

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EQUIPO DE METROLOGÍA
PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS Y EÓLICOS**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

Lis Mariela Villanueva Blas

ASESOR: Ing. Oscar Antonio Melgarejo Ponte

Lima, diciembre del 2014

RESUMEN

En la actualidad el Perú se encuentra en un proceso de transformación debido al crecimiento económico que se está viviendo, el cual va acompañado de una creciente demanda de energía a consecuencia de que diversas plantas industriales se han consolidado, razón por la cual se están tomando en cuenta otras fuentes de energía alternativas, tales como las fuentes de energía renovable, más concretamente la energía producida por aerogeneradores y celdas fotovoltaicas para complementar esta demanda.

En los últimos años la energía eólica y solar ha experimentado un desarrollo tecnológico considerable y han incrementado su competitividad en términos económicos en relación con otras fuentes de energía. La fuerza del viento se aprovecha a través de aerogeneradores que generan energía eléctrica, para tener grandes potencias instaladas, estos se agrupan en los denominados “Parques eólicos”.

Por otro lado, la energía fotovoltaica emplea la luz proveniente del sol a través de celdas fotovoltaicas para producir electricidad.

En la actualidad, los países que conforman la Unión Europea lideran en cuanto a la explotación y uso de la energía eólica y solar, seguidos de China, Estados Unidos y Alemania. En América Latina, el país en donde más se está desarrollando estas fuentes renovables de energía es Brasil debido a la sólida infraestructura industrial y una adecuada red eléctrica, así como una creciente demanda energética.

Los parques eólicos y los sistemas fotovoltaicos son instalados en lugares en donde se den las mejores condiciones de viento e irradiación solar y que además estén alejados de los sistemas eléctricos convencionales, que justifican los costos de instalación de estos sistemas. Por lo cual se hace necesario un previo análisis acerca de las condiciones meteorológicas más importantes, tales como la velocidad del viento y la irradiación solar. Esto permitirá tomar mejores decisiones acerca de una posible instalación de uno o ambos sistemas antes mencionados.

A partir del registro histórico de las variables meteorológicas se puede decidir posibles lugares de instalación, por tanto evitar pérdidas económicas por instalaciones de sistemas inadecuados debido a la falta de un análisis previo.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	2
CAPÍTULO 1.....	2
1. EL SISTEMA DE METROLOGÍA DE ENERGÍA EÓLICA Y FOTOVOLTAICA	2
1.1 DEFINICIÓN DE METROLOGÍA.....	2
1.2 SITUACIÓN ACTUAL DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS BASADOS EN ENEGÍA RENOVABLE	2
1.3 EQUIPOS DE MEDICIÓN DE RADIACIÓN SOLAR.....	3
1.4 DECLARACIÓN DEL MARCO PROBLEMÁTICO	4
CAPÍTULO 2.....	5
2. TECNOLOGÍAS EN LOS SISTEMAS DE METROLOGÍA DE ENERGÍA EÓLICA Y FOTOVOLTAICA.....	5
2.1 ESTADO DEL ARTE.....	5
2.2 ETAPAS EN LA ADQUISICIÓN DE DATOS	6
2.3 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES.....	7
2.3.1 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE VOLTAJE DEL ANEMÓMETRO Y DEL PANEL FOTOVOLTAICO	7
2.3.2 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE CORRIENTE DEL PANEL FOTOVOLTAICO	7
2.4 AMPLIFICADOR OPERACIONAL.....	8
2.5 ANEMÓMETROS	9
2.5.1 TIPOS DE ANEMÓMETROS	10
2.6 PANEL FOTOVOLTAICO	10
2.6.1 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA E IRRADIACIÓN SOLAR.....	10
2.6.2 SISTEMA Y GENERACIÓN FOTOVOLTAICO.....	11
2.7 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE DATOS	12
2.8 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN AUTÓNOMO.....	12
CAPÍTULO 3.....	13
3. DISEÑO DEL SISTEMA DE METROLOGÍA DE ENERGÍA EÓLICA Y FOTOVOLTAICA	13
3.1 OBJETIVOS	13
3.1.1 OBJETIVO GENERAL.....	13
3.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3.2 REQUERIMIENTOS DEL DISEÑO	14
3.3 DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL DISEÑO	15
3.4 SELECCIÓN, JUSTIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA	17
3.4.1 SENSOR DE TEMPERATURA.....	17
3.4.2 SENSOR DE EFECTO HALL	17
3.4.3 BATERÍA.....	20
3.4.4 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN AUTÓNOMO: DETECTOR DE VENTANA CON LM339	21
3.4.5 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN AUTÓNOMO: MOSFET DE BAJA TENSIÓN	23
3.4.6 ANEMÓMETRO DE COPELAS	23
3.4.6.1 ANEMÓMETRO CON UN GENERADOR DC.....	24
3.4.6.2 ANEMÓMETRO MAGNÉTICO.....	27
3.4.7 DETERMINACIÓN DE LA ORIENTACIÓN DEL VIENTO: VELETA.....	29
3.4.8 CUANTIFICACIÓN DE LA IRRADIACIÓN SOLAR: PANEL SOLAR.....	29
3.4.8.1 SELECCIÓN DEL PANEL SOLAR	30
3.4.8.2 MEDICIÓN DE LA IRRADIACIÓN SOLAR.....	30
3.4.9 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES	34
3.4.9.1 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE VOLTAJE DEL ANEMÓMETRO EMPLEANDO UN SENSOR DE EFECTO HALL.....	34

3.4.9.2	ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE VOLTAJE DEL SENSOR DE TEMPERATURA	37
3.4.9.3	ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE VOLTAJE DE LA BATERIA	38
3.4.9.4	ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE VOLTAJE DEL PANEL SOLAR	39
3.4.9.5	ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE SENSADO DE LA ORIENTACIÓN DEL VIENTO.....	39
3.4.10	SELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR	41
3.4.11	DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN AUTÓNOMO	42
3.4.12	SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO DE ALMACENAMIENTO	44
3.4.13	ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE VOLTAJE DEL GENERADOR DC.....	44
3.4.14	VISUALIZACIÓN DE PARÁMETROS: DISPLAY LCD	45
3.4.15	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN	46
3.5	DISEÑO DEL SOFTWARE.....	47
3.5.1	DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE PARÁMETROS EÓLICOS Y FOTVOLTAICOS	47
3.5.2	DESCRIPCIÓN DE LOS BLOQUES DEL DIAGRAMA DE FLUJO	48
3.5.2.1	INICIALIZACION DEL MICROCONTROLADOR	48
3.5.2.2	DIAGRAMA DE FLUJO PRINCIPAL.....	49
CAPÍTULO 4.....		54
4. IMPLEMENTACIÓN		54
4.1	IMPLEMENTACION DEL ANEMÓMETRO Y VELETA	54
4.2	IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO DE MEDICIÓN	54
4.3	PRUEBAS CON EL ANEMÓMETRO Y EL CIRCUITO DE MEDICIÓN.....	56
4.4	PRUEBAS CON EL PANEL SOLAR Y EL CIRCUITO DE MEDICIÓN	57
CONCLUSIONES		60
RECOMENDACIONES.....		61
BIBLIOGRAFÍA		62

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1.1: Conversión de la energía renovable en los sistemas de potencia [4]	2
Figura 1.2: Promedio de sistemas eléctricos basados en energía renovable [4]	3
Figura 2.1: Diagrama de bloques del proceso de adquisición de datos [10]	6
Figura 2.2: Comparador de ventana	9
Figura 2.3: Nivel de irradiación solar en la Tierra [4]	11
Figura 2.4: Circuito equivalente de una celda solar [13]	12
Figura 3.1: Diagrama de bloques	15
Figura 3.2: Sensor de temperatura LM35 [15]	17
Figura 3.3: Sensor de Efecto Hall UGN3503U [16]	18
Figura 3.4: Salida digital del sensor LB9051 [17]	19
Figura 3.5: Curva característica de carga de la batería [19]	20
Figura 3.6: Curva característica de descarga de la batería [19]	21
Figura 3.7: Amplificador Operacional LM339 [20]	21
Figura 3.8: Comparador de ventana	22
Figura 3.9: Salida del comparador de ventana	22
Figura 3.10: Diseño 3D del anemómetro de copelas	23
Figura 3.11: Motor DC 12V marca Motoba	24
Figura 3.12: Anemómetro Kestrel 4100	24
Figura 3.13: Relación entre la velocidad del viento y el voltaje generado (0 hasta 12V)	25
Figura 3.14: Relación entre la velocidad del viento y el voltaje generado (0 hasta -12V)	26
Figura 3.15: Anemómetro de copelas con imanes acoplados	27
Figura 3.16: Relación entre la velocidad del viento y el voltaje generado	28
Figura 3.17: Diseño de la veleta en 3D	29
Figura 3.18: Panel Solar de 12V-5W	30
Figura 3.19: Gráfica de irradiación solar vs hora del día	31
Figura 3.20: Gráfica de voltaje vs irradiación solar de cada una de las mediciones	32
Figura 3.21: Gráfica de voltaje vs irradiación solar con todas las muestras tomadas en las mediciones	32
Figura 3.22: Coeficientes del polinomio de aproximación de grado 6	33
Figura 3.23: Aproximación de la gráfica voltaje vs irradiación solar	33
Figura 3.24: Acondicionamiento de la señal proveniente del sensor de Efecto Hall	34
Figura 3.25: Señal en la posición A	34
Figura 3.26: Señal en la posición B	35
Figura 3.27: Señal en la posición C	35
Figura 3.28: Arco de desplazamiento del imán	36
Figura 3.29: Acondicionamiento del sensor de temperatura	38

Figura 3.30: Arreglo de resistencias para el acondicionamiento del voltaje de la batería.....	38
Figura 3.31: Arreglo de resistencias acondicionamiento del voltaje del panel solar	39
Figura 3.32: Arreglo de resistencias para el sensado de la dirección del viento	40
Figura 3.33: Microcontrolador ARM Córtes TM4C123GH6PM [23].....	41
Figura 3.34: Reguladores de tensión LM7805 y LM7809 conectados a la batería de 12V	42
Figura 3.35: Diagrama esquemático del sistema de alimentación autónomo	43
Figura 3.36: Diagrama de conexiones de la memoria SD hacia el puerto SSI del microcontrolador.....	44
Figura 3.37: Arreglo de resistencias para el acondicionamiento de la señal de voltaje del generador DC.....	45
Figura 3.38: Diagrama de conexiones del display LCD con el microcontrolador	45
Figura 3.39: Diagrama esquemático de la tarjeta de medición de parámetros eólicos y fotovoltaicos.....	46
Figura 3.40: Diagrama de flujo principal	47
Figura 3.41: Diagrama de flujo de la inicialización del microcontrolador	48
Figura 4.1: Anemómetro de copelas	54
Figura 4.2: Veleta	54
Figura 4.3: Circuito de medición implementado.....	55
Figura 4.4: Equipo de metrología para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos y eólicos implementado.....	55
Figura 4.5: Gráfica de voltaje del generador DC vs velocidad del viento	56
Figura 4.6: Gráfica de voltaje generado por el circuito acoplado al sensor de Efecto Hall vs velocidad del viento.....	57
Figura 4.7: Gráfica voltaje vs irradiación solar	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Escala de velocidades del viento [12].....	10
Tabla 3.1: Características del sensor de salida lineal UGN3503U [16].....	18
Tabla 3.2: Características del sensor de salida digital LB9051 [18]	19
Tabla 3.3: Características del mosfet 2N7002 [21].....	23
Tabla 3.4: Valores de voltaje y velocidad del viento medidos	25
Tabla 3.5: Valores de voltaje y velocidad del viento medidos	26
Tabla 3.6: Valores de voltaje y velocidad del viento medidos	28
Tabla 3.7: Valores obtenidos de tensión de salida vs irradiación solar	31
Tabla 3.8: Determinación de la velocidad del eje de un generador con un tacómetro y con el cicuito acondicionado al sensor de efecto hall.....	37
Tabla 3.9: Nivel de tensión para cada dirección de velocidad del viento	40
Tabla 3.10: Tabla comparativa de microcontroladores	41
Tabla 3.11: Valores ADC para el sensado de la dirección del viento	52
Tabla 3.12: Formato para el almacenamiento de los datos.....	53
Tabla 4.1: Valores de velocidad del viento obtenidos con el sistema de medición implementado	56
Tabla 4.2: Valores de irradiación solar obtenidos con el sistema de medición implementado... 58	58
Tabla 4.3: Muestra de toma de datos del sistema de medición implementado.....	59

INTRODUCCIÓN

La electrificación urbana y rural en lugares que no cuentan con energía mejora la calidad de vida de las personas. El acceso a la información vía radio, televisión o internet solo es posible si se cuenta con un sistema eléctrico que permita el funcionamiento de estos equipos.

El Perú está entre los países de la región con una baja cobertura eléctrica, el 92% de la población tiene acceso a energía y el 75.2% en el área rural tiene electricidad [1].

Asimismo, hay lugares y pueblos donde no alcanza la red eléctrica debido a condiciones geográficas desfavorables, ello ha sido uno de los factores para la creación de una nueva oferta energética, que tiene como lineamientos, el incremento de la participación de la energía renovable.

En la actualidad, cerca del 47.1% de la electricidad en el país proviene de centrales hidroeléctricas, y el 1.8% de parques eólicos y paneles solares, y el 51% restante es de gas natural [2].

Por otro lado, el crecimiento económico del país apunta a menores gastos de energía y aumento de productividad con el objetivo de dar un mayor espacio para las fuentes renovables y una disminución de las emisiones de carbono.

Por ello, la presente tesis tiene como objetivo principal diseñar e implementar un equipo de metrología para la adquisición de las principales variables meteorológicas que influyen en la instalación de sistemas generadores de energía eléctrica que emplean fuentes renovables, tales como los sistemas eólicos y fotovoltaicos.

La medición de las variables meteorológicas como la velocidad del viento y la irradiación solar, resulta generalmente costoso ya que en el mercado se encuentran equipos cuyas características no son totalmente empleados para los fines deseados lo que los encarece, limitando por ello su empleo a sistemas de gran envergadura.

Razón por la cual, en la presente tesis se propone realizar el diseño de un sistema de medición que permita obtener datos en tiempo real e histórico de las variables meteorológicas como la velocidad del viento y la irradiación solar, parámetros básicos para todo diseño que implique el empleo de energía renovable. Las variables serán almacenadas para su posterior acceso y/o descarga.

CAPÍTULO 1

1. EL SISTEMA DE METROLOGÍA DE ENERGÍA EÓLICA Y FOTOVOLTAICA

1.1 DEFINICIÓN DE METROLOGÍA

La metrología es la ciencia de las mediciones y sus aplicaciones [3]. La medición es el proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud.

1.2 SITUACIÓN ACTUAL DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS BASADOS EN ENERGÍA RENOVABLE

En la figura 1.1 se muestra las fuentes de energía y las formas en que se utilizan. Se puede ver que la energía química almacenada en los combustibles fósiles es convertida en formas utilizables de energía a través del calor producto del quemado de estos con una eficiencia cercana al 90%. La energía térmica puede ser convertida en energía mecánica empleando motores de vapor. Estos motores tienen una eficiencia de conversión hasta el 60%, esta eficiencia está limitada por la eficiencia de Carnot. En la actualidad, la mayoría de automóviles y camiones trabajan bajo este principio. La energía mecánica puede ser convertida en electricidad empleando generadores eléctricos con una eficiencia hasta de 99%. La mayor parte de la electricidad mundial es generada con un turbo generador que es conectado a una turbina de vapor, donde el carbón es la mayor fuente de energía. En todos los procesos de producción de electricidad basados en restos fósiles, al menos el 50% de la energía química disponible inicialmente se pierde en las varias etapas de conversión. En las plantas de energía nuclear, la energía es liberada como calor durante reacciones de fisión nuclear [4].

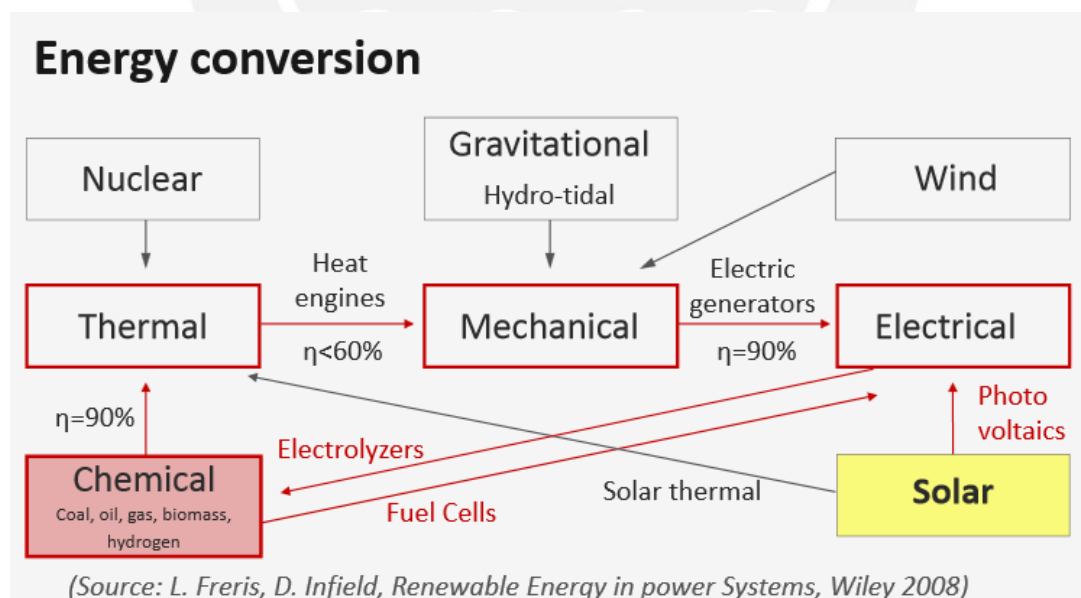


Figura 1.1: Conversión de la energía renovable en los sistemas de potencia [4]

Los tipos de energías mencionados anteriormente están basados en combustibles fósiles y nucleares, no son renovables porque ellos no son regenerados por la naturaleza. Por otro lado, las fuentes de energía renovable son repuestas por proceso natural a una tasa comparablemente más alta que la tasa de consumo humano. Consecuentemente, la energía eólica y solar son fuentes de energía renovable [4].

La energía cinética del viento puede ser convertida en energía mecánica empleando molinos de viento y la energía solar también puede ser convertida en electricidad empleando dispositivos denominados fotovoltaicos. En la figura 1.2 se muestra el promedio de sistemas eléctricos basados en energía renovable instalados en la actualidad.

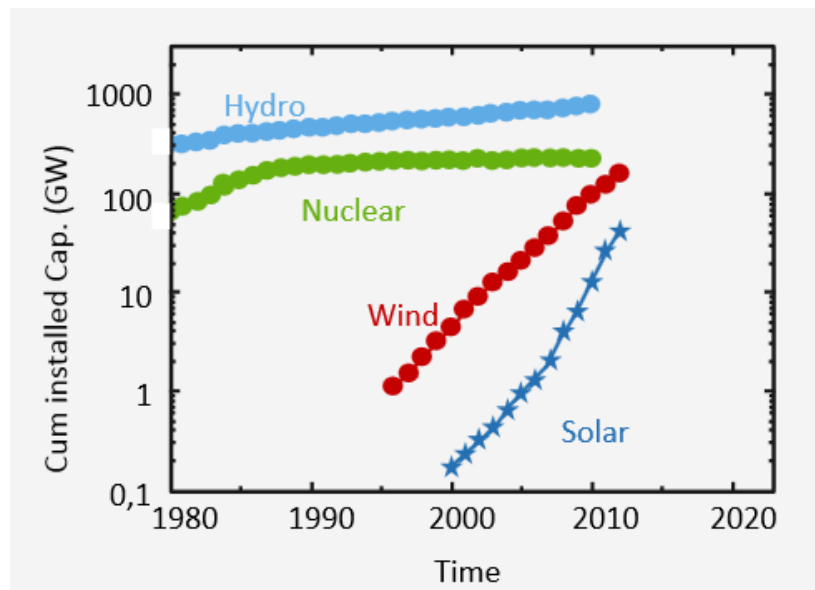


Figura 1.2: Promedio de sistemas eléctricos basados en energía renovable [4]

1.3 EQUIPOS DE MEDICIÓN DE RADIACIÓN SOLAR

- **Piranómetro.**- Un piranómetro (también llamado solarímetro y actinómetro) es un instrumento meteorológico utilizado para medir de manera muy precisa la radiación solar incidente sobre la superficie de la tierra. Se trata de un sensor diseñado para medir la densidad del flujo de radiación solar (kilovatios por metro cuadrado) en un campo de 180 grados.

Tipos de radiaciones:

- **Radiación directa:** llega directamente del sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección. Se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan.

- **Radiación Difusa:** Parte de la radiación que atraviesa la atmósfera es reflejada por las nubes o absorbida por éstas. Esta radiación se denomina difusa, va en todas las direcciones, como consecuencia de las reflexiones y absorciones, no solo de las nubes sino de las partículas de polvo atmosférico, montañas, etc. Este tipo de radiación se caracteriza por no producir sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos.

- **Radiación Reflejada:** Es aquella reflejada por la superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie. Las superficies verticales son las que más radiación reflejada reciben.

- **Radiación global:** Es la radiación total. Es la suma de las tres radiaciones.

1.4 DECLARACIÓN DEL MARCO PROBLEMÁTICO

Los sistemas eólicos y fotovoltaicos, como fuentes de energía, se han incrementado considerablemente, en nuestro medio, estos se instalan en ubicaciones poco accesibles y en lugares muy remotos y aislados [5]. Esto, hace que el registro de los parámetros eólicos, solares y posteriormente las magnitudes eléctricas, generadas por estos sistemas sean de difícil acceso y por consiguiente también sean difíciles de controlar.

La medición de los parámetros, tanto de la velocidad del viento, como el de la irradiación solar, generalmente resulta costoso porque en el mercado se encuentran equipos, cuyas características no son totalmente empleados para los fines deseados, lo que los encarece, limitando por ello su empleo a sistemas de gran envergadura.

La necesidad de diseñar e implementar un dispositivo diferente a los que el mercado ofrece de debe a diversos aspectos tales como:

- **Costo:** La mayoría de los equipos que el mercado ofrece son de un costo relativamente alto, los más empleados son las Estaciones Meteorológicas Davis, Climatronics, Kestrel, Oregon Scientific cuyos precios bordean los miles de dólares [6].
- **Utilidad:** La mayoría de modelos generalmente poseen muchas opciones de medida que no se emplean tales como: radiación ultravioleta, humedad del suelo, pluviómetro, etc. Por lo que se requiere desarrollar un dispositivo versátil y sobre todo que se adapte a las necesidades de medición.
- **Tamaño y adaptabilidad:** Es necesario un dispositivo portátil y de tamaño reducido, ideal para su implementación en cualquier sistema y en lugares alejados.
- **Consumo:** Dicho equipo ha de tener un consumo independiente de la red eléctrica y que pueda ser alimentado tanto con una batería como de una celda solar.

CAPÍTULO 2

2. TECNOLOGÍAS EN LOS SISTEMAS DE METROLOGÍA DE ENERGÍA EÓLICA Y FOTOVOLTAICA

2.1 ESTADO DEL ARTE

En la actualidad se han realizado diversas investigaciones en el campo de la generación de energías más limpias, que reduzcan las emisiones de carbono y productos contaminantes en el proceso. En América Latina esta tendencia ha llegado con fuerza debido al gran potencial que posee para el uso de energías renovables [7].

En el Perú, la energía eólica ha presentado un aumento más significativo de proyectos en los últimos años [8], debido a la dependencia energética muy grande de combustibles fósiles y del agua, para la generación de la energía eléctrica. Estas dependencias han traído consigo la escasez y el alza de precios a los consumidores finales [9]. No obstante, aun cuando no es fuerte todavía, las energías renovables se presentan como una excelente alternativa para la generación de energía eléctrica en el país como parte de la estrategia para superar la pobreza, elevar la calidad de vida y lograr la electrificación rural.

La idea tras la generación eólica es convertir la energía cinética del viento en energía mecánica a través de algún medio que la capte y transforme, para poder darle otro uso. Debido a la naturaleza de la concepción de viento, es un recurso aleatorio y variable en el tiempo, ello dificulta que una red eléctrica dependa sólo de este tipo de energía, además, dificulta los proyectos de generación eólica, puesto que es necesario conocer los regímenes de viento en la zona, estudios que pueden durar mucho tiempo.

Asimismo, la energía contenida en la luz solar, llamada energía solar, también puede ser convertida en electricidad. Si esta energía es convertida en electricidad directamente empleando dispositivos basados en materiales semiconductores, se denomina fotovoltaico (PV). El término fotovoltaico proviene de la palabra griega phos que significa luz, y -volt, que hace referencia a la electricidad y es una reverencia al físico italiano Alessandro Volta (1745-1827) quien inventó la batería. La eficiencia típica de los módulos solares más comerciales se encuentra en el rango del 15-20% [4].

Por otro lado, la medición y adquisición de datos a través de sensores es una técnica cada vez más empleada y necesaria en el ámbito de control de procesos o de la eficiencia energética. En la actualidad, la tendencia de los sistemas de adquisición de datos es realizar medidas de forma automática y registrarlas en tiempo real a través de un sistema SCADA o con un dispositivo creado para tal fin. Uno de los usos más útiles y demandados es el de registrar las medidas de un determinado sistema periódicamente y de forma continuada para estudiar el comportamiento de dicho sistema a lo largo del tiempo y poder obtener datos reales acerca de su funcionamiento.

En el mercado existen diversas marcas y tipos de dispositivos capaces de detectar y medir señales eléctricas de diversos tipos (analógicas y digitales) para luego registrarlas y almacenarlas en tiempo real y de forma automática en una memoria destinada para tal fin. No obstante, si bien estos equipos son de gran versatilidad y robustez, el gran inconveniente que presentan es su elevado coste, el cual bordea los miles de dólares.

Por ello, se ha desarrollado un equipo de metrología para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos y eólicos, con el fin de crear un dispositivo útil y flexible capaz de desarrollar funciones similares a las de otras soluciones del mercado pero con un coste considerablemente menor. Así, el equipo de metrología mide las señales de diversos sensores y registra automáticamente en una tarjeta de memoria Secure Digital (SD) con el fin de poder trabajar y compartir los datos obtenidos de una forma sencilla.

Los parámetros a medir son: voltaje y corriente de salida de una celda fotovoltaica, velocidad del viento e irradiación solar. Datos a partir de los cuales cualquier usuario podrá realizar una oportuna decisión y elección del tipo de sistema eléctrico, basado en cualquiera de las dos fuentes de energía renovable antes mencionadas o la combinación de ambas, que debe instalar en el lugar previamente analizado.

2.2 ETAPAS EN LA ADQUISICIÓN DE DATOS

Para monitorear y manipular datos involucrados en los fenómenos físicos es necesario un sistema cuya función sea convertir las variables físicas analógicas en variables digitales que puedan ser manipuladas a través de una computadora mediante software de aplicación.

En la figura 2.1 se ilustra las etapas de un Sistema de Adquisición de Datos:

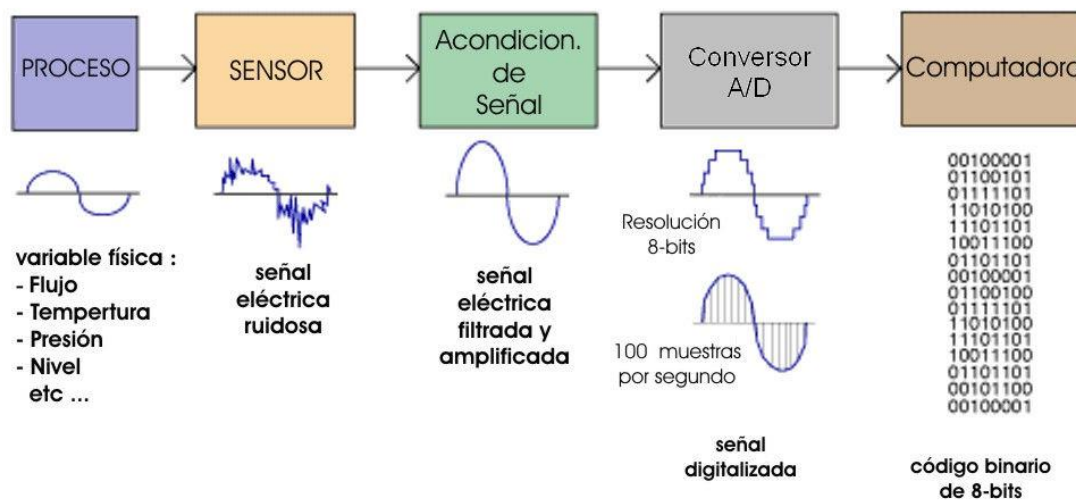


Figura 2.1: Diagrama de bloques del proceso de adquisición de datos [10]

Generación de la señal a través de sensores.

Los sensores transforman variables físicas en señales eléctricas. Por ejemplo, las termocuplas convierten la variable física de temperatura en voltaje. Los sensores generan señales que permiten conocer el valor de las variables físicas que mide.

Acondicionamiento de la señal: Amplificación y Filtrado.

La señal eléctrica generada por los sensores puede contener ruido o no ser de un nivel eléctrico adecuado para su procesamiento. Por esta razón, es necesaria una etapa de

acondicionamiento de la señal. Esta etapa comienza con la amplificación de la señal. Como ejemplo, las señales de bajo nivel de voltaje que provienen de termocuplas deben ser amplificadas para mejorar su resolución y minimizar errores en una posterior cuantización. Luego la señal es filtrada para eliminar componentes de frecuencia indeseada (ruido).

Digitalización de la señal: Muestreo y Cuantización.

Una vez que la señal se encuentra filtrada y en un nivel apropiado esta debe digitalizarse para poder ser leída y procesada por el computador. Así, en esta etapa, la señal analógica que es función continua del tiempo, es convertida a una señal definida sólo para instantes discretos de tiempo (la señal es muestreada). Además en cada instante de tiempo el valor de la señal es registrada en forma de número binario de acuerdo a una resolución (señal cuantizada en base a un cierto número de bits).

2.3 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

2.3.1 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE VOLTAJE DEL ANEMÓMETRO Y DEL PANEL FOTOVOLTAICO

El valor de voltaje que se obtendrá en la salida de la celda fotovoltaica no superará 18 voltios, no obstante esta señal requiere de un número adecuado de resistencias que funcionen como divisor de voltaje, para obtener un valor de tensión positivo y en un rango de tensión que no afecte la entrada del sistema de adquisición de datos y que puede ser procesado por el microcontrolador.

Antes que la señal ingrese al sistema de adquisición de datos es necesario usar un filtro para atenuar el ruido y otras frecuencias. Finalmente, se sabe que la mayoría de los sistemas de adquisición presentan una impedancia de entrada alta, por lo cual es importante emplear un búfer para conectar una carga de impedancia baja.

El muestreo de señales se aplica a señales analógicas y para el acondicionamiento de estas es necesario emplear circuitos analógicos, los parámetros que interesan son la amplitud de la tensión de salida del generador DC del anemómetro y amplitud de la tensión en los terminales en la salida de la celda fotovoltaica.

2.3.2 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE CORRIENTE DEL PANEL FOTOVOLTAICO

- **Resistencias calibradas.**- Son cargas resistivas de valores muy pequeños a través de las cuales se mide una corriente eléctrica. Se puede medir valores de corriente que no sean elevados. Su utilización es muy importante, ya que este tipo de resistencias no afectan las lecturas y las condiciones de trabajo del sistema.

La manera de medir la corriente que circula por un conductor es usar una resistencia en serie o en paralelo con el conductor, de forma que, conociendo el valor de la resistencia calibrada y el voltaje que cae en él, se obtiene la intensidad de corriente que circula por el circuito, valiéndose para ello de la ley de Ohm $V=IR$. No obstante, para colocar alguna de estas resistencias es necesario interrumpir el valor de la corriente lo cual resulta peligroso si se miden valores altos de corriente.

Estas presentan las siguientes características:

- Voltaje de salida: De acuerdo al valor de la resistencia. Relación lineal.
- Precisión: Cerca de 0.25% de precisión.
- Error por temperatura: cambia menos de 0.01% por °C, lo que produciría, con un cambio de temperatura de 30 °C, un error de 0.31%.
- Baja disipación de potencia.
- Se deben usar al 66% de su potencia como máximo para evitar daños en la resistencia.
- Puramente resistivas a bajas frecuencias.

2.4 AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Se puede usar el OPAMP con realimentación negativa. Un ejemplo de este tipo de configuración es el seguidor o buffer, el cual se emplea para conectar una fuente con una impedancia elevada a una carga de impedancia baja. Asimismo, se puede usar el OPAMP sin realimentación negativa, una aplicación de este tipo de configuración es el comparador de ventana que trabaja con alimentación asimétrica.

En esta configuración predomina el nivel bajo a salida $V_o = A_o (V_+ - V_-)$, se emplean operacionales con salida OPEN COLLECTOR cuya salida requiere una resistencia PULL UP. Si no se colocara esta resistencia, el transistor de salida del OPAMP no estaría polarizado y por lo tanto jamás se tendrá un nivel alto en la salida "1". Para el circuito que se muestra en la figura 2.2, se cumple que:

- Cuando la diferencia de entradas es positiva $(V_+ - V_-) > 0$, la salida será $V_{sat+} = 9V$.
- Cuando la diferencia de entradas es negativa $(V_+ - V_-) < 0$, la salida será $V_{sat-} = 0V$.

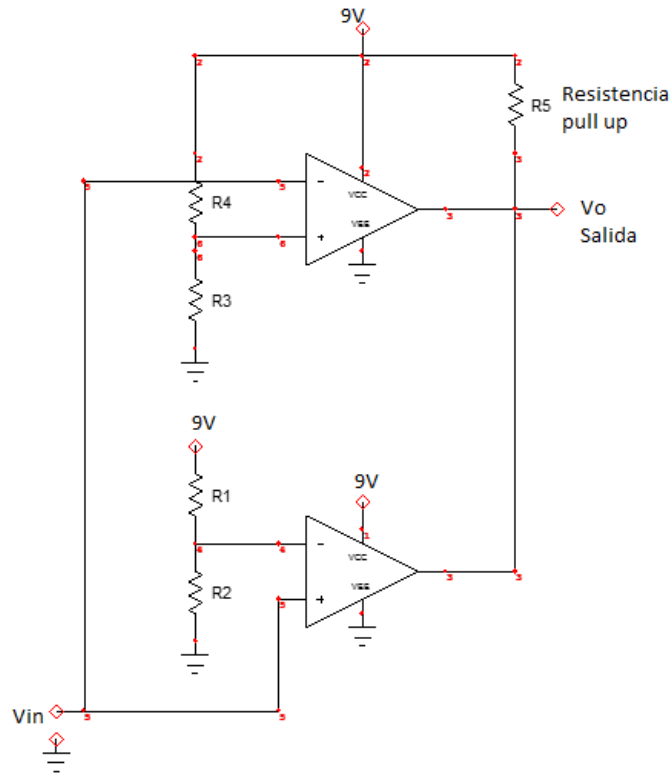


Figura 2.2: Comparador de ventana

Elaboración: Propia

2.5 ANEMÓMETROS

Un anemómetro es un instrumento empleado para medir la velocidad del viento, indirectamente a través de la fuerza del viento que incide sobre él. Si no se necesita una gran precisión, por ejemplo alrededor del 3%, pueden ser adecuados para aplicaciones meteorológicas. Pero si se requieren anemómetros para la industria eólica, los cuales son montados sobre aerogeneradores, entonces se emplean anemómetros calibrados y con un error de medición de quizás alrededor del 1% o menos [11].

El valor de la velocidad del viento registrado en el anemómetro es analizado por la industria eólica de acuerdo a la escala de velocidades del viento que se muestra en la tabla 2.1, esto para determinar si sopla suficiente viento para poner en marcha un aerogenerador.

Tabla 2.1: Escala de velocidades del viento [12]

Escala de velocidades del viento		
Velocidades de viento a 10 m de altura		
m/s	nudos	Clasificación del viento
0,0-0,4	0,0-0,9	Calma
0,4-1,8	0,9-3,5	Ligero
1,8-3,6	3,5-7,0	
3,6-5,8	7-11	
5,8-8,5	11-17	Moderado
8,5-11	17-22	Fresco
11-14	22-28	Fuerte
14-17	28-34	
17-21	34-41	Temporal
21-25	41-48	
25-29	48-56	
29-34	56-65	Fuerte temporal
>34	>65	Huracán

2.5.1 TIPOS DE ANEMÓMETROS

De acuerdo a la forma como se realiza la medición del viento, se tienen los siguientes tipos de anemómetros:

- a) Anemómetro de empuje
- b) Anemómetro de rotación o de copelas
- c) Anemómetro de compresión
- d) Anemómetro de hilo caliente
- e) Anemómetro sónico

2.6 PANEL FOTOVOLTAICO

2.6.1 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA E IRRADIACIÓN SOLAR

- **La energía solar fotovoltaica.**- Es una fuente de energía que produce electricidad de origen renovable, obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica, o bien mediante una deposición de metales sobre un sustrato denominada célula solar de película fina [4].

Las células o celdas solares son dispositivos que convierten energía solar en electricidad, ya sea directamente vía el efecto fotovoltaico, o indirectamente mediante la previa conversión de energía solar a calor o a energía química.

La forma más común de las celdas solares se basa en el efecto fotovoltaico, en el cual la luz que incide sobre un dispositivo semiconductor de dos capas produce una diferencia de fotovoltaje o del potencial entre las capas. Este voltaje es capaz de conducir una corriente a través de un circuito externo de modo de producir trabajo útil.

- **La irradiación solar.**- La irradiación (I) es un parámetro unitario que describe la potencia por unidad de área ($W \cdot m^{-2}$) y determinan la cantidad de energía por unidad de área y unidad de tiempo que es incidente en la superficie. Este parámetro no contiene información espectral [4]. El nivel de irradiación en la Tierra se muestra en la figura 2.3.

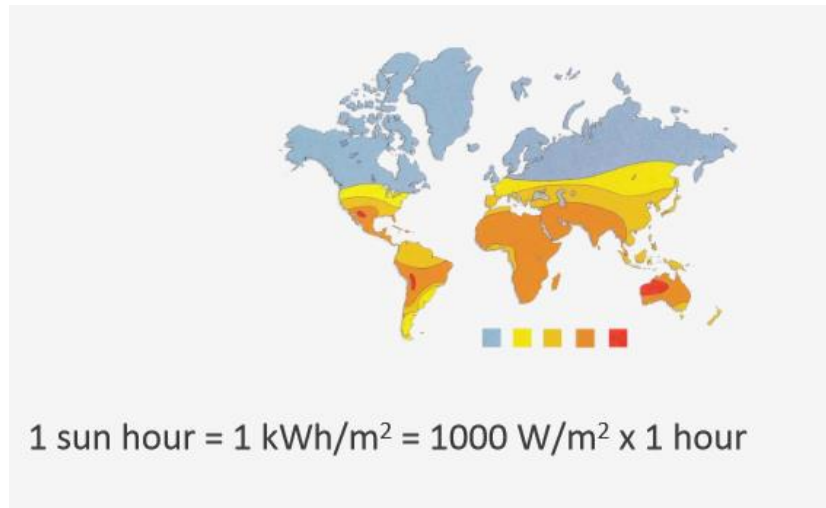


Figura 2.3: Nivel de irradiación solar en la Tierra [4]

2.6.2 SISTEMA Y GENERACIÓN FOTOVOLTAICO

- **El sistema fotovoltaico.**- Es un conjunto de dispositivos eléctricos y mecánicos que se utilizan para generar energía eléctrica a niveles de potencia requeridos haciendo uso del principio fotovoltaico. La eficiencia de conversión de estos sistemas es de alrededor de 15%, por lo que un metro cuadrado puede proveer 150 Watts, potencia suficiente para operar un televisor mediano [4].

- **Generación fotovoltaica.**- Las células solares están compuestas de materiales semiconductores que absorben energía de los fotones y crean pares electrón-hueco entre los semiconductores diferentes, llegando a niveles de energía donde los electrones pueden desplazarse libremente y conducir electricidad, a este principio se le conoce como foto conducción o efecto fotoeléctrico. El valor nominal del voltaje generado por un sistema fotovoltaico es determinado por el número de celdas solares empleadas en ellos, mientras que la corriente depende de la irradiación solar, la orientación y la insolación del lugar. Es importante tener en cuenta que si algunos paneles permanecen parcialmente sombreados durante una parte del día, su capacidad generadora sufre indefectiblemente, debido a que la parte sombreada equivale a conectar un alto valor de resistencia en serie con el generador, como R_s en la figura 2.4.

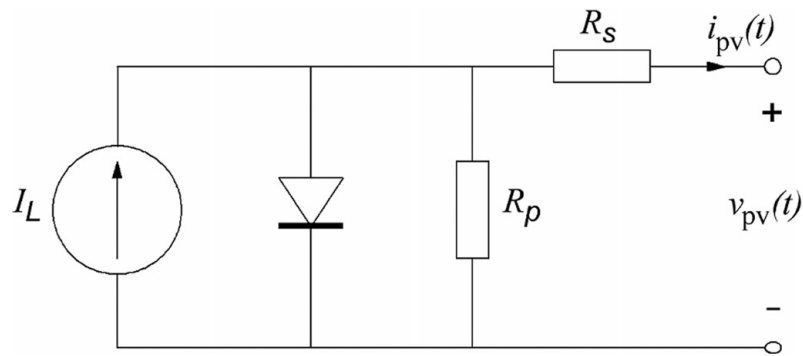


Figura 2.4: Circuito equivalente de una celda solar [13]

2.7 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE DATOS

En muchas aplicaciones de sistemas electrónicos, y en general en cualquier sistema de adquisición de datos, es necesario almacenar grandes cantidades de datos en donde las memorias seriales EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) suelen ser insuficientes, por lo tanto, el uso de las memorias tipo flash SD proporciona una gran ventaja, otorgando gran capacidad de almacenamiento y una gran disponibilidad en el mercado a muy bajo costo [14].

2.8 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN AUTÓNOMO

La irradiación solar es de naturaleza discontinua, por lo cual se debe almacenar la energía restante cuando ya no se disponga de esta, el medio de almacenamiento más común es la batería. Una batería es un acumulador que almacena energía eléctrica, usando procedimientos electroquímicos y que posteriormente la devuelve casi en su totalidad. La capacidad eléctrica se mide en Amperes*hora. Existen varios tipos de batería tales como: de Sulfato de Plomo, Alcalinas, de Manganeseo, Ni-H, Ni-C, Ion de Litio, Polímero de Litio, etc.

En cualquier sistema eléctrico que emplea baterías, debido a su naturaleza discontinua, la tensión en este debe oscilar mínimamente, para cubrir las necesidades cuando la tensión en la batería sea insuficiente, por lo cual es imprescindible el uso de un regulador y/o controlador de carga, que protege a las baterías de una carga extrema o de una descarga profunda, a fin de conservar la vida útil de esta. En el caso de las baterías de plomo-acido existe una relación directa ente el voltaje y el estado de la carga, lo cual se verifica en las gráficas proporcionadas por el fabricante, que hace posible determinar una cierta aproximación si la batería se encuentra en un rango permisible.

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO DEL SISTEMA DE METROLOGÍA DE ENERGÍA EÓLICA Y FOTOVOLTAICA

3.1 OBJETIVOS

3.1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un sistema de metrología para la adquisición de los principales parámetros generados por los sistemas eólicos y solares, con el objetivo de conocer el potencial de energía eléctrica por medios no convencionales y además la medida de los parámetros necesarios para su implementación en un determinado lugar. Asimismo, se podrán obtener datos en tiempo real e histórico de los siguientes parámetros:

- Voltaje de salida de un panel solar.
- Velocidad del viento.
- Irradiación solar.
- Temperatura
- Nivel de tensión de la batería
- Orientación del viento

3.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diseñar y/o seleccionar sensores para medir la velocidad del viento, irradiación solar, voltaje que entrega un panel solar, temperatura, nivel de tensión de la batería y orientación del viento.
2. Diseñar e implementar un sistema de acondicionamiento de señales eléctricas a la salida de los sensores.
3. Procesar las señales acondicionadas para luego registrarlas en intervalos de tiempo y que pueda ser modificado y mejorado en el futuro.
4. Diseñar un sistema para el almacenamiento de los parámetros medidos, en una tarjeta de memoria extraíble (tipo SD) con el fin de que dichos datos puedan almacenarse y transportarse de forma sencilla y rápida.
5. Diseñar e implementar un sistema de alimentación autónomo, empleando la energía de un panel solar como cargador de baterías.

3.2 REQUERIMIENTOS DEL DISEÑO

1. Medir los siguientes parámetros a través de un anemómetro:
 - Velocidad del viento en el rango de 0 m/s hasta 20m/s.
 - Resolución no mayor a 0.1 m/s.
 - Ser resistente a la intemperie.
 - Diseñar e implementar el anemómetro de copelas en la impresora 3D.
2. Medir y calcular los siguientes parámetros eléctricos de la celda fotovoltaica:
 - Voltaje de salida hasta los 18V.
3. Medir el nivel de irradiación que recepciona una celda fotovoltaica.
4. Diseñar e implementar los sistemas de acondicionamiento para las señales antes mencionadas. El rango de salida del sistema de acondicionamiento debe estar entre los 0-3.3V para que sean adecuadamente procesados por el microcontrolador.
6. Diseñar e implementar un sistema de alimentación autónomo.
7. Diseñar e implementar un sistema de medición de orientación del viento empleando una veleta.
8. Diseñar e implementar un sistema de medición de temperatura y temperatura en el rango mínimo de 0 – 50°C, con una resolución de 1°C.
9. Diseñar e implementar un sistema de almacenamiento de los valores de voltaje entregado por una celda fotovoltaica, irradiación solar, velocidad del viento, temperatura, nivel de batería y orientación del viento.
10. Diseñar un sistema de acceso a los datos históricos por medio de una memoria SD la cual luego podrá ser colocada en un lector externo de memoria SD para su descarga y análisis.

3.3 DESCRIPCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL DISEÑO

En la figura 3.1 se muestra el diagrama de bloques planteado para la solución:

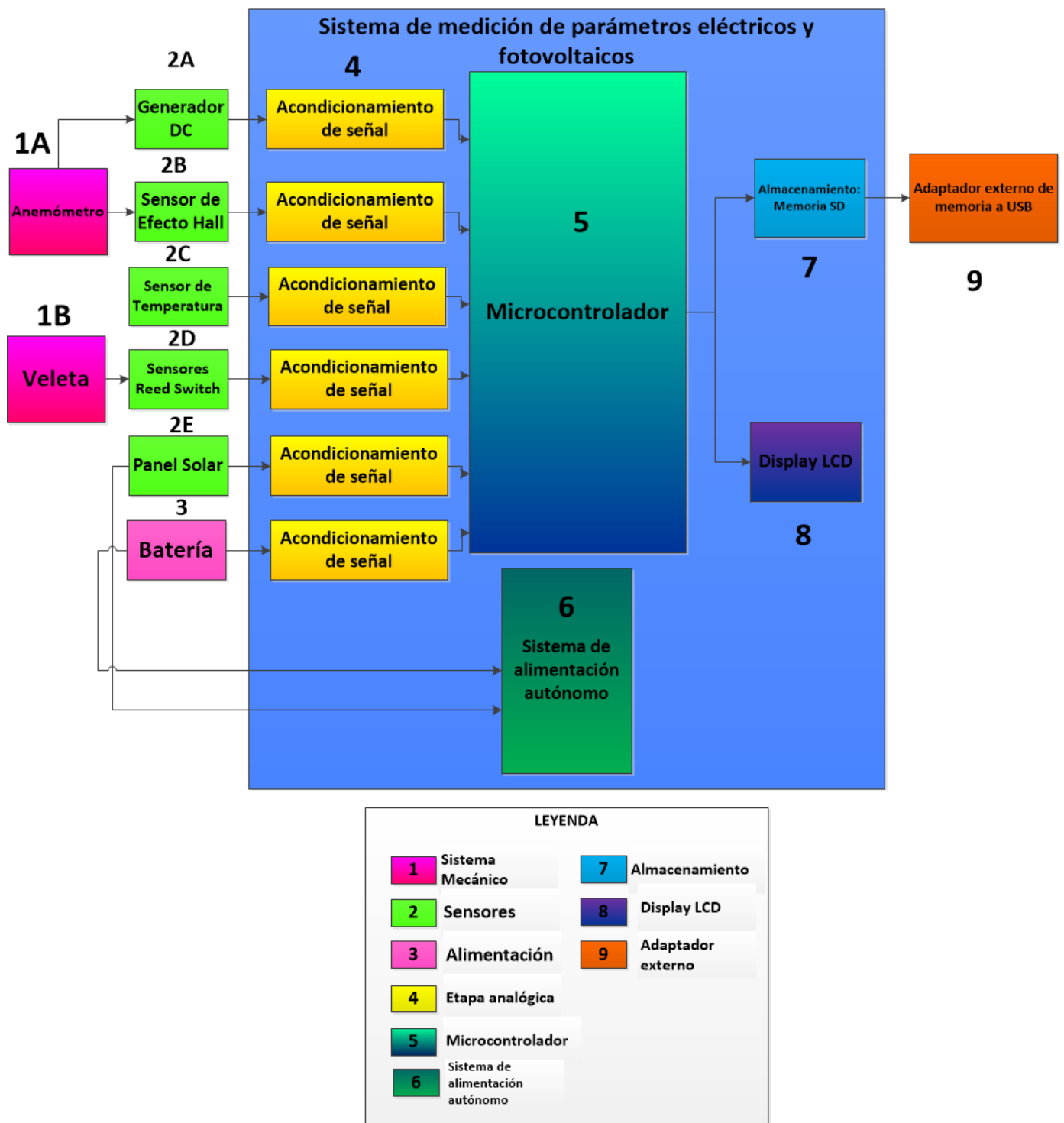


Figura 3.1: Diagrama de bloques

Elaboración: Propia

En el esquema se tienen las siguientes etapas:

1. El sistema mecánico está compuesto por el anemómetro de copelas y la veleta diseñada e impresa en una impresora 3D.
2. Los sensores están compuestos por los sensores de Efecto Hall, generador DC, temperatura, reed switches y el panel solar, los cuales permitirán la obtención de señales analógicas proporcionales a las señales físicas que miden respectivamente.
3. La batería proporcionará alimentación a todo el sistema de medición de parámetros eléctricos y fotovoltaicos.
4. Las señales analógicas provenientes de los sensores son acondicionadas para luego ser procesadas.
5. El microcontrolador se encarga de procesar los datos para así obtener los siguientes parámetros:
 - Tensión que entrega el panel
 - Irradiación solar
 - Temperatura
 - Nivel de tensión en la batería
 - Velocidad del viento
 - Orientación de la velocidad del viento
6. El sistema de alimentación autónomo carga la batería cuando esta se encuentra en un nivel que podría ocasionar el mal funcionamiento de los reguladores.
7. El almacenamiento de los parámetros calculados por el microprocesador se guardarán en una memoria SD.
8. Para la visualización de los parámetros antes mencionados se emplea un display LCD.
9. Para la descarga y/o acceso de los datos almacenados en la memoria SD se empleará un lector externo de memoria SD, el cual consta de un puerto USB que puede interactuar con una PC.

Para la medición del campo magnético se tuvieron 2 alternativas:

- a) Sensor de Efecto Hall con salida lineal UGN3503U

Según la polaridad del campo magnético que se le aplique al sensor, la tensión de salida será positiva o negativa, no obstante, con un campo magnético nulo se tiene una tensión de salida igual a la mitad de la tensión de alimentación. Este sensor se muestra en la figura 3.3 y sus características técnicas en la tabla 3.1.

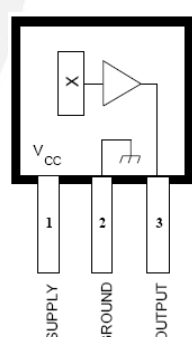


Figura 3.3: Sensor de Efecto Hall UGN3503U [16]

Características:

Tabla 3.1: Características del sensor de salida lineal UGN3503U [16]

Características eléctricas $T_A=+25^\circ\text{C}$ y $V_{CC}=5\text{V}$					
Características	Símbolo	Min.	Típico	Máx.	Unidades
Tensión de alimentación	V_{CC}	4.5	-	6.0	V
Corriente de alimentación	I_{CC}	-	9.0	14	mA
Tensión de salida (con $B=0$)	V_{OUT}	2.25	2.5	2.75	V
Sensibilidad	ΔV_{OUT}	0.75	1.3	1.72	mV/G
Ancho de banda (-3dB)	BW	-	23	-	KHz
Resistencia de salida	R_{OUT}	-	50	-	Ω
Histéresis	B_{hys}	30	52	-	G



- b) Sensor de Efecto Hall con salida digital LB9051

La estructura es la misma que la del sensor de salida lineal pero además tiene un comparador Schmitt trigger. Sin campo magnético aplicado al dispositivo, el transistor de salida permanece en corte (OFF). Al aplicar un campo magnético,

perpendicular a la superficie del dispositivo, que está por encima de un valor umbral, el transistor de salida pasa a saturación (ON). Si se reduce el campo magnético, el transistor conmutará para un valor menor que el umbral de conducción. Este dispositivo presenta cierta histéresis que previene disparos erróneos. La salida de este sensor se muestra en la figura 3.4 y sus características técnicas en la tabla 3.2.

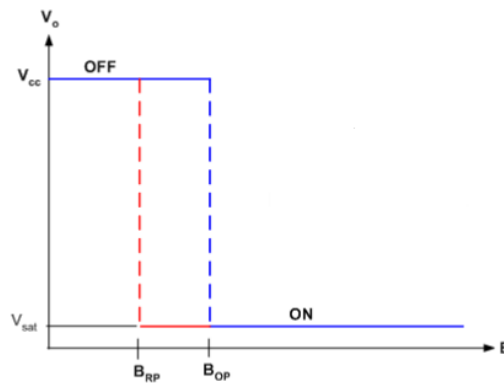


Figura 3.4: Salida digital del sensor LB9051 [17]

Características:

Tabla 3.2: Características del sensor de salida digital LB9051 [18]

Características eléctricas $T_A=+25^{\circ}\text{C}$						
Características	Símbolo	Condiciones	Min.	Típico	Máx.	Unidades
Tensión de alimentación	VCC		-	-	18	V
Corriente de alimentación	ICC		-	-	8	mA
Tensión de salida en "ON"	V _{OH1}	V _{CC} =16V, I _O =-30uA, B=-300G	-	-	0.4	V
	V _{OH2}	V _{CC} =3.6V, I _O =-30uA, B=-300G	-	-	0.4	V
Tensión de salida en "OFF"	V _{OL1}	V _{CC} =16V, I _O =12mA, B=300G	14.6	-	-	V
	V _{OL2}	V _{CC} =3.6V, I _O =12mA, B=300G	2.2	-	-	V
Punto de liberación (RP)	B _{RP}		-300	--	-	G
Punto de operación (OP)	B _{OP}		-	-	300	G

✓ **Elección:**

Se optó por elegir el sensor de Efecto Hall de salida digital LB9051 por lo siguiente:

- La señal de salida es un pulso cuya ancho depende del tiempo en el cual un campo magnético es perpendicular a su superficie, esto permite medir la frecuencia y período de rotación del eje del anemómetro. La duración del pulso positivo nos indica el tiempo de rotación e indirectamente la velocidad del viento.
- El sensor de Efecto Hall UGN3503U tiene una salida lineal analógica que varía proporcionalmente a la intensidad del campo magnético que se le aplica. No obstante, su señal de salida se distorsiona cuando el campo magnético cambia rápidamente y no guarda ninguna relación con la frecuencia de rotación del eje del anemómetro por lo que no es posible determinar la velocidad del viento.
- Además su elección fue porque hay disponibilidad en el mercado local.

3.4.3 BATERÍA

Se empleará una batería recargable de plomo ácido de 12V y de capacidad nominal 4Ah de la marca YUASA. Esto debido a que se requieren niveles de tensión de 9V, 5V y 3.3V para la alimentación de todo el sistema y puesto que el nivel de tensión de dropout requerido de los reguladores es de 2V es necesario una alimentación superior a 11V, por ello se optó por una batería de 12V. Asimismo, es necesario que la batería sea recargable puesto que se quiere diseñar un sistema de alimentación autónomo debido a la remota ubicación en la cual se colocará el equipo medidor. A continuación, en las figuras 3.5 y 3.6, se muestra las curvas de carga y descarga de esta batería:

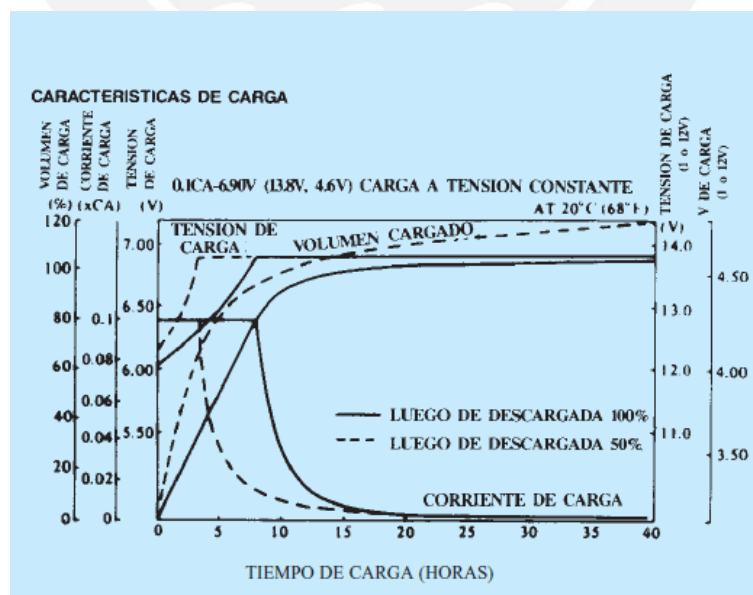


Figura 3.5: Curva característica de carga de la batería [19]

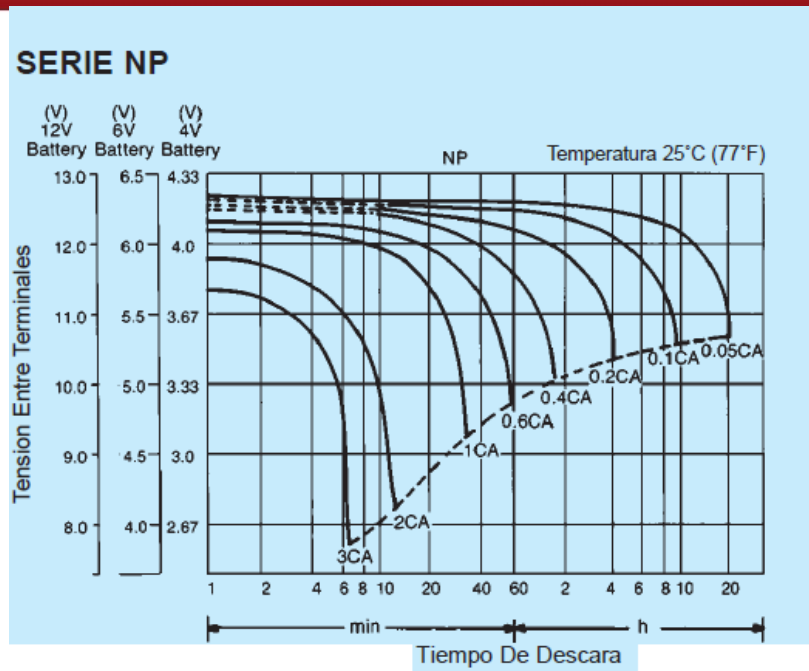


Figura 3.6: Curva característica de descarga de la batería [19]

3.4.4 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN AUTÓNOMO: DETECTOR DE VENTANA CON LM339

El detector de ventana, también llamado comparador de ventana, permite determinar si un valor de tensión de entrada se encuentra comprendido dentro de un rango de tensiones preestablecidos.

Este circuito se muestra en la figura 3.8, está compuesto por dos comparadores y dos tensiones de referencia que definen el límite superior (V_+) e inferior (V_-). Será empleado para delimitar el rango de carga de la batería, el circuito implementado se explica más adelante. El amplificador operacional LM339 se muestra en la figura 3.7.



Figura 3.7: Amplificador Operacional LM339 [20]

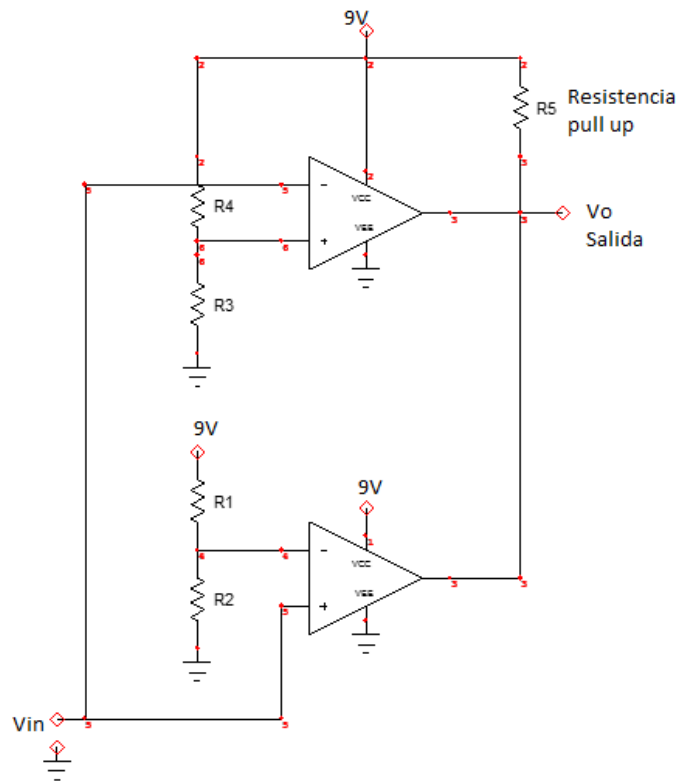


Figura 3.8: Comparador de ventana

Elaboración: Propia

La gráfica de la salida de este circuito se muestra en la figura 3.9:

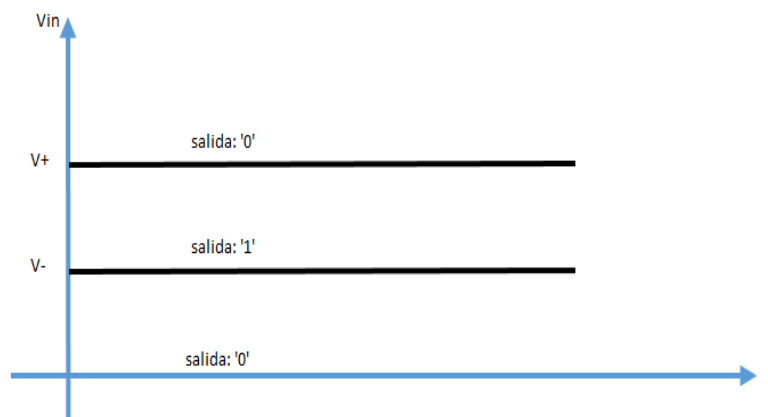


Figura 3.9: Salida del comparador de ventana

Elaboración: Propia

3.4.5 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN AUTÓNOMO: MOSFET DE BAJA TENSIÓN

Se ha buscado un dispositivo de conmutación para la carga de la batería que sea controlado por tensión, de esta forma, se ha optado por el mosfet de canal N de baja tensión, puesto que la tensión drenador - surtidor no superará los 14V. Para el diseño del sistema de alimentación autónomo se ha elegido el mosfet 2N7002, el cual cumple con los requerimientos antes mencionados además para este dispositivo no es necesario el acoplamiento de un disipador. El circuito implementado con este dispositivo se explica más adelante.

En la tabla 3.3 se muestran las características técnicas de este dispositivo.

Tabla 3.3: Características del mosfet 2N7002 [21]

Símbolo	Parámetro	Condiciones	Mín.	Típico	Máx.	Unidades
$V_{(BR)DSS}$	Drain-source breakdown voltage	$I_D = 10 \mu A; V_{GS} = 0 V; T_j = 25^\circ C$	60	-	-	V
I_D	drain current	$V_{GS} = 10 V; T_{amb} = 25^\circ C$	-	-	360	mA
R_{DSon}	drain-source on-state resistance	$V_{GS} = 10 V; I_D = 500mA; T_j = 25^\circ C; \text{pulsed}; t_p \leq 300 \mu s; \delta \leq 0.01$	-	1	1.6	Ω
V_{GSth}	gate-source threshold voltage	$I_D = 250 \mu A; V_{DS} = V_{GS}; T_j = 25^\circ C$	1.1	1.75	2.4	V
V_{GS}	gate-source voltage	$T_{amb} = 25^\circ C$	-20	-	20	V
C_{iss}	input capacitance	$V_{GS} = 0 V; V_{DS} = 10 V; f = 1 \text{ MHz}; T_j = 25^\circ C$	-	30	50	pF
C_{oss}	output capacitance		-	7	-	pF
C_{rss}	reverse transfer capacitance		-	4	-	pF

3.4.6 ANEMÓMETRO DE COPELAS

Para determinar la velocidad del viento se optó por emplear el anemómetro de rotación o de copelas, el cual fue diseñado e impreso en una impresora 3D tal como se muestra en la siguiente figura 3.10:

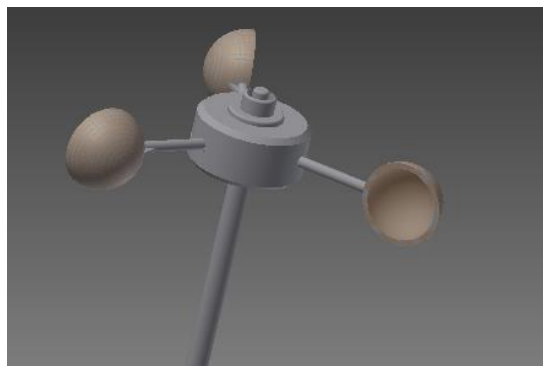


Figura 3.10: Diseño 3D del anemómetro de copelas

Elaboración: Propia

Para convertir el movimiento rotacional del anemómetro a una señal eléctrica se plantearon dos soluciones que se describen a continuación:

3.4.6.1 ANEMÓMETRO CON UN GENERADOR DC

En primer lugar, la solución planteada empleando un motor de corriente continua de 12V marca Motoba como generador DC consta de un anemómetro de copelas cuyo eje se encuentra acoplado al generador, de esta manera se convierte energía mecánica en energía eléctrica. La señal eléctrica o voltaje generado por el generador de corriente continua es proporcional a la velocidad del viento. Sin embargo, el voltaje no puede ser medido directamente por el microcontrolador por lo cual se acondiciona esta señal. Luego, este valor de voltaje acondicionado es enviado al microcontrolador para ser procesado y finalmente convertido en m/s. Este valor se muestra en un display LCD y se almacena en una tarjeta de memoria SD. El anemómetro fue calibrado mediante el uso de un anemómetro comercial marca Kestrel 4100. El generador DC y el anemómetro empleado se muestran en las figuras 3.11 y 3.12.



Figura 3.11: Motor DC 12V marca Motoba

Elaboración: Propia



Figura 3.12: Anemómetro Kestrel 4100

Elaboración: Propia

El procedimiento de calibración del anemómetro que se construyó se desarrolló de la siguiente manera: el anemómetro de copelas fue sometido a diferentes intensidades de viento el cual se registró con el anemómetro marca Kestrel 4100 y al mismo tiempo mediante un multímetro marca Fluke se realizó la medición del voltaje en los terminales del generador, esto con el fin de obtener la relación entre el voltaje generado y la velocidad del viento. Cabe mencionar que el sensado de la velocidad del viento se realiza en ambos sentidos de rotación del eje del generador, es decir, se ha empleado el rango de -12V a 12V.

A continuación se muestra la tabla 3.4 con las mediciones realizadas con el anemómetro comercial y el generador DC para una orientación del viento (un sentido de giro del eje del generador) a partir del cual se obtienen tensiones positivas en los terminales del generador DC:

Tabla 3.4: Valores de voltaje y velocidad del viento medidos

Elaboración: Propia

	Voltaje(V)	Velocidad del viento(m/s)
1	0.00	0
2	0.43	2.8
3	0.60	3.8
4	1.20	7.7
5	1.30	8.3
6	1.50	9.6
7	1.60	10.2
8	1.64	10.5
9	1.69	10.8
10	1.90	12.2

La relación que existe entre velocidad del viento y el voltaje obtenido del generador DC se muestra en la figura 3.13:

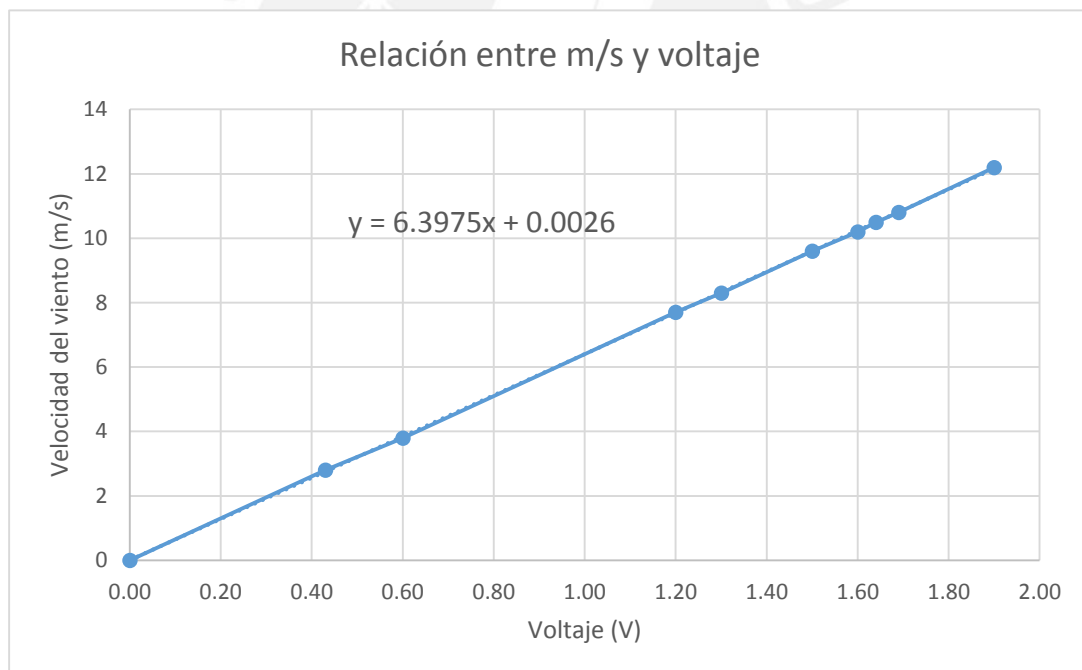


Figura 3.13: Relación entre la velocidad del viento y el voltaje generado (0 hasta 12V)

Elaboración: Propia

En la tabla 3.5 se muestran las mediciones realizadas con el anemómetro comercial y el generador DC para una orientación de velocidad del viento (un sentido de giro del eje del generador) a partir del cual se obtienen tensiones negativas en los terminales del generador DC:

Tabla 3.5: Valores de voltaje y velocidad del viento medidos

Elaboración: Propia

	Voltaje(V)	Velocidad del viento(m/s)
1	0.00	0
2	-0.43	2.8
3	-0.60	3.8
4	-1.20	7.7
5	-1.30	8.3
6	-1.50	9.6
7	-1.60	10.2
8	-1.64	10.5
9	-1.69	10.8
10	-1.90	12.2

La relación que existe entre velocidad del viento y el voltaje obtenido del generador DC se muestra en la figura 3.14:

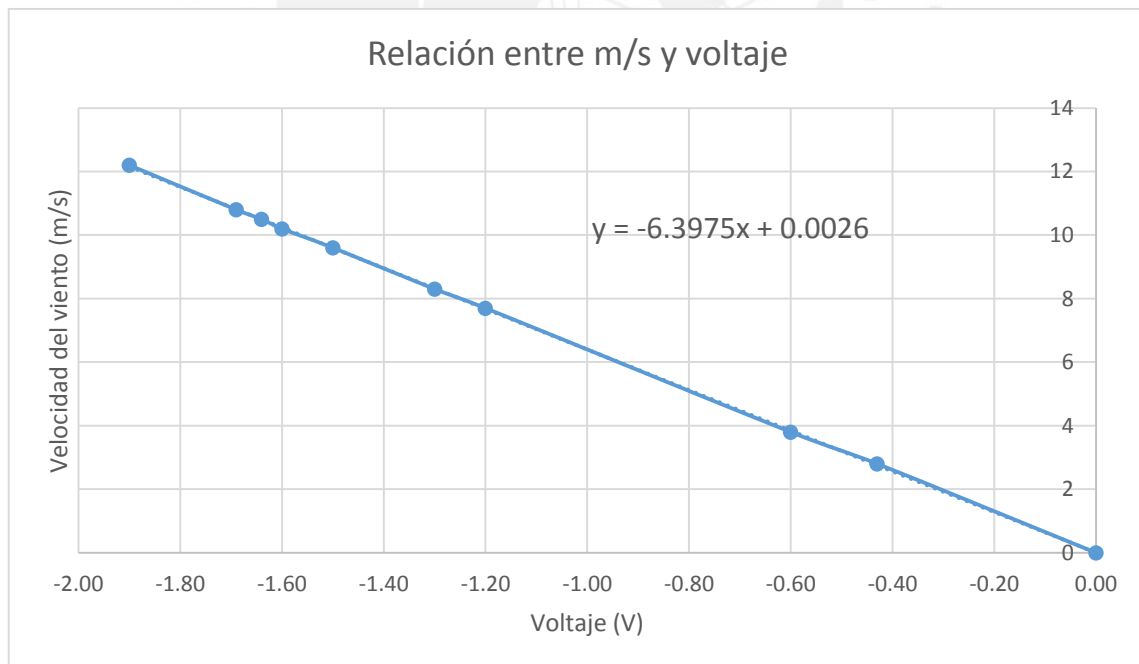


Figura 3.14: Relación entre la velocidad del viento y el voltaje generado (0 hasta -12V)

Elaboración: Propia

A partir de las mediciones se observa un cambio de 15.614mV en la tensión de salida del generador DC por cada 0.1m/s en la velocidad del viento, con un error menor al 1%, por lo cual se aproxima la resolución a 0.1m/s. Asimismo el rango de medición es desde 0 hasta 76.8m/s (tensión de salida del generador igual a 12V o -12V).

3.4.6.2 ANEMÓMETRO MAGNÉTICO

En segundo lugar, la solución planteada para medir la velocidad del viento con un sensor de Efecto Hall consta de este dispositivo y un par de imanes con polos norte y sur ubicados diametralmente opuestos en el eje del anemómetro. El sensor de Efecto Hall sensa el corte de las líneas de campo de polaridad norte cuando estas son perpendiculares a la superficie del dispositivo. Para este proyecto se ha empleado el sensor de salida digital LB9051. La solución para determinar el tiempo en el cual las líneas de corte son perpendiculares al dispositivo es empleando un temporizador, en electrónica este es un arreglo RC, compuesto por una resistencia y un condensador. Este tiempo de corte será traducido en el tiempo de carga de un condensador para establecer una relación entre velocidad del viento expresada en la frecuencia de rotación del eje del anemómetro y el voltaje de carga del condensador. El anemómetro implementado se muestra en la figura 3.15.

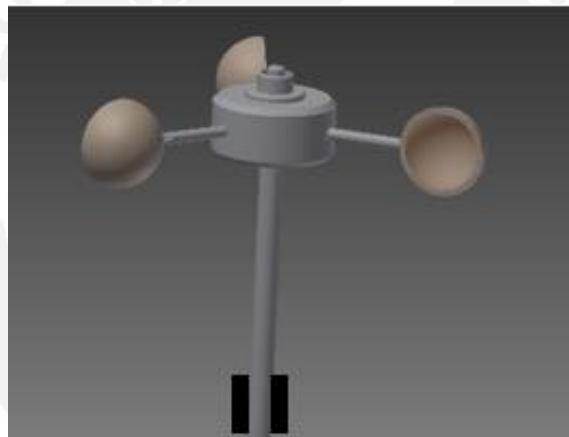


Figura 3.15: Anemómetro de copelas con imanes acoplados

Elaboración: Propia

El procedimiento de calibración del anemómetro que se construyó se desarrolló de la siguiente manera: el anemómetro de copelas fue sometido a diferentes intensidades de viento el cual se registró con el anemómetro marca Kestrel 4100 y al mismo tiempo mediante un multímetro marca Fluke se realizó la medición del voltaje en los terminales del condensador, esto con el fin de obtener la relación entre el voltaje de carga del condensador y la velocidad del viento.

A continuación se muestra la tabla 3.6 con las mediciones realizadas con el anemómetro comercial y el circuito de carga del condensador (el funcionamiento de este circuito se explica más adelante):

Tabla 3.6: Valores de voltaje y velocidad del viento medidos

Elaboración: Propia

	Voltaje(V)	Velocidad del viento(m/s)
1	2.000	0.00
2	1.700	3.50
3	1.677	3.70
4	1.646	4.10
5	1.615	4.40
6	1.611	4.50
7	1.584	4.80
8	1.574	4.90
9	1.534	5.40
10	1.512	5.60
11	1.494	5.80
12	1.487	5.90
13	1.415	6.70
14	1.404	6.90
15	1.314	7.90

En la figura 3.16, se muestra una gráfica de la relación lineal que existe entre la velocidad del viento y el voltaje generado por el circuito de carga del condensador acondicionado al sensor de Efecto Hall.

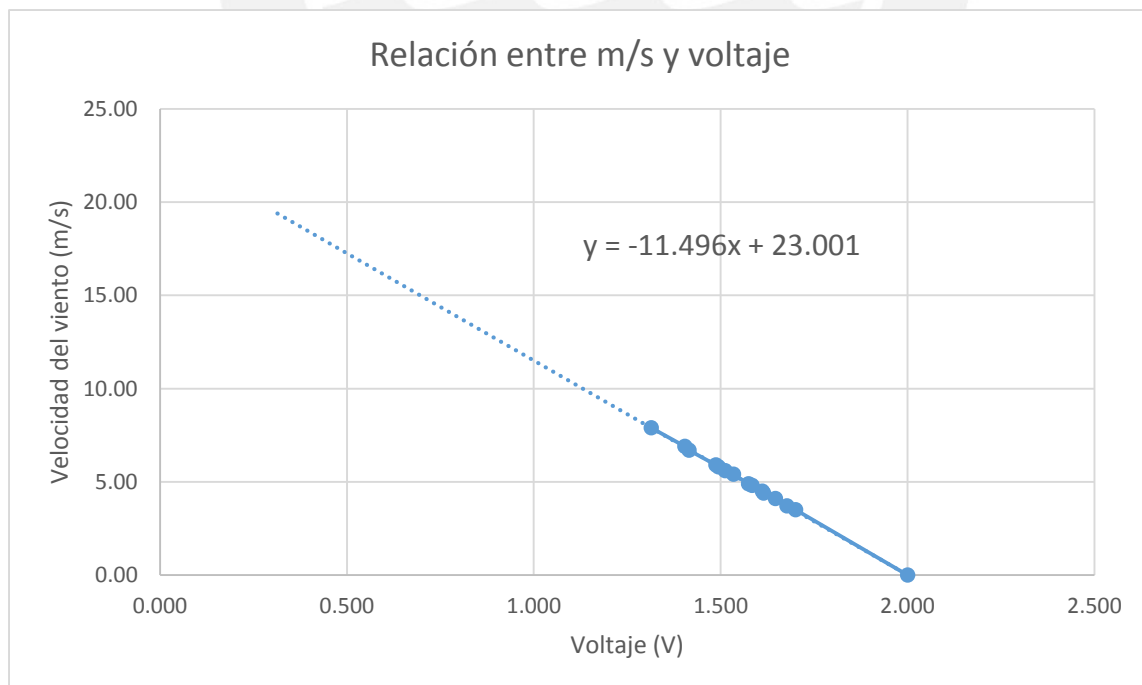


Figura 3.16: Relación entre la velocidad del viento y el voltaje generado

Elaboración: Propia

3.4.7 DETERMINACIÓN DE LA ORIENTACIÓN DEL VIENTO: VELETA

El viento puede soplar en su máxima intensidad no solo en una dirección sino en dos (debido a los dos posibles sentidos de giro del eje del generador: horario y antihorario). La solución para determinar la orientación del viento es una veleta. Esta veleta tiene acoplada sensores reed switch colocados alrededor del eje del anemómetro. Un sensor reed switch es un interruptor que se cierra ante la presencia de un campo magnético. En este caso el campo magnético será proporcionado por un imán, el cual se encuentra acoplado al eje del anemómetro y se desplaza sobre los ocho sensores reed switch. Lo que se ha hecho es dividir la veleta en ocho sectores y a cada sector se le ha asignado un valor de punto cardinal el cual se traduce en un valor de voltaje. Para ello se ha empleado un arreglo de resistencias como un divisor de voltaje, esto para emplear un solo puerto del microcontrolador. Finalmente, el microcontrolador traduce este valor de voltaje en un determinado punto cardinal. A partir del orden de los puntos cardinales se determina la orientación del viento, el cual puede ser cualquiera de los dos sentidos de giro del eje del generador. Para fines de pruebas en este proyecto se ha acoplado el eje de la veleta con el del anemómetro.

A continuación en la figura 3.17 se muestra el diseño en 3D de la veleta empleada para el sensado de la orientación del viento.

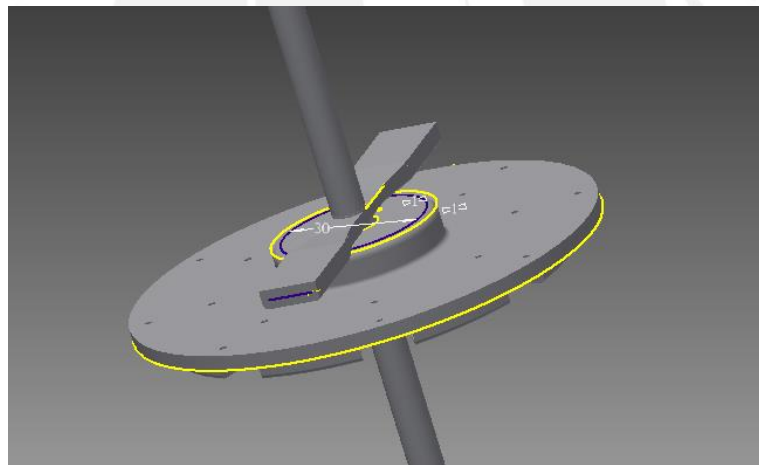


Figura 3.17: Diseño de la veleta en 3D

Elaboración: Propia

3.4.8 CUANTIFICACIÓN DE LA IRRADIACIÓN SOLAR: PANEL SOLAR

Interesa medir el valor de la irradiación solar si se quiere diseñar un sistema de energía con paneles solares en un determinado lugar. Este parámetro indica la cantidad de energía eléctrica disponible. La irradiación solar se define como la energía por unidad de superficie en W/m^2 . La solución planteada para cuantificar la irradiación solar es a través de un panel solar, este es un dispositivo que entrega voltaje DC que es proporcional a la cantidad de irradiación solar que incide sobre su superficie. El

procedimiento seguido para medir la irradiación solar con un panel solar es el siguiente: en primer lugar se ha medido el voltaje entregado por el panel solar durante todo el día y a diferentes horas. Luego, se ha relacionado un valor de voltaje entregado por el panel solar con un valor de irradiación solar medido por la Estación Meteorológica Davis ubicado en la Pontificia Universidad Católica del Perú.

3.4.8.1 SELECCIÓN DEL PANEL SOLAR

Existen muchos fabricantes, como Kyocera, Mitsubishi, Sanyo, Sharp, Siemens y Suntech. Se considera silicio policristalino o multi-cristalino, por ser el más económico para la aplicación rural [22].

El tipo de panel solar seleccionado debe proporcionar un voltaje de trabajo adecuado para la medición de la irradiación solar así como para la carga de la batería. Se tuvieron varias alternativas, entre ellas paneles solares de 5W, 10W, 20W y 100W, asimismo de valor nominal de tensión de 8V, 12V, 25V y 50V. El panel seleccionado para este proyecto es de 5W de potencia máxima de salida y 12V de voltaje nominal y entrega hasta 18 VDC como máximo. Debido al consumo del sistema, el cual no superará los 350mA, se ha escogido un panel solar de 5W. Asimismo, debido al nivel de voltaje de carga mínimo de la batería de 12V que alimentará el sistema, se ha escogido un panel solar de 12V de voltaje nominal. El panel solar empleado se muestra en la figura 3.18.



Figura 3.18: Panel Solar de 12V-5W

Elaboración: Propia

3.4.8.2 MEDICIÓN DE LA IRRADIACIÓN SOLAR

El instrumento empleado para la medición de la irradiación solar fue el equipo Davis de la estación meteorológica Hipólito Unanue ubicado en la Pontificia Universidad Católica del Perú. A continuación en la figura 3.19 se muestra la gráfica Irradiación Solar vs Hora del día registrado por este equipo en uno de los días en los que se realizaron las mediciones de la tensión de salida del panel solar:

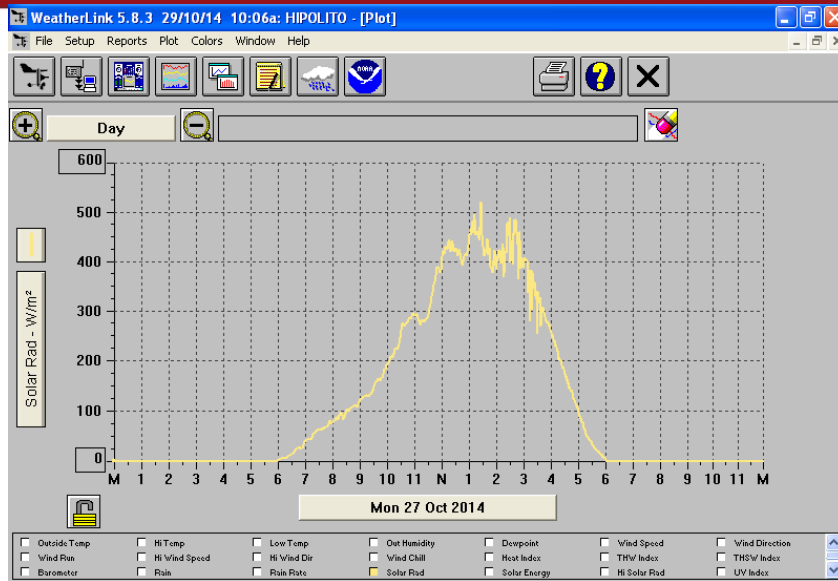


Figura 3.19: Gráfica de irradiación solar vs hora del día

Fuente: Estación Metereológica de la PUCP

En la tabla 3.7 se muestran las mediciones del voltaje de salida y su valor correspondiente de irradiación solar del panel solar seleccionado:

Tabla 3.7: Valores obtenidos de tensión de salida vs irradiación solar

Elaboración: Propia

Medición N° 1			Medición N° 2			Medición N° 3			Medición N° 3			Medición N° 3		
Hora	Voltaje (V)	Irradiación Solar (W/m2)	Hora	Voltaje (V)	Irradiación Solar (W/m2)	Hora	Voltaje (V)	Irradiación Solar (W/m2)	Hora	Voltaje (V)	Irradiación Solar (W/m2)	Hora	Voltaje (V)	Irradiación Solar (W/m2)
08:30	8.36	101	08:48	9.89	230	07:30	7.67	79	14:46	10.62	496	17:29	6.35	50
09:30	9.65	146	09:08	9.93	241	08:35	9.59	125	14:56	10.56	476	17:32	6.21	47
10:30	9.98	258	10:14	10.00	267	09:45	10.32	387	15:04	10.65	501	17:34	6.29	48
11:30	10.10	292	11:14	10.34	392	09:56	10.34	390	15:18	10.54	465	17:36	6.19	45
12:30	10.42	428	11:46	10.38	406	10:56	10.51	455	15:27	10.55	470	17:38	6.12	43
13:30	10.46	438	12:12	10.51	455	11:08	10.52	458	15:35	10.53	463	17:40	6.11	42
14:30	10.47	441	12:53	10.52	457	11:15	10.57	478	15:45	10.41	420	17:44	6.08	41
15:30	10.23	341	13:41	10.44	429	11:34	10.47	440	15:52	10.17	325	17:46	6.04	38
16:30	9.74	175	14:24	10.73	531	12:00	10.63	498	16:26	8.42	104	17:47	6.06	40
Medición N° 2			14:46	10.03	279	13:12	10.84	573	16:32	8.00	95	17:48	5.86	36
07:41	8.14	98	15:20	9.85	214	13:16	10.58	480	16:52	6.43	52	17:50	5.67	35
07:46	8.81	111	15:55	9.75	179	13:58	10.59	483	17:00	6.98	59	17:52	5.63	32
08:16	9.62	136	16:11	9.59	128	14:24	10.60	486	17:12	7.23	68	17:53	5.32	28
08:24	9.71	167	16:58	6.94	68	14:30	10.61	490	17:15	7.67	79	17:57	4.42	19
08:39	9.77	188	17:15	6.21	45	14:39	10.71	524	17:24	7.68	91	17:58	4.62	20

Se ha tomado un rango de una hora para la realización de las mediciones de irradiación solar en promedio, en la figuras 3.20 y 3.21 se muestran las gráficas de voltaje de salida vs irradiación solar, para ello primero se ha ordenado el valor de tensión de menor a mayor:

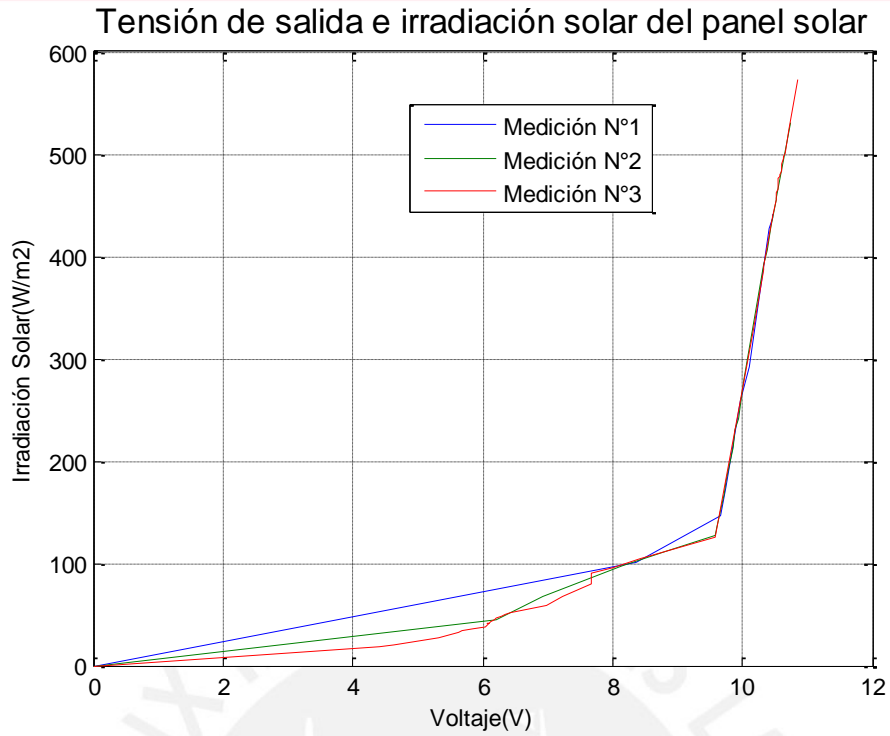


Figura 3.20: Gráfica de voltaje vs irradiación solar de cada una de las mediciones

Elaboración: Propia

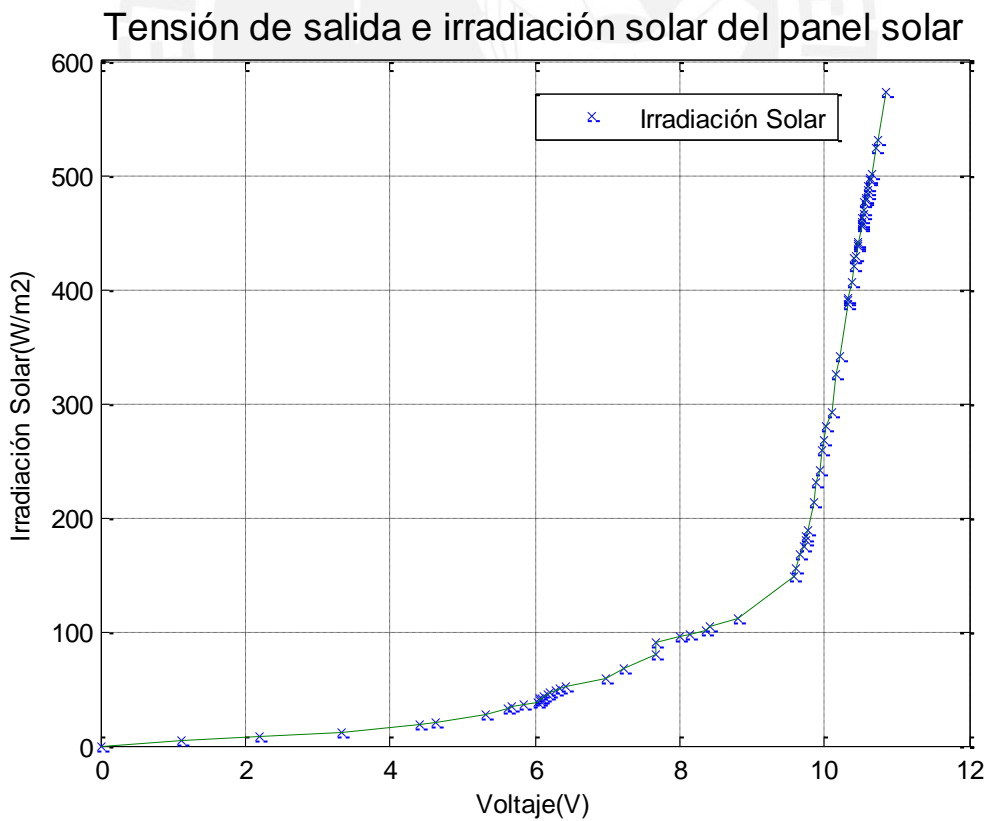


Figura 3.21: Gráfica de voltaje vs irradiación solar con todas las muestras tomadas en las mediciones

Elaboración: Propia

Para hallar la relación entre el voltaje entregado por el panel solar y la irradiación solar se realizó una aproximación a un polinomio de grado seis en Matlab que se muestra en la figura 3.22.

```

Linear model Poly6:
f(x) = p1*x^6 + p2*x^5 + p3*x^4 + p4*x^3 + p5*x^2 +
      p6*x + p7
Coefficients (with 95% confidence bounds):
p1 = 0.01991 (0.01425, 0.02557)
p2 = -0.5417 (-0.7361, -0.3474)
p3 = 5.474 (2.917, 8.031)
p4 = -24.79 (-40.78, -8.807)
p5 = 48.45 (1.148, 95.75)
p6 = -26.46 (-81.87, 28.95)
p7 = -7.217e-13 (-18.64, 18.64)
  
```

Figura 3.22: Coeficientes del polinomio de aproximación de grado 6

Elaboración: Propia

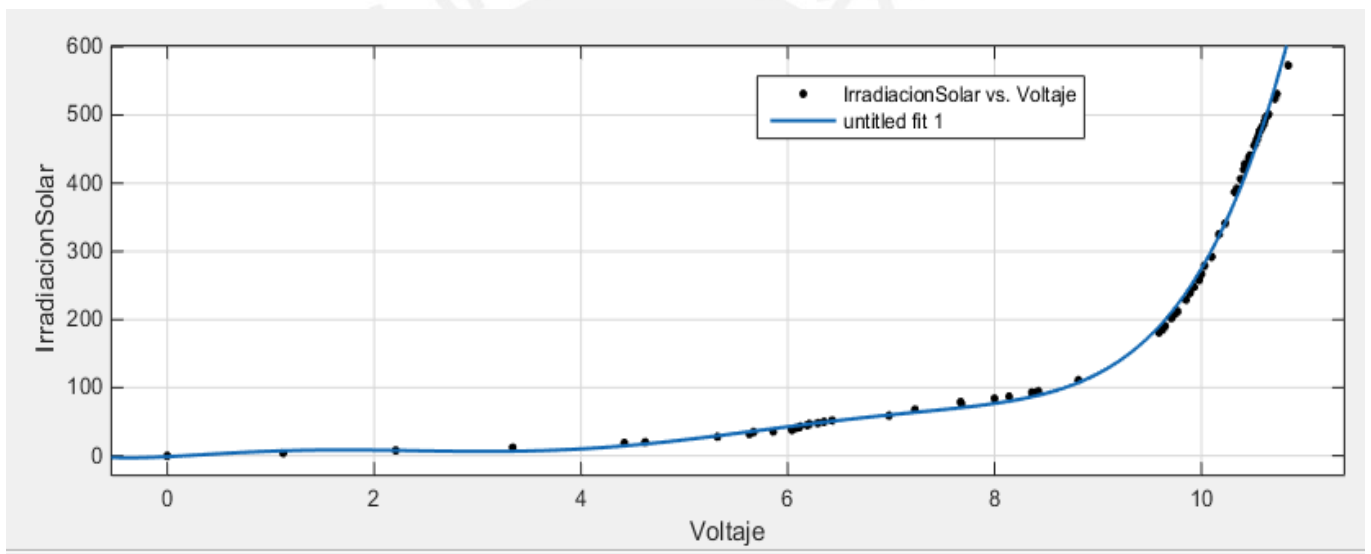


Figura 3.23: Aproximación de la gráfica voltaje vs irradiación solar

Elaboración: Propia

Se llega a la siguiente ecuación:

Irradiación Solar

$$= 0.01991 \times X^6 - 0.5417 \times X^5 + 5.474 \times X^4 - 24.79 \times X^3 + 48.45 \times X^2 - 26.46 \times X$$

Donde X es igual al voltaje de salida del panel solar.

Con la aproximación al polinomio de 6to grado se tiene un error menor al 1.5% en todo el rango de medición de la irradiación solar.

3.4.9 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

3.4.9.1 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE VOLTAJE DEL ANEMÓMETRO EMPLEANDO UN SENSOR DE EFECTO HALL

El sensor de Efecto Hall seleccionado fue el LB9051. La salida digital que proporciona varía desde 0.02V hasta 5V. Los cálculos realizados para el diseño de este circuito se encuentran en el Anexo A. El sistema de acondicionamiento que se diseñó para esta señal se muestra en la figura 3.24:

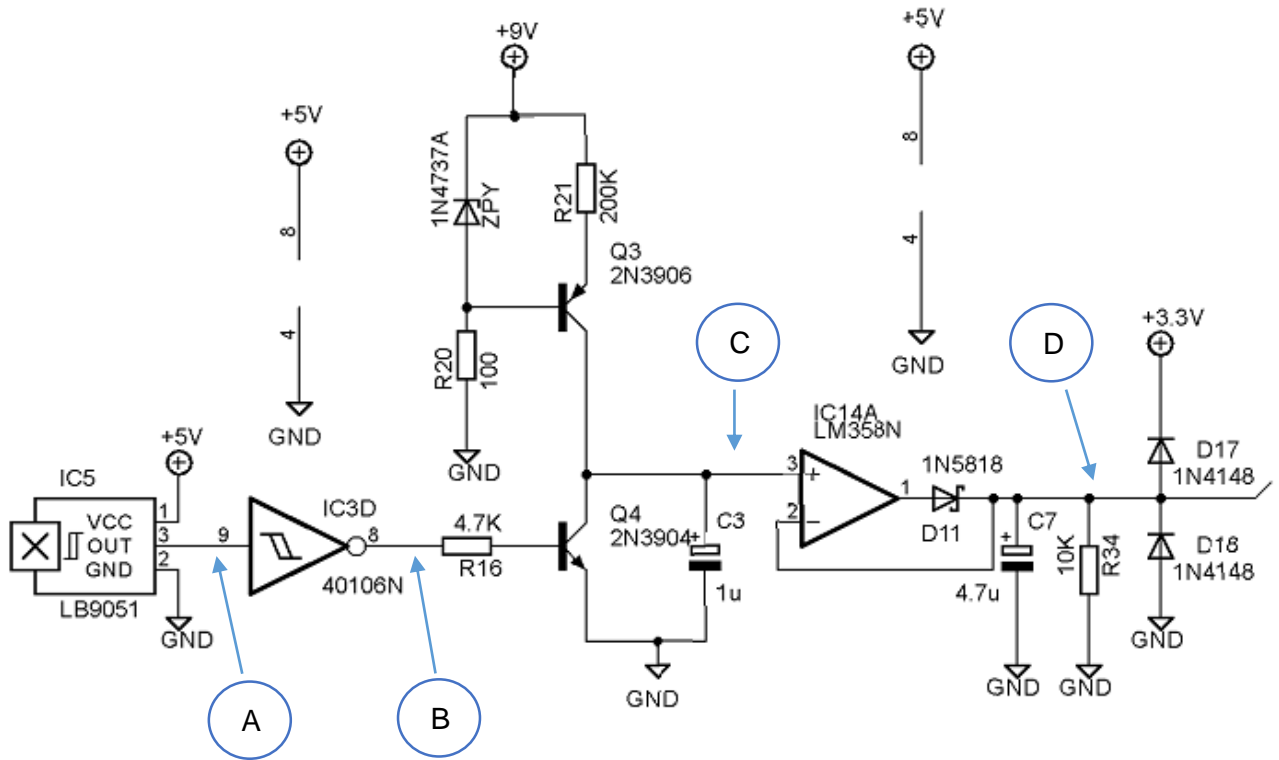


Figura 3.24: Acondicionamiento de la señal proveniente del sensor de Efecto Hall

Elaboración: Propia

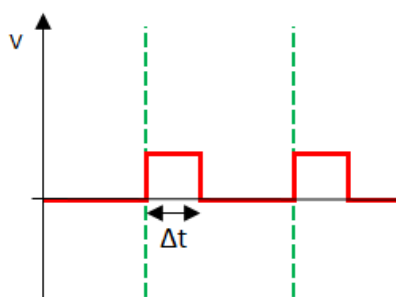
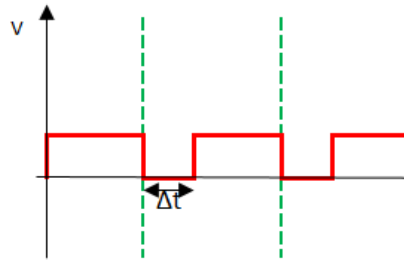


Figura 3.25: Señal en la posición A

Elaboración: Propia

A. La salida del sensor de Efecto Hall ingresa a una compuerta inversora Smith trigger, esto debido a que se desea una señal sin perturbaciones.



B. Salida del sensor de Efecto Hall invertida.

Figura 3.26: Señal en la posición B

Elaboración: Propia

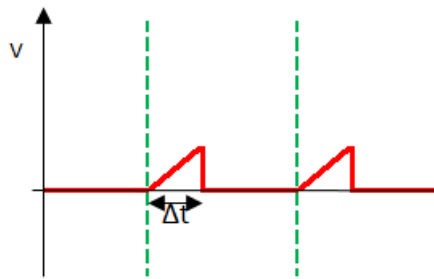


Figura 3.27: Señal en la posición C

Elaboración: Propia

C. De acuerdo a la frecuencia de rotación del eje del anemómetro se dará la conmutación del transistor NPN 2N3904. Este transistor tiene en paralelo a los terminales emisor y colector un condensador de 1uF, el cual se cargará hasta un nivel proporcional a la duración del pulso de 0V proveniente de la salida de la compuerta inversora Smith trigger.

D. El terminal positivo del condensador de 1uF ingresa a un detector de picos compuesto por un op-amp, un diodo 1N5818, un condensador de 4.7uF y una resistencia de 10K. Finalmente se obtiene en la salida una señal continua inversamente proporcional a la velocidad de rotación de eje del anemómetro que se encuentra dentro de rango de 240mV hasta 2V.

El transistor PNP 2N3906, el diodo Zener 1N4737A de 7.5V, la resistencia de drenaje de 100 ohmios, y la resistencia de 200K conforman una fuente de corriente que fija el nivel de tensión de carga del condensador en función de Δt .

A continuación se muestran los cálculos realizados:

De la ecuación de carga del condensador se obtiene la siguiente relación:

$$i(t) = C \frac{dV}{dt}$$

$$v(t) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(t) dt + v(t_0)$$

$$v_c(0) = 0$$

pero como $i(t)$ es cte entonces : $v_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t I dt + 0$

Finalmente se obtiene la ecuación de carga del condensador con una fuente de corriente constante:

$$v_c(t) = \frac{1}{C} I \Delta t = \frac{I \Delta t}{C}$$

Donde I es la corriente que fluye por la resistencia 200K:

$$I = \frac{V_Z - 0.7}{200K} = \frac{7.5 - 0.7}{200K} = 3.4 * 10^{-5} A$$

Reemplazando este valor en la ecuación de carga del condensador:

$$v_c(t) = \frac{1}{10^{-6}} * 3.4 * 10^{-5} \Delta t = 34 * \Delta t \rightarrow \Delta t = \frac{v_c}{34}$$

A partir de la anterior ecuación se obtiene Δt , el cual es el tiempo en el que el campo magnético norte del imán se encuentra perpendicular al sensor de Efecto Hall, es decir, el tiempo de duración del pulso de 0V.

Para calcular la velocidad del eje es necesario emplear la siguiente fórmula:

$$v(\text{velocidad}) = \frac{e(\text{espacio})}{t(\text{tiempo})}$$

El espacio que recorrerá el imán es constante y se calcula como se explica a continuación a partir de la figura 3.28:

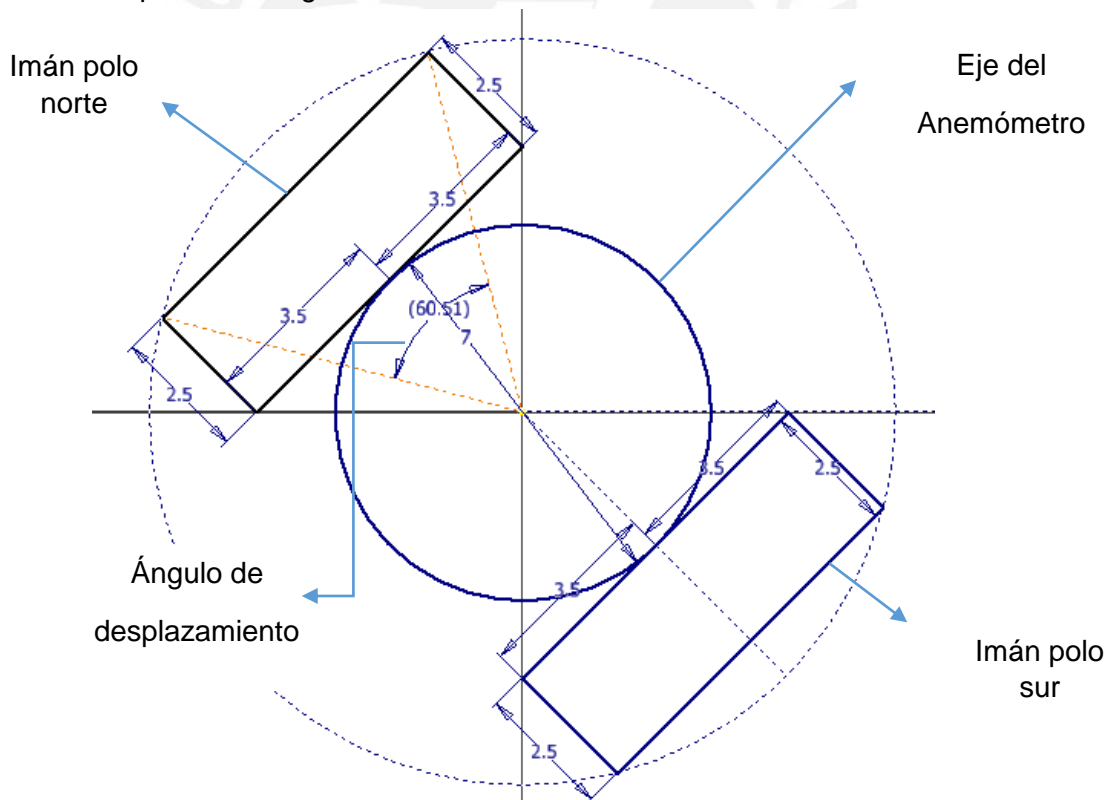


Figura 3.28: Arco de desplazamiento del imán

Elaboración: Propia

$$Ad = \text{Ángulo de desplazamiento}(\text{rad}) = 2 * \pi * \frac{60.51}{360} = 1.0561$$

$$\text{Longitud del arco de desplazamiento}(\text{mm}) = Ad * \text{Radio} = 7 * 1.0561 = 7.3927$$

Entonces la velocidad del eje se calcula de la siguiente manera:

$$v(m/s) = \frac{7.3927 * 10^{-3}}{\Delta t}$$

Se midió la velocidad del eje con este circuito y con un tacómetro para verificar el correcto funcionamiento y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 3.8: Determinación de la velocidad del eje de un generador con un tacómetro y con el circuito acondicionado al sensor de efecto hall

Elaboración: Propia

Alimentación del motor(V)	Velocidad registrado por el tacómetro(RPM)	Velocidad registrado por el tacómetro(m/s)	Voltaje del condensador (V)	Δt(ms)	Velocidad hallado a partir del circuito (m/s)
2.1	1011	0.131	1.90	55.882	0.132
3.08	1525	0.198	1.27	37.353	0.198
4.02	2201	0.286	0.88	25.882	0.286
6.05	2854	0.371	0.68	20.000	0.370
8.09	3584	0.466	0.54	15.882	0.465
10.26	4198	0.546	0.46	13.529	0.546
12.09	4959	0.645	0.39	11.471	0.644

Finalmente, se observa en la figura 3.24 que se adicionó unos diodos 1N4148 de alta velocidad de switching (4ns) que permiten proteger el puerto ADC del microcontrolador, en caso se presenten sobre voltajes, ya sean negativos (menores a 0 voltios) o positivos (mayores a 3.3 voltios).

3.4.9.2 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE VOLTAJE DEL SENSOR DE TEMPERATURA

El sensor de temperatura seleccionado es el LM35, el cual tiene una precisión calibrada de 1°C. Su rango de medición comprende desde -55°C hasta 150°C. La salida es lineal y cada grado centígrado equivale a 10mV. No obstante, para el diseño de este equipo de metrología se ha limitado el rango de medición desde 0°C hasta 150°C debido a que el ambiente en el cual será empleado no presentará temperaturas por debajo de 0°C.

El rango de tensión de salida del sensor de temperatura comprende desde 0V hasta 1.5 V. Como se observa en la figura 3.29 se adicionó unos diodos 1N4148 de alta velocidad de switching (4ns) que permiten proteger el puerto ADC del microcontrolador, en caso

3.4.9.4 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE VOLTAJE DEL PANEL SOLAR

El panel solar seleccionado proporciona una señal comprendida entre 0 y 18 voltios, esta señal tiene que ser acondicionada para poder ser muestreada por el conversor analógico digital.

Esto se logrará mediante el siguiente arreglo de resistencias de precisión. Los cálculos realizados para la selección de las resistencias se encuentran en el Anexo C.

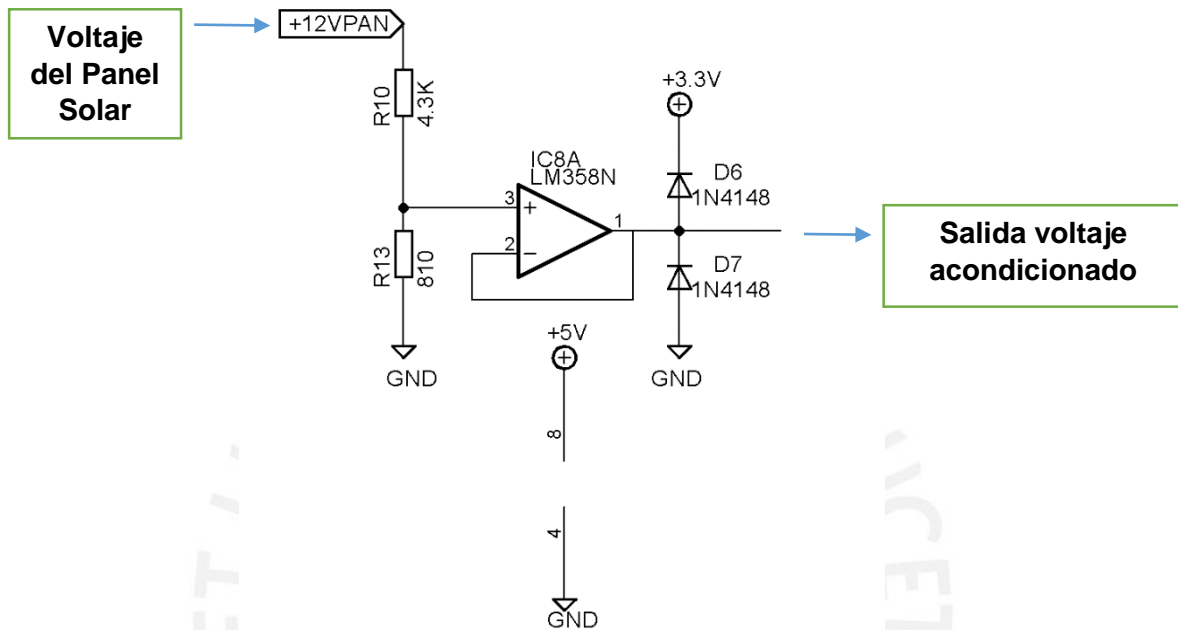


Figura 3.31: Arreglo de resistencias acondicionamiento del voltaje del panel solar

Elaboración: Propia

El terminal positivo va conectado al arreglo de resistencias que disminuyen la amplitud del voltaje del panel solar a través del divisor de tensión y en el punto de salida del voltaje acondicionado (punto 3) se tendrá voltaje que va desde 0V hasta 2.853V (cuando en panel solar entregue 18V).

Se adaptó las impedancias con un buffer (Op-amp con realimentación negativa) y como se observa en la figura 3.31 se adicionó unos diodos 1N4148 de alta velocidad de switching (4ns) que permiten proteger el puerto ADC del microcontrolador, en caso existan sobre voltajes, ya sean negativos (menores a 0 voltios) o positivos (mayores a 3.3 voltios).

3.4.9.5 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE SENSADO DE LA ORIENTACIÓN DEL VIENTO

Para el sensado de la orientación del viento se ha empleado un arreglo de interruptores Reed Switch los cuales se activarán ante la presencia del campo magnético del imán acoplado al eje del anemómetro cuando este pase por encima de alguno de estos interruptores de acuerdo a la velocidad del viento. Este arreglo se muestra en la figura 3.32.

Esto se logrará mediante el siguiente arreglo de resistencias de precisión, cada nivel de tensión del divisor corresponde a una de las ocho posibles direcciones de la velocidad del viento que se muestran en la tabla 3.9:

Tabla 3.9: Nivel de tensión para cada dirección de velocidad del viento

Elaboración: Propia

Orientación	Rango de voltaje
N	2.27V-2.37V
NE	2.09V-2.19V
E	1.89V-1.99V
SE	1.67V-1.77V
S	1.43V-1.53V
SO	1.16V-1.26V
O	836mV-936mV
NO	443mV-543mV

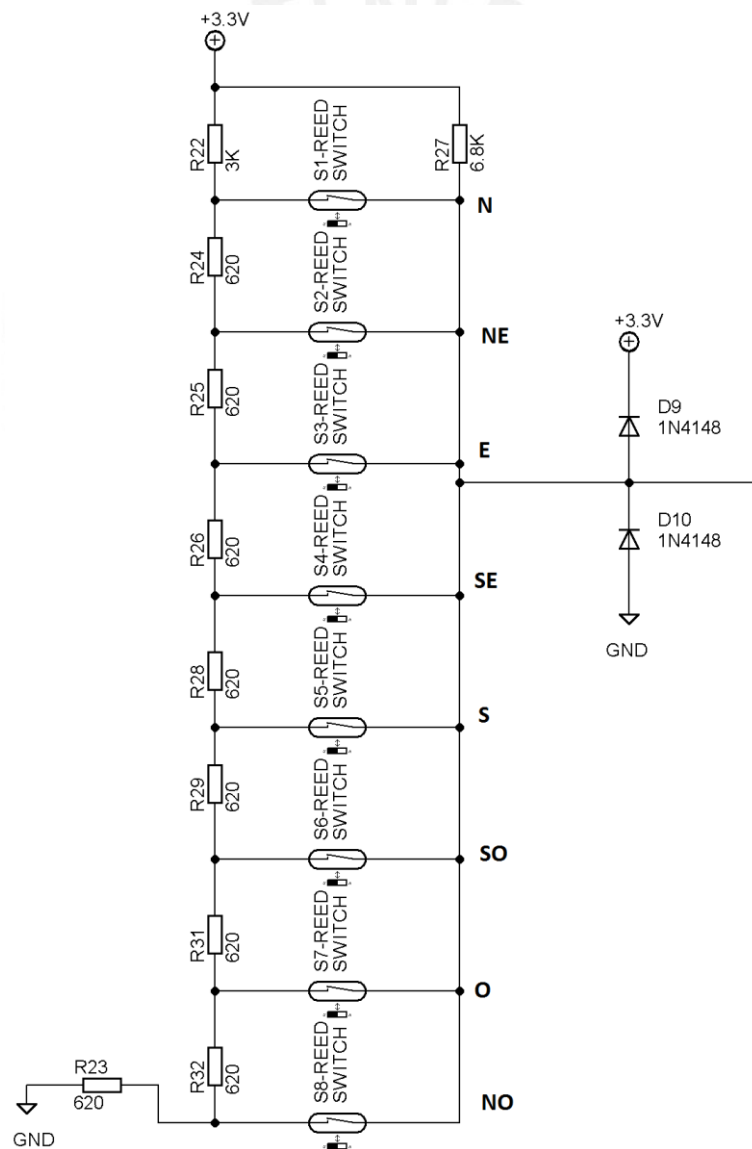


Figura 3.32: Arreglo de resistencias para el sensado de la dirección del viento

Elaboración: Propia

Los cálculos realizados para la selección de las resistencias se encuentran en el Anexo D. Se adicionó unos diodos 1N4148 de alta velocidad de switching (4ns) que permiten proteger el puerto ADC del microcontrolador, en caso existan sobre voltajes, ya sean negativos (menores a 0 voltios) o positivos (mayores a 3.3 voltios).

3.4.10 SELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR

El sistema necesitará un microcontrolador que cumpla con los requerimientos de procesamiento en tiempo real, rapidez y optimización de circuitos para ocupar poco espacio. Debido a que se tienen que sensar diversas señales analógicas provenientes de los distintos sistemas de medición diseñados, es necesario un microcontrolador de mayor potencia que tengan como mínimo seis entradas a módulos ADC, es decir, se requiere de un microcontrolador que realice procesamiento digital con varias señales, por ello se optó por el Microcontrolador ARM CórteX de núcleo M4 de Texas Instruments, que se muestran en la figura 3.33:

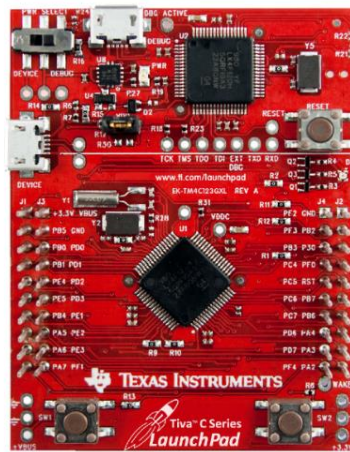


Figura 3.33: Microcontrolador ARM CórteX TM4C123GH6PM [23]

A continuación se muestra una tabla comparativa con las principales características de los microcontroladores que se tuvieron como opción:

Tabla 3.10: Tabla comparativa de microcontroladores

Elaboración: Propia

	ARM CórteX TM4C123GH6PM	ATMEGA16L
Alimentación	3.3V	3.3V
Frecuencia	80 MHz	16MHz
Resolución del ADC	12 bits	10 bits
Velocidad del muestreo	1MSPS	15kSPS
Arquitectura ADC	SAR	SAR
Muestreo secuencial de canales	Si	No
Nº de entradas ADC	12	8
Precio	S/.80	S/.20

Algunos factores que se tuvieron en cuenta para la elección del microcontrolador son las siguientes:

- El LaunchPad Tiva C Series TM4C123G tiene integrado un emulador o tarjeta de prueba que facilita las conexiones en la fase de simulaciones y pruebas. Asimismo, la mayor frecuencia y velocidad de funcionamiento agiliza las operaciones de cálculo y se obtienen resultados más precisos e inmediatos.
- Asimismo, el módulo de conversión análogo digital del ARM CórteX cuenta con cuatro secuencias de muestreo los cuales pueden ser programables, y permite realizar el muestreo de varios canales en forma paralela.

3.4.11 DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN AUTÓNOMO

Debido a que el sistema requiere funcionar de manera autónoma el mayor tiempo posible se ha diseñado un sistema de alimentación autónomo. Los niveles de tensión requeridos para la alimentación de todo el sistema son de 9V, 5V y 3.3V. Se han empleado los reguladores de voltaje LM7805 y LM7809 para obtener los niveles de voltaje fijos de 9V y 5V.

Estos reguladores necesitan un voltaje de dropout de 2V para su correcto funcionamiento. Asimismo, se empleó una batería recargable marca YUASA de 12V y capacidad nominal de 4Ah.

El sistema de regulación que alimenta todo el sistema de medición se muestra en la figura 3.34:

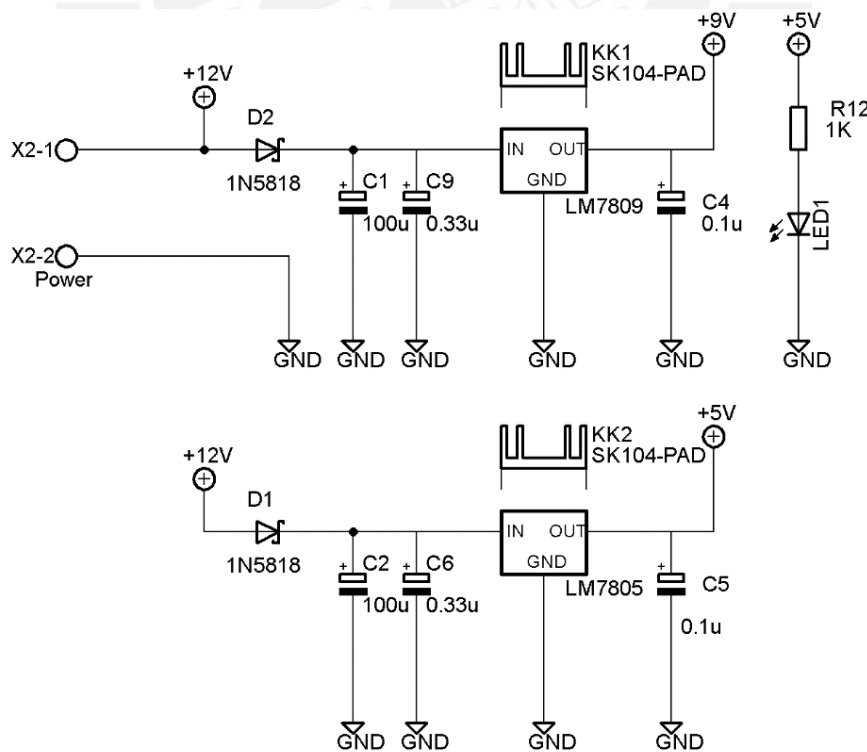


Figura 3.34: Reguladores de tensión LM7805 y LM7809 conectados a la batería de 12V

Elaboración: Propia

3.4.12 SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO DE ALMACENAMIENTO

El almacenamiento de los parámetros eléctricos como voltaje del panel solar, irradiación solar, la velocidad del viento registrada por el anemómetro, temperatura, nivel de tensión en la batería, fecha y hora se realizará en una memoria SD de 2 GB debido a la flexibilidad de este dispositivo para trasladar los datos, asimismo el sistema de archivos FAT permite almacenar datos hasta una capacidad de 2GB. La comunicación con el microcontrolador se realizó mediante el sistema SSI (Interfaz Serial Síncrona). La información almacenada en la SD interactúa con una PC por medio de un lector de memoria SD externo, mediante el cual el interesado en estos datos podrá visualizarlos. El diagrama de conexiones se muestra en la figura 3.36.

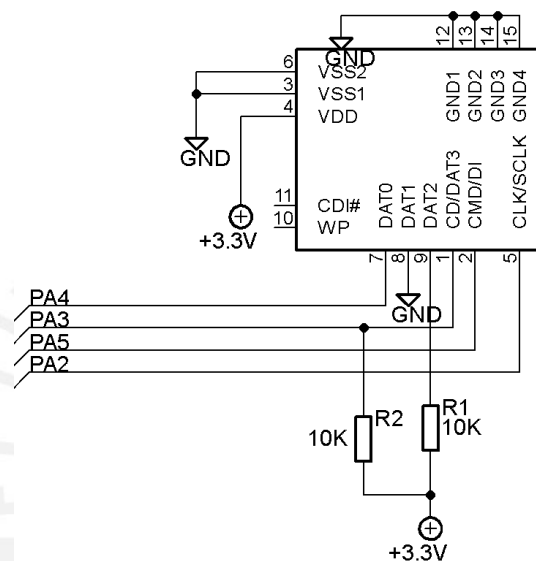


Figura 3.36: Diagrama de conexiones de la memoria SD hacia el puerto SSI del microcontrolador

Elaboración: Propia

3.4.13 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE VOLTAJE DEL GENERADOR DC

El motor de corriente continua empleado como generador que fue seleccionado proporciona una señal en el rango comprendido desde -12V hasta 12V, esta señal no puede ser medida directamente por el microcontrolador por lo cual debe ser acondicionada para luego ser muestreada por ADC. Esto será posible mediante el arreglo de resistencias que se muestra en la figura 3.37. Mediante este arreglo de resistencias se reduce la amplitud de la tensión entregada por el generador y en el punto A se tendrá una señal que va desde -366mV hasta 366mV. Para desplazar la señal y hacer que esta sea solo positiva, se requiere de una fuente de alimentación de 9 voltios, con lo cual se tendrá una señal que varía desde 794mV hasta 1.67V. Este rango es menor al rango del ADC, lo cual permite medir sobre tensiones en caso se presenten. Asimismo, se adicionó unos diodos 1N4148 de alta velocidad de switching (4ns) que permiten proteger el puerto ADC del microcontrolador, en caso se presenten voltajes negativos o positivos mayores a 3.3V. Los cálculos realizados para la selección de las resistencias se encuentran en el Anexo F.

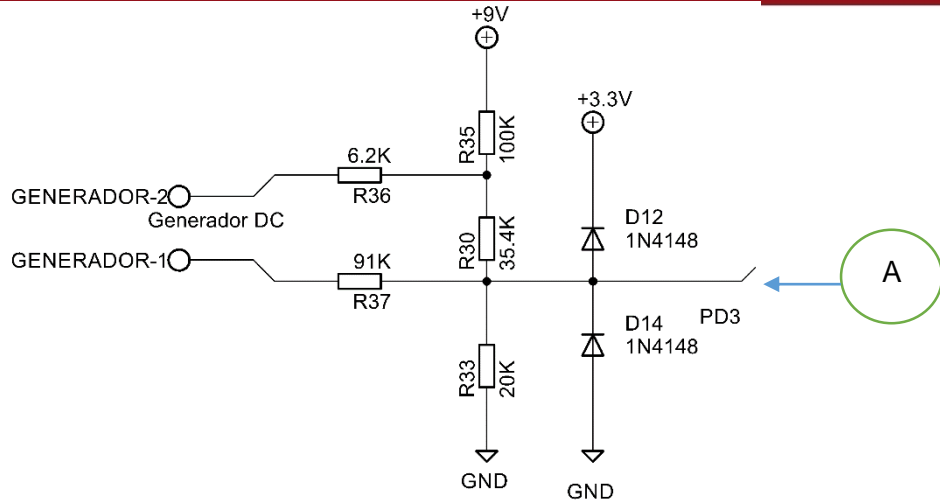


Figura 3.37: Arreglo de resistencias para el acondicionamiento de la señal de voltaje del generador DC

Elaboración: Propia

3.4.14 VISUALIZACIÓN DE PARÁMETROS: DISPLAY LCD

La visualización de los parámetros como temperatura (°C), nivel de batería (V), voltaje del panel solar (V), velocidad del viento con un generador DC (m/s), irradiación solar (W/m²), orientación del viento y velocidad del viento con sensor de Efecto Hall (m/s) se muestran en un display LCD. La actualización de estos datos se produce cada dos segundos. En la figura 3.38 se muestra las conexiones del display LCD con el microcontrolador.

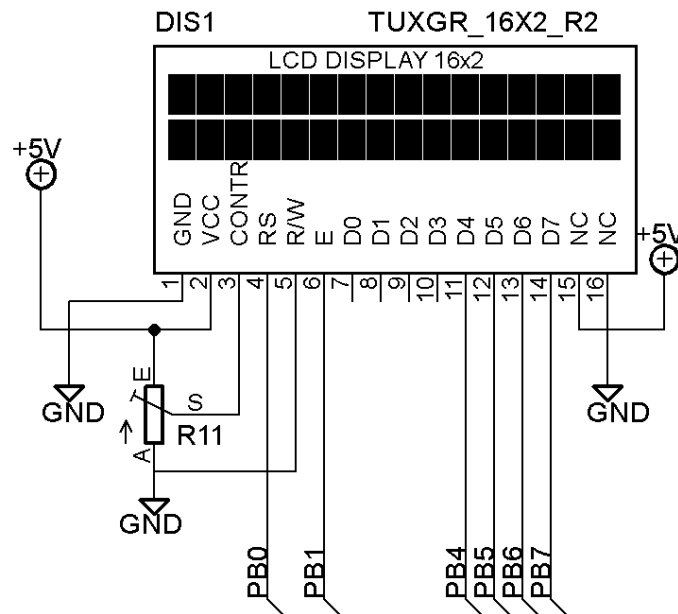


Figura 3.38: Diagrama de conexiones del display LCD con el microcontrolador

Elaboración: Propia

3.4.15 **DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN**

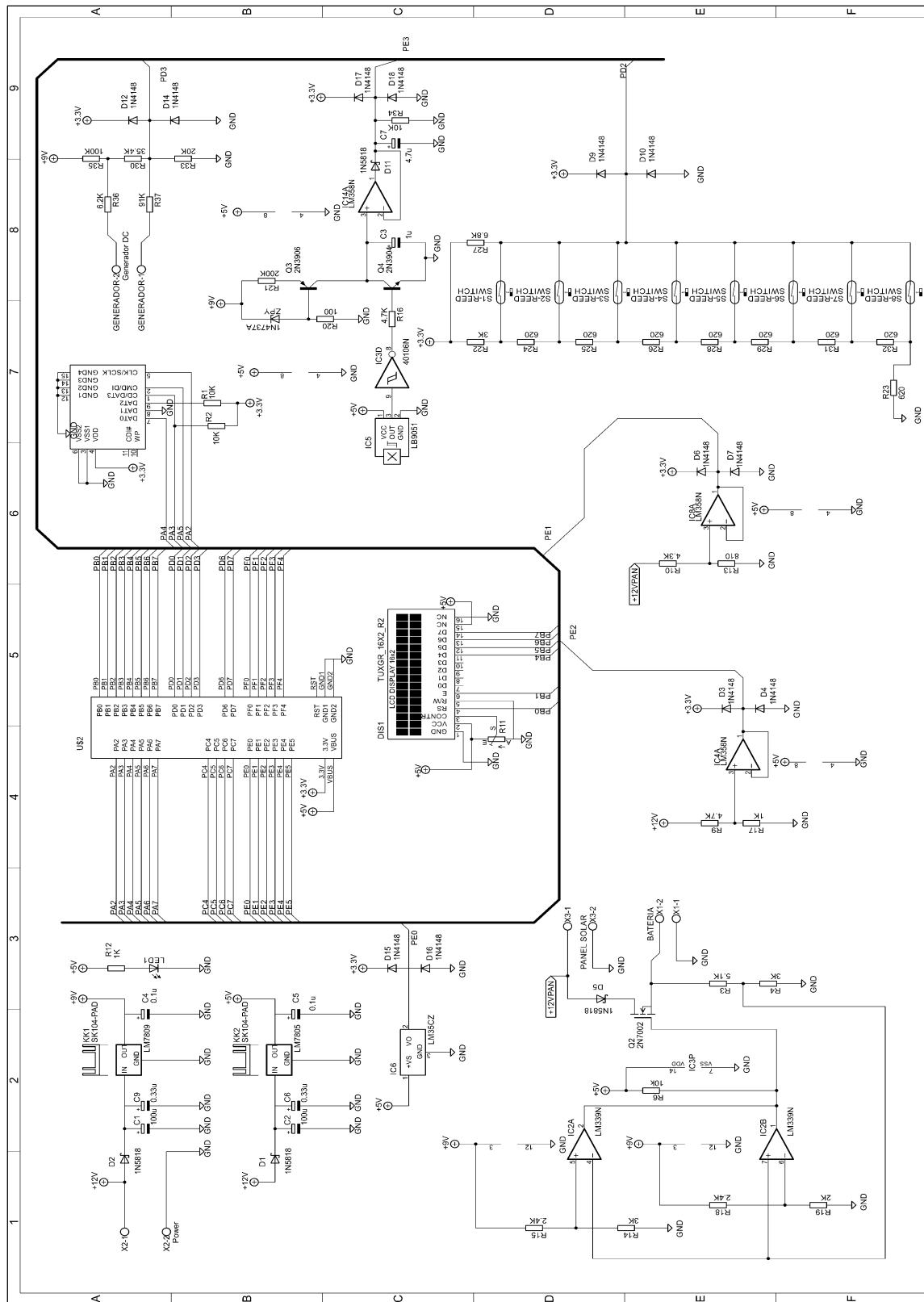


Figura 3.39: Diagrama esquemático de la tarjeta de medición de parámetros eólicos y fotovoltaicos

Elaboración: Propia

En la Figura 3.39 se observa el diagrama esquemático del equipo de metrología para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos y eólicos. Se ha incluido una pantalla LCD para el monitoreo del funcionamiento del sistema. Asimismo, se muestra la tarjeta SD en la cual se almacenan los parámetros eléctricos del panel solar (voltaje), velocidad del viento, orientación del viento, nivel de batería, temperatura, irradiación solar, fecha y hora.

3.5 DISEÑO DEL SOFTWARE

3.5.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE PARÁMETROS EÓLICOS Y FOTOVOLTAICOS

Para la escritura del código se empleó la Interfaz de Desarrollo Integrado Code Composer Studio en el lenguaje de programación orientado a objetos. En la figura 3.40 se muestra el procedimiento de adquisición de datos y cálculo de irradiación solar, voltaje del panel solar, temperatura, nivel de batería, velocidad del viento así como la orientación del viento. En la figura 3.41 se muestra el diagrama de flujo de la inicialización del microcontrolador.

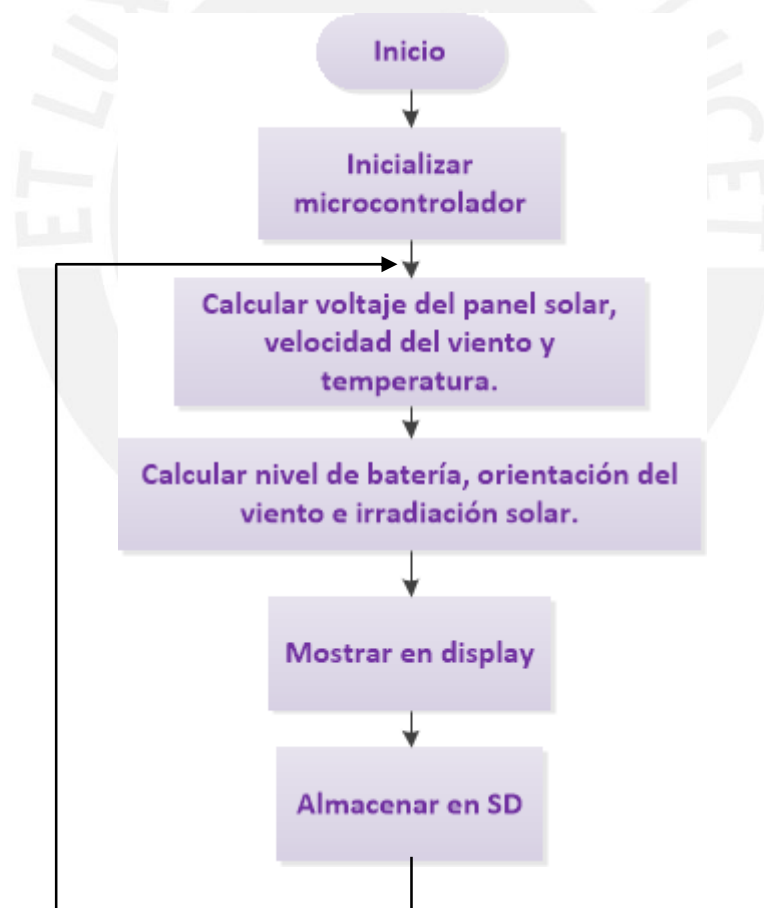


Figura 3.40: Diagrama de flujo principal

Elaboración: Propia

La inicialización del microcontrolador se da de la siguiente manera:

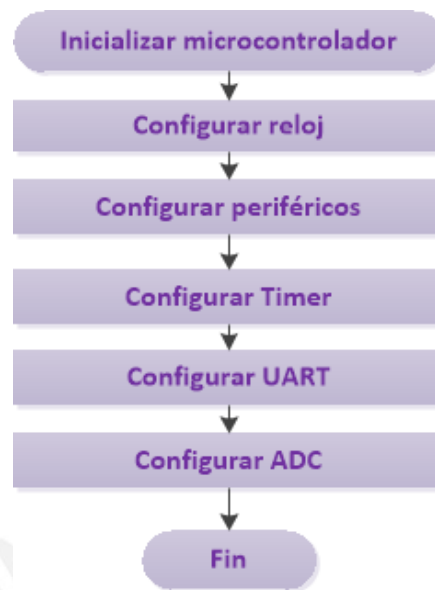


Figura 3.41: Diagrama de flujo de la inicialización del microcontrolador

Elaboración: Propia

3.5.2 DESCRIPCIÓN DE LOS BLOQUES DEL DIAGRAMA DE FLUJO

3.5.2.1 INICIALIZACION DEL MICROCONTROLADOR

La inicialización del microcontrolador está compuesta por las siguientes etapas:

- i. Configuración del reloj: El microcontrolador posee un PLL interno, el cual puede ser configurado hasta una frecuencia de 800MHz. Se divide este valor por 16 para configurar la frecuencia del reloj principal a 50MHz.
- ii. Configuración de los periféricos: Este bloque configura las entradas del ADC, como entradas analógicas, para poder realizar el muestreo.
- iii. Configurar Timer: El TIMER 0 será empleado para determinar la fecha y hora en tiempo real en el registro de datos.
- iv. Configurar UART: Este bloque configura el UART para emplearse como buffer temporal para el almacenamiento de los datos en la memoria SD.
- v. Configurar ADC: El microcontrolador consta de doce entradas al puerto ADC. Para muestrear y calcular todos los valores de irradiación solar, voltaje del panel solar, temperatura, nivel de batería, orientación del viento y velocidad del viento por dos métodos (sensor de Efecto Hall y generador DC), es necesario seis entradas del módulo ADC, por lo cual se usa la secuencia 0 del ADC que permite realizar el muestreo paralelo de los seis valores.

3.5.2.2 DIAGRAMA DE FLUJO PRINCIPAL

El proceso principal consta de las siguientes etapas:

- a) **Calcular voltaje del panel solar, velocidad del viento y temperatura.**
- **Para calcular el voltaje del panel solar se sigue el siguiente procedimiento:**

- i. Del proceso de acondicionamiento de la señal se tiene que para una entrada de 18V el voltaje máximo de entrada que se tendrá en el divisor será de 2.853V y el valor mínimo será 0V. Por lo cual se tiene una diferencia de 2.853V, el cual será el nivel de voltaje máximo que ingresará al ADC.
- ii. Luego, se convierte la señal de entrada en Voltios a su valor muestreado por el ADC, a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Valor entregado por el ADC} = \frac{\text{Voltaje de entrada} \times 4096}{3.3}$$

- iii. Entonces se verifica que para un valor de 18V del panel solar, se tendrá un voltaje en el divisor de 2.853V y el valor entregado por el ADC será de 3541, de esta manera se establece la siguiente relación:

$$\text{Voltaje del Panel Solar} = \frac{\text{Valor entregado por el ADC}}{196.72222}$$

Para lo cual se realiza el muestreo de la señal por un periodo de 0.5 segundos.

- **Para calcular la velocidad del viento con el sensor de Efecto Hall se sigue el siguiente procedimiento:**

- iv. Del proceso de acondicionamiento de la señal se tiene que el voltaje máximo de entrada que se tendrá será de 2V y el valor mínimo será 0.24V. Por lo cual se tiene que 2V, será el nivel de voltaje máximo que ingresará al ADC.
- v. Luego, se convierte la señal de entrada en Voltios a su valor muestreado por el ADC, a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Valor entregado por el ADC} = \frac{\text{Voltaje de entrada} \times 4096}{3.3}$$

- vi. Entonces se verifica que para un valor de 2V del circuito de acondicionamiento del sensor de Efecto Hall el valor entregado por el ADC será de 2482, de esta manera se establece la siguiente relación:

$$\text{Voltaje del circuito hall} = \frac{\text{Valor entregado por el ADC}}{1241}$$

- vii. Finalmente, se calcula la velocidad del viento a partir de la fórmula hallada anteriormente.

$$\text{Velocidad del viento} = -11.496 * \text{Voltaje del circuito hall} + 23.001$$

Para lo cual se realiza el muestreo de la señal por un periodo de 0.5 segundos

➤ **Para calcular la velocidad del viento con el generador DC se sigue el siguiente procedimiento:**

viii. Del proceso de acondicionamiento de la señal se tiene que para una entrada de 12V el voltaje mínimo acondicionado que se tendrá en el divisor será de 794mV y para una entrada de -12V el voltaje máximo acondicionado que se tendrá en el divisor será de 1.67V. Por lo cual se tiene una diferencia de 0.876V, el cual será el nivel de voltaje máximo que ingresará al ADC.

ix. Luego, se convierte la señal de entrada en Voltios a su valor muestreado por el ADC, a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Valor entregado por el ADC} = \frac{\text{Voltaje de entrada} \times 4096}{3.3}$$

x. Entonces se verifica que para un valor de -12V del generador DC, se tendrá un voltaje en el divisor de 1.67V y el valor entregado por el ADC será de 2072, de esta manera se establece la siguiente relación:

$$\text{Voltaje del Generador Divisor} = \frac{\text{Valor entregado por el ADC}}{1240.7186}$$

xi. Luego, se convierte la señal de voltaje en el divisor al valor real entregado por el generador:

$$\begin{aligned} \text{Voltaje del Generador} \\ = -27.28 * \text{Voltaje del Generador Divisor} + 33.651 \end{aligned}$$

xii. Finalmente, se calcula la velocidad del viento, cabe resaltar que como se tendrá tanto valores positivos y negativos en la variable voltaje de generador, se tendrá dos ecuaciones para determinar la velocidad del viento ya que esta siempre es positiva:

Si el voltaje del generador es negativo entonces se emplea la siguiente ecuación:

$$\text{Velocidad del viento} = -6.3975 * \text{Voltaje del Generador} + 0.0026$$

En caso contrario, la velocidad del viento será determinada de la siguiente manera:

$$\text{Velocidad del viento} = 6.3975 * \text{Voltaje del Generador} + 0.0026$$

Para lo cual se realiza el muestreo de la señal por un periodo de 0.5 segundos

➤ **Para calcular la temperatura se sigue el siguiente procedimiento:**

- xiii. Del proceso de acondicionamiento de la señal se tiene que para una entrada de 150°C el voltaje máximo de entrada que se tendrá será de 1.5V y el valor mínimo será 0V. Por lo cual se tiene una diferencia de 1.5V, el cual será el nivel de voltaje máximo que ingresará al ADC.
- xiv. Luego, se convierte la señal de entrada en Voltios a su valor muestreado por el ADC, a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Valor entregado por el ADC} = \frac{\text{Voltaje de entrada} \times 4096}{3.3}$$

- xv. Entonces se verifica que para un valor de 150°C de temperatura, se tendrá un voltaje de 1.5V y el valor entregado por el ADC será de 1861, de esta manera se establece la siguiente relación:

$$\text{Temperatura} = \frac{\text{Valor entregado por el ADC}}{12.4067}$$

Para lo cual se realiza el muestreo de la señal por un periodo de 0.5 segundos.

b) Calcular nivel de batería, orientación del viento e irradiación solar.

➤ **Para calcular el nivel de batería se sigue el siguiente procedimiento:**

- xvi. Del proceso de acondicionamiento de la señal se tiene que para una entrada de 15V el voltaje máximo de entrada que se tendrá en el divisor será de 2.631V y el valor mínimo será 0V. Por lo cual se tiene una diferencia de 2.631V, el cual será el nivel de voltaje máximo que ingresará al ADC.
- xvii. Luego, se convierte la señal de entrada en Voltios a su valor muestreado por el ADC, a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Valor entregado por el ADC} = \frac{\text{Voltaje de entrada} \times 4096}{3.3}$$

- xviii. Entonces se verifica que para un valor de 15V de la batería, se tendrá un voltaje en el divisor de 2.631V y el valor entregado por el ADC será de 3265, de esta manera se establece la siguiente relación:

$$\text{Nivel de batería} = \frac{\text{Valor entregado por el ADC}}{217.6666}$$

Para lo cual se realiza el muestreo de la señal por un periodo de 0.5 segundos.

➤ **Para calcular la orientación del viento se sigue el siguiente procedimiento:**

Para el cálculo de la orientación solar se ha planteado el siguiente cuadro que se muestra en la tabla 3.11 con ocho principales puntos cardinales.

Tabla 3.11: Valores ADC para el sensado de la dirección del viento

Elaboración: Propia

Rango de tensión(V)	Número ADC	Escribir
2.27-2.37	2817-2941	N
2.09-2.19	2594-2718	NE
1.89-1.99	2345-2470	E
1.67-1.77	2072-2196	SE
1.43-1.53	1774-1899	S
1.16-1.26	1439-1563	SO
0.83-0.93	1030-1154	O
0.44-0.54	546-670	NO
3.3	4096	--

- xix. Se ha convertido la señal de entrada en Voltios a su valor muestreado por el ADC, a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Valor entregado por el ADC} = \frac{\text{Voltaje de entrada} \times 4096}{3.3}$$

- xx. Entonces se verifica que para un valor de tensión del divisor de voltaje comprendido en algún rango del cuadro anterior se escribirá una única dirección del viento.

➤ **Para calcular la irradiación solar se sigue el siguiente procedimiento:**

- xxi. A partir de las mediciones realizadas con el panel solar se ha establecido la relación entre voltaje entregado por el panel solar e irradiación solar. Se tiene la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Irradiación Solar} \\ = 0.01991 \times X^6 - 0.5417 \times X^5 + 5.474 \times X^4 - 24.79 \\ \times X^3 + 48.45 \times X^2 - 26.46 \times X \end{aligned}$$

Donde X es el voltaje del panel solar.

Para lo cual se realiza el muestreo de la señal por un periodo de 0.5 segundos.

- c) Los parámetros calculados anteriormente se muestran en un display LCD.

d) Almacenamiento en tarjeta SD

Luego de mostrarse los datos, estos se almacenan cada minuto en un registro histórico en una memoria SD. Se ha escogido un periodo de tiempo de un minuto para el almacenamiento de los datos debido a que es un periodo de tiempo muy empleado en la mayoría de equipos de estación meteorológica. Los parámetros se almacenan en un documento Excel con el formato que se muestra en la tabla 3.12:

Tabla 3.12: Formato para el almacenamiento de los datos

Elaboración: Propia

Fecha	Hora	Temperatura (°C)	Nivel de Batería (V)	Voltaje del Panel Solar (V)	Orientación del viento
03/12/2014	10:08:23	22	12.3	9.6	N
			Velocidad del viento con generador DC (m/s)	Irradiación Solar (W/m ²)	Velocidad del viento con sensor de Efecto Hall (m/s)
			1.2	187	1.21



CAPÍTULO 4

4. IMPLEMENTACIÓN

4.1 IMPLEMENTACION DEL ANEMÓMETRO Y VELETA

El anemómetro de copelas tiene acoplado un generador DC y un par de imanes con polos norte y sur ubicados en paralelo al eje, estos imanes se encuentran diametralmente opuestos.

La veleta tiene ocho interruptores reed switch separados a un mismo ángulo uno del otro, un imán ubicado sobre estos sensores determina la orientación del viento.

En las figuras 4.1 y 4.2 se muestran el anemómetro y la veleta implementados. Las piezas que conforman dichos mecanismos fueron diseñados con el software Inventor y fueron impresos en la impresora 3D de la sección de Electricidad y Electrónica.



Figura 4.1: Anemómetro de copelas

Elaboración: Propia

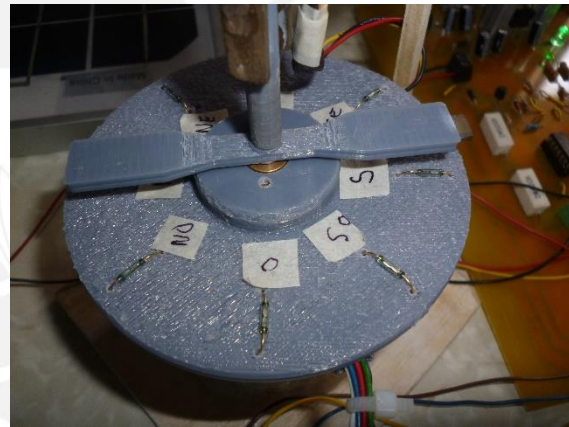


Figura 4.2: Veleta

Elaboración: Propia

4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO DE MEDICIÓN

En las figuras 4.3 y 4.4 se muestran las fotos del sistema implementado, el cual está compuesto de todos los circuitos de acondicionamiento, los sensores, el circuito de almacenamiento de datos, el circuito de carga de la batería así como los mecanismos para el sensado de velocidad y orientación del viento como son el anemómetro de copelas y la veleta.

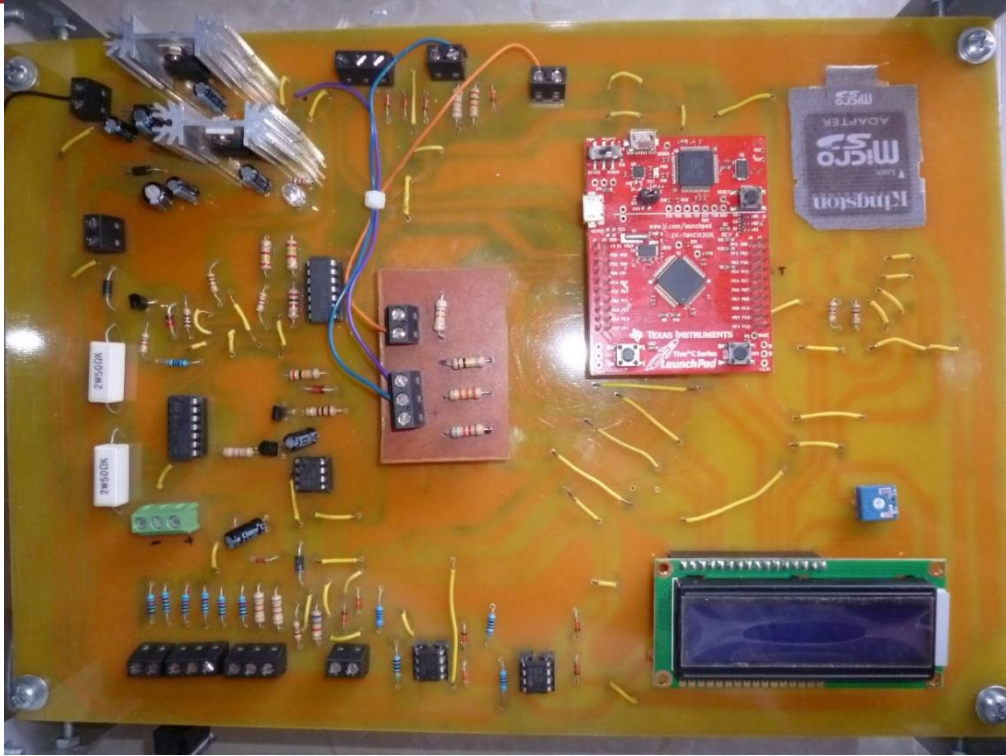


Figura 4.3: Circuito de medición implementado

Elaboración: Propia



Figura 4.4: Equipo de metrología para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos y eólicos implementado

Elaboración: Propia

4.3 PRUEBAS CON EL ANEMÓMETRO Y EL CIRCUITO DE MEDICIÓN

Se realizaron pruebas al aire libre y se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 4.1, figura 4.5 y figura 4.6:

Tabla 4.1: Valores de velocidad del viento obtenidos con el sistema de medición implementado

Elaboración: Propia

	Anemómetro con generador DC				Anemómetro con sensor de Efecto Hall			
	Voltaje(V)	Velocidad del viento-Valor medido (m/s)	Velocidad del viento-Anemómetro Kestrel 4100 (m/s)	Error (%)	Voltaje(V)	Velocidad del viento-Valor medido (m/s)	Velocidad del viento-Anemómetro Kestrel 4100 (m/s)	Error (%)
1	1.61	10.3	10.4	0.96	1.10	10.41	10.4	0.10
2	1.58	10.1	10.1	0.00	1.12	10.11	10.1	0.10
3	1.55	9.9	10.0	1.00	1.13	10.01	10.0	0.10
4	1.25	8.0	8.1	1.23	1.30	8.11	8.1	0.12
5	1.20	7.7	7.6	1.32	1.34	7.61	7.6	0.13
6	1.03	6.6	6.6	0.00	1.42	6.63	6.6	0.45
7	0.48	3.1	3.1	0.00	1.73	3.13	3.1	0.97
8	0.64	4.1	4.1	0.00	1.64	4.13	4.1	0.73
9	-0.55	3.5	3.5	0.00	1.69	3.52	3.5	0.57
10	-0.66	4.2	4.2	0.00	1.63	4.21	4.2	0.24
11	-0.50	3.2	3.2	0.00	1.72	3.21	3.2	0.31
12	-0.72	4.6	4.6	0.00	1.60	4.62	4.6	0.43
13	-0.98	6.3	6.4	1.56	1.44	6.43	6.4	0.47
14	-1.19	7.6	7.6	0.00	1.34	7.62	7.6	0.26
15	-1.33	8.5	8.5	0.00	1.26	8.53	8.5	0.35
16	-1.36	8.7	8.7	0.00	1.24	8.72	8.7	0.23
17	-1.53	9.8	9.8	0.00	1.15	9.83	9.8	0.31
18	-1.66	10.6	10.5	0.95	1.09	10.52	10.5	0.19

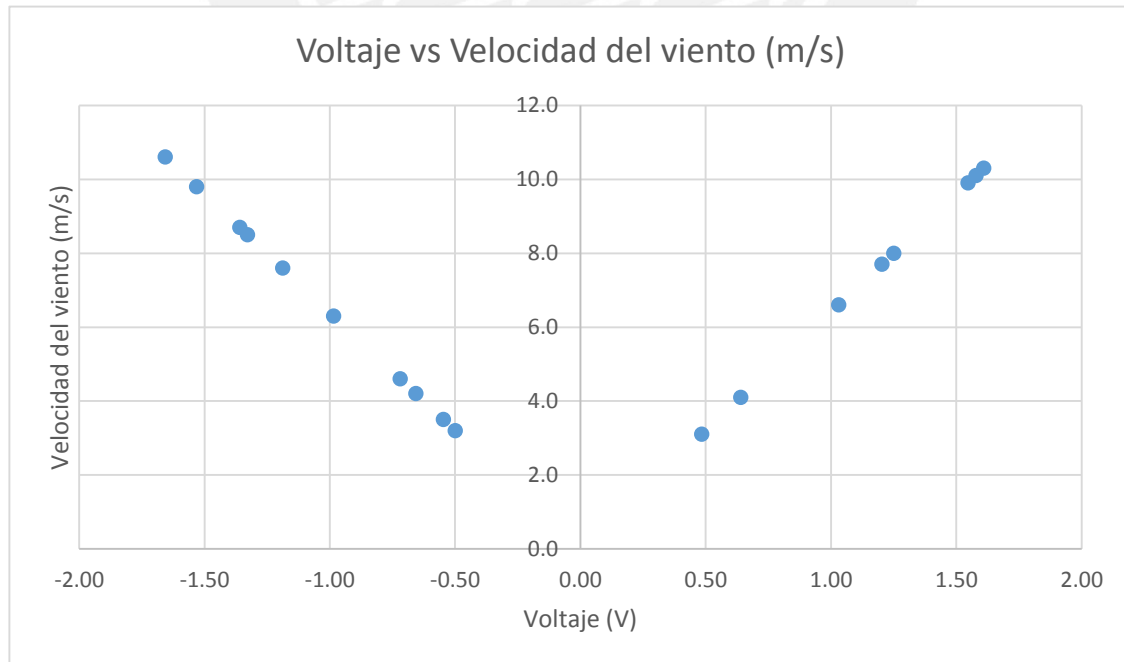


Figura 4.5: Gráfica de voltaje del generador DC vs velocidad del viento

Elaboración: Propia

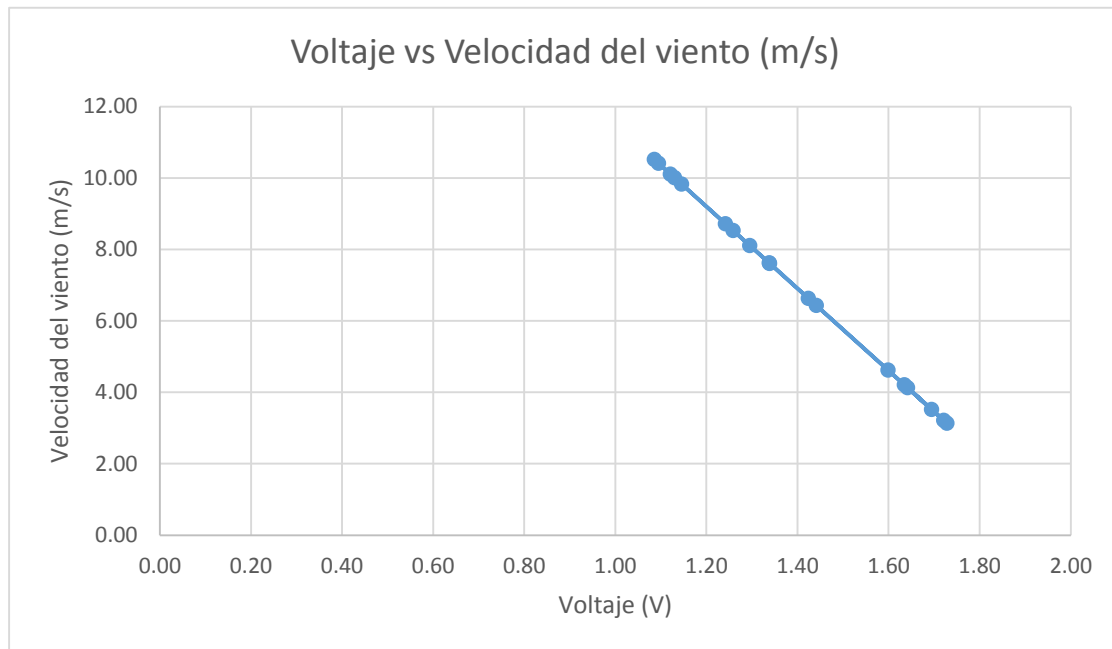


Figura 4.6: Gráfica de voltaje generado por el circuito acoplado al sensor de Efecto Hall vs velocidad del viento

Elaboración: Propia

Para verificar los resultados se empleó una anemómetro comercial marca Kestrel 4100. El anemómetro implementado tiene las siguientes características:

- Calcula velocidades de viento con dos métodos: sensor de Efecto Hall y empleando un generador DC.
- Es resistente a la intemperie.
- Calcula velocidades de viento comprendidas en el rango de 0m/s hasta 20m/s.
- Resolución no mayor a 0.1m/s: generador DC (0.1m/s) y sensor de Efecto Hall (0.01m/s).
- Error de medición menor a 1.6% empleando el generador DC y menor al 1% empleando el circuito acoplado al sensor de Efecto Hall.

4.4 PRUEBAS CON EL PANEL SOLAR Y EL CIRCUITO DE MEDICIÓN

Se realizaron pruebas al aire libre con el panel solar y el sistema de medición de velocidad del viento e irradiación solar implementados, los resultados se muestran en la tabla 4.2 y figura 4.7:

Tabla 4.2: Valores de irradiación solar obtenidos con el sistema de medición implementado

Elaboración: Propia

	Voltaje del panel solar(V)	Irradiación Solar - Valor Medido (W/m ²)	Irradiación Solar - Valor registrado por Estación Davis (W/m ²)	Error(%)
1	0	0	0.0	0.00
2	2.9	14	14.0	0.00
3	3.7	11	11.1	0.90
4	4.3	12	12.0	0.00
5	5.9	39	39.2	0.51
6	6.4	52	52.2	0.38
7	6.8	62	62.3	0.48
8	7.1	69	69.2	0.29
9	7.6	79	79.3	0.38
10	7.9	85	85.0	0.00
11	8	87	87.0	0.00
12	8.1	89	89.1	0.11
13	8.6	103	103.1	0.10
14	8.7	107	107.1	0.09
15	9.2	139	139.1	0.07
16	9.4	160	160.1	0.06
17	10	270	270.4	0.15
18	10.1	298	298.3	0.10
19	10.4	404	404.3	0.07
20	10.5	448	448.2	0.04
21	10.7	551	551.4	0.07

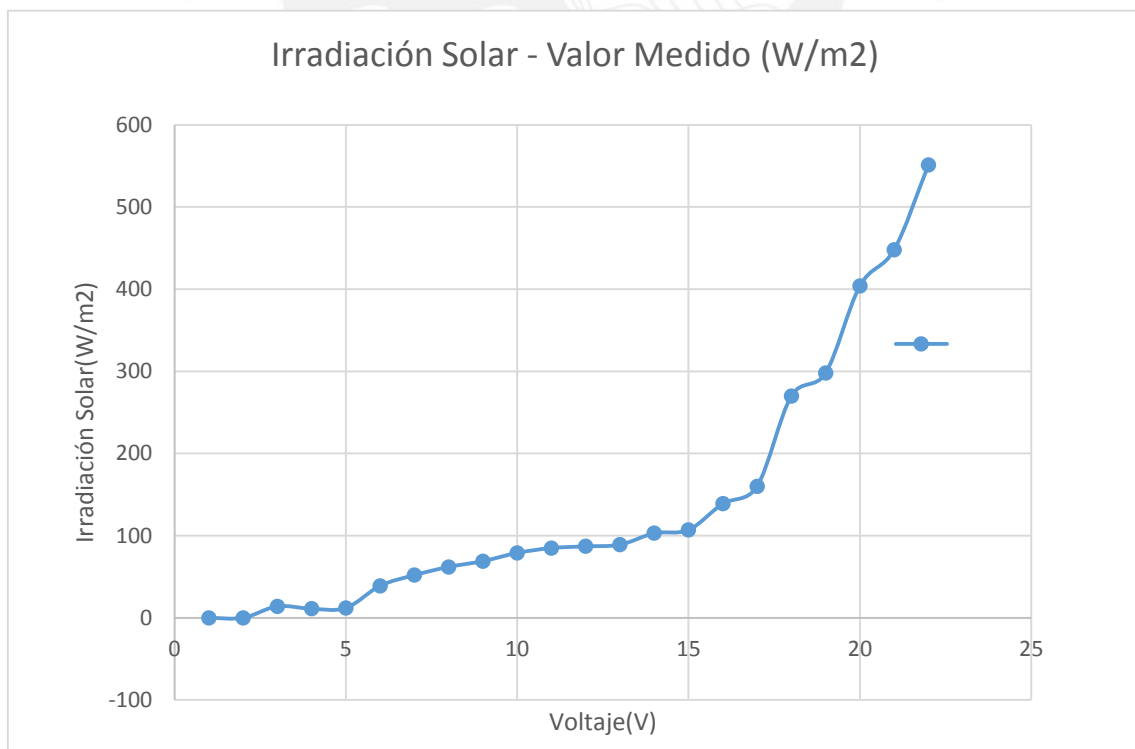


Figura 4.7: Gráfica voltaje vs irradiación solar

Elaboración: Propia

- Se verificó que con el panel solar se obtuvieron valores de irradiación solar con un error menor al 1%, esto debido a la aproximación que se realizó con el polinomio de grados 6.

En la Tabla 4.3, se muestran los distintos valores obtenidos por el sistema de medición implementado:

Fecha	Hora	Temperatura (°C)	Nivel de batería (V)	Voltaje del Panel Solar (V)	Velocidad del viento con Generador DC (m/s)	Irradiación Solar (W/m ²)	Dirección del viento	Velocidad del viento con sensor de Efecto Hall (m/s)
03/12/2014	10:08:23	22	12.3	9.6	1.2	187	N	1.21
03/12/2014	10:09:23	22	12.3	9.6	1.2	187	N	1.21
03/12/2014	10:10:23	22	12.3	9.6	1.2	187	NE	1.21
03/12/2014	10:11:23	23	12.3	9.6	0.0	187	--	0.00
03/12/2014	10:12:23	23	12.3	9.6	0.0	187	--	0.00
03/12/2014	10:13:23	23	12.3	9.5	0.0	187	--	0.00
03/12/2014	10:14:23	23	12.3	9.6	0.0	187	--	0.00
03/12/2014	10:15:23	23	12.3	9.6	0.0	187	--	0.00
03/12/2014	10:16:23	23	12.3	9.6	0.0	187	--	0.00
03/12/2014	10:17:23	23	12.3	9.6	0.0	187	--	0.00
03/12/2014	10:18:23	23	12.3	9.6	2.1	187	N	2.11
06/12/2014	14:17:31	31	12.1	10.9	2.1	677	NE	2.11
06/12/2014	14:18:31	31	12.1	10.9	2.3	677	E	2.11
06/12/2014	14:19:31	31	12.1	10.9	2.3	677	SE	2.11
06/12/2014	14:20:31	31	12.1	10.9	1.1	677	--	0.00

Tabla 4.3: Muestra de toma de datos del sistema de medición implementado

Elaboración: Propia

CONCLUSIONES

- Se diseñó e implementó un sistema de medición empleando sensores para obtener datos de velocidad del viento e irradiación solar.
- Se diseñó e implementó dos métodos de medición de velocidad del viento con una resolución menor a 0.1m/s con un generador DC y con una resolución de 0.01m/s con un circuito y sensor de Efecto Hall.
- Se diseñó e implementó un sistema de alimentación autónomo, el cual emplea la energía de un panel solar para cargar una batería.
- Se diseñó e implementó un sistema de medición de orientación del viento, nivel de batería y temperatura.
- Se diseñó e implementó un sistema de medición de voltaje y corriente que entrega un panel solar.
- Se diseñó e implementó un sistema de acondicionamiento de señales eléctricas para cada uno de los sensores.
- Se procesaron cada uno de los parámetros medidos, para luego ser almacenados en una memoria extraíble SD con el objetivo de que estos puedan almacenarse y transportarse de forma sencilla y rápida.

RECOMENDACIONES

- Mejorar el eje del anemómetro con un sistema mecánico de rodamientos para reducir la inercia y mejorar el sensado de la velocidad del viento.
- Para que el sistema de medición de velocidad e irradiación solar sea más completo se recomienda la inclusión de más sensores tales como: humedad relativa, flujo de volumen de aire, presión, etc.
- Para que el sistema de medición de irradiación solar, voltaje y corriente de un panel solar se pueda aplicar a paneles solares cuya tensión de salida sea superior o inferior a 12V se recomienda el diseño de un arreglo de resistencias para el acondicionamiento de la señal que ingresará al ADC, el cual puede ser añadido al circuito por medio de un switch conmutador.
- Se recomienda volver a construir las copelas del anemómetro con un tipo de material más resistente al medio ambiente para un mayor tiempo de durabilidad.
- Calibrar a mayores valores de irradiación solar.
- Emplear reguladores de bajo dropout para mayor autonomía.
- Añadir un circuito de protección en caso de cortocircuito.
- Se recomienda construir un chasis de acuerdo a los índices de protección IP de al menos 55-56 (protección contra lluvia y polvo) para que sea resistente a la intemperie.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de Energía y Minas, Plan Nacional de Electrificación Rural 2015-2024, Lima, 2015, p. 8.
- [2] Delta Volt Energía Renovable, Energía Hidroeléctrica, Energía Renovable y Tradicional en el Perú, Lima, 2014.
- [3] LAROUSSE, Diccionario enciclopédico usual (4ta edición), Puebla, México: Ediciones Larousse, 2008.
- [4] O. I. A. H. S. R. A. v. S. M. Z. K. Jäger, Solar Energy Fundamentals, Technology and Systems, Holanda: Copyright Delft University of Technology, 2014.
- [5] Energías renovables: Perú subasta energía solar fotovoltaica, Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico, 2014.
<http://www.evwind.com/2014/11/09/ergon-gana-en-peru-subasta-de-energias-renovables-con-energia-solar/>
- [6] Scientific Sales Inc.
<http://www.scientificsales.com/SearchResults.asp?mfg=Oregon+Scientific>
- [7] World Wide Fund, Líderes en Energía Limpia.
<http://www.wwfca.org/?235411/lideresenenergialimpia>
- [8] La Energía Eólica en Perú, TECH4CDM, p. 20.
http://www.tech4cdm.com/uploads/documentos/documentos_La_Energia_Eolica_en_Peru_13aed1f1.pdf
- [9] Ministerio de Energía y Minas, Plan Energético Nacional 2014-2025, 2014.
- [10] Sección de Electricidad y Electrónica PUCP, Programación Gráfica en LABVIEW, Lima, 2014-1.
- [11] PCE Instruments
https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-de-medida/medidor/amemometro-kat_70015_1.htm
- [12] PCE Instruments
<http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/tablas-de-velocidades-del-viento.htm>
- [13] S. Zengin, F. Deveci, M. Boztepe, Decoupling Capacitor Selection in DCM Flyback PV Microinverters Considering Harmonic Distortion, IEE Transactions On Power Electronics, vol. 28, nº 2, pp. 1-2, Febrero 2013.

- [14] Carlos A. Henao, Edison Duque Cardona, Manejo de una memoria SD/MMC con un PIC16F87x, Scientia et Technica, nº 44, p. 316, 2010.
- [15] Sensor de Temperatura LM35
[Texas Instruments,» http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf](http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf)
- [16] Sensor de Efecto Hall UGN3503
http://www.bristolwatch.com/hall_effect/ugn3503.pdf
- [17] Universidad Nacional de San Luis de Argentina, Laboratorio de Interfaces, Sensores de Efecto Hall.
<http://www0.unsl.edu.ar/~interfases/labs/lab09.pdf>.
- [18] Sensor de Efecto Hall LB9051
http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/sanyo/ds_pdf_e/LB9051.pdf
- [19] Catálogo de baterías YUASA
<http://www.americanbattery.com.ar/yuasa/CatalogoNPMasBaterias.pdf>
- [20] LM339N
<http://letsmakerobots.com/content/lm339-quad-comparator>
- [21] Mosfet canal N 2N7002
<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/2N/2N7000.pdf>
- [22] Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicaciones de Madrid, Energía Solar Fotovoltaica.
http://www.coitaoc.org/files/estudios/energia_solar_fotovoltaica_2e5c69a6.pdf
- [23] ARM CÓRTEX
<http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Volume1/tm4c123gh6pm.pdf>
- [24] Cargador Solar para Baterías
<http://www.bandasaltas.com.ar/Cargador%20Panel%20Solar.html>