiente controlado mediante el uso de las herramientas seleccionadas, por lo que se obtuvieron datos confiables.

Los datos indican que el sistema opera correctamente en sus cuatro características (figuras 4.3 y 4.4), demostrando que es capaz de resistir altas temperaturas en un ambiente estresante por calor. De igual manera, no se observaron retrasos en el tiempo de procesamiento de la señal ni en la transmisión de datos por el puerto serial. La evaluación del indicador visual fue satisfactoria, por lo que las señales de salida periférica del sistema funcionan correctamente a temperaturas de 80 °C.

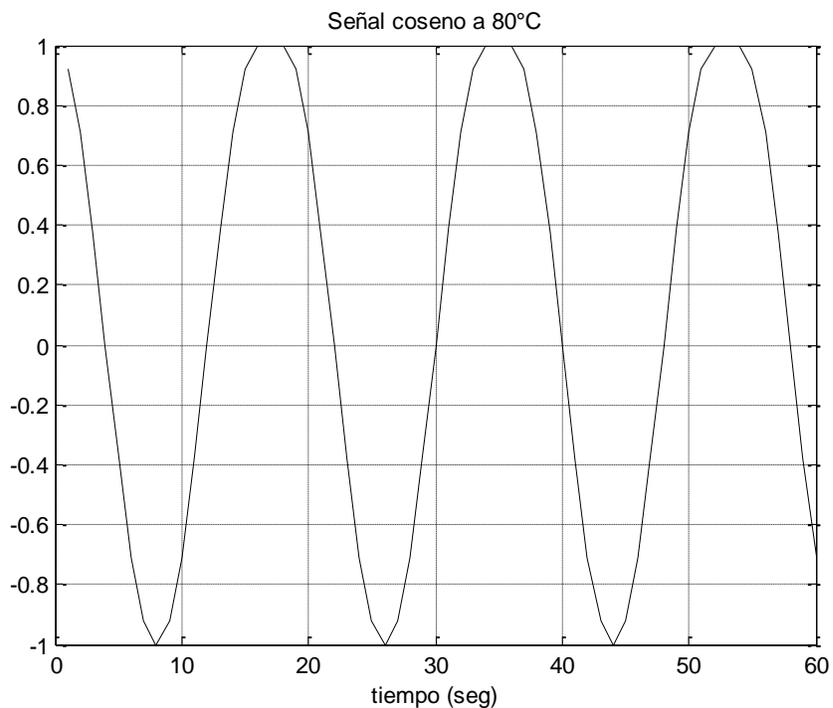


Figura 4.3. Señal coseno en el tiempo.

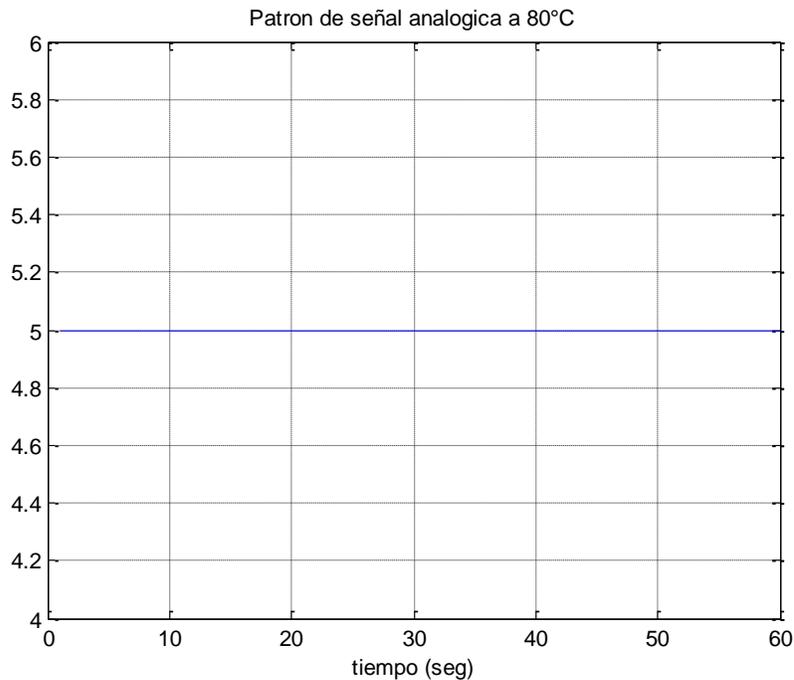


Figura 4.4. Patrón de señal analógica de 5 voltios.

4.2. Prueba del error del sistema de control

En el siguiente experimento se evaluó el desempeño que tiene el sistema de control. Por lo anterior, se aplicó una evaluación al tipo de controlador y al algoritmo de control que realiza las operaciones de los seguidores.

Un buen controlador es el que posee las características de confiabilidad y robustez; siendo la primera la capacidad que tiene el sistema de control para no fallar manteniéndose en condiciones estables o en una variación mínima dentro de un rango deseable para el sistema; la segunda para reestablecer o regresar a su rango óptimo de operación después de alguna falla o factor de perturbación no controlable que se presente.

Como muestra la literatura, existen algunos criterios integrales que pueden servir como ayuda para la evaluación de los errores generados por el controlador (ecuaciones 2.2, 2.3, 2.4, 2.5) debido a alguna condición o factor de perturbación.

Los criterios cuantifican el error generado por el algoritmo de control, proporcionando un valor que al ser integrado al algoritmo da como resultado la disminución de los errores o variaciones generadas por los factores de perturbación no controlables.

Una manera para determinar el error de control es mediante la diferencia que existe entre las posiciones angular de control del helióstato en acimut y elevación (α, β) y las posiciones angular medidas por la flecha del motor $(\bar{\alpha}, \bar{\beta})$, donde las primeras son las posiciones exactas en acimut y elevación en que debe localizarse el helióstato a cierta hora del día, con el fin de obtener una mayor eficiencia en la puntería del seguidor. Las segundas son las lecturas tomadas por los encoders de los motores. El error de control (σ) se puede representar por las ecuaciones:

$$\text{error en acimut } (\sigma_a) = \bar{\alpha} - \alpha \quad (4.1)$$

$$\text{error en elevación } (\sigma_e) = \bar{\beta} - \beta \quad (4.2)$$

La resolución del encoder se considera por medio de LabVIEW y el módulo NI9411 del cRIO (modulo para encoder) donde la resolución de éste es de ± 4 mA por canal de transmisión (un motor tiene 2 canales).

Con base en las ecuaciones anteriores, es posible determinar el error existente entre ambas posiciones angulares, y así, evaluar correctamente el desempeño que tiene el controlador. Con estas ecuaciones se diseña la tabla 4.2, que representa el error generado en acimut y elevación entre el encoder y el sistema de control. De igual forma, la prueba debe incluir el traslado entre operaciones del helióstato, por lo que se escogió una posición de inicio "A" y una posición final "B".

	Encoder $\bar{\alpha}$	Encoder $\bar{\beta}$	Sistema de control α	Sistema de control β	Error en acimut σ_a	Error en elevación σ_e
<i>Posición</i> A	$\bar{\alpha}_0$	$\bar{\beta}_0$	α_0	β_0	$\bar{\alpha}_0 - \alpha_0$	$\bar{\beta}_0 - \beta_0$
	$\bar{\alpha}_1$	$\bar{\beta}_1$	α_1	β_1	$\bar{\alpha}_1 - \alpha_1$	$\bar{\beta}_1 - \beta_1$
	$\bar{\alpha}_2$	$\bar{\beta}_2$	α_2	β_2	$\bar{\alpha}_2 - \alpha_2$	$\bar{\beta}_2 - \beta_2$
	$\bar{\alpha}_3$	$\bar{\beta}_3$	α_3	β_3	$\bar{\alpha}_3 - \alpha_3$	$\bar{\beta}_3 - \beta_3$
	·	·	·	·	·	·
	·	·	·	·	·	·
	·	·	·	·	·	·
	$\bar{\alpha}_i$	$\bar{\beta}_i$	α_i	β_i	$\bar{\alpha}_i - \alpha_i$	$\bar{\beta}_i - \beta_i$
	·	·	·	·	·	·
	·	·	·	·	·	·
<i>Posición</i> B	$\bar{\alpha}_k$	$\bar{\beta}_k$	α_k	β_k	$\bar{\alpha}_k - \alpha_k$	$\bar{\beta}_k - \beta_k$

Tabla 4.2. Error de control. σ_a y σ_e

Una vez obtenido el valor del error del sistema de control por medio de los criterios de desempeño fue necesario determinar cuáles eran sus causas, entre las que encontraron cuestiones ambientales (viento), inercia de la estructura, mala instalación del seguidor y problemas en el algoritmo de control (cálculos incorrectos, des sincronización, cicla miento de operaciones). Con base en ello se determinaron los tipos de perturbaciones que más afectan el comportamiento del helióstato; además de proporcionaron información de futuras mejoras en el controlador.

En la tabla 4.3 se representan simbólicamente los datos que indican la vibración que se generó en la estructura. El viento fue otro factor a tomar en cuenta para la evaluación del error de control, por lo que la tabla 4.4 se muestran simbólicamente los datos de cargas de viento que se presentaron durante el transcurso del

experimento. Con esto se observa si el error de control tiene correlación con ambos factores (viento y vibración).

<i>Vibración</i>	
<i>Posición A</i>	V_{i_0}
	V_{i_1}
	V_{i_2}
	.
	.
<i>Posición B</i>	V_{i_k}

Tabla 4.3. *Vibración generada por la inercia de la estructura.*

<i>Viento</i>	
<i>Posición A</i>	V_0
	V_1
	V_2
	.
	.
<i>Posición B</i>	V_k

Tabla 4.4. *Mediciones de viento entre operaciones.*

4.2.1. Prueba preliminar: Error de control

Para analizar el algoritmo de control del sistema actual, primero es necesario saber cómo funciona el mismo. Por lo anterior, se ha realizado un diagrama de bloques (figura 4.5) que representa el sistema de control y cómo opera para el redireccionamiento del rayo solar.

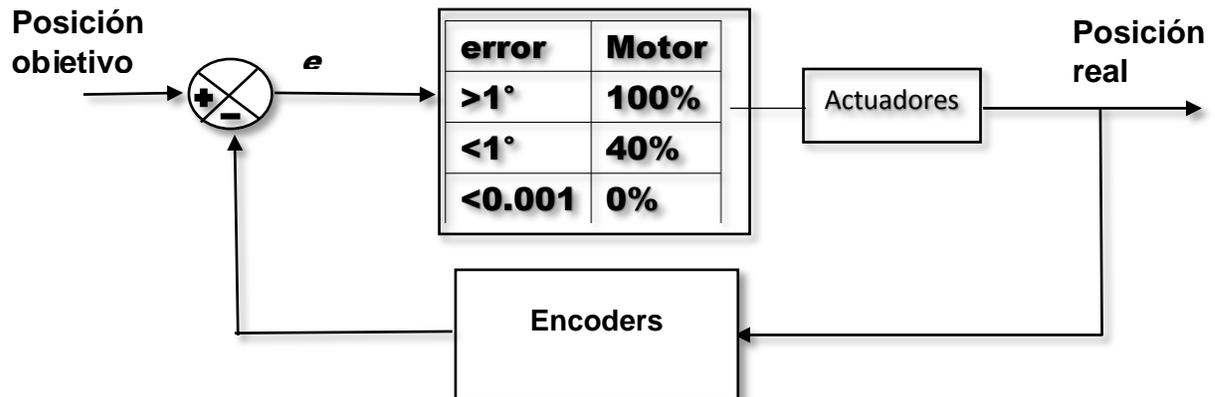


Figura 4.5. Sistema de control, diagrama de bloques.

La figura anterior representa la arquitectura de control en la PSH, específicamente un control de lazo cerrado con retroalimentación por encoders, donde la posición objetivo es fijada por medio manual o automático a un blanco en la torre; esta no se mueve hasta que el seguidor llega a dicho punto. La acción de control es sencilla y consta de comparar la posición actual y objetivo del heliostato: si el error es mayor a 1° , la velocidad de los motores aumenta al 100% de su capacidad; al momento que este sea menor a 1° , su velocidad desciende hasta un 40%; y por último, los motores se detienen cuando el error es menor a 0.001° .

Para poder realizar estas acciones de control se necesitan dispositivos que indiquen la posición real de seguidor. El sistema cuenta con encoders localizados en los motores del heliostato que realizan la tarea en cuestión. Una vez se sabe la forma en que trabaja el sistema de control, se pueden definir las posiciones dentro del algoritmo, que en este caso está implementado por la plataforma de desarrollo LabVIEW, como se muestra en la figura 4.6.

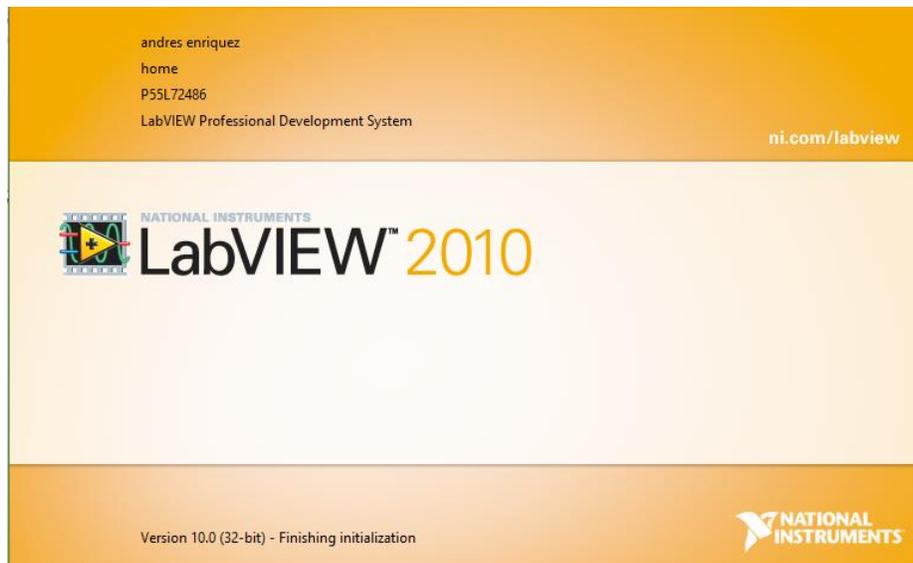


Figura 4.6. Plataforma virtual LabVIEW.

Antes de localizar los datos de interés ($\alpha, \beta, \bar{\alpha}, \bar{\beta}$), hay que familiarizarse con el entorno del programa. Se debe desarrollar habilidades en programación visual como lo es LabVIEW, reconocer cada componente que se está utilizando dentro del programa y el porqué de estos, preguntar al personal encargado sobre las dudas del programa, y por último, localizar los datos de interés mencionados. Esta etapa puede ser la más tardada, ya que desarrollar las habilidades y adentrarse en el código puede ser muy demandante.

Dentro del algoritmo de control se han localizado la posición real y objetivo, mismas que se muestran en la figura 4.7. Las adecuaciones implementadas para la extracción de $\alpha, \beta, \bar{\alpha}, \bar{\beta}$, se muestran en la figuras 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12.

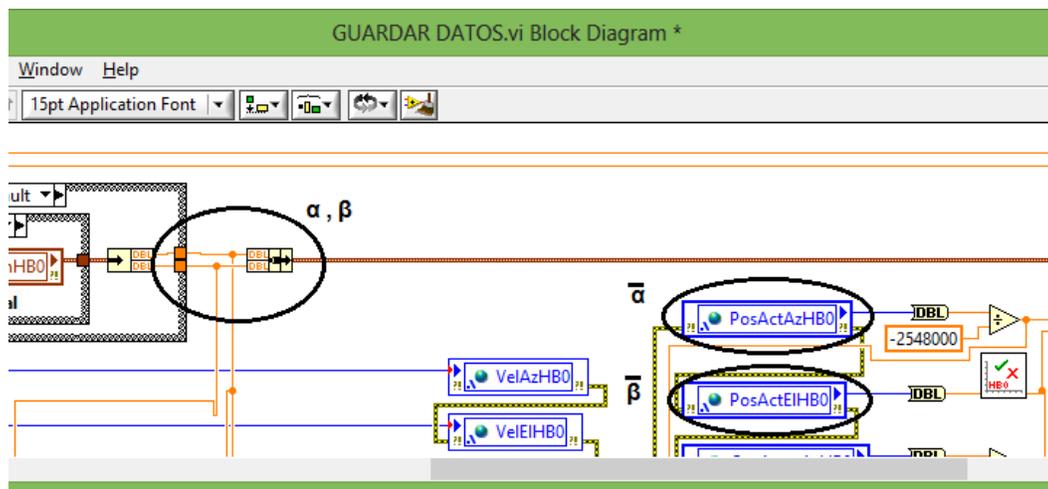


Figura 4.7. Posiciones objetivo (de control) y posiciones de encoder (real).

Modificando el programa, es posible extraer los datos de interés, que fueron:

1. Crear una variable compartida, que almacene los datos de interés; esto se lleva a cabo dentro del proyecto principal SCADA, en el cRIO que controla al heliostato a evaluar. En este caso la variable es llamada “DATOS”.

variable compartida

Figura. 4.8. Variable DATOS, localizada en la dirección del cRIO.

2. Una vez creada la variable, es necesario dirigirse nuevamente al algoritmo de control del heliostato para convertir las cuatro variables de interés en un arreglo de datos, donde en cada ciclo sean recalculadas e insertadas al mismo arreglo (figura 4.9).
3. Después, iniciar una estructura de casos para controlar el grabado de los datos mediante un botón virtual, donde el estado verdadero de la estructura será verdadero o falso en decir guardar y no grabar respectivamente (figura 4.9).

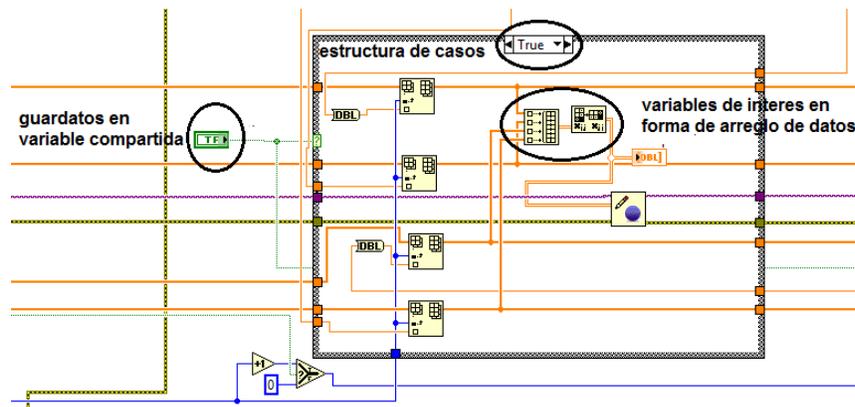


Figura 4.9. Convierte variables de interés en un arreglo de datos y guarda el arreglo.

- Los datos serán guardados en la variable compartida creada en el punto 1, por lo que es necesario agregar los comandos, **abrir variable**, **escribir datos**, y **cerrar variable**, dentro del código de operación donde se realizaron las modificaciones anteriores, dando como resultado el almacenamiento del arreglo dentro de la variable compartida (figura 4.10).

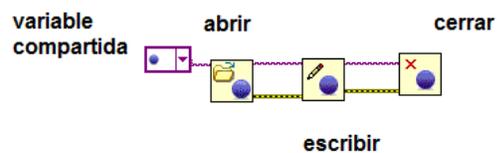


Figura 4.10. Guardar en la variable compartida.

- Regresar al proyecto principal y crear un nuevo VI o nuevo código que esté localizado en la computadora principal para que los datos recabados se trasladen a esta PC (figura 4.11). En este caso se le ha llamado “guardar datos”.

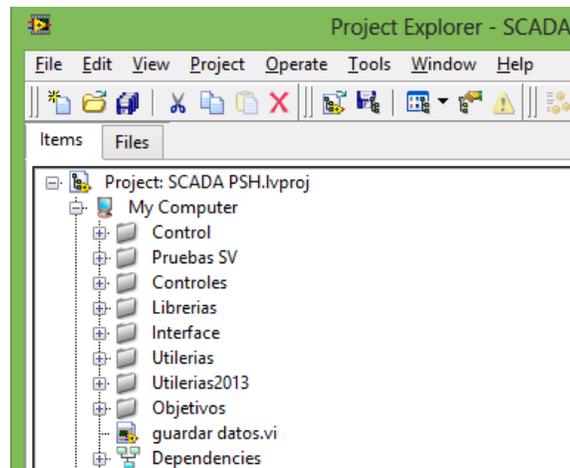


Figura 4.11. Nuevo VI (guardar datos). Computadora principal.

6. Dentro este nuevo VI, agregar los comandos de **abrir variable**, **leer datos**, **cerrar variable** y **escritura de datos en hoja de cálculo**, para poder manejar estos con más facilidad (figura 4.12).

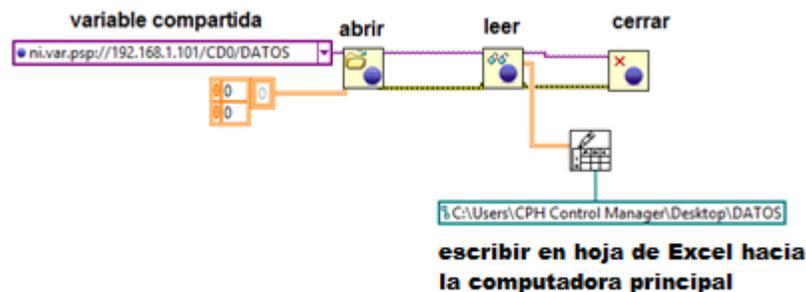


Figura 4.12. Escribir datos en hoja de cálculo.

Por medio de dichas modificaciones se podrá guardar y extraer datos desde cualquier computadora conectada en red con el cRIO. En este caso se implementó para la computadora principal que controla a los helióstatos.

Para mostrar el tipo de comportamiento que sigue el control, se ha llevado a cabo pruebas preliminares que muestran al error en acimut y elevación del seguidor. Gracias a los datos recabados del algoritmo de control, estos se pudieron llevar a una tabla comparativa y ser graficados por medio de MATLAB. Los resultados del

error de control desde posición **Home** hasta posición **seguimiento** se muestran en la tabla 4.5 y la figura 4.13 y 4.14.

	$\bar{\alpha}_0$	α_0	$\bar{\beta}_0$	β_0	$\bar{\alpha}_0 - \alpha_0$	$\bar{\beta}_0 - \beta_0$	Tiempo segundos
<i>Posición A</i>	0	-34.71	90	38.629	34.71	51.371	0.5
	-0.057	-34.71	89.968	38.629	34.653	51.339	1
	-0.127	-34.699	89.929	38.635	34.572	51.294	1.5
	-0.197	-34.699	89.889	38.635	34.502	51.254	2

	-33.144	-33.143	39.439	39.442	-0.001	-0.003	675
-33.144	-33.143	39.439	39.442	-0.001	-0.003	675.5	
<i>Posición B</i>	-33.144	-33.143	39.439	39.442	-0.001	-0.003	676

Tabla 4.9. Estado Home a seguimiento.

En la tabla 4.9 se observa el error en acimut y el error en elevación del sistema de control, donde cada vez que se realiza el cálculo de la posición objetivo y la posición real se genera un error. La prueba duró alrededor de 11 minutos dando un aproximado de 1320 datos a evaluar debido a la frecuencia de muestreo de 2 Hz, donde la posición a acimut (8 minutos con 57 segundos) llegó a su posición antes que elevación (10 minutos con 51 segundos).

Las siguientes figuras (figura 4.13 y 4.14) muestran el comportamiento del error a lo largo de la prueba. Inicialmente el error alcanza un valor muy elevado, provocado por el cálculo de un nuevo objetivo de blanco en la torre, por lo que se decide evaluar únicamente a los errores estables (error generado una vez que el seguidor alcanza su objetivo), ya que debido a estos se ve reflejada la acción de control.

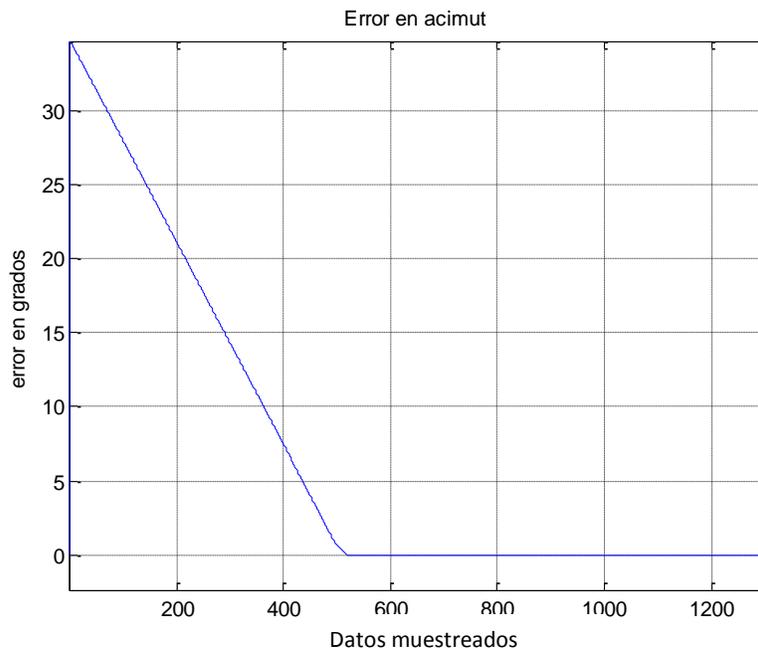


Figura 4.13. Error de Acimut contra el tiempo. Operación seguimiento.

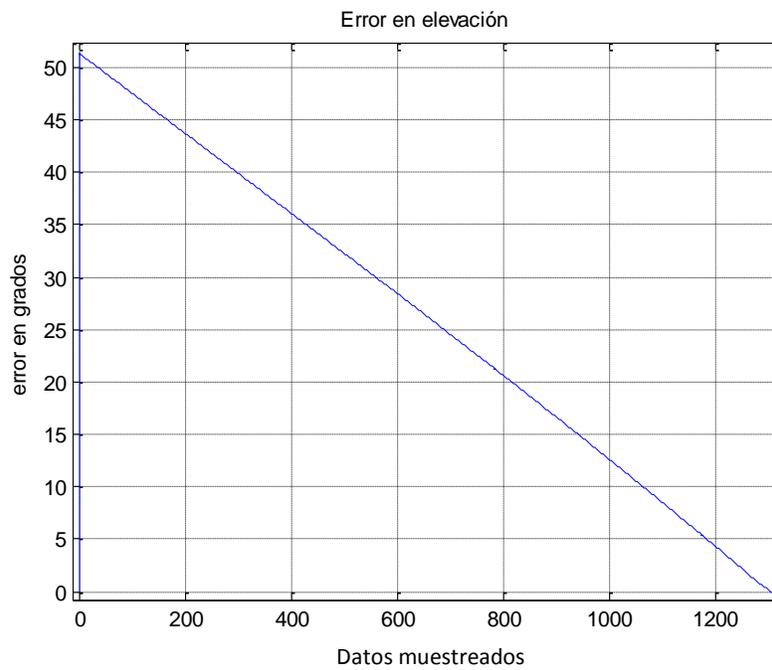


Figura 4.14. Error de elevación contra el tiempo. Operación seguimiento.

Los resultados anteriores muestran al error de posición “A” a posición “B”, donde se trasladó el seguidor. Estos resultados indican cómo el error aumenta por la acción del cambio de objetivo en la torre y cómo este va disminuyendo hasta que se estabiliza, indicando que el seguidor ha llegado a la posición deseada. Del mismo modo se realizaron las pruebas para las operaciones Home y posición manual, donde se hace uso de blancos específicos. Los resultados no mostraron gran variación en el error en estado estable, debido a que no hacen uso del cálculo solar para sus actividades donde el helióstato llega a su objetivo y permanece en esa posición hasta que se seleccione un nuevo blanco.

4.2.2. Prueba preliminar: vibración en la estructura del seguidor

El siguiente paso fue posicionar los acelerómetros para la lectura de vibración en la estructura. Se seleccionó el dispositivo ADX345 (figura 4.15), que tiene gran capacidad de resolución (13 bits), con rangos de $\pm 2G$, $\pm 4G$, $\pm 8G$ y $\pm 16G$; en donde 1G es la aceleración de la fuerza gravitatoria de la Tierra (9.81 m/s^2). El acelerómetro trabaja adecuadamente con la plataforma Arduino, por lo que se decidió implementar en esta se asume que la precisión del sensor ha sido corroborada por los expertos en instrumentación del campo.

Para la captura de datos de vibración, fue necesario de otro dispositivo que realizara la actividad de guardar los datos dentro de una memoria externa, para después realizar análisis debido a los datos por medio de una computadora. Para lo anterior, fue necesario que Arduino trabajase como DataLogger haciendo uso de una tarjeta SD que guarda los datos de vibración (frecuencia y amplitud). Para el DataLogger se requirió de un dispositivo conocido como Arduino-SD o *shield* Ethernet (figura 4.16), el cual cumple con la función requerida de almacenamiento de valores en memorias externas.

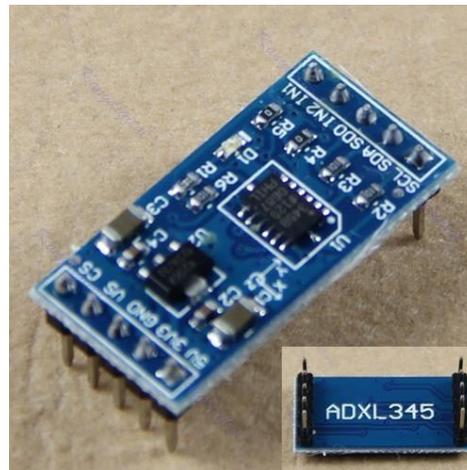


Figura 4.15. Acelerómetro ADX345.

La tarjeta shield Ethernet (figura 4.16) tiene la capacidad de guardar los datos que procesa Arduino dentro de una memoria SD, otorgándole la capacidad de poder manejarlos por medio de una computadora para un análisis más apropiado. El software que se seleccionó para el análisis de los datos (análisis estadístico, gráficos, comparaciones entre diversos valores) que fue guardado dentro de la SD fue paquetería Excel y MatLab.

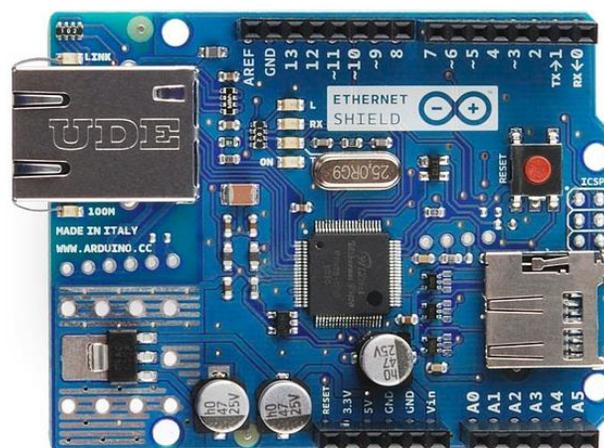


Figura 4.16. Shield Ethernet Arduino.

Para poder obtener las lecturas de vibración de la estructura del helióstato fue necesario desarrollar una nueva *shield*, con motivo de facilitar la unión entre Arduino, el módulo Ethernet y el sensor ADX345, la cual se muestra en la figura 4.17. La *shield* se adaptó para Arduino UNO específicamente, debido a que este dispositivo es el que se seleccionó para el experimento.

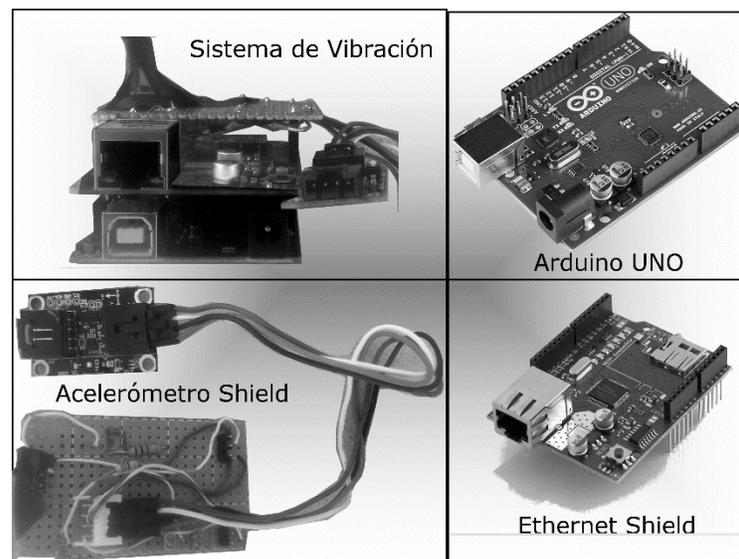


Figura 4.17. Modulo completo Arduino, Shield Ethernet y Shield acelerómetro.

La forma en que se conectó la plataforma Arduino con el acelerómetro se muestra en la figura 4.18. El circuito que se desarrolló para la *shield* del acelerómetro se muestra en la figura 4.19, donde: tierra y voltaje se tomaron de una fuente de alimentación externa conectados a Vin y GND de Arduino respectivamente; la señal de captura de datos de vibración se proporcionó desde el laboratorio de control para llegar al cRIO y finalizando al PIN 7 de Arduino; el PIN 6 indicó la acción de captura de datos por medio de un diodo Led; el PIN A5 fue la señal de reloj para el acelerómetro (Serial Communications Clock del sensor); el PIN A4 es la señal de entrada de datos del sensor (Serial Data Input del sensor).

Aunado a lo anterior, se utilizaron componentes como resistencias, botones, terminal blocks, tal y como lo muestra el diagrama de conexión del *shield* del sensor.

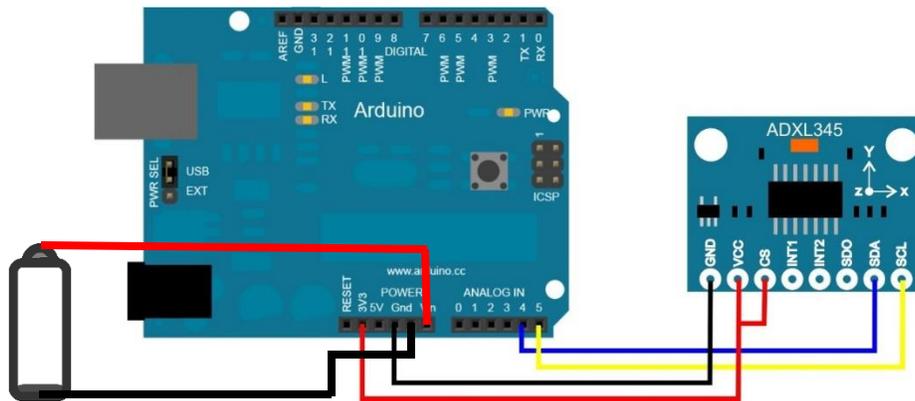


Figura 4.18. Diagrama de conexión de Arduino-acelerómetro.

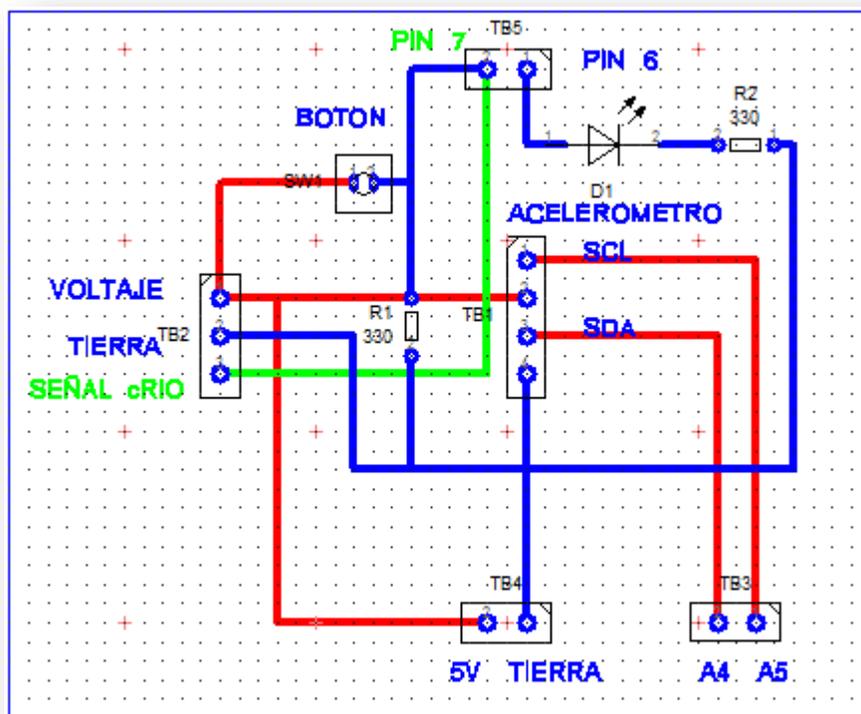


Figura 4.19. Diagrama de la shield acelerómetro para Arduino UNO.

Una vez concluido el desarrollo del sistema de vibración, se realizó el algoritmo de recopilación de datos de vibración y amplitud, tal y como lo muestra la figura 4.20. El algoritmo es implementado en lenguaje de Arduino donde se calculan los componentes de la vibración: la amplitud en m/s^2 y la frecuencia en Hertz.

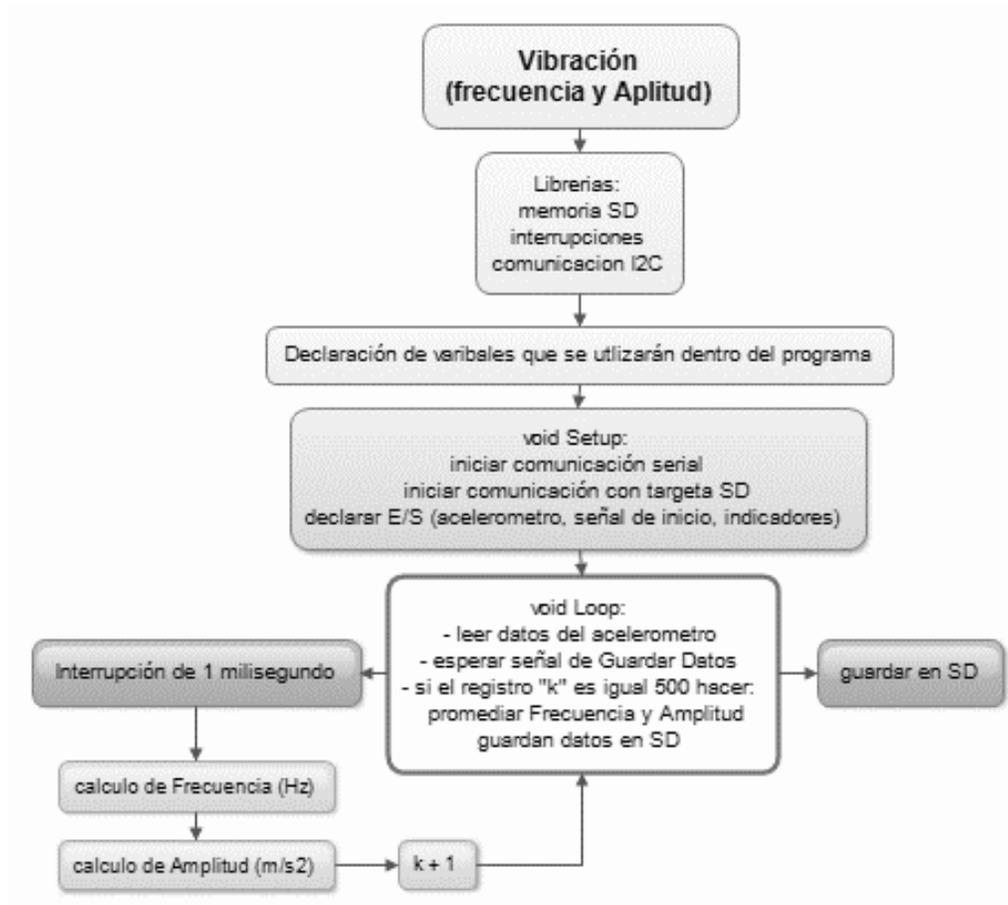


Figura 4.20. Algoritmo para cálculo de vibración y guardado de datos.

El dispositivo completo (microcontrolador y sensor) se evaluó con un osciloscopio para verificar que este cumpliera con el tiempo en que debe guardar los datos dentro de la memoria SD. Se programó Arduino con una frecuencia de muestreo de 2 Hz, donde se almacenó un valor de frecuencia y un valor de amplitud correspondiente dentro de la memoria externa, con el fin de sincronizarse con el tiempo de guardado

de datos de posición en LabVIEW y obtener así el mismo número de valores en ambos sistemas.

Concluido lo anterior, se colocó el dispositivo completo en la estructura del helióstato, donde el sensor fue fijado fuertemente a esta con posibilidad de moverse únicamente por medio de la estructura del seguidor (figura 4.21). En este caso se seleccionó una de las esquinas del seguidor para hacer las pruebas de vibración, donde se pensó habría una mayor exposición a este factor.



Figura 4.21. *Módulo Arduino y sensor fijados en la estructura del helióstato.*

El microcontrolador fue controlado por la computadora principal dentro del laboratorio, proporcionando una señal para iniciar con el experimento y recabar los datos de interés del sensor. Por lo anterior, se instaló un módulo de salidas digitales en el chasis de cRIO que va cableado hacia la entrada digital 7 de Arduino y así tener el control del sistema desde el laboratorio principal. Igualmente se realizó una prueba preliminar para corroborar que el dispositivo instalado en la estructura del seguidor estuviera operando correctamente, por lo que se seleccionó un tiempo de 50 segundos para la prueba, donde en presencia de varios golpes al seguidor con tiempos aceptable entre cada uno de ellos con motivo de la estabilización, para ver el

resultado en forma de un gráfico. El tiempo de 50 segundos fue justo para el propósito del experimento. Los datos recabados de este se muestran en las figuras 4.22 y 4.23, donde la primera refiere a la amplitud de la vibración y la segunda a la frecuencia de la misma.

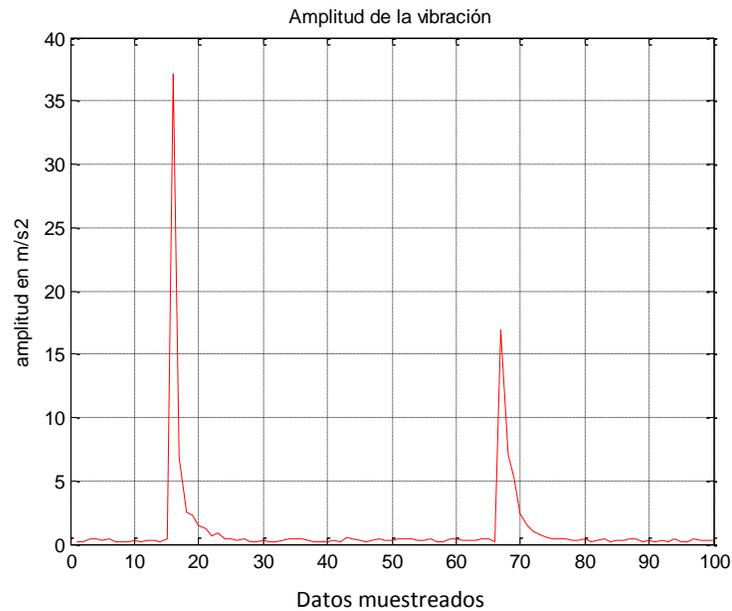


Figura 4.22. Gráfico de la amplitud de la vibración.

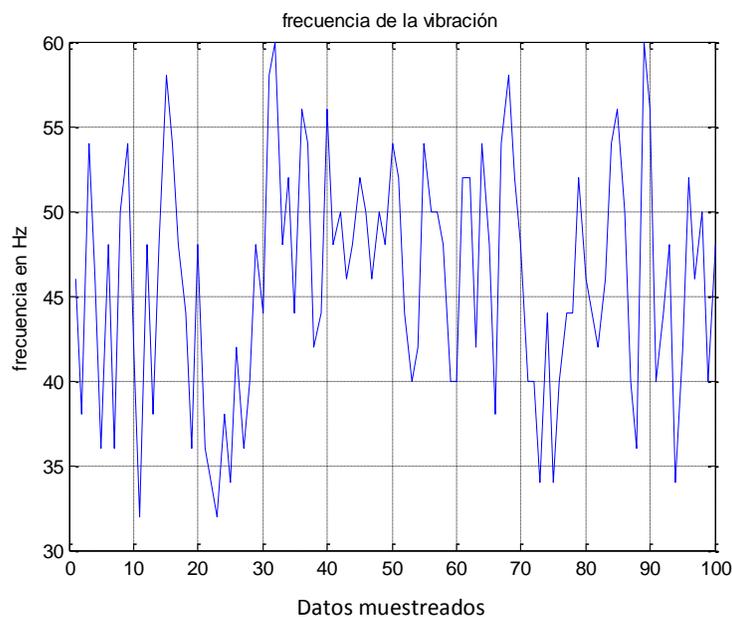


Figura 4.23. Gráfico de frecuencia de la vibración

El objetivo del experimento fue conocer la frecuencia y amplitud de la vibración en la estructura del seguidor. Los picos que se muestran en el gráfico de amplitudes fueron pequeños golpes con el fin de verificar que el dispositivo se encontrara trabajando de manera correcta; de igual forma, estos golpes se reflejaron en el gráfico de frecuencias, por lo que se alcanzaron altos niveles en la vibración del mecanismo.

Lo que se deseó observar son esos mismos sobresaltos de frecuencia y amplitud, que se piensa que pueden causar daños graves al mecanismo del seguidor y afectar en el error de control. Grandes niveles en la frecuencia y en la amplitud pueden indicar que el helióstato se encuentra comprometido a las operaciones que realiza y que presenta perturbaciones en su estructura, ya sea por parte del viento o por otros factores como el sistema de engranaje o los motores.

4.2.3. Prueba preliminar: Cargas de viento en campo

Para conocer las cargas de viento que influyen en las operaciones del seguidor, fue necesario utilizar un sensor capaz de realizar dicha actividad, por lo que se seleccionó el siguiente dispositivo (figura 4.24). Como se indicó en la literatura, el anemómetro es un dispositivo capaz de medir las cargas de viento en su entorno; las características de este son:

- Voltaje de salida: 0.4 a 2V
- Velocidad de inicio: 0.2 m/s
- Máxima velocidad: 70 m/s
- Rango de prueba: 0.5 m/s a 50 m/s
- Resolución: 0.1 m/s

El cableado que se muestra en la figura 4.24 son: cable azul, que es la señal que es procesada por parte del microcontrolador, resultado en las velocidades del viento en Km/h; cable café, que es el voltaje de alimentación del anemómetro, de 9 a 24 Volts en corriente directa; y el cable negro que es el común.

Por medio de estas especificaciones, fue posible realizar un programa para capturar las cargas de viento dentro de la PSH y evaluar los seguidores en base a ésta perturbación.



Figura 4.24. *Anemómetro analógico*

Una vez programado el microcontrolador con el anemómetro (figura 4.25), el siguiente paso fue realizar la misma prueba con el osciloscopio y con esto verificar si el sistema que se desarrolló para medir las cargas de viento cumple con la especificación de muestreo de 2 Hz. Del mismo modo el sistema fue implementado para guardar datos de velocidades en Km/H cada 500 milisegundos, con el fin de obtener la misma cantidad de datos que los sistemas anteriores (posiciones y vibraciones).

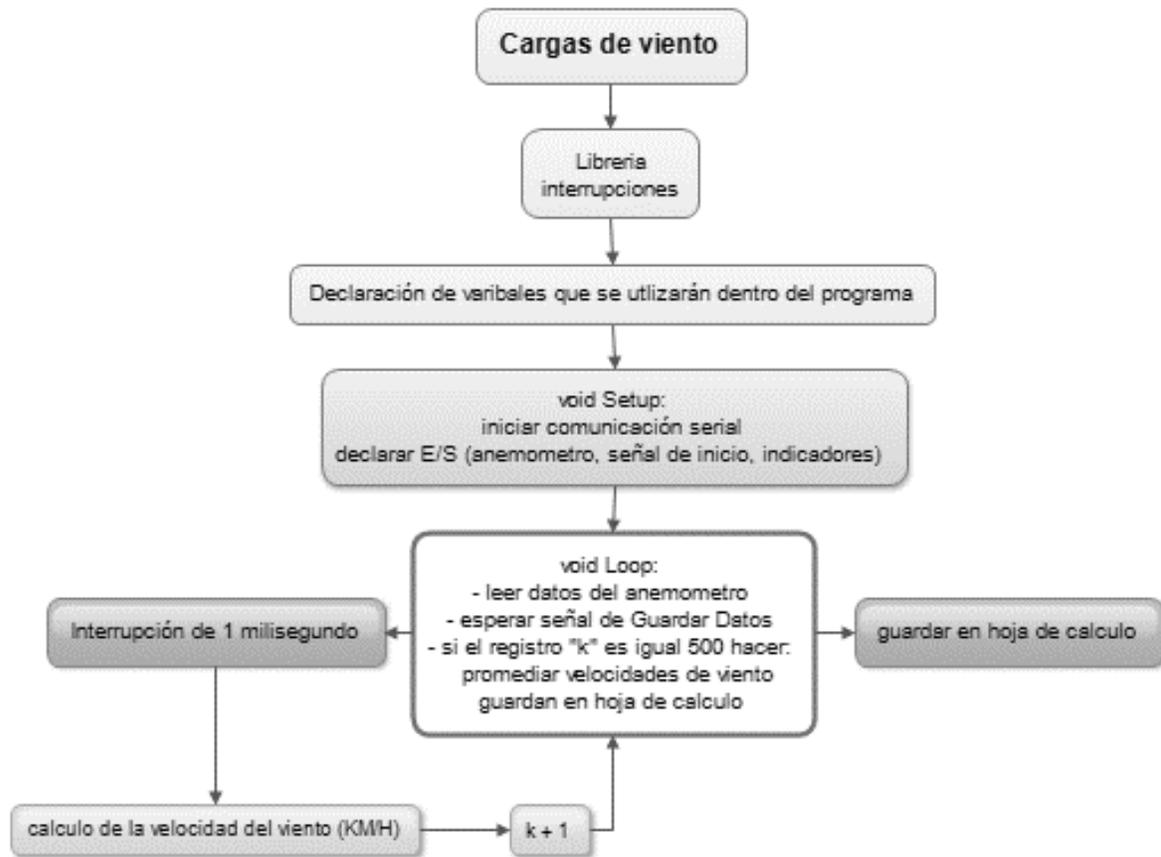


Figura 4.25. Algoritmo para cálculo de cargas de viento y guardado de datos.

Una vez concluido con la prueba anterior del osciloscopio, el siguiente paso fue corroborar si el sensor se encuentra en calibración, por lo que se comparó con el dispositivo implementado dentro del PSH que registra los vientos dentro del campo. Por lo anterior, se instaló el sensor en la punta de la torre de concentración, donde se localiza el anemómetro de PSH y se compararon los datos recabados.

Lo datos mostraron congruencia unos con otros, por lo que se concluyó que el dispositivo fue correctamente calibrado y programado, dando paso a una tercera prueba del sensor.

La tercera prueba consistió en recabar los datos de cargas de viento, posicionando al sensor a una distancia lo más cercana posible del helióstato en evaluación,

procurando que no hubiera obstrucción de ningún tipo, con el fin de que el anemómetro pueda guardar correctamente los datos de interés. Debido a lo anterior, se seleccionó una distancia aproximada de medio metro desde el nivel del suelo y 6 metros a un lado del seguidor. La estación donde se realizaron las pruebas de viento se muestra en la figura 4.26.

La señal que indica la captura de los datos de velocidad fue dada igualmente por cRIO. Una vez concluida la prueba, se tienen los tres sistemas para la captura de todos los datos importantes para una evaluación completa (posiciones, vibraciones y velocidades).



Figura 4.26. Estación de pruebas de viento.

Gracias a esta estación se pudo recabar datos de cargas de viento, que se integra por el sensor de viento y su fuente de alimentación, una computadora y soporte,

cable Ethernet para la señal al microcontrolador, extensiones eléctricas, y la plataforma Arduino con su código correspondiente.

Se realizó una prueba preliminar para verificar si la estación se encontraba trabajando correctamente, donde se recabaron algunos datos de viento y se guardaron en una hoja de datos de Excel para poder graficar su comportamiento. La figura 4.27 muestra el resultado del comportamiento de la prueba concluida, donde se diseñó para 50 segundos, con la que se llegó a un máximo 28 km/h y un mínimo de 7 km/h de velocidad de viento.

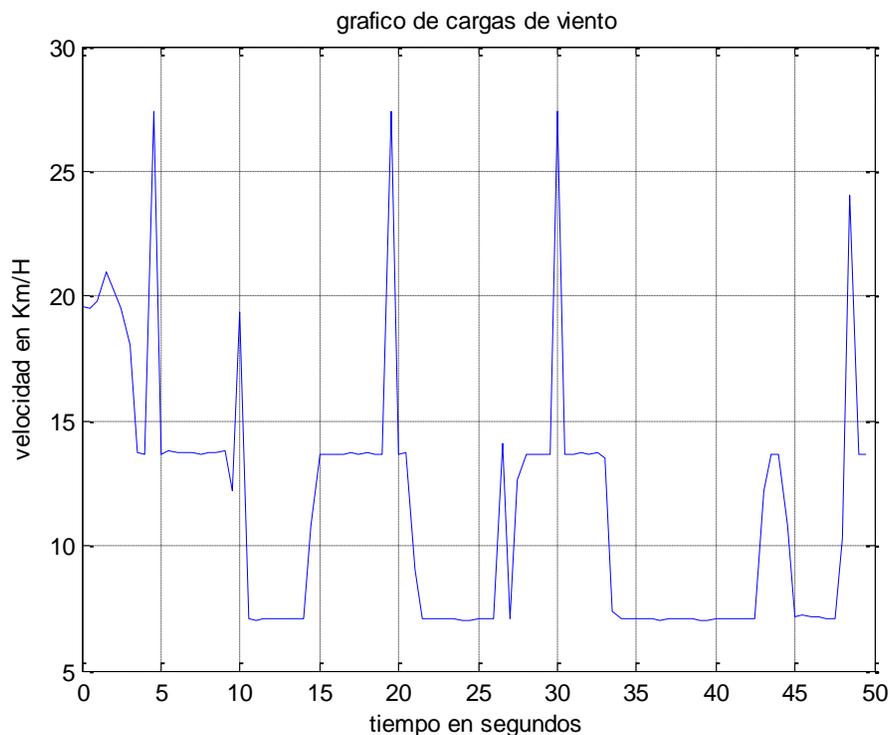


Figura 4.27. Gráfico de cargas de viento.

Los resultados mostrados por la prueba anterior revelaron qué tan rápido pueden variar las velocidades en un campo abierto y que estas pueden alcanzar niveles capaces de afectar no solo al mecanismo del seguidor, sino también las operaciones que realiza. Existen cambios bruscos de viento, como se mostró en el gráfico

anterior, que pueden ocurrir inesperadamente por lo que se debe estar preparado para tomar las medidas necesarias y asegurar la integridad de los seguidores.

4.2.4. Prueba del sistema de control con vibración y viento, estado seguimiento

Una vez concluidas las pruebas preliminares, se procede a realizar el experimento del sistema de control integrando todos los subsistemas desarrollados hasta este punto.

Es importante preparar correctamente el experimento, por lo que se deben de montar la estación de pruebas de viento y el sensor de aceleración del sistema de vibración; del mismo modo, preparar el sistema de guardado de datos dentro del laboratorio para que con una sola señal de sincronía, los tres sistemas inicien sus procesos simultáneamente y concluyan así al mismo tiempo.

El experimento evalúa la operación seguimiento del helióstato (tabla 2.1) en estado estable (operación donde el rayo solar alcanza el objetivo indicado y donde se encuentra calculando las posiciones constantemente).

Dentro del experimento se seleccionaron diversos objetivos de blanco y sus secuencias (figura 4.28), con el fin de que el helióstato se desplace en una gran variedad de posiciones y así abarcar más información de la prueba. Por medio del desplazamiento del seguidor se observa si existe algún punto en la estructura donde su comportamiento no sea el esperado.

Se cronometró el tiempo de la prueba para que esta dure una hora exactamente, por lo que se esperó obtener un total de 7200 datos en cada uno de los sistemas anteriores. Los resultados obtenidos por el sistema SCADA en la plataforma de desarrollo LabVIEW no fueron idóneos, resultando en un total de 5200 datos de posición, por lo que las evidencias no son concluyentes y asumimos que el sistema pudo haber fallado, no se encuentra trabajando a 2 Hz o que no está sincronizado correctamente, e inclusive que el sistema SCADA tiene problemas para trabajar en

tiempo real. Los resultados obtenidos por los sistemas restantes demostraron que el microcontrolador Arduino es un sistema síncrono, concluyendo con un total de 7200 datos cada sistema. Se decidió realizar un ajuste de los datos de vibración y velocidad del viento con los datos de posición, para así realizar el análisis correspondiente.

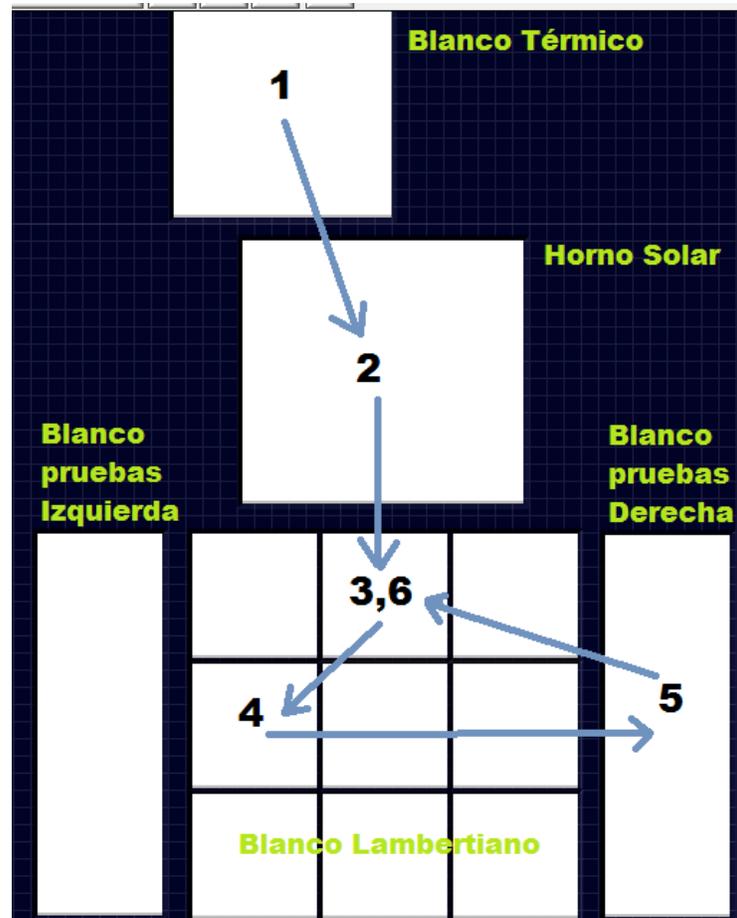


Figura 4.28. Secuencia correspondiente de blancos en la torre.

El resultado del experimento se representa en las siguientes gráficas, donde se muestra el comportamiento del error de control en las posiciones de acimut y elevación ya antes mencionadas.

En la figura 4.29, el helióstato siguió el desplazamiento correspondiente al gráfico de las secuencias de blanco en la torre, iniciando por el horno solar, marcado con el 1, hasta la posición final en el blanco Lambertiano, marcado con el número 6, donde concluyó el experimento.

El error de control en acimut se muestra en la figura 4.29 de color azul, donde el eje “x” son el total de los datos recabados en una hora y en el eje “y” es el error en grados.

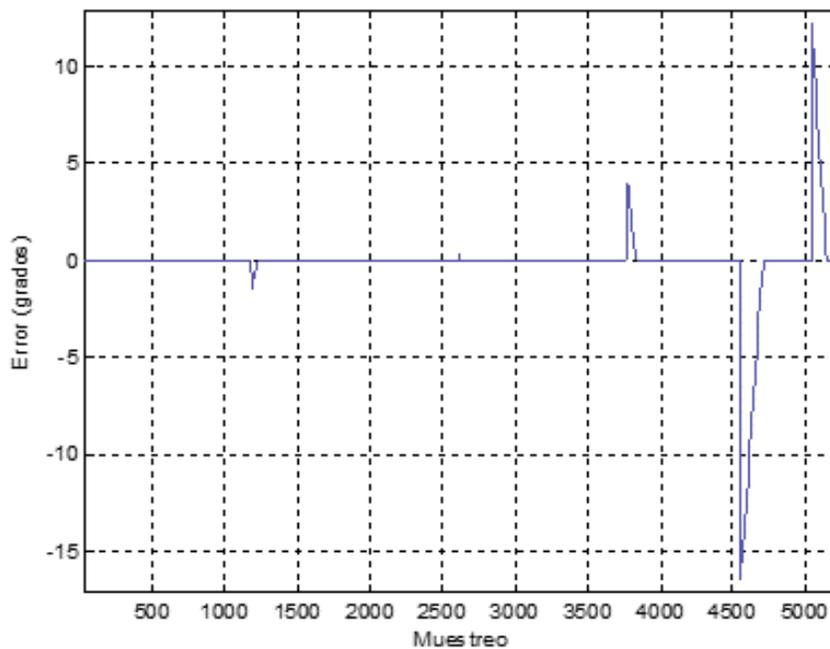


Figura 4.29. Error de control acimut, operación seguimiento.

En la gráfica anterior se muestra el error en acimut, donde los picos o cambios de nivel bruscos representan la transición de un objetivo de blanco a otro en la torre, por lo que se generaron errores muy grandes durante estas transiciones. Únicamente se ha enfocado en el error en estado estacionario o estable, es decir cuando el seguidor ha llegado a la posición objetivo. El error en dicho estado se representa como la línea horizontal azul paralela al plano “x” en la figura anterior. La siguiente gráfica (figura

4.30) muestra un acercamiento de la figura 4.29, indicando el error en estado estacionario de manera más evidente.

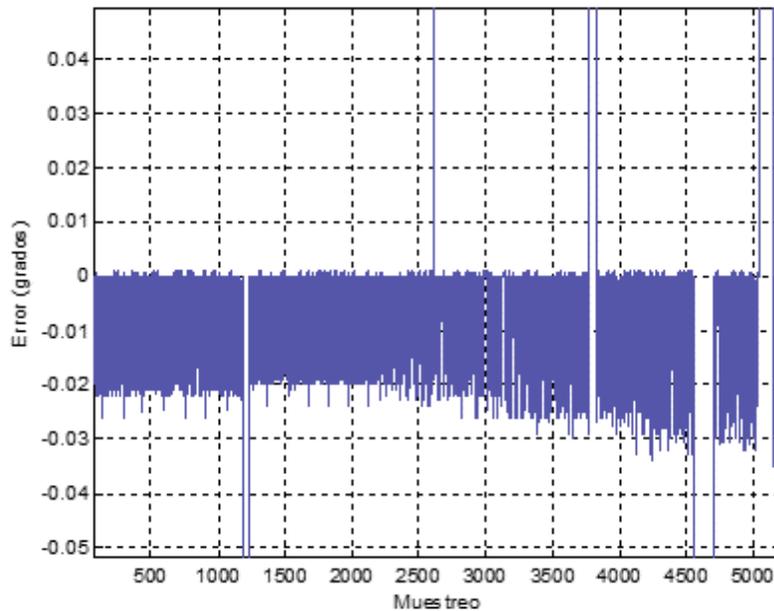


Figura 4.30. Zoom del error de control acimut, operación seguimiento.

En la gráfica anterior se observó los errores de control que van en el orden aproximado de 0.02° que, con respecto a la tolerancia establecida por la PSH (0.001°), resultaron ser mayores. La gráfica ilustra cómo el error va en incremento conforme se extiende el tiempo de la prueba.

Gracias a los datos resultantes del error de control, se pudo obtener valor IAE o integral absoluta del error dada por la ecuación (2.3) en la literatura y algunas adecuaciones a esta como se muestran en cálculo del índice de error para acimut en el siguiente desarrollo. Se seleccionó dicha ecuación debido a que el criterio trabaja de manera eficiente con errores pequeños a lo largo del tiempo. Por medio de la integral y algunas modificaciones a esta misma, se obtuvo un índice que representa

al error del sistema en el lapso de tiempo en que se realizó la prueba. El resultado de esta ecuación es el siguiente:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

$$IAE = \frac{\sum_0^n |e(t)| dt}{ndt}$$

$$IAE = \frac{\sum_0^{5200} ((0.0005) + (0.0005) + \dots + (0.0165))}{2600}$$

$$IAE_{acimut} = 0.00251$$

donde:

dt = 0.5 segundos.

|e(t)| = error en cada instante de tiempo.

n= número de datos.

El resultado del cálculo de la integral absoluta del error desde 0 a 5200 en estado estable fue de 0.00251, que representa el índice del error que se tuvo conforme al tiempo en que se realizó la prueba; además, representa una base para nuevos sistemas de control que se quieran evaluar.

El error de control en elevación se muestra en la figura 4.31, siguiendo el mismo desplazamiento marcado por la gráfica de secuencia de blancos en la torre. Igualmente que en acimut, la figura 4.32 muestra el acercamiento de la gráfica del error en elevación, con el fin de poder apreciar mejor los errores más pequeños. El eje “x” representa el total de datos recabados de la prueba y “y” el error en grados.

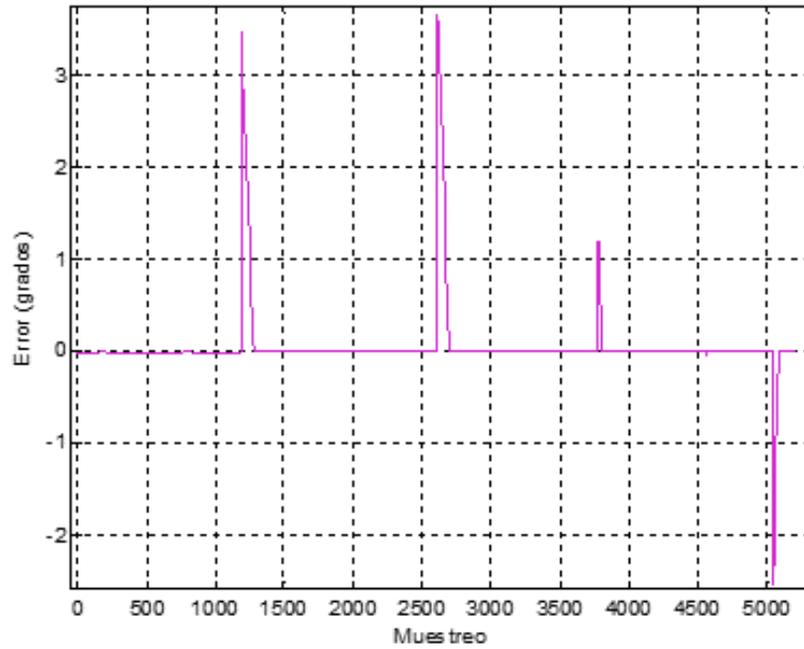


Figura 4.31. Gráfico del error de control en elevación, operación seguimiento.

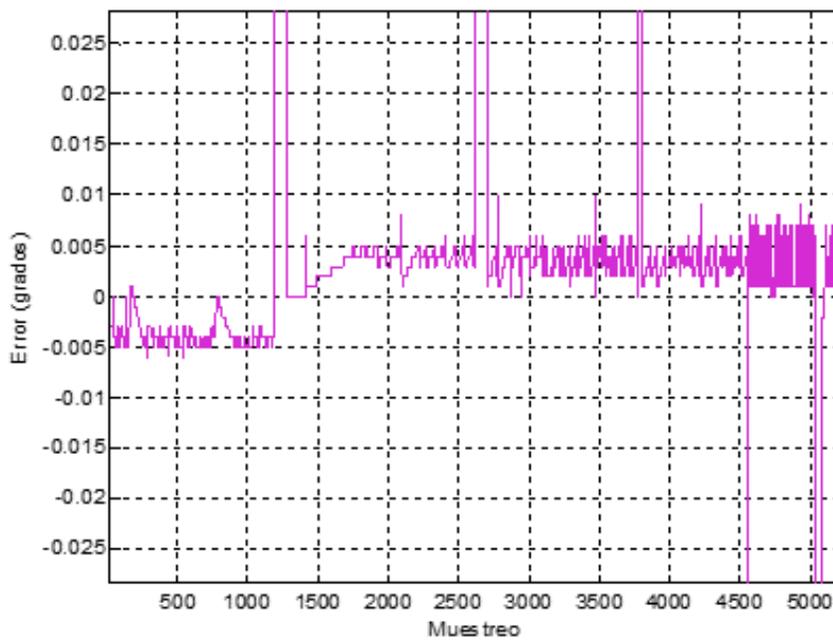


Figura 4.32. Acercamiento del gráfico del error de control en elevación, operación seguimiento.

El gráfico del error de control en elevación no mostró altos niveles de error en estado estacionario como el gráfico de acimut; aunque este se sale de las especificaciones de la PSH.

La evaluación de la integral absoluta del error dio como resultado **IAE (elevación) = 0.00322**, indicando que existe mayor desviación en elevación que en acimut. Debido a esto, es necesario ver los factores que influyeron en ambas posiciones, por lo que se presenta a continuación los resultados obtenidos por parte del sistema de vibración y el sistema de viento.

El siguiente gráfico muestra las amplitudes de la vibración durante el experimento, indicando el nivel de movimiento al que la estructura fue sometida. Observando detenidamente la figura 4.33 se distinguen varios picos de aceleración donde el seguidor presenció movimientos bruscos, ya sea por la acción del viento o por el mecanismo del seguidor; por otro lado, hubo periodos de tiempo donde el heliostato no sufrió altos niveles de vibración.

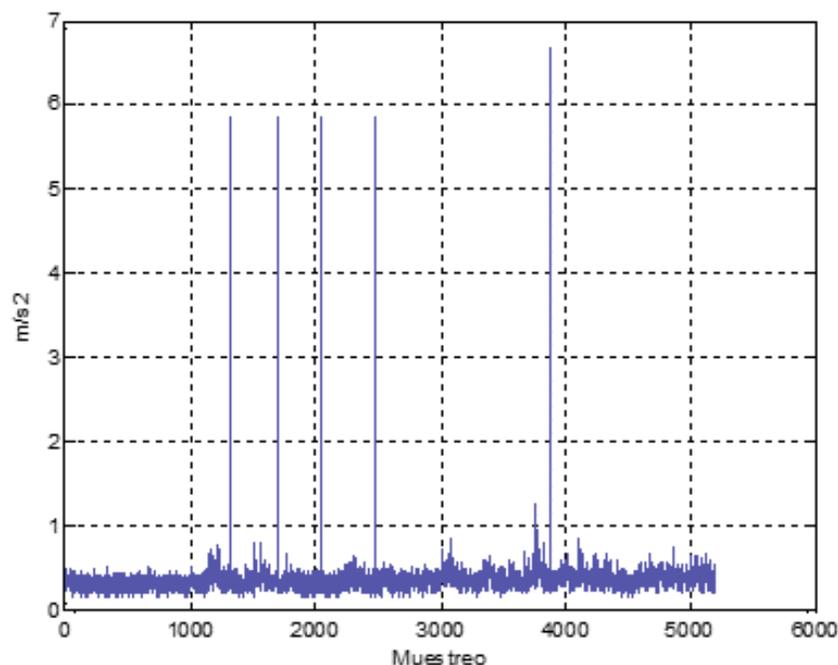


Figura 4.33. Gráfico de vibración en amplitud.

Una vez obtenidos los picos de amplitud y los momentos en que ocurrieron esos fenómenos, se trató la señal de vibración y se realizó el espectro de frecuencia para esta. La figura 4.34 representa al espectro de frecuencia de la señal anterior.

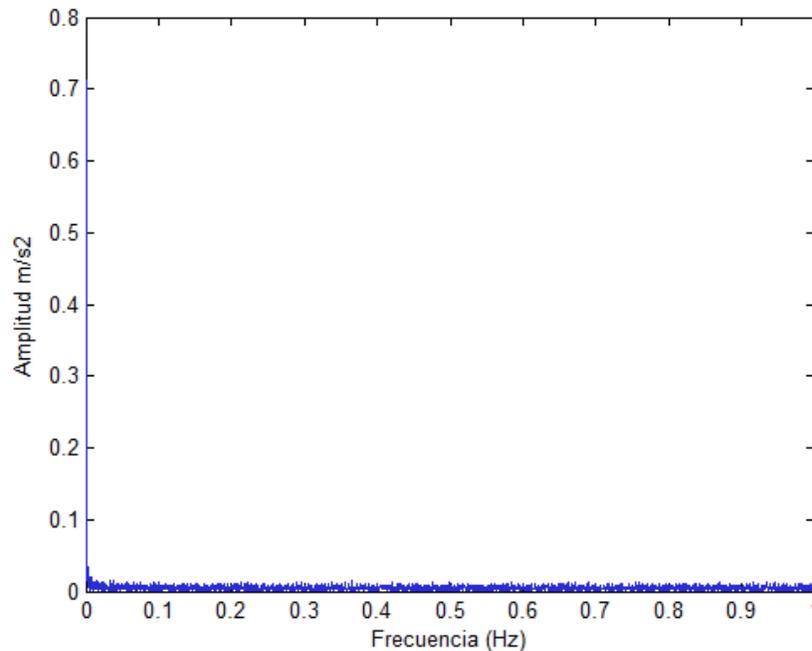


Figura 4.34. *Espectro de frecuencia de la señal de vibración.*

Con el espectro de frecuencia, es posible localizar los componentes en frecuencia y en amplitud para los cuales la estructura del seguidor trabaja inadecuadamente. El espectro de frecuencia proporciona información importante acerca de los motores, el sistema de engranaje y la cremallera con respecto a la frecuencia en que estos elementos se van desempeñando en el transcurso del experimento.

Debido a que en el experimento se realizó a un muestreo de 2 Hz que corresponde a la misma frecuencia con la que el sistema de control se encuentra operando, no se obtuvo un rango de frecuencias alto. Se decidió trabajar con la misma frecuencia en los sistemas de vibración y viento, con el fin de realizar el análisis correspondiente obteniendo el mismo número de datos en todos los sistemas. Si existiera algún

comportamiento inadecuado en la estructura del helióstato, este no se puede observar debido a que el rango máximo del espectro es de 1 Hz. Para localizar las frecuencias a las que el seguidor se encuentra comprometido, es necesario aumentar la velocidad de muestreo, con lo cual se amplía el rango en el gráfico. Es importante mencionar que no se pudo obtener un espectro de frecuencias adecuado, sin embargo se dan los resultados obtenidos porque son parte de la metodología y se deben mejorar con un tiempo de muestreo más alto en un trabajo futuro.

La siguiente fase fue conocer el comportamiento que tuvo la estación de viento en el transcurso del experimento.

El factor de viento es uno de los más importantes dentro de la PSH debido a la localización del campo, que es en las afueras de la ciudad; no existe edificios ni estructuras que desvíen el ciclo de este factor, por lo que se sospechó que es uno de los principales elementos que pueden alterar la puntería del haz de luz y, por consiguiente, cambiar la posición original de los seguidores solares, además de dañarlo por las grandes ráfagas que se llegan a presenciar dentro del campo. El gráfico siguiente (figura 4.35) muestra el comportamiento del viento durante el experimento de una hora.

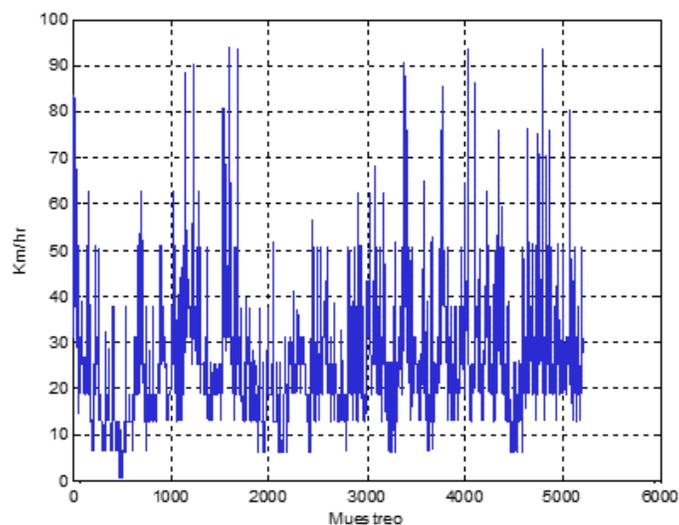


Figura 4.35. Gráfico de cargas de viento.

Con lo que respecta a las cargas que se presentaron durante el experimento, estas estuvieron entre los 6 y 90 km/h, con un promedio representativo del experimento de 23 km/h, donde se observó gran variación en los niveles a lo largo de la prueba. De esta gráfica se pudo obtener el espectro de frecuencia del viento y, con esto, observar los componentes en frecuencia y amplitud a los que el viento se trasladó a través del campo. De igual manera, la frecuencia de muestreo de los datos fue de 2 Hz, por lo que resultó una gráfica muy similar al espectro de vibración. Se necesita aumentar la velocidad de muestreo para visualizar un rango más amplio en la gráfica.

Una segunda evaluación se realizó con los datos obtenidos por la estación de viento, calculando el RMS o valor eficaz de un cierto rango de datos por medio de la ecuación (4.3). El valor eficaz representa un valor más significativo del viento en km/h que es proporcionado. Para la evaluación se seleccionó un rango de 520 datos, los cuales se dividieron en un total de 10 secciones. Los resultados de esta evaluación se muestran en la figura 4.36.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} |x(n)|^2} \quad (4.3)$$

donde:

V_{RMS} = es el valor eficaz de un rango de valores.

N = la cantidad de valores en el rango.

$X(n)$ = cada valor en el rango especificado.

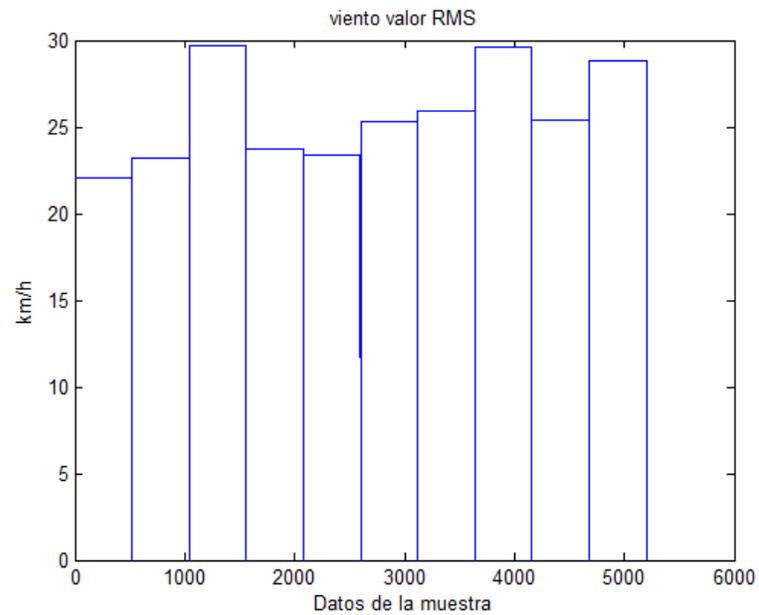


Figura 4.36. Valores RMS del viento.

Para verificar si el viento tiene alguna relación con la vibración de la estructura, se realizó una gráfica donde se muestran ambos factores para poder analizarse juntos (figura 4.37).

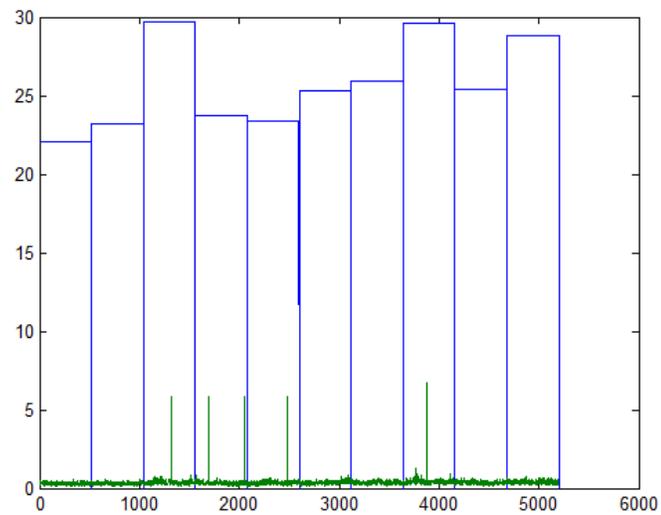


Figura 4.37. Gráfico de vibración y viento.

Como se muestra en la figura 4.37, la vibración y el viento en la estructura del seguidor, el comportamiento de ambas señales indicaron que efectivamente la estructura del helióstato se ve afectada por las cargas de viento, provocando en algunos casos altos niveles de vibración. De igual manera, la vibración puede verse influida por la constante estabilización del helióstato, causada por el sistema de control que no es lo bastante eficiente para compensar dichos errores en el posicionamiento de los seguidores.

Se debe resaltar que los encoders no muestran la información de la posición real del helióstato, ya que estos se encuentran instalados en la flecha del motor y no al final del sistema de engranaje; se realiza la compensación matemática del sistema de engranaje y la reducción del motor dentro del algoritmo de control, por lo que no existe ninguna retroalimentación que proporcione información real después de estos dos sistemas. Por lo anterior, no existe retroalimentación real del seguidor que indique que se encuentra efectivamente apuntando al blanco deseado en la torre, por lo que posteriormente afectaría al sistema de concentración ya que el rayo podría no estar bien localizado en su objetivo.

También se puede concluir que el sistema de control de la PSH no se encuentra trabajando de manera adecuada en sus operaciones, lo que significa que este opera de una manera fuera de los tiempos en que fue programado, basado en que no se obtuvo la cantidad de datos esperados en el experimento y que resultó en una adecuación de dichos datos con los de viento y vibración.

Los límites de velocidad máxima de viento dentro del campo de helióstatos son de 60 km/h, en comparación con los mostrados por el experimento que fueron aproximadamente de 23 km/h, indicando una velocidad aceptable para realizar experimentos. De igual manera, se presenciaron cargas que hicieron vibrar la estructura como lo muestra la figura 4.36. Gracias al IAE o integral absoluta del error como índice de desempeño, es posible diseñar nuevos y mejores sistemas de control que reemplacen al existente por uno que opere en tiempo real y que reduzca el error de control.

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Las pruebas dentro de la Plataforma Solar de Hermosillo se realizaron con el fin de conocer el desempeño de sus helióstatos para futuras mejoras, ya sea en su estructura, electrónica, hardware o software. Para los experimentos se tomaron en cuenta los factores externos de perturbación, los cuales de alguna u otra manera podrían afectar en el cumplimiento de las operaciones del seguidor. De acuerdo a la literatura mostrada en el documento y a opiniones de expertos dentro de la PSH, se delimitaron los más importantes factores para la evaluación de helióstatos, que fueron: la temperatura ambiente a la que se encuentran expuestos los controladores, capaces de alcanzar los 65° centígrados al intemperie; el error del sistema de control a partir de la variable de control y la lectura tomada, donde fue necesario introducirse al software de la PSH que realiza las operaciones del sistema; el viento como factor incontrolable que es capaz de alterar el posicionamiento de helióstato debido a la carga que tiene que soportar este al momento de realizar sus operaciones de control, donde sus límites no deben sobrepasar los 60 km/h.

En la prueba térmica se aisló el factor de temperatura debido a que los expertos mencionan que podría ser uno de los más importantes, por lo que se evaluó este factor individualmente. El experimento consistió en colocar un dispositivo (plataforma Arduino) dentro de un recipiente térmico que simulara las características del campo y que fuese capaz de realizar las operaciones importantes que se requirieran para el control de los helióstatos. El experimento revela que Arduino soportó hasta los 80 °C sin presentar anomalía alguna en sus cuatro evaluaciones. No fue posible realizar el mismo procedimiento al sistema cRIO por cuestiones operativas del campo, es por eso que se decidió hacer la prueba térmica en la plataforma Arduino.

En la prueba del error del sistema de control se localizaron las variables de interés del sistema (variable de control y lectura del sensor) y se implementaron acciones para obtener estos datos de las variables y hacer el análisis de la información

recabada. Para conocer la vibración de la estructura fue necesario diseñar un sistema que calculara la frecuencia y la amplitud de esta, por lo que se eligió a Arduino para el trabajo. Para el factor de viento se diseñó un sistema capaz de tomar lecturas de las cargas de viento a las que estaban sometidos los seguidores; dicho sistema consta de Arduino, el sensor de viento, y una PC, para el almacenamiento de los datos tomados por el sensor. Se implementaron acciones en el código del controlador para extraer las posiciones de control y las posiciones reales del helióstato. El experimento duró una hora exactamente, donde los resultados obtenidos fueron los siguientes:

El sistema de la PSH o SCADA no se encuentra trabajando de manera correcta en sus operaciones, por lo que la cantidad de datos obtenidos del error no concuerda con lo especificado en su programación; por lo anterior, se tuvo que hacer una adecuación a los datos para que estos fueran analizados.

El sistema de vibración y viento trabajaron correctamente durante el experimento y se obtuvo la cantidad de datos esperada, otorgando otro punto a favor de Arduino.

Con base en los datos analizados por el experimento, el error del sistema de control, en ambos casos (acimut y elevación), va en incremento con el transcurso del tiempo, donde al final de la prueba se observó un error de 0.03° en acimut y 0.005° en elevación, mientras que la tolerancia del sistema es de 0.001° para ambos casos. Igualmente, se presentan los índices del error absoluto, que fueron 0.00251 en acimut y 0.00322 en elevación, los cuales son una base para evaluar futuros controladores que se deseen implementar.

Se concluye que la influencia del viento en relación al error del sistema de control es poca, por lo que no hay un valor de posición en sistema de helióstatos que demuestre que hubo influencia. Por lo anterior, se cree que el error se ve más influido por el mismo sistema de control debido a que no trabaja de manera adecuada, afectando directamente los cálculos de las posiciones. La vibración en la estructura de seguidor se ve influida por las cargas de viento debido a que se

presenciaron ráfagas importantes en el transcurso de la prueba y estas concuerdan con algunas vibraciones generadas. Se puede realizar más experimentos con distintos niveles de viento para obtener más información entre estos dos factores.

Como trabajo futuro, se planea hacer pruebas con ráfagas de viento mayores a los ideales y extender el tiempo del experimento, con el fin de asegurar si el factor de viento tiene alguna influencia significativa en el error de control. Igualmente, se deben implementar un mayor número de sensores en la estructura para caracterizar mejor la vibración en todo el mecanismo y con esto tener más y mejor información para ser evaluada. También se debe incrementar el número de anemómetros y ser posicionados a varios niveles de altura y distancia del helióstato, con el fin de tener una mejor lectura de las cargas de viento alrededor del seguidor.

Se recomienda mejorar el sistema SCADA de la PSH e implementar algún tipo de retroalimentación para conocer la posición real del seguidor y así tener mejores evaluaciones, además de concluir si el sistema de control tiene correlación con viento y vibración.

Igualmente se recomienda realizar más trabajos con la plataforma de desarrollo Arduino, ya que mostró grandes ventajas en base a las pruebas realizadas en este trabajo. Este sistema podría sustituir una o varias operaciones del actual cRIO, ya que demostró ser un sistema síncrono, robusto y confiable. Existen varios dispositivos que trabajan muy bien con Arduino como lo son las interfaces *shields* utilizadas en este documento, por ello se recomienda adentrarse más en el tema de ser adaptados a los helióstatos.

6. REFERENCIAS

ABENGOA, 2013. *Abengoa and BrightSource Energy partner to build the world's two largest solar power towers*. [online] Available at: <http://www.abengoasolar.com/web/en/acerca_de_nosotros/sala_de_prensa/noticias/2013/solar_20130315.html>.

Aharon, O., 2013. Profiling solar energy in concentrated solar power systems. *Laser Focus World*, 49(2), pp.49–51.

Ahram, T.Z., Karwowski, W., Jacobs, K. and Soares, M.M., 2012. Embedded systems engineering for products and services design. *Work*, 41, pp.941–948.

Almog, D. and Heart, T., 2009. What Is a Test Case ? Revisiting the Software Test Case Concept. pp.13–31.

Álvarez, M.R., 2001. Energía solar termoeléctrica. pp.1–22.

Anderson, J.A. and Polkinghome, M.N., 2000. APPLICATION OF HALT AND HASS. (435), pp.2–4.

Arrieta, O., Vilanova, R., Rica, U.D.C., Jos, S., Rica, C. and Arrieta, O., 2011. Simple PID tuning rules with guaranteed M s robustness achievement. pp.12042–12047.

Azofra, D., Martínez, E., Jiménez, E., Blanco, J. and Saenz-Díez, J.C., 2014. Comparison of the influence of biomass, solar–thermal and small hydraulic power on the Spanish electricity prices by means of artificial intelligence techniques. *Applied Energy*, 121(0), pp.28–37.

Barnard, A., 2012. *Ten things you should know about HALT & HASS*. *Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2012 Proceedings - Annual*, .

Bell, J., Martínez Álvarez, R., Rodríguez Yunta, M.J. and Sánchez Martín, L., 2007. *Química : un proyecto de la American Chemical Society*. Barcelona: Reverté.

Bonanos, A.M., 2012. Error analysis for concentrated solar collectors. *Journal of Renewable & Sustainable Energy*, 4(6), p.63125.

Bose, B.K., 2010. Energy, Environmental Pollution, and the Impact of Power Electronics. (March), pp.6–17.

Camacho, E.F., Berenguel, M. and Gallego, A.J., 2014. Control of thermal solar energy plants. *Journal of Process Control*, 24(2), pp.332–340.

Cancino-Solórzano, Y. and Xiberta-Bernat, J., 2009. Statistical analysis of wind power in the region of Veracruz (Mexico). *Renewable Energy*, 34(6), pp.1628–1634.

Carrasco, J.M., Franquelo, L.G., Bialasiewicz, J.T., Galvan, E., Guisado, R.C.P., Prats, M.A.M., Leon, J.I. and Moreno-Alfonso, N., 2006. *Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey*. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, .

Chong, K.-K. and Tan, M.H., 2012. Comparison Study of Two Different Sun-Tracking Methods in Optical Efficiency of Heliostat Field. *International Journal of Photoenergy*, pp.1–10.

Cornejo, C.I., 2013. *Automatización de sistema de control para campo de helióstatos*. Instituto Tecnológico de Chihuahua, p.108.

Fernandez, J., Mounier, L. and Pachon, C., 2005. A Model-Based Approach for Robustness Testing. In: *Testing of Communicating Systems*. pp.333–348.

Fu, X., Wang, X. and Puster, E., 2011. Simultaneous thermal and timeliness guarantees in distributed real-time embedded systems. *Journal of Systems Architecture*, 57(6), pp.584–596.

Gong, B., Wang, Z., Li, Z., Zang, C. and Wu, Z., 2013. Fluctuating wind pressure characteristics of heliostats. *Renewable Energy*, 50(0), pp.307–316.

GONZÁLEZ, W.G., 2011. *ANÁLISIS CAUSA RAÍZ MEDIANTE VIBRACIONES A COMPRESOR AERZEN DE TORNILLO*. universidad veracruzana, p.102.

Griffith, D.T., Ho, C., Hunter, P., Sment, J., Moya, A. and Menicucci, A., 2012. Modal Analysis of a Heliostat for Concentrating Solar Power. In: R. Allemang, J. De Clerck, C. Niezrecki and J.R. Blough, eds., *Topics in Modal Analysis I, Volume 5 SE - 39*, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer New York, pp.415–423.

Guo, M., Wang, Z. and Sun, F., 2013. Simulations of reflected sun beam traces over a target plane for an azimuth–elevation tracking heliostat with fixed geometric error sources. *Solar Energy*, 97(0), pp.102–111.

Hennecke, K., Schwarzbözl, P., Koll, G., Beuter, M., Hoffschmidt, B., Götsche, J. and Hartz, T., 2009. The Solar Power Tower Jülich — A Solar Thermal Power Plant for Test and Demonstration of Air Receiver Technology. In: *Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I – Vol. V)*. pp.1749–1753.

- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. and Baptista Lucio, P., 2006. *Metodología de la investigación*. México: : McGraw Hill, p.656.
- Herrador, R.E., 2009. *Guía de Usuario de Arduino*. Available at: <http://www.uco.es/aulasoftwarelibre/wp-content/uploads/2010/05/Arduino_user_manual_es.pdf>.
- Howlader, A.M., Urasaki, N., Yona, A., Senjyu, T. and Saber, A.Y., 2013. Design and Implement a Digital H^∞ Robust Controller for a MW-Class PMSG-Based Grid-Interactive Wind Energy Conversion System. *Energies (19961073)*, 6(4), pp.2084–2109.
- Kanters, J., Wall, M. and Dubois, M.-C., 2014. Typical Values for Active Solar Energy in Urban Planning. *Energy Procedia*, 48(0), pp.1607–1616.
- Kogan, K., 2009. Production control under uncertainty: Closed-loop versus open-loop approach. *IIE Transactions*, 41(10), pp.905–915.
- Lanzi, E., Verdolini, E. and Haščič, I., 2011. Efficiency-improving fossil fuel technologies for electricity generation: Data selection and trends. *Energy Policy*, 39(11), pp.7000–7014.
- Lee, C.-Y., Chou, P.-C., Chiang, C.-M. and Lin, C.-F., 2009. Sun Tracking Systems: A Review. *Sensors (14248220)*, 9(5), pp.3875–3890.
- Liserre, M., Sauter, T. and Hung, J.Y., 2010. *Future Energy Systems: Integrating Renewable Energy Sources into the Smart Power Grid Through Industrial Electronics*. *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, .
- Lochau, M. and Goltz, U., 2010. Feature Interaction Aware Test Case Generation for Embedded Control Systems. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 264(3), pp.37–52.
- Makki, A., Omer, S. and Sabir, H., 2015. Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41(0), pp.658–684.
- Marwedel, P., 2011. Introduction. In: *Embedded System Design SE - 1*, Embedded Systems. Springer Netherlands, pp.1–19.
- Moroto Solórzano, R., 2007. *Ecuaciones para la sintonización de controladores PID con acción derivativa aplicada a la señal realimentada*. p.90.

- Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, K. and Sharifi, A., 2009. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 13(8), pp.1800–1818.
- Nordelch, 2014. *Anemómetro*. [online] wikipedia. Available at: <<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anemometer.jpg>>.
- Pavlović, T.M., Radonjić, I.S., Milosavljević, D.D., Pantić, L.S. and Piršl, D.S., 2012. ASSESSMENT AND POTENTIAL USE OF CONCENTRATING SOLAR POWER PLANTS IN SERBIA AND REPUBLIC OF SRPSKA. *Thermal Science*, 16(3), pp.931–945.
- Porter, A., 2004. Chapter 9 - Highly Accelerated Life Testing (HALT). In: A.B.T.-A.T. and V. Porter, ed. Burlington: Newnes, pp.123–138.
- Rairán-antolines, J.D. and Fonseca-gómez, J.M., 2011. Doble lazo de control para regular la posición y la velocidad en un motor de. 15, pp.337–357.
- Rášo, P., n.d. PRINCIPLES AND AN EXAMPLE OF HIGHLY ACCELERATED LIFE TEST. (2).
- Roos, T.H., 2012. A WIND LOADING CORRELATION FOR AN ISOLATED SQUARE HELIOSTAT , PART 1 : LIFT AND DRAG FORCES. pp.1–8.
- Ruiz, V.M.A., 2003. SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PI Y PID INTEGRALES IAE E ITAE. 13, pp.31–39.
- Shinners, S.M., 1992. *Modern Control System Theory and Design*. New York: J. Wiley, p.723.
- Sment, J. and Ho, C.K., 2014. Wind Patterns over a Heliostat Field. *Energy Procedia*, 49(0), pp.229–238.
- Sulaiman, D.R., 2011. Microprocessors thermal challenges for portable and embedded systems using thermal throttling technique. *Procedia Computer Science*, 3(0), pp.1023–1032.
- Summit, T. test, 2005. *Implement Highly-Accelerated Stress Screaming (HALT-HASS)*. pp.100–114.
- Sun, H., Gong, B. and Yao, Q., 2014. A review of wind loads on heliostats and trough collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32(0), pp.206–221.

- Sun, X., Ye, H. and Fei, S., 2013. A closed-loop detection and open-loop control strategy for booms of truck-mounted concrete pump. *Automation in Construction*, 31(0), pp.265–273.
- Terrés-Nícoli, J.M., Mans, C. and King, J.P.C., 2014. Dynamic Effects of a Heliostat to Wind Loading. *Energy Procedia*, 49(0), pp.1728–1736.
- TERRESOL, 2015. *Gemasolar will host the most innovative fashion catwalk*. [online] Available at: <http://www.torresolenergy.com/TORRESOL/nota_prensa_detalle.html?id=cw559f868c66daf>.
- Tudorache, T. and Kreindler, L., 2010. Design of a Solar Tracker System for PV Power Plants. 7(1), pp.23–39.
- Tuite, D., 2010. SOLAR ENERGY GOES BEYOND PHOTOVOLTAICS. *Electronic Design*, 58(3), pp.36–41.
- University, C.S. and Institute, S.E.R., n.d. Heliostat Wind Tunnel Experiments. [online] pp.1–26. Available at: <https://www.google.org/pdfs/google_heliostat_wind_tunnel.pdf>.
- Vagia, M. and Tzes, A., 2013. Design of a robust controller and modeling aspects of a micro cantilever beam with fringing and squeezed gas film damping effects. *Mechatronics*, 23(1), pp.67–79.
- Van, M., Kang, H.-J. and Suh, Y.-S., 2013. Second Order Sliding Mode-Based Output Feedback Tracking Control for Uncertain Robot Manipulators. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10, p.1.
- Verle, M., 2009. *Pic microcontrollers : programmin in c*. [S.I.]: Mikroelektronika.
- Vives, A., 2010. *Sistemas de Control Tecnología Industrial II*. [online] Slideshare. Available at: <<http://es.slideshare.net/tonivi99/sistemas-de-control>>.
- Wang, M.-H., Chung, Y.-K. and Sung, W.-T., 2011. Using thermal image matter-element to design a circuit board fault diagnosis system. *Expert Systems with Applications*, 38(5), pp.6164–6169.
- Wang, W., Loman, J. and Vassiliou, P., 2004. *Reliability importance of components in a complex system. Reliability and Maintainability, 2004 Annual Symposium - RAMS*, .
- Wang, Z. and Wu, Z., 2006. WIND DYNAMICS TESTING ON DAHAN HELIOSTAT.

Wenge, L., Deyuan, L., Siyuan, C., Shaoming, L., Xiangwei, Z. and Linhai, Z., 2010. *Research on PID Control Parameters Tuning Based on Election-Survey Optimization Algorithm. Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE), 2010 International Conference on*, .

Zang, C., Gong, B. and Wang, Z., 2014. Experimental and theoretical study of wind loads and mechanical performance analysis of heliostats. *Solar Energy*, 105(0), pp.48–57.

Zang, C., Wang, Z., Liu, X., Zhang, X. and Wang, Y., 2009. Design and Analysis of Heliostat Support Structure. In: D.Y. Goswami and Y. Zhao, eds., *Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I – Vol. V) SE - 389*. Springer Berlin Heidelberg, pp.1909–1913.

Zang, C.C., Christian, J.M., Yuan, J.K., Sment, J., Moya, A.C., Ho, C.K. and Wang, Z.F., 2014. Numerical Simulation of Wind Loads and Wind Induced Dynamic Response of Heliostats. *Energy Procedia*, 49, pp.1582–1591.