

**INSTRUMENTACIÓN Y SISTEMA ENERGÉTICO PARA UN SECADOR DE
CAFÉ**



DANIVER TORRES RIASCOS

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
MAYO DE 2017**

**INSTRUMENTACIÓN Y SISTEMA ENERGÉTICO PARA UN SECADOR DE
CAFÉ**



DANIVER TORRES RIASCOS

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero en Electrónica

Director

Mg. Julio Andrés Mosquera Bolaños

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
MAYO DE 2017**

Nota de aceptación:

Director:

Mg. Julio Andrés Mosquera Bolaños

Jurado:

Jurado:

Popayán, 11 de Mayo de 2017.

DEDICATORIA

A mi señor padre que fue esa persona que todos los días me impulsó y motivó para culminar mi carrera.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por mantenerme en pie en cada momento y por darme esa fe para la culminación de este proyecto.

A Julio Mosquera por gran su apoyo como director de este proyecto.

A mi esposa e hija, que son el gran motor de mi vida y de mi carrera.

A mis padres y hermanos, que mediante sus logros me motivaron para conseguir los míos.

A los jurados de este proyecto, que con sus observaciones ayudaron a realizar un buen trabajo de grado.

A la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca por brindarme sus espacios para realizarme profesionalmente.

CONTENIDO

	Pág.
Lista de Tablas	8
Lista de Figuras	9
Lista de Fotografías	11
Lista de Anexos	12
Lista de Abreviaturas	13
INTRODUCCIÓN	16
1. PROBLEMA	18
1.1. Planteamiento del problema	18
1.2. Justificación	19
1.3. Objetivos	19
1.3.1. Objetivo general	19
1.3.2. Objetivos específicos	19
1.4. Alcance	19
2. MARCO CONCEPTUAL	21
2.1. Marco teórico	21
2.1.1. Café cereza	21
2.1.2. ECOSECADOR	22
2.1.3. Silo	22
2.1.4. Temperatura	22
2.1.5. Humedad relativa	23
2.1.6. Sistema energético renovable	24
2.1.7. Seguidor solar	26
2.1.8. Diseño asistido por computadora (CAD)	27
2.2. Estado del arte	28
2.2.1. Medición de temperatura de secado	28
2.2.2. Medición de humedad relativa	29
2.2.3. Sistema energético renovable	30

2.2.4. Seguidor solar.....	30
3. INSTRUMENTACIÓN PARA LA TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA.	34
3.1. Microcontrolador Arduino uno	34
3.2. Prototipo secador de café	35
3.3. Sensores	37
3.3.1. Sensor de temperatura DS18B20 WATERPROOF tipo sonda.....	37
3.3.2. Celdas de carga.....	38
3.4. Pruebas en el prototipo secador de café.....	43
3.4.1. Simulación del sensor DS18B20 WATERPROOF tipo sonda	43
3.4.2. Simulación de la celda de carga S YZC-516	47
4. SISTEMA ENERGÉTICO RENOVABLE CON DISEÑO DEL SEGUIDOR SOLAR COMO MECANISMO DE OPTIMIZACIÓN.	52
4.1. Sistema energético renovable con base en paneles solares	52
4.1.1. Diagrama de bloques.....	53
4.1.2. Elementos bloques	54
4.1.3. Ensamble por elementos	60
4.1.4. Plano por elemento.....	66
4.1.5. Wiring	71
4.1.6. Troubleshooting	72
4.1.7. Validación del sistema energético renovable.....	76
4.2. Diseño en SolidWorks del seguidor solar para el arreglo de paneles	84
4.2.1. Metodología de diseño del seguidor solar de 1 eje, software CAD SolidWorks 2014.....	85
4.2.2. Validación del modelo por elementos finitos: análisis estructural	97
4.2.3. Aproximación del seguidor solar de 1 eje	103
5. CONCLUSIONES.....	106
BIBLIOGRAFÍA.....	107
ANEXOS.....	112

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: alcance del proyecto.....	20
Tabla 2: tipos de sensores de temperatura.....	23
Tabla 3: tipos de sensores de humedad relativa.....	24
Tabla 4: componentes sistema energético renovable.....	26
Tabla 5: tipos de seguidor solar.....	27
Tabla 6: herramientas CAD más utilizadas.....	28
Tabla 7: aportes del estado del arte.....	33
Tabla 8: criterios de selección del sensor de temperatura.....	37
Tabla 9: tipos de celdas de carga.....	41
Tabla 10: características del S YZC-516.....	43
Tabla 11: especificaciones del sensor de temperatura.....	44
Tabla 12: relación de datos de temperatura.....	44
Tabla 13: especificaciones del transmisor HX711.....	48
Tabla 14: conexiones para la simulación de la celda de carga.....	49
Tabla 15: mapeo de los elementos bloque.....	59
Tabla 16: lista de elementos y/o dispositivos necesarios para el ensamble del sistema energético renovable.....	61
Tabla 17: promedio de radiación solar en Popayán.....	68
Tabla 18: descripción del cableado.....	72
Tabla 19: indicadores leds.....	73
Tabla 20: funciones de los botones.....	73
Tabla 21: fallas y soluciones del equipo multifuncional.....	75
Tabla 22: horas de carga estimadas para la batería.....	79
Tabla 23: mediciones en el panel solar y la carga.....	82
Tabla 24: medición de valores en condiciones normales de trabajo.....	84
Tabla 25: materiales y medidas del panel solar.....	86
Tabla 26: dimensiones en milímetros para el soporte.....	88
Tabla 27: especificaciones mínimas del actuador.....	95
Tabla 28: tensión de von Mises (1).....	99
Tabla 29: factor de seguridad de Von Mises.....	100
Tabla 30: tensión de Von Mises en el soporte para el panel solar.....	101
Tabla 31: factor de seguridad de Von Mises.....	103

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: esquema básico de un sistema energético renovable.....	25
Figura 2: seguidor solar.....	26
Figura 3: generación de energía eléctrica con y sin seguidor solar.....	32
Figura 4: instrumentación del prototipo secador de café.....	34
Figura 5: secador de una sola capa con inversión de aire.	35
Figura 6: cuatro resistencias haciendo un <i>Puente de Wheatstone</i>	39
Figura 7: cuatro resistencias haciendo un <i>Puente de Wheatstone</i>	40
Figura 8: diagrama de conexiones para la simulación en arduino uno.....	45
Figura 9: código en arduino para el sensor.	46
Figura 10: lectura de la temperatura en el monitor virtual de arduino.	47
Figura 11: diagrama de conexión de la celda de carga.	49
Figura 12: código para la calibración del sensor.	50
Figura 13: código de simulación para la celda de carga.	51
Figura 14: módulos que componen el estudio, diseño y verificación de funcionamiento del sistema energético renovable.....	52
Figura 15: diagrama bloques del sistema energético renovable.	53
Figura 16: elementos bloque panel solar fotovoltaico.	55
Figura 17: elementos bloque controlador de carga.	56
Figura 18: elementos bloque banco de baterías.	56
Figura 19: elementos bloque inversor DC/AC.	57
Figura 20: Estructura para paneles solares.....	60
Figura 21: esquema de conexión de los paneles.	63
Figura 22: herramienta de la NASA para calcular la irradiación solar en una zona específica.	68
Figura 23: irradiación media mensual en Popayán.	69
Figura 24: diagrama de conexión sistema energético.	71
Figura 25: grafica de horas estimado durante cinco días.....	80
Figura 26: demostración de la proporcionalidad entre la potencia generada y la potencia de salida sin batería.....	82
Figura 27: panel de 300W modelado.	87
Figura 28: sensor fotoeléctrico.	87
Figura 29: caja de conexiones del panel solar.	87
Figura 30: soporte para panel solar.....	88
Figura 31: bridas de sujeción.	89
Figura 32: base giratoria.	89
Figura 33: sujeción de largueros.	90

Figura 34: bridas para bascular.....	91
Figura 35: conjunto columna seguidor solar.....	92
Figura 36: soporte para la caja de control.....	93
Figura 37: apoyo para el actuador lineal.....	93
Figura 38: sistema de anclaje a tierra.....	94
Figura 39: actuador electromecánico.....	95
Figura 40: bridas de apoyo para el actuador.....	96
Figura 41: caja de control.....	97
Figura 42: fuerzas a las que está sometida la columna (1).....	98
Figura 43: fuerzas a las que está sometida la columna (2).....	99
Figura 44: factor de seguridad de Von Mises.....	100
Figura 45: esfuerzo de fluencia acero estructural.....	101
Figura 46: desplazamiento en el eje Y del soporte para el panel solar.....	102
Figura 47: factor de seguridad de Von Mises del soporte para el panel.....	102
Figura 48: detalle anclaje al piso.....	103
Figura 49: detalle caja de control.....	104
Figura 50: modelo final (1).....	104
Figura 51: modelo final (2).....	105

Lista de Fotografías

	Pág.
Fotografía 1: árbol de cafeto.	21
Fotografía 2: placa arduino uno.....	35
Fotografía 3: prototipo secador de café.....	37
Fotografía 4: sensor digital DS18B20.....	38
Fotografía 5: celda de carga.....	43
Fotografía 6: transmisor HX711.	48
Fotografía 7: características técnicas del panel solar.....	62
Fotografía 8: conexión real de las baterías.	64
Fotografía 9: equipo multifuncional.	64
Fotografía 10: Conexión del arreglo de paneles al equipo multifuncional.	65
Fotografía 11: conexión del banco de baterías al equipo multifuncional.	65
Fotografía 12: así queda la conexión al equipo multifuncional.	66
Fotografía 13: sistema energético renovable a escala.	77
Fotografía 14: conexión entre panel solar y batería.	79
Fotografía 15: conexión entre la batería y la carga.	80
Fotografía 16: conexión entre panel solar, inversor y la carga.	81
Fotografía 17: sistema energético en condiciones normales de trabajo.....	83
Fotografía 18: panel real.	86

Lista de Anexos

ANEXO 1: proceso de arme y desarme del seguidor.....	112
ANEXO 2: planos del seguidor solar.....	119

Lista de Abreviaturas

P_M	Potencia del motor.
P_{V1}	Potencia del ventilador 1.
P_{V2}	Potencia del ventilador 2.
P_{E1}	Potencia del extractor 1.
P_{E2}	Potencia del extractor 2.
P_A	Potencia del arduino.
D_E	Demanda energética.
I_S	Irradiación solar.
F_P	Factor de pérdidas.
P_P	Potencia de los paneles solares.
N_P	Numero de paneles solares.
A_S	Autonomía sin brillo solar.
E_b	Eficiencia de las baterías.
D_{max}	Descarga máxima.
V_S	Voltaje de trabajo del sistema.
P_b	Potencia de las baterías.
C_b	Capacidad de las baterías.

Resumen

La “INSTRUMENTACIÓN Y SISTEMA ENERGÉTICO PARA UN SECADOR DE CAFÉ” es desarrollado en la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca como parte de un proyecto macro implementado por el Grupo de Investigación en Tecnología y Ambiente GITA, llamado ECOSECADOR, el cual pretende ser una solución eficaz para el secado uniforme de café para pequeños y medianos caficultores en el departamento del Cauca.

Por lo tanto este proyecto consiste en desarrollar e implementar una instrumentación para el proyecto macro ECOSECADOR que permita la lectura de temperatura y humedad relativa, considerando que la variable física de temperatura no debe sobrepasar el límite máximo permitido para mantener los aceites esenciales del grano de café, por ello la necesidad de realizar un seguimiento constante de temperatura y humedad relativa, la cual debe estar entre el 10 y 12% valores que determinan su calidad en el mercado.

Un factor determinante del ECOSECADOR es la implementación de energías renovables, hecho que requirió el diseño de un sistema energético capaz de suplir las necesidades de corriente y voltaje del silo¹ con una propuesta para la implementación de un seguidor solar portátil como mecanismo de optimización (armable y desarmable) diseñado y con sus respectivos planos en SolidWorks.

Palabras claves: temperatura de secado, humedad relativa máxima, sistema energético, seguidor solar.

¹ Silo: Construcción diseñada en forma de habitación para el proceso de secado de café.

Abstract

The "INSTRUMENTATION AND ENERGY SYSTEM FOR DRYER COFFEE" is developed at the University Corporation Autonomy del Cauca as part of a macro project implemented by the Research Group on Technology and Environment GITA, called ECOSECADOR, which pretends to be an effective solution for the uniform drying of coffee for small and medium coffee growers in the department of Cauca.

Therefore this project consists of developing and implementing an instrumentation for the ECOSECADOR macro project that allows the reading of temperature and relative humidity, considering that the physical temperature variable should not exceed the maximum limit allowed to maintain the essential oils of the coffee bean, therefore the need for constant monitoring of temperature and relative humidity, which must be between 10 and 12% values that determine its quality in the market.

A key determinant of ECOSECADOR is the implementation of renewable energies, which required the design of an energy system capable of supplying the current and voltage needs of the silo² with a proposal for the implementation of a portable solar tracker as an optimization mechanism (buildable and detachable) designed and with their respective planes in SolidWorks.

Key words: drying temperature, maximum relative humidity, energy system, solar tracker.

² Silo: Construction designed as a room for the coffee drying process.

INTRODUCCIÓN.

Colombia se ha convertido en un país líder en la producción de café de buena calidad, siendo reconocido internacionalmente por su sabor, olor, acidez y aroma, convirtiéndolo en uno de los productos más demandados del país [1]. En la actividad cafetera están involucradas cerca de 600.000 familias que cultivan y procesan el grano de café [2], en el proceso de secado no tienen en cuenta variables que afectan la calidad final del grano como lo son la temperatura a la que exponen el café para secar y su humedad relativa al final del proceso, es por ello que mantenerse en la industria demanda de esfuerzos unificados que conlleven a conservar en cada proceso de secado la calidad del grano de café.

En el proceso de producción de café intervienen variables que determinan su propiedad, como lo son las condiciones climáticas, fertilizantes, plagas, despulpado, lavado y secado, de tal manera que este proyecto se centra en el proceso de secado, en donde una correcta implementación de un sistema de medida de temperatura y humedad relativa determinen su calidad final, ya que la temperatura de secado no debe sobrepasar los límites permitidos para conservar los aceites esenciales del grano de café, así mismo la humedad relativa debe estar entre el 10 y 12% [3], condición apta para la comercialización. La implementación se realiza en un silo como estructura de secado de café, el cual es alimentado por un sistema energético con base en paneles solares conectados de manera aislada a la red eléctrica. Lo anterior se debe al gran porcentaje de fincas productoras de café que no cuentan con fluido eléctrico, siendo el 44% del territorio colombiano y en especial la zona suroccidental que carece del servicio de energía eléctrica [4].

El desarrollo del proyecto se realiza con base a un proyecto macro aun en implementación llamado ECOSECADOR desarrollado por el Grupo de Investigación en Tecnología y Ambiente GITA de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, siendo la "INSTRUMENTACIÓN Y SISTEMA ENERGÉTICO RENOVABLE PARA UN SECADOR DE CAFÉ" parte fundamental para la obtención de un proceso de secado que mantenga la humedad relativa entre el 10 y 12%, condición favorable en donde es considerado un producto de buena calidad [3].

En el primer capítulo se realiza el planteamiento del problema junto con los objetivos y el alcance del trabajo y en el segundo capítulo se desarrolla la parte teórica y planteamientos de investigadores sobre el tema, los cuales aportan a la consecución del proyecto.

En el tercer capítulo se desarrolla el diseño de la instrumentación requerida con base a unos parámetros definidos, donde el sensor de temperatura está bajo

humedad relativa constante y es capaz de leer con gran robustez la temperatura dentro del silo, de igual manera las celdas de carga tipo “S” son las encargadas mediante el peso de determinar el porcentaje de humedad relativa en el que se encuentran los granos de café.

En el cuarto capítulo se presenta el sistema energético renovable con una propuesta de diseño de un seguidor solar para el arreglo de paneles que busca optimizar el tiempo de captación de radiación solar.

El propósito fue diseñar e implementar una instrumentación y sistema energético capaz de cumplir con los requerimientos de un prototipo desarrollado llamado ECOSECADOR.

1. PROBLEMA.

1.1. Planteamiento del problema

El proceso de producción de café tiene tres etapas: siembra, mantenimiento de la planta y cosecha, luego de la cosecha existen tres fases importantes para conseguir un café de buena calidad que son: despulpado, lavado y secado, siendo la más significativa el secado, que es en esta fase en donde el grano de café llega con una humedad relativa inicial aproximada del 53%, este producto del lavado, condición no apta para la venta por la reproducción de microorganismos que deterioran los granos de café llegando a dañar toda la cosecha [2]. Este porcentaje de humedad relativa debe disminuirse hasta que llegue a las condiciones recomendadas.

Aunque se han implementado mecanismos para realizar un secado que evite daños considerables en el grano, como el secado en silos rotativos, estos tienen una desventaja donde el secado lo realizan mediante la quema de la cascarilla del café, biomasa, gas o diésel, deteriorando la calidad del grano y aportando Gases Efecto Invernadero (GEI) durante su combustión [5], además en el suroccidente colombiano se sigue secando el café de forma tradicional esparciéndolo en una gran superficie abierta para que seque con la temperatura del sol y su inspección es de manera visual, es decir que en este proceso no se cuenta con una instrumentación que permita hacer una medición constante de variables ambientales presentes en el grano. Para ello se hace necesaria una instrumentación capaz de leer constantemente variables de temperatura y humedad relativa dentro del silo³. Con los datos obtenidos de la instrumentación se toman decisiones que influyen en mantener la calidad del grano en los estándares nacionales, que para Colombia debe estar en una humedad relativa entre el 10 y 12% [3]. El sistema secador de café será un producto de ingeniería innovador al trabajar con energía solar fotovoltaica con seguimiento del sol, permitiendo auto sostenibilidad energética del mismo y la portabilidad del sistema ya que permite ser instalado en zonas donde no hay acceso a la red eléctrica. Cabe recordar que el 44% del territorio colombiano carece del servicio de energía, siendo la costa occidental la región que cuenta con mayor número de comunidades sin electricidad [4].

En este sentido surge la siguiente pregunta de investigación.

¿Cómo evitar daños en el grano de café durante el proceso de secado en silos y como brindar portabilidad energética al sistema secador de café?

³ Silo: construcción diseñada en forma de habitación para el proceso de secado de café.

1.2. Justificación

La instrumentación y el sistema energético aportarán mejoras a la actividad cafetera de pequeños empresarios y familias campesinas caucanas, siendo la de mantener la calidad del grano del café entre el 10 y 12% de humedad relativa [3], por lo tanto llega a causar un impacto socioeconómico de gran relevancia debido a que la propuesta es apoyada por una entidad del sector productivo que trabaja muy de cerca con la comunidad cafetera del departamento, es decir, que ese apoyo puede verse reflejado en la implementación masiva de esta tecnología, siendo un prototipo innovador en la industria ya que así lo determina su portabilidad energética.

En cuanto a la academia, se espera obtener un reconocimiento para el Grupo de Investigación en Tecnología y Ambiente GITA, ganando experiencia y conocimiento en desarrollo de proyectos de alto impacto social, articulación con el sector empresarial y social y fortalecimientos del trabajo multidisciplinario. Además de incentivar a los estudiantes de ingeniería a seguir investigando sobre las energías renovables, componente trabajado en este proyecto.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Implementar un sistema de medida de temperatura y humedad relativa en un silo como estructura de secado de café alimentado con energía solar fotovoltaica.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar e implementar la instrumentación que permita la medida de las variables temperatura y humedad relativa.
- Implementar el sistema energético con seguimiento solar basado en energía fotovoltaica que alimente el prototipo de secador de café.
- Evaluar el sistema de medición y de alimentación de energía para un silo como estructura de secado de café.

1.4. Alcance

Es importante aclarar que este proyecto se realiza para y en función del proyecto macro ECOSECADOR el cual se encuentra en implementación, en donde el desarrollo de éste influye de manera directa sobre algunas tareas a desarrollarse en el proyecto INSTRUMENTACIÓN Y SISTEMA ENERGÉTICO PARA UN SECADOR DE CAFÉ, por tal motivo se proyecta el alcance en función del ECOSECADOR.

En la tabla 1 el alcance del proyecto.

REQUERIMIENTO	ALCANCE	OBSERVACIONES
INSTRUMENTACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Selección de los sensores idóneos que cumplan con los requerimientos del ECOSECADOR para la medición de temperatura y humedad relativa. • Simulación de los sensores. • Implementación y pruebas de los sensores en el prototipo. 	La implementación de la instrumentación se realiza en un modelo a escala.
SISTEMA ENERGÉTICO	<ul style="list-style-type: none"> • Determinar las necesidades de corriente y voltaje del ECOSECADOR. • Diseñar el sistema energético renovable para el ECOSECADOR. • Realizar un prototipo a escala del sistema energético. • Evaluar el sistema energético en el prototipo a escala. 	La implementación del sistema energético se realiza en un modelo a escala.
SEGUIDOR SOLAR	<ul style="list-style-type: none"> • Establecer el seguidor solar como mecanismo de optimización. • Diseñar el seguidor solar en una herramienta CAD para el arreglo de paneles. • Validación del seguidor solar. • Obtener los planos para una futura fabricación del seguidor solar. 	Se realiza un diseño de un seguidor solar como mecanismo de optimización para el sistema energético. Se cuenta con los respectivos planos para una futura construcción.

Tabla 1: alcance del proyecto.
Propia.

2. MARCO CONCEPTUAL.

Esta sección tiene como objetivo dar una fundamentación teórica de este proyecto dando soporte al estudio que se está realizando, de tal forma que en el *marco teórico* se precisen los conceptos o términos que se usan en el desarrollo del proyecto, mientras que en el *estado del arte* se presentan los principales planteamientos de investigadores sobre los temas principales de estudio que son la instrumentación y el sistema energético renovable.

2.1. Marco teórico

A continuación, se presentan teóricamente los componentes que hacen parte del proyecto, definiéndolos textualmente con el propósito de evitar distintas interpretaciones. Comprendiendo que la medición de temperatura se realizará por medio de sensores los cuales arrojarán valores de medida en grados, como de igual forma se realiza la medición de humedad relativa, con sensores, obteniendo a la salida valores distintos de voltaje los cuales se convierten para obtener un porcentaje de humedad relativa y por último el sistema energético renovable con seguimiento solar como mecanismo de optimización que proveerá la parte energética al sistema secador de café. También se presentan otros conceptos importantes que hacen parte del proyecto.

2.1.1. Café cereza

El café se define como la semilla seca de la planta del café sin importar que haya sido tostada o molida. El cafeto, el árbol del que proviene el grano, es originario de África, su nombre se deriva de la ciudad de Kaffa – Etiopia. En América, el café fue introducido durante el siglo XVIII, la planta se propagó por el caribe y el continente. Se introdujo inicialmente en Brasil, Jamaica y Santo Domingo, de donde el cultivo se extendió al resto de los actuales países productores de América [6].



Fotografía 1: árbol de cafeto.
Tomada de [6].

Este tipo de grano es cultivado en las diferentes regiones cafeteras colombianas, donde por su convergencia tropical, topografía cambiante, luminosidad, temperaturas y lluvias presentes en las diferentes temporadas del año le otorgan al café colombiano una distinción sobresaliente en todo el mundo por su sabor, olor, acidez y aroma [2].

2.1.2. ECOSECADOR

El sistema consta de un silo en forma de habitación de 3 metros de ancho x 3 metros de fondo con una altura de 2 metros, el cual es semi - hermético para mantener una temperatura adecuada que debe estar entre 45°C y 54°C que favorezca el secado [7], la parte superior es en plástico para generar el efecto invernadero y así elevar la temperatura de forma rápida dentro del silo, a un costado del silo y afuera de este se encuentra el seguidor solar con el arreglo de paneles solares que sirve para alimentar los sensores de temperatura, humedad relativa, el motor que arrastra el cilindro con café y el control de este. Los extractores, uno para expulsar el aire caliente y otro para que ingrese aire frío, ambos bajo la influencia de un control de temperatura para mantener condiciones óptimas. El sistema de arrastre hace girar el cilindro a una velocidad promedio de 6 a 8 revoluciones por minuto, favoreciendo el secado uniforme del grano. En el cilindro concéntrico se dispone de compartimientos para albergar una cantidad máxima de 300 Kg de café a secar.

2.1.3. Silo

Es una construcción en forma de habitación 3 metros de ancho x 3 metros de fondo con una altura de 2 metros, el cual es semi – hermético para mantener la temperatura, el silo contiene el cilindro concéntrico en donde se alberga el café, los sensores, motores, actuadores y ventiladores integrados de tal manera que esto conlleve a un secado de café uniforme.

2.1.4. Temperatura

La temperatura es una variable física la cual no debe sobrepasar el límite máximo de 55°C permitido para mantener los aceites esenciales del grano [3], por ello la necesidad de su medición.

El seguimiento frecuente de las variaciones de temperatura se realiza con la utilización de sistemas de control de la temperatura, estos están constituidos por cables que disponen de sensores de temperatura denominados termocuplas [8]. Entre los sensores más comunes empleados para medir temperatura con instrumentación electrónica se tienen: RTD's, termistores, sensores de circuito integrado y termocuplas-termopar; según *Ramón Pallas*, en la tabla 2 se aprecia los distintos tipos de sensores de temperatura *aclarando* sus ventajas y desventajas [9].

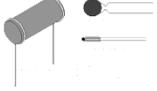
SENSOR	VENTAJA	DESVENTAJA	IMAGEN
<i>Detector de resistencia metálica RTD</i>	Uno de los más precisos, se caracteriza por su excelente estabilidad.	Inestable ante vibraciones o choques mecánicos.	
<i>Termistores</i>	Alto rendimiento, rápido.	No lineal, rango de temperaturas limitado.	
<i>Sensores de circuito integrado</i>	Presenta una salida lineal y proporcional a la temperatura.	Limitado rango de temperatura, necesidad de alimentación y el auto calentamiento.	
<i>Termocupla/ termopar</i>	Buena estabilidad a lo largo del tiempo, robusto, responde rápido a los cambios de temperatura.	El instrumento que lee su salida debe incluir circuitos de linealización.	

Tabla 2: tipos de sensores de temperatura.
Adaptada de [9].

2.1.5. Humedad relativa

La humedad relativa es un fenómeno natural que se presenta a nivel molecular y que se encuentra básicamente relacionada con la cantidad de moléculas de agua presentes en una determinada sustancia, la cual puede estar en estado sólido o gaseoso [10]. Aunque la humedad relativa no influye de manera sustancial en la vida del ser humano, si resulta relevante para ciertos procesos químicos, físicos o biológicos [10].

En el mercado existe gran variedad de instrumentos que son utilizados para medir la humedad relativa, desde los higrómetros, higrótermómetros, barómetros. Por otra parte no existe una tecnología de medición que sea apropiada para todas las aplicaciones, las mediciones de humedad relativa pueden ser hechas por sensores basados en: psicometría, deformación, resistivos, capacitivos, los tipos los resume *Samir Kouro* en la tabla 3 [10].

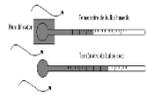
SENSOR	VENTAJA	DESVENTAJA	IMAGEN
Sensores mecánicos (por deformación)	Detecta la ausencia o presencia de los elementos	Tienen desgaste en la pieza, poca resistencia a la oxidación	
Psicometría por bulbos húmedos y secos	Provee una alta precisión en las proximidades del punto de saturación. Fácil de operar y reparar	A baja humedad relativa el desempeño es pobre y el mantenimiento debe intensificarse	
Sensor por condensación	Alto grado de sensibilidad a niveles bajo de humedad	A valores de humedad superiores al 85% tiene una tendencia a saturar y se trastorna en no lineal	
Sensor capacitivo	Detectan todo tipo de elementos metálicos	Distancia de detección corta	
Sensor infrarrojo	Rápidos y de reducido peso	Presenta interferencia de elementos externos	

Tabla 3: tipos de sensores de humedad relativa.
Adaptada de [10].

Un café de calidad se determina por la humedad relativa, esta debe mantenerse entre el rango del 10 y 12% [3], solo ahí es considerado un buen producto, por ello la importancia de verificar constantemente el grado de humedad relativa en que se encuentra el grano.

2.1.6. Sistema energético renovable

Una característica notable del proyecto es la de trabajar con energías renovables, convirtiéndose en un secador de café diferente en el mercado al utilizar energía limpia, este sistema energético además se convierte en un pilar fundamental ya que suplirá el voltaje y la corriente necesaria para los sensores, el controlador, extractores, ventiladores y demás por ende su diseño es con base en los requerimientos energéticos de los dispositivos ya mencionados.

De esto se encargará un panel solar fotovoltaico, el cual, realiza la conversión directa de la luz solar en energía eléctrica consiguiéndolo mediante las celdas solares, por un proceso llamado *efecto fotovoltaico (FV)*, es decir, cuando la luz impacta en la célula solar, los fotones liberan electrones de los átomos a los que pertenecían permitiendo que estos circulen y generen electricidad. De este modo, un módulo o panel fotovoltaico está conformado por un grupo de celdas solares interconectadas entre si y protegidas contra la intemperie, impactos y corrosión, de tal manera que la vida de un módulo fotovoltaico sobrepase los 20 años [11].

Otros componentes vitales del sistema energético son el regulador de carga, la batería y el inversor. En la figura 1 se puede observar el esquema básico de un sistema energético renovable.

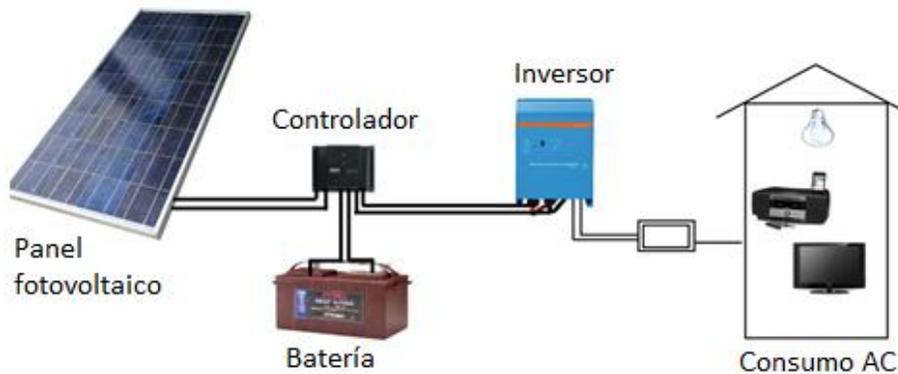


Figura 1: esquema básico de un sistema energético renovable.
Tomada de [12].

En la tabla 4 se exponen los componentes del sistema energético renovable.

COMPONENTES DE UN SISTEMA ENERGETICO RENOVABLE		
COMPONENTE	FUNCIÓN	TIPOS
PANEL SOLAR	Realiza la conversión directa de luz solar en energía eléctrica.	Monocristalino, policristalino, amorfo.
REGULADOR DE CARGA	Protege la batería frente a sobrecargas y descargas profundas [12].	MPPT y PWM.
BATERÍA	Almacena la energía eléctrica generada por el panel solar [13].	Las hay de arranque, hibrida y ciclo profundo.
INVERSOR	Convierte la corriente continua en corriente alterna.	De onda cuadrada, de onda senoidal, de onda senoidal modificada.

Tabla 4: componentes sistema energético renovable.
Adaptada de [12] [13].

La principal función del sistema energético es brindar portabilidad energética al sistema secador de café, solo este componente es un gran factor diferenciador en el mercado, ya que con este componente el sistema secador de café puede operar en zonas en donde no se cuenta con la conexión a la red eléctrica, es importante mencionar que el 44% del territorio colombiano carece de energía, siendo la costa occidental la que cuenta con el mayor número de comunidades sin electricidad [4].

2.1.7. Seguidor solar

El sistema secador de café requiere estar en funcionamiento ininterrumpido durante el ciclo de secado, es decir, que durante dicho ciclo el sistema energético renovable debe ser capaz de suplir la energía necesaria para el secador de café. Así que existe la posibilidad de implementar un dispositivo adicional con el fin de aumentar la captación solar y éste es el seguidor solar.

Es un dispositivo conformado por una parte fija y una móvil, cuya finalidad es el aumento de la captación de radiación solar, para lo cual cuenta con una superficie de captación que debe permanecer perpendicular a los rayos del sol durante el día y dentro de su rango de movimiento [14]. En la figura 2 se puede observar la aproximación del seguidor solar.

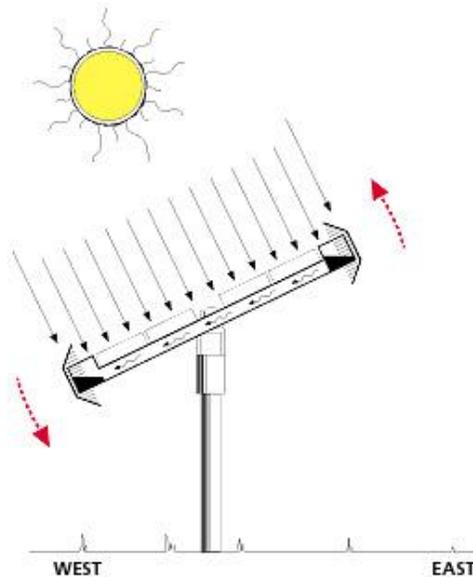


Figura 2: seguidor solar.
Tomada de [15].

Los seguidores solares pueden ser clasificados según el tipo de movimiento que realicen y según el algoritmo de seguimiento, como se muestra en la tabla 5.

SEGÚN EL TIPO DE MOVIMIENTO	
DE UN SOLO EJE	DE DOS EJES
La rotación de la superficie se hace sobre un solo eje, puede ser horizontal, vertical u oblicuo. No puede realizar un seguimiento completo del sol.	Cuenta con dos grados de libertad, está en capacidad de realizar un seguimiento total del sol. Resulta ser más costoso.
SEGÚN EL TIPO DE ALGORITMO DE SEGUIMIENTO	
SEGÚN LA LUMINOSIDAD	PROGRAMACIÓN ASTRAL
Se basa en la señal entregada por uno o varios sensores enviando una señal de control a uno o varios motores para posicionarse.	Depende únicamente de una serie de ecuaciones que predicen la ubicación del sol en cualquier momento.

Tabla 5: tipos de seguidor solar.
Tomada de [14].

2.1.8. Diseño asistido por computadora (CAD)

Las herramientas CAD permiten hacer uso de las tecnologías informáticas para el diseño y la documentación sobre diseño. El software de diseño reemplaza los dibujos a mano con procesos automatizados [16]. El software CAD en 2D y 3D es una solución de diseño tridimensional que integra un número de funciones avanzadas para facilitar el modelado de piezas, crear grandes ensamblajes, generar planos y otras funcionalidades que permiten validar, gestionar y comunicar proyecto de forma precisa y fiable.

En la tabla 6 las herramientas CAD más utilizadas.

HERRAMIENTAS CAD	DESCRIPCIÓN
AutoCAD	Es un software muy reconocido por su capacidad de edición, que hace posible el dibujo digital de planos de edificios o la recreación de imágenes en 3D, es uno de los programas más usados por arquitectos, ingenieros, diseñadores industriales y otros [17]. La licencia suele ser muy costosa.
SolidWorks	El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la aplicación [18].

	Goza de buena popularidad en la ingeniería electrónica y cuenta con licencias gratuitas para estudiantes.
--	---

Tabla 6: herramientas CAD más utilizadas.
Adaptada de [17] [18].

2.2. Estado del arte

En este apartado se presentan los principales planteamientos de investigadores y/o trabajos relacionados sobre los temas a tratar, con lo cual se pueda determinar una línea base a seguir para la medición de la temperatura y humedad relativa para el secado de café, así mismo para el sistema energético renovable junto con el seguidor solar.

2.2.1. Medición de temperatura de secado

Antes de determinar la instrumentación para la medición de temperatura, es necesario conocer el rango de temperaturas a las cuales se puede exponer el café para un secado uniforme que mantenga los aceites esenciales del grano.

Dicho esto, el *Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé)* menciona que el secado mecánico de café se hace en cámaras en las cuales se introduce aire caliente a máximo 50°C, impulsado por un ventilador el cual atraviesa la masa de café [7], mientras que *Jonathan Felipe Lee Laverde* y *Cesar Augusto Delgado Agudelo* en [19], establece unos límites entre 36 y 54°C, aclarando que si se sobrepasa su límite superior, se correría el riesgo de obtener un sobre – secado en la capa del grano, produciendo una humedad final inferior al 10%, generando mala calidad del grano por cristalizado de sus capas.

En cuanto a la instrumentación, de acuerdo con *Diego Bueno* y *Walter Nieto* [20], la temperatura en tanques de almacenamiento debe realizarse con termómetros. La medición de temperatura se debe realizar localmente por inspección visual directa del operador a una distancia menor o igual a un metro. El termómetro o sensor debe ser instalado dentro del termopozo colocando glicerina como fluido de transmisión térmica. El bulbo o sensor de temperatura debe tener certificado de calibración vigente no mayor a un año [20].

Sin embargo, los estudios realizados por *Randolfo Chang* en [21], indica que la temperatura más exacta se consigue midiéndola simultáneamente en distintos niveles, con sensores multipunto, dado que los productos albergados en tanques de almacenamiento tienden a estratificarse⁴ [21]. Mientras que la multinacional *Ecopetrol*, establece que para la determinación de la temperatura se pueden utilizar sensores electrónicos digitales con una incertidumbre baja [22].

⁴ Estrato: capas de sedimento que se pueden formar en tanques de almacenamiento.

Se determina para el proyecto que el café debe secarse a una temperatura no mayor a los 54°C como lo establecen *Jonathan Felipe Lee Laverde* y *Cesar Augusto Delgado Agudelo* para no obtener un sobre – secado que afecte la calidad del grano por cristalización de sus capas, siendo el instrumento de medición idóneo el termómetro digital el cual es utilizado en la mayoría de procesos de secado en cilindros de almacenamiento.

2.2.2. Medición de humedad relativa

Una vez el café termina el proceso de lavado, este conserva el 53% de humedad relativa aproximadamente [2], esta debe ser disminuida a valores entre el 10 y 12% para obtener un producto de buena calidad.

En consecuencia los métodos utilizados para medir la humedad de los granos se clasifican en directos e indirectos [23]. En los métodos indirectos se determina la humedad de los granos a partir de alguna propiedad física relacionada con ella (por ejemplo el peso), tal es el caso de las celdas de carga la cual permite convertir fuerzas en señales eléctricas utilizando galgas extensiométricas, que permiten a través de la deformación de objetos medir la fuerza aplicada en ellos de manera no invasiva, es decir, en el caso del café, a mayor humedad mayor peso y a menor humedad menor peso [24]. Otra es la resistencia eléctrica, utilizada para medir la humedad del arroz antes de la cosecha; la constante dieléctrica y la permisividad eléctrica de los granos son útiles en la determinación rápida y no destructiva de la humedad de los granos, debido a las altas correlaciones entre las propiedades dieléctricas de los granos y la cantidad de agua presente en ellos a diferentes frecuencias [23]. *Sáenz y Gómez* en [25] utilizaron ultrasonido para medir la humedad de arroz durante el proceso de secado, en el rango de humedad de 5 al 23%, los autores consideran que el ultrasonido es promisorio para la medición en línea de la humedad de granos durante el proceso de secado [25]. En el método directo, se extrae el agua presente en los granos. Los medidores de humedad directos ofrecidos en el mercado no son apropiados para el control en línea del proceso, debido a que se requieren de 20 a 30 minutos para extraer la muestra, tiempo durante el cual los granos pueden reducir su humedad a valores notoriamente inferiores al 10% [23].

Teniendo definido para el proyecto que la humedad relativa en los granos de café al finalizar el proceso de secado se encuentra entre el 10 y 12%, basta por determinar el instrumento de medición, el cual debe ser no invasivo debido a la dificultad de medir dentro del cilindro en donde se deposita el café, siendo las galgas extensiométricas las que cumplen con el objetivo de manera más eficaz.

2.2.3. Sistema energético renovable

La instalación de energía solar cada vez es más económica debido al gran uso que se le está dando, siendo una gran alternativa como reemplazo de las fuentes tradicionales de energía, existen dos tipos o formas de realizar conexiones solares; las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red e instalaciones fotovoltaicas aisladas a la red.

Según *Israel Blanco Sardinero* las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red están formadas por un generador fotovoltaico y un sistema de acondicionamiento de potencia, encargado de transformar la energía en forma de corriente continua a corriente alterna, con las características de la red de distribución [26]. Este tipo de instalaciones garantiza el suministro constante de energía, ya que dado el caso de que los generadores fotovoltaicos se queden cortos en su producción, la red eléctrica compensa esa falta de energía, su desventaja radica en que no brinda portabilidad al sistema secador de café, tendiendo éste que ser instalado siempre en zonas donde haya acceso a la red eléctrica.

Las instalaciones aisladas a la red eléctrica, cumplen la función de satisfacer total o parcialmente los requerimientos de energía eléctrica de viviendas o localidades que no cuentan con la prestación de servicio eléctrico de alguna compañía. Son utilizadas en sectores alejados, generalmente en sectores rurales. Estos sistemas van acompañados de inversores de corriente continua a corriente alterna, reguladores de voltaje y bancos de baterías que permiten almacenar la energía que no se está utilizando, según el proyecto de *Simec Chile SRL* [27]. Para que esta solución sea más eficiente se optimiza con un seguidor solar, el cual garantiza el seguimiento de la irradiación solar en los paneles el mayor tiempo posible durante las horas de sol.

De tal manera que para el proyecto se opta por una conexión aislada a la red eléctrica, la cual permite que el ECOSECADOR pueda trabajar en fincas en donde no haya acceso a la red eléctrica.

2.2.4. Seguidor solar

Un sistema de seguimiento solar es un dispositivo mecánico capaz de orientar los paneles solares de forma perpendicular a los rayos solares para un mejor aprovechamiento de la radiación solar, ya sea siguiendo el sol desde el este en el amanecer hasta el oeste en la puesta, o bien empleando el punto de máxima potencia.

Según *Jonathan Sumano Fuentesvilla* en [28], existen seguidores de un eje y a dos ejes, donde el seguidor solar estacional de un eje incrementa la producción de energía eléctrica en un 28% más respecto a una instalación fija, mientras que los

seguidores a dos ejes permiten incrementar aproximadamente la eficiencia hasta un 35% la producción de energía eléctrica de los paneles solares fotovoltaicos. Para el diseño mecánico *Jonathan Sumano Fuentesvilla* en [28] emplea el software SolidWorks 2010, principalmente para la elaboración del diseño y el análisis de fuerzas del SSFA (sistema de seguimiento fotovoltaico). Para ello se realiza el diseño de cada una de las partes de forma independiente con base en las medidas de croquis bidimensionales, además del peso y dimensiones del panel fotovoltaico y de los motores de CD [28].

Por otro lado *José Beltrán Adán* en [29] plantea que la incidencia de los rayos solares sobre el plano de los paneles fotovoltaicos difiere de la perpendicular a lo largo del día y por lo tanto se ve reducida la eficiencia de los paneles solares. Es posible corregir esta situación utilizando un seguidor solar que oriente los paneles a la posición del sol. El uso de seguidores solares ha reportado ganancias superiores al 20% en estudios de campo. En [29] el estudio de rendimiento de los seguidores solares *José Beltrán Adán* calcula el valor del ángulo de azimut y altura del sol, determinando el ángulo entre el vector de dirección de los rayos del sol y el vector normal a los módulos en cada seguidor para conocer el rendimiento de los seguidores solares obteniendo un criterio de selección. Además se realiza la simulación de generación de energía en Cuernavaca con los datos de radiación obtenidos de la estación de monitoreo del Centro de Investigación en Energía en los puntos extremos del movimiento de latitud del sol, equinoccio de otoño y primavera y solsticio de verano e invierno considerando las características de los módulos utilizados y se obtuvo un promedio de generación de energía por cada mes del año, *ver figura 3*. El seguidor solar de un eje considerado fue el polar ya que es el que presenta un mejor rendimiento.

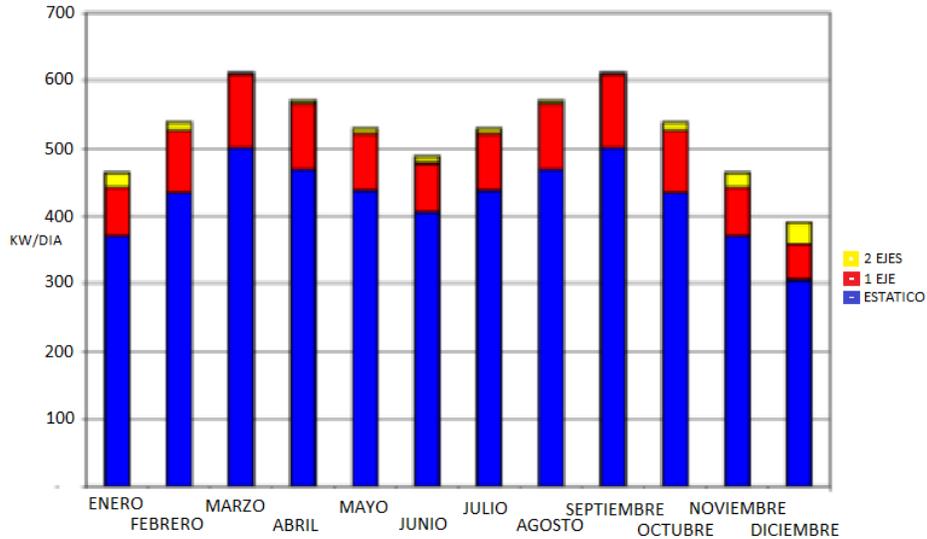


Figura 3: generación de energía eléctrica con y sin seguidor solar.
Adaptada de [29].

En donde, la gráfica está compuesta en el plano “Y” por *energía promedio por día (Wh)* versus en el plano “X” por *meses del año (enero a diciembre)* arrojando como resultados en azul (*arreglo de paneles solares estático*) en rojo (*seguidor solar de un eje*) y en amarillo (*seguidor solar de dos ejes*).

El estado del arte permite trazar una línea base para el desarrollo del proyecto, de este se destacan los siguientes aportes en la tabla 7.

TEMAS A DESARROLLAR	CONCLUSIONES
Medición de temperatura de secado	Según el estudio de los autores, el café debe secarse a una temperatura no máxima a los 54°C para no obtener un sobre – secado que afecte la calidad del grano por cristalización de sus capas, con base a esto el instrumento de medición debe contar con un rango de temperatura que pase ampliamente los límites de los 50°C, por ejemplo de 0°C – 100°C. Se debe tener en cuenta que el instrumento estará bajo humedad constante, por lo tanto debe ser capaz de funcionar bajo estos parámetros.
Medición de humedad relativa	Es claro que los granos de café después del lavado obtienen una humedad del 53%, siendo necesario disminuirlo a valores entre el 10 y 12%.

	El cilindro donde se depositan los granos de café estará en constante movimiento, situación que no permite instalar un sensor dentro de él para obtener la medición (debido a su cableado), así que la manera más apropiada es realizar una medición no invasiva por medio de la deformación de sensores mecánicos.
Sistema energético renovable	El Sistema Secador de Café trabajará en fincas productoras de café en donde en algunos casos no habrán redes de energía eléctrica, por tal motivo se debe contar con una instalación aislada a la red eléctrica la cual pueda cumplir a cabalidad el abastecimiento de energía para este sistema.
Seguidor solar	El seguidor de un eje polar ofrece un mejor rendimiento a lo largo del año, no se justifica el uso de un seguidor solar de dos ejes debido a que la adición de un segundo eje de movimiento reportaría un incremento reducido versus el mayor costo que implica su implementación.

Tabla 7: aportes del estado del arte.
Adaptada de 2.2.

3. INSTRUMENTACIÓN PARA LA TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA.

La instrumentación expuesta en este apartado sirve para medir, convertir, transmitir, controlar o registrar variables de un proceso, en este caso, el secado del café, con el fin de optimizar los recursos utilizados en este.

Un sistema de instrumentación es una estructura compleja que agrupa un conjunto de instrumentos, un dispositivo o sistema en el que se mide, unas conexiones entre estos elementos [20].

En la figura 4 se presentan los componentes de la instrumentación utilizada en el prototipo del secador de café.

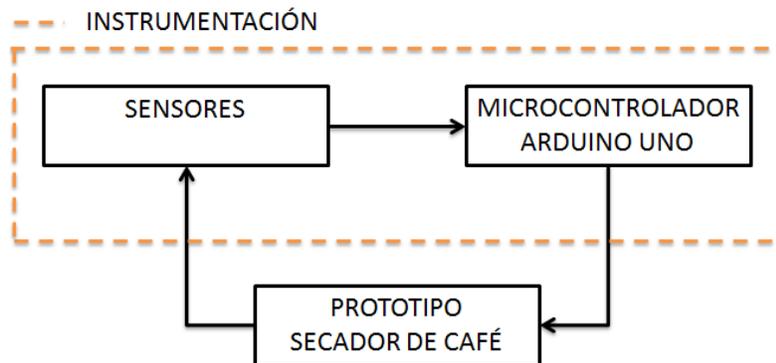


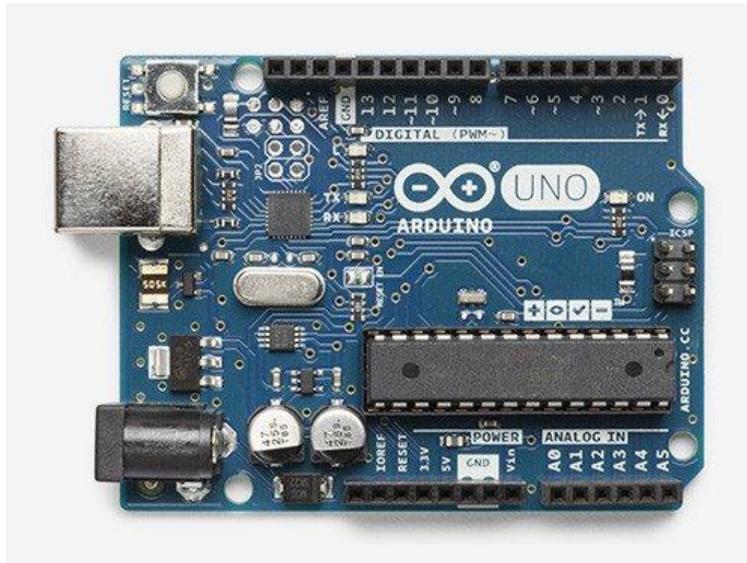
Figura 4: instrumentación del prototipo secador de café.
Propia.

3.1. Microcontrolador Arduino uno

Consiste en una placa de circuito impreso con un microcontrolador, usualmente Atmel AVR, puertos digitales y analógicos de entrada/salida, los cuales pueden conectarse a placas de expansión. Asimismo posee un puerto de conexión USB desde donde se puede alimentar la placa y establecer comunicación con el computador. Por otro lado el software consiste en un entorno de desarrollo basado en el entorno de *processing* y *lenguaje de programación* basado en *wiring* [30].

Por lo tanto con arduino se lee la temperatura que registra el sensor de temperatura como también el porcentaje de humedad relativa arrojado por las galgas extensiométricas. El sensor de temperatura utiliza la comunicación *one wire* la cual permite enviar y recibir datos utilizando un solo cable.

Para la simulación de los sensores se utiliza la tarjeta *ARDUINO UNO*, ver fotografía 2.

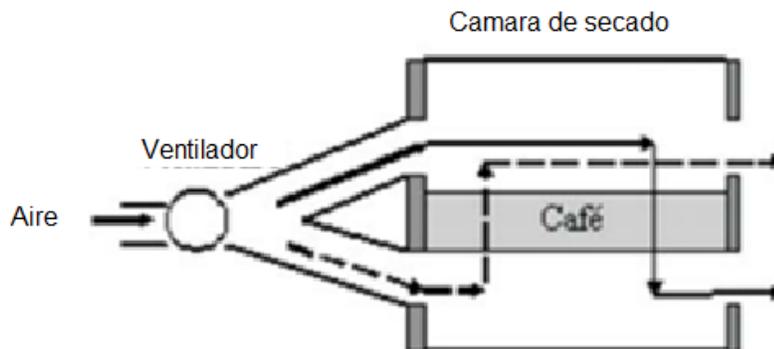


Fotografía 2: placa arduino uno.
Propia.

La placa *arduino uno* es la pieza central de la instrumentación, en el arduino uno se desarrolla el software para la lectura de valores arrojados por los sensores. Es el elemento más importante de la instrumentación.

3.2. Prototipo secador de café

Para la validación de la instrumentación en el proceso de secado se modela un prototipo de secador mecánico de café de una sola capa con inversión de aire, figura 5, siguiendo los planteamientos en [23], además de los planteados por *Jonathan Felipe Lee Laverde* y *Cesar Augusto Delgado Agudelo* en [19] donde brindan intervalos de tiempo que están entre 6 a 12 horas para invertir la dirección de aire en el secador para disminuir el gradiente de humedad.



Secador de una sola capa, con inversión de la dirección del flujo de aire.

Figura 5: secador de una sola capa con inversión de aire.
Tomada de [23].

Este prototipo cuenta con dos dinámicas diferentes en su proceso de secado de café.

- **Dinámica 1:** el aire ingresa por la parte inferior del silo y sale por la parte superior del silo.

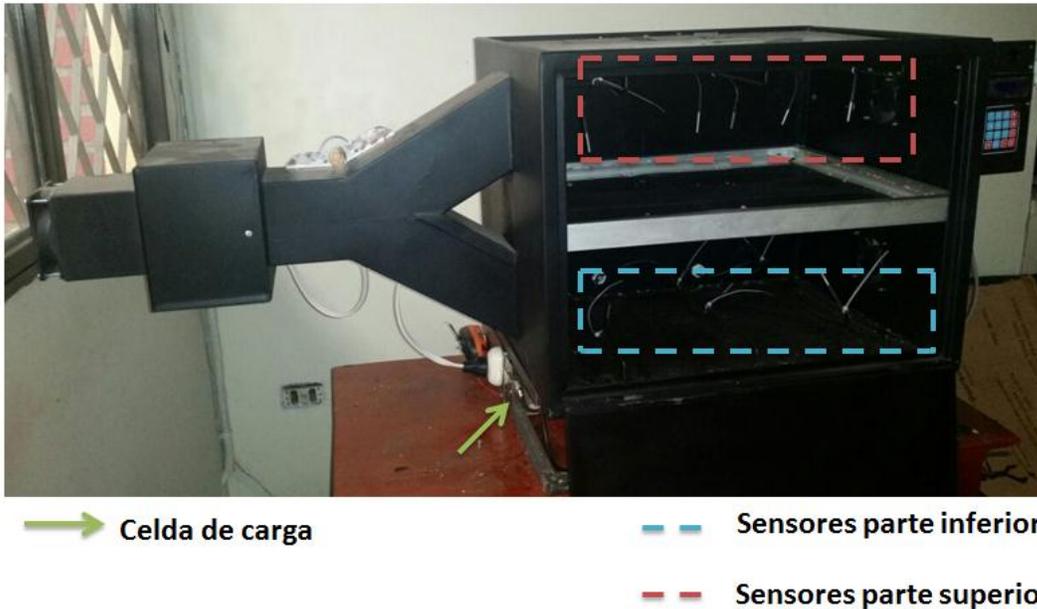
En esta dinámica el aire es impulsado por un ventilador de 5V por la parte inferior del silo a una temperatura predefinida, en el silo se encuentran 6 sensores de temperatura distribuidos en diferentes partes para así poder tener un promedio de la temperatura presente en el espacio. Este aire caliente presente en la parte inferior del silo es extraído por un ventilador de 12V ubicado en la parte superior del silo, el cual obliga a que el aire caliente ascienda a la parte superior del silo, atravesando y penetrando la capa de café presente en el cilindro que lo contiene, permitiendo que el café pueda tener un secado más uniforme.

- **Dinámica 2:** el aire ingresa por la parte superior del silo y sale por la parte inferior del silo.

En esta dinámica el aire es impulsado por el ventilador de 5V pero por la parte superior del silo a la misma temperatura predefinida que en la dinámica 1, de igual manera se encuentran 6 sensores de temperatura los cuales permiten tener un promedio de la temperatura presente en este espacio. Este aire caliente presente en la parte superior del silo es extraído por un ventilador de 12V ubicado en la parte inferior del silo, atravesando y penetrando la capa de café presente en el cilindro que lo contiene, permitiendo que el café pueda tener un secado más uniforme.

Para la inversión del aire se utilizó un relé de estado sólido, el cual conmuta el circuito de carga a partir de una señal de control activando o desactivando el interruptor.

Dado a que se está evaluando la instrumentación en un prototipo a escala menor se determina tener intervalos de tiempo de 3 horas. En la fotografía 3 el prototipo del secador de café.



Fotografía 3: prototipo secador de café.
Propia.

3.3. Sensores

La función de los sensores es realizar un monitoreo constante de la temperatura de secado y de la humedad relativa de los granos de café, para la humedad relativa la medición se realiza de manera no invasiva por medio de galgas extensiométricas.

3.3.1. Sensor de temperatura DS18B20 WATERPROOF tipo sonda

El termómetro digital “DS18B20 WATERPROOF” cumple con las especificaciones requeridas para el monitoreo constante de la temperatura de secado, en la tabla 8 las consideraciones para su implementación.

CRITERIOS DE SELECCIÓN	
Resolución de lectura	9 a 12 bits
Rango de temperatura	-55°C a 125°C
Protocolo de comunicación	<i>One wire</i>
Consumo de corriente	Prescinde de fuente de alimentación
Característica principal	Resistente al agua
Precio	Alrededor de U\$ 8.

Tabla 8: criterios de selección del sensor de temperatura.
Adaptada de [31].

La resolución de lectura de 9 a 12 bits se modifica a la necesidad de cada proceso. Este tipo de sensor utiliza el protocolo de comunicación *one wire* el cual cuenta con una sola línea de comunicación de un maestro y varios esclavos, este tipo de comunicación brinda el voltaje necesario para el funcionamiento del sensor permitiendo que este trabaje de forma parasita, es decir, prescinde de una fuente de alimentación externa que en este caso es el sistema energético con base en paneles solares. Su característica *waterproof* lo hace resistente al agua.



Fotografía 4: sensor digital DS18B20.
Tomada de [31].

- **Comunicación *one wire*:** El protocolo de comunicación *one wire* está basado en un bus, un maestro y varios esclavos de una sola línea de datos en la que se alimentan. Se alimenta con corrientes parasitas, aunque necesitan referencia a tierra. Los esclavos se identifican a través de un valor de *ID*, el cual se puede seleccionar físicamente, de esta forma es posible la comunicación en un bus, la comunicación es bidireccional. Los datos se envían o reciben *bit* por *bit* siguiendo una regla y el tiempo de espera entre un *bit* y otro no está limitado, aunque debe esperar al menos 12us [32].

3.3.2. Celdas de carga

Dispositivo electrónico que permite convertir fuerzas en señales eléctricas, utilizando galgas extensiométricas que permiten a través de la deformación de objetos medir la fuerza aplicada en ellos. Se utilizan 4 galgas configuradas en un *Puente de Wheatstone* y antes de que una celda de carga sea utilizada es necesario hacer una etapa de amplificación de la señal que permita que estos datos sean leídos con mejor precisión [24].

Las celdas de carga se componen esencialmente de dos estructuras.

- **Galgas extensiométricas:** son transductores pasivos los cuales a través de celdas de carga como elemento flexible, pueden medir las deformaciones de elementos cuando se les aplica una fuerza de compresión, tracción o flexión. La deformación de la celda de carga ocasiona el cambio de resistencia en la galga, de esta manera se puede determinar cuanta fuerza se le está aplicando [33]. La ecuación está dada por:

$$R = p \frac{L}{A} \quad (3.3.2.1)$$

Donde R es el cambio de resistencia en la galga, p la resistividad, siendo L la longitud y A la sección transversal.

- **Puente de Wheatstone:** en la figura 6 se observan las cuatro galgas extensiométricas en donde dos galgas son utilizadas para compresión y las otras dos para tracción.

Este tipo de celdas de carga tiene un solo apoyo y una sola dirección de fuerza, en donde estas están constituidas por un *Puente de Wheatstone* como se observa en la figura 6.

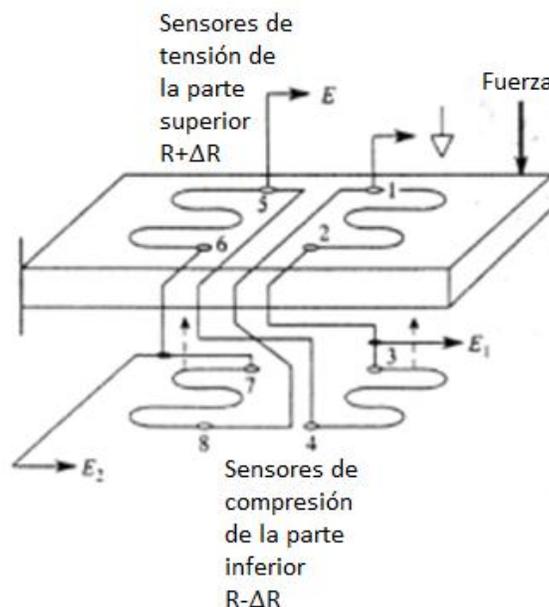


Figura 6: cuatro resistencias haciendo un *Puente de Wheatstone*. Tomada de [33].

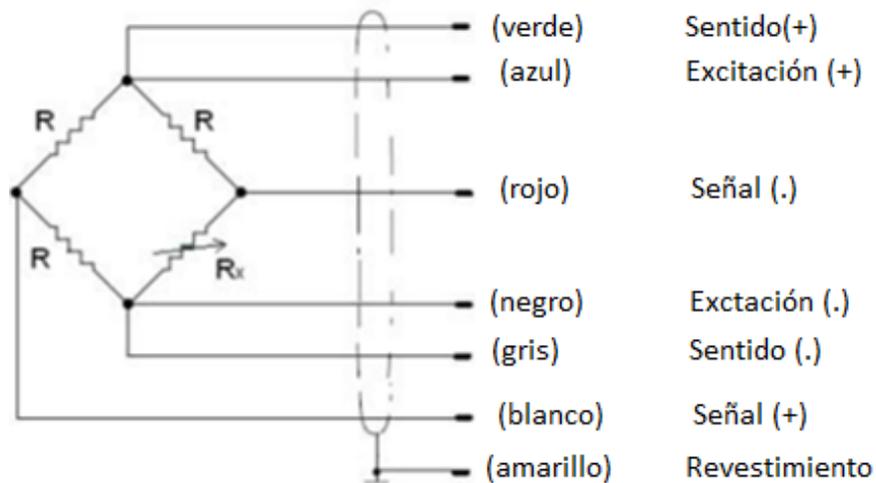


Figura 7: cuatro resistencias haciendo un *Puente de Wheatstone*.
Tomada de [33].

De tal manera que este circuito es posicionado dentro de una celda de carga para poder actuar sobre la deformación de esta y así poder medir la resistencia y transformar la resistencia en fuerza, para tal requisito se efectúan las siguientes ecuaciones.

$$V_a = V \frac{R+\Delta R}{2R} \quad (3.3.2.2)$$

$$V_b = V \frac{R+\Delta R}{2R} \quad (3.3.2.3)$$

$$V_{ab} = V \frac{\Delta R}{R} = V \cdot K \cdot \varepsilon \quad (3.3.2.4)$$

Así que, en conjunto la galga extensiométrica y el puente de Wheatstone componen una celda de carga.

3.3.2.1. Tipos de celdas de carga

Las celdas de carga varían dependiendo del uso que se le vaya a dar.

TIPOS DE CELDA DE CARGA		
Celda de carga de compresión	Estas celdas son de acero inoxidable para que puedan ser utilizadas en la industria, miden la fuerza a través de la compresión de las mismas, son muy estables y fáciles de calibrar, están diseñadas para posicionarlas en un entorno plano. Soportan desde los 11Kg hasta los 23000Kg.	
Celda de carga de tensión y compresión	Son de acero inoxidable para que puedan ser utilizadas en la industria, miden la fuerza a través de la tensión y la compresión, ofrecen una alta precisión en las lecturas, además tienen un pequeño tamaño lo cual la hace muy práctica para espacios pequeños. Soportan desde 1Kg hasta los 450Kg.	
Celda de carga con viga en forma de "S"	Son de acero inoxidable para su uso en la industria, mide la fuerza a través de la tensión y compresión, pero ofreciendo rechazo a la carga lateral superior, tienen buena precisión en las lecturas. Soportan desde los 11Kg hasta los 18000Kg.	
Celda de carga de flexión de viga	Es la más utilizada en la industria por su versatilidad en su uso, maneja mayores cargas y lecturas más precisas. Soportan desde los 45Kg hasta los 45500Kg.	
Celda de carga de un solo punto	La posición como se coloque esta celda de carga en el sistema es independiente de la lectura ya que esta celda es de alta precisión, se usan en sistemas de pesaje comercial en la industria, son más costosas que las anteriores. Soportan desde los 2.3Kg hasta los 23000Kg.	

Tabla 9: tipos de celdas de carga.
Adaptada de [34].

Las galgas utilizan las propiedades de la resistencia eléctrica la cual es una propiedad del material. De tal manera que cuando la galga presenta elasticidad o estrechamiento, esta incrementa su resistencia eléctrica reduciendo el paso de corriente eléctrica [34].

En común las celdas de carga tienen unas limitaciones, ventajas y desventajas a tener en cuenta.

- **Limitaciones:** el esfuerzo de compresión y tensión no debe llevar la galga fuera de su margen de elasticidad. Su deformación también está limitada.
- **Ventajas:** pueden ser alimentadas con corriente AC o DC, son inmunes al campo magnético y su pequeño tamaño las hace ideal para todo tipo de aplicaciones.
- **Desventajas:** señal de salida débil.

Para el proyecto se decidió trabajar con las celdas de carga tipo S, las cuales son de acero inoxidable aptas para aplicaciones industriales exigentes en donde la humedad y la corrosión están presentes, su alimentación es con corriente continua de 10Vcc, consumiendo menor corrientes que las otras de su clase.

3.3.2.2. Celda de carga tipo “S YZC-516”

Las celdas de carga tipo “S”, es un transductor el cual permite convertir la fuerza ya sea producida por compresión o tensión en una señal eléctrica mediante un transmisor de señal, la cual es interpretada por el microcontrolador Arduino Uno convirtiéndola mediante código en una medida de peso. Este tipo de celda brinda un rango de medida óptima para el desarrollo del proyecto además de que la medida se realiza de manera no invasiva, por tal motivo se decide implementarla como el sistema de pesaje.



Fotografía 5: celda de carga.
Propia.

La celda de carga tipo “S YZC-516” tiene las siguientes características como se observa en la tabla 10.

Impedancia de entrada	365 +/-
Impedancia de salida	350 +/-
Resistencia de aislamiento	Más de 2000M
Tamaño	2.95x1.97 pulgadas
Conexión	Rojo: Vcc Negro: Gnd Verde: señal salida al transmisor Blanco: señal salida al transmisor

Tabla 10: características del S YZC-516.
Adaptada de [24].

3.4. Pruebas en el prototipo secador de café

Las pruebas se realizaron con base en determinar si los sensores son capaces de leer temperatura y humedad relativa en el prototipo secador de café.

3.4.1. Simulación del sensor DS18B20 WATERPROOF tipo sonda

El sensor DS18B20 permite medir temperaturas hasta 125°C de forma fácil y además está sellado en un envoltorio que permite sumergirlo en líquido o protegerlo de la intemperie y humedad. Dado que es un sensor digital, la señal leída no se degrada debido a la distancia del cableado. Puede funcionar en modo *one wire* con una precisión de +/-0.5°C con una resolución de 12 bits. También pueden utilizarse varios sensores sobre el mismo *PIN* ya que internamente viene programado con un *ID* único de 53 bits para diferenciarlos. El rango de

funcionamiento es de 3 a 5V por lo que se puede utilizar en prácticamente cualquier sistema que use microcontroladores [31].

En la tabla 11 sus especificaciones.

Características del cable	<ul style="list-style-type: none"> • Tubo de acero inoxidable de 6mm de diámetro por 30mm de largo. • Largo: 91cm. • Diámetro: 4mm. • Contiene un sensor de temperatura DS18B20.
Conexión	3 cables: rojo es VCC (positivo), negro es GND (negativo) y amarillo es el cable de datos.
Características del sensor DS18B20	<ul style="list-style-type: none"> • Rango de temperatura: -55 a 125°C. • Resolución: de 9 a 12 bits (configurable) • Interfaz <i>one wire</i> • Identificador interno único de 64 bits. • Múltiples sensores pueden compartir el mismo <i>PIN</i>. • Precisión: +/-0.5°C (de -10° a 85°C). • Tiempo de captura inferior a 750ms. • Alimentación: 3.0 a 5.5V.

Tabla 11: especificaciones del sensor de temperatura.
Adaptada de [31].

En la tabla 12 la relación de datos de temperatura.

RELACIÓN DE DATOS DE TEMPERATURA		
TEMPERATURA (°C)	SALIDA DIGITAL BINARIA	SALIDA DIGITAL HEXAGONAL
+125	0000 0111 1101 0000	07D0h
+85	0000 0101 0101 0000	0550h
+25.062	0000 0001 1001 0001	0191h
+10.025	0000 0000 1010 0010	00A2h
+0.5	0000 0000 0000 1000	0008h
0	0000 0000 0000 0000	0000h
-0.5	1111 1111 1111 1000	FFF8
-10.025	1111 1111 0101 1110	FF5Eh
-25.062	1111 1110 0110 1111	FE6Fh
-55	1111 1100 1001 0000	FC90h

Tabla 12: relación de datos de temperatura.

Adaptada de [31].

Para la simulación del sensor DS18B20 se utiliza la tarjeta *ARDUINO UNO*. En la figura 8 se puede apreciar el esquema de conexiones en donde se utiliza una resistencia de $4,7K\Omega$, el sensor industrial tipo sonda DS18B20 y la placa arduino uno.

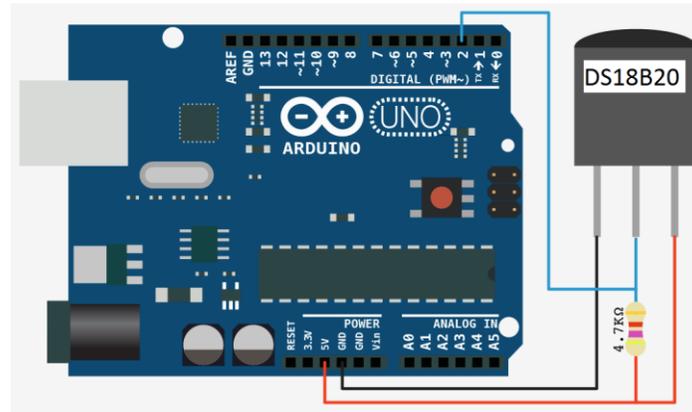


Figura 8: diagrama de conexiones para la simulación en arduino uno.
Propia.

Una vez completa la conexión, se procede a realizar un código para probar el funcionamiento del sensor, en la figura 9 se puede observar el código para dicha prueba. Tener en cuenta que se deben descargar e instalar las librerías *One Wire* y *DallasTemperature*.

```
OneWire ourWire(Pin); //Pin declarado como bus para la comunicación OneWire

DallasTemperature sensors(&ourWire); //Se instancia la librería DallasTemperature

void setup() {
  delay(1000);
  Serial.begin(9600);
  sensors.begin(); //Se inician los sensores
}

void loop() {
  sensors.requestTemperatures();

  Serial.print(sensors.getTempCByIndex(0)); //Se lee e imprime la temperatura en
  grados Celsius
  Serial.println("Grados Centigrados");

  delay(1000); //Se provoca un lapso de 1 segundo antes de la próxima lectura
}
```

Figura 9: código en arduino para el sensor.
Propia.

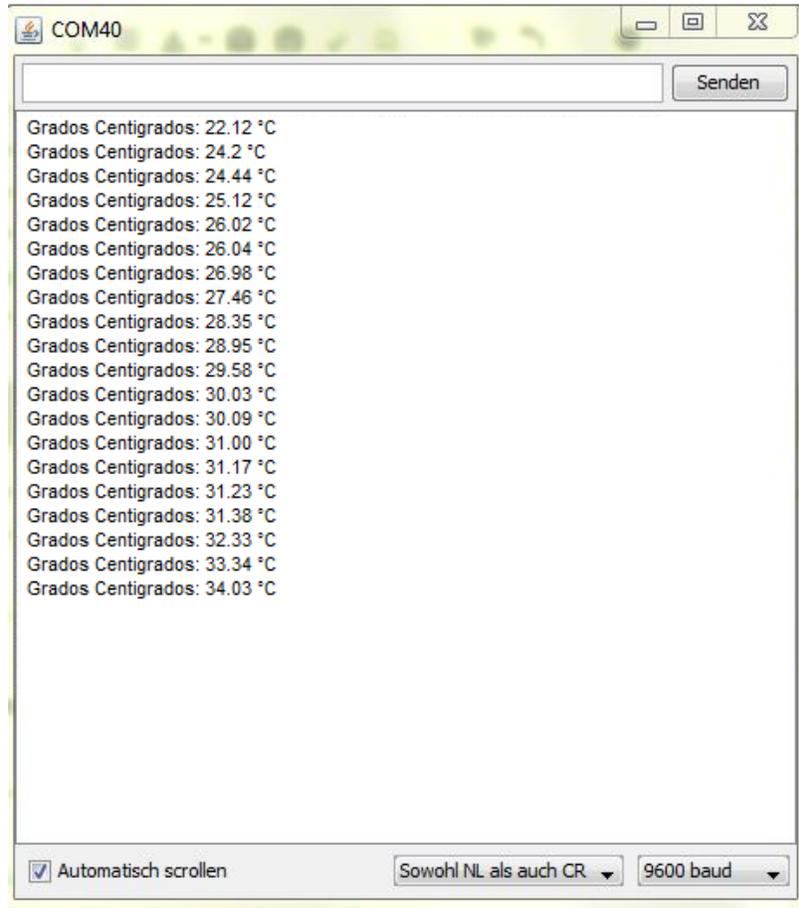


Figura 10: lectura de la temperatura en el monitor virtual de arduino. Propia.

Una vez cargado el código en la placa, el resultado es inmediato y se puede observar la lectura en grados centígrados en el monitor virtual del arduino. La cual, fue aumentando la temperatura a medida que ingresaba aire caliente.

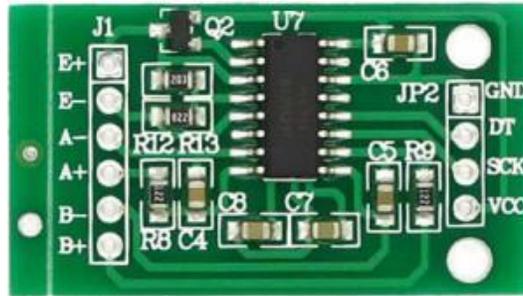
3.4.2. Simulación de la celda de carga S YZC-516

Básicamente se simulará una balanza digital, usando para ello la celda de carga S YZC-516 la cual es capaz de convertir una fuerza en una señal eléctrica, esa señal es leída por el transmisor de celda de carga HX711.

- **Transmisor de celda de carga HX711**

Este módulo funciona como interface entre las celdas de carga y el microcontrolador, permite leer el peso de manera sencilla. Internamente se encarga de la lectura del *Puente de Wheatstone* formado por la celda de carga, convirtiendo la lectura analógica a digital con su conversor A/D interno de 24 bits.

Se comunica con el microcontrolador mediante 2 pines (*Clock* y *Data*) de forma serial [35]. En la fotografía 6 el transmisor de celda de carga.



Fotografía 6: transmisor HX711.
Propia.

En la tabla 13 las especificaciones del transmisor.

Referencia	HX711
Voltaje de operación	5V
Corriente de operación	<10mA
Resolución de conversión	24 bits
Frecuencia de operación	80Hz
Interfaz	TTL232 serial

Tabla 13: especificaciones del transmisor HX711.
Adaptada de [35].

En la tabla 14 la conexión entre la celda de carga y el módulo HX711 y la conexión entre el módulo HX711 y el Arduino uno.

CONEXIÓN ENTRE LA CELDA DE CARGA Y EL MÓDULO HX711	
CELDA DE CARGA	MÓDULO HX711
Cable rojo	Pin E+
Cable negro	Pin E-
Cable verde	Pin A+
Cable blanco	Pin A-
CONEXIÓN ENTRE EL MÓDULO HX711 Y EL ARDUINO	
MÓDULO HX711	ARDUINO UNO
Pin GND	Pin GND
Pin DT	Pin A1
Pin SCK	Pin A0
Pin VCC	Pin 5V

Tabla 14: conexiones para la simulación de la celda de carga.
Elaboración propia.

De tal manera que la conexión final es como se muestra en la figura 11.

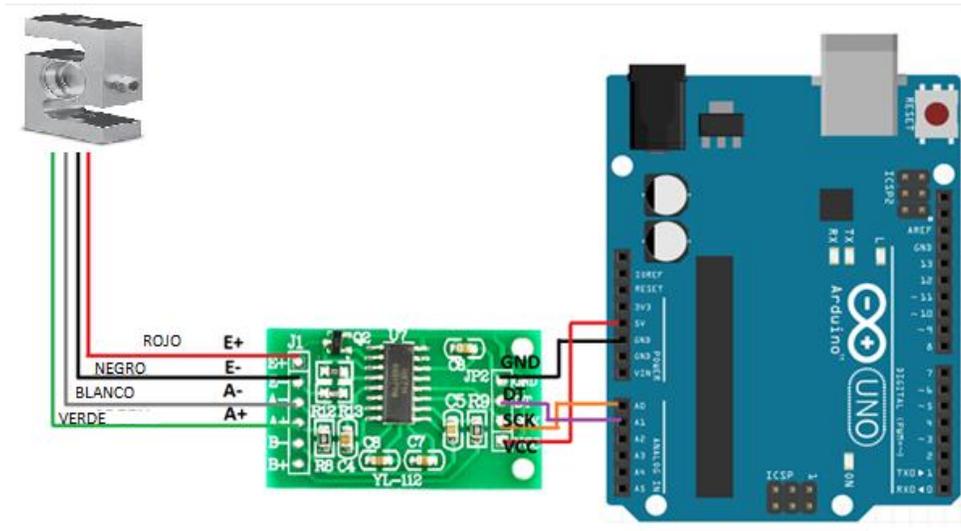


Figura 11: diagrama de conexión de la celda de carga.
Propia.

Una vez realizado el esquema de conexión, se debe contar con la librería HX711 de *Bogde*, la cual se puede descargar de internet y se debe incluir en el IDE de Arduino.

Lo primero que se debe de hacer es calibrar, que es básicamente hallar el valor de la escala que se usará, es decir hallar el factor de conversión para convertir valor de lectura en un valor con unidades de peso. La escala es diferente para cada celda y cambia de acuerdo a la forma de instalar, al peso máximo de celda de carga, incluso así se trate del mismo modelo de celdas no necesariamente tienen el mismo valor de escala [36].

Por lo tanto para la calibración se debe contar con un peso conocido para poder realizar la calibración, para este caso se utilizó un peso de 10Kg.

Una vez cargado el código, ver figura 12, el programa debe correr sin el peso puesto, luego se ejecuta el monitor virtual de Arduino colocando el peso de 10Kg sobre la celda de carga.

```

#include "HX711.h"

#define DOUT A1
#define CLK A0

HX711 balanza(DOUT, CLK);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("Lectura del valor del ADC:t");
  Serial.println(balanza.read());
  balanza.set_scale(); //La escala por defecto es 1
  balanza.tare(20); //El peso actual es considerado Tara.
  Serial.println("Coloque un peso conocido:");
}

void loop() {

  Serial.print("Valor de lectura: t");
  Serial.println(balanza.get_value(10),0);
  delay(100);
}

```

Figura 12: código para la calibración del sensor.
Propia.

Con los datos obtenidos de la medición, se calcula el valor de la escala a usar.

$$ESCALA = \frac{\text{Valor lectura}}{\text{Peso real}} \quad (3.4.2.1)$$

$$ESCALA = \frac{11749300,5}{10} = 1179430.25 \quad (3.4.2.2)$$

Una vez conocido el valor de la escala se puede insertar en el código. En la figura 13 el programa final para la celda de carga.

```

#define DOUT  A1
#define CLK  A0

HX711 balanza(DOUT, CLK);

void setup() {
Serial.begin(9600);
  Serial.print("Lectura del valor del ADC:t");
  Serial.println(balanza.read());
  Serial.println("No ponga ningun objeto sobre la balanza");
  Serial.println("Destarando...");
  Serial.println("...");
  balanza.set_scale(1179430.25); // Establecemos la escala
  balanza.tare(20);

  Serial.println("Listo para pesar");
}

void loop() {
  Serial.print("Peso:t");
  Serial.print(balanza.get_units(20),3);
  Serial.println("kg");
  delay(500);
}

```

Figura 13: código de simulación para la celda de carga.
Propia.

4. SISTEMA ENERGÉTICO RENOVABLE CON DISEÑO DEL SEGUIDOR SOLAR COMO MECANISMO DE OPTIMIZACIÓN.

Un sistema energético renovable es un conjunto que genera energía eléctrica a partir de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Dentro de este tipo está la energía solar.

De tal manera que en este capítulo se desarrolla el diseño y cálculos del sistema energético renovable para el ECOSECADOR, como también la implementación a escala del sistema para su validación (*ver sección 4.1.7*). Además, se realiza el diseño de un seguidor solar portátil en SolidWorks, el cual sirve como mecanismo de optimización ya que aumenta el tiempo de captación de radiación solar.

4.1. Sistema energético renovable con base en paneles solares

En consecuencia, en la figura 14 se presenta el diagrama de los módulos que conforman el sistema energético renovable.

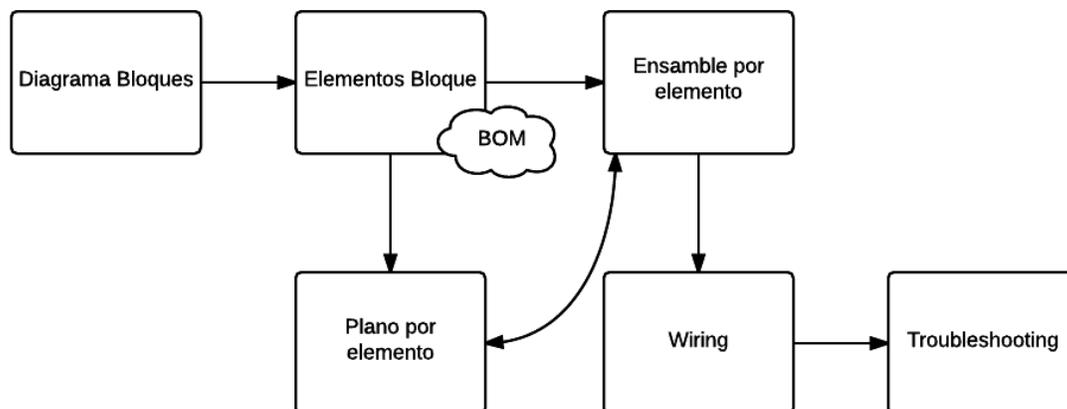


Figura 14: módulos que componen el estudio, diseño y verificación de funcionamiento del sistema energético renovable.

Tomada de [37].

En donde *Diagrama Bloques* y *Elementos Bloque*, describen el funcionamiento lógico general y específico de cada componente del sistema energético; *Ensamble por elemento*, especifica la manera de ensamblar cada elemento físico dentro de cada componente del sistema energético; *Plano por elemento*, especifica el diseño realizado para el sistema energético; *Wiring*, especifica la estructura del cableado empleado en el sistema energético; *Troubleshooting*, especifica los pasos de verificación para el correcto funcionamiento del sistema energético.

Los módulos que a continuación se exponen detallan cada parte del sistema energético.

4.1.1. Diagrama de bloques

La figura 15 presenta la lógica funcional del componente energético.

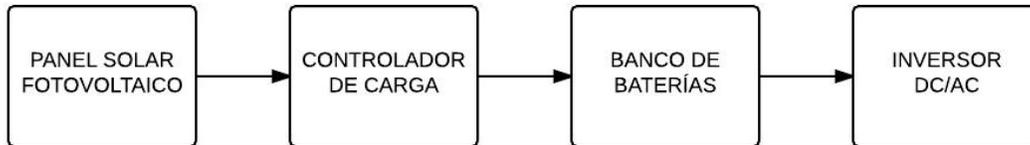


Figura 15: diagrama bloques del sistema energético renovable.
Tomada de [37].

- **Panel solar fotovoltaico:** bloque encargado de convertir la energía que proporciona el sol. Esto es conseguido mediante una célula solar la cual es una placa que suele estar hecha de silicio cristalino que por su composición puede hacer dicha conversión, por ende, muchas células solares componen un panel solar logrando convertir mayor energía del sol en electricidad [38]. Este bloque se caracteriza por la producción de energía limpia y renovable sin tener que recurrir a las formas tradicionales de generación de electricidad, su mantenimiento es mínimo y su vida útil es bastante larga, los hay; monocristalino, policristalino o amorfo [38].

El bloque emplea el material tipo monocristalino, el cual es más eficiente respecto a los otros materiales. Finalmente, el bloque proporciona suficiente electricidad para el uso en el prototipo secador de café.

- **Controlador de carga:** bloque encargado del control del voltaje y la corriente que entrega el arreglo de paneles solares, estos entregan diferentes voltajes que podrían llegar a deteriorar la batería por un efecto de sobrecarga, así que gracias al controlador las baterías duran más tiempo. Este bloque emplea luces led indicando el proceso de ejecución (indicador de estado, indicador de carga e indicador de falla), como también una pantalla LCD y los botones de funciones.

Para garantizar un buen trabajo se utiliza un controlador de carga PWM el cual permite entregar a la batería un nivel de carga variable electrónicamente gracias a un encendido-apagado muy rápido del circuito. El dispositivo comprueba continuamente la tensión de la batería, y si esta es muy buena los impulsos estarán muy distanciados (por ejemplo cada 3 segundos) y además serán muy cortos de duración (por ejemplo de una décima de segundo) [39]. Si

por el contrario la batería necesita mucha carga, los impulsos serán muy prolongados y continuos. El controlador comprueba la tensión de la batería entre pulso y pulso.

- **Banco de baterías:** bloque que almacena la energía eléctrica generada por el panel solar fotovoltaico. Suelen ser la parte más sensible de un sistema fotovoltaico y las que mayor cuidado y atención requieren. Un banco de baterías puede durar entre cinco y diez años, después de dicho tiempo se hace necesario su reemplazo [40]. En este caso, el banco de baterías tendrá una duración máxima de seis (6) años.

Este bloque utiliza la batería tipo gel, la cual cuenta con una larga vida útil respecto a sus ciclos de descarga profunda. Además, es una tecnología madura que se presta muy bien a los sistemas fotovoltaicos de mayor potencia. De igual manera, este tipo de batería no requiere de mantenimiento alguno salvo la limpieza exterior de sus terminales, se caracterizan por ser aptas para aquellas aplicaciones que requieren un uso intenso de la batería y una recarga rápida.

- **Inversor DC/AC:** bloque que se encarga de convertir la corriente continua en corriente alterna, las características deseables para un inversor DC/AC se resumen de la siguiente manera: Alta eficiencia, bajo consumo en vacío, alta fiabilidad, protección contra cortocircuitos, seguridad y buena regulación de la tensión y frecuencia de salida [40].

4.1.2. Elementos bloques

A continuación, se especifica la manera como está compuesto lógicamente cada bloque del sistema.

La figura 16 presenta los elementos del bloque *panel solar fotovoltaico*.

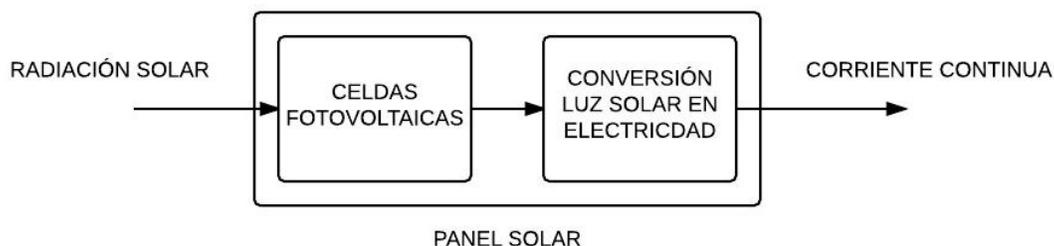


Figura 16: elementos bloque panel solar fotovoltaico.
Tomada de [37].

El bloque *panel solar fotovoltaico* está compuesto de los elementos bloque *Celdas Fotovoltaicas* y *Conversión Luz Solar en Electricidad*, adicionalmente, presenta las señales de *radiación solar* y *corriente continua* como entrada y salida del bloque, respectivamente.

- **Radiación solar:** señal de entrada de todo el sistema energético, sin radiación solar no hay electricidad, la radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol. Su principal aplicación es la generación de electricidad [41].
- **Celda fotovoltaica:** la potencia que genera una celda de tamaño estándar es muy pequeña (en torno a 1 o 5 W), por lo que será necesario tener que asociar varias de ellas con el fin de elevar a una mayor potencia [40]. Las agrupaciones se realizan en serie-paralelo y se componen de un conjunto de 72 celdas.
- **Conversión luz solar en electricidad:** la conversión la realiza la celda fotovoltaica, la cual transforma la energía lumínica en energía eléctrica mediante el efecto fotoeléctrico, generando energía solar fotovoltaica [40].
- **Corriente continua:** señal obtenida al final del proceso, en el panel fotovoltaico esta es entregada por medio de dos cables.

La figura 17 presenta los elementos del bloque *controlador de carga*.

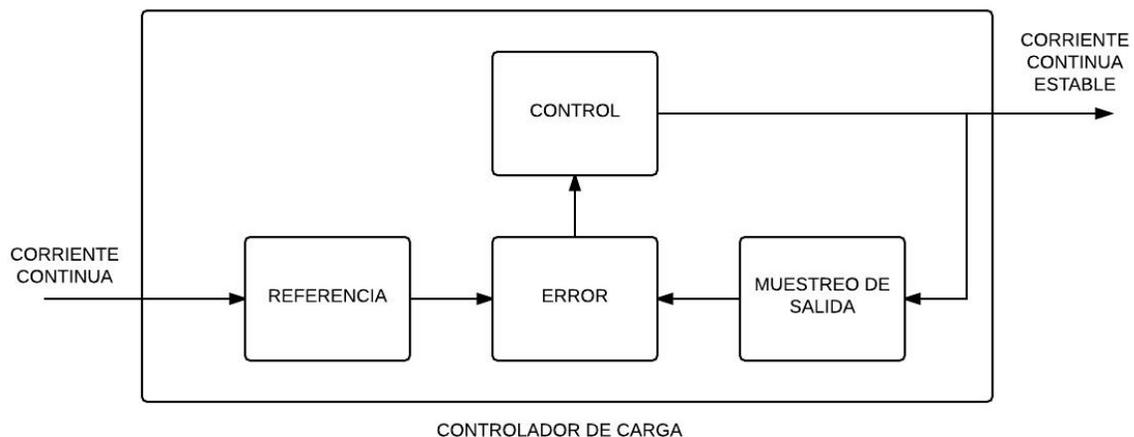


Figura 17: elementos bloque controlador de carga.
Tomada de [37].

El bloque *controlador de carga* está compuesto de los elementos bloque *Referencia, Error, Control y Muestreo de Salida*, adicionalmente, presenta señales de *corriente continua* y *corriente continua estable* como entrada y salida del bloque, respectivamente.

- **Corriente continua:** señal de entrada al bloque del controlador de carga, representa la corriente eléctrica generada por el bloque de panel solar.
- **Referencia:** elemento bloque que representa el proceso interno del controlador, corresponde a un valor deseado que se quiere llegue a la batería, en particular, el sistema de alimentación energético trabaja con 12 V.
- **Muestreo de salida:** elemento bloque que representa el valor de voltaje que hay en la salida del controlador.
- **Error:** elemento bloque que efectúa la suma entre la referencia y el muestreo de salida, idealmente debe ser cero (0), es decir, que el proceso está controlado.
- **Control:** elemento bloque donde se realizan correcciones de voltaje y se introduce un valor idóneo a las baterías.
- **Corriente continua estable:** señal de salida obtenida al final del proceso de control.

La figura 18 presenta los elementos de bloque *banco de baterías*.



Figura 18: elementos bloque banco de baterías.
Tomada de [37].

El bloque *banco de baterías* está compuesto del elemento bloque *Energía Química*, adicionalmente, presenta las señales de *energía eléctrica (generación)* y *energía eléctrica (consumo)* como entrada y salida del bloque, respectivamente.

- **Energía eléctrica (Generación):** señal de entrada al bloque de banco de baterías correspondiente a la salida del controlador.
- **Energía química:** elemento bloque encargado de realizar el proceso químico reversible llamado reducción-oxidación REDOX, en el cual uno de los componentes se oxida (pierde electrones) y el otro se reduce (gana electrones), proceso en donde los componentes no resultan consumidos ni se pierden [42].
- **Energía eléctrica (Consumo):** señal de salida del proceso de generación de energía eléctrica como elemento de alimentación energética al sistema de secado de café.

La figura 19 presenta los elementos de bloque del *inversor DC/AC*.

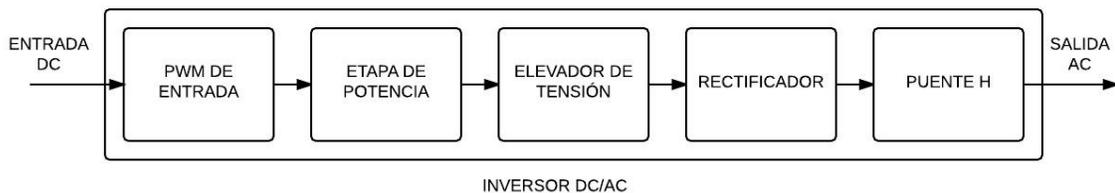


Figura 19: elementos bloque inversor DC/AC.
Tomada de [37].

El bloque *inversor DC/AC* está compuesto de los elementos bloque *PWM de Entrada*, *Etapa de Potencia*, *Elevador de Tensión*, *Rectificador* y *Puente H*, adicionalmente presenta las señales de *entrada DC* y *salida AC* como entrada y salida del bloque, respectivamente.

- **Entrada DC:** señal de entrada al bloque inversor DC/AC, correspondiente a la salida de voltaje controlada del bloque banco de baterías.
- **PWM de entrada:** elemento bloque encargado de modular el ancho de pulso para la señal de entrada.

- **Etapa de potencia:** elemento bloque formado por transistores que manejan corrientes de hasta 130 A.
- **Elevador de tensión:** elemento bloque que representa el transformador encargado de elevar la tensión.
- **Rectificador:** elemento bloque que rectifica la señal con el fin de obtener una tensión continua de valor elevado.
- **Puente H:** elemento bloque conformado por transistores en configuración de puente completo que se habilita con la señal enviada por el PWM para dar paso a la señal continua de tensión elevada y generar a la salida los 220 V (RMS).
- **Salida AC:** señal de salida del sistema energético renovable capaz de alimentar el motor AC conectado al secador de café.

4.1.2.1. Materiales

A continuación, se listan los materiales utilizados para la implementación del sistema energético renovable. En la tabla 15 se presenta el mapeo de cada elemento bloque a su implementación física.

Identificador	Elemento Físico	Elementos Bloque	Bloque
1	Panel solar	<ul style="list-style-type: none"> ● Radiación solar ● Celdas fotovoltaicas ● Conversion luz en electricidad ● Corriente continua 	Panel solar
2	Equipo Multifuncional	<ul style="list-style-type: none"> ● Corriente continua ● Referencia ● Error ● Muestreo de salida ● Control ● Corriente continua estable 	Controlador carga
		<ul style="list-style-type: none"> ● Entrada DC ● PWM de entrada ● Etapa de potencia ● Elevador de tensión ● Rectificador ● Puente H ● Salida AC 	Inversor DC/AC
3	Batería	<ul style="list-style-type: none"> ● Energía eléctrica (generación) ● Energía química (almacenamiento) ● Energía eléctrica (consumo) 	Banco de baterías
	<ul style="list-style-type: none"> Conector MC4 en Y macho Conector MC4 en Y hembra Conector MC4 simple hembra Conector MC4 simple macho Patch cord de cable tipo vehículo #8 rojo y negro para conexión de baterías Patch cord de cable tipo vehículo #8 rojo y negro para conexión de controlador a baterías Cable encauchetado duplex #8 rojo y negro para conexión de panel a regulador (mt) 	Elementos de conexión y cableado.	

Tabla 15: mapeo de los elementos bloque.
Tomada de [37].

4.1.3. Ensamble por elementos

Para el ensamble se procede de la siguiente manera. Cabe aclarar que este ensamble se realiza para fines de pruebas en el sistema energético renovable.

- **Estructura metálica:** se debe contar con una estructura capaz de soportar el peso de cuatro paneles solares de 300W, el cual es de 120Kg aproximadamente.



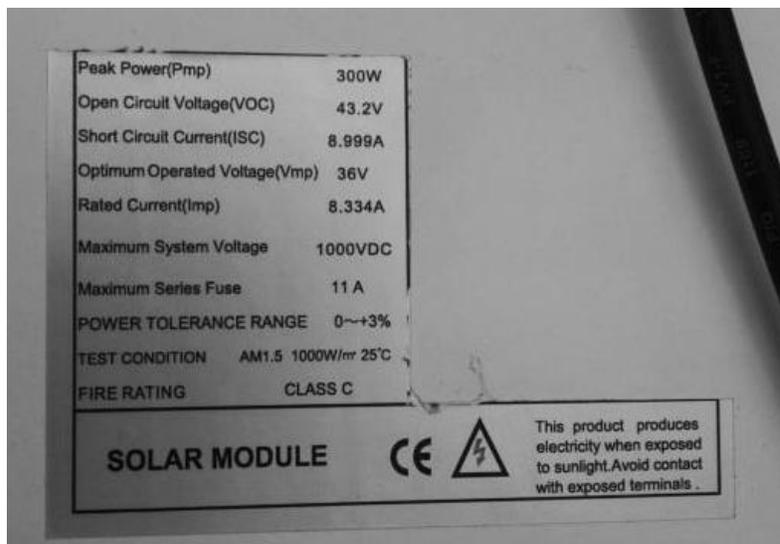
Figura 20: Estructura para paneles solares.
Tomada de [37].

- **Elementos de medición:** en la tabla 16 se listan los elementos empleados para el ensamble del sistema energético.

LISTA DE ELEMENTOS Y/O DISPOSITIVOS		
NOMBRE	CANTIDAD	FOTO
PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO	4	
EQUIPO MULTIFUNCIONAL	1	
BATERÍA	2	
CONECTOR MC4 EN Y MACHO Y HEMBRA	1	
PATCH CORD TIPO VEHÍCULO #8 ROJO, NEGRO Y BLANCO PARA CONEXIÓN DE BATERÍAS	1	
CABLE ENCAUCHETADO DUPLEX #8 PARA CONEXIÓN DE PANEL A REGULADOR	1	
MEDIDOR DE RADIACIÓN SOLAR	1	
PINZA VOLTIAMPERIMETRICA	1	
INCLINOMETRO	1	
BRÚJULA	1	
MULTÍMETRO	1	
CAJA DE HERRAMIENTAS BÁSICA	1	

Tabla 16: lista de elementos y/o dispositivos necesarios para el ensamble del sistema energético renovable.
Tomada de [37].

- **Procedimiento de ensamble:** se inicia verificando que los cuatro paneles solares fotovoltaicos cuenten con las características técnicas requeridas, estas se deben visualizar en el reverso de cada panel solar y deben ser las siguientes.



Fotografía 7: características técnicas del panel solar.
Tomada de [37].

Una vez verificado que los cuatro paneles cumplen con las características técnicas requeridas, se procede a ubicarlos en la estructura metálica dispuesta para ellos (*ver figura 20*). Luego, conectar dos paneles en serie y los otros dos paneles restantes también conectarlos en serie, ya que los terminales de los paneles traen incluidos los conectores, solamente se toma el terminal positivo de un panel y se conecta al terminal negativo del otro panel, lo cual debe hacer un sonido de “click” al conectarlos, luego, estas dos agrupaciones se conectan en paralelo, utilizando para los terminales positivos el “Conector MC4 en Y hembra”, y para los terminales negativos el “Conector MC4 en Y macho” y en estos conectores, conectar el “Cable encauchado dúplex #8 para conexión de panel a controlador”, de tal manera, el positivo sea conectado en el conector hembra y el negativo sea conectado en el conector macho. El esquema de conexión se muestra en la figura 21.

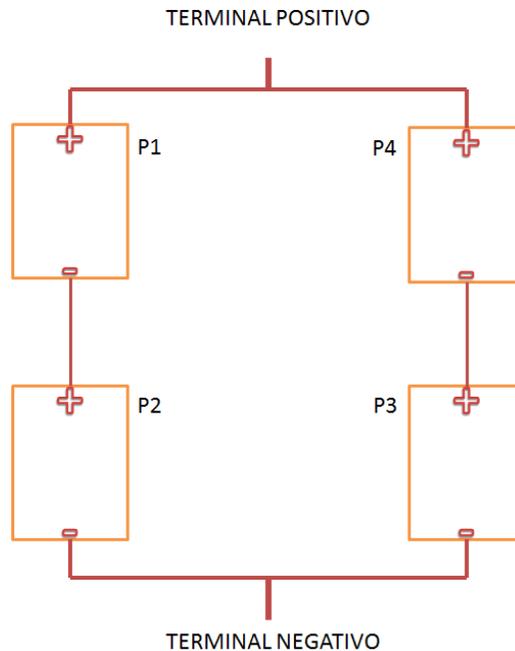


Figura 21: esquema de conexión de los paneles.
Propia.

La salida del arreglo de paneles, que son un terminal positivo (*blanco*) y un terminal negativo (*negro*), se conectarán luego en el equipo multifuncional (ver fotografía 9).

Verificar que las dos baterías cumplan con las características requeridas: “*Batería gel 12VDC 250Ah a 20°C marca MTEK*”, esta se debe ilustrar en un costado de la batería.

Estas baterías deben conectarse en serie para incrementar el valor del voltaje a 24V, para ello se juntan de forma paralela los lados más largos de las baterías, y el terminal positivo de una, se conecta al terminal negativo de la otra utilizando el “*Patch cord de cable tipo vehículo #8 blanco*”. A los terminales restantes se conectan el “*Patch cord de cable tipo vehículo #8 rojo y negro*”, respectivamente como muestra la fotografía 8.

Estos cables se conectan luego como muestra la fotografía 10.



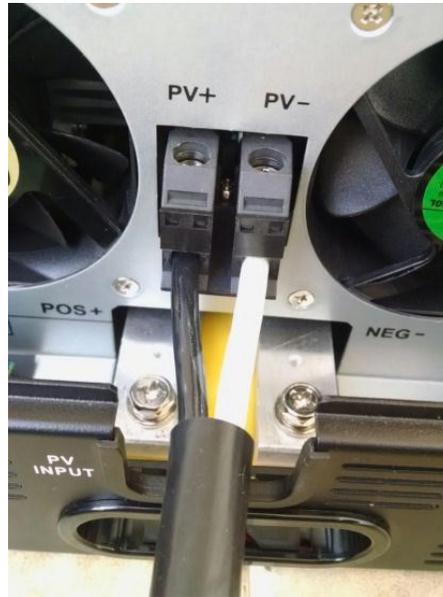
Fotografía 8: conexión real de las baterías.
Tomada de [37].

Este sistema energético trabaja con un equipo multifuncional, el cual contiene inversor monofásico y controlador solar. Se inicia verificando que cumpla con la siguiente característica: “*Marca Green energy, modelo GEMKS 2K-24 Plus. Incluye Inversor 24VDC-230VAC, 2000VA 60Hz onda seno pura y Controlador solar 1500W 60AMP*”.



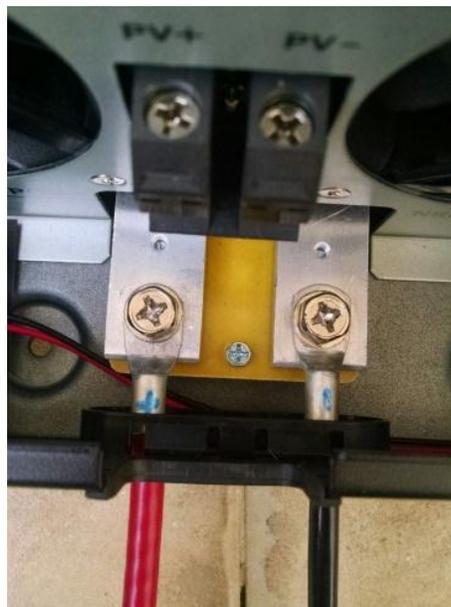
Fotografía 9: equipo multifuncional.
Tomada de [37].

Inicialmente se debe desatornillar la rejilla de protección para poder realizar las conexiones y cerciorarse de que el equipo se encuentra apagado (*switch en la posición off*). Una vez hecho esto se procede a conectar el arreglo de paneles solares, para ello se toman sus salidas y deben quedar conectadas así.



Fotografía 10: Conexión del arreglo de paneles al equipo multifuncional.
Tomada de [37].

Luego se conecta el banco de baterías.



Fotografía 11: conexión del banco de baterías al equipo multifuncional.
Tomada de [37].

Finalmente se atornilla la rejilla de protección.

El equipo multifuncional queda de la siguiente manera.



Fotografía 12: así queda la conexión al equipo multifuncional.
Tomada de [37].

Una vez realizada las conexiones del arreglo de paneles y el banco de baterías al equipo funcional, se puede conectar el motor que hace girar el cilindro que contiene el café en la salida AC del equipo multifuncional.

4.1.4. Plano por elemento

El plano por elemento del componente energético consiste en el diseño y cálculos del sistema para suministrar la energía suficiente de operación al ECOSECADOR.

- **Condiciones de diseño**

Los requerimientos de diseño del sistema son:

- Motor trifásico a 230Vac que funcionará durante 12 horas diarias con un consumo de 200W.
- Dos ventiladores DC encendidos durante 24 horas diarias, de 600mA y 12V cada uno.
- Un extractor DC encendido durante 24 horas diarias, de 300mA y 12V.
- Un extractor DC encendido durante 24 horas diarias, de 400mA y 12V.
- Placa arduino atmega 2560, de 800mA y 12V, encendido 24 horas diarias.

- **Cálculos del sistema**

Se procede a encontrar la potencia total que consumirá cada elemento.

$$P_M = 200W \quad (4.1.4.1)$$

$$P_{V1} = 600mA \times 12V = 7.2W \quad (4.1.4.2)$$

$$P_{V2} = 600mA \times 12V = 7.2W \quad (4.1.4.3)$$

$$P_{E1} = 300mA \times 12V = 3.6W \quad (4.1.4.4)$$

$$P_{E2} = 400mA \times 12V = 4.8W \quad (4.1.4.5)$$

$$P_A = 800mA \times 12V = 9.6W \quad (4.1.4.6)$$

Se debe tener en cuenta que los ventiladores al igual que la placa arduino trabajarán durante 24 horas por día, mientras que el motor trifásico solo trabajará 12 horas por día, en consecuencia, se debe calcular la demanda energética diaria en cada uno de los elementos.

$$D_E = (P_M \times 12) + (P_{V1} \times 24) + (P_{V2} \times 24) + (P_{E1} \times 24) + (P_{E2} \times 24) + (P_A \times 24) \quad (4.1.4.7)$$

$$D_E = (200 \times 12) + (7.2 \times 24) + (7.2 \times 24) + (3.6 \times 24) + (4.8 \times 24) + (9.6 \times 24) = 3189.6 \quad (4.1.4.8)$$

La D_E se aproxima a 3500 para garantizar el correcto funcionamiento de los elementos, ya que en estos sistemas solares autónomas existen pérdidas, bien sea por cableado, temperatura de los paneles solares, condiciones climáticas y demás.

$$D_E = 3500 \text{ Wh/día} \quad (4.1.4.9)$$

Posteriormente, se debe calcular la irradiación solar en la zona de instalación, para este caso en la ciudad de Popayán. Para ello, una herramienta proporcionada por la NASA llamada “NASA Surface meteorology and solar energy”, es utilizada para la obtención de la irradiación solar.

Una vez en la herramienta se deben ingresar los valores de latitud y longitud de la zona de instalación para obtener los siguientes valores.

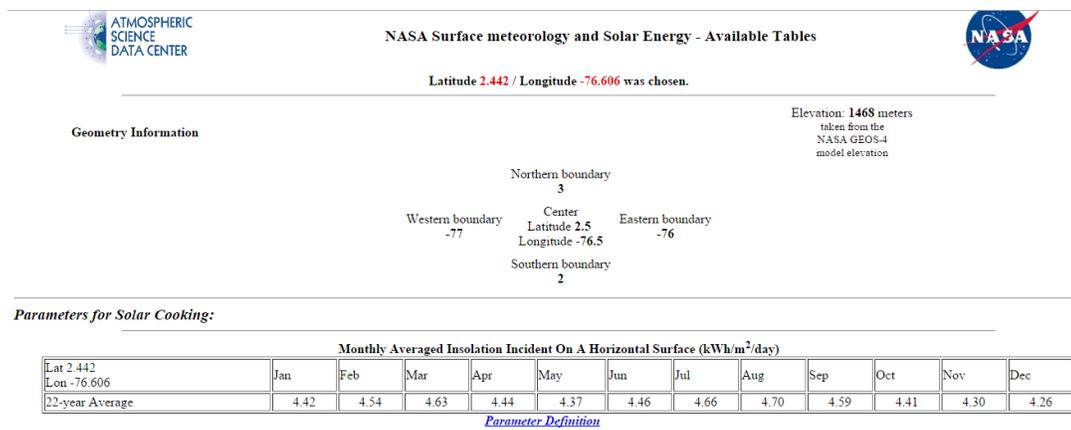


Figura 22: herramienta de la NASA para calcular la irradiación solar en una zona específica. Tomada de [37].

En la tabla 17 la irradiación mensual sobre una superficie horizontal.

IRRADIACIÓN MENSUAL SOBRE UNA SUPERFICIE HORIZONTAL (KWh/m2/día)	
ENERO	4,42
FEBRERO	4,54
MARZO	4,63
ABRIL	4,44
MAYO	4,37
JUNIO	4,46
JULIO	4,66
AGOSTO	4,70
SEPTIEMBRE	4,59
OCTUBRE	4,41
NOVIEMBRE	4,30
DICIEMBRE	4,26
PROMEDIO:	4,48

Tabla 17: promedio de radiación solar en Popayán. Tomada de [37].

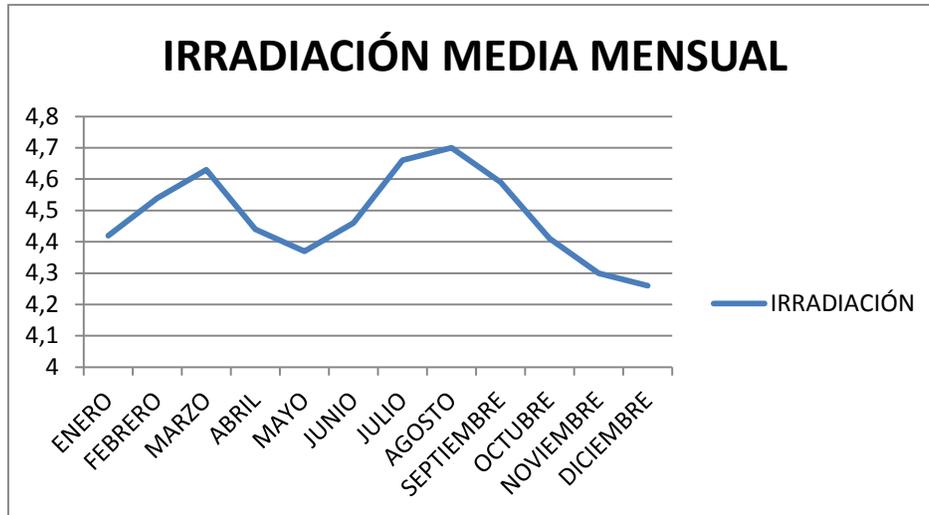


Figura 23: irradiación media mensual en Popayán. Propia.

En la figura 23, se puede apreciar que entre el mes de febrero, marzo y abril son los meses del primer semestre del año con mejor irradiación mensual, mientras que en el segundo semestre los mejores meses se encuentran entre julio, agosto y septiembre.

$$I_s = 4.48 \text{ KWh/m}^2/\text{día} \quad (4.1.4.10)$$

Se sugiere un $F_p = 1.2$ factor para compensar pérdidas.

Con estos datos hallados es posible calcular la potencia que deben generar los paneles solares.

$$P_p = \frac{F_p \times D_E}{I_s} = \frac{1.2 \times 3500}{4.48} \quad (4.1.4.11)$$

$$P_p = 937.5 \text{ W} \quad (4.1.4.12)$$

Es decir, que se necesita un panel de 937.5W para suplir las necesidades energéticas del sistema, pero en el mercado no se encuentra un panel con dicha

capacidad, por ende se calcula el número de paneles a utilizar, cada uno siendo de 300W de los cuales si se consiguen en el mercado.

$$N_p = \frac{P_p}{W_{max}} = \frac{937.5}{300} = 3.125 \quad (4.1.4.13)$$

Por ende se aproxima a **4 el número de paneles, cada uno de 300W, para una potencia total de 1200W.**

Los paneles deben ser fotovoltaico monocristalino, los cuales son los más eficientes en el mercado respecto a los policristalino o amorfo, además se deben buscar en el mercado los que brinden mayor eficiencia.

Una vez definida la cantidad de paneles y el tipo, se procede a calcular la capacidad de las baterías.

Donde A , es autonomía, es decir, tiempo sin brillo solar. Se recomienda que sea de dos días.

Donde E , es eficiencia de las baterías, la cual es de un 80% para las de ciclo profundo.

Donde D_{max} , es descarga máxima, se sugiere que sea del 50% para no afectar la vida útil de las baterías.

Donde V_S , es voltaje del sistema. Este sistema trabajará a 24V.

Donde P_b , es potencia de las baterías.

Donde C_b , es la capacidad que deberán tener las baterías, este es el dato a hallar.

$$A = 2 \text{ días} \quad (4.1.4.14)$$

$$D_E = 3500 \text{ Wh/día} \quad (4.1.4.15)$$

$$E = 80 \% \quad (4.1.4.16)$$

$$P_b = \frac{A \times D_E}{E \times D_{max}} = \frac{2 \times 3500}{0.8 \times 0.5} = \frac{7000}{0.4} \quad (4.1.4.17)$$

$$P_b = 17500 \quad (4.1.4.18)$$

$$C_b = \frac{P_B}{V} = \frac{17500}{24} = 729.16 \text{ Ah} \quad (4.1.4.19)$$

Por lo tanto para garantizar un funcionamiento continuo del sistema se debe contar con un **arreglo de baterías de 800 Ah**.

4.1.5. Wiring

La figura 24 presenta el diagrama de conexión del componente energético.

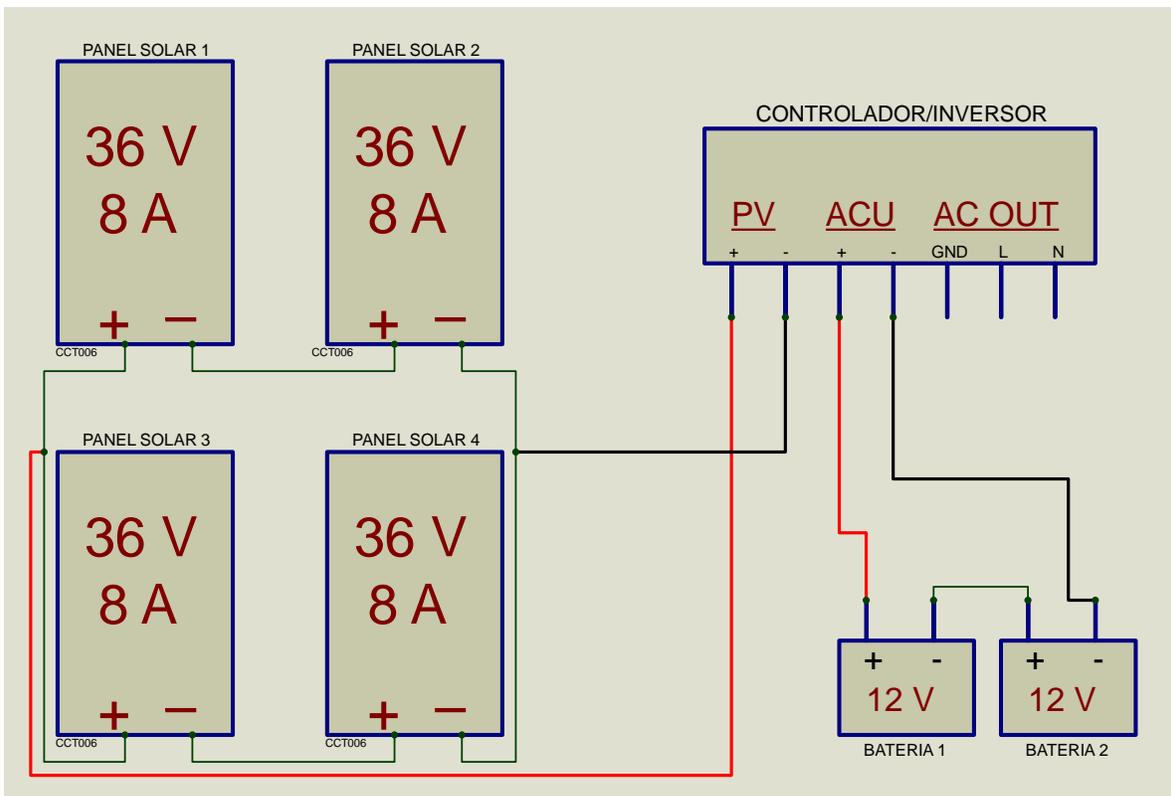


Figura 24: diagrama de conexión sistema energético.
Tomada de [37].

La tabla 18 presenta la descripción del cableado de cada elemento del sistema energético.

ELEMENTO	COLOR CABLE	SIGNIFICADO
Arreglo de paneles.	Verde	Conexión paneles serie-paralelo.
	Rojo	Rama positiva de los paneles al positivo del controlador (PV+).
	Negro	Rama negativa de los paneles al negativo del controlador (PV-).
Banco de baterías.	Verde	Conexión baterías en serie.
	Rojo	Positivo del banco de baterías al (POS+) del controlador.
	Negro	Negativo del banco de baterías al (NEG-) del controlador.
Controlador/Inversor.	GND	Salida de conexión a tierra del motor.
	L	Salida a Línea del motor.
	N	Salida de conexión a neutro del motor.

Tabla 18: descripción del cableado.
Tomada de [37].

4.1.6. Troubleshooting

La verificación del funcionamiento del sistema procede la siguiente manera:

Todo el sistema energético renovable debe estar conectado y los paneles solares deben estar posicionados en la estructura diseñada para ellos.

Haciendo uso del inclinómetro se procede a medir la inclinación de los paneles en la estructura, la cual debe estar en un rango de 5° a 10°. Si el valor es diferente, cerciorarse de que la estructura esté ubicada en una zona totalmente plana donde no haya ninguna obstrucción natural como: piedras, madera, barro, etc., que puedan afectar la estabilidad de la estructura. En este paso no ocurre inconveniente ya que la estructura es totalmente fija, es decir, que no varía su ángulo de inclinación.

El corazón del sistema energético renovable es el equipo multifuncional inversor/controlador, este es el que controla toda la operación de carga de baterías, recibe la energía de los paneles y entrega la potencia al motor.

- **Operación del equipo multifuncional**

Con todos los dispositivos bien conectados se procede a encender el equipo multifuncional, en la parte de atrás se encuentra el switch de apagado/encendido, ponerlo en posición “on”.

En la parte frontal de operación se encuentra el panel de visualización, tres leds indicadores y cuatro botones de funciones.

En la tabla 19 se especifica las indicaciones de los leds.

LED INDICADOR		MENSAJE	
AC/INV	Verde	Continuo.	La salida se alimenta por la utilidad en modo Linea.
		Intermitente.	La salida se alimenta por batería o PV en modo batería.
CHG	Verde	Continuo.	Batería totalmente cargada.
		Intermitente.	Batería está cargando.
FAULT	Rojo	Continuo.	Falla ocurrida en el inversor.
		Intermitente.	Peligro ocurre una condición en el inversor.

Tabla 19: indicadores leds.
Tomada de [37].

En la tabla 20 se especifica las funciones de los botones.

FUNCIÓN DE BOTÓN	DESCRIPCIÓN
ESC	Para salir del modo de ajuste.
UP	Para ir a la selección anterior.
DOWN	Para ir a la selección siguiente.
ENTER	Confirmar la selección en el modo de ajuste.

Tabla 20: funciones de los botones.
Tomada de [37].

Una vez referenciados los botones para la navegación, en la pantalla LCD se pueden encontrar diferentes iconos que sirven de información para saber el estado en el que se encuentran los dispositivos conectados al equipo multifuncional, como el estado de las baterías, el estado de los paneles solares, la configuración actual del sistema, información de salida, información de carga e información de modo de operación.

Para realizar ajustes al sistema, se debe presionar por tres (3) segundos el botón ENTER y una vez en el modo ajustes con el botón DOWN se busca el programa número 02 el cual es *máxima carga de corriente* y se presiona ENTER, con esto el sistema actuará de forma automática.

Por ende si todo está bien conectado y el equipo multifuncional bien programado, en la parte frontal del equipo solo debe estar intermitente el led verde de CHG indicando que la batería se encuentra cargando y en la pantalla LCD debe estar visible la opción seleccionada.

En la tabla 21 se especifica una lista de posibles problemas y soluciones que podrían ocurrir en el equipo.

PROBLEMA	LCD/LED/BUZZER	EXPLICACION/POSIBLE CAUSA	QUE HACER
Unidad se apaga automaticamente durante el proceso de encendido.	LCD/LED y BUZZER estarán activos durante 3 segundos y luego se apagarán.	El voltaje de la batería es demasiado bajo (<1.91V/celda).	1. Recargar batería. 2. Reemplazar batería.
No responde despues del encendido.	No hay indicación.	1. El voltaje de la batería es demasiado bajo (<1.4V/celda). 2. La polaridad de la batería está invertido.	1. Verificar si las baterías y el cableado está bien conectado. 2. Recargar batería. 3. Reemplazar batería.
Existe alimentación, pero la unidad funciona en modo de batería.	La tensión de entrada es cero (0) en la LCD y el LED verde parpadea.	Protector de entrada se dispara.	Comprobar si el interruptor de AC se dispara y si el cableado de AC está bien conectado.
	LED verde parpadea.	Calidad insuficiente de alimentación AC.	1. Verificar si los cables de AC son muy delgados y/o muy largos. 2. Verificar si el generador (si aplica) está trabajando bien o si los rangos de la entrada de voltaje son correctos.
	LED verde parpadea.	Ajuste "Solar First" como la prioridad de la fuente de salida.	Cambie la prioridad de la fuente de salida a "Utility First".
Cuando la unidad está encendida, el rele interno se enciende y se apaga repetidamente.	Display LCD y los LEDs están parpadeando.	La batería está desconectada.	Verificar si los cables de la batería están bien conectados.

BUZZER emite un pitido continuo y el LED rojo está encendido.	Código de falla 07.	Error de sobrecarga. El inversor está sobrecargado 110% y el tiempo ha terminado.	Reducir la carga conectada apagando algún equipo.
	Código de falla 05.	Salida de un cortocircuito.	Verificar si el cableado está bien conectado y remover la carga anormal.
		Temperatura del componente convertidor interno es mas de 120°C. (Solo para modelos 1-3KVA).	Verificar si la unidad de ventilación está bloqueada o si la temperatura ambiente es demasiado alta.
	Código de falla 02.	Temperatura interna del componente inversor es mas de 120°C.	
	Código de falla 03.	Bateria sobre-cargada.	Llevar al centro de reparación.
		El voltaje de la batería es demasiado alto.	Verificar si las especificaciones y cantidad de baterías cumplen con los requisitos.
	Código de falla 01.	Falla del ventilador.	Reemplazar el ventilador.
	Código de falla 06/58.	Salida anormal (voltaje invertido por debajo de 190Vac o es mas alto que 260Vac).	1. Reducir la carga conectada. 2. Llevar al centro de repación.
	Código de falla 08/09/53/57.	Componentes internos fallando.	Llevar al centro de reparación.
	Código de falla 51.	Sobre corriente o sobre tensión.	Reiniciar la unidad, si el error ocurre de nuevo, llevar al centro de reparación.
	Código de falla 52.	La tensión del BUS es demasiado baja.	
	Código de falla 55.	Salida de voltaje desbalanceado.	
Código de falla 56.	Batería no está bien conectada o el fusible está quemado.	Si la batería está bien conectada, llevar al centro de reparación.	

Tabla 21: fallas y soluciones del equipo multifuncional.
Tomada de [37].

4.1.7. Validación del sistema energético renovable

La implementación del sistema energético renovable se realizó a una escala de reducción de 1:100, en donde la finalidad fue aproximar los resultados a unas condiciones reales para el posterior análisis de los mismos.

Las condiciones de diseño para el sistema real fueron las siguientes (ver sección 4.1.4.):

- Motor trifásico a 230Vac que funcionará durante 12 horas diarias con un consumo de 200W.
- Dos ventiladores DC encendidos durante 24 horas diarias, de 600mA y 12V cada uno.
- Un extractor DC encendido durante 24 horas diarias, de 300mA y 12V.
- Un extractor DC encendido durante 24 horas diarias, de 400mA y 12V.
- Placa arduino atmega 2560, de 800mA y 12V, encendido 24 horas diarias.

El cálculo del sistema real fue de $D_E = 3500 Wh/dia$, este valor es la carga eléctrica del ECOSECADOR, es decir, esa carga incluye el consumo de potencia del motor, ventiladores, extractores y demás.

4.1.7.1. Cálculos del sistema a escala

La escala que se utilizó es de 1:100 y con una $D_E = 3500 Wh/dia$ se calcula la nueva D_E para el prototipo.

$$\begin{array}{l} 1 \rightarrow 100 \\ x \rightarrow 3500 \end{array} \quad (4.1.7.1.1)$$

$$x = \frac{1 \times 3500}{100} = 35 \quad (4.1.7.1.2)$$

Con $D_E = 35 Wh/dia$ a escala se calculó la potencia que deben generar los paneles solares.

$$P_P = \frac{F_P \times D_E}{I_S} = \frac{1,2 \times 35}{4,48} \quad (4.1.7.1.3)$$

$$P_P = 9,37W \quad (4.1.7.1.4)$$

De tal manera, que se utilizó un panel solar de 10W de potencia y 17,5V máximo.

De igual manera, se calculó la capacidad de la batería.

$$P_b = \frac{A \times D_E}{E \times D_{max}} = \frac{2 \times 35}{0,80,5} = \frac{70}{0,4} \quad (4.1.7.1.5)$$

$$P_b = 175 \quad (4.1.7.1.6)$$

$$C_b = \frac{P_b}{V} = \frac{175}{24} = 7,29 \text{ Ah} \quad (4.1.7.1.7)$$

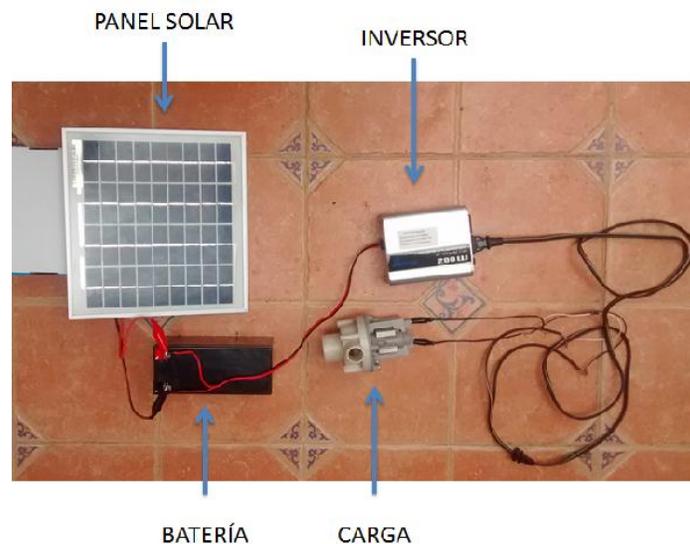
La batería que se utilizó cuenta con una capacidad de 7,5Ah.

El prototipo construido está formado a grandes rasgos por los siguientes componentes:

- Panel solar de 10W, voltaje máximo de 17,5V.
- Batería sellada de 7,5Ah a 12V.
- Inversor de corriente de 200W de 12V a 110V.
- Motor de corriente alterna de 110-127Vac a 60Hz el cual simula la carga del ECOSECADOR.

4.1.7.2. Puesta en marcha del prototipo

Una vez definidos y calculados los componentes del sistema energético, se conectaron como se muestra en la fotografía 13. El panel solar cuenta con una inclinación de 4°, el cual es el apropiado respecto a la ubicación de la línea ecuatorial.



Fotografía 13: sistema energético renovable a escala.
Propia.

En la fotografía 13 se puede apreciar que el panel solar está conectado a la batería, la batería se conectó al inversor y a su vez el inversor se conectó a la carga.

4.1.7.3. Pruebas realizadas y resultados

Se realizaron una serie de ensayos llevados a cabo mediante mediciones con el objetivo de analizar el prototipo en funcionamiento intentando acercarse a las condiciones de trabajo normal.

a) Pruebas con batería

Se realizaron pruebas para conocer el tiempo de carga de la batería y la autonomía de la misma sin sol. Es importante conocer estos valores debido a que es la batería la que suple la corriente necesaria para la aplicación en las noches, días nublados o sin sol.

- **Tiempo de carga de la batería con el motor desconectado:**

Se conoció el tiempo promedio que tarda la batería desde que se queda descargada hasta que adquiere un valor de carga que permita su uso para la aplicación. Es útil saber el tiempo necesario que se debe esperar desde que se gastan las baterías hasta que se pueden usar otra vez, por supuesto el tiempo depende de las condiciones de irradiación solar que exista en el momento.

La batería se descargó hasta un 60% de su capacidad para realizar las pruebas, estas se realizaron entre las 09:00 Am y 05:00 Pm durante cinco días. En la fotografía 14 la conexión entre el panel solar y la batería.

En la tabla 22 se observan las horas de carga estimado para que la batería llegara al 90% de su capacidad durante cinco días de prueba, no fue posible llegar al 100% debido a que demanda más tiempo para poder cargarse.



Fotografía 14: conexión entre panel solar y batería.
Propia.

En la tabla 22 las horas estimadas para cargar la batería.

DIA	IRRADIACION MEDIA MES DE FEBRERO (KWh/m2/dia)	HORAS DE CARGA ESTIMADO
1	4,54	9
2	4,54	8
3	4,54	8
4	4,54	7
5	4,54	8

Tabla 22: horas de carga estimadas para la batería.
Propia.

En la figura 25 la grafica de horas estimadas durante cinco dias para cargar la batería.

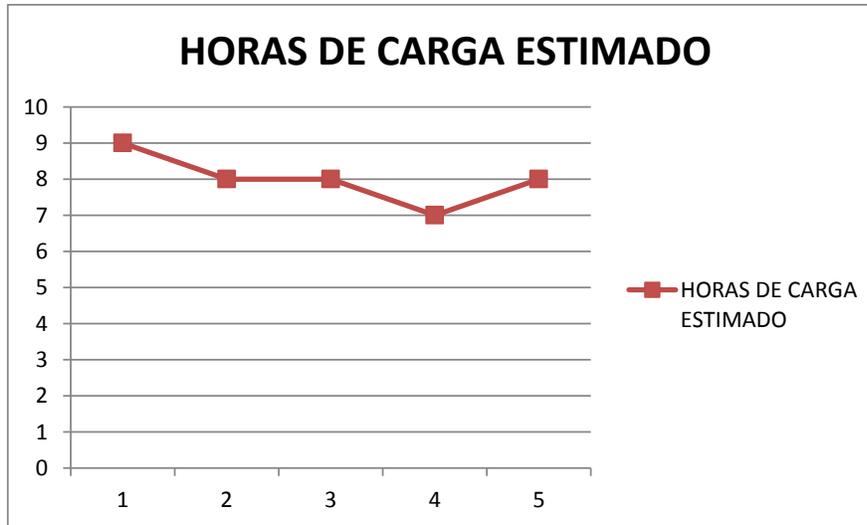


Figura 25: grafica de horas estimado durante cinco días.
Propia.

Con un promedio de carga de 8 horas por día para una capacidad del 90%.

- **Autonomía sin sol:**

Se midió el tiempo que tarda la batería en descargarse por completo cuando el motor es conectado, la medición se realizó con el panel solar desconectado, lo cual simula un día sin sol.

La prueba se realizó durante dos días, con la batería al 100% de su capacidad. En la fotografía 15 la conexión de la batería con la carga.



Fotografía 15: conexión entre la batería y la carga.
Propia.

Observando los tiempos de carga de la batería y pensando en lo que puede ser una temporada de lluvias, se determina que el tiempo de carga es largo para una batería de tan solo 7,5Ah, además, esta no logró cargarse hasta el 100% de su capacidad en las 8 horas que se dispusieron para su carga. Los valores se calcularon para una carga de la batería en vacío, es decir, sin ninguna carga conectada (motor, ventiladores, extractores y demás). Así que, teniendo unos días de mal tiempo el sistema energético se encontraría en una situación comprometida si la carga está conectada mucho tiempo.

b) Pruebas de conexión directa

El objetivo de la prueba consistió en determinar la curva de relación entre el panel solar y la carga directamente, sin el uso de batería. La carga fue alimentada a una tensión de corriente alterna variable en función de la irradiación del momento.

Se conectó el panel solar y la carga al inversor, se hicieron mediciones cada 20 minutos en la hora más favorable del día (12:00 Pm) para conseguir una máxima irradiación solar. En la fotografía 16 la conexión entre el panel solar, el inversor y la carga.



Fotografía 16: conexión entre panel solar, inversor y la carga.
Propia.

En la tabla 23, se recogen los datos de voltaje, corriente y potencia generada por el panel solar, de igual manera, la potencia de salida obtenida en la carga.

MEDIDAS	PANEL SOLAR			CARGA
	VOLTAJE (V)	CORRENTE (I)	POTENCIA (W)	POTENCIA SALIDA (W)
1	17,2	0,19	3,268	14,3792
2	17,19	0,21	3,6099	15,52257
3	17,3	0,18	3,114	12,7674
4	17,2	0,19	3,268	14,3792
5	17,03	0,22	3,7466	17,98368
6	16,92	0,23	3,8916	19,06884
7	16,9	0,25	4,225	21,5475
8	16,9	0,25	4,225	21,5475
9	16,6	0,26	4,316	22,4432
10	16,4	0,27	4,428	23,4684

Tabla 23: mediciones en el panel solar y la carga.
Propia.

En la figura 26, la conexión entre el panel solar con la carga directa, en donde se observa la proporción que se guarda entre una y otra.

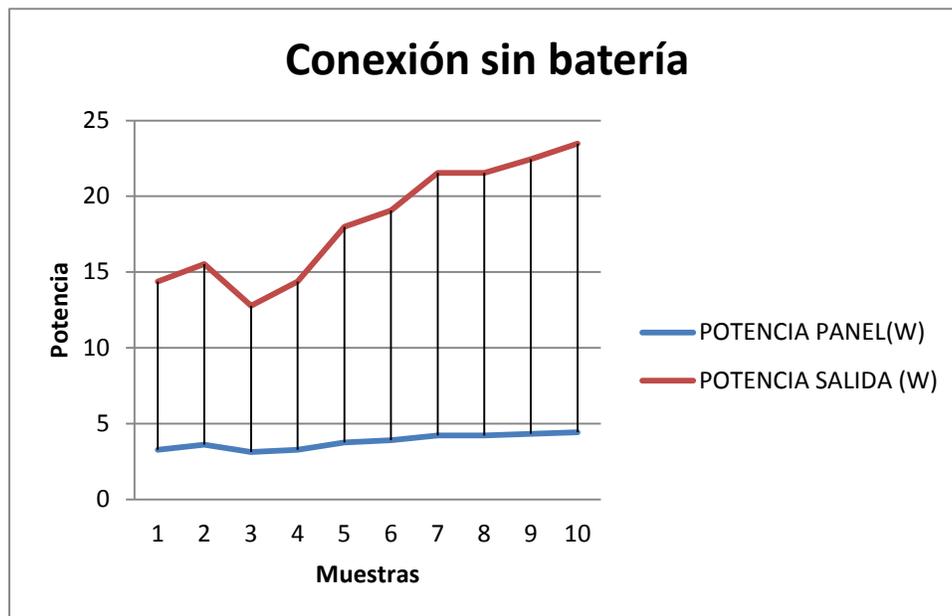


Figura 26: demostración de la proporcionalidad entre la potencia generada y la potencia de salida sin batería.
Propia.

Es importante conocer la potencia generada a la salida del inversor en función de la potencia que genera el panel solar la cual varía dependiendo de la irradiación que esté recibiendo en el momento.

Se determinó que, el funcionamiento de la carga es directamente proporcional a la potencia que genera el panel solar, que a su vez depende de la irradiación incidente en cada momento.

c) Rendimiento del sistema

La prueba final consistió en conectar todo el sistema energético; el panel solar a la batería, la batería al inversor y el inversor a la carga, este conjunto simula una condición normal de trabajo.

La medición se realizó desde la 11:00 Am en pleno sol y con la batería cargada en un 100% hasta las 06:00 Pm en la puesta del sol.

El objetivo fue determinar cómo afecta la irradiación solar en sostener el porcentaje de carga de la batería en un 100% y como ésta a medida que se descarga disminuye la potencia de salida en el inversor.



Fotografía 17: sistema energético en condiciones normales de trabajo.
Propia.

En la tabla 24 se observan la medición de voltaje, corriente y potencia generado por el panel solar, como también, el porcentaje de la batería en condiciones iniciales de trabajo y la potencia de salida en el inversor.

HORAS	PANEL SOLAR			BATERÍA	INVERSOR
	VOLTAJE (V)	CORRENTE (I)	POTENCIA PANEL(W)	PORCENTAJE DE CARGA	POTENCIA SALIDA (W)
11:00 a. m.	16,5	0,18	2,97	100%	35W
12:00 p. m.	16,8	0,18	3,024	98%	35W
1:00 p. m.	17,1	0,17	2,907	99%	35W
2:00 p. m.	16,9	0,18	3,042	96%	35W
3:00 p. m.	13,4	0,19	2,546	95%	35W
4:00 p. m.	4,3	0,24	1,032	90%	26W
5:00 p. m.	1,9	0,27	0,513	79%	15W
6:00 p. m.	1,2	0,29	0,348	61%	10W

Tabla 24: medición de valores en condiciones normales de trabajo. Propia.

En cuanto al rendimiento del sistema, este funciona con total normalidad siempre y cuando la batería este cargada a un 100% de su capacidad, según los cálculos el panel solar es capaz de mantener la capacidad de la batería por encima del 95% obteniendo una salida en la carga de 35W condición normal de trabajo. Pero una vez el panel deja de recibir irradiación solar, la batería empieza a descargarse de manera rápida afectando el funcionamiento de la aplicación ya que la potencia de salida en el inversor disminuye de manera drástica.

4.2. Diseño en SolidWorks del seguidor solar para el arreglo de paneles

El seguidor solar es un dispositivo mecánico capaz de orientar el arreglo de los cuatro paneles de forma perpendicular a los rayos solares para un mejor aprovechamiento de la radiación solar. Teniendo en cuenta que el sol en el amanecer se encuentra en el este y en la puesta termina su recorrido en el oeste, un panel estático no aprovecha el tiempo máximo de radiación de la misma manera como lo harían con seguimiento solar, ya que los estáticos permanecen en una posición determinada.

En la sección **2.2.4.**, se afirma que el uso de seguidores solares ha reportado ganancias superiores al 20% en estudios de campo versus a tener un arreglo de paneles de forma estática, este 20% resulta ser un determinante para diseñar un seguidor solar, para este caso de un solo eje debido a que los seguidores de dos ejes no presentan mayor incremento comparado con el costo que tiene su implementación.

SolidWorks es un software CAD que permite modelar cualquier estructura mecánica de manera confiable, ya que su validación se realiza mediante el

método de elementos finitos (*MEF*) el cual ha adquirido una gran importancia en la solución de problemas de ingeniería.

El **método de elementos finitos** permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real, más fácil y económico de modificar que un prototipo. Para la solución de problemas de ingeniería, se emplea la resolución de problemas que involucran un alto grado de complejidad, de matemáticas aplicadas, así como las fisicomatemáticas, ya que la gran mayoría de los problemas que se presentan en estas áreas, comúnmente involucran geometrías complejas, cargas no distribuidas y determinación de propiedades de materiales. Por ende se puede analizar estructuras, problemas de transferencia de calor, flujo de fluidos, transporte de masa así como el cálculo de potencial electromagnético [43].

Otro aspecto de suma importancia en el diseño del seguidor es el dispositivo mecánico que va a realizar el movimiento de la base, para ello, se utiliza un actuador lineal el cual convierte el movimiento de rotación de un motor de corriente continua de baja tensión en movimiento lineal, es decir, los movimientos de empuje y halado [44]. Esto con el fin de simplificar el diseño, ya que con la utilización de un motor paso a paso, por ejemplo, se tendría que utilizar un juego de engranaje para realizar el movimiento del seguidor.

4.2.1. Metodología de diseño del seguidor solar de 1 eje, software CAD SolidWorks 2014

El ECOSECADOR está pensado, diseñado y se está implementando para que pueda trasladarse e instalarse en un espacio cualquiera para su uso, por tal motivo todos los componentes inmersos en él deben contar con este requerimiento, de tal manera que el diseño del seguidor solar debe brindar la opción de armar y desarmar en cualquier espacio para su uso, así mismo se debe tener en cuenta que la superficie en donde se instalara puede ser de cemento/concreto o tierra firme, de tal manera que este se convierte en el requerimiento principal para su diseño, otros aspectos que se tienen en cuenta es la utilización de un actuador lineal de bajo consumo.

Para plasmar el seguidor solar se procedió a modelar completamente cada parte del mismo, determinar las sujeciones adecuadas y los componentes electrónicos.

- **Panel solar fotovoltaico de 300W:** el panel fue diseñado tomando como referencia dimensiones reales medidas. En la tabla 25 los materiales y medidas del panel solar, la fotografía 18 el panel real y la figura 27 el panel modelado.

MATERIALES	
Marco	Aleación de aluminio anodizado
Panel	Vidrio laminado
MEDIDAS	
Largo	195cm
Alto	99cm
Ancho	4cm

Tabla 25: materiales y medidas del panel solar.
Propia.

En la fotografía 18 se observa el panel real utilizado para el sistema energético renovable.



Fotografía 18: panel real.
Propia.

Y en la figura 27 se observa el panel de 300W modelado en SolidWorks.

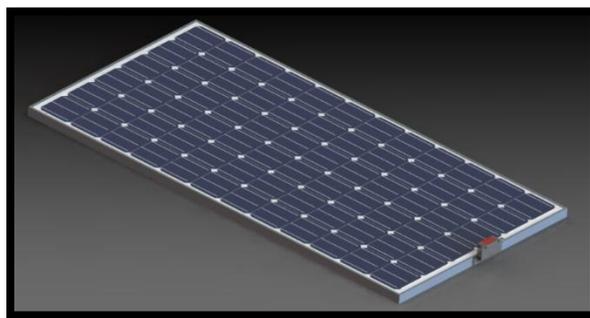


Figura 27: panel de 300W modelado.
Propia.

El sensor fotoeléctrico es meramente tentativo, se descargó de una fuente de modelos CAD en internet, además se consultó un catálogo de la empresa TELEMECANIQUE para ajustar las medidas a los productos ofrecidos en dicho catálogo. Cabe recalcar que la ubicación del sensor es tentativa también, por simplicidad del modelo no se muestra el cableado.

El soporte del sensor se diseñó en función de las dimensiones tanto de los agujeros de sujeción como de los laterales del marco del panel. El material escogido fue un acero AISI 1020 laminado en frío.

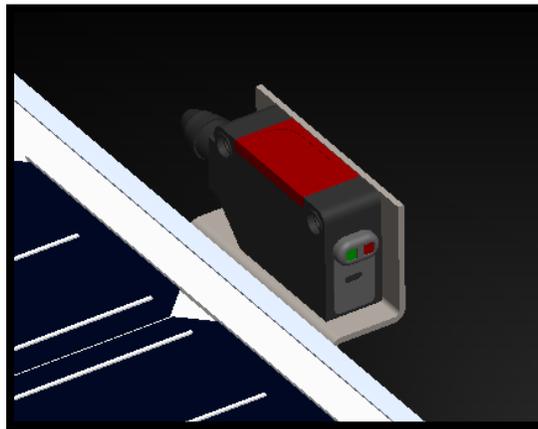


Figura 28: sensor fotoeléctrico.
Propia.

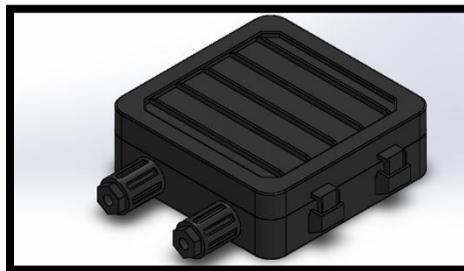


Figura 29: caja de conexiones del panel solar.
Propia.

- **Soporte para panel solar:** para el diseño del soporte, se determinó que fuera de fácil desarme desde la base y para eso se concibió su forma como una semejanza a una ramificación.

Los perfiles donde se apoya el panel coinciden con los agujeros de instalación del mismo y el larguero inferior sostiene en un sistema de voladizo el cuerpo del panel solar. Es apoyado además por unos refuerzos atornillados a la base y pasadores de alta resistencia (*ver sección base giratoria*).

Debido a las dimensiones de cada panel, se optó por diseñar el soporte de perfilaría rectangular de acero estructural; el software tiene por defecto el acero ASTM A36 que es el material más común para conformar esos perfiles.



Figura 30: soporte para panel solar.
Propia.

En la tabla 26 las dimensiones del soporte.

DIMENSIONES EN mm	
Apoyo para panel	60x40x4.0
Larguero	90x50x3.2

Tabla 26: dimensiones en milímetros para el soporte.
Propia.

Las 4 bridas de sujeción para los paneles se modelaron usando como material aleación de aluminio 1060, en láminas de 1/8 de pulgada de espesor (parte superior). Estas se atornillan a los perfiles de acero con tornillos de cabeza hexagonal M8x1.25x55.

Dos bridas en “U” de acero inoxidable 304 (parte inferior) unen el larguero a los soportes del panel, mediante tornillería de cabeza hexagonal M10x1.5x50 y pasadores de acero AISI 4130 de diámetro 10mm.



Figura 31: bridas de sujeción.
Propia.

- **Base giratoria:** el diseño de la base también se pensó para que fuera desmontable de la columna. La base está conformada por un bastidor de tubería rectangular de 100x50x3.6mm en acero ASTM A36.

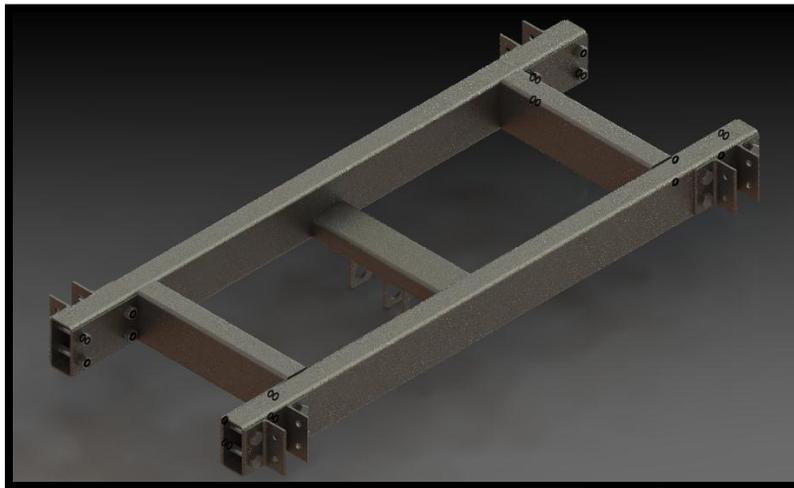


Figura 32: base giratoria.
Propia.

La sujeción de los largueros para los soportes de paneles es como se muestra en la figura 33. Estas dejan ver las conexiones con pasadores, refuerzo y tornillería. Para cada panel se usaron:

Pasadores: 2 pasadores de acero AISI 4130 de diámetro 1/2 pulgada.

Bridas de anclaje: 2 bridas, ángulo estructural 50x50x4mm ASTM A36.

Tornillos hexagonales: 4 tornillos de 1/2x25x2.75 con tuerca.

Lamina soporte: 1 lamina trasera de 150x100, espesor 3/8 de pulgada en acero AISI 1020.

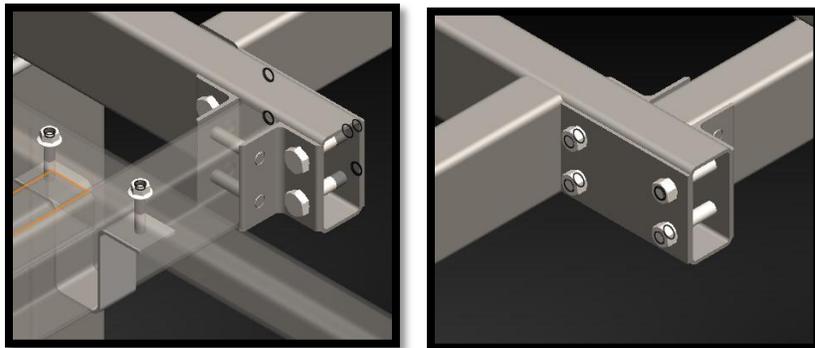


Figura 33: sujeción de largueros.
Propia.

En la figura 34 se muestran las 2 bridas que hacen bascular la parte superior con respecto a la columna para realizar el giro del seguidor. Estas sujetarán 2 pasadores de 30mm de diámetro hechos de acero AISI 1020.

Las bridas son conformadas en acero AISI 4340 para dar una alta resistencia a las solicitudes de carga propias del funcionamiento del seguidor. Estarán sujetas al larguero central del bastidor con tornillos autorroscantes de diámetro mínimo 10mm.

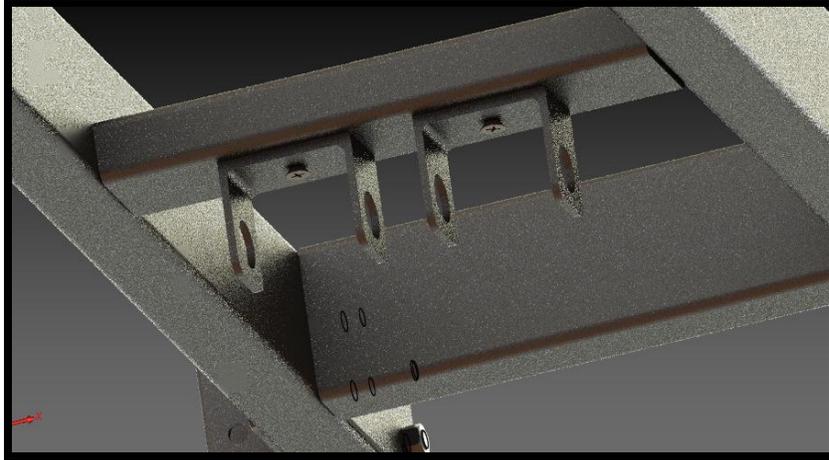


Figura 34: bridas para bascular.
Propia.

- **Conjunto columna:** en cuanto al diseño de la columna, se pensó en una forma que combinara resistencia a las principales fuerzas que inciden sobre ella (carga muerta y carga de viento), con la capacidad de hacerla lo más liviana posible sin perjudicar las prestaciones mecánicas y la integridad estructural de la columna.

Se optó por un arreglo de 2 tubos rectangulares (1) de 90x50x3.2mm en ASTM A36 con una longitud aproximada de 1500mm. Estos se unen mediante varillas roscadas (acero inoxidable AISI 304) de 1/2 pulgada (2) y láminas de acero ASTM A36 al soporte superior (3) que conecta las bridas de pivote (AISI 4340); así como a los sistemas de anclaje a tierra (4) para formar un conjunto más sólido (*ver figura 30*).

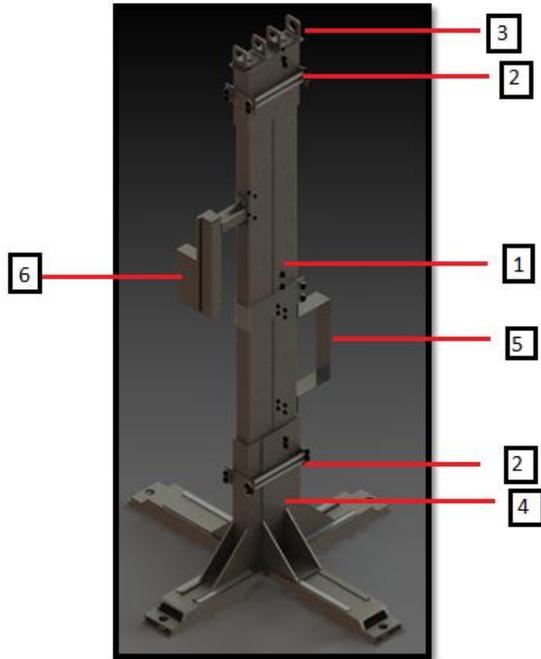


Figura 35: conjunto columna seguidor solar.
Propia.

El soporte para la caja de control (5) es de lámina de acero AISI 1020 de calibre 1/8 de pulgada y está atornillada a la columna con tornillería autorroscante de diámetro 5/16 de pulgada.

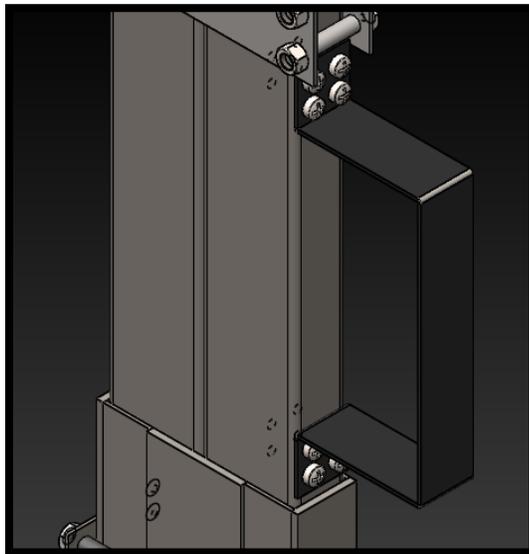


Figura 36: soporte para la caja de control.
Propia.

El apoyo (6) para el actuador lineal está construido con tubería rectangular de 80x40x3.2mm para la base y de 40x40x2.6mm para los brazos que van atornillados a la columna. La sujeción se realiza con tornillos de cabeza hexagonal con diámetro mínimo de 8mm.

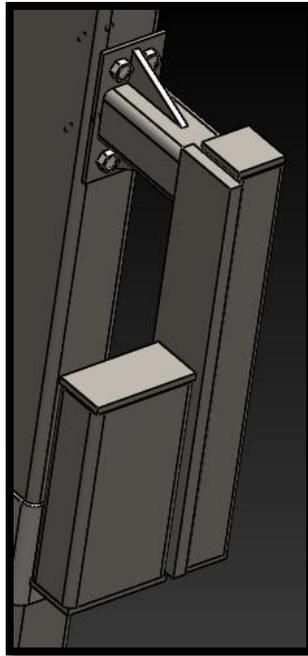


Figura 37: apoyo para el actuador lineal.
Propia.

- **Sistema de anclaje a tierra:** el sistema de anclaje a tierra consta de un montaje de 2 elementos principales, unidos con varilla roscada y lámina de acero; y repetidos ortogonalmente en los 4 lados de la columna para brindar estabilidad y un refuerzo más robusto contra los esfuerzos a los que está sometida la estructura.



Figura 38: sistema de anclaje a tierra.
Propia.

- a) Anclaje: está hecho con perfil estructural CH100x10, ASTM A36; al cual se le suelda una placa de acero en su parte inferior para dar un apoyo plano. Tendrá unas guías por donde se deslizarán los pies de apoyo, además contará con agujeros para el anclaje a suelo de concreto o tierra firme.
 - b) Pie de apoyo: diseñado en forma “L” con acero ASTM A36 y refuerzos triangulares de 2 ½ pulgadas y una variación en el ancho para ajustar en la parte más ancha de la columna.
- **Actuador electromecánico:** el actuador se eligió teniendo en cuenta 2 ítems importantes para definir su carga de servicio.
 - a) El peso total de la estructura de los paneles, que de acuerdo a SolidWorks es de 231,4Kg (2270N aproximadamente).
 - b) La fuerza total del viento calculada: la cual es de 3160N para un área efectiva de paneles de $7.9m^2$ a 75° de inclinación.

En ese orden de ideas, el actuador debe superar el valor más alto registrado. Se consultó un catálogo en línea del fabricante LINAK y se eligió para el diseño un actuador LA30 con las siguientes especificaciones mínimas en la tabla 27.

ESPECIFICACIONES MÍNIMAS	
Fuerza de empuje	3500N

Fuerza de retroceso	3000N
Carrera mínima	250mm
Voltaje de alimentación	12Vdc
Consumo de corriente a carga plena	18A

Tabla 27: especificaciones mínimas del actuador.
Propia.

En la figura 39 se observa en detalle el diseño del actuador electromecánico.

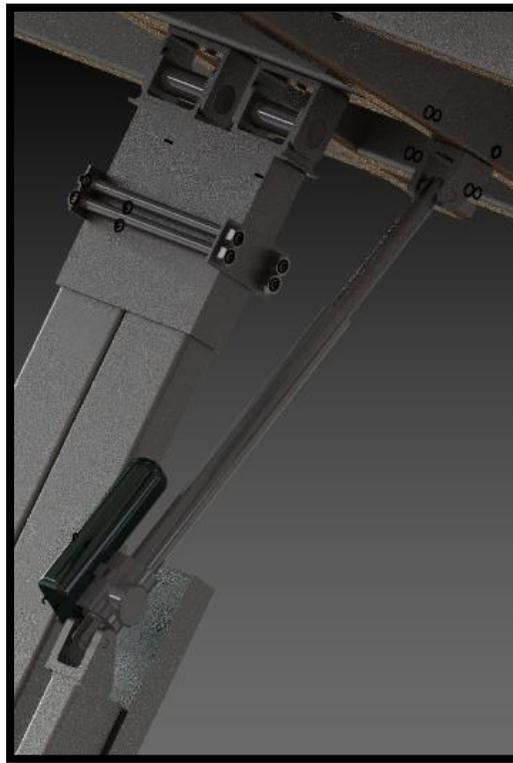


Figura 39: actuador electromecánico.
Propia.

Las bridas de apoyo para el actuador están diseñadas para soportar la carga máxima de empuje, en material AISI 1020 laminado en frío. Estas se unirán al actuador con pasadores de diámetro 10mm hecho en acero AISI 4130. La sujeción tanto del soporte como el bastidor se hará preferiblemente atornillada.

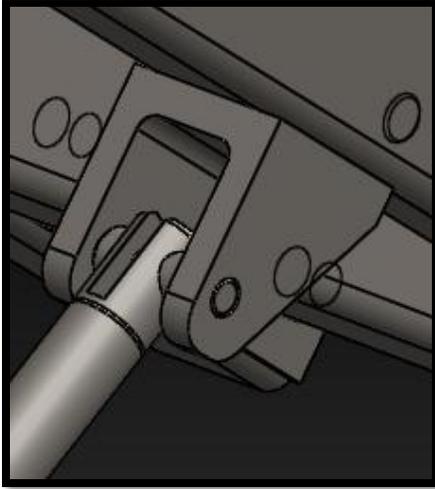


Figura 40: bridas de apoyo para el actuador.
Propia.

- **Caja de control:** la caja está diseñada para contener una batería pequeña de 12V (parte inferior) con agujeros laterales para el arreglo de los cables de alimentación del actuador y los sistemas de control.

En la parte superior se alojarán los módulos electrónicos de control así como la caja que contiene el Arduino. La caja está fabricada en un material de lámina de aluminio 6010 calibre 1/16 de pulgada, con dimensiones de 250x180x118mm. El soporte de la batería es un perfil angular 20x20x40mm en aluminio 6010.



Figura 41: caja de control.
Propia.

4.2.2. Validación del modelo por elementos finitos: análisis estructural

El siguiente proceso es validar el modelo con un estudio de elementos finitos para revelar esfuerzos, tensiones y factores de seguridad en condiciones de servicio.

Para el análisis se escogieron 2 puntos críticos en toda la estructura, que son la columna y el soporte para el panel solar.

4.2.2.1. La columna

Está sometida a las siguientes cargas.

- a) Carga de viento: se tomó la carga de viento de diseño indicada por la *Norma Sismo Resistente Colombiana NS10*, donde la presión de diseño mínima para cualquier estructura debe ser de 400N/m^2 multiplicada por el área de la misma, proyectada a un plano vertical normal a la dirección del viento.

El máximo ángulo de inclinación de los paneles es de $\pm 75^\circ$, el área proyectada para este ángulo se calculó por los 4 paneles y se obtuvo 7.9m^2 . Por consiguiente, la carga de viento resultante es de **3160,7N**.

- b) Carga muerta: se refiere al peso de todos los elementos que soporta la columna. SolidWorks tienen una calculadora incluida que puede dar una magnitud aproximada de la masa de los componentes dependiendo de los materiales que se asignen a cada pieza. Esta calculadora arrojó que el peso aproximado es de **231,4Kg (2270N)**.
- c) Fuerza de empuje del actuador: la fuerza de empuje mínima se tomó como 3500N, pero se realiza la simulación con la componente en el eje "Y" de dicha fuerza, ya que el actuador está ubicado a 72° de la horizontal, en estado de reposo. El valor de esa fuerza es entonces de **3328,7N**.

En la simulación se tomaron en cuenta otras cargas menos relevantes como el peso de la caja de control que es de **6Kg (60N)** aproximadamente. Se despreciaron los elementos de fijación para simplificar el modelo y se concentró la atención en los resultados de tensión, desplazamiento y factor de seguridad, en la figura 42 las fuerzas que actúan sobre la columna.

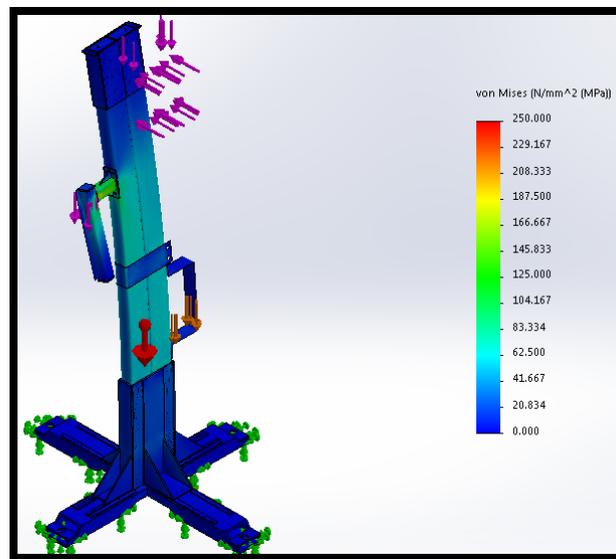


Figura 42: fuerzas a las que está sometida la columna (1).
Propia.

En la tabla 28 el esfuerzo de fluencia del acero estructural, donde los valores son tomados en las caras de los perfiles estructurales.

TENSION DE VON MISES		
	Valor	
Suma	2.2191e+00	N/mm^2 (Mpa)
Avg	37.92	N/mm^2 (Mpa)

Max.	106.03	N/mm ² (Mpa)
Min.	0.41495	N/mm ² (Mpa)
Valor RMS	44.776	N/mm ² (Mpa)

Tabla 28: tensión de von Mises (1).
Propia.

La tensión de **Von Mises** es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión. En ingeniería estructural se usa en el contexto de las teorías de fallo como indicador de un buen diseño para materiales [45].

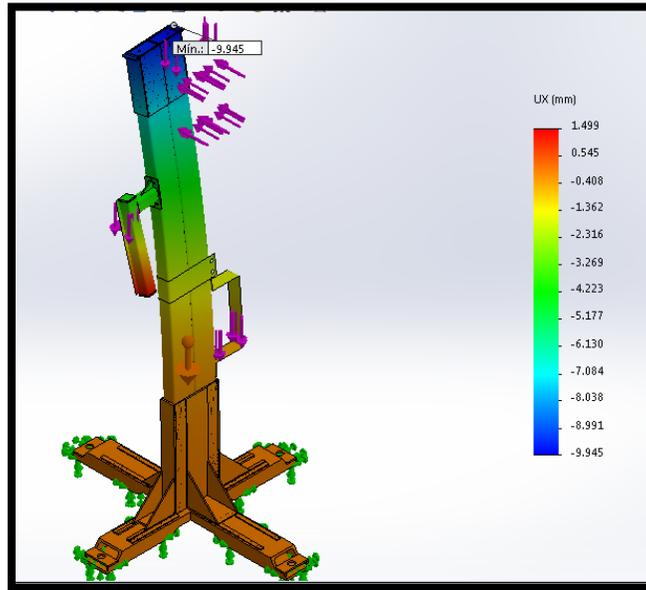


Figura 43: fuerzas a las que está sometida la columna (2).
Propia.

El desplazamiento máximo como se muestra en la figura 43, ocurre eventualmente en la sección donde se aplica la fuerza de estudio.

Desplazamiento en el eje "X"; desplazamiento mínimo (1.499mm), desplazamiento máximo (9.945).

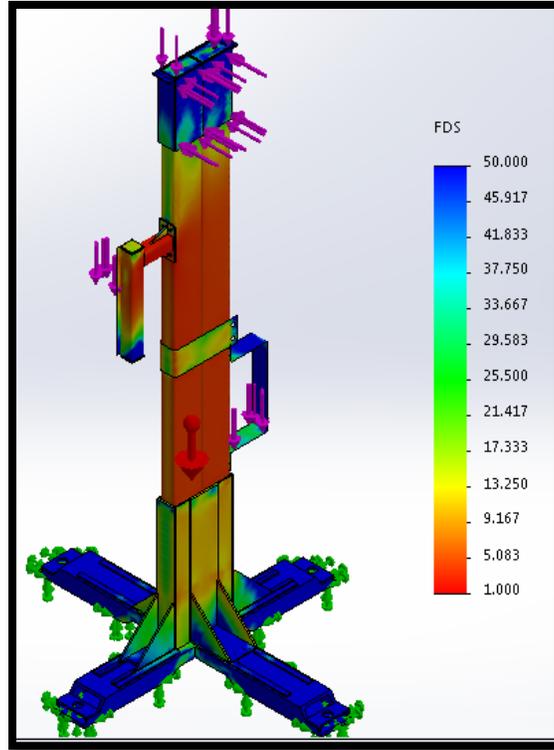


Figura 44: factor de seguridad de Von Mises.
Propia.

En la tabla 29 los valores tomados en las caras de los perfiles estructurales.

FACTOR DE SEGURIDAD DE VON MISES	
	Valor
Suma	1.2835e+00
Avg	21.932
Max.	723.99
Min.	2.3579
Valor RMS	50.601

Tabla 29: factor de seguridad de Von Mises.
Propia.

4.2.2.2. El soporte para el panel solar:

Este subconjunto se ensambla directamente a la base giratoria haciendo las veces de ramificación, por lo que el sistema es análogo a una viga voladiza, donde los

cortantes máximos estarán en la base de unión del soporte y la parte libre después del larguero.

Se usaron las cargas de viento y cargas muertas del punto anterior, pero aplicadas a un solo sistema, el área de acción en este caso es de $1.9m^2$ y la carga de viento es de **746.5N** (normal a la superficie del panel y a 75°) y se toma el peso de un panel solar (27Kg o 300N aproximadamente) y el peso propio de los componentes del sistema. Esto se divide entre las vigas que componen el soporte.

Se despreciaron los elementos de fijación para simplificar el modelo y se concentró la tensión en los resultados de la tensión, desplazamiento y factor de seguridad.

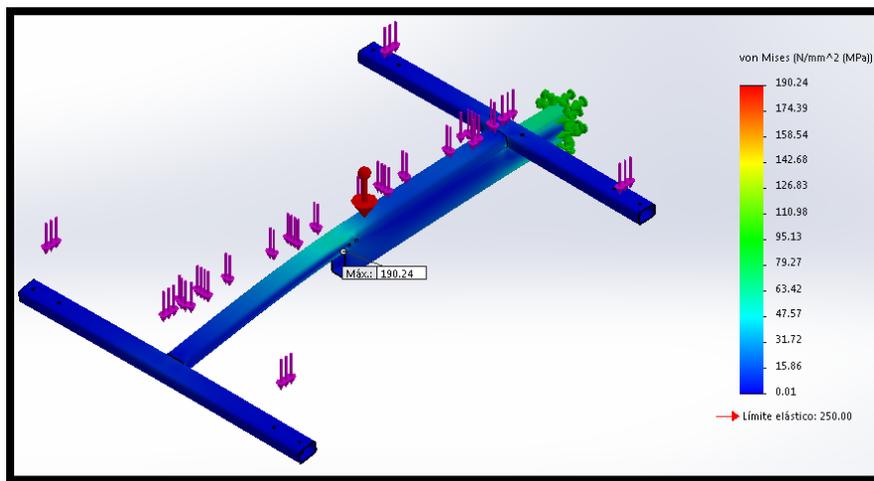


Figura 45: esfuerzo de fluencia acero estructural.
Propia.

Los valores en la tabla 30 son tomados en la cara superior del larguero.

TENSION DE VON MISES		
	Valor	
Suma	53206	N/mm ² (Mpa)
Avg	26.804	N/mm ² (Mpa)
Max.	109.71	N/mm ² (Mpa)
Min.	0.5697	N/mm ² (Mpa)
Valor RMS	37.646	N/mm ² (Mpa)

Tabla 30: tensión de Von Mises en el soporte para el panel solar.
Propia.

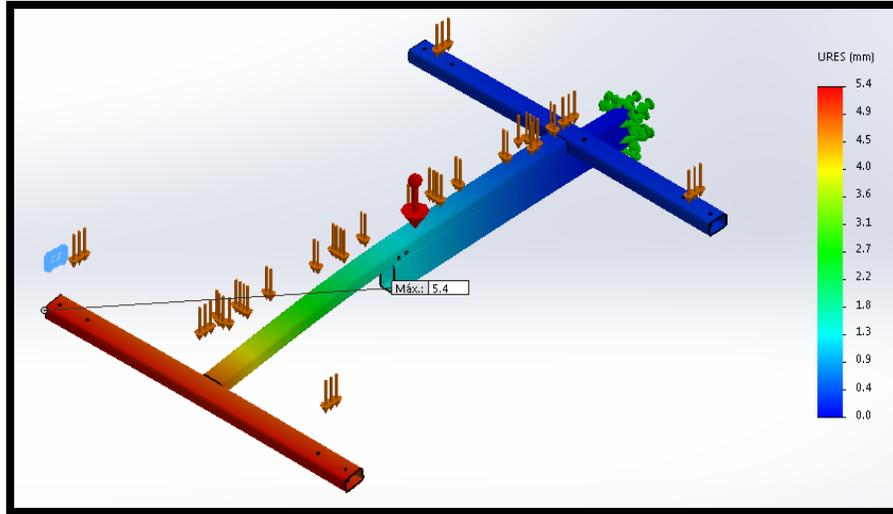


Figura 46: desplazamiento en el eje Y del soporte para el panel solar. Propia.

El desplazamiento máximo en el eje "Y" es de 5.4mm.

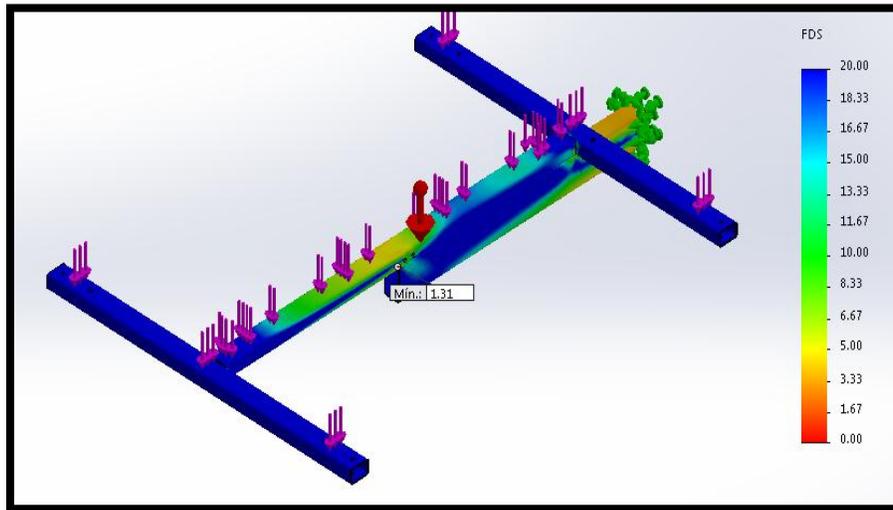


Figura 47: factor de seguridad de Von Mises del soporte para el panel. Propia.

FACTOR DE SEGURIDAD DE VON MISES	
	Valor
Suma	60574
Avg	30.516
Max.	441.02

Min.	1.6807
Valor RMS	47.135

Tabla 31: factor de seguridad de Von Mises.
Propia.

Los valores en la tabla son tomados en la cara superior del larguero, su factor mínimo es de 1,31.

Con base a los estudios estáticos realizados, se puede inferir que los puntos analizados cumplen con las prestaciones de cargas y muestran un comportamiento adecuado a los esfuerzos a los que son sometidos.

4.2.3. Aproximación del seguidor solar de 1 eje

En este apartado se puede detallar el diseño final del seguidor solar, observando en la figura 48 el anclaje al piso.



Figura 48: detalle anclaje al piso.
Propia.

En la figura 49 se observa la ubicación de la caja de control, que fue ubicada en la columna del seguidor solar.



Figura 49: detalle caja de control.
Propia.

En la figura 50 se puede apreciar la forma del seguidor solar con los paneles perpendiculares al sol.



Figura 50: modelo final (1).
Propia.

Y por último en la figura 51 otra vista del seguidor solar.



Figura 51: modelo final (2).
Propia.

La metodología para el ensamble del seguidor solar se puede observar en el *anexo 1* en donde se explica el proceso de arme y desarme del seguidor paso a paso, de igual manera en el *anexo 2* se encuentran los planos de las 25 partes que se diseñaron para implementar el seguidor, ver PDF “Anexo 2. Planos seguidor solar de 1 eje”.

5. CONCLUSIONES.

En este trabajo de grado se implementó un sistema de medida de temperatura y humedad relativa en un prototipo del silo como estructura de secado de café, el cual es alimentado con energía solar fotovoltaica. Por tal motivo se puede determinar lo siguiente.

- Se implementó en un prototipo una instrumentación capaz de leer temperatura y humedad relativa en el silo; el objetivo principal fue la lectura de dichas variables ambientales y esto se comprobó con un código en arduino uno, el cual fue efectivo.
- Por su característica *waterproof* el sensor de temperatura DS18B20 resulta ideal para el ECOSECADOR debido a la humedad que se presenta el.
- Se implementó un prototipo a escala del sistema energético renovable, en donde se realizaron pruebas de carga y descarga de la batería las cuales fueron satisfactorias, como la puesta en marcha del sistema de manera directa (sin la batería), en donde se determinó que la potencia de salida es proporcional a la generada por los paneles; por tal motivo el sistema energético debe trabajar necesariamente con las baterías las cuales provean de corriente al ECOSECADOR en las noches, días nublados y sin sol.
- Debido a que el tiempo de carga de la batería es algo largo, se destaca la importancia de un buen dimensionado de las baterías, para evitar que el sistema pare en ubicaciones en donde no hay buena irradiación solar.
- El sistema energético renovable está diseñado para suplir de energía suficiente al ECOSECADOR, su diseño siempre fue por encima de todo valor, esto, para no quedarse corto a la hora de iniciado el proceso de secado.
- Los sistemas de medición y de alimentación fueron evaluados de manera independientemente debido a que el uno no afecta el funcionamiento del otro.
- Además se plantea mediante un diseño en SolidWorks un seguidor solar, el cual pueda aumentar el tiempo de captación de radiación solar, diseño que fue validado con las herramientas del software. También se cuenta con los planos para una eventual fabricación del seguidor.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] J. Cárdenas Gutiérrez, *La industria del cafe en Colombia*, Costa Rica, 1993.
- [2] M. Estrada Mejia y C. M. Santa Garcia, *Estudio de factibilidad para la implementación de un sistema de producción de cafés especiales en el departamento de risaralda*, Pereira, 2007.
- [3] C. E. Oliveros Tascon y J. R. Sanz Uribe, «Ingeniería y Café en Colombia,» *Universidad de los Andes*, nº 33, pp. 99-114, 2011.
- [4] «hsbnoticias.com,» [En línea]. Available: <http://hsbnoticias.com/noticias/nacional/fijan-atenci%C3%B3n-en-el-pac%C3%ADfico-para-programas-de-energ%C3%ADa-94399>. [Último acceso: 02 Abril 2016].
- [5] D. A. ECHEVERRY OCAMPO, *DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA AUTOMATIZACIÓN DE UN SECADOR ELECTROMECHANICO DE CAFÉ*, PEREIRA, 2010.
- [6] S. Baudi, *Química de los Alimentos*, Ciudad de México: PEARSON Educación, 1993.
- [7] C. N. d. I. d. Café, «Cenicafé,» [En línea]. Available: http://www.cenicafe.org/es/publications/cartilla_21._Secado_del_cafe.pdf. [Último acceso: 24 Septiembre 2016].
- [8] E. M. Garcia Torres, *DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO CON SISTEMA SCADA APLICADO AL CONTROL DEL MICRO CLIMA Y DOSIFICACION DEL PRODUCTO ALMACENADO EN SILOS*, Ecuador, 2012.
- [9] R. Pallás Areny, *SENSORES Y ACONDICIONADORES DE SEÑAL*, Barcelona: MARCOMBO S.A., 2003.
- [10] S. kouro, «Sensores de Humedad,» *Rev. Universidad Tecnica FEDERICO SANTA MARIA*, 2001.
- [11] A. L. ALBERT, *Electrónica y dispositivos electrónicos*, REVERTÉ S.A., 2005.
- [12] D. Fraille, *Dimensionamiento de un sistema PV aislado en Ecuador*, Quito.

- [13] O. Style, *ENERGÍA SOLAR AUTÓNOMA*, España: Itaca Appropriate Technology, 2012.
- [14] A. Escobar, M. Holguin y J. C. Osorio, «DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SEGUIDOR SOLAR PARA LA OPTIMIZACION DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO,» *Ciencia y tecnología*, Universidad Tecnologica de Pereira, Pereira, 2010.
- [15] F. ENERGIZAR, *Seguidor Solar*, Buenos Aires, 2016.
- [16] «AUTODESK,» 2017. [En línea]. Available: <http://latinoamerica.autodesk.com/solutions/cad-software>. [Último acceso: 24 01 2017].
- [17] J. S. Lojan Paradines, *Manual de autocad 2D y 3D*, Barcelona - Venezuela, 2010.
- [18] SolidWorks Corporation, *Conceptos básicos de SolidWorks. Piesas y ensambles*, Concord - Massachusetts, 2006.
- [19] J. F. LEE LAVERDE y C. A. DELGADO AGUDELO, *MODELAMIENTO Y DISEÑO DE UN SECADOR ESTATICO DE CAFÉ PERGAMINI (SILO DE CAFÉ)*, PEREIRA, 2013.
- [20] D. F. Bueno Patarroyo y W. J. Nieto Nieto, «IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE MEDICION Y FISCALIZACION DE CUSTODIA DE CRUDO EN LA ESTACION DE TRANSFERENCIA DE CAMPO MORICHE,» Bucaramanga, 2010.
- [21] R. Chang Granados, «ESTUDIO DE MEDICIONES EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS,» Ciudad de Guatemala, 2007.
- [22] ECOPETROL, «Manual de medicion de hidrocarburos,» 2007.
- [23] C. Oliveros-Tascos, L. Lopez-Valencia, C. M. Buitrago y E. Moreno-Cardenas, «DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL CAFE DURANTE EL SECADO EN SILOS,» Chinchiná, 2010.
- [24] M. Espinoza Esquivel, *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE CARGA*, SAN NICOLAS DE LOS GARZA, 1995.
- [25] L. L. Saenz Cruz y E. Gomez Acero, «Evaluación de un método para la

determinacion de humedad en un medio poroso empleando ultrasonido,» *Revista Ingenieria e Investigacion No. 52*, 2003.

- [26] I. Blanco Sardinero, «Instalación solar fotovoltaica conectada a red sobre la azotea de una nave industrial,» Madrid, 2011.
- [27] SIMEC CHILE, «Proyecto Energia Solar,» Santiago, 2009.
- [28] J. SUMANO FUENTEVILLA, DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO FOTOVOLTAICO, OAXACA, 2012.
- [29] J. B. Adán, *Prototipo fotovoltaico con seguimiento del sol para procesos electroquímicos*, Cuernavaca, 2007.
- [30] B. Evans, *Arduino Notebook*, San Francisco, 2007.
- [31] Maximintegrated, «Maxim Integrated,» [En línea]. Available: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>. [Último acceso: 13 Agosto 2016].
- [32] N. Cuarteto Moya y S. Quintana Alcaraz, *Monitorización remota de una red 1-Wire*, CATALUÑA, 2008.
- [33] C. A. URREA MORENO y A. F. PEÑA MUÑOZ, *CONTROL DE TEMPERATURA Y HUMEDAD PARA LA AUTOMATIZACION DEL SECADO DEL CAFÉ*, Popayán, 2016.
- [34] B. Bellini, *Sensores de presión utilizados en las plataformas de fuerza aplicadas al estudio de la posturografia*, Montevideo, 2009.
- [35] Avia Semiconductor, *24Bit Analog to Digital Converter (ADC) for Weigh Scales*, Xiamen, 2001.
- [36] spence, *Arduino Load Cell / Scale*, Boston, 2013.
- [37] J. A. Mosquera, J. A. Caicedo, P. E. Caicedo, S. P. Castillo, D. Torres Riascos, C. A. Urrea Moreno y A. F. Peña, *ECOSECADOR*, Popayán, 2015.
- [38] D. A. ARENAS SANCHEZ y H. S. ZAPATA CASTAÑO, *LIBRO INTERACTIVO SOBRE ENERGIA SOLAR Y SUS APLICACIONES*, PEREIRA, 2011.

- [39] D. Hoyos, V. Maiver, V. H. Serrano, F. Farfan y C. Cadena, *Controlador de carga para un sistema fotovoltaico aislado*, Buenos Aires, 2011.
- [40] O. Style, *ENERGIA SOLAR AUTONOMA*, España: ITACA Appropriate Technology, 2012.
- [41] Grupo NAP, *Energía Solar Fotovoltaica*, Madrid, 2002.
- [42] H. C. Van Ness y J. M. Smith, *Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química*, Ciudad de Mexico: Mc Graw Hill, 1998.
- [43] K.-J. Bathe, *Finite element procedure*, Boston: Pearson Education Inc, 1996.
- [44] LINA group Headquarters, «LINAK,» [En línea]. Available: <http://www.linak.es/about/?id3=4283>. [Último acceso: 17 09 2016].
- [45] R. A. Mireles Palomares, *TEORIAS DE FALLA Y SUS APLICACIONES*, SAN NICOLAS DE LOS GARZA, 1992.
- [46] Area Tecnologia, «AREA TECNOLOGIA,» [En línea]. Available: <http://www.areatecnologia.com/electricidad/paneles-solares.html>. [Último acceso: 25 Junio 2015].
- [47] Fondear, «FONDEAR,» 2014. [En línea]. Available: http://www.fondear.org/infonautic/equipo_y_usos/Electricidad_Energia/ControladorCarga/ControladorCarga.htm. [Último acceso: 20 Junio 2015].
- [48] T. Diaz Corcobado y G. Carmona Rubio, *Instalaciones solares fotovoltaicas*, Madrid: McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2010.
- [49] M. Fernández Barrera, *Energía solar: Electricidad fotovoltaica*, Madrid: Liberfactory, 2010.
- [50] O. Style, *ENERGÍA SOLAR AUTÓNOMA*, España: ITACA Appropriate Technology, 2012.
- [51] C. L. Mantell, *INGENIERÍA ELECTRO-QUÍMICA*, Barcelona: Reverté, S.A., 2003.
- [52] Blog de Car Audio, «blogdecaraudio,» 13 Diciembre 2013. [En línea]. Available: <http://blogdecaraudio.com/2011/12/bateria-%C2%BFcomo-funcionan-%C2%BFpor-que-es-mejor-usar-las-de-gel-o-de-polvo/>. [Último

acceso: 09 Julio 2015].

[53] A. A. Castro Rojas, *Sensores utilizados en la Automatización Industrial*, Costa Rica, 2008.

[54] WAVESHARE, «WAVESHARE share awesome hardware,» [En línea]. Available: <http://www.waveshare.com/logic-level-converter.htm>. [Último acceso: 12 Febrero 2017].

ANEXOS.

ANEXO 1: proceso de arme y desarme del seguidor.

PROCESO DE DESARMADO DEL SEGUIDOR

1. Desarme del sensor:

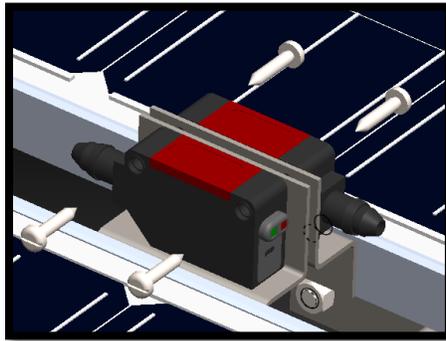


Figura 1: desarme del sensor.

- A. Desconectar el cable de alimentación del sensor (no se muestra en la figura).
- B. Soltar los 2 tornillos que unen el cuerpo del sensor a la brida.
- C. Desacoplar el sensor teniendo cuidado de no enredar los cables.
- D. Repetir las operaciones A, B y C con los demás sensores.
- E. El desmontaje de la brida del panel solar es opcional.

2. Desmonte del panel:

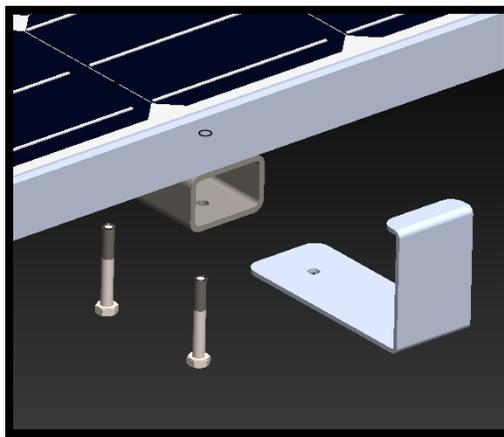


Figura 2: desmontaje del panel.

- A. Desconectar los cables de conexión del panel.

- B. Soltar los tornillos M8 de la brida en C de aluminio sin olvidar remover la tuerca y el refuerzo en la parte superior del perfil de acero (no visibles).
- C. Retirar la brida en C halándola hacia afuera.
- D. Repetir los pasos B y con las demás bridas.
- E. Desmontar el panel. Se debe prestar especial atención a este paso para evitar caídas y/o daños al panel o sus componentes.
- F. Repetir los pasos A, B, C, D y E para los otros 3 paneles.

3. Desmonte del soporte para panel solar:

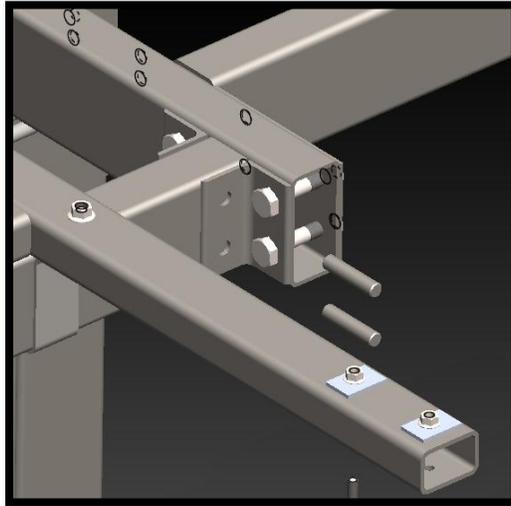


Figura 3: desmonte del soporte para el panel solar.

- A. Extraer los 2 pasadores de diámetro 0.5 pulgadas de los refuerzos en ángulo que están atornillados. En lo posible, no permitir que el soporte rote al quitar uno de los 2 pasadores.
- B. Extraer el soporte completo halándolo desde su base con precaución a fin de evitar caídas o accidentes.
- C. Repetir los pasos A y B en cada soporte.

NOTA: no es obligatorio desarmar todo el soporte, a menos que por condiciones de transporte sea necesario. En ese caso, se debe soltar las bridas en U ubicadas en los extremos del larguero inferior del soporte con las herramientas adecuadas.

4. Desmonte del actuador lineal:

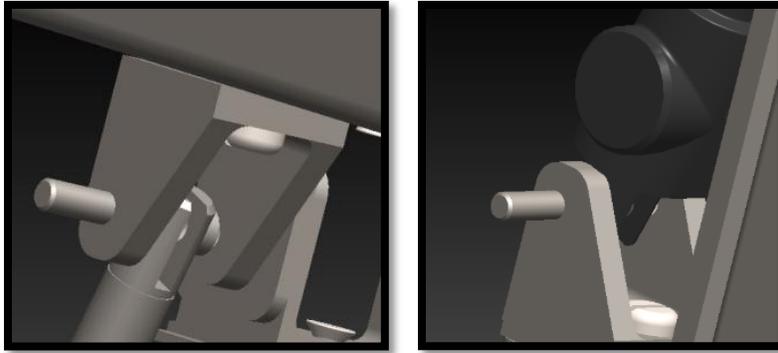


Figura 4: desmonte del actuador lineal.

- A. Desconectar la alimentación eléctrica del actuador.
- B. Remover con la herramienta adecuada los 2 pasadores de diámetro de 10mm de las bridas que sujetan los extremos del actuador. *Comenzar por la brida superior.*
- C. Tener precaución con la base giratoria, ya que al quitar el actuador esta quedará libre y rotará por efecto de la gravedad.
- D. Retirar el actuador completamente teniendo cuidado con los cables.

5. Desmonte de la base giratoria:

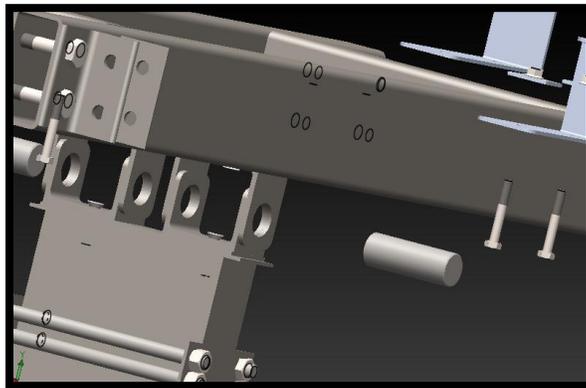


Figura 5: desmonte de la base giratoria.

- A. Con la ayuda de la herramienta adecuada, extraer ambos pasadores/eje de diámetro 30mm de las bridas pivote.
- B. Retirar completamente el bastidor, no es necesario desmontar ninguna pieza más.

SUGERENCIA: por motivos de seguridad, no realizar este paso sin la ayuda de otro u otros operarios. Esto es a fin de evitar accidentes relacionados al peso de la base.

6. Desmonte de los componentes de la columna:

6.1. Desmonte de caja de control

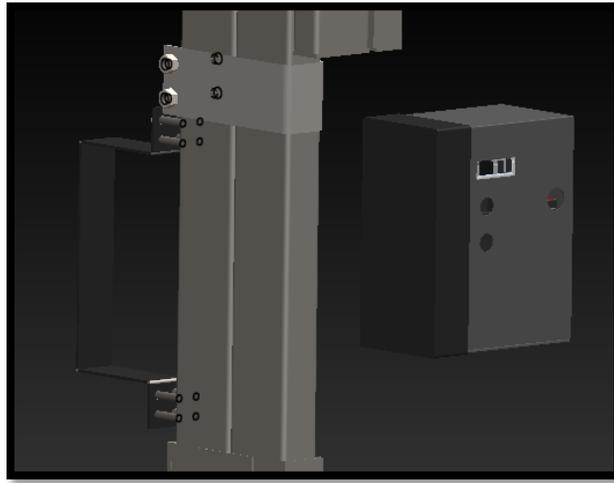


Figura 6.1: desmonte de caja de control.

- A. Desconectar las conexiones de la caja de control y asegurarse de que no haya interferencia de componentes.
- B. Desmontar el soporte de la caja extrayendo los 4 tornillos del soporte con el destornillador adecuado.
- C. Extraer la caja cuidadosamente para evitar su caída.

6.2. Desmonte de brida central

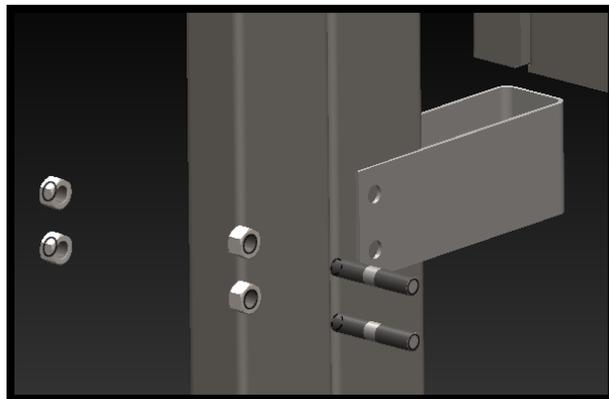


Figura 6.2: desmonte de brida central.

- A. Retirar las tuercas hexagonales con la llave adecuada.
- B. Deslizar hacia afuera las varillas roscadas.
- C. Deslizar hacia afuera la brida en U central completamente.

6.3. Desmonte de pies de apoyo

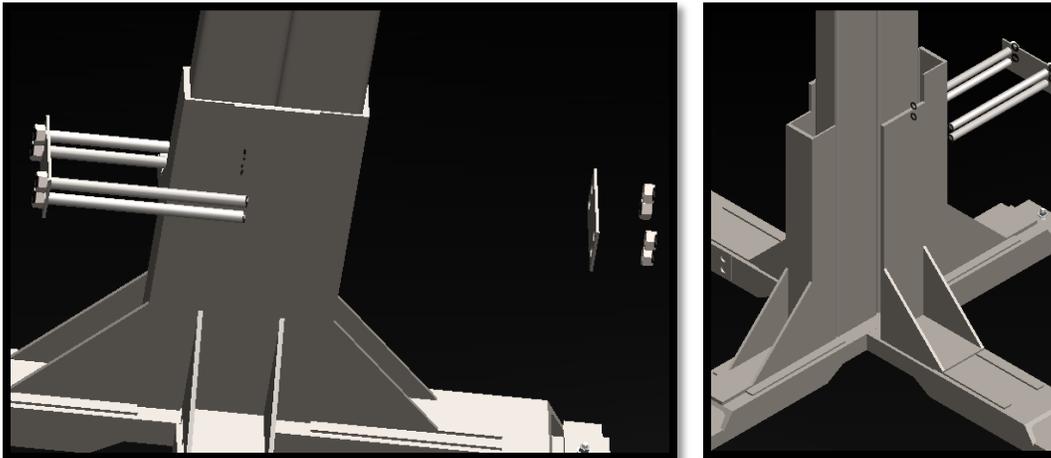


Figura 6.3: desmonte de pies de apoyo.

- A. Extraer las tuercas hexagonales con la llave adecuada y la lámina adyacente del montaje de bridas inferior.
- B. Extraer el conjunto restante de varillas roscadas, tener especial cuidado con el poste de la columna para evitar que este vuelque.
- C. Deslizar un pie de apoyo a lo largo de las guías soldadas encima del anclaje a tierra.
- D. Realizar el paso C para los demás pies de apoyo.
- E. Retirar el poste por completo.

SUGERENCIA: realizar este paso preferiblemente con la ayuda de otro operador para evitar que el poste caiga.

6.4. Desmonte de los anclajes

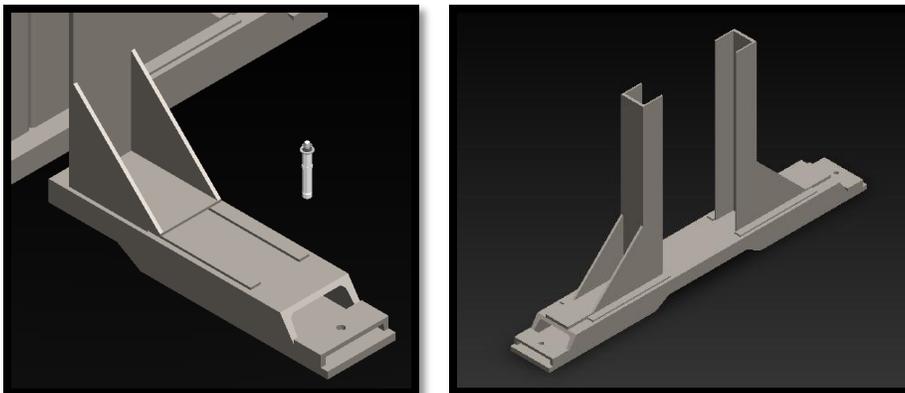


Figura 6.4: desmonte de los anclajes.

- A. Retirar los tornillos de anclaje de los 4 extremos con la herramienta adecuada.
- B. Quitar el anclaje corto.
- C. Repetir el paso B con el otro anclaje.
- D. Por último, retirar el anclaje largo para así terminar el desarmado de la base.

PROCESO DE ARMADO DEL SEGUIDOR

Para armar el seguidor, básicamente se puede realizar el proceso inverso al desarmado teniendo en cuenta para el montaje de los tornillos de anclaje lo siguiente:

1. Taladrar el orificio de anclaje y limpiarlo (el anclaje debe estar sobre la superficie a instalar).
2. Con la ayuda de un martillo introducir el anclaje a través de la pieza dentro de la perforación.
3. Apretar la tuerca con una llave dinamométrica comprobada. De no disponer de esta, girar una llave común de 2 a 3 vueltas hasta sentirlo firme.

El resto de los pasos para el ensamble del seguidor se pueden tomar de manera inversa a los anteriormente descritos.

SELECCIÓN DE LOS TORNILLOS DE ANCLAJE

Para escoger los tornillos de anclaje se tomó el valor de reacción resultante tomada del análisis de elementos finitos para la columna, el cual es de aproximadamente 72Kg (**707N**) y se tomó como la carga de trabajo de corte para el perno...

Este valor relativamente bajo se debe a que las fuerzas de reacción sobre el poste son en gran parte reducidas por los pies de apoyo y por las dimensiones de los perfiles de anclaje.

En ese orden de ideas, se escogió un tornillo de anclaje de montaje pasante AMWE 1075 de acero galvanizado, con las siguientes características:



Wedge anchor

Anclaje de montaje pasante. La perforación y el montaje se realizan a través de la pieza a fijar para evitar errores de posicionamiento. La profundidad de perforación no necesita ser precisa. Aptos para fijaciones provisionales (una vez utilizadas se pueden martillar hasta quedar a nivel de la superficie). Diseñados especialmente para resistir altos esfuerzos de corte.

Código	Diámetro rosca		Largo		Dimensión perforación		Espesor máxima fijar mm t	Carga de trabajo	
	\varnothing d_1 mm	l mm	\varnothing d_0 mm	Prof. mín. h_D mm	Arranque kg	Corte kg			
AMWE 875	8	75	8	45	10	280	400		
AMWE 8100	8	100	8	45	30	280	400		
AMWE 1075	10	75	10	45	10	350	450		
AMWE 1095	10	95	10	45	30	350	450		
AMWE 1295	12	95	12	60	20	500	600		
AMWE 12145	12	145	12	60	60	500	600		
AMWE 16125	16	125	16	75	25	700	1100		
AMWE 16150	16	150	16	75	50	700	1100		
AMWE 16200	16	200	16	100	75	700	1100		
AMWE 20150	20	150	20	100	25	1400	2300		

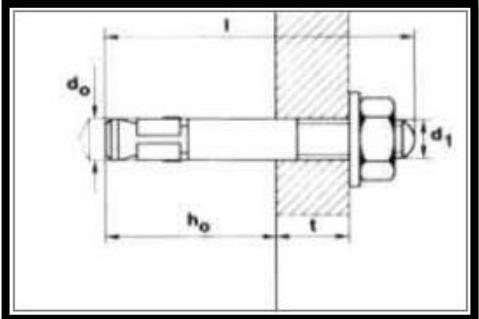


Figura 7: características del tornillo.

ANEXO 2: planos del seguidor solar.

Ver archivo PDF “Anexo 2. *Planos seguidor solar de 1 eje*”, en él se encuentran las 25 partes con sus respectivos planos para poder fabricarlos.