



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CAMPUS SAN JUAN DEL RÍO

DISEÑO DE SISTEMA EÓLICO AISLADO CON ANÁLISIS DE CALIDAD DE LA
ENERGÍA EN EL CENTRO ACADÉMICO DE TECNOLOGÍA AVANZADA
SUSTENTABLE

TESIS

Como parte de los requisitos para obtener el título de

INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

Línea Terminal

ELÉCTRICA

Presenta

VERÓNICA ALEJANDRA SÁNCHEZ ESTRELLA

Dirigido por:

DR. DAVID ALEJANDRO ELVIRA ORTIZ

SINODALES:

Dr. David Alejandro Elvira Ortiz (16323)
Presidente

Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar (11825)
Secretario

Dr. Juan Pablo Amezcuita Sánchez (11508)
Vocal

Dr. Juan Primo Benítez Rangel (2088)
Suplente

Four handwritten signatures in blue ink, each placed above a horizontal line, corresponding to the four members of the Sinodal list.

San Juan del Río, Qro. Marzo 2023



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales de
Información



Diseño de sistema eólico aislado con análisis de calidad
de la energía en el Centro Académico de Tecnología
Avanzada Sustentable.

por

Verónica Alejandra Sánchez Estrella

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Clave RI: IGLIN-234693-0323-323

RESUMEN

Hoy en día, la incorporación de energías alternativas a la generación de energía, ha sido un cambio necesario como resultado del calentamiento global y la disminución de las reservas energéticas. El desarrollo actual de estas nuevas tecnologías las sitúa en una posición idónea para su explotación comercial. Además, junto con un consumo eficiente de energía, se alcanza un nivel sustentable óptimo. Una de las energías que sobresale es la energía eólica. El presente trabajo de tesis tuvo por objetivo realizar el diseño y análisis de la calidad de la energía de un sistema eólico autónomo. El proyecto se desarrolló en el edificio del CATAS, en Campus Tequisquiapan, UAQ., para la alimentación energética del aula C1. Para esto, se han empleado aerogeneradores que ya estaban colocados anteriormente en el lugar, sin ser utilizados. La metodología que se ha seguido para el diseño ha sido la elaboración de dos tipos de estudio principales, el dimensionado eléctrico y la valoración del recurso eólico. El primer punto fue determinar la potencia demandada por el lugar; seguido de la estimación del recurso eólico, donde los datos correspondientes se obtuvieron de MERRA-2, y así evaluar la potencia demandada con la generada por el sistema eólico. Posterior a esto se hizo el cálculo de la corriente y componentes, incluyendo los elementos del esquema de protección. Se continuó con la conexión de cada dispositivo y puesta en marcha de la instalación, para así obtener las señales de corriente y voltaje. Estas señales se procesaron en MATLAB. El resultado del análisis indica que la instalación cumple con la normativa interna de México y la internacional para armónicos; sin embargo es importante mejorar el factor de potencia ya que resultó ligeramente por debajo del límite establecido en México.

*Para mis padres.
Por su constante e inquebrantable apoyo y esfuerzo.*

AGRADECIMIENTOS

Indudablemente mi mayor agradecimiento es para mis padres. Gracias por estar conmigo siempre apoyándome y alentándome a dar mi mayor esfuerzo.

Gracias a mi asesor, el Dr. David Alejandro Elvira Ortiz por su asesoría y acompañamiento a lo largo del proyecto.

Gracias a mi co-asesor, el Dr. Aruro Yosimar Jaen Cuellar por su invitación para integrarme al proyecto y por su constante ayuda.

Gracias a la Universidad Autónoma de Querétaro por brindarme el conocimiento y las herramientas para alcanzar una meta más.

ÍNDICE

ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
Antecedentes	3
Objetivos	6
Descripción del problema	7
Justificación	8
Planteamiento del problema	9
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	11
Sistemas de generación eólica	11
Elementos de un aerogenerador	11
Distribución de Weibull	13
Perfil logarítmico	14
Inversor	16
Baterías	17
Controlador de carga	18
Esquema de protección eléctrica	18
Ampacidad	19
Aspectos de diseño de un aerogenerador.	20
Normatividad	21
PQUAQ	21
3. METODOLOGÍA	2

Descripción de la zona	24
Dimensionado	27
Cotización	34
Integración de equipos de conexión y cargas	36
Instalación y puesta en marcha	37
Elaboración de diagrama unifilar	40
Monitoreo de las señales de voltaje y corriente	40
4. RESULTADOS	43
Descripción de la zona	43
Dimensionado	43
Cotización	44
Integración de equipos de conexión y cargas	36
Instalación y puesta en marcha	37
Elaboración de diagrama unifilar	40
Monitoreo de las señales de voltaje y corriente	40
CONCLUSIONES	64
LITERATURA CITADA	66

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
2.1	Parámetro h_0 según el tipo de terreno.	15
3.1	Características del aula.	26
3.2	Características de datos recolectados de velocidad.	27
3.3	Especificaciones del fabricante para el inversor.	28
3.4	Parámetro h_0 según el tipo de terreno.	31
3.5	Cargas utilizadas en el aula.	34
3.6	Cotización de materiales.	35
4.1	Cuadro de cargas.	44
4.2	Parámetros obtenidos de Weibull.	45
4.3	Potencia generada por aerogenerador.	47
4.4	Parámetros para cálculo de ampacidad.	49
4.5	Potencia total.	50
4.6	Parámetros para cálculo de baterías.	51
4.7	Cotización de materiales.	52
4.8	Selección de protecciones.	56
4.9	Potencias y factor de potencia	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Cuadro		Página
1.1	Bloques principales que integran el proyecto para la implementación de la instalación eólica aislada.	10
2.1	Componentes de un aerogenerador.	13
2.2	Curva característica de Weibull.	14
2.3	Tarjeta de adquisición de datos PQUAQ .	22
3.1	Diagrama de metodología donde se detallan las etapas contempladas para el desarrollo del proyecto.	24
3.2	Edificio del CATAS.	25
3.3	Ubicación del CATAS.	25
3.4	Cargas eléctricas del aula.	28
3.5	Histograma de frecuencias acumuladas.	30
3.6	Distribución acumulada de Weibull.	30
3.7	Curva de potencia del aerogenerador.	32
3.8	Secciones para el cálculo de conductores.	32
3.9	Componentes de una instalación eólica aislada.	36
3.10	Centro de carga.	38
3.11	Canalización y conexión del conductor a la salida de las turbinas.	38
3.12	Canalización del conductor, desde el aerogenerador hasta el regulador	39

3.13	Tablero de baja tensión.	39
3.14	Script para obtención de THD.	41
3.15	Script para el cálculo de las potencias.	42
4.1	Ecuación lineal de regresión.	45
4.2	Conexión de dispositivos y cargas.	54
4.3	Conmutador.	54
4.4	Canalización.	57
4.5	Áreas que ocupó el conductor eléctrico de la salida del aerogenerador.	58
4.6	Instalación del conductor al regulador, con protecciones eléctricas a la entrada y salida del regulador .	58
4.7	Instalación de banco de baterías.	58
4.8	Diagrama unifilar.	59
4.9	Señal de voltaje y corriente adquirida.	61
4.10	Acercamiento de la señal de corriente y voltaje adquirida.	61

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se precisa de un suministro energético constante para desarrollar las actividades emergentes dentro de una sociedad. Esto ha conducido a que se dependa en gran escala de la energía eléctrica, situación que incrementa con el tiempo, a tal punto que la vida sin la disposición de energía es inadmisibile.

Y, aunque el sistema eléctrico nacional actual es capaz de cubrir la creciente demanda energética de forma satisfactoria e ininterrumpida, su producción eléctrica se basa principalmente en fuentes convencionales de generación.

El uso constante de recursos como el petróleo, carbón y gas, ocasiona que los yacimientos disminuyan sin posibilidad de reposición. Lo que provoca un incremento en el costo de la producción y el consumo de energía eléctrica. Además, se aumentan los gases de efecto invernadero que son causa del calentamiento global.

Lo anterior ha forzado a explorar nuevas fuentes de generación de energía, que respalden el actual suministro de energía eléctrico y sean sustentables. Estas fuentes llevan el nombre de energías alternativas.

Las nuevas tecnologías permiten la producción de energía eléctrica a través de aquellos recursos naturales que son renovables e inagotables, tales como el viento y la luz solar. Sus características les otorgan una gran rentabilidad económica, lo que a la vez les permite mantener una competitividad en el mercado energético frente a las fuentes de energía convencionales.

Una de estas nuevas tecnologías que ha tenido un gran auge es la energía eólica. Su aceptabilidad surge al emplearse el viento como materia prima, el cual es un recurso natural fácil de encontrar en la naturaleza. Por lo que es un recurso gratuito que asegura la generación de energía eléctrica libre de emisión de gases contaminantes. Lo anterior, junto con el importante avance

que ha tenido en confiabilidad y eficiencia, le ha llevado a ser una opción viable sobre otras tecnologías de generación eléctrica.

Por otro lado, la energía eólica es considerada una energía intermitente, con lo que se presentan retos a afrontar para el desarrollo de esta tecnología. Uno de ellos es el aprovechamiento del recurso eólico, que varía de acuerdo a la disponibilidad del flujo del viento, por lo que es crucial contar con sistemas de almacenamiento de energía en el caso de sistemas eólicos aislados. Así, se puede disponer de energía eléctrica en cualquier momento que se requiera, sin depender estrechamente de las condiciones naturales.

Además, al contar con la presencia de cargas y dispositivos no lineales, se debe poner un enfoque adecuado en el dimensionamiento de la instalación eólica. Y así, cumplir el propósito de suministrar un abastecimiento energético seguro, continuo y eficiente. De esta manera, se integran lineamientos dirigidos a la calidad de la energía.

El enfoque de sustentabilidad, que se asocia a la generación y el consumo de energía proveniente de sistemas eólicos, tiene estrecha relación con el concepto de calidad de energía. Esto se mantiene al lograr un ahorro de energía en el momento de alcanzar y sostener la eficiencia energética, aportando así a la acción climática.

En la Universidad Autónoma de Querétaro se busca impulsar investigaciones con enfoque en las tecnologías sustentables, además de desarrollar un medio ambiente sano. Es por ello que se cuenta con centros de investigación dedicados a energías alternativas, como lo es el Centro Académico de Tecnología Avanzada Sustentable (CATAS). Aquí se tiene como finalidad que el edificio sea alimentado totalmente por energías limpias.

Al alcanzar este objetivo se estará logrando hacer una transición energética con la que se disminuya el impacto ecológico y se logre la autosuficiencia energética.

1.1. Antecedentes

A partir de lo anterior, en los años recientes el número de trabajos de investigación que se centran en sistemas eólicos se ha incrementado. Uno de ellos es el trabajo de Cruz (2012), en donde se utilizó tanto la energía solar como la energía eólica para llevar a cabo la instalación de un sistema interconectado a la red. Esto se hizo para garantizar el suministro de la energía eléctrica a una casa de interés social. En este trabajo la instalación híbrida se presenta principalmente para la alimentación de cargas de baja potencia, como lo son las lámparas de la casa; así que se puede hacer más sustentable al lograr que la demanda de la casa de interés social, sea alimentada en su totalidad por energías renovables. El aprovechamiento del viento junto con otras fuentes de energía también se ve en el trabajo de investigación de Clemente (2019), en donde se realizó el diseño de un sistema fotovoltaico y eólico. Aquí ambos sistemas se determinaron como autónomos, con el propósito de llevar a cabo la alimentación de dos talleres industriales. Para esto se realizó el análisis correspondiente de las cargas a alimentar y la potencia entregada por cada sistema, y así obtener la factibilidad de dicho proyecto para alimentar las dos zonas, de tal modo que se pudiera pasar a la instalación eléctrica real, sin embargo un análisis de la energía entregada por la instalación sería un buen complemento en este trabajo.

Un trabajo más en donde se puede observar la confiabilidad en el uso de la energía eólica, es el de Sánchez (2019). En su trabajo demostró la viabilidad de un sistema eólico interconectado a la red, para suministrar electricidad a una comunidad que hasta ese momento contaba con un servicio eléctrico inestable. Esto lo logró mediante un estudio de prefactibilidad de la construcción y diseño de la instalación. Con el suministro eléctrico proporcionado por el sistema eólico, se reactivaron las actividades de la comunidad, logrando una mayor producción, seguridad y calidad. Por otro lado, desde una perspectiva económica, el contemplar la posibilidad de un sistema eólico completamente autónomo sería una mejora en la investigación.

De igual forma la eficiencia de la tecnología eólica se observa en el trabajo que realizó Chávez et al. (2020), donde la investigación permitió

mejorar el aprovechamiento del recurso eólico en turbinas de baja potencia. El enfoque se dio en turbinas colocadas en zonas urbanas, donde son mayores las variaciones en la velocidad del viento debido a la rugosidad del terreno. Lo anterior incide directamente en la elección del área y tamaño de las turbinas. Aun así, a pesar de que las características de la turbina intervienen para obtener un mayor rendimiento del recurso eólico, la calidad de la energía también tiene una gran importancia en el papel de ganar la mayor eficiencia posible del sistema eólico. Es por ello que el tomar en consideración este concepto en el trabajo que se menciona, se haría posible una ganancia máxima del sistema eólico.

Un punto a tener presente antes de llevar a cabo la instalación de un sistema eólico, es el realizar estudios del viento, tal como lo hizo Canché (2020) en su trabajo de investigación. En éste involucró un análisis de la velocidad del viento local, para así tener una estimación de la potencia que se generaría por el aerogenerador. Lo antes mencionado lo logró tomando las muestras de la base de datos MERRA 2, posterior a ello, concluyó qué temporadas del año eran más favorables para la producción eólica de la zona. Si bien el conocer los periodos de mayor aprovechamiento eólico es óptimo, realizar un dimensionado adecuado de un banco de baterías ayuda a proveer un servicio eléctrico continuo. Por lo mismo, el punto anterior ayudaría a reforzar esta investigación.

La ejecución de un estudio para estimar el recurso eólico requerido se puede desarrollar de diversas formas. Una de ellas se observa en el trabajo de Sansó (2018), quién realizó el análisis de velocidad media de cada mes a lo largo de un año, para al final relacionarlo con el consumo eléctrico mensual de una finca. Posterior a ello, los resultados los utilizó para comparar aerogeneradores de diferente potencia, y así visualizar cuál de ellos generaría una mayor producción de energía. Un aspecto que permitiría complementar este trabajo, es plantear un análisis de calidad de la energía en caso de llevar a la práctica el proyecto de investigación. El añadir este análisis ayudará a contemplar soluciones en caso de problemas con la señal entregada, y así lograr una instalación más eficiente.

Se ha hecho hincapié en la importancia del dimensionamiento de una instalación eléctrica, puesto que facilita la selección de los dispositivos necesarios para la construcción de dicha instalación. Un claro ejemplo de lo anterior es la investigación de Sánchez (2019), quién llevó a cabo una instalación híbrida autónoma a partir del aprovechamiento de la energía del viento y el sol. Esta investigación se realizó con el objetivo de alimentar de energía un caserío. Sin embargo, agregar la medición de las variables eléctricas de la señal daría lugar a un enriquecimiento de este trabajo.

Pero no todo tiene que ver con obtener la mayor eficiencia de la energía eólica, también se puede abarcar la implementación de sistemas eólicos desde una perspectiva de aprendizaje. Justo como se visualiza en el trabajo de investigación realizado en la universidad de Jaén por Serrano (2018), donde se efectuó la instalación de un sistema eólico autónomo, respaldado por energía solar, en una zona donde el comportamiento del viento no permitía una generación eficiente de energía eléctrica para la alimentación del equipo eléctrico. No obstante, la instalación se pudo adquirir como un espacio para llevar a cabo actividades de carácter didáctico, una mejora que se podría añadir es el análisis de la energía entregada por el sistema híbrido para así conocer bajo qué condiciones se encuentra trabajando la instalación a la vez que se abre un área más en el ámbito académico.

Un punto más a considerar es la calidad de energía, que tiene un impacto desde en los grandes consumidores de energía hasta en los más pequeños. Esto ha sido demostrado en el trabajo Kumar et al. (2017), donde a través de la simulación por bloques en Simulink, se procedió a realizar un análisis de la calidad de la energía en sistemas que involucran energía proveniente de un sistema eólico y de la red eléctrica, un buen complemento a este trabajo sería un estudio de calidad de la energía puramente para sistemas eólicos aislados, dado que éstos son una tecnología que tiene muchas áreas de aprovechamiento.

Tomando en consideración lo anterior, resultaría benéfico la incorporación de un sistema eólico en la Universidad Autónoma de Querétaro, en donde además de contemplarse el dimensionado de la instalación, también se incluya el análisis de la calidad de la energía entregada.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Realizar el dimensionado e instalación de un sistema aislado de generación eólica, y determinar su desempeño mediante un análisis de calidad de la energía para satisfacer la necesidad energética en un salón del edificio CATAS.

1.2.2. Objetivos particulares

1. Analizar la demanda energética requerida en un salón del edificio CATAS de acuerdo a las cargas presentes en el sitio, para determinar la potencia instalada que se requiere.
2. Seleccionar de acuerdo a los valores de potencia y energía calculados los elementos del sistema de generación adecuados para funcionar ante estas condiciones de operación.
3. Realizar el dimensionado de un banco de baterías considerando las condiciones de viento del lugar para asegurar que no haya daños en el sistema de almacenamiento de energía a la vez que se cuenta con un suministro eléctrico ininterrumpido.
4. Llevar a cabo la cotización del material requerido haciendo una búsqueda de los elementos con diferentes proveedores para seleccionar los que mejor se adapten a las necesidades del sistema.
5. Instalar el sistema de generación aislada mediante la conexión de los diversos elementos que lo conforman para energizar un salón del edificio CATAS.
6. Hacer un análisis de la energía generada y consumida en el sitio a través de la medición de las señales eléctricas de voltaje y corriente para determinar si efectivamente se está cumpliendo con las necesidades del lugar.
7. Realizar un análisis de contaminación armónica mediante la transformada de Fourier y el índice de distorsión armónica total para

determinar si se encuentra dentro de los parámetros establecidos por las normas internacionales.

1.3. Descripción del problema

Al momento de la revisión del apartado de antecedentes, se han identificado diversas situaciones asociadas al tema de investigación, las cuales derivan del estatus actual que presenta el trabajo de tesis.

La zona de desarrollo del proyecto es el CATAS, el cual es un edificio con enfoque autosustentable. En el edificio se cuenta con aerogeneradores colocados en la parte superior del mismo, aunque ninguno de ellos cuenta con conexión a una instalación eléctrica. Así que, es tecnología que se tiene disponible más no se aprovecha de forma alguna.

Actualmente el edificio dispone de un suministro energético proveniente de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Esto conduce a que haya un consumo de energía proveniente de fuentes convencionales, con lo que se contribuye a la contaminación ambiental, y se hace uso de recursos naturales que están en cantidades limitadas en la naturaleza.

En tal circunstancia, el consumo de energía en el CATAS, genera una facturación eléctrica que supone un gasto económico para la Universidad Autónoma de Querétaro, gasto que se incrementa con la elevación del costo de los combustibles fósiles.

Añadido a lo anterior, se tiene que, en la instalación eléctrica actual se desconocen los parámetros característicos de la señal de energía entregada. Esto implica que también se ignora cómo dicha energía afecta a la instalación eléctrica y a las cargas eléctricas que alimenta.

De lo anterior se deduce que, en la UAQ Campus Tequisquiapan no se cuenta con un laboratorio que permita la investigación y el desarrollo de conocimientos en cuestión de energías alternativas. Y esto atenúa el fortalecimiento de iniciativas y actividades que aporten a la acción climática, tanto en la sociedad como en la comunidad estudiantil.

Además, día con día, se visualiza un incremento en la demanda de energía local.

1.4. Justificación

A continuación se presentan los siguientes criterios como respuesta a las inquietudes y oportunidades que plantea el proyecto, de manera que se justifica la elaboración del mismo.

Examinando las problemáticas existentes con relación al medio ambiente, y de cuestión económica asociadas a la generación convencional de energía, es decisivo implementar soluciones con un enfoque sustentable, como los proyectos que se desarrollan en el CATAS. Así, con la ejecución de proyectos en los que se proporciona un suministro energético de forma totalmente autónoma, se logran acciones encauzadas a la sustentabilidad. Propiciando así la disminución del uso de combustibles fósiles, de la emisión de gases de efecto invernadero y otros gases contaminantes que repercuten negativamente en el medio ambiente.

La incorporación de un sistema eólico autónomo implica un suministro energético a bajo costo, ya que no hay gasto por combustible. Solo se considera un bajo presupuesto para el mantenimiento de la instalación. Y dicho mantenimiento se realiza de 1 a 2 veces al año..

Además, la expansión de la tecnología eólica junto con la aplicación de sistemas de almacenamiento, garantizan un servicio continuo, ecológico y económico durante un periodo promedio de 25 años. Y al implementarse la instalación eólica en la misma área donde se requiere el abastecimiento eléctrico, se logra una generación eléctrica local, lo que permite hacer uso de los aerogeneradores con los que se cuenta en el CATAS.

Por otra parte, al efectuarse un estudio de la calidad de la energía a la instalación del sistema eólico aislado, se podrán visualizar las condiciones en las que se entrega el suministro eléctrico. Para así, obtener una estimación de la vida útil y condiciones de funcionamiento de las cargas y equipo eléctrico de la instalación. Adicional a lo anterior, la incorporación de este tipo de instalación dentro de un plantel educativo, propicia que se generen y desarrollen

actividades de investigación y de aspecto didáctico enfocados a energías renovables. Proporcionando así un laboratorio de energías renovables a la UAQ.

Así mismo, el CATAS, al pertenecer a una institución educativa como lo es la Universidad Autónoma de Querétaro, tiene la responsabilidad social de fomentar una conciencia ambiental en la comunidad estudiantil y en la sociedad en general de la cual forma parte.

A la vez, con la generación local de electricidad se contribuye a la problemática local de demanda de energía.

1.5. Planteamiento del problema

Los pasos que se aplican para el desarrollo del proyecto, se visualizan de forma general en el diagrama de la Figura 1.1. Los bloques que lo conforman son:

- a) Documentación: Se investigan los antecedentes relacionados con el tema de investigación, para posterior a ello establecer la aportación del proyecto actual.
- b) Dimensionado: Se determinan las cargas que se requiere alimentar en el espacio de trabajo, de acuerdo a las actividades realizadas allí. Y se seleccionan los componentes que integran la instalación eólica aislada.
- c) Instalación: Se lleva a cabo la instalación del equipo y dispositivos eléctricos que conforman el proyecto.
- d) Adquisición de datos: Por medio de una tarjeta de adquisición de datos, se obtienen datos de la señal eléctrica entregada por el sistema eólico.
- e) Calidad de la energía: A través de un análisis de datos se determina si el estado de la señal generada por la instalación es adecuada según la normativa.

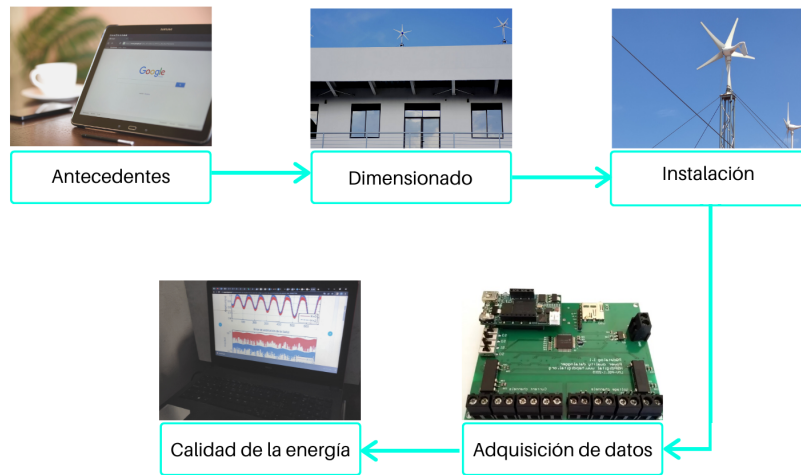


Figura 1.1 Bloques principales que integran el proyecto para la implementación de la instalación eólica aislada (autoría propia).

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

A lo largo de este capítulo se desarrollarán diversos temas que tienen estrecha relación con la generación de energía eólica, adquisición de datos y calidad de la energía. De esta forma se comprenden mejor los conceptos para el desarrollo de la metodología a lo largo del proyecto.

2.1. Sistemas de generación eólica

La cantidad de energía contenida o proporcionada por las masas de aire en movimiento en su circulación por las capas bajas de la atmósfera, representa un nivel de potencial energético relativamente elevado, especialmente en determinadas condiciones locales y temporales, de tal modo que se justifica el esfuerzo por llevar a cabo su transformación en energía útil y su aprovechamiento en condiciones favorables de eficiencia y rentabilidad, dado el grado de desarrollo alcanzado por las tecnologías de conversión eólica (Mur, 2012).

En la actualidad, se están realizando esfuerzos para desarrollar soluciones que permitan un mejor aprovechamiento de este tipo de instalaciones. Estos esfuerzos deben tener en cuenta la estimación, evaluación y explotación del recurso eólico (Bilbao et al., 2020).

2.2. Elementos de un aerogenerador

El aerogenerador es la máquina encargada de transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica. Para ello dispone de una parte mecánica, la cual extrae energía mecánica del viento y otra eléctrica, la cual transforma la energía mecánica en eléctrica en condiciones adecuadas para ser evacuada (Sáenz, 2013).

A continuación se muestran los elementos que componen a un generador de eje horizontal, los cuales se observan en la Figura 2.1.

Rotor: Su función es convertir la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación, son el conjunto de componentes del aerogenerador que giran fuera de la góndola. Está compuesto por las palas, el buje y la nariz.

Palas: Son el elemento del aerogenerador que por aprovechamiento aerodinámico capturan la energía del viento y transmiten su potencia hacia el buje al que están conectadas.

Buje: Es el elemento de unión entre las palas y el sistema de rotación, ya que este está acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador.

Cono o nariz: Es la cubierta metálica con forma cónica que se encara al viento, y lo desvía hacia el tren motor. Debe tener la forma aerodinámica adecuada para impedir la formación de turbulencias.

Eje de baja velocidad: Es el encargado de conectar el buje del rotor con la multiplicadora y transmitir la energía captada por las palas.

Multiplicadora: La multiplicadora conecta el eje de baja velocidad del rotor con el eje de alta velocidad del generador. Con ella se consigue la conversión entre potencia de alto par torsor, que se obtiene del rotor girando lentamente, y la potencia de bajo par torsor, a alta velocidad, que se utiliza en el generador, se caracteriza por su relación de transformación, definida como la relación entre la velocidad de giro del eje de entrada (lado del rotor) y la del eje de salida (lado del generador eléctrico).

Eje de alta velocidad: Es el encargado del accionamiento del generador eléctrico.

Generador eléctrico: Su función es convertir la energía mecánica de rotación que le entrega la multiplicadora, en energía eléctrica. El generador eléctrico de un aerogenerador tiene que trabajar bajo niveles de cargas fluctuantes debido a las variaciones en la velocidad del viento.

Góndola: La góndola encierra en su interior la multiplicadora, el generador eléctrico y los sistemas auxiliares del aerogenerador y dispone de una cubierta de protección y de insonorización de los componentes de la máquina. También incorpora las aberturas necesarias para lograr una ventilación efectiva del multiplicador y del generador.

Sistema de regulación y control: Este sistema tiene como función, mantener la velocidad de rotación constante y regular, y limitar la potencia eólica aprovechada o recuperada por el rotor (San Román, 2012).

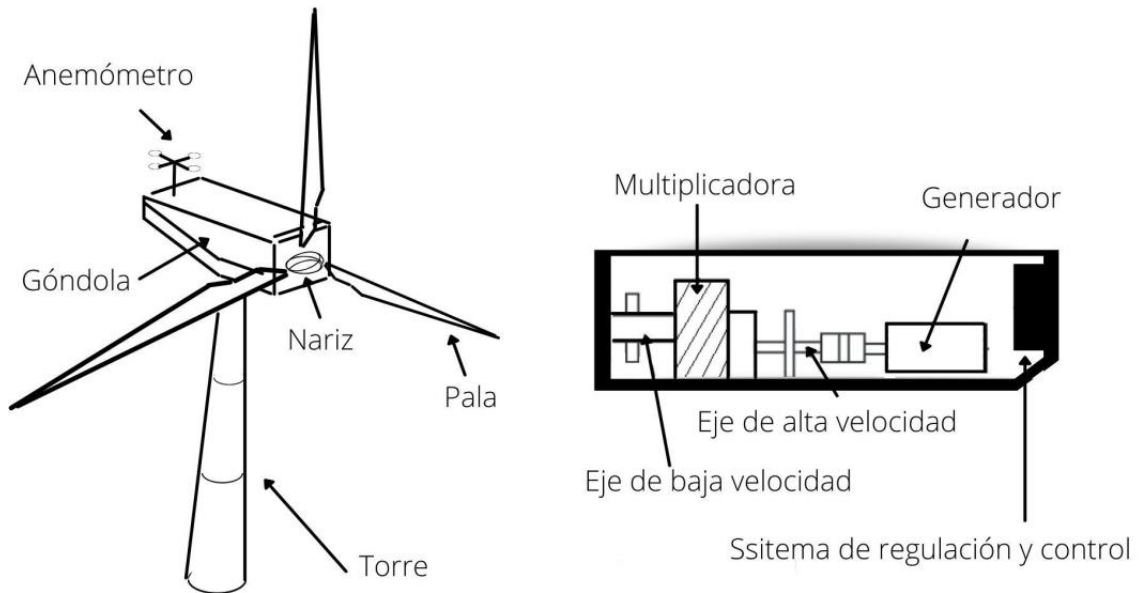


Figura 2.1 Componentes de un aerogenerador (autoría propia).

2.3. Distribución de Weibull

Las técnicas estadísticas se utilizan tradicionalmente para modelar las velocidades del viento promediadas espacialmente utilizando datos históricos del viento que se miden durante un período de tiempo en el sitio potencial de interés. Una de las más populares de estas técnicas es la función de distribución de probabilidad de Weibull (Agelin, 2018).

Cuando los datos de la velocidad del flujo del viento son muestreados en cortos intervalos de tiempo es recomendable el uso de la función de distribución de Weibull.

Tomando la función de distribución acumulativa de Weibull como función lineal se tiene:

$$\begin{aligned}
 X &= \ln v & c &= e^{-(b/k)} \\
 \text{donde:} & & b &= -k \ln c & Y &= kX + b
 \end{aligned}$$

(1)

Tomando en cuenta la función gamma, se determina la velocidad media del viento, con la expresión siguiente:

$$v = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (2)$$

donde:

v es la velocidad media del viento (m/s).

Γ es la función gamma.

El valor de k representa el parámetro de forma como se observa en la Figura 2.2, el de b indica la intersección con el eje de las coordenadas y el valor de c corresponde al parámetro de escala dado en m/s (Palacios, 2019).

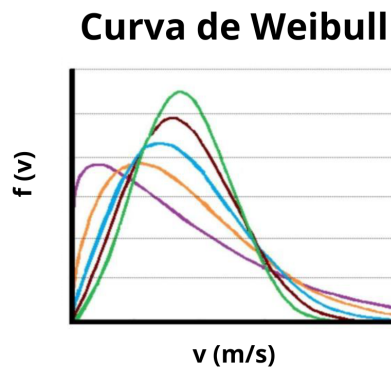


Figura 2.2 Curva característica de Weibull (autoría propia).

2.4. Perfil logarítmico

La expresión de perfil logarítmico se utiliza para estimar la velocidad del viento a una altura deseada, tomando como base la velocidad del viento conocida a una altura dada. La expresión del perfil logarítmico es:

$$\frac{v}{v_{ref}} = \frac{\ln \frac{h}{h_0}}{\ln \frac{h_{ref}}{h_0}} \quad (3)$$

donde:

v es la velocidad estimada del viento a la altura que se desea conocer (m/s).

v_{ref} es la velocidad del viento a la altura de referencia donde se cuenta con mediciones (m/s).

h es la altura a la que se desea estimar la velocidad del viento (m).

h_{ref} es la altura de referencia (m).

h_0 es la longitud de la rugosidad del terreno (m).

La longitud de la rugosidad del terreno representa en cierta medida el grado de obstáculo que presenta éste a la circulación del viento, algunos valores de h_0 se muestran en el Cuadro 2.1 (Jaramillo, 2011).

Cuadro 2.1 Parámetro h_0 según el tipo de terreno.

<i>Terreno</i>	<i>h_0 (x10-3m)</i>	<i>α</i>
<i>Llano liso con hierba o lodo</i>	00.01	--
<i>Superficie nevada</i>	03.00	0.10
<i>Campo barbechado</i>	30.00	0.13
<i>Plantaciones</i>	50.00	0.19
<i>Zonas urbanas</i>	1500.00	0.32

La potencia obtenida por la turbina debe corresponder al gasto total, el cual se define a continuación:

$$Gasto\ total = \frac{Consumo\ total * Factor\ de\ seguric}{Eficiencia\ inversor} \quad (4)$$

2.5. Inversor

La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada en corriente directa CD a un voltaje simétrico de salida en corriente alterna CA con magnitud y frecuencia deseada (Fernández, 2004).

La potencia nominal del inversor queda determinada como se enuncia a continuación:

$$Potencia_{inversor} = Potencia_{total} \quad (5)$$

donde:

$Potencia_{inversor}$ es la potencia del inversor (W).

$Potencia_{total}$ es la potencia total de las cargas (W).

La potencia de salida del inversor queda determinada a continuación:

$$Potencia_{salida} = \frac{P_{inversor}}{n_{inversor}} \quad (6)$$

donde:

$Potencia_{salida}$ es la potencia de salida del inversor (W).

$P_{inversor}$ es la potencia del inversor (W).

n_{salida} es la eficiencia del inversor (%).

2.6. Baterías

El sistema de almacenaje y de respaldo de energía es una de las características más importantes de una instalación debido a que es necesario utilizar la energía generada a cualquier hora del día (Díaz, 2019).

Para la correcta elección del sistema de almacenamiento de energía se considera la corriente de descarga, la cual se expresa como sigue,

$$I_{carga} = \frac{P_{generada}}{v} \quad (7)$$

donde:

I_{carga} es la corriente de carga (A).

$P_{generada}$ es la potencia nominal del número total de aerogeneradores (W).

v es el voltaje al que trabaja el sistema (V).

Y también se requiere de la corriente de descarga, la cual se define como:

$$I_{descarga} = \frac{P_{salida}}{v} \quad (8)$$

donde:

$I_{descarga}$ es la corriente de descarga (A).

P_{salida} es la potencia de salida del aerogenerador (W).

Así mismo, la capacidad de carga queda definida como:

$$Q_c = \frac{f.s * Gt * Días}{Pd * v} \quad (9)$$

donde:

Q_c es la capacidad de descarga (Ah).

$f.s$ es el factor de seguridad (%).

Gt es el gasto total (Wh).

$Días$ es el número de días de autonomía.

Pd es la profundidad de descarga (%).

Y por último. la capacidad por batería se expresa como sigue:

$$Capacidad\ por\ batería = \frac{Q_c}{n} \quad (10)$$

donde:

n es el número de baterías a emplear.

2.7. Controlador de carga

Se utiliza un controlador de carga para cargar la batería controlando la salida del aerogenerador, para así proteger la batería de una sobrecarga o descarga excesiva. (Venkateswarlu, 2020).

2.8. Esquema de protección eléctrica

La función principal de un sistema de protección es fundamentalmente la de causar la pronta remoción del servicio cuando algún elemento del sistema de potencia sufre un cortocircuito, o cuando opera de manera anormal.

Los objetivos generales de un sistema de protección se resumen así:

- Proteger efectivamente a las personas y los equipos.
- Reducir la influencia de las fallas sobre las líneas y los equipos (Ramírez, 2003).

La seguridad en sistemas de corriente directa de bajo voltaje debe ser igual de eficiente que la establecida en sistemas de corriente alterna (Salonen et al., 2009).

De lo anterior se establece que la corriente considerada para la dimensión de la instalación de acuerdo a la norma correspondiente, queda expresada como sigue para circuitos de corriente continua:

$$I_{c.d.} = \frac{P}{V} * 1.25 \quad (11)$$

donde:

$I_{c.d.}$ es la intensidad de corriente del sistema (A).

P es la potencia nominal (W).

V es el voltaje nominal (V).

Apegándose de nuevo a normativa, la corriente para sistemas monofásicos queda determinada como:

$$I_m = \frac{P}{V * f.p.} * 1.25 \quad (12)$$

donde:

I_m es la intensidad de corriente del sistema (A).

$f.p.$ es el factor de potencia.

2.9. Ampacidad

La ampacidad, se define como “corriente máxima que un conductor puede transportar, bajo condiciones de uso sin exceder su rango de temperatura” (NOM-001-SEDE-2012, 2012, art. 100).

Los parámetros que pueden afectar el valor de la ampacidad son los factores de corrección por temperatura y agrupamiento, así que la intensidad de corriente corregida se determina de la siguiente manera:

$$I_{\text{corregida}} = I * F_{\text{temperatura}} * F_{\text{agrupamiento}} \quad (13)$$

donde:

$I_{\text{corregida}}$ es la intensidad de corriente corregida por los factores de corrección (A).

I es la intensidad de corriente corregida máxima del sistema (A).

$F_{\text{temperatura}}$ es el factor de corrección por temperatura.

$F_{\text{agrupamiento}}$ es el factor de corrección por agrupamiento.

2.10. Aspectos de diseño de un aerogenerador

Hay varios aspectos críticos de una turbina de viento que deben considerarse en la fase de diseño, para garantizar que la turbina sea económica y duradera.

- La Torre: En principio, la torre debe ser lo más alta posible, porque la velocidad del viento aumenta con la altura. Sin embargo, la altura está limitada por problemas de costos.
- Control y seguimiento: Los siguientes aspectos de una turbina eólica deben controlarse y monitorearse para garantizar el funcionamiento eficaz de una turbina eólica dentro de los límites legales:
 - Velocidad de rotación y ángulo de paso de las palas del rotor.
 - La velocidad y dirección natural del viento.

- El voltaje y la frecuencia de la electricidad producida.
- La adquisición y almacenamiento de señales eléctricas (Wagner, 2020).

2.11. Normatividad

El material consultado para cumplir con los lineamientos normativos enfocados en instalaciones eléctricas se tomará de acuerdo a lo especificado en el artículo 694 de la NOM-001-SEDE-2012, cuyas disposiciones hacen referencia a sistemas eléctricos eólicos pequeños, en donde se abarca tanto a los sistemas autónomos como a aquellos que interactúan con otra fuente de generación (NOM-001-SEDE-2012, 2012) .

Para los lineamientos normativos en materia de calidad de la energía, se consulta la norma IEEE Std 1159-2019, en la cual se pueden encontrar la definición de calidad de la energía, así como los parámetros de las condiciones que surgen entre la interacción de la fuente de energía y los equipos conectados a ella (IEEE Std 1159-2019, 2019). Por otra parte, la IEC 61000-4-30 tiene por objetivo establecer límites que le ofrezcan al usuario final un servicio energético lo más eficiente posible, mediante el establecimiento de métodos de medición e interpretación de resultados de calidad de energía (IEC 61000-4-30, 2015). También se hizo uso de la especificación CFE L0000-45 (Especificación CFE L0000-45, 2007), cuyos lineamientos toman como referencia la IEEE-519-2022 (IEEE 519-2022, 2022).

La norma IEC 60755 se enfoca en dispositivos de protección contra descargas eléctricas (IEC 60755, 2017), debido a ello se consulta la norma para la selección de dispositivos de protección contra corriente residual.

2.12. PQUAQ

La PQUAQ mostrada en la Figura 2.3 es un sistema que permite la adquisición de señales, y fue desarrollado por integrantes de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Este sistema permite la entrada para 7 señales, de las cuales 4 señales están destinadas a medición de corriente y 3 señales más se ocupan para la

medición de voltaje, puesto que está diseñado para poder trabajar en sistemas trifásicos. Sin embargo, permite el análisis tanto en redes eléctricas continuas y alternas.

Para sistemas de corriente continua trabaja con niveles de tensión de hasta 600 V y la corriente es de alrededor de 250 A.

La frecuencia de la tarjeta de adquisición de datos es de 8 kHz con una resolución de 16 bits (Elvira et al, 2018).



Figura 2.3 Tarjeta de adquisición de datos PQUAQ (autoría propia).

3. METODOLOGÍA

Durante este capítulo se aborda la descripción a detalle de las etapas del proceso que llevan a alcanzar los objetivos fijados anteriormente en el apartado 1. Todo ello se ha plasmado de forma gráfica en la Figura 3.1, para así brindar una mejor visualización del desarrollo del proyecto.

El diagrama de bloques consta de 7 puntos principales, y cada uno de ellos cuenta con diversas acciones de desarrollo.

- Descripción de la zona:

Aquí se procedió a realizar una descripción física y geográfica del espacio de trabajo. Posterior a ello se hizo una evaluación de la zona para determinar los diversos aspectos en los que impacta la instalación.

- Dimensionado:

Se procedió a hacer un cálculo de la demanda de energía eléctrica del aula; de la estimación del recurso eólico de acuerdo a las características presentes en la zona; y el cálculo de los componentes pertenecientes a la instalación eólica aislada.

- Cotización:

Se obtuvo la cotización de los elementos que componen el sistema eólico, con base en el dimensionado antes mencionado.

- Integración de equipos de conexión y cargas:

Una vez se hubo evaluado la cotización de los elementos del proyecto, se prosiguió a la selección de protecciones eléctricas. Se requirió considerar pautas normativas.

- Instalación y puesta en marcha:

Se procedió a la conexión de los componentes del sistema eólico aislado, incluyendo las protecciones eléctricas.

- Elaboración de diagrama unifilar:

Se requirió la elaboración de un diagrama unifilar de la instalación eólica. En el que se incluyó dispositivos y esquema de protección.

- Monitoreo de señales de voltaje y corriente:

Una vez desarrollado lo anterior, como último punto se hizo el monitoreo de las señales de voltaje y corriente. Esto con el fin de disponer de un informe de la calidad de la energía a través de la señal eléctrica generada.

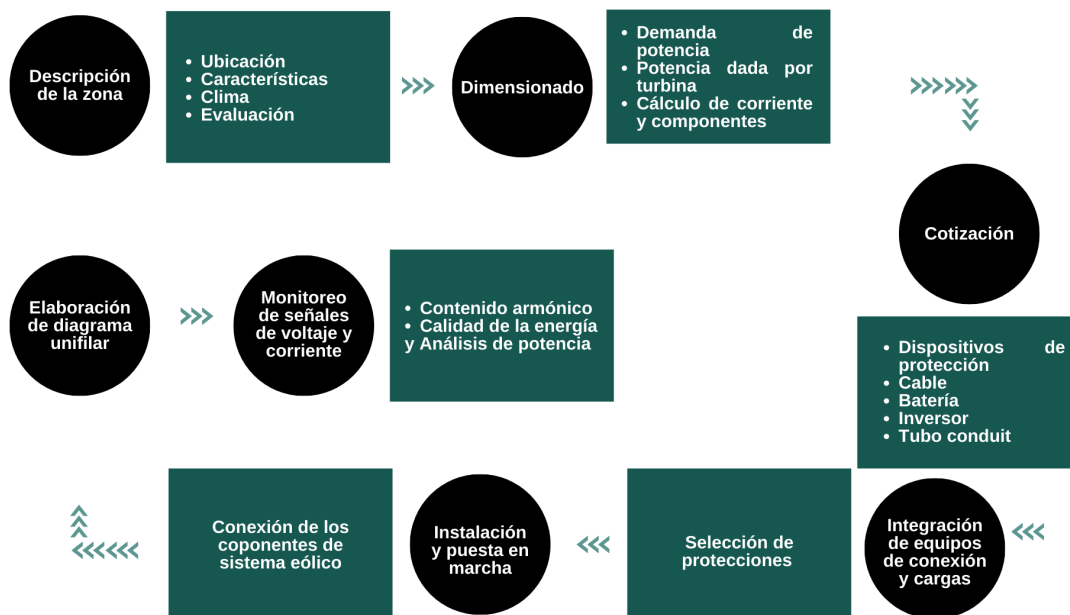


Figura 3.1 Diagrama de metodología donde se detallan las etapas contempladas para el desarrollo del proyecto (autoría propia).

3.1. Descripción de la zona

3.1.1. Ubicación

El proyecto fue desarrollado en el edificio del CATAS, localizado en la Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Tequisquiapan. La instalación

eólica aislada alimenta el aula C1 del laboratorio, está se muestra en la Figura 3.2.

La dirección de la ubicación es Campus Tequisquiapan, Mezquite 10, El Vergel, Centro, 76750 Tequisquiapan, Qro. La zona se localizó con las coordenadas de latitud $20^{\circ}31'01''\text{N}$ y longitud $99^{\circ}54' 10''\text{W}$, a una altitud sobre el nivel del mar de 1901 metros, Figura 3.3.



Figura. 3.2 Edificio del CATAS (autoría propia).

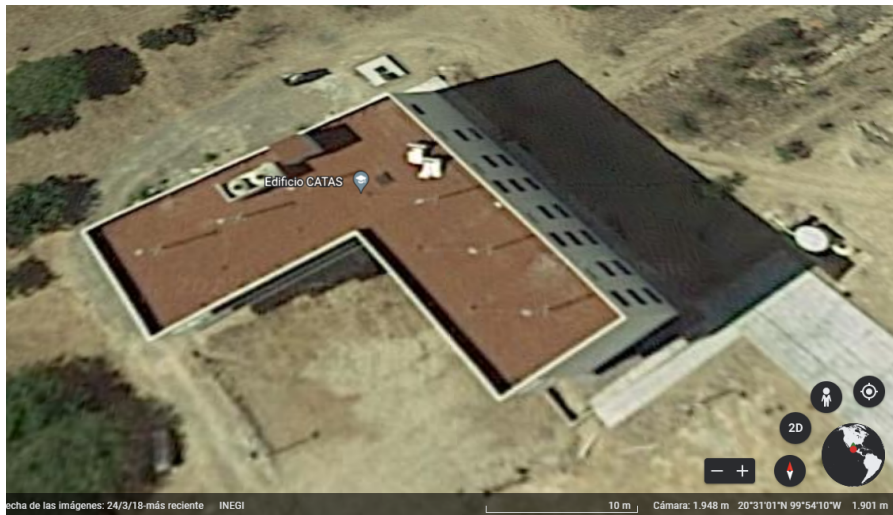


Figura. 3.3 Ubicación del CATAS (Google Earth, 2018).

3.1.2. Características

Las características de la zona requerida, fueron evaluadas tomando en consideración que el aula era un espacio de trabajo donde anteriormente ya se desarrollaban actividades académicas. Por lo que no se incluyeron cálculos del sistema de iluminación, de igual manera se excluyó el cálculo del circuito correspondiente al área interna del aula.

Las cargas eléctricas existentes en el aula, relevantes para los cálculos del dimensionado de la instalación, fueron contactos y luminarias.

El recuento del número de contactos y luminarias presentes se muestran en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1 Características del aula.

<i>Aula</i>		<i>C1</i>
<i>Número de salidas de contactos</i>		<i>6</i>
<i>Número de luminarias</i>		<i>6</i>

3.1.3. Clima

La evaluación del recurso eólico disponible en el área donde se implementó el proyecto, requirió de datos referentes a temperatura y velocidad del aire. Para obtener los datos, se buscó una base de datos que permitiera la búsqueda de la ubicación del edificio lo más exacta posible. Por lo cual los datos para los cálculos se tomaron del reanálisis atmosférico de la NASA, MERRA-2.

Los datos consultados en cuanto a velocidad del viento, se adquirieron de acuerdo a las características presentadas en el Cuadro 3.2. Se determinó que los datos fueron recopilados y promediados por hora, desde la fecha de 01 de enero de 2020, hasta el 31 de diciembre de 2020. De esta manera, se consiguió un total de 8784 datos de velocidad del viento, medidos a 10 metros sobre el nivel del suelo.

Para el cálculo del calibre del cable, la temperatura considerada fue de 32°C, al ser la temperatura ambiente de la zona.

Cuadro 3.2. Características de datos recolectados de velocidad.

<i>Número de muestras</i>	8784
<i>Intervalo de tiempo</i>	1 hora
<i>Inicio de toma de muestras</i>	01/01/2020
<i>Final de toma de muestras</i>	31/12/2020
<i>Altura de medición de velocidad</i>	10 m

3.1.4. Evaluación

La instalación de un sistema de generación eólica puede influir de diversas formas en el entorno en el que se instala. Es por ello que se realizó una evaluación del impacto que tenía el proyecto en el área para la parte experimental de campo.

De acuerdo a las dimensiones, equipo y dispositivos empleados, la evaluación se enfocó en tres principales aspectos:

- Contaminación visual.
- Contaminación auditiva.
- Ocupación del suelo.

3.2. Dimensionado

3.2.1. Demanda de potencia

Como primer paso, se realizó el cálculo de la potencia demandada en el aula C1. Se incluyeron las cargas eléctricas ya instaladas, también se integraron cargas que se estimó podrían utilizarse más adelante en las actividades académicas.

Fue así como una vez evaluada el área y considerando que la zona de estudio era un aula escolar, se decidió establecer las cargas de acuerdo a prioridad y frecuencia de uso. De tal forma que, para las 6 salidas de contactos encontradas, se hizo la estimación para el cálculo de la potencia como sigue: se incluyó la potencia de un proyector existente en el campus, mientras que el resto de las salidas de contactos se consideraron para computadoras portátiles. Se adicionaron al cálculo las lámparas que ya estaban instaladas en el salón. Ambas cargas integradas se pueden visualizar en la Figura 3.4. La estimación de demanda de energía se contempló para un escenario donde se hiciera la mayor demanda de energía posible en el aula según sus características.

Para completar el cálculo, se evaluó la cantidad de horas en la que cada carga se mantendría en utilización y además el número de unidades. Posterior a lo anterior, se elaboró un cuadro de demanda energética con los datos anteriores en Excel.

Es así como la estimación de cargas quedó como sigue:

- 5 computadoras portátiles
- 1 proyector
- 6 lámparas led



Figura 3.4. Cargas eléctricas del aula (autoría propia).

Finalmente, para determinar la potencia total necesaria se recurrió a calcular el gasto total con la ecuación 4. Para esto fue necesario valerse de las

especificaciones del fabricante, específicamente de las relacionadas a la eficiencia del inversor. Las características encontradas se presentan en el Cuadro 3.3, donde se concluye que la eficiencia es de un 90%, con un factor de seguridad del 10%.

Cuadro 3.3. Especificaciones del fabricante para el inversor.

<i>Eficiencia</i>		90%
<i>Factor de seguridad</i>		10%

3.2.2. Potencia dada por turbina

Para el cálculo de la potencia disponible en el viento, se requirió de mediciones de la velocidad del viento. En este caso, los datos de velocidad del viento fueron tomados de MERRA-2.

Estos datos se obtuvieron promediados por hora, por lo que su procesamiento fue más sencillo y permitió utilizar la distribución de Weibull (Jaramillo a, 2011).

Utilizando la distribución de Weibull en forma lineal, se encontró la velocidad media, a través de la cual se hizo la estimación de la potencia disponible del viento.

De acuerdo a la ecuación 1, para encontrar los parámetros k y c se siguió el procedimiento (Elorreaga, 2019) en el que fue necesario ordenar los datos de las mediciones de velocidad de mayor a menor, para después obtener la frecuencia acumulada mediante una hoja de cálculo de excel.

Seguido de lo anterior, para la obtención de los rangos se hizo un script en MATLAB, con el que se realizó un histograma de frecuencias, que arrojó el número de rangos correspondientes a los 8784 datos. Este se muestra en la Figura 3.5.

Con los datos anteriores se generó la gráfica de frecuencias acumuladas que se muestran en la Figura 3.6. Los datos originados por esta gráfica se usaron para elaborar la ecuación lineal de la velocidad del viento.

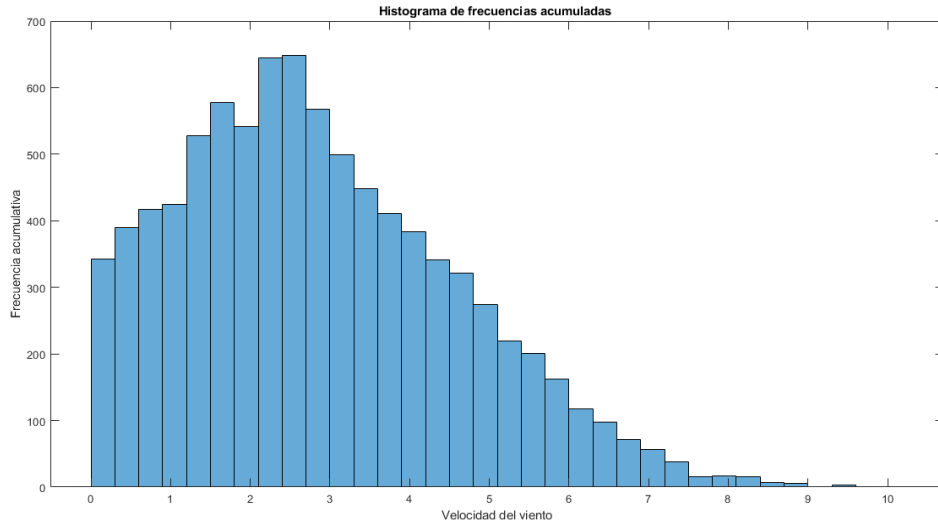


Figura 3.5. Histograma de frecuencias acumuladas (autoría propia).

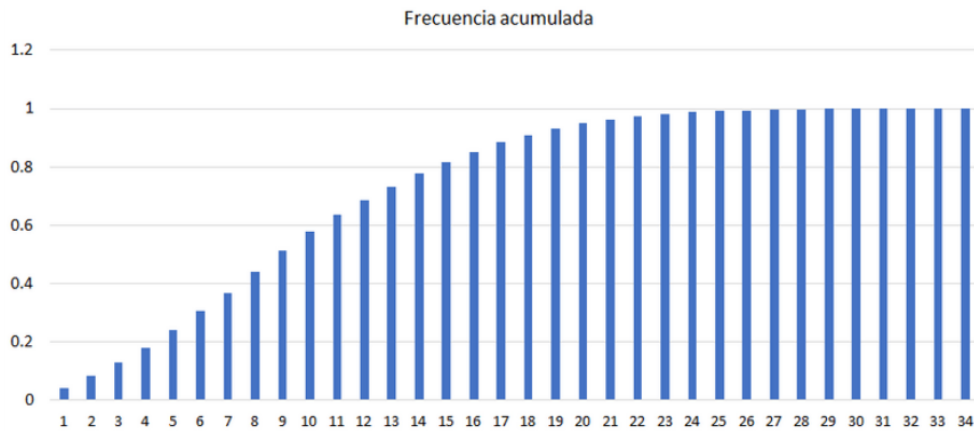


Figura 3.6. Distribución acumulada de Weibull (autoría propia).

Con la ecuación lineal de velocidad del viento resultante, se obtuvieron los parámetros k y c de la ecuación de Weibull, lo que permitió obtener la velocidad media ocupando la ecuación 2.

Esta velocidad media se consiguió de los datos de velocidad del viento tomados a una altura de 10 metros sobre el nivel del suelo, por lo que fue necesario hacer una corrección acorde a la altura en la que estarían trabajando realmente los aerogeneradores.

Tomando en cuenta la altura del edificio del CATAS y añadiendo la altura de los aerogeneradores establecidos sobre el edificio, se estableció la altura de trabajo de cada turbina de 16.6 metros sobre el nivel del suelo. La corrección se obtuvo con un perfil logarítmico (Jaramillo, 2011), con base en la ecuación 3, que se relaciona con la altura y rugosidad del suelo.

La rugosidad del terreno se obtuvo de los parámetros establecidos en el Cuadro 3.4. para lo cual se tomó el valor de h_0 dirigido a zonas urbanas.

Cuadro 3.4. Parámetro h_0 según el tipo de terreno.

<i>Terreno</i>	<i>h_0 (x10-3m)</i>	<i>α</i>
<i>Llano liso con hierba o lodo</i>	0.01	--
<i>Superficie nevada</i>	3	0.10
<i>Campo barbechado</i>	30	0.13
<i>Plantaciones</i>	50	0.19
<i>Zonas urbanas</i>	1500	0.32

Una vez realizado el cálculo de la velocidad media corregida, lo siguiente fue obtener la potencia eléctrica generada, esto se consiguió con la curva de potencia proporcionada por el fabricante de la turbina. La curva de potencia se puede consultar en la Figura 3.7.

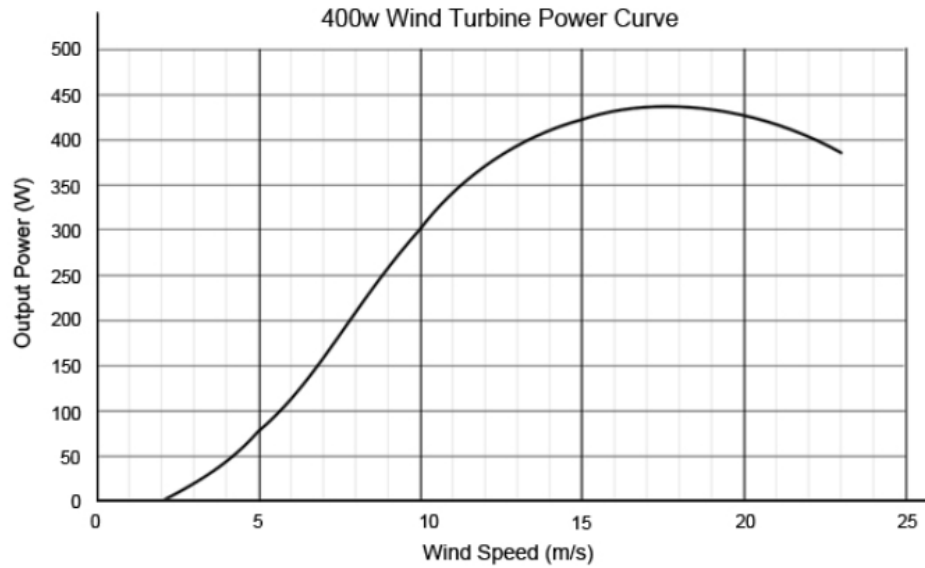


Figura 3.7. Curva de potencia del aerogenerador (Folkecenter, 2016).

3.2.3. Cálculo de corriente y componentes

3.2.3.1. Selección de conductores

En base al artículo 694-12 b) 2 de la NOM 001 SEDE 2012, para obtener el cálculo de sección transversal del conductor de los circuitos que integran la instalación eólica, se consideró para el dimensionamiento de los conductores una corriente de no menos de 125% de la corriente máxima.

La sección de los conductores se calculó para diferentes segmentos, y se tomó en cuenta el voltaje y potencia establecido en cada uno de ellos. La Figura 3.8. permite observar las secciones en las que se dividió el cálculo.

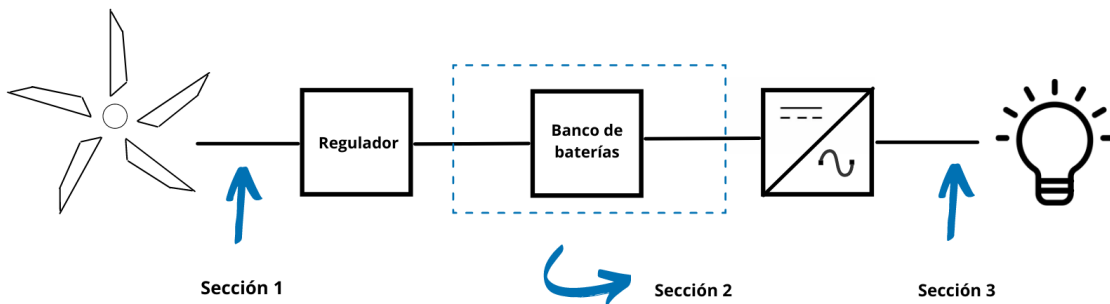


Figura 3.8. Secciones para el cálculo de conductores (autoría propia).

1. El primer tramo del cálculo del cable correspondió desde la salida del aerogenerador hasta el regulador.
2. El segundo tramo se estableció a partir del regulador hasta el inversor.
3. El tercer y último tramo correspondió al circuito de la salida del inversor a las cargas.

Teniendo en consideración la NOM 001-SEDE 2012, en donde para sistemas eléctricos eólicos pequeños los conductores deben conducir no menos que un 125 por ciento de la corriente máxima, se realizó el ajuste de la corriente.

Además, el cálculo del calibre del conductor se justificó con base en el cálculo de ampacidad donde se consideró la corrección por factor de agrupamiento y de temperatura.

El factor de agrupamiento fue 1, debido a que el número de conductores no es mayor a 3, de acuerdo a la NOM-001-SEDE-2012. Por otro lado, el factor corrección de temperatura se seleccionó de la tabla 310-15(b)(2)(a), con base en la temperatura ambiente de 32 °C

3.2.3.2. Inversor

Para la correcta selección del inversor, los cálculos realizados se relacionaron con la potencia del inversor. Esta potencia se estableció como se observa en la ecuación 4, de donde se deduce que la potencia del inversor es igual a la potencia total requerida.

La potencia total requerida se obtuvo al calcular el total de watts de las cargas consideradas dentro del aula: watts y número de unidades de cada carga. Lo anterior se visualiza en el Cuadro 3.5.

Cuadro 3.5 Cargas utilizadas en el aula.

<i>Tipo de carga</i>	<i>Consumo (W)</i>	<i>Unidades</i>
<i>Lámpara led</i>	40	6
<i>Computadora</i>	45	5
<i>Proyector</i>	296	1

3.2.3.3. Baterías

La capacidad nominal de las baterías se obtuvo a través de la corriente de carga, corriente de descarga y potencia de descarga del inversor.

Dentro de las consideraciones que se tomaron en cuenta para el dimensionado de las baterías fue el régimen de descarga al cual se estaría trabajando, por ello se seleccionó un régimen de descarga de Qc100.

Teniendo los datos anteriores se calculó la capacidad nominal total necesaria de las baterías. Posterior a ello se obtuvo la capacidad nominal individual por batería.

3.3. Cotización

Los materiales fueron cotizados de acuerdo a las características encontradas en el apartado de dimensionamiento. En el Cuadro 3.6 se presentan los elementos que se requirieron para hacer la conexión y puesta en marcha de la instalación eólica. También se hace mención del número de dispositivos y elementos necesarios.

Cuadro 3.6. Cotización de materiales

Descripción	Cantidad
Aerogenerador 12v/400w	3
Baterías de descarga profunda 115 Ah, 60% profundidad de descarga	7
Inversor onda senoidal pura 12/24 volts cc; 127 volt ca; 1000 watts	1
Caja 100 Mts Cable lusa Negro Thw Cal 10 Awg	1
Caja 100 Mts Cable lusa Rojo Thw Cal 10 Awg	1
Tubo P.G. 21 MM ¾" C/Cople	8
Tubo P.G. 16 MM 1/2" C/Cople	8
Cople P.G. 21 MM ¾"	10
Codo P.G. 21 MM ¾"	3
Reducc. Alum. 19mm A 13mm ¾" A 1/2"	3
Varistor 15V 30mA	4

Fusible con porta fusible 110 A	1
Fusible con porta fusible 45 A	3
Interruptor diferencial. 20A. TOMZN	1
Interruptor termomagnético A.C. 15A 1 polo	1
Gabinete mini Kaedra - para dispositivos Riel Din - 1f - 3 módulos.	2
Conmutador Giovenzana	1

3.4. Integración de equipos de conexión y cargas

El diagrama de la Figura 3.9 muestra cómo se integraron y conectaron cada uno de los componentes que conformaron la instalación eólica aislada, de igual manera presenta se observa la conexión a las cargas eléctricas.

En el circuito, se integrará un conmutador eléctrico que permitirá realizar el cambio de fuente de alimentación en caso de falla o mantenimiento.

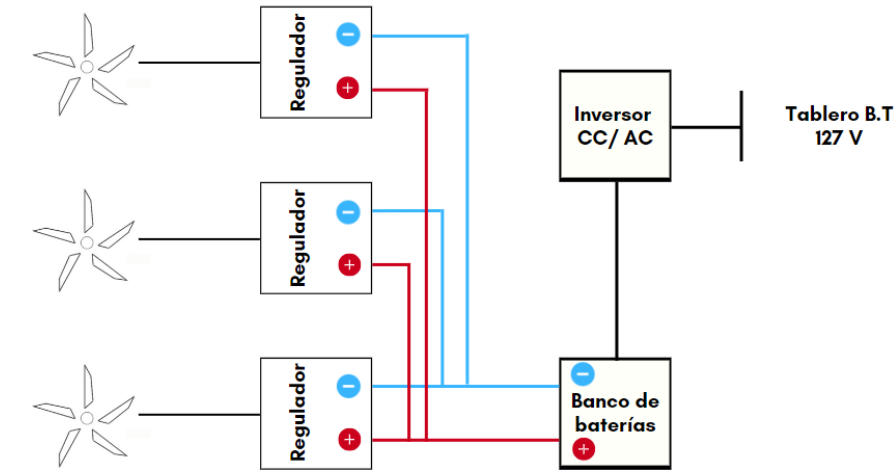


Figura 3.9. Componentes de una instalación eólica aislada (autoría propia).

3.4.1. Esquema de protecciones

Se seleccionó el esquema de protecciones de acuerdo a las secciones en las que se dividen los equipos que componen la instalación eólica.

- Regulador - batería

En esta sección se optó por la elección de un fusible para la protección del circuito contra sobrecargas y cortocircuito. Y para sobretensiones un varistor.

Para su selección se calculó la corriente del circuito y el voltaje con un 20% de sobretensión permisible.

- Batería - inversor

En la sección de batería a inversor se acordó seleccionar la misma protección que se escogió anteriormente en la sección de regulador - batería.

- Salida de inversor

A la salida del inversor se eligió añadir como protección al circuito un interruptor termomagnético y un interruptor diferencial.

La implementación se hizo dentro del marco normativo que especifica el artículo 694-12 b) 2 de la NOM 001 SEDE 2012.

3.5. Instalación y puesta en marcha

Como primer punto, se hizo la conexión del cable desde la salida del aerogenerador hasta el regulador. El regulador se decidió ubicar en el centro de carga que se localizó en el mismo nivel del edificio en el que se encontraba el aula. El centro de carga se observa en la Figura 3.10. La conexión y canalización al inicio se hizo como circuito independiente por cada turbina, mientras que para dirigir el cable hacia el centro de carga, se hizo una sola canalización. La Figura 3.11 muestra este proceso.



Figura 3.10. Centro de carga (autoría propia).



Figura 3.11. Canalización y conexión del conductor a la salida de las turbinas (autoría propia).

Una vez que los conductores se instalaron en el centro de carga, se realizó la conexión de cada generador eólico al regulador que le correspondía a cada uno, tal como lo muestra la Figura 3.12.



Figura 3.12. Canalización del conductor, desde el aerogenerador hasta el regulador (autoría propia).

Nuevamente se hizo una conexión desde la salida de cada regulador al banco de baterías. De la salida del banco de baterías, la conexión continuó hasta el inversor.

El conductor eléctrico de la salida del inversor se conectó al tablero de baja tensión que se encontraba ahí mismo en el centro de carga. El tablero con el circuito correspondiente al aula C1 se observa en la Figura 3.13.



Figura 3.13. Tablero de baja tensión (autoría propia).

El esquema de protección se colocó en las secciones mencionadas anteriormente.

3.6. Elaboración de diagrama unifilar

Se procedió a crear un diagrama unifilar, con el objetivo de identificar los componentes que integran la instalación eléctrica y visualizar cómo se distribuye la potencia desde la fuente.

El diagrama se elaboró en Autodesk Electrical, se utilizó simbología IEC. La representación gráfica de la instalación eléctrica se presenta en este documento para futuras consultas.

3.7. Monitoreo de señales de voltaje y corriente

Se adquirieron las señales de corriente y voltaje del sistema eólico con la tarjeta PQUAQ. Para su procesamiento se realizaron 3 scripts de MATLAB. En uno de ellos se cargaron los datos adquiridos y se hizo el ajuste adecuado para ambas señales, la de voltaje y corriente. En otro script se guardaron las señales de V e I en un documento .MAT, además, se verificó que las señales se adquirieron correctamente. Y finalmente en el último script se ejecutó el análisis de armónicos, potencias y factor de potencias.

3.7.1. Contenido armónico

En MATLAB se creó un script en el que se establecieron los parámetros del sistema y se accedió a los datos almacenados de voltaje y corriente. Para el análisis de distorsión armónica, se calculó la transformada rápida de Fourier (fft) de la señal, para esto se consideró la norma IEC 61000-4-30. En cumplimiento a la norma, se establecieron ventanas de la fft de 12 ciclos y la resolución de los componentes armónicos a la frecuencia de 5 Hz. Por lo que la ventana base de observación fue de 200 ms. El procedimiento se puede identificar en la Figura 3.14.

Por último se obtuvo el promedio de la distorsión armónica total.

Fourier y THD

```
ini = 1;
fin = mm;
for j=1:Kt
    ss = Vff(ini:fin);
    trs = abs(fft(ss));
    xS = trs(1:H)/H;

    suma = 0;
    for m=1:length(freq)
        if(mod(freq(m),60) == 0) && (freq(m) <= 3600)
            if(freq(m) == 60)
                vv =xS(m);
            else
                suma = suma + xS(m).^2;
            end
        end
    end
    Vh = sqrt(suma);
    THD(j) = (Vh/vv)*100;
    ini = fin+1;
    fin = (j+1)*mm;
end
```

Figura 3.14. Script para obtención de THD (autoría propia).

3.7.2. Análisis de potencia y factor de potencia

En el mismo script de la distorsión armónica, se hizo el análisis para la potencia activa, reactiva y aparente. El factor de potencia también se obtuvo en los resultados.

Para calcular la potencia activa se utilizó los valores de voltaje e intensidad de corriente instantáneos de la señal. En cambio, para la potencia aparente se utilizaron los valores RMS y la potencia activa. La potencia reactiva resultó al usar los valores de potencia aparente y activa. El script se muestra en la Figura 3.15.

Potencia aparente

```
p_s = Vrms * Irms;
```

Potencia activa

```
p_pp = Vff .* Iff;  
p_p = sum(p_pp) / length(Vff);
```

Potencia reactiva

```
p_q = sqrt(p_s.^2 + p_p.^2);
```

Figura 3.15. Script para el cálculo de las potencias (autoría propia).

El factor de potencia se calculó por detección por cruce por cero. Con este método el objetivo es detectar cuando el voltaje pasa de valor positivo a negativo en una señal eléctrica de corriente alterna. Esta detección también se hace al cambiar de valor negativo a valor positivo.

4. RESULTADOS

4.1. Descripción de la zona

4.1.1. Evaluación

Después de evaluar el área y el entorno en el que se encuentra, se llegó al siguiente resultado:

- Contaminación visual.

Los aerogeneradores no indicaron un impacto radical o perjudicial en el área de colocación de la instalación. Esto se debió a que se situaron en la parte superior del edificio del CATAS. Este edificio cuenta con una altura de 12 metros.

- Contaminación auditiva.

El ruido generado por aerogeneradores pequeños se estimó en 1% arriba del ruido ambiente, por lo que las turbinas no ocasionarían daño alguno a la salud. Además, el ruido no interviene o interrumpe en las actividades que se desarrollan dentro y fuera del edificio del CATAS.

- Ocupación del suelo

Debido a que el lugar de emplazamiento de los aerogeneradores es el techo del edificio, no se empleó el espacio de un área que estuviera destinada a otra aplicación u actividad.

4.2. Dimensionado

4.2.1. Demanda de potencia

En el Cuadro 4.1, que corresponde al cuadro de cargas, se señala la máxima demanda obtenida de acuerdo a la potencia de cada equipo eléctrico, que resultó de 761 Watts. También se presenta el consumo total, que tuvo un valor de 2564 Wh.

Para obtener la energía que el sistema eólico aislado necesitaba cubrir, se utilizó la ecuación 4. Y se tomaron los datos mostrados en el Cuadro 3.3, obteniéndose así un gasto total de 3133.78 Wh.

$$Gasto\ total = \frac{2564\ Wh * 1.10}{0.90} \quad (4)$$

$$Gasto\ total = 3133.78\ Wh$$

El tiempo de empleo para cada equipo eléctrico, se determinó de 4 horas, porque son las horas de clase que se imparten en el aula. Las luminarias fueron la excepción, ya que la estructura del edificio permite la entrada adecuada de luz solar en el aula.

Cuadro 4.1 Cuadro de cargas

Carga tipo	Consumo (W)	Unidades	Horas de uso	Potencia total (W)	Consumo (Wh)
Lámpara led	40	6	2	240	720
Computadora	45	5	4	225	900
Proyector	296	1	4	296	1184
Consumo total (Wh) =					2564
Gasto total (Wh) =					3133.78

4.2.2. Estimación del recurso

La ecuación lineal de la velocidad del viento se obtuvo de acuerdo a la ecuación 1, y se generó a partir del gráfico de la Figura 4.1.

$$y = 1.1455x - 1.3196 \quad (1)$$

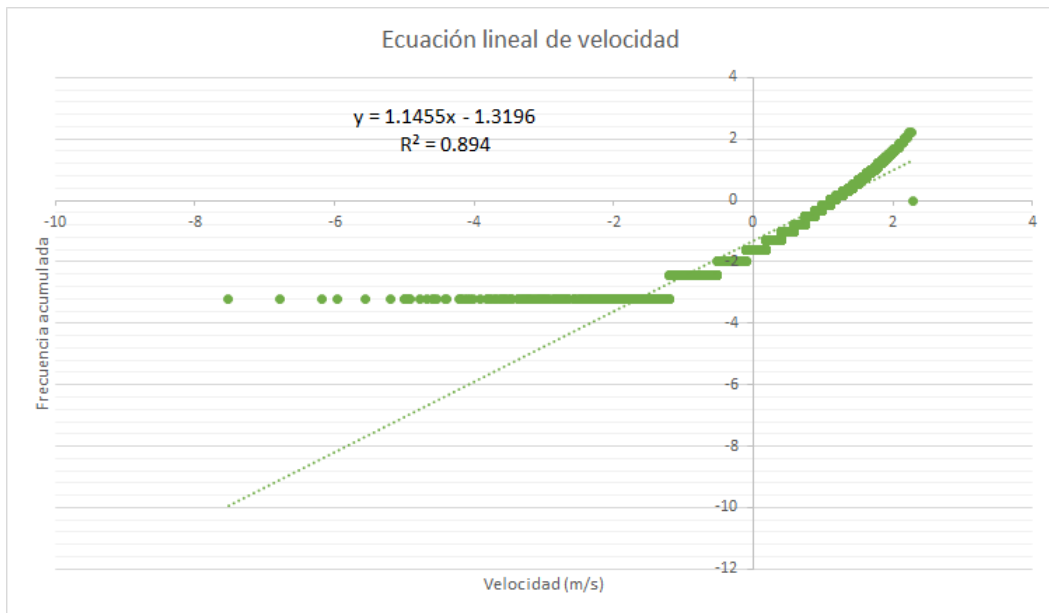


Figura 4.1. Ecuación lineal de regresión (autoría propia).

De la ecuación lineal de la velocidad se tomaron los valores de k y b , los cuales se muestran en el Cuadro 4.2.

Cuadro 4.2. Parámetros obtenidos de Weibull.

k	1.1455
b	- 1.3196

A continuación se obtuvo el valor de c

$$c = e - ((- 1.3196)/1.1455)$$

$$c = 3.1645 \text{ m/s}$$

Tomando en cuenta la función gamma, se determinó la velocidad media del viento, con la ecuación 2.

$$v = 3.1645 \text{ m/s} \Gamma \left(1 + \frac{1}{1.1455} \right) \quad (2)$$

$$v = 3.0151 \text{ m/s}$$

Se empleó el perfil logarítmico para la corrección de la velocidad media, como indica la ecuación 3.

$$v = (3.015093174 \text{ m/s}) \frac{\ln\left(\frac{16.6 \text{ m}}{1.5}\right)}{\ln\left(\frac{10 \text{ m}}{1.5}\right)} \quad (3)$$

$$v = 3.8205 \text{ m/s}$$

La velocidad promedio del área en donde se encuentra el aula C1, con corrección de altura a 16.6 m y rugosidad del terreno de 1.5, es de 3.8205 m/s. Esta velocidad es superior a la velocidad de arranque del aerogenerador utilizado en el proyecto que el fabricante especifica de 2.5 m/s.

Esta corrección fue necesaria debido a que la velocidad tiene una variación de acuerdo a la altura y rugosidad a la que se hace una medición.

La velocidad media encontrada se empleó para estimar la potencia disponible en el viento. Para lo cual se consultó la curva de potencia del aerogenerador proporcionada por el fabricante. Fue así como la potencia disponible del viento resultó de:

$$P = 44 \text{ watts}$$

Los 44 watts de potencia representan la potencia por hora que es capaz de entregar la turbina eólica. Por lo que la potencia generada a lo largo de un día, que son 24 horas, sería de 1056 Wh.

Para cubrir el gasto total que se calculó anteriormente, se ocuparon 3 aerogeneradores para el dimensionamiento del proyecto. Con esto la potencia por día proporcionada por los 3 aerogeneradores es de 3168 Wh. En el Cuadro 4.3 se muestran los resultados.

Cuadro 4.3. Potencia generada por aerogenerador

<i>Potencia en 1 hora</i>		44 W
---------------------------	--	------

<i>Potencia en 1 día</i>	105 Wh
<i>Potencia de 3 aerogeneradores</i>	3168 Wh

4.2.3 Cálculo de corriente y componentes

4.2.3.1 Selección de conductores

- Sección aerogenerador - regulador y regulador - batería

La corriente del circuito que se estimó para el primer tramo se calculó con la potencia nominal del aerogenerador con la ecuación 11.

$$I_{c.d.} = \frac{400 W}{12 V} * 1.25 \quad (11)$$

$$I = 41.67 A$$

Así que la intensidad máxima de corriente del circuito es de 41.67 A.

Posterior a estos cálculos mencionados, se prosiguió a realizar la corrección por factores de corrección de agrupamiento y temperatura, como se expresa en la ecuación 13. Los datos se tomaron del Cuadro 4.4

$$I_{corregida} = 41.67 A * 1 * 0.96 \quad (13)$$

$$I = 40.00 A$$

El conductor se eligió de la tabla 310-15(b)16. de la columna de temperatura de 90°C. Fue posible seleccionar el conductor de la columna de 90°C porque se utilizaron factores de corrección de ampacidad.

Y es así como el valor corregido de la corriente se ajustó a un calibre 10 AWG con ampacidad permisible de 40 Amperes a 90°C. Este conductor eléctrico coincidió con el calibre de conductor recomendado por el fabricante del aerogenerador. Además la intensidad de corriente máxima de 40 A fue la que el regulador tiene la capacidad de soportar.

A la salida del regulador la intensidad de corriente es la misma que la sección aerogenerador - regulador, por lo que el calibre del conductor fue el mismo.

- Sección batería - inversor

Aquí se implementó el mismo procedimiento anterior. Se obtuvo una corriente corregida de 100 A. Se seleccionó la potencia del inversor para el cálculo, que fue de 1000 W.

$$I_{c.d.} = \frac{1000 W}{12 V} * 1.25$$

$$I = 104.17 A$$

$$I = 104.17 * 1 * 0.96$$

$$I = 100 A$$

Con el resultado anterior el calibre seleccionado fue 3 AWG a 90 °C de cobre.

- Sección salida del inversor

Esta sección no se calculó debido a que era un circuito que ya había sido conectado anteriormente. Así que solo hubo una conexión al tablero de baja tensión.

Cuadro 4.4. Parámetros para cálculo de ampacidad

<i>Temperatura ambiente</i>		32° C
<i>Factor de agrupamiento</i>		1

Factor de temperatura

0.96

4.2.3.2 Inversor

Para seleccionar el inversor adecuado para la instalación, se ocupó la ecuación 5, donde se determinó que la potencia a la que se requería el inversor era igual a la potencia total del sistema. Y se estableció de acuerdo al Cuadro 4.5.

$$Potencia_{inversor} = 761 \text{ W} \quad (5)$$

El inversor seleccionado fue de una potencia comercial de 1000 W, el valor más cercano a los 761 W.

Una vez seleccionado el inversor, se obtuvo la potencia de salida con la ecuación 6.

$$Potencia_{salida} = \frac{1000 \text{ W}}{0.9} \quad (6)$$

$$Potencia_{salida} = 1111 \text{ W}$$

Cuadro 4.5 Potencia total

Carga tipo	Consumo (W)	Unidades	Potencia (W)
------------	-------------	----------	--------------

Lámpara led	40	6	240
Computadora	45	5	225
Proyector	296	1	296
		Potencia total	761 W

4.2.3.3 Baterías

En este apartado se calculó la capacidad nominal de las baterías, para esto fue necesario obtener primero la corriente de carga y descarga. Por lo que se emplearon las ecuaciones 7 y 8. Para esto se tomaron los datos del Cuadro 4.6.

$$I_{carga} = \frac{1200 W}{12 v} \quad (7)$$

$$I_{carga} = 100 Ah$$

Para determinar la corriente de descarga se necesito el valor de la potencia de salida del inversor.

$$I_{descarga} = \frac{1111 W}{12 v} \quad (8)$$

$$I_{descarga} = 92.5834 Wh$$

Mientras que la capacidad de carga se calculó con la ecuación 9. Se determinaron 2 días de autonomía después del análisis de datos.

$$Q_c = \frac{110 * 3133.78 Wh * 2}{70 * 12 V} \quad (9)$$

$$Q_c = 820.7519 Ah$$

El total de la capacidad que se ocupa es de 820.7619 Ah, para conocer el número de baterías y la capacidad de cada batería, se hizo el cálculo que se muestra a continuación con la ecuación 10.

$$\text{Capacidad por batería} = \frac{820.7519 \text{ Ah}}{7 \text{ baterías}} \quad (10)$$

$$\text{Capacidad por batería} = 117.25 \text{ Ah}$$

El resultado fue que se ocupaban 7 baterías de 122 Ah.

Cuadro 4.6. Parámetros para cálculo de baterías

<i>Qc100</i>	122 Ah
<i>Días de autonomía</i>	2
<i>Eficiencia del inversor</i>	90%
<i>Factor de seguridad</i>	10%
<i>Tensión de sistema</i>	12 V
<i>Gasto total</i>	3133.78 Wh
<i>Profundidad de descarga</i>	70%

4.3. Cotización

Se verificaron los precios de los materiales calculados. El precio de cada dispositivo y el monto total se presentan en el Cuadro 4.7.

Cuadro 4.7 Cotización de materiales

Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Costo total
Aerogenerador 12v/400w	3	\$ 18,479.00	\$ 55,437.00
Baterías de descarga profunda 115 Ah, 60% profundidad de descarga	7	\$ 3,270.00	\$ 22,890.00
Inversor onda senoidal pura 12/24 volts cc; 127 volt ca; 1000 watts	1	\$ 5,661.00	\$ 5,661.00
Caja 100 Mts Cable lusa Negro Thw Cal 10 Awg	1	\$ 1,721.00	\$ 1,721.00
Caja 100 Mts Cable lusa Rojo Thw Cal 10 Awg	1	\$ 1,721.00	\$ 1,721.00
Tubo P.G. 21 MM ¾" C/Cople	8	\$ 124.98	\$ 999.84
Tubo P.G. 16 MM 1/2" C/Cople	8	\$ 99.33	\$ 794.64
Cople P.G. 21 MM ¾"	10	\$ 7.36	\$ 73.60
Codo P.G. 21 MM ¾"	3	\$ 30.38	\$ 91.14
Reducc. Alum. 19mm A 13mm ¾" A ½"	3	\$ 7.90	\$ 23.70
Fusible con porta fusible 110 A	1	\$220.00	\$220.20

Fusible con porta fusible 45 A	3	\$222.25	\$666.75
Interruptor diferencial 20 A TOMZN	1	\$285.00	\$285.00
Interruptor termomagnético A.C. 15A 1 polo	1	\$159.00	\$159.00
Gabinete mini Kaedra - para dispositivos Riel Din - 1f - 3 módulos.	2	\$280.00	\$560.00
Conmutador Giovenzana	1	\$915.00	\$915.00

Total			\$ 92,218.87
-------	--	--	--------------

4.4. Integración de equipos de conexión y cargas

En la Figura 4.2 se observan los 3 aerogeneradores conectados a un regulador de manera individual, la salida de cada regulador se dirigió a un banco de baterías. De ahí se conectó el circuito a un inversor de 1000 W. El circuito a la salida del inversor se conectó al tablero de baja tensión de 127 V.

El banco de baterías se integró de 7 baterías conectadas en paralelo.

Además, para asegurar el suministro eléctrico al aula en caso de falla o mantenimiento, se estableció un conmutador con la intención de evitar la interrupción de cualquier actividad en desarrollo en el aula, éste se muestra en la Figura 4.3. Ante alguna de estas situaciones, el conmutador permitirá conectar el circuito a un suministro eléctrico alterno o su desconectarlo. Su capacidad se estimó con la ecuación 12 y ajustando con un factor de potencia de 0.85.

$$I = \frac{761 W}{127 * 0.85} * 1.25 \quad (12)$$

$$I = 8.81 A$$

El valor de intensidad comercial para el conmutador fue de 20 A con 3 polos.

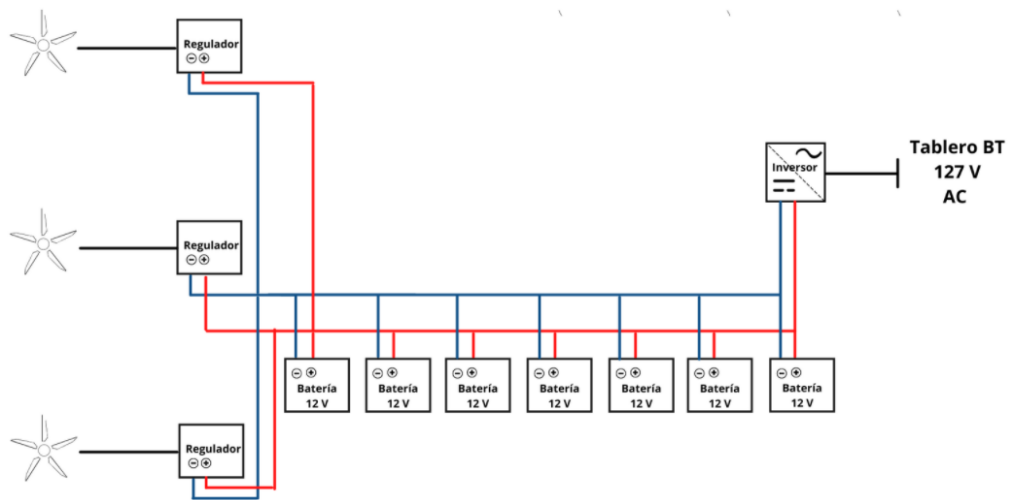


Figura 4.2. Conexión de dispositivos y cargas (autoría propia).



Figura 4.3. Conmutador (autoría propia).

4.4.1. Esquema de protecciones

De acuerdo a cada sección establecida en el capítulo de metodología, se han seleccionado las protecciones eléctricas.

- Regulador - batería

El fusible se seleccionó con el cálculo de la ecuación 11. La potencia fue la de la salida del aerogenerador, que corresponde a 400 W Y lo mismo para el voltaje, 12V.

$$I = \frac{400 W}{12} * 1.25 \quad (11)$$

$$I = 41.67 A$$

Para el varistor al tomar en cuenta el 20% de sobretensión y la tensión del sistema, se obtuvo un voltaje de 14.4 V. Por lo que el valor comercial se recomienda de 15 V.

- Batería - inversor

Al ser la misma protección seleccionada que en el tramo anterior, el procedimiento fue el mismo. Mientras que el valor de corriente cambia, el sistema en este punto sigue operando a 12 V. El resultado se muestra a continuación.

$$I = \frac{1000 W}{12} * 1.25$$

$$I = 104.17 A$$

- Salida del inversor

Para el interruptor termomagnético la corriente resultó de 8.81 al aplicar el ajuste en la ecuación 12.

$$I = \frac{761 W}{127} * 1.25 \quad (12)$$

$$I = 8.81 A$$

El interruptor diferencial se recomienda para circuitos de bajo voltaje de una sensibilidad de 30 mA, y la corriente debe ser mayor a la del interruptor termomagnético para una coordinación adecuada.

En el Cuadro 4.8 se muestran los valores comerciales de las protecciones de acuerdo a la intensidad de corriente.

Cuadro 4.8 Selección de protecciones.

Sección	Dispositivo	Corriente/voltaje de diseño	Valor comercial (A)
Regulador - batería	Fusible	41.67 A	45 A
	Varistor	14.4 V	15 V
Batería - inversor	Fusible	104.17	110 A
	Varistor	14.4 V	15 V
Salida de inversor	Interruptor diferencial	8.81 A	20 A
	Interruptor termomagnético	8.81 A	15 A

4.5. Instalación y puesta en marcha

Para los conductores eléctricos, desde la salida de los aerogeneradores hasta el centro de carga, se realizó la canalización de los

mismos con tubo conduit de pared delgada $\frac{3}{4}$ y $\frac{1}{2}$, esto se muestra en la Figura 4.4. De esta forma se protegieron ante condiciones ambientales del área.

Los cables eléctricos de la salida del aerogenerador se condujeron a través del salón C3 para llegar al centro de carga, esto se presenta en la Figura 4.5.

En el centro de carga se conectó el conductor de cada aerogenerador a la protección eléctrica, que eran los interruptores termomagnéticos, de manera individual. Los 3 interruptores se colocaron en un gabinete mini Kaedra de tres módulos, tal como se muestra en la Figura 4.6. A la salida de los reguladores se colocó igualmente un gabinete mini, con el interruptor que correspondía a la sección de regulador - batería, para pasar así a la conexión en paralelo de las 7 baterías establecidas, lo cual se observa en la Figura 4.7.

Después de conectar el inversor nuevamente se tiene un interruptor termomagnético de 15A para el lado de corriente alterna. Y finalmente se hizo la instalación del conmutador al tablero de baja tensión.

Y al finalizar la instalación se pudo poner en marcha el sistema eólico para la obtención de datos.



Figura 4.4. Canalización (autoría propia).



Figura 4.5. Áreas que ocupó el conductor eléctrico de la salida del aerogenerador (autoría propia).



Figura 4.6. Instalación del conductor al regulador, con protecciones eléctricas a la entrada y salida del regulador (autoría propia).



Figura 4.7. Instalación de banco de baterías (autoría propia).

4.6. Diagrama unifilar

El diagrama unifilar de la Figura 4.8 muestra los elementos que componen la instalación eólica aislada, entre los que se incluye el esquema de protección. Cada componente muestra las capacidades a las que opera. Este diagrama tiene el propósito de ser una referencia para acciones de mantenimiento, modificaciones o para proyectos futuros.

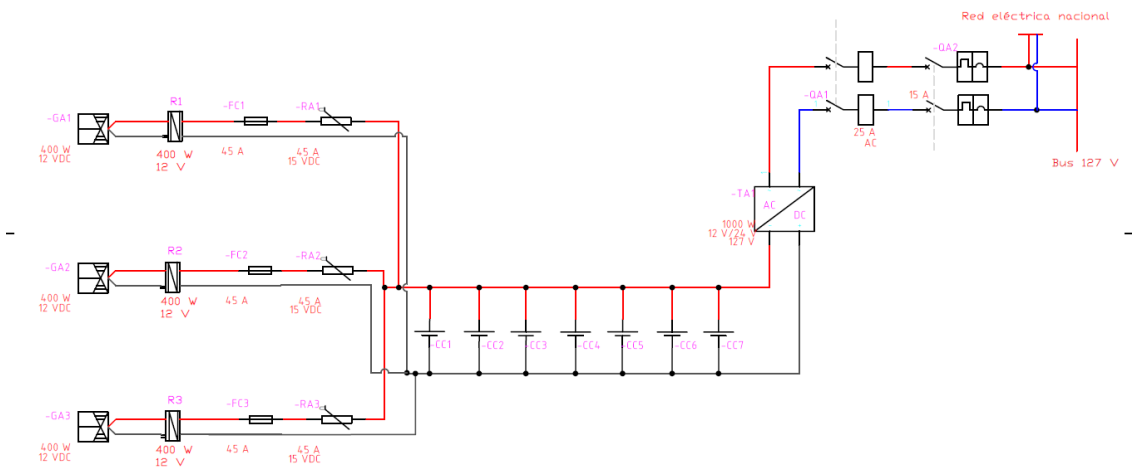


Figura 4.8. Diagrama unifilar (autoría propia).

4.7. Monitoreo de señales de voltaje y corriente

Las pruebas se hicieron a lo largo de 7 días durante 3 horas en la instalación eólica aislada del CATAS, estas pruebas se elaboraron para otra investigación, pero se tomaron como referencia para el trabajo actual. De esas pruebas se seleccionaron instantes donde se conectan las cargas, y se midió en la línea de suministro. Cumpliendo las pautas de punto de conexión y tiempo de medición establecidas por la especificación de CFE 10000-45. Los datos se guardaron y posteriormente se exportaron a MATLAB.

Enseguida se graficó la señal de voltaje e intensidad de corriente, que se muestran en la Figura 4.9. Después las señales fueron recortadas a partir de los 10 segundos. Esto se realizó, ya que el inicio de la señal pertenecía al momento de arranque del generador, y hasta después de establecerse en la velocidad mínima de 2.5 m/s giró únicamente por el empuje del viento. El offset de la señal de voltaje también se restó. En las gráficas se observa que a lo

largo del resto de la señal hubo generación de corriente, las demás muestras presentaron gráficas similares a la muestra actual.

En la Figura 4.10 se muestra un acercamiento de ambas señales, de voltaje e intensidad de corriente. En estas señales se visualizan incrementos de la señal que pueden considerarse swell, los cuales tienen su origen en la desconexión de las cargas y la electrónica de potencia perteneciente al inversor.

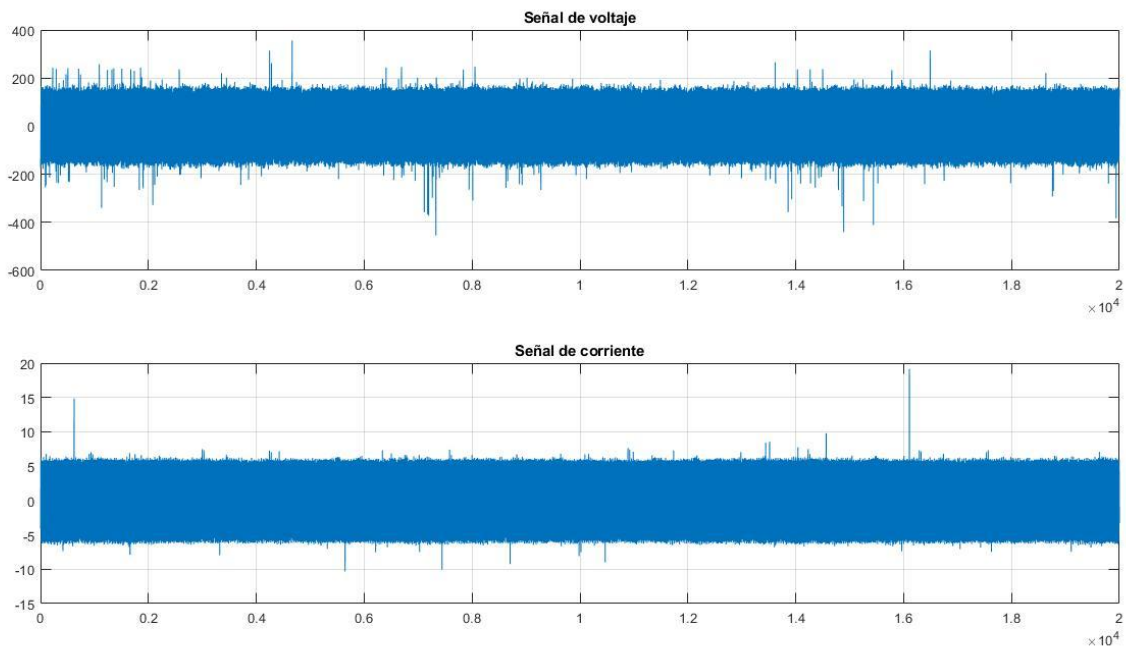


Figura 4.9. Señal de corriente y voltaje adquirida (autoría propia).

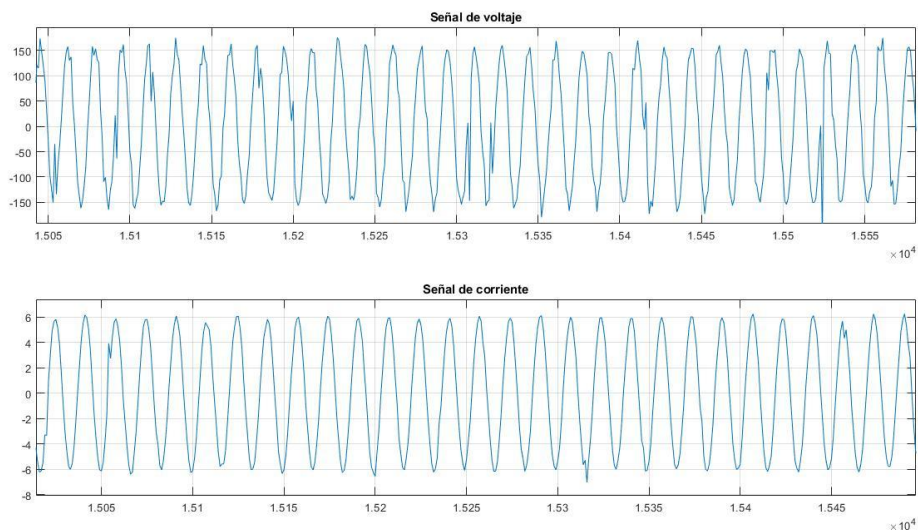


Figura 4.10. Acercamiento de la señal de corriente y voltaje adquirida (autoría propia).

En la señal de voltaje se puede ver incrementos de tensión que pueden considerarse swells debido a la desconexión de cargas y operaciones de conmutación debido al inversor.

4.7.1. Contenido armónico

Ya habiendo seleccionado los datos del instante de tiempo con las cargas conectadas, se realizó el análisis de THD con ventanas de 200 ms. a lo largo de la señal. De esto se obtuvo el promedio diario de la distorsión, el cual resultó en 5.6265 % para el voltaje y la distorsión armónica total en la corriente fue de 3.0006 %.

En la Tabla 2 de la especificación de CFE 10000-45, el porcentaje máximo para la distorsión armónica total para baja tensión en el punto de conexión se considera de 8%, por lo que se está dentro del margen normativo nacional y de igual forma se cumple con el límite fijado por la IEEE 519-2022. La distorsión armónica total también entra dentro de los límites establecidos por las mismas dependencias.

4.7.2. Análisis de potencia y factor de potencia

La evaluación de potencia se hizo para la misma muestra seleccionada anteriormente, con lo que se obtuvieron los resultados que se muestran en el Cuadro 4.9.

Respecto al factor de potencia primero se midió la diferencia en número de muestras cuando ambas señales, voltaje y corriente, cruzan por cero. Y en conjunto con la frecuencia de la señal y la frecuencia de muestreo se consiguió el ángulo de fase. De lo anterior se obtuvo el promedio y se calculó el coseno del ángulo. Esto dio como resultado un factor de potencia de 0.8973.

Cuadro 4.9 Potencias y factor de potencia.

<i>Potencia activa</i>	19.3864 W
<i>Potencia aparente</i>	492.0645 VA
<i>Potencia reactiva</i>	492.4462 VAR
<i>Factor de potencia</i>	0.8973

CONCLUSIONES

Los objetivos establecidos para el proyecto se cumplieron en su totalidad, puesto que se logró realizar el dimensionado y la instalación del sistema eólico aislado en el aula C1 del CATAS.

Y en base a cálculos de corriente y ampacidad, se seleccionaron los elementos del sistema autónomo adecuados para la instalación, incluyendo el esquema de protecciones. En este último se encontró como dificultad encontrar algunos elementos propuestos para la sobretensión en la línea de corriente continua, como varistores y supresor de picos, debido a que es un sistema de baja potencia. Finalmente, se optó por colocar interruptores termomagnéticos para protección de cortocircuitos y sobrecargas. Se contempla la integración de un dispositivo para sobretensión en proyectos futuros, como un supresor de transitorios o un arreglo fusible - varistor, para mejorar el esquema de protección del sistema eólico.

Por otra parte, a través del análisis establecido para calcular el recurso energético del viento, se obtuvo una velocidad media promediada por hora. De lo que resultó en una velocidad media que está por encima de la velocidad de arranque de las turbinas. Además, a través de este análisis se logró determinar que al año la probabilidad de quedarse sin abastecimiento de energía proveniente de los aerogeneradores equivale a dos días a lo largo de todo el año. Por lo que en los cálculos para el banco de baterías se hizo conveniente poner dos días de autonomía para la instalación. Con esto también se justificó el emplear los 3 aerogeneradores instalados en el CATAS para satisfacer la demanda de energía.

La cotización de los elementos se realizó con diferentes proveedores, las opciones más adecuadas dieron como resultado un presupuesto de \$99999.

La instalación, conexión y puesta en marcha de la instalación permitió la adquisición de las señales de corriente y armónicos,

Durante el análisis de calidad de la energía, se encontraron aumentos de tensión (swells). Y aunque este parámetro no se analizó en este proyecto, el contemplarlo para futuros trabajos de investigación ayudaría a brindar un mejor rendimiento de la instalación.

También a través de este procesamiento se obtuvo una distorsión armónica total de 5.6265% para la señal de voltaje. Por otro lado, la distorsión armónica total de la corriente fue de 3.0006%. Ambos porcentajes cumplen con la especificación de CFE y la IEEE 519-2022 para circuitos de baja tensión. Estos armónicos están presentes por las cargas no lineales que se encuentran conectadas al sistema, como son el equipo de cómputo, el proyector y el elemento del inversor.

El factor de potencia es la razón entre la potencia activa y la potencia aparente, por lo tanto, es un indicador de optimización de energía. De acuerdo a la especificación de la Comisión Federal de Electricidad, el factor de potencia debe de estar por arriba de 0.90. En este caso, el procesamiento de las señales dio como resultado un factor de potencia de 0.8973, lo que está por debajo del límite establecido y sugiere que la eficiencia de la potencia consumida no es la adecuada. Y aunque los niveles de armónicos están dentro de norma, el mejorar el THDv ayudaría a mejorar el factor de potencia.

Un factor de potencia dentro del rango establecido tiene como consecuencia una eficiencia en el consumo de energía, lo que permite un ahorro de energía. Este último aspecto no solo impacta en el aspecto económico, también repercute en lograr y mantener un equilibrio ecológico.

En general, se puede concluir que el abastecimiento proporcionado por el sistema autónomo permite alimentar las cargas presentes en el aula C1. Y la instalación es posible utilizarla como laboratorio de energías renovables.

LITERATURA CITADA

- Agelin, M. 2018.1.11 Fluid Mechanics Aspects of Energy. pp: 478-520. In: Ibrahim Dincer (Ed.). Comprehensive Energy Systems. Vol. I. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00110-3>
- Bilbao, J., B. Bravo, O. Garcia, C. Rebollar and C. Varela. 2020. Designing and projecting a wind generator based on the emplacement: power coefficient. IJTPE. 12(4): 91.
- Canché, L. G.2020. Estudio de los fenómenos climáticos y su influencia sobre la producción de potencia de una granja eólica para la región de Arriaga, Chiapas. Tesis, Maestría en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Morelos, México.
- Chavez, E., A. Chávez, J. Jauregui, M. Trejo, R. Carrillo, and J. Ríos. 2020. Pitch Control for Anticipation in the Measurement of Wind Speed for Small Wind Turbines Installed in Areas With Atypical Winds. ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. September 22, 2020. International Gas Turbine Institute. Houston, Texas.
- Clemente, R. 2019. Diseño de una instalación con energía solar fotovoltaica y energía eólica, aislada de la red eléctrica. Trabajo de fin de grado, Grado en Ingeniería Eléctrica. Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño. Valencia, España.
- Cruz, C. G. 2012. Diseño e implementación de sistema de red eléctrico para casas de interés social utilizando energías renovables. Tesis. Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería. Querétaro, México.
- Díaz, B. F. 2019. Dimensionamiento de un sistema eléctrico con energía solar y eólico para electrificar el caserío Chochor en el distrito de Morrope Departamento de Lambayeque. Tesis, Ingeniero Mecánico Electricista. Universidad Nacional "Pedro Ruiz Gallo", Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Lambayeque, Perú.

- Elvira, D., D. Moringo, O. Duque, A. Jaén, R. Osornio and R. Romero. 2018. Methodology for Flicker Estimation and Its Correlation to Environmental Factors in Photovoltaic Generation. IEEE Access. 6: 24035-24047. [https://doi: 10.1109 / ACCESS.2018.2829148](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2829148).
- Especificación CFE L0000-45. 2007. Desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica. México.
- Fernández, J. M. 2004. Estudio e implementación de un convertidor multicelda apilable controlado por DSP. Tesis, Maestría en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Electrónica. Universidad de las Américas, Escuela de Ingeniería. Puebla, México.
- Folkecenter. 2016. Catalogue of small wind turbines. Disponible en: <https://www.folkecenter.eu/PDF/Wind/353.Catalogue-of-small-wind-turbines-8th-edition.pdf>. [Consulta: 17 de marzo de 2021].
- Google Earth. Edificio CATAS [Mapa online]. Recuperado de <<https://earth.google.com>>. [Consulta: 15 de marzo de 2021].
- IEC 60755. 2017. General safety requirements for residual current operated protective devices.
- IEC 61000-4-30. 2015. Testing and measurement techniques: Power Quality measurement methods.
- IEEE Std. 1159-2019. 2019. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
- IEEE 519-2022. 2022. IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems.
- Jaramillo, O. 2011. Diseño e implementación de sistemas híbridos combinados (avances tecnológicos y regulación). Curso CAPEV 1 2011. OLADE. México.
- Kumar, M., R. Ranjan, B. D., and S. Rakesh. 2017. Enhancement of power quality of Grid connected wind energy system using STATCOM.

International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET). March 21-22, 2012. Nagercoil, India. IEEE.

Mur, J. 2008. Curso de energía eólica. Máster europeo en energías renovables y eficiencia energética.[en línea], Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Zaragoza,[Consultado: 19 de mayo de 2012], Disponible en: [www. windygrid.org/manualEolico.pdf](http://www.windygrid.org/manualEolico.pdf).

NOM-001-SEDE-2012. 2012. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones Eléctricas (utilización). Diario Oficial de la Federación, Secretaría de Energía.

Ramírez, S. 2003. Conceptos generales. Protección de sistemas eléctricos. p 65-66. Universidad Nacional de Colombia Manizales, Colombia.

Palacios, P. 2019. Diseño de un sistema eólico para suministrar energía eléctrica al fundo Chucupe-Lambayeque. Tesis, Ingeniero Mecánico Electricista. Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica. Chiclayo, Perú.

Sáenz, S. 2013. Generación eólica. En: Modelos Agregados de Parques Eólicos. p 53 Universidad de Sevilla, España.

Salonen, P., P. Nuutinen, P. Peltoniemi and J. Partanen. 2009. Protection scheme for an LVDC distribution system. 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - Part 1. June 8-11, 2009. Prague, Czech Republic. IET.

Sánchez, D. 2019. Dimensionamiento, Selección de un Sistema Híbrido aislado para Electrificar el Caserío Pampa de Chaparri Provincia de Chiclayo. Tesis, Ingeniero Mecánico Electricista. Universidad Nacional "Pedro Ruiz Gallo", Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Lambayeque, Perú.

Sánchez, D. G. 2019. Propuesta de generación de energía eléctrica por medio de un sistema eólico en la comunidad de Santa María del Mar, Juchitán Oaxaca. Tesis, Ingeniero Eléctrico Electrónico. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. México.

- San Román, A.L. 2012. Diseño de un aerogenerador para uso particular. Trabajo Fin de grado, Ingeniero mecánico. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica. Madrid, España.
- Sansó, A. 2018. Energía eólica como fuente eléctrica de una casa aislada. Trabajo de final de grado, Ingeniería de sistemas biológicos. Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Superior de Agricultura de Barcelona. Barcelona, España.
- Serrano, P. J. 2018. Implementación, estudio experimental y puesta a punto de un aerogenerador para aplicaciones de generación distribuida. Universidad de Jaén. Jaén, España.
- Venkateswarlu, R. S. 2020. Solar PV power: Design, manufacturing and applications from sand to system. Academic Press. USA.