



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICO PARA AUTONOMÍA ENERGÉTICA
DE UN SITIO DE CELDA PARA TELEFONÍA CELULAR EN ALDEA SAMORORO, JALAPA**

Irvin Vinicio Meza Arrecis

Asesorado por el Ing. Gerardo de Jesús Paredes Navarrete

Guatemala, marzo de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICO PARA AUTONOMÍA ENERGÉTICA
DE UN SITIO DE CELDA PARA TELEFONIA CELULAR EN ALDEA SAMORORO, JALAPA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

IRVIN VINICIO MEZA ARRECIS

ASESORADO POR EL ING. GERARDO DE JESÚS PAREDES NAVARRETE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MARZO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Núñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Fernando Waldemar de León Contreras
EXAMINADOR	Ing. Carlos Fernando Rodas
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier González López
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICO PARA AUTONOMÍA ENERGÉTICA DE UN SITIO DE CELDA PARA TELEFONÍA CELULAR EN ALDEA SAMORORO, JALAPA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 14 de julio de 2014.



Irvin Vinicio Meza Arrecis

Guatemala 05 de octubre de 2016

Ing. Otto Fernando Andrino González
Coordinador del Área de C.C. Básicas y Electrotecnia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Andrino:

Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titulado: **"DISEÑO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICO PARA AUTONOMÍA ENERGÉTICA DE UN SITIO DE CELDA PARA TELEFONÍA CELULAR EN ALDEA SAMORORO, JALAPA"** elaborado por Irvin Vinicio Meza Arrecis, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

Por tanto, el autor de este trabajo de graduación y mi persona, somos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente,



Ing. Gerardo Paredes
Colegiado 1988
Asesor

GERARDO DE JESÚS PAREDES NAVARRETE
INGENIERO ELECTRICISTA
Colegiado No. 1,988



REF. EIME 03. 2017.
Guatemala, 24 de NOVIEMBRE 2016.

Señor Director
Ing. Francisco Javier González López
Director Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
DISEÑO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICO PARA
AUTONOMÍA ENERGÉTICA DE UN SITIO DE CELDA PARA
TELEFONÍA CELULAR EN ALDEA SAMORORO, JALAPA
del estudiante Irvin Vinicio Meza Arrecis, que cumple con los
requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Otto Fernando Andrino González
Coordinador Área Electrotécnica



SFO



REF. EIME 03. 2017.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; IRVIN VINICIO MEZA ARRECIS Titulado: DISEÑO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICO PARA AUTONOMÍA ENERGÉTICA DE UN SITIO DE CELDA PARA TELEFONÍA CELULAR EN ALDEA SAMORORO, JALAPA, procede a la autorización del mismo.

Ing. Francisco Javier González López



GUATEMALA, 17 DE ENERO 2017.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 114.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICO PARA AUTONOMÍA ENERGÉTICA DE UN SITIO DE CELDA PARA TELEFONÍA CELULAR EN ALDEA SAMORORO, JALAPA**, presentado por el estudiante universitario: **Irvin Vinicio Meza Arrecis**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, marzo de 2017



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Al creador	Por concederme la vida.
La memoria de mi padre	Axel Antonio Meza Callejas, que en paz descansa, y que en vida me enseñó muchas cosas que me ayudan a ser un hombre de bien.
Mi madre	Imelda Arrecis, que con su apoyo incondicional, su amor, comprensión y deseo de superación me ha dado un ejemplo de vida, contribuyendo a alcanzar esta meta.
Mi esposa	Rosangela Mazariegos, por su amor, apoyo incondicional, ejemplo de dedicación y gran motivación para alcanzar este triunfo.
Hijos	Adrián y Javier, a quienes esperé con amor y son la nueva motivación en mi vida.
Hermanos	Axel Omar e Ivan Meza, por su apoyo y por estar siempre ahí cuando los he necesitado.
Familia	Por el cariño y apoyo que me brindan en la vida.
Amigos	Por su apoyo y amistad sincera.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios, una importante influencia en mi carrera profesional.
Facultad de Ingeniería	Por los conocimientos compartidos a lo largo de la carrera, influyendo en mí para buscar el éxito.
Ing. Gerardo Paredes	Por su apoyo, motivación constante y por su importante asesoría en el desarrollo de este trabajo.
Ing. Fernando Méndez	Por su apoyo y motivación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. DESCRIPCIÓN Y CONSUMO ENERGÉTICO DE UN SITIO DE CELDA	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Descripción de un sitio de celda	3
1.3. Sistema RF.....	3
1.3.1. Radio base BTS.....	4
1.3.2. Descripción del funcionamiento básico.....	5
1.3.3. Manejo de la movilidad de una estación móvil.....	7
1.4. Sistema de transmisión de datos.....	9
1.4.1. LAN <i>switch</i>	10
1.4.1.1. Switch Cisco ME-3600X-24FS-M	10
1.4.2. Radio enlace.....	11
1.4.2.1. Radio enlace NEC IP200.....	11
1.4.3. Dispositivo de acceso ethernet ETX-201H	12
1.5. Sistema de energía	12
1.5.1. Acometida eléctrica	12
1.5.2. Tablero de energía	15
1.5.3. <i>Breakers</i>	15

1.5.4.	Rectificadores.....	16
1.5.5.	Banco de baterías	16
1.5.5.1.	Baterías tipo GEL	17
1.5.5.2.	Baterías tipo AGM	17
1.5.6.	Motogenerador	18
1.6.	Sistema de puesta a tierra	19
1.6.1.	Pararrayos.....	20
1.6.2.	Electrodos	21
1.7.	Esquema propuesto de generación eólica	22
1.8.	Demanda eléctrica de un sitio de celda.....	23
2.	ESTUDIO PARA GENERACIÓN EÓLICA Y TIPOS DE GENERADORES	27
2.1.	Energía eólica	27
2.2.	Generadores eléctricos	28
2.2.1.	Generador síncrono	28
2.2.2.	Generador asíncrono	29
2.2.3.	Generador sincrónico multipolar de imán permanente	29
2.3.	Aerogenerador	31
2.3.1.	Aerogenerador de eje horizontal	33
2.3.2.	Aerogenerador de eje vertical	33
2.3.3.	Tipos de turbinas.....	34
2.4.	Velocidad del viento en Guatemala.....	36
2.4.1.	Velocidad promedio anual	36
2.4.2.	Torres de medición de variables eólicas	37
2.4.3.	Anemómetro.....	38
2.4.3.1.	Anemómetro de rotación	38
2.4.4.	Clasificación del viento.....	39

	2.4.4.1.	Escala de Beaufort	39
	2.4.4.2.	Ley de Betz.....	40
	2.4.5.	Tipos de torres de telefonía móvil.....	40
	2.4.5.1.	Torre autosoportada	41
	2.4.5.2.	Torre arriestrada.....	42
	2.4.5.3.	Torre tipo monopolo.....	43
3.	DISEÑO DE SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICO EN ALDEA SAMORORO		45
3.1.	Demanda de sitio de celda en región aldea Samororo.....		46
3.2.	Consumo de sitio de celda en región aldea Samororo		46
3.3.	Potencial de densidad de energía eólica en Guatemala		48
	3.3.1.	Regiones de mayor aprovechamiento del viento	50
3.4.	Estudio para generación eólica en aldea Samororo, departamento de Jalapa		51
	3.4.1.	Mediciones del viento en aldea Samororo.....	51
	3.4.2.	Distribución de Weibull	52
	3.4.3.	Condiciones climáticas	53
	3.4.4.	Cálculo del potencial eólico de aldea Samororo, Jalapa	53
3.5.	Modelo con aerogenerador de eje horizontal		56
	3.5.1.	Generador de imán permanente DC.....	62
	3.5.2.	Capacidad de banco de baterías	63
	3.5.3.	Regulador eólico y control de carga de baterías.....	67
	3.5.4.	Protección contra descargas atmosféricas	68
3.6.	Infraestructura requerida		68
	3.6.1.	Torre de aerogenerador.....	68
	3.6.1.1.	Torre tipo celosía	69
	3.6.1.2.	Torre tipo atirantada	69

3.6.1.3.	Torre tipo tubular	70
3.6.2.	Terreno de celda	71
3.6.2.1.	Caseta de equipos Indoor	71
3.7.	Montaje de equipos	72
3.7.1.	Conductores por utilizar.....	74
3.7.2.	Protección de equipos DC.....	77
3.8.	Sistema de energía eólico autónomo	80
4.	BENEFICIOS DE IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA	87
4.1.	Beneficios ambientales	87
4.2.	Beneficios económicos.....	88
4.2.1.	Ahorro de energía eléctrica comercial	90
4.2.2.	Reducción de gastos de operación y mantenimiento.....	91
4.2.3.	Ahorro por operación de banco de baterías	92
4.2.4.	Ahorro en consumo de diésel para generación	92
4.3.	Evaluación económica	94
	CONCLUSIONES.....	99
	RECOMENDACIONES	103
	BIBLIOGRAFÍA.....	105

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Sitio de celda Vodafone en España	2
2.	Sistema radiante	4
3.	Topología de una red de telefonía celular	6
4.	Topología y movilidad de una MS en la red	8
5.	Topología de transmisión de un sitio de celda	9
6.	Medición en baja tensión 120/240 VAC	13
7.	Especificaciones de accesorios para acometida aérea residencial.....	14
8.	Sistema de transferencia automático del motogenerador	18
9.	Sistema de tierra de un sitio de celda	20
10.	Pararrayos modelo INGESCO PDC 3.1 a nivel I, II y III	21
11.	Registro de tierra con varilla de <i>cooperweld</i>	22
12.	Esquema de sistema de generación eólico para un sitio de celda	23
13.	Generador síncrono de imán permanente.....	30
14.	Partes de un aerogenerador	32
15.	Tipos de turbinas para aerogeneradores	35
16.	Velocidad promedio del viento en Guatemala.....	36
17.	Torre de medición de viento.....	37
18.	Esquema anemómetro de rotación	38
19.	Torre auto soportada.....	41
20.	Torre arriostrada	42
21.	Torre tipo monopolo	43
22.	Diagrama de flujo diseño de sistema eólico	45
23.	Mapa de potencial eólico en Guatemala	49

24.	Ubicación de la aldea Samororo	50
25.	Gráfica de velocidad del viento de la aldea Samororo	52
26.	Curvas de rendimiento Enair 30.....	58
27.	Curvas de rendimiento Enair 70.....	59
28.	Curvas de rendimiento Enair 160.....	60
29.	Banco de baterías 48V 3 000AH.....	66
30.	Ubicación de torre de aerogenerador	69
31.	Tipos de torres para aerogenerador	70
32.	Montaje de equipos en sitio de celda.....	73
33.	Tablero de distribución.....	79
34.	Sistema de energía eólico para una celda de telecomunicaciones.....	84
35.	Costo de energía eléctrica comercial mensual	90

TABLAS

I.	Especificaciones técnicas BTS Huawei DBS3900	5
II.	Especificaciones técnicas Cisco ME-3600X-24FS-M	10
III.	Especificaciones técnicas iPASOLINK 200	11
IV.	Especificaciones técnicas ETX-201H	12
V.	Demanda eléctrica de una celda tipo rural.....	24
VI.	Demanda eléctrica de una celda tipo nodo básico	24
VII.	Ventajas y desventajas de los aerogeneradores	35
VIII.	Escala de Beaufort.....	39
IX.	Consumo de energía de sitio de celda nodo básico	47
X.	Velocidad promedio del viento en aldea Samororo.....	51
XI.	Características de aerogeneradores Enair	56
XII.	Generación Enair a velocidad 6,33 metros/segundo	61
XIII.	Baterías <i>U-power</i>	64
XIV.	Cálculo de CT y determinación del calibre del conductor	75

XV.	Propiedades básicas de los conductores de hilos de cobre.....	76
XVI.	Ampacidad permitida para conductores aislados.....	77
XVII.	Capacidades de interruptores para DC.....	78
XVIII.	Cálculo de <i>breakers</i> DC.....	79
XIX.	Déficit energético eólico.....	81
XX.	Generación anual total.....	83
XXI.	Aporte de generación del sistema.....	85
XXII.	Generación eólica frente a generación comercial.....	96
XXIII.	Generación eólica frente a generación grupo electrógeno.....	97

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ρ	Densidad del aire
SO_2	Dióxido de azufre
CO_2	Dióxido de carbono
$^{\circ}\text{C}$	Grados centígrados
Kg	Kilogramo
Kg/m³	Kilogramos por metro cúbico
kW	Kilovatio
kWh/d	Kilovatio hora día
kWh	Kilovatio por hora
kWh/año	Kilovatios por hora año
L/hr	Litro por hora
m	Metro
m²	Metros cuadrados
m/s	Metros por segundo
mm	Milímetro
Nm	Newton metro
Ohm/km	Ohmios por kilómetro
N_xO_y	Óxido de nitrógeno

GLOSARIO

2G	Segunda generación de telefonía móvil.
3G	Tercera generación de telefonía móvil.
AC	Corriente alterna.
Acometida	Derivación desde la red de distribución de la empresa suministradora del servicio eléctrico hacia la edificación o propiedad donde se hará uso de la energía eléctrica.
AGM	<i>Absortion Glass Mat</i> , absorción por fibra de vidrio.
AH	Amperio hora.
Alfa	Denominación de sector de área 1, de cobertura de una celda.
Ampacidad	Máxima intensidad de corriente que puede circular de manera continua por un conductor eléctrico sin que este sufra daños.
Amperio	Unidad de medida de la corriente eléctrica.

Autonomía	Capacidad de operación constante con energía propia generada y almacenada.
AWG	<i>American Wire Gauge</i> , es una referencia de clasificación de diámetros para conductores.
<i>Backhaul</i>	Porción de una red jerárquica que comprende los enlaces intermedios entre el núcleo o <i>backbone</i> , y las subredes en sus bordes.
<i>Base Transceiver Station</i>	Estaciones base transceptoras, que procesan, envían y reciben información en una celda.
Beta	Denominación de sector de área 2 de cobertura de una celda.
<i>Breaker</i>	Disyuntor eléctrico.
BSC	<i>Base Station Controller</i> , controlador de estaciones base.
BTS	Equipo que cubre el radio de cobertura de una celda.
<i>Cadweld</i>	Tipo de soldadura para conductores de cobre.
Celda	Radio de cobertura del área geográfica de un sitio.
Cisco	Empresa proveedora de equipos y servicios.

CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
Corriente	Flujo de carga eléctrica por unidad de tiempo que recorre un material.
DC	Corriente directa.
Demanda energética	Energía necesaria para mantener en operación los equipos electrónicos de un sitio de celda.
DOD	<i>Depth of Discharge</i> , profundidad de descarga de una batería.
EEM	Empresa Eléctrica Municipal.
Energía eléctrica	Diferencia de potencial entre dos puntos, originando una corriente eléctrica entre sí cuando se los pone en contacto por medio de un conductor eléctrico.
Fci	Flujo de caja del período de tiempo <i>i</i> .
Gamma	Denominación de sector de área 3 de cobertura de una celda.
Gbps	Giga bit por segundo, velocidad de transmisión de datos.
Grupo electrógeno	Máquina que mueve un generador eléctrico a través de un motor de combustión interna.

GSM	<i>Global System for Mobile communications</i> , sistema global para comunicaciones móviles.
HLR	<i>Home Location Register</i> , registro de ubicación inicial, donde se registra la nueva ubicación del usuario.
Huawei	Empresa proveedora de equipos y servicios.
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> , Comisión Electrotécnica Internacional es una organización de normalización en los campos: eléctrico, electrónico y tecnologías relacionadas.
Indoor	Interior de una edificación.
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
IP	<i>Internet Protocol</i> , protocolo de capa de red del modelo OSI.
LAN	<i>Local Area Network</i> , red de computadoras que abarca un área reducida a una casa, un departamento o un edificio.
MEM	Ministerio de Energía y Minas.
MG	Motogenerador.

MS	<i>Mobile Station</i> , estación móvil, es la terminal móvil o teléfono celular.
MSC	<i>Mobile Switching Center</i> . Centro de conmutación de llamadas de una red de telefonía móvil GSM/UMTS.
msnm	Metros sobre el nivel del mar.
<i>National Electrical Code</i>	Estándar estadounidense para la instalación segura de alumbrado y equipos eléctricos.
NEC	Empresa proveedora de equipos y servicios.
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i> , Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos.
Ohmio	Unidad derivada de resistencia eléctrica en el sistema internacional de unidades.
<i>Outdoor</i>	Exterior de una edificación.
<i>Patch cord</i>	Cable para interconectar equipos o dispositivos electrónicos entre sí.
Potencia	Relación de paso de energía de un flujo por unidad de tiempo; es decir, la cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento en un momento determinado.

PSTN	<i>Public Switched Telephone Network</i> , red pública conmutada, es la sección terrestre de la red, aquí es en donde se encuentra la telefonía fija y los demás operadores de telefonía móvil.
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i> , algoritmo de carga de baterías.
RF	Radio frecuencia.
Socket	Base para montaje.
Switch	Equipo que se utiliza frecuentemente para concentrar servicios <i>ethernet</i> con conexión a cobre y a diferentes velocidades.
TDM	<i>Time Division Multiple Access</i> , es una técnica que permite la transmisión de señales digitales y cuya idea consiste en ocupar un canal de transmisión a partir de distintas fuentes, de esta manera se logra un mejor aprovechamiento del medio de transmisión.
THHN	<i>Thermoplastic High Heat Nylon</i> , cable para construcción, con aislamiento de PVC y cubierta de nailon.
TIR	Tasa interna de retorno.
TM	Tanque mensual de diésel.

Topología	Mapa físico o lógico de una red para intercambiar datos.
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i> , sistema universal de telecomunicaciones móviles.
UTP	<i>Unshielded twisted pair</i> , tipo de cableado utilizado principalmente para comunicaciones.
VAC	Voltaje de corriente alterna.
VAN	Valor actual neto, es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión.
VDC	Voltaje de corriente directa.
VLR	<i>Visiting Location Register</i> , registro de ubicación de visitas, donde se registra la ubicación de cada usuario.
Vatio	Unidad de medida de la potencia eléctrica.
Voltaje	Potencial eléctrico, expresado en voltios.

RESUMEN

Las fuentes de generación de energía renovable son cada vez más utilizadas debido a que son sustentables y favorecen la economía y el medio ambiente, ya que son limpias y no emiten dióxido de carbono. La energía eólica es uno de estos tipos de energías, es por ello que en este estudio se enfatiza el aprovechamiento del viento como recurso para la generación de electricidad.

La industria de las telecomunicaciones ha crecido considerablemente, con cobertura en regiones remotas en las cuales se construyen sitios de celda para brindar servicios de telefonía e internet móvil, entre otros. Pero es posible que no exista suministro de energía eléctrica de tipo comercial en estos lugares, es por ello que el operador de telefonía móvil activa sus sitios con suministro eléctrico generado de forma propia a través de un grupo electrógeno, lo cual implica altos costos de operación por el gasto mensual de diésel.

En este estudio se analiza el consumo energético de un sitio de celda, basado en su equipamiento y sus consumos máximos, así como también el potencial de generación eólico en Guatemala, específicamente en la región de aldea Samororo, municipio de Mataquescuintla, Jalapa, para ver la factibilidad de que las condiciones geográficas y naturales de este lugar, combinadas con un aerogenerador, puedan ser lo suficientemente aptas para generar la energía eléctrica que demanda un sitio de celda en esa ubicación.

Finalmente, se hace una evaluación económica al diseño de generación eólica propuesto, para ver la rentabilidad de un proyecto de esta magnitud que pudiese ser aplicado por un operador de telefonía móvil.

OBJETIVOS

General

Diseñar un sistema de generación de energía eléctrica eólica como propuesta en la autonomía energética de un sitio de celda para telefonía celular en aldea Samororo, municipio de Mataquescuintla del departamento de Jalapa.

Específicos

1. Describir los elementos que conforman un sitio de celda de telefonía celular, su demanda energética y su funcionamiento.
2. Realizar un estudio para generación de energía eléctrica eólica en aldea Samororo, basado en características geográficas y tipos de aerogeneradores disponibles en el mercado.
3. Diseñar un sistema de generación eólico para suministrar energía eléctrica a los equipos de un sitio de celda ubicado en aldea Samororo.
4. Enumerar los beneficios que conlleva la implementación de energía eólica en un sitio de celda de telefonía celular.

INTRODUCCIÓN

Los proyectos de generación eléctrica a través de energías renovables están en constante desarrollo y crecimiento en Guatemala, al igual que el crecimiento de las redes de telefonía móvil. Es por ello que en este estudio se analiza el potencial de generación eólico en la región de la aldea Samororo, Jalapa, para su aprovechamiento como fuente de energía en un sitio de celda. El estudio está desarrollado dentro de un marco teórico para su análisis.

Se propone el diseño de un sistema de generación eólico para la autonomía energética de un sitio de celda de telefonía celular en una región rural o aislada, donde no se dispone del servicio de energía eléctrica comercial y donde únicamente se genera la energía demandada a través de un grupo electrógeno propio. Es por ello que se analizará la conveniencia de utilizar energía eólica generada con recurso propio frente a la generación por medio de la combustión de diésel o por suministro comercial de la generación municipal.

La energía eléctrica generada por aerogeneradores en aldea Samororo es suficiente para suministrar electricidad a los equipos electrónicos de un sitio de celda, por lo que un sistema en donde se integren también bancos de baterías debe soportar sin problema la demanda de la carga instalada. De esta forma es posible minimizar al máximo la necesidad de generar por medio de motogeneradores, siendo factible la instalación de un sistema de generación eólico y obteniendo un beneficio económico.

1. DESCRIPCIÓN Y CONSUMO ENERGÉTICO DE UN SITIO DE CELDA

Un sitio de celda de telefonía celular consta, básicamente, de una radio base receptora que envía y recibe señales de radio frecuencia desde un sistema radiante hacia terminales personales conocidas como teléfonos celulares.

La transmisión de datos se logra por la interacción de diferentes tipos de equipos de transmisión y sistemas asociados, los cuales consumen cierta cantidad de energía eléctrica que debe ser suministrada de forma comercial o por generación local.

1.1. Antecedentes

La necesidad de las empresas de telecomunicaciones por ampliar la cobertura, implica la instalación de antenas de emisión en áreas remotas, en las cuales el suministro de energía eléctrica comercial no está siempre presente, por lo que es necesario implementar sistemas de generación de energía eléctrica aislada, siendo ahora ya utilizadas las renovables, tal es el caso de la energía eólica.

“En España se han implementado sistemas de generación eólica en sitios de celda de la operadora de telefonía móvil Vodafone, situados en las regiones de Granada, Murcia y Córdoba”¹, entre otras.

¹ ENAIR ENERGY S.L. *Sistema para telecomunicaciones*. p. 5.

Las condiciones climáticas en estas regiones favorecen la velocidad del viento, que combinada con el equipamiento de aerogeneradores y bancos de baterías correctamente dimensionados, alcanzan a cubrir hasta el 100 % del requerimiento energético de la celda.

Estos sistemas eólicos aprovechan los recursos naturales renovables de los lugares donde son implementados, reduciendo también los costos operativos como combustibles usados para generación.

Figura 1. **Sitio de celda Vodafone en España**



Fuente: Enair. Sistemas para Telecomunicaciones. Consulta: noviembre 2016.

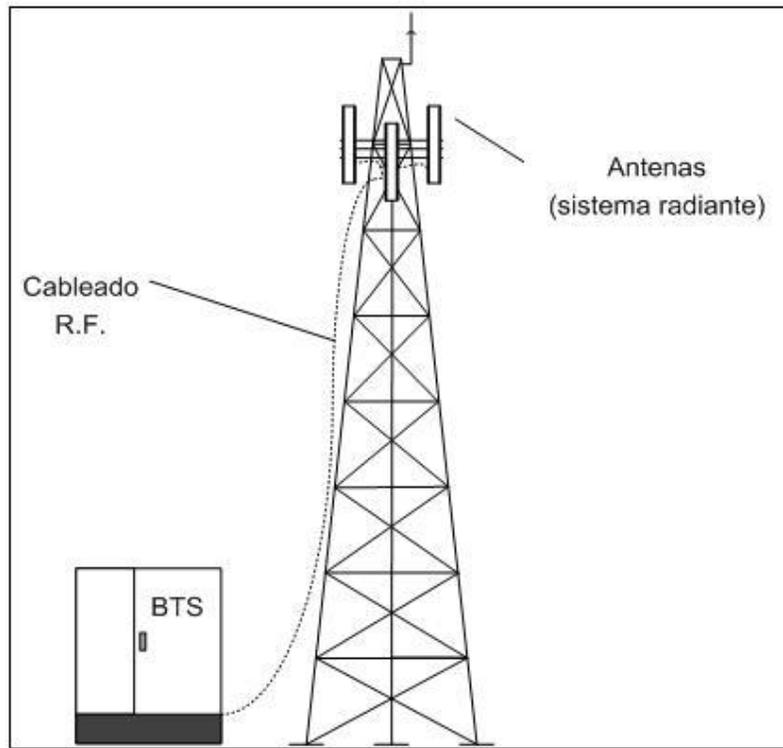
1.2. Descripción de un sitio de celda

Básicamente, los sitios de celda se componen de un sistema de RF (radio frecuencia) compuesto por una radio base que brinda servicios de voz en 2G y 3G, internet y demás servicios. Dicha radio base necesita de un sistema de transmisión de datos para tener comunicación con las centrales de telefonía. Ambos sistemas necesitan del sistema de energía para funcionar, el cual debe suministrar -48VDC al equipamiento instalado en sitio para cubrir la demanda instalada. También debe haber un sistema de puesta a tierra para garantizar la integridad física del equipamiento y seguridad del personal de mantenimiento.

1.3. Sistema RF

Este sistema está conformado por las antenas que radian la señal hacia los móviles y cada uno de estos es un teléfono celular. El sistema radiante generalmente se divide en tres sectores; alfa, beta y gamma, que son las áreas de cobertura de una celda. Las antenas están montadas sobre una torre o mástil. Estas antenas se conectan a través de cableado coaxial hacia la BTS (*Base Transceiver Station* / estación base transceptora), que no es más que la unidad básica de transmisión y recepción de un sitio de celda. Ver figura 2.

Figura 2. **Sistema radiante**



Fuente: elaboración propia.

1.3.1. **Radio base BTS**

Es el equipo físico que cubre el radio de cobertura del área geográfica conocida como celda. Cuenta con equipos (tarjetas) de transmisión y recepción de baja potencia en varias frecuencias o canales, restringiendo su cobertura a la misma área. Como base se utilizará una BTS marca Huawei y modelo DBS3900, en configuración GSM 3x4 + UMTS 3x2, usualmente utilizada en área urbana pero, por demandar mayor consumo de potencia, se empleará para calcular el requerimiento energético de un sitio de área rural.

Tabla I. **Especificaciones técnicas BTS Huawei DBS3900**

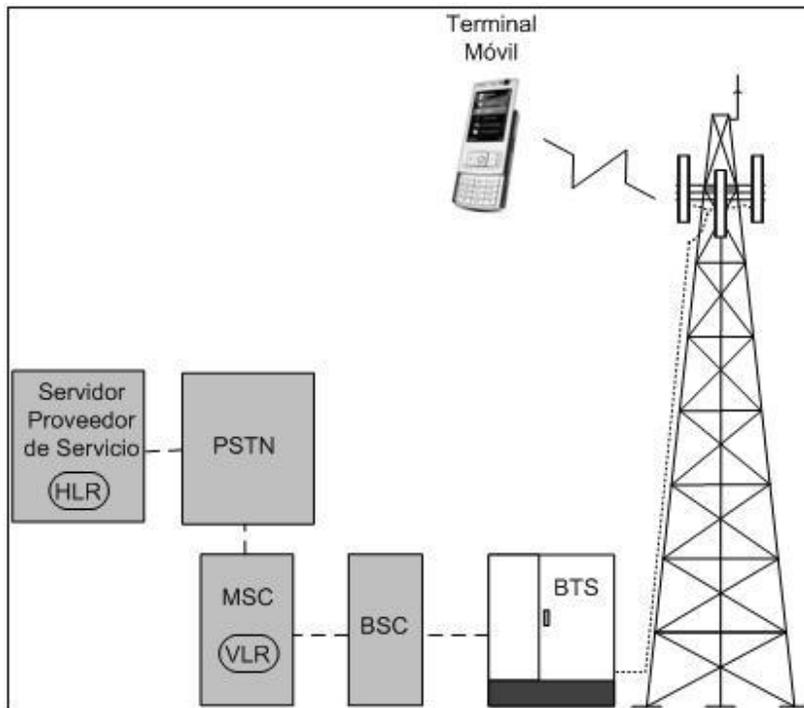
EQUIPO	DIMENSIONES (H x W x D)	IN POWER	TIPO	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia Max. (W)	Temperatura operación °C
DBS3900	Depende del gabinete	2	DC	-48	22	1 050 – 1 100	-20 to +45 °C

Fuente: SRAN N3.0 Series Multi-Mode Base Station.

1.3.2. Descripción del funcionamiento básico

Un sitio de celda funciona de la siguiente manera: la terminal móvil se comunica por medio de radio frecuencia hacia el sistema radiante de la celda más próxima, una vez que la celda tiene contacto con el móvil, la BTS recibe y transfiere la información de voz o datos hacia el controlador de estaciones base (BSC), por sus siglas en inglés *Base Station Controller*. El BSC se encarga de controlar la comunicación entre las BTS que tenga asociadas a él y un centro conmutador móvil (MSC), por sus siglas en inglés *Mobile Switching Center*. Ver figura 3.

Figura 3. **Topología de una red de telefonía celular**



Fuente: elaboración propia.

La función del MSC es comunicar a los BSC que tiene asociados a él con la red de telefonía pública conmutada (PSTN), por sus siglas en inglés *Public Switched Telephone Network*. La PSTN no es más que la sección terrestre de la red, aquí es en donde se encuentra la telefonía fija y los demás operadores de telefonía móvil. Ver figura 2.

A cada terminal móvil se le denomina también estación móvil por sus siglas en inglés *Mobile Station (MS)* y necesitan estar siempre localizadas y registradas para el manejo de su movilidad.

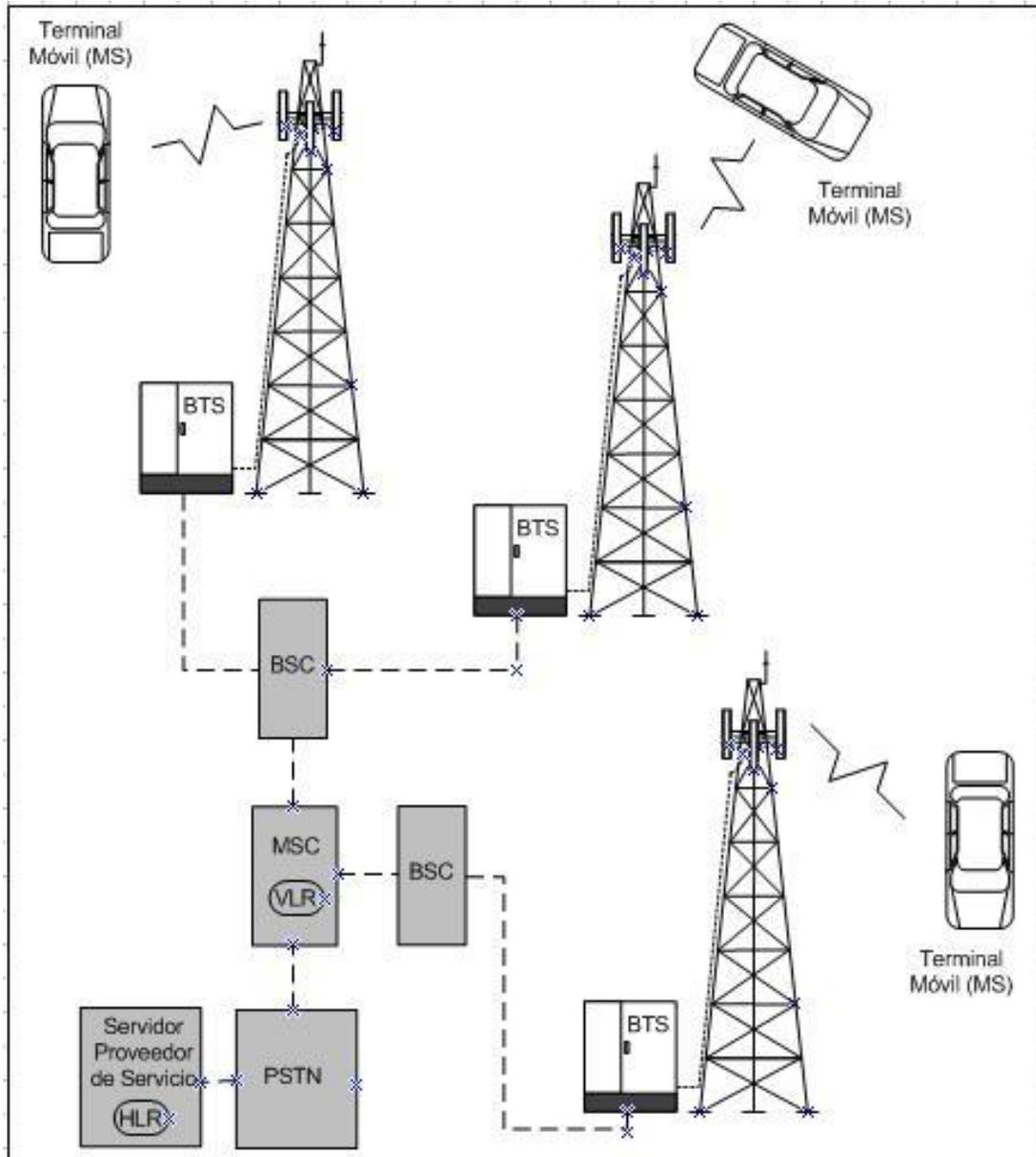
1.3.3. Manejo de la movilidad de una estación móvil

Es necesario que la red tenga registrada la ubicación de la estación móvil, con la finalidad de que esta se pueda conectar hacia la red según el pedido de comunicación que haga. Una estación móvil se comunica con el BSC y este manda un mensaje notificándole al MSC que la MS esta ahora registrada en este BSC. Luego esta información queda registrada en una lista guardada en un servidor proveedor en el cual quedarán ubicadas las MS y los BSC que las tienen registradas.

Por ejemplo, si una persona va conduciendo su automóvil y a la vez está entablando una conversación telefónica por medio de su celular, el automóvil será la MS. Cuando esta se aproxima a una celda manda un mensaje al BSC, el cual queda registrado en este; el BSC, a su vez, manda un mensaje hacia el MSC en donde se ingresa la MS al registro de ubicación de visitas (VLR), por sus siglas en inglés *Visiting Location Register*.

Entonces, el MSC manda un mensaje al servidor proveedor de servicios quien actualizará el registro de ubicación inicial (HLR) por sus siglas en inglés *Home Location Register*, el cual registrará la información con la nueva ubicación del móvil o MS. Este proceso se repite cada vez que la MS se aproxima a una nueva celda, por lo que su ubicación y movilidad en la red queda registrada en todo momento, según se muestra en la figura 4.

Figura 4. Topología y movilidad de una MS en la red



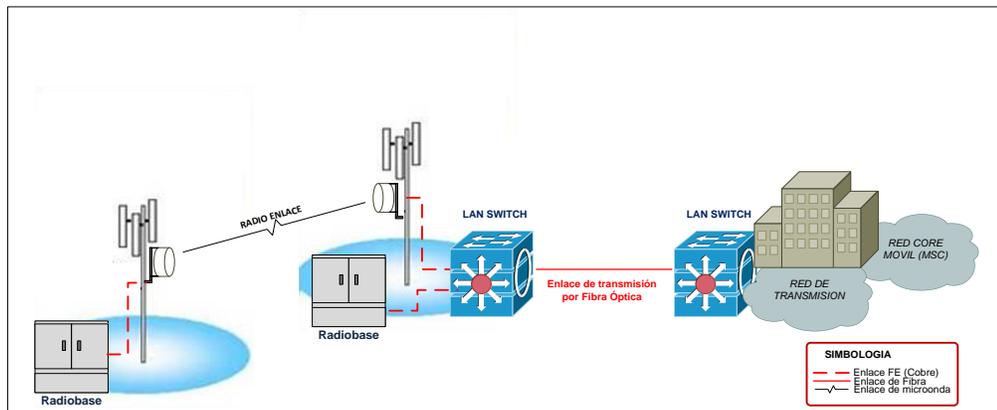
Fuente: elaboración propia.

1.4. Sistema de transmisión de datos

Está conformado por equipos de transmisión encargados de transportar la información y datos que provienen de la BTS de un sitio de celda final hacia un sitio de celda tipo nodo o central de telefonía, con la finalidad de que las BTS tengan comunicación con las BSC y estas, a su vez, con las MSC.

La transmisión de un sitio de celda puede darse de varias formas, entre ellas están: por conexión de fibra óptica, por microondas, y en algunos casos vía satélite. Este último es muy costoso por lo que se estudiarán casos utilizando equipos de radio y *switches* con conexión a fibra o por microondas.

Figura 5. Topología de transmisión de un sitio de celda



Fuente: elaboración propia.

1.4.1. LAN switch

Un LAN *switch* es un dispositivo digital lógico que opera en la capa de enlace del modelo OSI (capa 2), transmitiendo datos de un segmento de red a otro. Una radio base tiene interfaces equipadas con tarjetas Ethernet, las cuales son conectadas hacia un puerto de *switch* para, a través de este, lograr conectividad hacia la MSC.

1.4.1.1. Switch Cisco ME-3600X-24FS-M

Es un *switch* Ethernet de acceso, utilizado mayormente en sitios tipo nodo por convergencia de servicios. También pueden ser utilizados en un sitio de acceso donde únicamente se transmite los datos de la BTS local. Este equipo se utiliza frecuentemente para concentrar servicios Ethernet con conexión a cobre y velocidades de 1Gbps. En general, su medio de transmisión se levanta por fibra óptica de un nodo de acceso hacia una central de telefonía y puede ser hasta velocidades de 10Gbps.

Tabla II. Especificaciones técnicas Cisco ME-3600X-24FS-M

EQUIPO	DIMENSIONES (H x W x D)	IN POWER	TIPO	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia Max. (W)	Temperatura operación °C
ME-3600X-24FS-M	43,68 x 444,5 x 516,28 mm.	2	DC	-48	6	233	0 - 45 °C

Fuente: www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/me-3600x-series-ethernet-access-switches/data_sheet_c78-601946.pdf. Consulta: julio 2014.

1.4.2. Radio enlace

Es un equipo de transmisión de datos que mediante señales de radio frecuencia (RF), transporta información de un punto A hacia un punto B para comunicar redes de datos. Opera en capa 2 y en distintas capas del modelo OSI. Se utiliza también como un LAN *switch* para sitios remotos que se encuentran en regiones rurales. Una radio base se conecta directamente a las interfaces *fast ethernet* de un radio enlace para lograr conectividad hacia la MSC.

1.4.2.1. Radio enlace NEC IP200

El radio enlace NEC iPASOLINK 200, es un elemento de red de tipo modular que integra tarjetas con equipamiento TDM, IP, para conmutación de datos y paquetes mediante microondas e interfaces ópticas, lo que resulta en la reducción de costos y larga vida útil del equipo. Este radio enlace cubre los requerimientos de *backhaul* móvil desde un sitio de acceso hasta un nodo de agregación de la red metro Ethernet.

Tabla III. Especificaciones técnicas iPASOLINK 200

EQUIPO	DIMENSIONES (H x W x D)	IN POWER	TIPO	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia Max. (W)	Temperatura operación °C
iPASOLINK 200	44 x 482 x 240 mm.	2	DC	-48	6	75	-5 to +50 °C

Fuente: <http://www.nec.com/pasolink/>. Consulta: agosto 2014.

1.4.3. Dispositivo de acceso ethernet ETX-201H

Es un equipo de demarcación carrier ethernet, utilizado para brindar servicios en capa 2, exclusivamente en sitios de acceso, utilizado más frecuentemente para transmitir datos por fibra óptica. Cuenta con interfaces *fast ethernet* para conexión de radio bases.

Tabla IV. Especificaciones técnicas ETX-201H

EQUIPO	DIMENSIONES (H x W x D)	IN POWER	TIPO	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia Max. (W)	Temperatura operación °C
ETX-201/H	47 x 215 x 147 mm.	1	DC	-48	6	6,1	-40 to +65 °C

Fuente: http://www.bestdatasource.com/rad/data_sheets/ETX-201-a.pdf. Consulta febrero 2017.

1.5. Sistema de energía

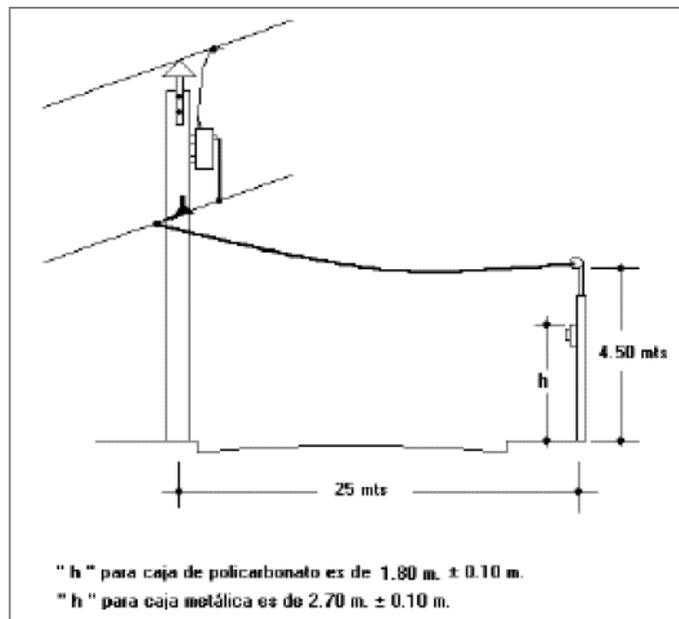
Las celdas y nodos de telefonía móvil utilizan generalmente un voltaje de operación monofásico de 120/240VAC, este es suministrado a través de la red nacional de energía eléctrica o por generación propia. Internamente en cada nodo sabemos que los equipos de telecomunicaciones operan con -48VDC por lo que utilizan unidades de rectificadores y bancos de baterías que proveen este voltaje a partir de una fuente comercial.

1.5.1. Acometida eléctrica

Para una celda de acceso el suministro es en baja tensión y monofásica. La tensión por contratar y suministrada por la Empresa Eléctrica de Guatemala S.A. es 120/240 Voltios, 1 fase y 3 alambres.

Cuando se instala caja del medidor de energía metálica tipo *socket*, la misma irá a una altura de 2,70 metros \pm 10 centímetros, medido del nivel de la acera a la parte superior de la caja, con el frente hacia la calle. Y si es caja de policarbonato irá a una altura de 2,80 metros \pm 10 centímetros medido de igual forma.

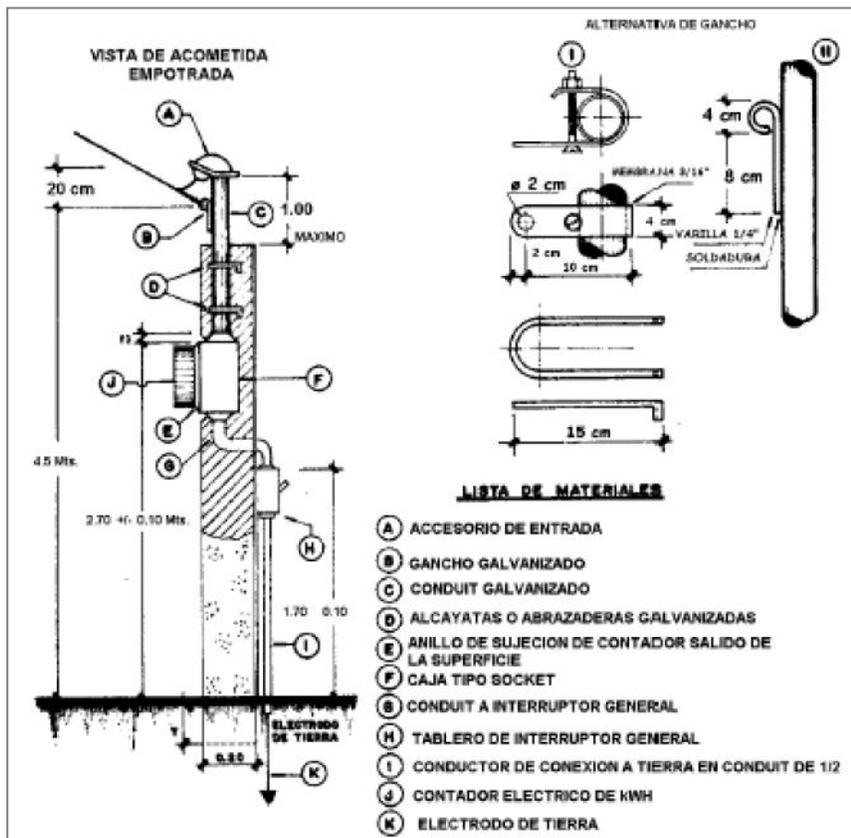
Figura 6. **Medición en baja tensión 120/240 VAC**



Fuente: Normas Empresa Eléctrica de Guatemala, S.A.

A continuación se muestran los accesorios que conforman la acometida eléctrica.

Figura 7. Especificaciones de accesorios para acometida aérea residencial



Fuente: Normas Empresa Eléctrica de Guatemala, S.A.

1.5.2. Tablero de energía

El tablero de distribución de energía eléctrica debe ser de 24 polos, 120/240 voltios y barras de 150 amperios, el tablero debe ir empotrado en muro. El interruptor termomagnético de protección para el tablero es de 2X125 amperios incorporado. El tablero de distribución es alimentado del principal que está en la columna de acometida eléctrica y cuyo interruptor termomagnético es de 2X125 amperios. El neutro debe ir aislado y la barra puesta a tierra. La capacidad del tablero se debe determinar según la carga instalada en sitio.

Cuando el sitio de celda cuenta con caseta se utilizará un tablero NEMA tipo 1 para interiores, en caso contrario se utilizará uno clase NEMA tipo 3, de exteriores, a prueba de lluvia y hermético al polvo.

1.5.3. Breakers

Son interruptores termomagnéticos que protegen las instalaciones eléctricas contra corrientes de cortocircuito y sobrecarga, de esta forma seccionan y aíslan la falla de un circuito. El *breaker* principal y el de protección del tablero son de 2 polos (2X125A), mientras que los de circuitos independientes son de 1 polo. Su capacidad en amperios se calcula en función de la carga instalada por circuito.

1.5.4. Rectificadores

Son equipos diseñados específicamente para suministrar energía a sistemas de telecomunicaciones y bancos de baterías. Un rectificador transforma potencia AC a DC, por lo general, de 120/240 VAC a 24 o 48 voltios DC para los equipos de transmisión y radio bases instaladas en un sitio de celda, el chasis de este es positivo. La capacidad del rectificador debe determinarse en base a la carga instalada en sitio, por lo que la corriente nominal de operación estará en el rango de 30 a 250 amperios.

1.5.5. Banco de baterías

Estos están formados con baterías de tipo GEL o AGM, por lo general de 12 voltios, cuya capacidad sumada forma bancos de -48 voltios DC. Su función es almacenar el exceso de energía eléctrica generada por el generador eólico y proporcionar energía durante períodos de baja o nula velocidad del viento para soportar la carga instalada en funcionamiento. La capacidad del banco de baterías se calcula para reservar capacidad suficiente para suministrar energía durante períodos de mal tiempo.

La capacidad del banco se da en AH y será capaz de mantener la carga funcionando por determinado período, por ejemplo, si se cuenta con un banco con capacidad de 1 800AH @ 8hr, y la carga conectada del sitio demanda 75 amperios, se obtiene un respaldo de, aproximadamente, 24 horas.

1.5.5.1. Baterías tipo GEL

Son baterías plomo-ácido selladas, el electrolito es gelificado, lo que provoca menos evaporación y aumento en la vida útil en cuanto a un mayor número de ciclos de cargas y descargas. Soportan descargas profundas y ambientes con vibraciones, golpes y altas temperaturas. Su voltaje de descarga es más estable, ideal para utilizar con inversores.

Deben cargarse con tensiones más bajas y con cargador ajustado específicamente para ese tipo de baterías, debido a estas características y duración su costo es mayor.

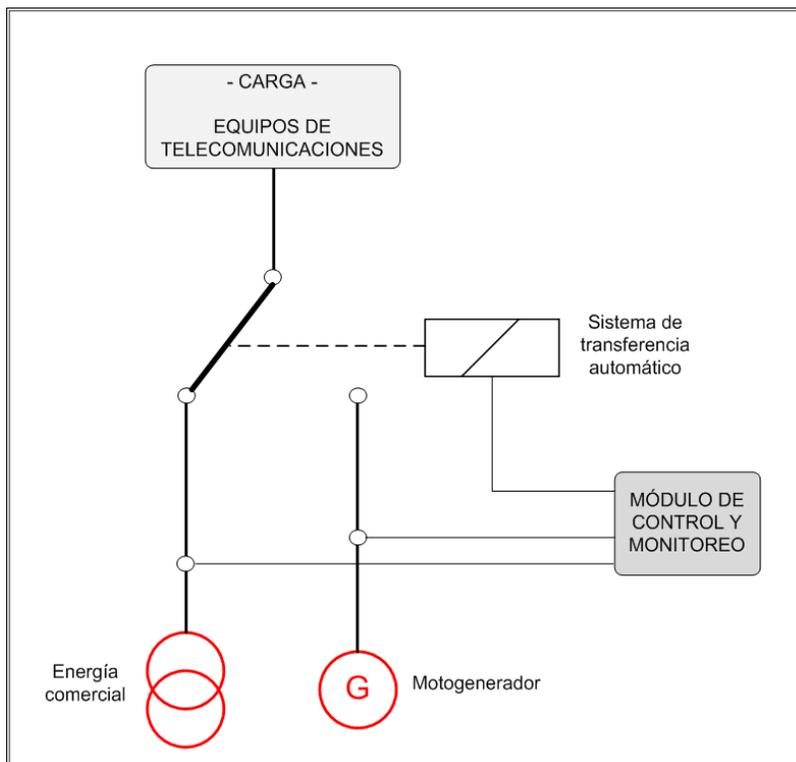
1.5.5.2. Baterías tipo AGM

Se denominan AGM debido a sus siglas en inglés *Absortion Glass Mat*, en estas el ácido se absorbe mejor y más rápido por las placas de plomo. Tiene una resistencia eléctrica interna muy baja, entregan y absorben tasas más altas de corriente eléctrica que otras baterías selladas durante su carga y descarga. Estas se pueden cargar con tensión nominal sin requerirse calibrar nuevamente los sistemas ya instalados o adquirir cargadores especiales para este tipo de baterías.

1.5.6. Motogenerador

Generalmente, los sitios de celda operan con energía eléctrica comercial con un respaldo de energía suministrado por un grupo electrógeno formado por un motogenerador que funciona con diésel. Este proceso ocurre de tal forma que cuando hay una falla o corte en el suministro eléctrico comercial, el motogenerador arranca automáticamente, entonces el interruptor de transferencia conmuta la carga que colgaba de la acometida hacia la posición del motogenerador, quedando restablecido el servicio.

Figura 8. Sistema de transferencia automático del motogenerador



Fuente: elaboración propia.

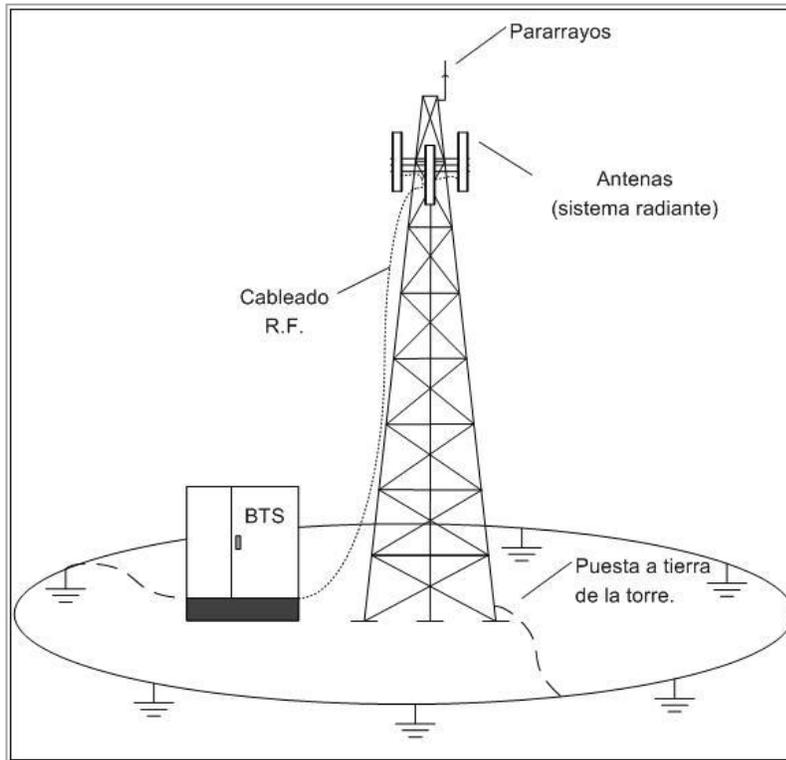
1.6. Sistema de puesta a tierra

Este sistema es vital ya que su función primordial es la de aislar el cuerpo humano de cualquier tipo de corrientes peligrosas para el mismo y provee la protección necesaria al equipamiento eléctrico de la celda contra descargas electroatmosféricas, corrientes de falla y sobre voltajes que puedan dañar la integridad física del equipo eléctrico, así como también el correcto funcionamiento del mismo.

Todos los elementos del sitio de celda se deben conectar al sistema de puesta a tierra; tanque mensual (de diésel), BTS, tableros y paneles eléctricos, antenas y cableados de RF. El sistema de puesta a tierra de un sitio de celda se compone, principalmente, de un pararrayos que está ubicado en lo más alto de la torre, donde están ancladas las antenas del sistema radiante.

Un cable de cobre conecta el pararrayos al sistema de puesta a tierra de la celda, el cual está conformado por electrodos de cobre enterrados y unidos a su vez por medio de soldadura exotérmica (*cadweld*) formando un anillo de protección capaz de drenar las corrientes de las descargas electroatmosféricas a tierra. Usualmente, se usa este sistema más conocido como convencional, se emplea cable desnudo AWG #2/0 y el anillo debe dar como máximo una medida de 2 ohmios. Todos los equipos eléctricos se deben conectar al anillo de puesta a tierra, incluyendo los cables coaxiales del sistema radiante.

Figura 9. **Sistema de tierra de un sitio de celda**



Fuente: elaboración propia.

1.6.1. Pararrayos

El pararrayos es un elemento metálico cuya función es ofrecer un punto de incidencia y conducción para recibir una descarga atmosférica y proveerle un camino controlado a la corriente del rayo para disiparlo a tierra, esto con el fin de no causar daños a personas, construcciones y equipos eléctricos. Fue inventado por Benjamín Franklin en 1753. Todos los sitios de telecomunicaciones que cuentan con infraestructura elevada, como torres de transmisión requieren un sistema de pararrayos.

El pararrayos debe ser de tipo activo e instalado al menos 2 metros más alto que la estructura y cualquier equipo o antena instalada en la torre para cubrir un ángulo de protección de equipos instalados a inferior altura. Se debe instalar un pararrayos tipo Ingesco Nivel II PDC 3,1 (radio de protección de 45m) y conectarlo por medio de cable ACSR 2/0 hasta abajo al pozo de tierras.

Figura 10. **Pararrayos modelo INGESCO PDC 3.1 a nivel I, II y III**

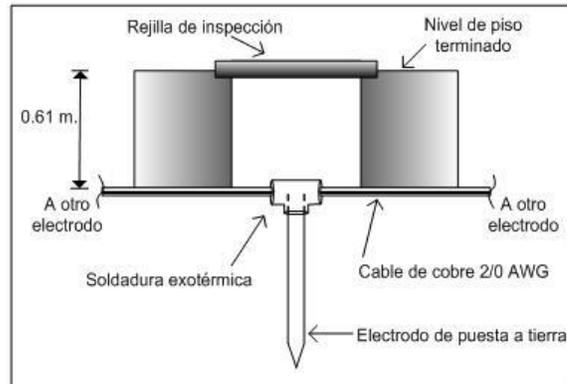


Fuente: <http://www.ingesco.com>. Consulta: agosto de 2014.

1.6.2. Electroodos

Son varillas conductoras, con revestimiento de cobre electrolítico puro (varilla tipo *copperweld*), se entierran en el suelo a una distancia menor o igual a 4 metros y con el propósito de hacer contacto eléctrico con la tierra física del lugar. La medida de los electroodos debe ser de 5/8" por 8' con un espesor de 0,254 mm. Debe dejarse dentro del registro de tierra 0,40 metros para poder realizar una o más soldaduras.

Figura 11. **Registro de tierra con varilla de cooperweld**



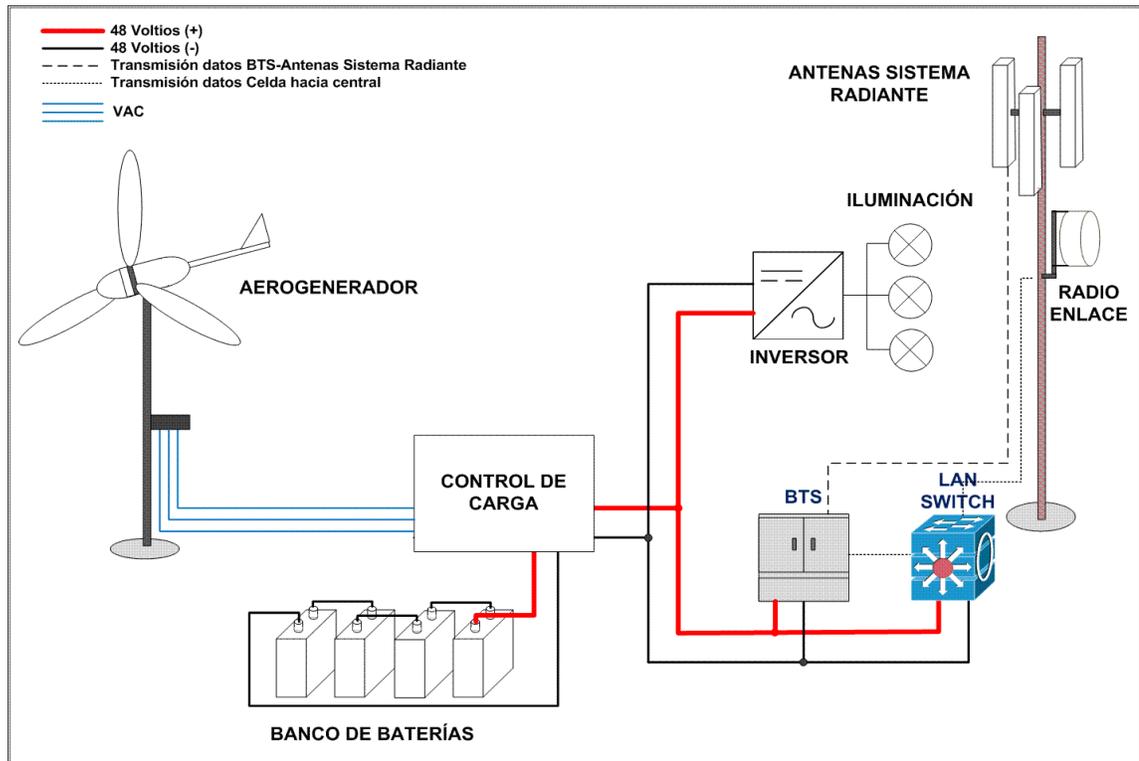
Fuente: elaboración propia.

1.7. Esquema propuesto de generación eólica

Ya que se conoce los sistemas que componen un sitio de celda y su equipamiento asociado, se procede a realizar una propuesta de diseño de generación de energía eólica que sustituirá la fuente de suministro comercial en el sistema de energía del sitio.

El sistema se compone, fundamentalmente, de un aerogenerador y uno o más bancos de baterías asociados según sea necesario y se calcule más adelante. Un controlador de carga mantendrá la operación del aerogenerador y el banco de baterías en función del consumo demandado por los equipos de transmisión.

Figura 12. Esquema de sistema de generación eólico para un sitio de celda



Fuente: elaboración propia.

1.8. Demanda eléctrica de un sitio de celda

Según se ha visto, el equipamiento de transmisión que conforma un sitio de celda demanda cierta potencia eléctrica, la cual debe ser suministrada por el sistema de generación eólico. La demanda eléctrica es la cantidad de energía que se necesita en un momento determinado y se mide en kW. Se considerará una celda rural la que se conecta de forma puntual hacia un nodo o central, y celda tipo nodo la que se conecta hacia una central, pero de ella, a su vez, levanta una o más celdas distantes.

Se sabe que la potencia eléctrica está dada por:

$$P = V * I \text{ (Vatios)}$$

De donde se ve que la corriente eléctrica está dada por:

$$I = P / V \text{ (Amperios)}$$

Tabla V. **Demanda eléctrica de una celda tipo rural**

EQUIPO	IN POWER	TIPO	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia Max. (W)	Icalculada (A)
ETX-201/H	1	DC	-48	6	6,1	0,13
DBS3900	2	DC	-48	22	1 050	21,88
Iluminación	1	DC	-48	10	300	6,25
TOTAL					1 356,1	28,25

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Demanda eléctrica de una celda tipo nodo básico**

EQUIPO	IN POWER	TIPO	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia Max. (W)	Icalculada (A)
ME-3600X-24FS-M	2	DC	-48	6	233	4,85
iPASOLINK 200	2	DC	-48	6	75	1,56
ETX-201/H	1	DC	-48	6	6,1	0,13
DBS3900	2	DC	-48	22	1 050	21,88
Iluminación	1	DC	-48	10	300	6,25
TOTAL					1 664,1	34,67

Fuente: elaboración propia.

Se ve que el equipo de mayor consumo es la BTS, y la diferencia entre los dos tipos de celda no es significativa, entonces se calculará en base a la celda tipo nodo básico. La demanda es 1,66 kW.

Se calculó la corriente máxima para cada equipo según especificaciones de fábrica para cada equipo, estas se muestran en las tablas V y VI de demanda eléctrica para sitios de celda rural y nodo básico.

2. ESTUDIO PARA GENERACIÓN EÓLICA Y TIPOS DE GENERADORES

2.1. Energía eólica

La energía eólica se forma cuando la energía cinética del viento, masa de aire en movimiento, incide sobre las paletas de una aeroturbina, produciendo un trabajo mecánico de rotación que mueve, a su vez, un generador eléctrico para producir electricidad. “La cantidad de energía que contiene el viento antes de pasar por un rotor en movimiento es proporcional al cubo de la velocidad a la que se mueve”², y está dada por la fórmula:

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad \text{ecuación (1)}$$

Donde:

P = potencia en vatios, cantidad de energía del viento.

ρ = densidad del aire en Kg/m³

A = superficie o área barrida por el rotor en m²

V = velocidad del viento en m/s

Si se dispone de la velocidad media anual del viento, se puede hacer una estimación de la producción neta de electricidad para un aerogenerador convencional de paso y velocidad variable.

² ÁLVAREZ, Clemente. *Energía eólica*. p. 27.

“A una altitud de entre 0 – 1 500 msnm y viento con distribución de Weibull con factor de forma de curva del viento cercano a 2, y con velocidad entre 7 – 10 m/s”³, se tiene:

$$E \approx [2 - (V - 7)/4] D^2 V^3 \quad \text{ecuación (2)}$$

Donde:

E = producción de electricidad (kWh/año)

D = diámetro del rotor (m)

V = velocidad del viento en m/s

2.2. Generadores eléctricos

Un generador eléctrico es una maquina eléctrica capaz de generar energía eléctrica a partir de energía mecánica proporcionada por una turbina o mecanismo giratorio.

2.2.1. Generador síncrono

Su principio fundamental es que el movimiento relativo entre un conductor y un campo magnético induce un voltaje en el conductor. Una fuente externa de excitación DC se aplica a unos anillos colectores en el rotor, produciendo la fuerza del flujo y, por consiguiente, el voltaje inducido en la armadura se regula mediante la corriente directa y el voltaje suministrado al campo. La corriente alterna es producida en la armadura resultante de la inversión del campo magnético a medida que los polos norte y sur pasan por los conductores individuales.

³ ÁLVAREZ, Clemente. *Energía eólica*. p. 38.

La disposición más común es la de un electroimán cilíndrico que gira dentro de un conjunto de conductores estacionarios. La corriente generada aumenta hasta un pico, cae hasta cero, desciende hasta un pico negativo y sube nuevamente a cero varias veces por segundo, en función de la frecuencia para la cual fue diseñada la máquina. Este tipo de corriente es conocido como corriente alterna monofásica.

2.2.2. Generador asíncrono

El generador asíncrono también es conocido como de inducción y es similar al sincrónico. En este no hay excitación en su rotor y los conductores se encuentran unidos en corto en los extremos del rotor mediante un anillo anular. Su disposición es similar a una jaula de ardilla por lo que se origina el nombre de este tipo de devanado. La carga del generador crece según se incrementa la velocidad, este lo hace autorregulante y puede usarse sin control de un regulador.

Los generadores de inducción siempre se deben usar en paralelo con generadores sincrónicos que regulan el voltaje y suministran los kilovatios necesarios para vencer la potencia retrasada de la generación por inducción.

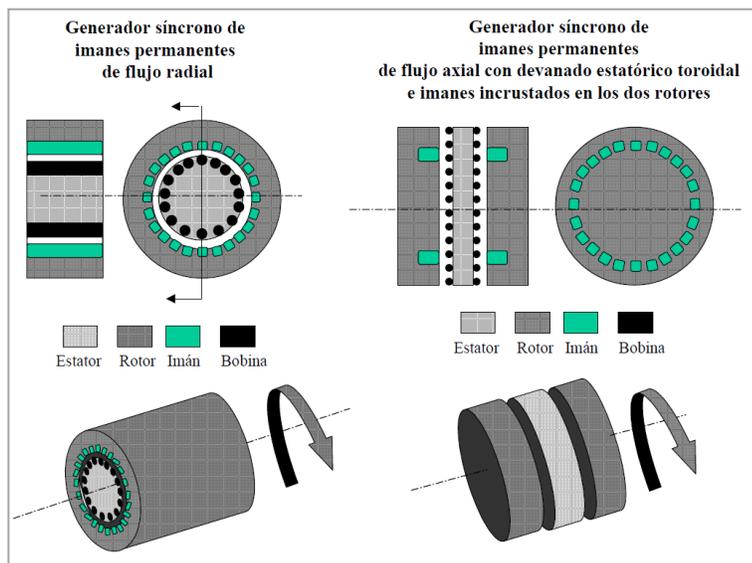
2.2.3. Generador sincrónico multipolar de imán permanente

Los generadores sincrónicos multipolares de imán permanente se utilizan mayormente en aerogeneradores de baja potencia, hasta 12kW. Son robustos y requieren bajo mantenimiento, evitan el uso de cajas multiplicadoras aunque su precio es relativamente mayor. Utilizan imanes de alto magnetismo.

Los materiales más utilizados para sintetizar los imanes son: alnico, ferrita, neodimio-hierro-boro y samario-cobalto. Los imanes de neodimio-hierro-boro son los que tienen las mejores características magnéticas existentes en la actualidad y su comportamiento en función de la temperatura ha mejorado significativamente, se pueden utilizar para aplicaciones de hasta 150°C.

La tensión de salida depende únicamente de la velocidad de giro del rotor ya que no es posible regular la corriente de excitación del circuito inductor (imanes). El generador se saturará a una determinada velocidad de rotación.

Figura 13. **Generador síncrono de imán permanente**



Fuente:

www.ute.com.uy/empresa/entorno/energias_renovables/eolica/actividad_2002/eolica_generador_es.pdf. Consulta: agosto 2014.

Es posible establecer una relación par de un generador de imanes permanentes y la geometría de este en Nm a través de la fórmula:

$$T = kD^2L$$

Donde:

T = par (Nm)

K = constante

D = diámetro del rotor (m)

L = longitud axial del rotor (m)

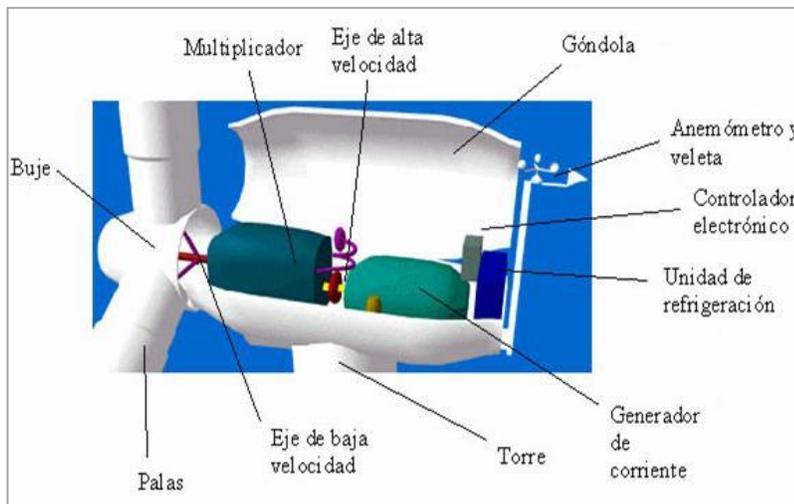
2.3. Aerogenerador

Es un generador eléctrico cuya fuente de energía mecánica de rotación es suministrada por una turbina eólica que gira por la incidencia de viento en sus palas. El aerogenerador se compone de las siguientes partes:

- La torre: soporta la góndola y el rotor. Suelen usarse tubulares de acero.
- Rotor: lo conforma las palas y el buje que las une, transforma la energía del viento en mecánica y cuanto mayor sea el área barrida mayor será la producción.
- Las palas: son similares a las alas de un avión, la mayor parte de turbinas tiene tres y se fabrican de poliéster o epoxy reforzado con fibra de vidrio.
- Góndola: su interior contiene los dispositivos que transforman la energía y en su exterior cuentan con un anemómetro y una veleta que brindan información al sistema para control.

- Multiplicador: multiplica la velocidad de giro del rotor adaptándola al generador.
- Generador: transforma la energía mecánica en eléctrica.
- Controlador electrónico: controla las condiciones de funcionamiento del aerogenerador, analizando las señales de sensores asociados.
- Sistemas hidráulicos: elementos que permiten el giro de las palas y el frenado del rotor o el giro de frenado de la góndola.
- Sistema de orientación: coloca al rotor siempre de manera perpendicular al viento.

Figura 14. **Partes de un aerogenerador**



Fuente: <http://www.renovables-energia.com/2009/07/partes-de-un-aerogenerador/>.

Consulta: agosto 2014

2.3.1. Aerogenerador de eje horizontal

Es el más utilizado en la actualidad por ser el más eficiente, su disposición de palas, generalmente tres, se encuentra sobre un eje horizontal al suelo y a determinada elevación respecto de este. Se usan tres palas porque es el menor número en proporcionar mayor estabilidad y permite ahorrar material y peso en el sistema.

Los aerogeneradores horizontales pueden ser de tipo barlovento y sotavento. La diferencia radica en que el tipo barlovento tiene la turbina delante de la góndola tal como el de la figura anterior, y el sotavento tiene la turbina atrás de la góndola, lo que en máquinas pequeñas es interesante puesto que la carcasa de la góndola funcionaría como veleta para orientar el aerogenerador en dirección del viento.

2.3.2. Aerogenerador de eje vertical

Este tipo de aerogenerador tiene la turbina montada sobre un eje de giro perpendicular al suelo. Una de sus ventajas es que no necesita sistema de orientación que lo dirija hacia el viento, pero es menos eficiente que uno de eje horizontal y requiere ayuda para arrancar y recibe menos viento al estar pegado al suelo. El tipo de generador más conocido dentro de esta clasificación es la turbina Darrieus, que se compone de un eje vertical y en el que giran palas con forma de "C".

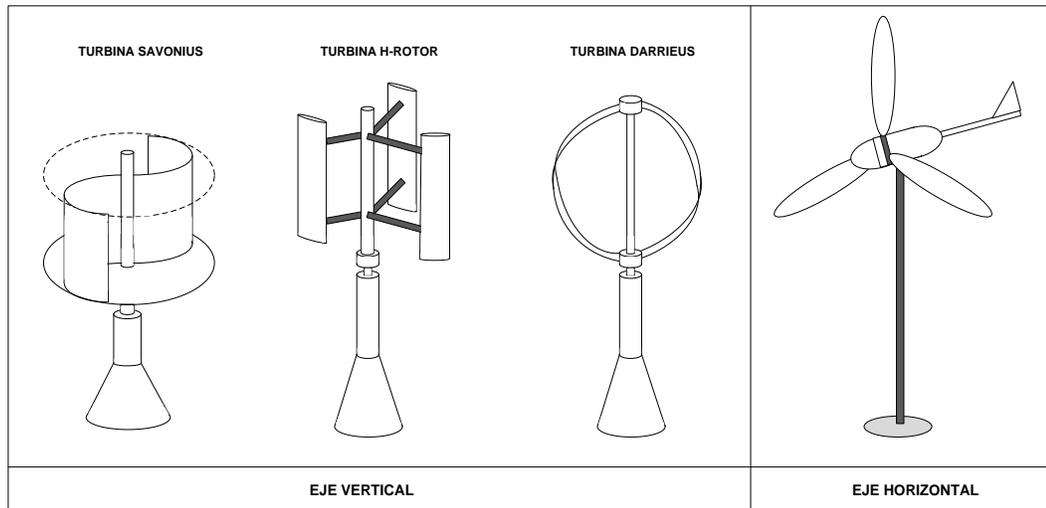
2.3.3. Tipos de turbinas

Existen varios tipos de turbinas utilizadas en aerogeneradores y cada una con características que las diferencian en cuanto a eficiencia de generación:

- Eje horizontal, son muy utilizadas por ser eficientes, más económicas, y tienen diversidad de modelos. No soporta cambios frecuentes en la dirección del viento ni vientos racheados.
- Eje vertical por sustentación, entre ellas la turbina Darrieus y H-rotor, tiene eficiencia aceptable, menor sensibilidad a la turbulencia, es indiferente a la dirección del viento y crea pocas vibraciones. No ha sido muy probada.
- Eje vertical de arrastre, entre ellas la turbina Savonius, es silenciosa, robusta y fiable, indiferente a la dirección del viento, aprovecha flujos turbulentos y crea pocas vibraciones. Su eficiencia es baja y su costo elevado.

A continuación se muestran los tipos de turbinas citados:

Figura 15. Tipos de turbinas para aerogeneradores



Fuente: elaboración propia.

En la siguiente tabla se resumen las principales ventajas y desventajas de los aerogeneradores tipo horizontal y vertical:

Tabla VII. Ventajas y desventajas de los aerogeneradores

AEROGENERADOR	VENTAJAS	DESVENTAJAS
HORIZONTAL	Más eficiente	Necesita sistema de orientación de dirección del aire
	Son de menor costo y más fáciles de encontrar	Son relativamente más ruidosos
	Cuentan con mayor desarrollo tecnológico	
VERTICAL	No necesita sistema de orientación de dirección del aire	Menos eficiente
	Hacen menos ruido	Requiere ayuda para arrancar
	Menor impacto de aspecto visual	Recibe menos viento al estar pegado al suelo
		Son más costosos y difíciles de encontrar

Fuente: elaboración propia.

2.4. Velocidad del viento en Guatemala

En Guatemala se registran velocidades de viento que son lo suficientemente buenas para considerar las zonas donde se producen como aptas para la generación eólica.

2.4.1. Velocidad promedio anual

El Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH, ha desarrollado proyectos de medición del viento en diversos lugares de Guatemala, esto con el objetivo de conocer el potencial eólico del país.

Figura 16. Velocidad promedio del viento en Guatemala



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de

<http://www.insivumeh.gob.gt/meteorologia/ESTACIONES/GUATEMALA/Insivumeh/Velocidad%20del%20Viento%20Insivumeh.htm>. Consulta: agosto 2014.

2.4.2. Torres de medición de variables eólicas

Son torres provistas de equipos que miden el comportamiento del viento en intervalos de tiempo definidos. Esta información se almacena en un equipo registrador de datos.

El Ministerio de Energía y Minas a través de la Dirección General de Energía, ha instalado torres de 30 metros de altura, equipadas y que realizan mediciones cada 10 minutos. Estas torres son de tipo tubular tensadas y cuentan con medidores de velocidad del viento (anemómetro), medidor de dirección del viento, sensor de temperatura, sensor de radiación solar, registrador de datos, pararrayos y una baliza.

Figura 17. **Torre de medición de viento**



Fuente: http://www.lopezepinosa.com/joseantonio/blog/wp-content/uploads/2011/07/04_ANEMOMETRO_PIE_DE_PISTA.jpg. Consulta: agosto 2014.

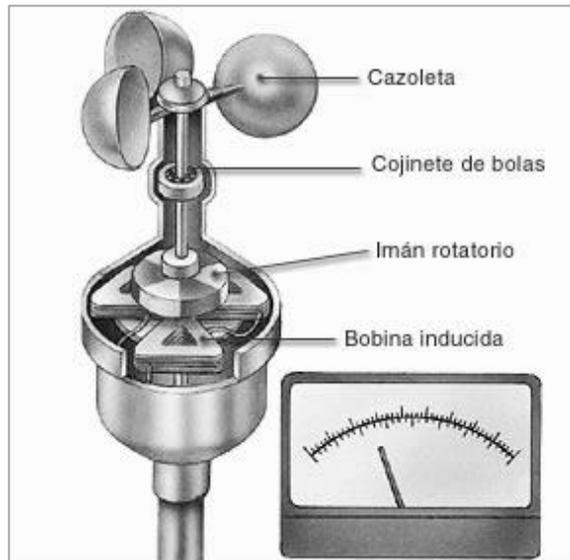
2.4.3. Anemómetro

Es un instrumento utilizado para medir la velocidad del viento. Suelen medir velocidades instantáneas, en las cuales puede haber ráfagas de viento que distorsionan la medición. Debido a esto se toma el valor medio de los cálculos realizados en intervalos de 10 minutos.

2.4.3.1. Anemómetro de rotación

Este anemómetro está formado por varias cazoletas o hélices unidas a un eje, cuyo giro es proporcional a la velocidad del viento. En los anemómetros magnéticos, el giro acciona un diminuto generador eléctrico que facilita una medida muy precisa.

Figura 18. Esquema anemómetro de rotación



Fuente: <http://www.hiru.com/>. Consulta: agosto 2014.

2.4.4. Clasificación del viento

Los vientos se clasifican en base a su velocidad y fuerza ejercida. Estos pueden variar desde un viento relativamente en calma, con velocidad casi nula, hasta vientos tan fuerte como un huracán. Existe una escala de medición del viento llamada escala de Beaufort.

2.4.4.1. Escala de Beaufort

La escala de Beaufort es utilizada para medir la intensidad del viento, mediante su velocidad. Consiste en una escala de 12 grados o fuerzas para expresar la velocidad del viento. Esta fue publicada por Francis Beaufort en 1806 y fue adoptada por el Comité Meteorológico Internacional en 1874. La exactitud del grado o fuerza del viento dependerá de tomar la velocidad media durante diez minutos a una altura de 10 metros sobre la superficie del mar.

Tabla VIII. Escala de Beaufort

ESCALA DE BEAUFORT, FUERZA DEL VIENTO Y MEDICIONES EQUIVALENTES					
N	Clasificación	Efectos	Nudos	Km/h	Mts/Seg
0	Calma	El Humo sube en vertical	< 1	0 - 2	0 - 0,2
1	Ventolina	El humo indica la dirección del viento, pero no la veleta	1 - 3	2 - 6	0,3 - 1,5
2	Brisa suave	Sensible a la cara, mueve hojas de arboles y la veleta	4 - 6	7 - 11	1,6 - 3,3
3	Brisa baja	Mueve constantemente hojas y arboles, despliega banderas poco pesadas	7 - 10	12 - 19	3,4 - 5,4
4	Brisa moderada	Levanta polvo y papeles, mueve ramas pequeñas	11 - 16	20 - 29	5,5 - 7,9
5	Brisa fresca	Mueve arbustos, forma crestas pequeñas de olas en lagos y ríos	17 - 21	30 - 39	8,0 - 10,7
6	Brisa fuerte	Mueve ramas grandes, silvan los alambres del telegrafo	22 - 27	40 - 50	10,8 - 13,8
7	Viento moderado	Mueve todo el arbol	28 - 33	51 - 61	13,9 - 17,1
8	Viento fresco	Rompe las ramas de los árboles, resistencia al caminar	34 - 40	62 - 74	17,2 - 20,7
9	Viento fuerte	Daños a edificios ligeros, derrumba chimeneas	41 - 47	75 - 87	20,8 - 24,4
10	Temporal	Arranca arboles, daños considerables en los edificios	48 - 55	88 - 101	24,5 - 28,4
11	Temporal fuerte	Muy raro, daños intensos generales	56 - 63	102 - 117	28,5 - 32,6
12	Huracán		> 64	> 118	> 32,7

N = número de Beaufort

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de <http://www.marinamercante.gob.hn/index.php/escala-de-beaufort>. Consulta: agosto 2014.

2.4.4.2. Ley de Betz

Esta ley establece que no es posible convertir toda la energía del viento en energía eléctrica, define un límite de potencia máxima extraíble de aproximadamente el 59 %. Esto debido a la eficiencia aerodinámica de las palas y la eficiencia mecánica de los componentes, así como la eficiencia eléctrica del generador, controlador e inversor.

Debido a esto la ecuación de potencia generada está dada por (ENAIR ENERGY S.L., 2010):

$$P = C_p \frac{1}{2} \rho A V^3 \text{ ecuación (3)}$$

Donde:

C_p = coeficiente de potencia que representa la eficiencia del sistema, aproximadamente entre 20 y 30 % en punto de trabajo nominal.

A = área de barrido en m^2

V = velocidad del viento en m/s

2.4.5. Tipos de torres de telefonía móvil

Estructuras metálicas que soportan los sistemas radiantes, antenas y cableados de RF en un sitio de celda. Están compuestas por perfiles y ángulos de acero unidas por tornillos, pernos, remaches o por medio de soldaduras. Según las necesidades y condiciones del sitio, así deberá ser la elección del tipo de torre, entre las más utilizadas se encuentran las auto soportadas, arriostradas y monopolos.

2.4.5.1. Torre autosoportada

Este tipo de torre se construye sobre terrenos, generalmente en áreas urbanas o cerros. La cimentación debe ser adecuada para resistir las fuerzas a las que será sometida. La geometría de estas torres depende de la altura, ubicación y fabricante de las torres.

Figura 19. **Torre auto soportada**



Fuente: <http://www.c4mvingeneria.com/wp-content/uploads/2014/12/torre-autosoprotada.jpg>.

Consulta: agosto 2014.

2.4.5.2. Torre arriostrada

Cuando se requiere instalar antenas en regiones o puntos específicos y estratégicos, se requiere construir torres arriostradas sobre edificaciones existentes. Estas torres utilizan tirantes o arriostres a diferentes distancias y posicionando sus bases sobre columnas y puntos resistentes, a pesar de que la torre no es muy grande, se debe tomar en cuenta estas consideraciones. No se instalan sobre losas u otro elemento inadecuado que podría fallar. Los arriostres, generalmente, se tensan al 10 % de la resistencia proporcionada por el fabricante.

Figura 20. **Torre arriostrada**



Fuente: <http://www.directorio-de-empresas.com.mx/wp-content/uploads/2014/03/3600-SRWD-Guyed-Tower-333x500.jpg>. Consulta: agosto 2014.

2.4.5.3. Torre tipo monopolo

Consisten en un poste, el cual es instalado en sitios donde se requiere conservar la estética, ya que ocupan menos espacio físico. En casos especiales se les aplica un camuflaje para simular vegetación de la localidad.

Figura 21. **Torre tipo monopolo**

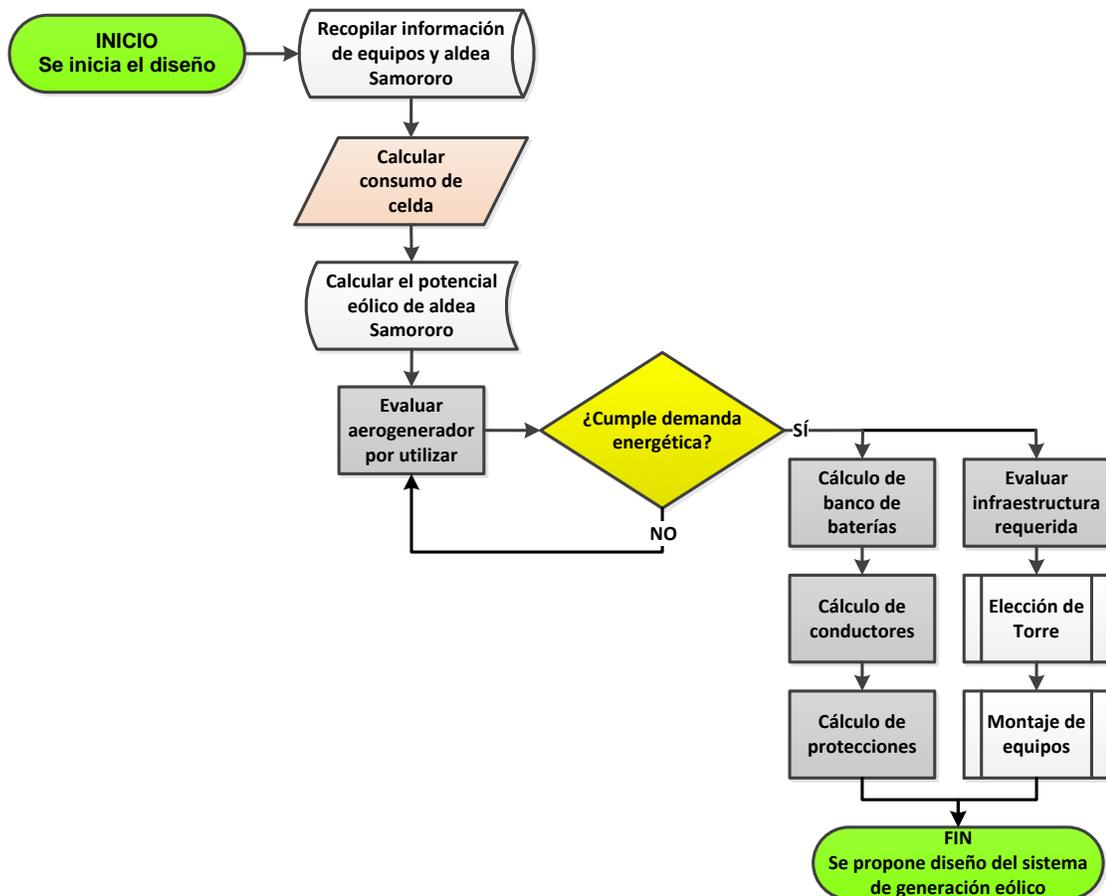


Fuente: <http://www.productosatlas.com/pics/content/category/1285948968.JPG>. Consulta: agosto 2014.

3. DISEÑO DE SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICO EN ALDEA SAMORORO

A continuación se muestra el diagrama de flujo del proceso por seguir para diseñar el sistema de generación eólico en aldea Samororo:

Figura 22. Diagrama de flujo diseño de sistema eólico



Fuente: elaboración propia.

3.1. Demanda de sitio de celda en región aldea Samororo

La demanda es el promedio de carga eléctrica en un intervalo determinado de tiempo y se mide en kilovatios (kW). El equipo por instalar en una celda tipo rural tiene una demanda de 1 356,1 W (Tabla V) y para una celda tipo nodo básico una demanda de 1 664,1 W (Tabla VI). El aerogenerador debe tener las características eléctricas necesarias para poder suministrar la energía de operación a este equipamiento durante todo el día, los 365 días del año.

3.2. Consumo de sitio de celda en región aldea Samororo

El consumo es la cantidad de energía utilizada en un período de tiempo determinado y se mide en kilovatio-hora (kWh). Se tomará la demanda de un sitio de celda tipo nodo básico como referencia para saber el consumo de energía eléctrica.

San Miguel (2011), indica que para obtener la energía consumida se usa la fórmula $E=P*t$, por lo que para calcular el consumo de energía del sitio de celda se utilizará la siguiente ecuación:

$$C = D*t \quad \text{ecuación (6)}$$

Donde:

C = consumo de energía en kWh

D = demanda en kW

t = tiempo de utilización en horas

Sustituyendo valores se puede concluir en la fórmula:

$$C = \frac{(\text{Número de equipos})(\text{potencia max})(\text{tiempo de uso al día})}{1000} \quad \text{ecuación (6)}$$

Aplicando la ecuación 6 se obtiene los consumos parciales y total de energía eléctrica de una celda, en base a la carga total instalada, así el consumo diario es de 36,94 kWh a máxima capacidad. Los resultados se muestran en la tabla IX.

Tabla IX. **Consumo de energía de sitio de celda nodo básico**

EQUIPO	IN POWER	Numero de equipos	TIPO	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia Max. (W)	Potencia Max. Total (W)	I calculada (A)	Tiempo de uso al día (h)	Consumo de Energía (kWh/d)
ME-3600X-24FS-M	2	1	DC	-48	6	233	233	4,85	24	5,59
iPASOLINK 200	2	1	DC	-48	6	75	75	1,56	24	1,80
ETX-201/H	2	1	DC	-48	6	6,1	6,1	0,13	24	0,15
DBS3900	2	1	DC	-48	22	1 050	1 050	21,88	24	25,20
Iluminación	1	4	DC	-48	10	75	300	6,25	14	4,20
TOTAL							1 664,1	34,67	110,00	36,94

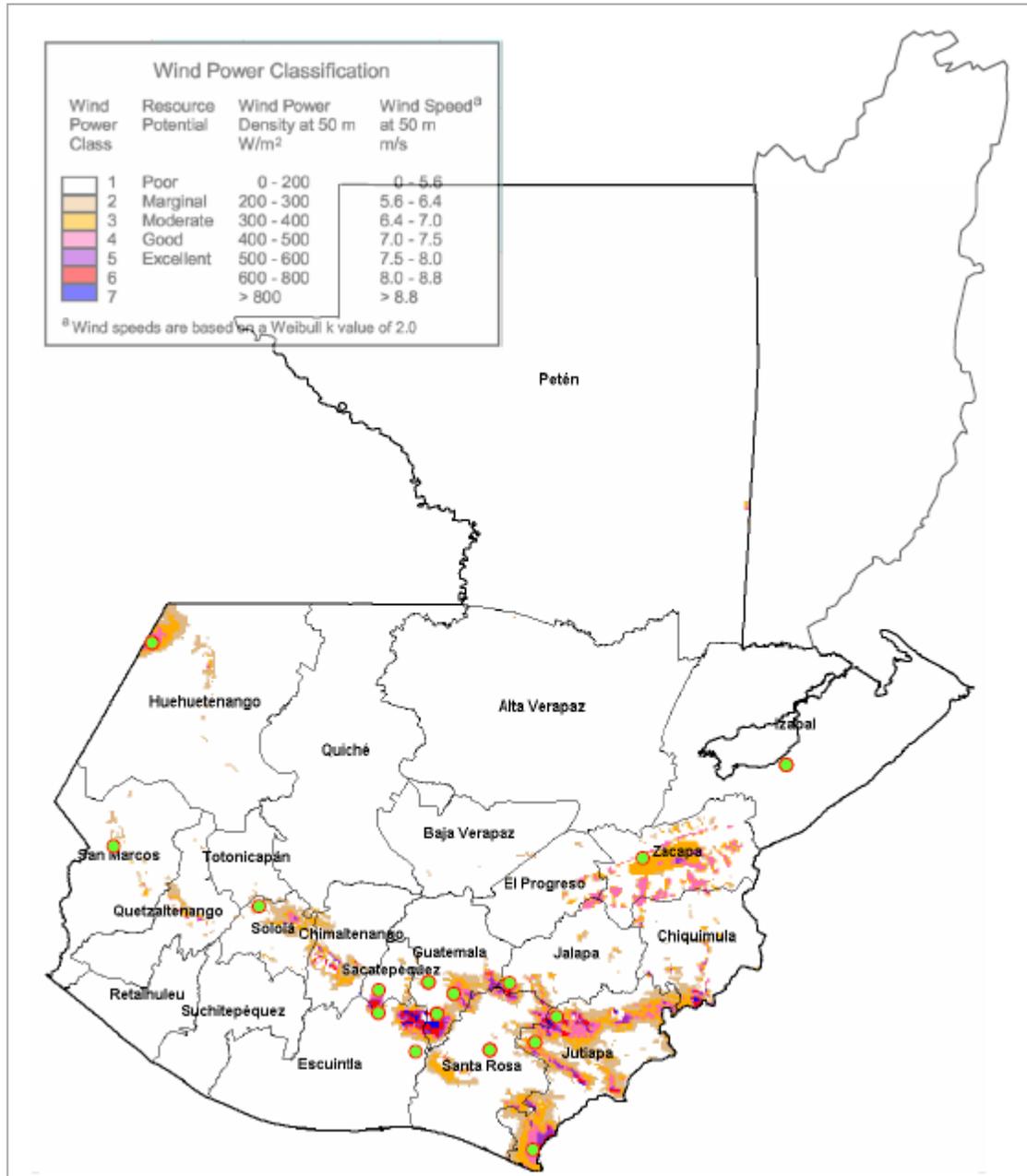
Fuente: elaboración propia.

3.3. Potencial de densidad de energía eólica en Guatemala

El potencial eólico se obtiene en base a una serie de mediciones del recurso eólico de dos años en el sitio seleccionado. Se logra con la instalación de torres de medición que cuentan con anemómetros y equipos de medición que recopilan información sobre el comportamiento de la velocidad y dirección del viento, radiación solar, presión y la temperatura.

Guatemala cuenta con varias regiones privilegiadas con este recurso y esto lo ha publicado y dado a conocer el Ministerio de Energía y Minas, a través de mediciones que ha realizado desde el año 2006. La velocidad promedio del viento en regiones como la aldea Samororo, son de amplio aprovechamiento para la generación de energía eléctrica.

Figura 23. Mapa de potencial eólico en Guatemala



Fuente: Ministerio de Energía y Minas. *Resumen de las mediciones del viento en Guatemala.*

p. 2.

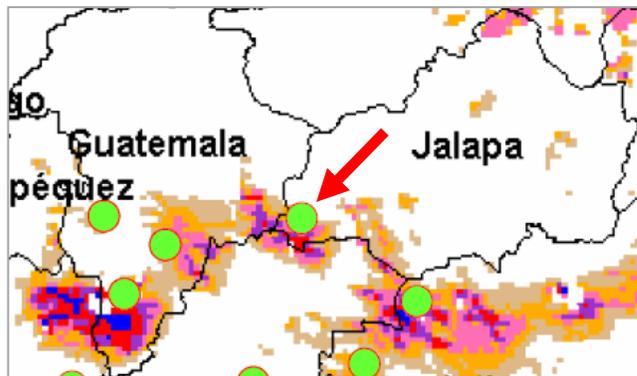
3.3.1. Regiones de mayor aprovechamiento del viento

En base a las mediciones de velocidad del viento realizadas durante los últimos años por el MEM, se puede considerar las regiones en las que el viento promedio está entre 5.6 – 8 m/s, es decir, están en los rangos de moderado, bueno y excelente, como regiones de mayor aprovechamiento del viento para generación de energía eléctrica. Entre estas están:

- El Rodeo, San Marcos, San Marcos.
- Finca Candelaria, Alotenango, Sacatepéquez.
- Aldea Samororo, Mataquescuintla, Jalapa.
- El Durazno, Jutiapa, Jutiapa.
- Finca la Concha, El Jocotillo, Villa Canales, Guatemala.

Para este estudio es de interés la aldea Samororo, Mataquescuintla, Jalapa.

Figura 24. Ubicación de la aldea Samororo



Fuente: Ministerio de Energía y Minas. *Resumen de las mediciones del viento en Guatemala.*

3.4. Estudio para generación eólica en aldea Samororo, departamento de Jalapa

La aldea Samororo está situada en el municipio de Mataquescuintla, departamento de Jalapa, se ubica en la coordenada geográfica N14° 30' 41" W90° 16' 59,8" a 1 852 msnm. Cuenta con velocidades promedio arriba de 6 m/s, ideales para la generación eólica. En noviembre de 2006 el MEM inició las mediciones de velocidad promedio mensual en este lugar, finalizando estas en febrero de 2010. Es un período de poco más de 3 años de mediciones mensuales, lo que nos da una base sólida para el estudio teórico.

3.4.1. Mediciones del viento en aldea Samororo

Las mediciones del viento en aldea Samororo fueron realizadas por el MEM en un período de 41 meses (año 2006 – 2010), siendo promedios mensuales de velocidad. Si se toma la totalidad de estas mediciones y se saca el promedio, se tendrá una velocidad promedio de 6,33 m/s.

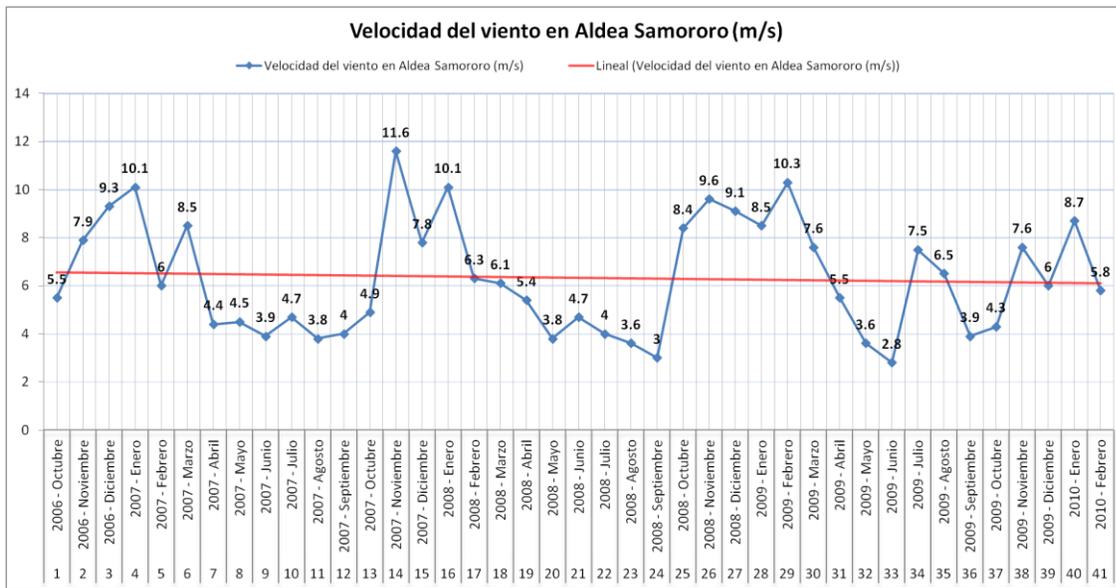
Tabla X. Velocidad promedio del viento en aldea Samororo

Mes	No. Medición	Año	Velocidad del viento (m/s)	No. Medición	Año	Velocidad del viento (m/s)	No. Medición	Año	Velocidad del viento (m/s)	No. Medición	Año	Velocidad del viento (m/s)	No. Medición	Año	Velocidad del viento (m/s)
Enero	1	2006	5,5	4	2007	10,1	16	2008	10,1	28	2009	8,5	40	2010	8,7
Febrero	2	2006	7,9	5	2007	6	17	2008	6,3	29	2009	10,3	41	2010	5,8
Marzo	3	2006	9,3	6	2007	8,5	18	2008	6,1	30	2009	7,6	-	2010	-
Abril	-	2006	-	7	2007	4,4	19	2008	5,4	31	2009	5,5	-	2010	-
Mayo	-	2006	-	8	2007	4,5	20	2008	3,8	32	2009	3,6	-	2010	-
Junio	-	2006	-	9	2007	3,9	21	2008	4,7	33	2009	2,8	-	2010	-
Julio	-	2006	-	10	2007	4,7	22	2008	4	34	2009	7,5	-	2010	-
Agosto	-	2006	-	11	2007	3,8	23	2008	3,6	35	2009	6,5	-	2010	-
Septiembre	-	2006	-	12	2007	4	24	2008	3	36	2009	3,9	-	2010	-
Octubre	-	2006	-	13	2007	4,9	25	2008	8,4	37	2009	4,3	-	2010	-
Noviembre	-	2006	-	14	2007	11,6	26	2008	9,6	38	2009	7,6	-	2010	-
Diciembre	-	2006	-	15	2007	7,8	27	2008	9,1	39	2009	6	-	2010	-

Fuente: elaboración propia, según datos tomados de: Ministerio de Energía y Minas. *Resumen de las mediciones del viento en Guatemala.*

De la tabulación anterior se puede observar gráficamente el comportamiento de la velocidad del viento:

Figura 25. **Gráfica de velocidad del viento de la aldea Samororo**



Fuente: elaboración propia.

3.4.2. Distribución de Weibull

Es una función utilizada para predecir la variación del viento en una región o localización específica. Con esta función es posible describir el comportamiento de la velocidad del viento, además de que permite hacer una estimación de la producción de energía para una localización específica.

3.4.3. Condiciones climáticas

Las condiciones de temperatura, altura sobre el nivel del mar, terreno y velocidad del viento en la aldea Samororo favorecen de manera notable a la generación de energía eléctrica a partir de la utilización de aerogeneradores. Es por ello que esta ubicación resulta ser muy buena para su aprovechamiento.

3.4.4. Cálculo del potencial eólico de aldea Samororo, Jalapa

Para determinar el potencial eólico de un área específica de forma circular en aldea Samororo, se necesita conocer tres factores importantes, como lo son:

- Velocidad del viento, en m/s
- Densidad del aire seco, en Kg/m³
- Tamaño del rotor (real o para efectos del cálculo), en m

Para el cálculo del potencial eólico y de la ecuación:

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad \text{ecuación (1)}$$

Se sabe que el área de una superficie circular (área barrida por el rotor) es igual a πr^2 , entonces:

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 V^3 \quad \text{ecuación (4)}$$

Donde:

P = potencia en vatios (W)

ρ = densidad del aire en Kg/m³

r = tamaño del rotor del aerogenerador en m²

V = velocidad del viento en m/s

“Dado que la densidad (ρ) varía en función de la altura y temperatura”⁴, se utiliza la ecuación:

$$\rho = 1,225e^{[(-z/8435) - (T-15)/288]} \quad \text{ecuación (5)}$$

Donde:

ρ = densidad del aire en Kg/m³

T = temperatura en °C

z = altura en msnm

Si se sabe que la aldea Samororo está a 1 852 msnm y su temperatura promedio oscila en los 15°C, entonces se puede sustituir esos valores en la ecuación 4:

$$\rho = 1,225e^{[(-1852/8435) - (15-15)/288]}$$

$$\rho = 0,98351685 \text{ Kg/m}^3$$

⁴ FAJARDO Juan. IMIQ. Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos. *Revista Tecnología Ciencia y Educación*. Vol. 25 núm. 2, p. 27.

La densidad del aire en la aldea Samororo es 0,9835 Kg/m³. Ahora se puede calcular el potencial eólico, ya que se sabe que la velocidad promedio del viento es 6,33 m/s y tomando como base un rotor de 2 metros, se sustituyen los valores en la ecuación 3:

$$P = \frac{1}{2} (0,98351685)(\pi)(2)^2(6,33)^3$$

$$P = \frac{1}{2} (0,98351685)(\pi)(4)(253,636137) = 1\ 567,3746$$

$$P = 1\ 567,3746 \text{ vatios}$$

El potencial eólico base calculado es 1 567,3746 vatios o 1,6kW, por encima de la demanda calculada en el capítulo 1 para un sitio de celda tipo rural que es de 1 356,1 vatios y muy aproximado a la demanda calculada para un sitio tipo nodo básico 1 664,1 vatios o bien 1,66 kW.

Con este cálculo realizado es posible iniciar a la selección de un aerogenerador que cumpla con los requerimientos de potencia necesaria para suministrar a un sitio de celda.

3.5. Modelo con aerogenerador de eje horizontal

Según se ha mostrado, se requiere un aerogenerador capaz de generar al sistema 36,94 kWh/día, lo que viene siendo unos 13 483,1 kWh/año. Sin olvidar la potencia de 1,66 kW que debe soportar.

Se utilizará un aerogenerador de eje horizontal ya que estos son más eficientes, menos costosos y tienen un mayor soporte en cuanto al desarrollo tecnológico que han tenido respecto de un aerogenerador de eje vertical. Para el estudio se tomará como base tres aerogeneradores disponibles en el mercado marca Enair. En la siguiente tabla se muestra el resumen de características de estos tres aerogeneradores:

Tabla XI. **Características de aerogeneradores Enair**

Modelo	Enair 30	Enair 70	Enair 160
Generador	250RPM, 24 polos, imanes de neodimio	250RPM, 24 polos, imanes de neodimio	250RPM, 24 polos, imanes de neodimio
Helices	3	3	3
Voltaje [VDC]	48	48	48
Potencia [W]	3 000	5 500	10 500
Potencia nominal [W]	1 500	3 500	7 500
Tipo	Horizontal a barlovento	Horizontal a barlovento	Horizontal a barlovento
Eficiencia	95 %	95 %	95 %
Peso [kg]	130	165	375
Largo [m]	2,9	3,4	4,3
Diametro [m]	3,2 / 4,1	4,1	6,1
Viento de arranque [m/s]	2	2	2
Velocidad nominal [m/s]	10 - 12	12	12
Velocidad soportada [m/s]	60	60	60

Fuente: elaboración propia, según portafolio de productos Enair.

Sabiendo la información de los aerogeneradores mostrada en la tabla X, se puede calcular la energía producida por cada generador anualmente utilizando la fórmula:

$$E \approx [2 - (V - 7)/4] D^2 V^3 \quad \text{ecuación (2)}$$

Donde:

D = diámetro en metros

V = velocidad en m/s

E = energía anual producida kWh

Sustituyendo valores del aerogenerador con $V = 6,33$ m/s:

$$E \approx [2 - (6,33 - 7)/4] (6,1)^2 (6,33)^3$$

$$E \approx [2 - (-0,67)/4] (37,21)(253,63)$$

$$E \approx [2 + 0,1675] (37,21)(253,63)$$

$$E \approx [2,1675] (9\,437,57)$$

$$\mathbf{E \approx 20\,455,94\,kWh}$$

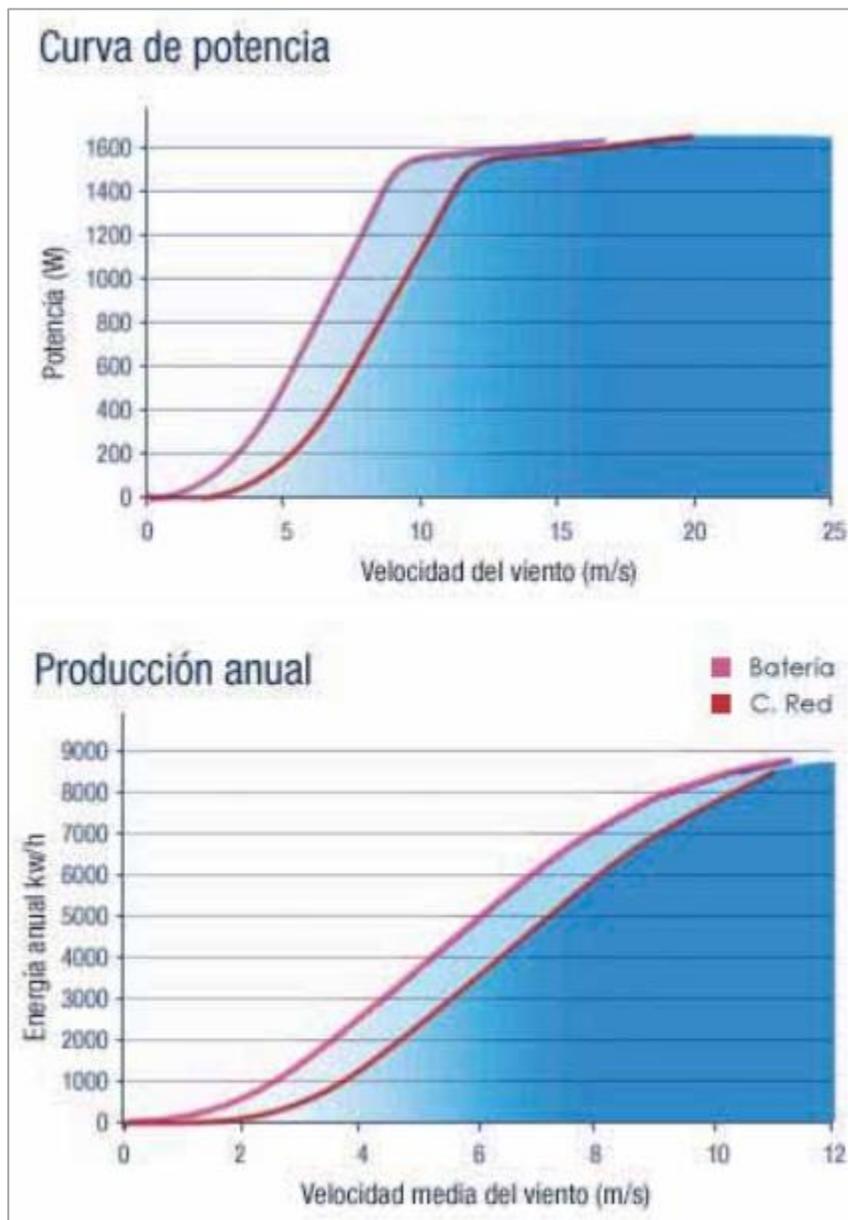
Por lo que la energía diaria teórica generada es:

$$\mathbf{E_d \approx 20\,455,94/365 \approx 56,04\,kWh}$$

Con esta energía diaria se puede alimentar el consumo diario de 36,94 kWh/día.

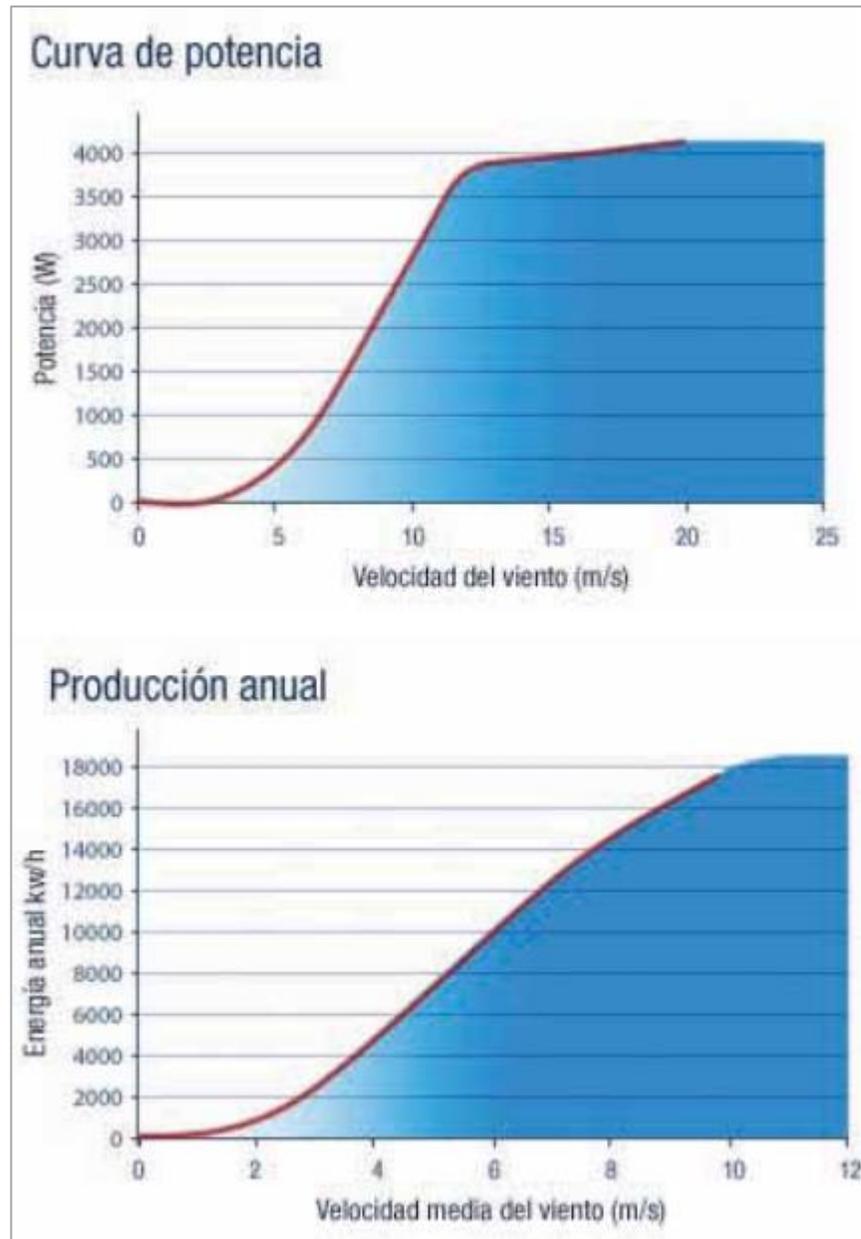
A continuación se muestran las curvas de rendimiento de los aerogeneradores propuestos para el estudio:

Figura 26. **Curvas de rendimiento Enair 30**



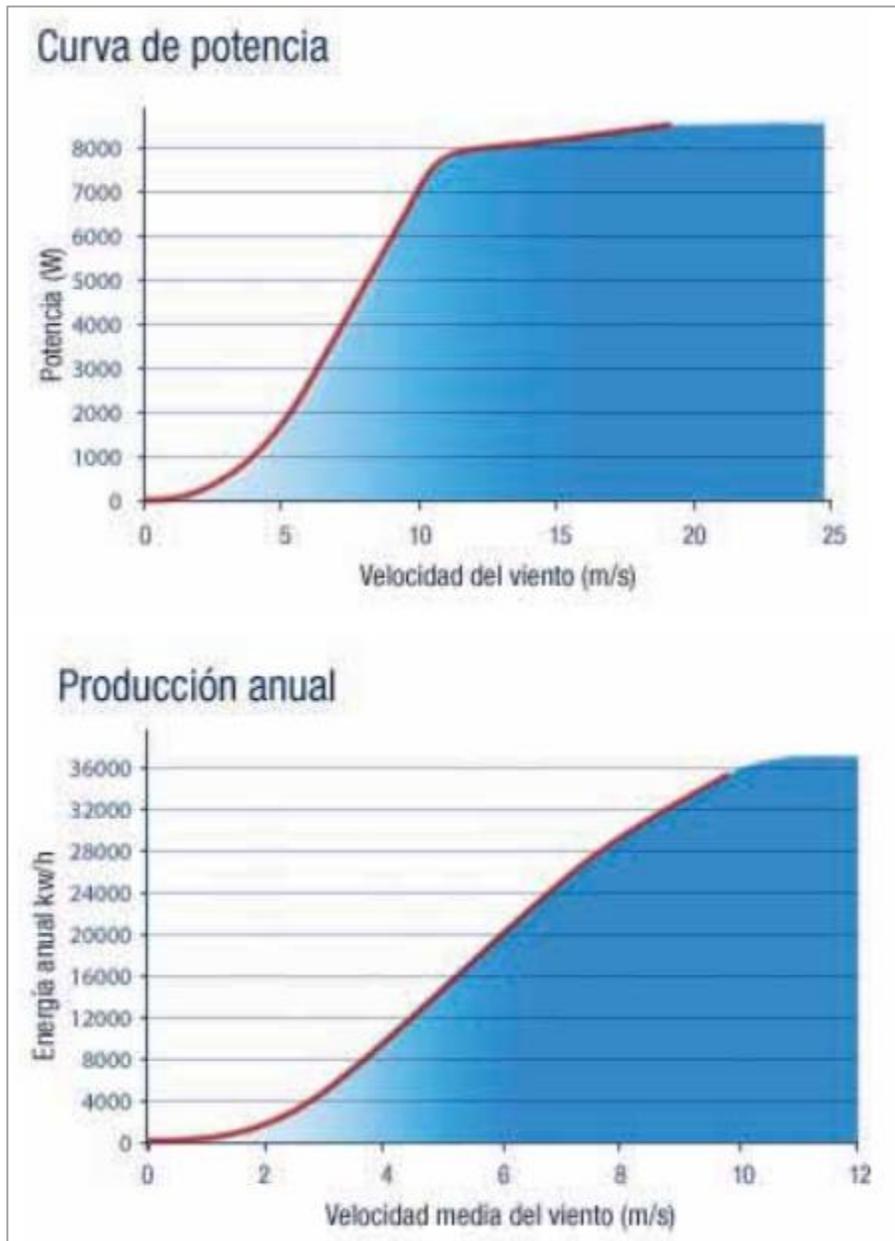
Fuente: portafolio de productos Enair. p. 3.

Figura 27. **Curvas de rendimiento Enair 70**



Fuente: portafolio de productos Enair. p. 4.

Figura 28. Curvas de rendimiento Enair 160



Fuente: Portafolio de productos Enair. p. 5.

Al saber que la velocidad promedio anual es de 6,33 m/s y observando las gráficas de curvas de rendimiento para cada generador, se ve que las potencias y energías anuales generadas para esta velocidad son aproximadamente como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla XII. **Generación Enair a velocidad 6,33 metros/segundo**

Modelo	Enair 30	Enair 70	Enair 160
P_{vpa} [W]	800	1 000	3 200
E_{vpa} [kWh/año]	5 500	10 800	22 000

Fuente: elaboración propia.

Se puede ver que la energía producida al año con una velocidad de 6,33 m/s para el aerogenerador Enair 160 equivale a aproximadamente 60,27 kWh/día comparado con el dato teórico que es 56,04 kWh/d, y para el Enair 70 a aproximadamente 29,58 kWh/día.

Con el modelo Enair 160 se puede suministrar a la celda los 36,94 kWh/día necesarios para la operación continua y hasta aproximadamente un 38,7 % de crecimiento.

El aerogenerador cuenta con una resistencia de frenado para detener el aerogenerador, lo cual facilita las tareas de supervisión y mantenimiento.

3.5.1. Generador de imán permanente DC

El generador por utilizar es de imanes permanentes de neodimio ya que son los que tienen mejores características magnéticas y soportan mayor temperatura, según vio en el capítulo 2. Este generador tiene 24 polos, diámetro de 6,1 m con 3 hélices, giro en sentido horario. Su potencia es 10 500 W y su potencia nominal curva es de 7 500 W.

Su velocidad de viento al arranque es 2m/s, nominal 12m/s.

El área de barrido de este aerogenerador es 30,17m², según indica el fabricante. Y si se calcula de la ecuación 4, se ve que:

$$A = \pi r^2$$

$$A = \pi(d/2)^2$$

$$A = \pi(6,1/2)^2 = \mathbf{29,22m^2}$$

Al sustituir la velocidad promedio de 6,33 m/s, el área de barrido calculada anteriormente y la densidad del aire $\rho = 0,98351685 \text{ Kg/m}^3$, encontrada en el capítulo 2, se puede encontrar la potencia instantánea:

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 V^3 \text{ ecuación (4)}$$

$$P = \frac{1}{2} (0,98351685)\pi(6,1/2)^2(6,33)^3$$

$$P = \frac{1}{2} (0,98351685)\pi(9,3025)(253,63)$$

$$P = \mathbf{3\ 645,04 \text{ vatios}}$$

Basándose en la teoría, 3 645,04 vatios es la potencia instantánea que el aerogenerador elegido puede aprovechar del viento en la aldea Samororo para suministrar la energía requerida, sin embargo, en la tabla XI se indica la potencia real 3 200 vatios que el fabricante ha obtenido luego de la experimentación, cifra que aun siendo relativamente menor, cumple con el requerimiento energético. Por esto se elige el aerogenerador horizontal Enair 160.

3.5.2. Capacidad de banco de baterías

Los bancos de baterías para telecomunicaciones se arman a partir de baterías de 12VDC, para llegar a 24VDC o 48VDC según se requiera, su capacidad se expresa en Ah (amperio-hora). Se sabe que el consumo diario será de, aproximadamente, 36,94 kWh/d, equivalentes a 36 940 vatios. Se ha de considerar que la descarga profunda de las baterías no supere el 70 % de su capacidad nominal, puesto que las baterías están diseñadas para un número finito de descargas profundas o ciclos de operación.

El número de descargas y la capacidad de descarga profunda que ofrece una batería dependen de sus características propias y de las que el fabricante proporciona. Se diseñará un banco de baterías con autonomía para tres días sin vientos fuertes, eligiendo un modelo de batería de la siguiente tabla:

Tabla XIII. **Baterías U-power**

Model	Nominal Voltage (V)	C5 to 10.2V (Ah)	C10 to 10.2V (Ah)	C100 to 10.2V (Ah)	Reserve capacity min.	Dimensions (mm)			Layout
						L	W	H	
UP-SP-57	12V	43	49	57	103	242	175	190	0
UP-SP-67	12V	50	57	67	125	278	175	190	0
UP-SP-83	12V	67	74	83	175	353	175	190	0
UP-SP-83X	12V	67	74	83	175	308	175	210	0
UP-SP-100	12V	75	85	100	210	345	175	230	0
UP-SP-160	12V	115	130	160	267	513	189	223	3
UP-SP-190	12V	135	150	190	336	513	223	223	3
UP-SP-220	12V	155	185	220	383	518	274	242	3
UP-SP-250	12V	185	200	250	496	518	274	242	3

Fuente: Enair, portafolio de producto 2014.

Para el cálculo del banco de baterías se tomará como base la batería UP-SP-250 tipo AGM con electrolito absorbido, usada en aplicaciones eólicas.

Dado:

$E_c = 36,94 \text{ kWh}$ (energía requerida por celda al día)

$E_{c(3\text{días})} = 110,82 \text{ kWh}$ (energía requerida por celda en 3 días)

Autonomía = $E_{c(3\text{días})} = 110,82 \text{ kWh}$

CB = autonomía/DOD ecuación (7)

Donde:

DOD = *Depth of Discharge* (profundidad de descarga 75 % para esta batería).

Autonomía = kWh necesarios para 3 días.

$$CB = (110,82 \text{ kWh}) / 0,75 = \mathbf{147,78 \text{ kWh.}}$$

Esto quiere decir que aplicando ya el ciclo de descarga profunda a las baterías, la capacidad del banco debe subir de 110,82 kWh a 147,78 kWh para cubrir 3 días de ausencia de velocidad promedio del viento.

Ahora se debe convertir los kWh a Ah, sabiendo que:

$$P_{\text{elec}} = V \cdot I \quad \text{ecuación (8)}$$

$$Ah = CB / V_{\text{bat}} \quad \text{ecuación (9)}$$

Donde V_{bat} es el voltaje nominal de la batería que conforma un banco de baterías.

Entonces:

$$Ah = 147,780 \text{ Wh} / 48V = \mathbf{3,078.75 \text{ Ah}}$$

Ahora se necesita saber el número series de baterías que conformarán el banco de 48V, dividiendo los Ah entre la capacidad Ah de la batería elegida (según tabla XII).

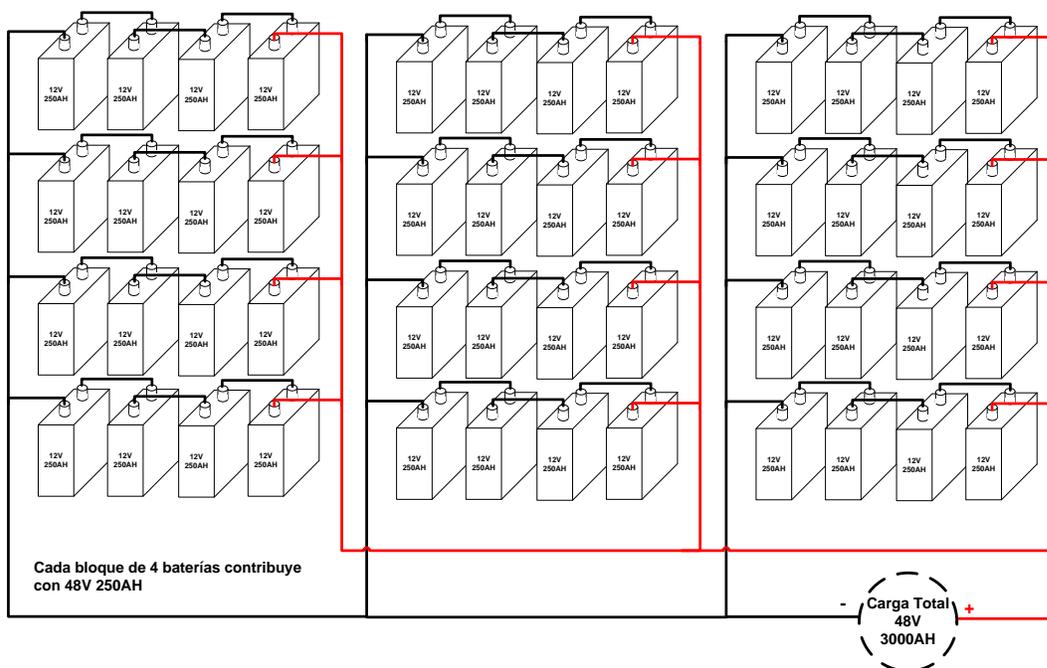
$$N_{\text{bat}} = Ah / Ah_{\text{bat}} \quad \text{ecuación (10)}$$

$$N_{\text{bat}} = 3\,078,75 \text{ Ah} / 250 \text{ Ah} = 12,315 \approx 12 \text{ series de baterías}$$

En base a los cálculos anteriores se puede concluir que la capacidad total del banco de baterías para tener una autonomía energética de 3 días es de 48V y 3 000Ah, conformado por una serie de 12 bancos de 4 baterías de 12V y 250Ah cada una. Estas baterías soportan hasta 500 ciclos de descarga a 75 % DOD y 1 000 ciclos de descarga, según norma IEC 61427.

En la figura 29 se observa el esquema de conexión del banco de baterías calculado.

Figura 29. Banco de baterías 48V 3 000AH



Fuente: elaboración propia.

3.5.3. Regulador eólico y control de carga de baterías

El control de carga de baterías es un regulador inversor AC/DC, que se encarga de convertir la corriente alterna trifásica que suministra el aerogenerador a corriente directa de 48V. A este regulador se conecta el banco de baterías para proporcionar la corriente de carga a las mismas, también se conecta la carga instalada de DC de la celda y un inversor DC/AC de ser necesario para alimentar cargas de AC comunes y de bajo consumo.

Las cargas de DC están compuestas por la BTS, radio enlaces, *switches* y otros dispositivos de transmisión de la celda.

El algoritmo de carga de baterías es PWM a tensión constante, pasa por cuatro etapas: inicial, absorción, flotación y ecualización. En etapa inicial se incrementa a una intensidad máxima conforme se cargan las baterías. En la etapa de absorción se utiliza tensión constante y se disminuye la corriente, entonces, esta disminuye hasta cierto valor e inicia la etapa de flotación, con una mínima corriente de carga para mantener la carga completa evitando algún exceso de gaseo.

Y en la etapa de ecualización se sobrecargan las baterías, esto se hace en períodos de tiempo espaciados en días, y por unas pocas horas, con esto se asegura la mezcla del electrolito para garantizar que todas las celdas cargan completamente.

Sabiendo que la potencia máxima consumida por la celda en determinado momento del día es de 1,66kW y que el voltaje suministrado por el regulador debe ser 48VDC, se llega a una corriente máxima 34,67 A (tabla VI), por lo que el regulador debe ser de al menos 48VDC y 35A de salida.

3.5.4. Protección contra descargas atmosféricas

Los aerogeneradores deben contar con un sistema de protección contra rayos para drenar estas descargas a tierra. Esta protección está conformada por un sistema de conductores receptores situados en las palas del aerogenerador. Estos receptores están conectados internamente de las palas por medio de un cable de cobre hasta la base de las palas, de esta forma el rayo será drenado desde las palas hacia la estructura de la góndola y luego a la de la torre que tiene conexión a tierra. Así el rayo no pasará a través de los rodamientos ni eje principal.

El sistema eléctrico del aerogenerador también cuenta con protectores de sobretensión. Estos sistemas de protección son diseñados para obtener un nivel máximo clase 1, según la norma IEC 61024-24.

3.6. Infraestructura requerida

El aerogenerador y el equipamiento asociado a este, requiere de cierto espacio físico y adecuaciones de infraestructura para ser instalado, por ello es de vital importancia tomar estas consideraciones.

3.6.1. Torre de aerogenerador

La torre es el elemento de infraestructura que sostiene en su totalidad el generador eólico, debe ser capaz de soportar el peso del aerogenerador y las cargas producidas por el viento. Se debe situar tomando en cuenta las obstrucciones que puedan interferir en la velocidad y dirección del viento, tales como casas y árboles.

Una recomendación por seguir es instalar la torre diez metros más alto que cualquier obstrucción presente y dejando una distancia del doble de su altura, según se muestra en la siguiente gráfica:

Figura 30. **Ubicación de torre de aerogenerador**



Fuente: Enair, *Manual de usuario aerogeneradores 30 y 70*. p. 27.

3.6.1.1. Torre tipo celosía

Estas son fabricadas con perfiles de acero soldados. Su principal ventaja es que utiliza aproximadamente la mitad de material que una tubular, por lo que su costo es menor. Es tan rígida como una tubular.

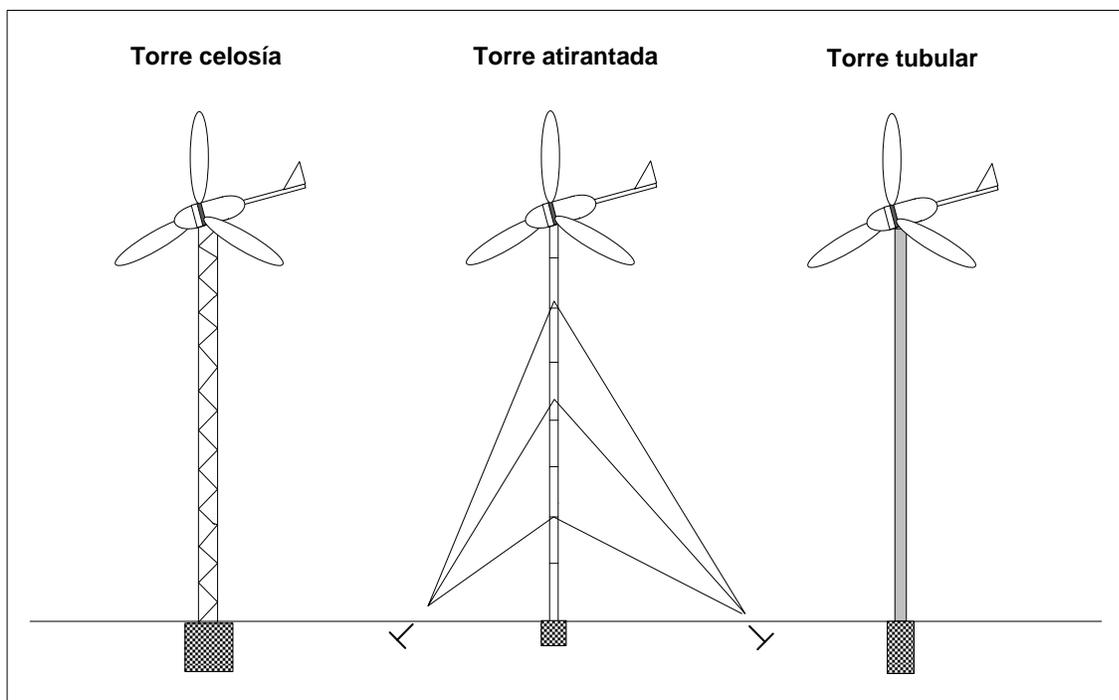
3.6.1.2. Torre tipo atirantada

Este tipo de torres está conformado por un mástil delgado sostenido con cables tensores (atirantada) y su principal ventaja es el ahorro de peso y, por tanto, de costo.

3.6.1.3. Torre tipo tubular

Está conformada por secciones de tubo metálico, que se arman en tierra y son izadas manualmente a través de un tráctel, pero en caso de no contar con este sistema de elevación de carga, se deberá hacer con grúa. Su base está anclada mediante tornillos que están fundidos en un cemento de concreto. Esta base de concreto abarca un área de aproximadamente 1x1 metros. Se considerará usar una torre tubular de 18 metros.

Figura 31. Tipos de torres para aerogenerador



Fuente: elaboración propia.

3.6.2. Terreno de celda

Un sitio de celda convencional debe tener, al menos, un área de 10x20 metros, este tamaño está definido así en base al tamaño de la torre de telefonía móvil, cuyas bases están distanciadas en un máximo de 7 metros entre sí, según sea requerido y a la cantidad de equipamiento del cual se compone la celda. Pero es necesaria un área mayor ya que se debe considerar el espacio físico que ocupará la torre del aerogenerador. La propuesta consiste en adquirir un área de terreno de 10x30 metros para contar con un área adecuada para realizar la instalación del aerogenerador.

3.6.2.1. Caseta de equipos Indoor

En el sitio de celda se debe construir una caseta de 3,80x3,80 metros externamente, para poder contar internamente con un área de 3,50x3,50 metros, equivalente a un área de 12,25 metros cuadrados. La altura interna de suelo a techo es de 3,14 metros.

Ahora bien, se debe tomar en cuenta que el banco de baterías está compuesto por 12 bancos de 4 baterías, cada batería mide 518x274x242 mm, entonces en una disposición horizontal de dos apilamientos de seis bancos de baterías se necesitaran 60x200x200 mm de espacio físico para instalar las baterías.

3.7. Montaje de equipos

Los equipos electrónicos que conforman el sistema de transmisión de datos, bancos de baterías, controlador de baterías y tableros de energía se ubicarán e instalarán dentro de la caseta de transmisión del sitio de celda.

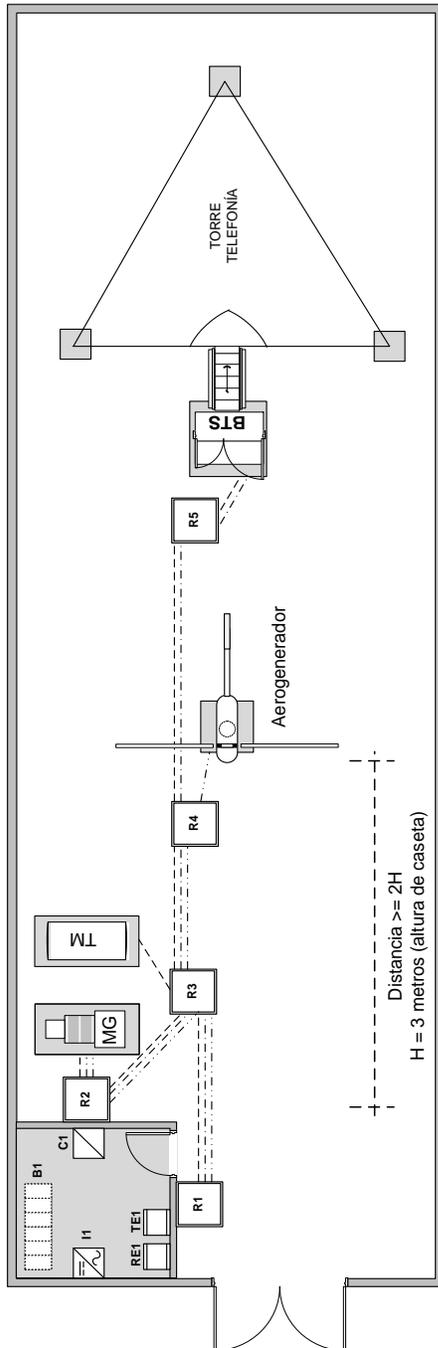
La BTS, motogenerador, tanque mensual son de tipo *outdoor* y se instalarán sobre bases de concreto fundido en intemperie.

La torre de telefonía móvil tiene una cimentación especial con bases de concreto fundido, y sobre esta torre se instala el sistema radiante de telefonía móvil compuesto por antenas. También acá se instalan las antenas del enlace de radio por microondas que sirve de transmisión de datos para la celda.

Se instalan cinco registros a 0,40 metros de profundidad y con tapadera de concreto, en estos convergen tres tubos de PVC de 2,5 pulgadas de diámetro por los cuales se deberá introducir el cableado de datos UTP CAT7 y *patch cords* de fibra óptica. En otro ducto deberá ir el cableado de energía 48VDC y en otro el cableado de energía de generación del aerogenerador hacia la caseta en donde se encuentra el controlador del aerogenerador.

La propuesta del montaje se muestra en la siguiente figura:

Figura 32. **Montaje de equipos en sitio de celda**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

3.7.1. Conductores por utilizar

Debido a que los equipos electrónicos instalados en la celda están ubicados a diferentes distancias de la fuente de alimentación, se debe considerar estas distancias para el cálculo del conductor. Todo conductor de cobre presenta una resistividad proporcional a su área de sección y longitud, por lo que esto ocasionará una caída de tensión que hay que considerar en la elección del conductor.

Entre los equipos de telecomunicaciones y el sistema de rectificación no deberá existir una caída de tensión que exceda los 5 VDC. Para calcular la caída de tensión se utilizará la fórmula, de IEC 60364:

$$CT = \frac{2L * R_L * I}{1000}$$

Donde:

CT = caída de tensión, en voltios

L = largo del conductor, en metros

R_L = resistencia en CC a 75°C de tabla XIII, en ohm/km

I = corriente del conductor, en amperios

Se toman las intensidades calculadas en el capítulo uno, tabla VI, y se calcula la caída de tensión tomando de referencia las distancias a las que se hará el montaje de equipos en el sitio de celda, según se muestra en la siguiente tabla:

Tabla XIV. **Cálculo de CT y determinación del calibre del conductor**

EQUIPO	AWG	RL [ohm/km]	I [A]	V [VDC]	L [m]	CT [VDC]
DBS3900	12	6,5	21,88	48	30	8,53
	10	4,07	21,88	48	30	5,34
	8	2,551	21,88	48	30	3,35
	6	1,608	21,88	48	30	2,11
ME-3600X-24FS-M	14	10,7	4,85	48	5	0,52
iPASOLINK 200	14	10,7	1,56	48	5	0,17
ETX-201/H	14	10,7	0,13	48	5	0,01
Iluminación	14	10,7	6,25	48	7	0,94
Protección principal	6	1,608	34,67	48	3	0,33
Protección banco de baterías	6	1,608	34,67	48	3	0,33

Fuente: elaboración propia.

Para la BTS (DBS3900) el calibre 12 AWG/THHN soportaba la corriente de 21,88 amperios, según tabla XV, pero la caída de tensión sería 8,53 VDC, producida en el conductor debido a la distancia L, por lo que excede los 5 VDC máximos permitidos. Entonces se recalcula hasta llegar a un calibre 6 AWG/THHN que minimiza la caída de tensión a 2,11 VDC que es aceptable para este equipo.

La resistividad para cada calibre de conductor se debe tomar de la tabla XIV, publicado por la *National Electrical Code*, edición 2011, donde la resistividad del cobre se mide en ohm/km a una temperatura de 75°C.

Tabla XV. Propiedades básicas de los conductores de hilos de cobre

Size (AWG or kcmil)	Conductors										Direct-Current Resistance at 75°C (167°F)					
	Area		Quantity	Stranding		Overall				Copper						
	mm ²	Circular mils		Diameter		Diameter		Area		Uncoated		Coated		Aluminum		
				mm	in.	mm	in.	mm ²	in. ²	ohm/ km	ohm/ kFT	ohm/ km	ohm/ kFT	ohm/ km	ohm/ kFT	
18	0.823	1620	1	—	—	1.02	0.040	0.823	0.001	25.5	7.77	26.5	8.08	42.0	12.8	
18	0.823	1620	7	0.39	0.015	1.16	0.046	1.06	0.002	26.1	7.95	27.7	8.45	42.8	13.1	
16	1.31	2580	1	—	—	1.29	0.051	1.31	0.002	16.0	4.89	16.7	5.08	26.4	8.05	
16	1.31	2580	7	0.49	0.019	1.46	0.058	1.68	0.003	16.4	4.99	17.3	5.29	26.9	8.21	
14	2.08	4110	1	—	—	1.63	0.064	2.08	0.003	10.1	3.07	10.4	3.19	16.6	5.06	
14	2.08	4110	7	0.62	0.024	1.85	0.073	2.68	0.004	10.3	3.14	10.7	3.26	16.9	5.17	
12	3.31	6530	1	—	—	2.05	0.081	3.31	0.005	6.34	1.93	6.57	2.01	10.45	3.18	
12	3.31	6530	7	0.78	0.030	2.32	0.092	4.25	0.006	6.50	1.98	6.73	2.05	10.69	3.25	
10	5.261	10380	1	—	—	2.588	0.102	5.26	0.008	3.984	1.21	4.148	1.26	6.561	2.00	
10	5.261	10380	7	0.98	0.038	2.95	0.116	6.76	0.011	4.070	1.24	4.226	1.29	6.679	2.04	
8	8.367	16510	1	—	—	3.264	0.128	8.37	0.013	2.506	0.764	2.579	0.786	4.125	1.26	
8	8.367	16510	7	1.23	0.049	3.71	0.146	10.76	0.017	2.551	0.778	2.653	0.809	4.204	1.28	
6	13.30	26240	7	1.56	0.061	4.67	0.184	17.09	0.027	1.608	0.491	1.671	0.510	2.652	0.808	
4	21.15	41740	7	1.96	0.077	5.89	0.232	27.19	0.042	1.010	0.308	1.053	0.321	1.666	0.508	
3	26.67	52620	7	2.20	0.087	6.60	0.260	34.28	0.053	0.802	0.245	0.833	0.254	1.320	0.403	
2	33.62	66360	7	2.47	0.097	7.42	0.292	43.23	0.067	0.634	0.194	0.661	0.201	1.045	0.319	
1	42.41	83690	19	1.69	0.066	8.43	0.332	55.80	0.087	0.505	0.154	0.524	0.160	0.829	0.253	
1/0	53.49	105600	19	1.89	0.074	9.45	0.372	70.41	0.109	0.399	0.122	0.415	0.127	0.660	0.201	
2/0	67.43	133100	19	2.13	0.084	10.62	0.418	88.74	0.137	0.3170	0.0967	0.329	0.101	0.523	0.159	
3/0	85.01	167800	19	2.39	0.094	11.94	0.470	111.9	0.173	0.2512	0.0766	0.2610	0.0797	0.413	0.126	
4/0	107.2	211600	19	2.68	0.106	13.41	0.528	141.1	0.219	0.1996	0.0608	0.2050	0.0626	0.328	0.100	
250	127	—	37	2.09	0.082	14.61	0.575	168	0.260	0.1687	0.0515	0.1753	0.0535	0.2778	0.0847	
300	152	—	37	2.29	0.090	16.00	0.630	201	0.312	0.1409	0.0429	0.1463	0.0446	0.2318	0.0707	
350	177	—	37	2.47	0.097	17.30	0.681	235	0.364	0.1205	0.0367	0.1252	0.0382	0.1984	0.0605	
400	203	—	37	2.64	0.104	18.49	0.728	268	0.416	0.1053	0.0321	0.1084	0.0331	0.1737	0.0529	
500	253	—	37	2.95	0.116	20.65	0.813	336	0.519	0.0845	0.0258	0.0869	0.0265	0.1391	0.0424	
600	304	—	61	2.52	0.099	22.68	0.893	404	0.626	0.0704	0.0214	0.0732	0.0223	0.1159	0.0353	
700	355	—	61	2.72	0.107	24.49	0.964	471	0.730	0.0603	0.0184	0.0622	0.0189	0.0994	0.0303	
750	380	—	61	2.82	0.111	25.35	0.998	505	0.782	0.0563	0.0171	0.0579	0.0176	0.0927	0.0282	
800	405	—	61	2.91	0.114	26.16	1.030	538	0.834	0.0528	0.0161	0.0544	0.0166	0.0868	0.0265	
900	456	—	61	3.09	0.122	27.79	1.094	606	0.940	0.0470	0.0143	0.0481	0.0147	0.0770	0.0235	
1000	507	—	61	3.25	0.128	29.26	1.152	673	1.042	0.0423	0.0129	0.0434	0.0132	0.0695	0.0212	
1250	633	—	91	2.98	0.117	32.74	1.289	842	1.305	0.0338	0.0103	0.0347	0.0106	0.0554	0.0169	
1500	760	—	91	3.26	0.128	35.86	1.412	1011	1.566	0.02814	0.00858	0.02814	0.00883	0.0464	0.0141	
1750	887	—	127	2.98	0.117	38.76	1.526	1180	1.829	0.02410	0.00735	0.02410	0.00756	0.0397	0.0121	
2000	1013	—	127	3.19	0.126	41.45	1.632	1349	2.092	0.02109	0.00643	0.02109	0.00662	0.0348	0.0106	

Fuente: *National Electrical Code*, edición 2011, p. 70-721. Consulta: agosto 2016.

La siguiente tabla muestra la ampacidad de dos o tres conductores aislados para un rango de 0 a 2 000 voltios, llevando corriente en el mismo cable y a una temperatura ambiente de 30°C.

Tabla XVI. Ampacidad permitida para conductores aislados

Size (AWG or kcmil)	Temperature Rating of Conductor. [See Table 310.104(A).]						Size (AWG or kcmil)
	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	
	Types TW, UF	Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, ZW	Types THHN, THHW, THW-2, THWN-2, RHH, RWH-2, USE-2, XHHW, XHHW-2, ZW-2	Type TW	Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW	Types THHN, THHW, THW-2, THWN-2, RHH, RWH-2, USE-2, XHHW, XHHW-2, ZW-2	
	COPPER			ALUMINUM OR COPPER-CLAD ALUMINUM			
14	16**	18**	21**	—	—	—	14
12	20**	24**	27**	16**	18**	21**	12
10	27**	33**	36**	21**	25**	28**	10
8	36	43	48	28	33	37	8
6	48	58	65	38	45	51	6
4	66	79	89	51	61	69	4
3	76	90	102	59	70	79	3
2	88	105	119	69	83	93	2
1	102	121	137	80	95	106	1
1/0	121	145	163	94	113	127	1/0
2/0	138	166	186	108	129	146	2/0
3/0	158	189	214	124	147	167	3/0
4/0	187	223	253	147	176	197	4/0

Fuente: *National Electrical Code*, edición 2011, p. 70-731. Consulta: agosto 2016.

3.7.2. Protección de equipos DC

Es importante calcular las protecciones necesarias para los diferentes circuitos DC que se habilitarán, es por ello que en base a las corrientes máximas calculadas (I) según especificaciones de las fuentes de alimentación de cada equipo, se debe aplicar un margen de protección de 1,25.

En la siguiente tabla se muestran los *breakers SQUARE D* tomados de referencia para hacer la elección del ideal con base en la corriente de protección I_p , según norma IEC 60269:

$$I_p = I \cdot 1,25 \quad \text{ecuación (11)}$$

Donde:

I_p = corriente de protección en amperios.

I = la corriente máxima de fuente por equipo.

Tabla XVII. **Capacidades de interruptores para DC**

Interruptores QO				
Tipo: Protección: Uso:	Interruptor QO Clásico Sobrecarga y cortocircuito principal y áreas generales		Interruptor QO-GFI falla a tierra, electrocución áreas húmedas y exterior	
Corriente	1 Polo	2 Polos	1 Polo	2 Polos
10 A	QO110	QO210		
15 A	QO115	QO215	QO115GFI	QO215GFI
20 A	QO120	QO220	QO120GFI	QO220GFI
30 A	QO130	QO230	QO130GFI	QO230GFI
40 A	QO140	QO240		QO240GFI
50 A	QO150	QO250		QO250GFI
60 A	QO160	QO260		
70 A	QO170	QO270		
80 A		QO280		
90 A		QO290		
100 A		QO2100		

Fuente: <http://www.schneider-electric.com.mx>. Consulta: agosto 2016.

Aplicando la ecuación 11, se encuentra la corriente de protección para equipos DC y se hace la elección del *breaker* en función de los disponibles según la tabla XVI. El resultado de este cálculo se muestra en la siguiente tabla:

Tabla XVIII. **Cálculo de *breakers* DC**

EQUIPO	I [A]	V [VDC]	I _p [A]	Breaker [A]
DBS3900	21,88	48	27,35	30
ME-3600X-24FS-M	4,85	48	6,06	10
iPASOLINK 200	1,56	48	1,95	10
ETX-201/H	0,13	48	0,16	10
Iluminación	6,25	48	7,81	10
Protección principal	34,67	48	43,34	50
Protección banco de baterías	34,67	48	43,34	50

Fuente: elaboración propia.

Se usará un tablero metálico de uso en interiores y para empotrar en pared, tipo NEMA 1, con protección principal y 20 espacios para *breakers*.

Figura 33. **Tablero de distribución**



Fuente: <http://www.schneider-electric.com.mx>. Consulta. agosto 2016.

3.8. Sistema de energía eólico autónomo

Se han definido los equipos por usar y sus capacidades de generación para el aerogenerador, capacidad de almacenaje de energía en el caso del banco de baterías. Así como también los calibres de cable por utilizar para transportar corriente DC desde el tablero de distribución hacia las cargas y sus respectivas protecciones en base a la corriente máxima demanda por cada equipo.

El sistema de energía eólico será alimentado por un viento promedio anual de 6,33 m/s, este producirá una energía diaria de 56,04 kWh/d, lo cual podrá mantener en operación constante la carga instalada en la celda, que demanda aproximadamente 36,94 kWh/d al sistema.

La autonomía energética si hubiese baja velocidad del viento o nula será de tres días, según se calculó el banco de baterías. Y cabe mencionar que por factor viento, hay meses en los que la velocidad del viento será baja y habrá un déficit de energía, por lo cual será necesario el uso de un motogenerador para producir la energía faltante, según se ve en la siguiente tabla:

Tabla XIX. Déficit energético eólico

MES	Velocidad viento promedio aldea Samororo (m/s)	Energía diaria generada $E = [2 - (V-7)/4]D^2V^3/365$	(Deficit E) [kWh/d]	Energía diaria aerogenerador [kWh/d]	Energía diaria motogenerador [kWh/d]	Energía mensual aerogenerador [kWh/d]	Energía diaria motogenerador [kWh/d]
ENERO	9,35	117,7	80,76	36,94		1 145,14	
FEBRERO	7,1	72,06	35,12	36,94		1 034,32	
MARZO	7,4	78,49	41,55	36,94		1 145,14	
ABRIL	5,1	33,47	(3,47)	33,47	3,47	1 004,09	104,11
MAYO	3,96	17,47	(19,47)	17,47	19,47	541,66	603,48
JUNIO	3,8	15,66	(21,28)	15,66	21,28	469,89	638,31
JULIO	5,4	38,53	1,59	36,94		1 145,14	
AGOSTO	4,63	26,23	(10,71)	26,23	10,71	813,19	331,95
SEPTIEMBRE	3,63	13,86	(23,08)	13,86	23,08	415,82	692,38
OCTUBRE	5,77	45,19	8,25	36,94		1 145,14	
NOVIEMBRE	9,17	114,57	77,63	36,94		1 108,20	
DICIEMBRE	8,05	92,40	55,46	36,94		1 145,14	
GENERACIÓN ANUAL TOTAL						11 1123,87	2 370,23

Fuente: elaboración propia.

En la tabla anterior se observa que en los meses de abril, mayo, junio, agosto y septiembre el déficit de energía eólica es de 78 kWh/d, y si se proyecta a días por mes, se tendrá un déficit de 2 370,23 kWh anual que por cuestiones de variabilidad del viento no es posible cubrir. Entonces es aquí donde se debe utilizar un grupo electrógeno por 5 meses al año, equivalente a 150 días. El déficit repartido por día para los 150 días será de 15,8 kWh/d.

Comercialmente, los motores generadores inician en capacidades de 10kW, y son estos los existentes y utilizados en sitios de celda, por lo que se debe considerar un motogenerador existente de esa capacidad.

Un motogenerador de 10kW, con una capacidad de 50 litros (13.22 galones) en su base de tanque y con autonomía de 16 horas al 90 % de capacidad es una solución razonable en consumo de diésel. El tiempo de operación para el motogenerador y el aerogenerador para estos meses será de 10 horas diarias equivalente a un 42,77 % de la energía generada y 14 horas 57,76 % equivalente a un 57,23 % y respectivamente.

En régimen *50 % of prime power* el motor marca Perkins 403D-11G del generador Selmec modelo S10P tiene un consumo de diésel de 1.7 L/hr, por lo que si este funcionará 10 horas continuas diarias por 150 días, necesitará 2 550 litros anuales para operar.

Entonces, el sistema autónomo eólico aportará al sistema el 82,42 % de la energía anual requerida, mientras que el grupo electrógeno el 17,58 % para completar los 13 483,1 kWh/año.

Ahora bien, se debe tomar cuenta que el banco de baterías está diseñado para operar continuamente por 3 días aportando 110,82 kWh al sistema autónomo eólico. Y considerando que el proyecto está proyectado a 25 años, tendríamos 20 descargas a 75 % DOD al año, ya que el máximo de descargas de ese tipo son 500 para este tipo de baterías. Entonces se puede realizar un plan energético para la generación anual total del sistema eólico tal como se muestra a continuación:

Tabla XX. **Generación anual total**

MES	Velocidad viento promedio aldea Samotoro (m/s)	Energía diaria generada $E = [2 - (V-7)/4]D^3/365$	(Deficit E) [kWh/d]	Energía diaria aerogenerador [kWh/d]	Energía diaria motogenerador [kWh/d]	Energía mensual aerogenerador [kWh/d]	Energía mensual banco de baterías [kWh/d]	Energía mensual motogenerador [kWh/d]	Descargas anuales de baterías
ENERO	9,35	117,7	80,76	36,94		1 145,14			
FEBRERO	7,1	72,06	35,12	36,94		1 034,32			
MARZO	7,4	78,49	41,55	36,94		1 145,14			
ABRIL	5,1	33,47	(3,47)	33,47	3,47	1 004,09	110,82		1,00
MAYO	3,96	17,47	(19,47)	17,47	19,47	541,66	443,28	160,2	4,00
JUNIO	3,8	15,66	(21,28)	15,66	21,28	469,89	664,92		6,00
JULIO	5,4	38,53	1,59	36,94		1 145,14			
AGOSTO	4,63	26,23	(10,71)	26,23	10,71	813,19	332,46		3,00
SEPTIEMBRE	3,63	13,86	(23,08)	13,86	23,08	415,82	664,92	27,46	6,00
OCTUBRE	5,77	45,19	8,25	36,94		1 145,14			
NOVIEMBRE	9,17	114,57	77,63	36,94		1 108,20			
DICIEMBRE	8,05	92,40	55,46	36,94		1 145,14			
GENERACIÓN ANUAL TOTAL POR TIPO						11 112,87	2 216,40	187,66	20,00
GENERACIÓN ANUAL TOTAL						13 516,93			

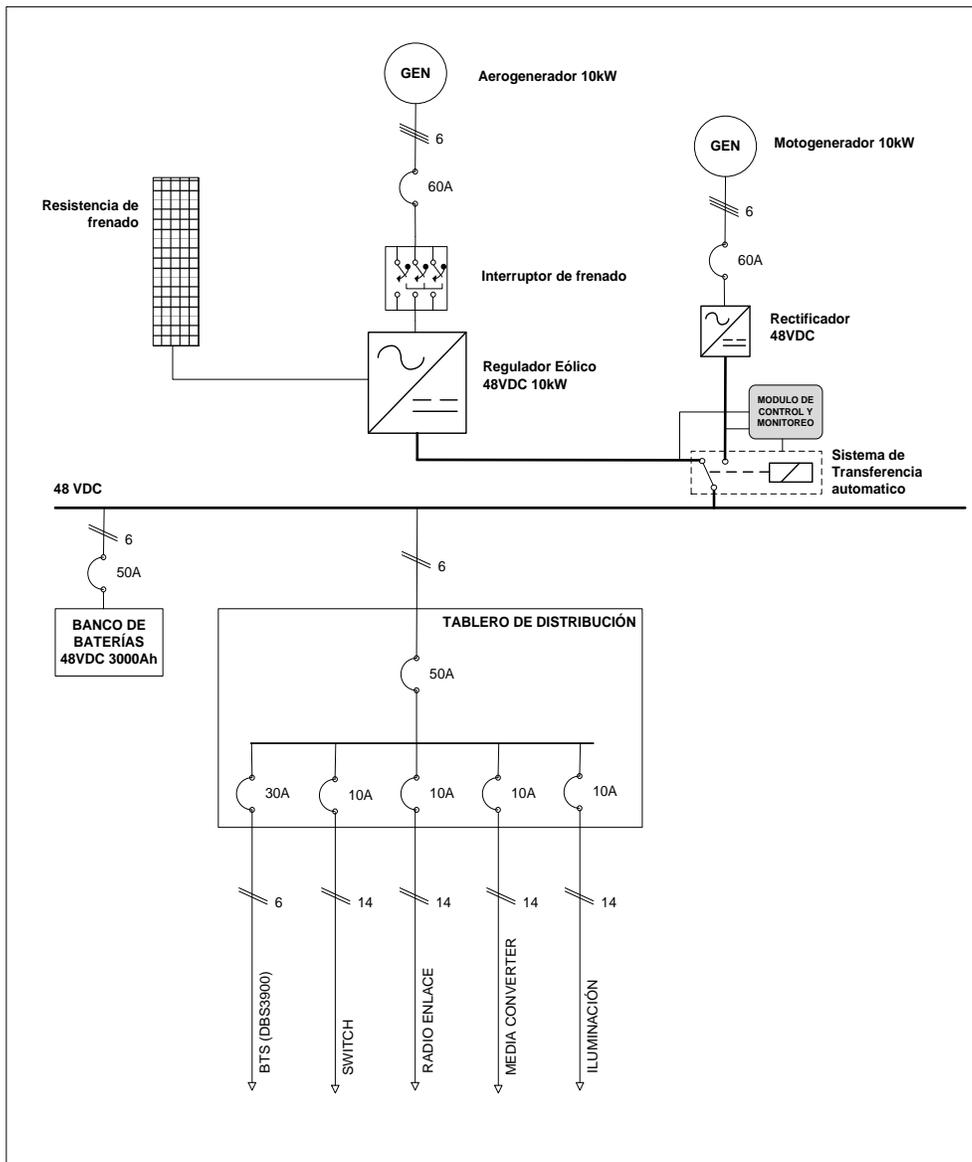
Fuente: elaboración propia.

Se observa que optimizando las descargas del banco de baterías se puede bajar considerablemente la dependencia de utilización del motogenerador hasta unos 187,66 kWh al año, y la generación alcanzará los 13 516,93 kWh anuales.

La autonomía energética del sistema autónomo es alcanzable casi en su totalidad, pero se debe considerar que el banco de baterías debe también crecer. Debido a que la celda ya cuenta con un motogenerador, se puede mantener su utilización y con un constante monitoreo para llevar a la práctica un sitio totalmente independiente de energía eléctrica comercial y generación por diésel.

A continuación se muestra el diagrama unifilar eléctrico del sistema de generación eólico:

Figura 34. Sistema de energía eólico para una celda de telecomunicaciones



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

El aporte de generación eléctrica para el sistema autónomo será:

Tabla XXI. **Aporte de generación del sistema**

Generación	kWh anual	Porcentaje de aporte
Requerida	13 483,10	100 %
Banco de baterías	2 216,40	16,44 %
Eólico	11 112,87	82,42 %
Motogenerador	187,66	1,39 %
Generación anual	13 516,93	100,25 %

Fuente: elaboración propia.

4. BENEFICIOS DE IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA

Los principales beneficios de la implementación de energía eólica son ambientales, ya que se reducen los requerimientos de generación por medio de combustibles y también económicos, puesto que el costo de generación disminuye ya que se vuelve propio y el costo de distribución se elimina.

4.1. Beneficios ambientales

La energía eólica tiene muchas ventajas ambientales, ya que es limpia, renovable, además de ser un tipo de generación sustentable. Es posible mencionar algunos de sus beneficios principales:

- No produce emisiones de CO₂.
- Permite su desarrollo sin expoliar la naturaleza, conservando con esto el medio ambiente.
- Una unidad de kWh de electricidad generada con turbinas eólicas puede desplazar una unidad generada por una central por quema de hidrocarburos, evitando emisiones de gases de efecto invernadero.
- Cada kWh de electricidad generado por un aerogenerador, evita lo producido por una central de carbón: 0,60 Kg de CO₂ (dióxido de carbono), además de 1,33 gramos de SO₂ (dióxido de azufre) y 1,67 gramos de NxOy (óxido de nitrógeno).

- Es inagotable y renovable continuamente.
- No genera residuos peligrosos ni riesgos de accidentes.
- Respecto de la generación hidroeléctrica en Guatemala, es un complemento importante, ya que en verano cuando la generación hidroeléctrica presenta sus niveles más bajos, la generación eólica tiene sus niveles más altos. Generalmente la disminución de las precipitaciones coincide con el aumento de la velocidad del viento.

4.2. Beneficios económicos

Entre los beneficios económicos es posible mencionar:

- Representa un ahorro en reservas de combustibles fósiles en general.
- Tiende a ser cada vez más barata conforme avanza la tecnología.
- Ahorra en gastos de operación, debido a que disminuye notablemente el gasto en la adquisición de diésel para la generación de energía eléctrica.
- Incentiva la economía debido a la incursión de nuevas empresas proveedoras de equipamiento y servicios para generación eólica.
- Existen incentivos para desarrollar proyectos de generación eólica.

En Guatemala para iniciar y realizar las gestiones de la implementación de un proyecto de generación eólico, se debe realizar el trámite para solicitud de calificación de incentivos para proyectos que utilizan recursos energéticos renovables según Decreto 52-2003 publicado por el Ministerio de Energía y Minas (MEM).

De la misma forma se debe completar los formularios en instructivos para la presentación de solicitud de calificación y aplicación de incentivos fiscales para proyectos que utilicen recursos energéticos renovables. Estos son los sistemas avalados por el MEM para gozar de incentivos:

- Sistema de generación (turbina, generador, sistema electrógeno, todos con sus componentes, controles, protecciones y accesorios).
- Sistema de almacenamiento de energía.
- Sistema de datos meteorológicos.
- Sistema de inversión y sincronización.
- Sistema lubricación.
- Sistema de refrigeración.
- Sistema de servicios auxiliares.
- Sistema de supervisión, control y adquisición de datos del proceso de generación de energía.

- Sistema de tierra física para cada aerogenerador.

4.2.1. Ahorro de energía eléctrica comercial

Un sistema de generación de energía eólica para una celda de telefonía celular se empleará en una región en la cual no hay cobertura de la red de suministro de energía eléctrica comercial o porque se quiere aprovechar este tipo de generación renovable.

Se ha mencionado que el consumo máximo anual de energía requerido por la celda es de 13 483,1 kWh/año, por lo que implica una energía mensual de 1 124 kWh. Tomando como base que en el área de aldea Samororo es la empresa EEM Jalapa la que distribuye energía eléctrica y tiene una tarifa que indica un precio de Q.1,379678 por kWh, entonces se puede decir que el consumo mensual con energía comercial sería:

Figura 35. Costo de energía eléctrica comercial mensual

DETALLE DE CARGOS	Precios	Consumo kWh	Importe Q.
Cargo fijo por usuario	13.923681		13.92
Costo de energía kWh	1.379678	1124 kWh	1,550.76
(a)Aporte tarifa social INDE	No Aplica	0 kWh	0.00
Total Consumo kWh		1124 kWh	0.00
Total Cargo			1,564.68
Total IVA			187.76
(b)Servicio alumbrado publico			0.00
(c)TOTAL A PAGAR			1,752.44

Fuente: http://www.cnee.gob.gt/Calculadora/facturas_bts.php. Consulta: agosto 2016.

Se concluye que mensualmente se tendría un ahorro de Q.1 752,44 y anualmente Q.21 029,28. Al implementar un sistema de energía eólico, este suministraría la energía parcial o total a la celda.

4.2.2. Reducción de gastos de operación y mantenimiento

Debido a que se plantea que un sistema eólico estará presente en una celda lejana, en donde no se tiene presencia de energía eléctrica comercial, se supone que únicamente funciona con un sistema electrógeno, entonces esto requiere que continua y periódicamente, personal de operación y mantenimiento se movilice al sitio para realizar el abastecimiento de diésel al tanque mensual que provee de diésel al motogenerador ubicado en la celda.

Además, este personal también realiza trabajos programados de mantenimiento y de haber alguna falla de cualquier índole, incluyendo el corte de energía por cualquier motivo, deben movilizarse a dicha celda para solucionar el problema. Es por eso que al implementar un sistema eólico, disminuirán considerablemente los gastos de operación, ya que no se requerirá de movilización continua mientras el sistema eólico, baterías y motogenerador funcionen de acuerdo con el plan que la empresa defina. Entre los gastos que disminuyen con la implementación del sistema eólico se tienen:

- Combustible para vehículos, depreciación y arrendamiento
- Diésel para sistema electrógeno
- Mantenimiento del sistema electrógeno
- Servicios de mano de obra

4.2.3. Ahorro por operación de banco de baterías

Es necesario tomar en cuenta que la inversión de baterías para la conformación del banco de baterías es considerablemente alta, pero estas están diseñadas para operar hasta para 500 ciclos de descarga a 75 % DOD según ser analizó previamente. Si el proyecto está proyectado a 25 años, entonces es posible realizar un plan de ciclos de descarga periódicos aunque no sean por falla de energía. Esto implicaría realizar 20 descargas por año, y con la autonomía de 3 días por energía almacenada en estas, significarían 60 días o bien 1 440 horas de operación anuales.

Estos 60 días de operación de baterías equivalen a 2 216,4 kWh de los 13 483,1 kWh necesarios al año, y tomando en cuenta que el precio es de Q.1,379678 por kWh se tendría un ahorro anual de Q.3 592,96.

4.2.4. Ahorro en consumo de diésel para generación

Si la celda de la aldea Samororo funcionara únicamente con un grupo electrógeno, entonces utilizaría una gran cantidad de galones de diésel al año. El motogenerador tiene un consumo de diésel de 1.7 L/hr, por lo que es posible proyectar su consumo al año.

$$CD_A = 1,7 \text{ L/hr} * 8\,760 \text{ hr}_A = 14\,892$$

El consumo sería de 14 892 litros de diésel al año, equivalentes a 3 940 galones.

Para septiembre de 2016, el MEM publica un precio promedio del diésel para el área metropolitana de Q.17,05. Entonces si el sitio de celda opera todo el año con energía generada por combustión de diésel, el gasto anual de operación sería Q.67 177,00.

Con la implementación del sistema de generación eólico únicamente se necesitaría generar 187,66 kWh anuales por medio de combustión de diésel. Esto equivale a 5,1 días o 123 horas. Entonces, el consumo de diésel por litro sería:

$$C_{DA} = 1,7 \text{ L/hr} * 123\text{hr}_A = 209,1 \text{ litros}$$

Estos 209,1 litros equivalen a 56 galones de diésel anuales, lo que daría un gasto anual de operación de Q.904,80. Se presenta así un ahorro de Q.66 272,20 anuales.

4.3. Evaluación económica

La evaluación económica indicará si el proyecto de implementación de un sistema de generación eólico es rentable o no. Para esta evaluación se calculará el VAN (Valor Actual Neto) y la TIR (Tasa Interna de Retorno), como criterios de decisión para realizar o no el proyecto.

El VAN consiste en convertir los valores de los diferentes períodos de tiempo a un valor presente, considerando una tasa de interés (tasa de descuento) para todos los flujos de efectivo para el análisis del proyecto. A continuación se muestra la fórmula para sacar el VAN:

$$VAN = \sum_{i=1}^n \frac{Fci}{(1 + k)^i} - I$$

Donde:

Fci = corresponde al flujo de caja en un periodo i

k = la tasa interés (tasa de descuento)

I = inversión inicial

n = es el número de períodos considerado

El criterio para evaluar el VAN es:

VAN > 0 → el proyecto se acepta y es rentable

VAN = 0 → el proyecto no genera ganancia

VAN < 0 → el proyecto no es rentable y se rechaza

La TIR es un índice de rentabilidad muy aceptado, y es la tasa de interés en la cual el VAN es 0. Entre mayor sea la TIR y más alejada esté de la tasa de descuento, más rentable será el proyecto.

Para realizar este análisis se realizará el flujo de caja, que contenga ingresos y egresos anuales. La vida útil del aerogenerador es de 25 años, por lo que este será el período de evaluación del proyecto. Se utilizarán precios aproximados en base a los precios comerciales del mercado actual. También se utiliza la tabla XIX para calcular los costos de generación, tanto para energía eólica como para energía por combustión de diésel. Se toma una tasa de descuento $k = 10 \%$

Se considera que el sitio de celda está en una ubicación geográfica estratégica para las telecomunicaciones, pero no hay suministro de red eléctrica comercial, por lo que se deberá evaluar si el proyecto opera con generación por medio de diésel o se elige la propuesta eólica.

Tabla XXII. Generación eólica frente a generación comercial

Bien y servicio	Año 0 inversión inicial	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5											
Aerogenerador	Q97 677,45																
Torre autosoportable	Q21 746,10																
Servicio de instalación (30 % aerogenerador)	Q29 303,23																
Banco de baterías	Q112 627,20																
Gastos de diésel		Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80											
Gastos operación y mantenimiento		Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77											
Precio Q./kWh diésel		Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98											
Precio Q./kWh EEM Jalapa		Q1,38	Q1,41	Q1,44	Q1,46	Q1,49											
Egresos (gastos)		Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57											
Cargo fijo por usuario, al año		Q167,08	Q167,08	Q167,08	Q167,08	Q167,08											
IVA anual Q. (12 %)		Q2 252,85	Q2 297,51	Q2 343,06	Q2 389,52	Q2 436,91											
Aumento de precio electricidad (2 % anual)		0,02	0,02	0,02	0,02	0,02											
Ahorro de diésel anual		Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00											
Valor de la energía generada		Q18 394,39	Q18 762,28	Q19 137,53	Q19 520,28	Q19 910,68											
Ingresos (ahorro)		Q20 814,33	Q21 226,87	Q21 647,67	Q22 076,88	Q22 514,67											
Flujo de caja (ahorro neto Q/año)		(261 353,98)	Q18 932,75	Q19 345,30	Q19 766,10	Q20 195,31	Q20 633,10										
VAN (a 20 años)		(Q74 890,56)															
VAN (a 25 años)		(Q57 937,00)															
TIR (a 20 años)		5,82 %															
TIR (a 25 años)		7,26 %															
Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15								
Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80								
Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77								
Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98								
Q1,52	Q1,55	Q1,59	Q1,62	Q1,65	Q1,68	Q1,72	Q1,75	Q1,79	Q1,82								
Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57								
Q167,08	Q167,08	Q167,08	Q167,08	Q167,08	Q167,08	Q167,08	Q167,08	Q167,08	Q167,08								
Q2 485,24	Q2 534,55	Q2 584,84	Q2 636,13	Q2 688,45	Q2 741,82	Q2 796,26	Q2 851,78	Q2 908,42	Q2 966,18								
0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02								
Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00								
Q20 308,90	Q20 715,07	Q21 129,38	Q21 551,96	Q21 983,00	Q22 422,66	Q22 871,12	Q23 328,54	Q23 795,11	Q24 271,01								
Q22 961,22	Q23 416,70	Q23 881,30	Q24 355,18	Q24 838,54	Q25 331,57	Q25 834,46	Q26 347,40	Q26 870,61	Q27 404,28								
Q21 079,65	Q21 535,13	Q21 999,73	Q22 473,61	Q22 956,97	Q23 450,00	Q23 952,89	Q24 465,83	Q24 989,04	Q25 522,71								
Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24	Año 25								
Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80								
Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77								
Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98								
Q1,86	Q1,89	Q1,93	Q1,97	Q2,01	Q2,05	Q2,09	Q2,13	Q2,18	Q2,22								
Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57								
Q167,08	Q167,08	Q167,08	Q167,08	Q167,08	Q167,08	Q167,08	Q167,08	Q167,08	Q167,08								
Q3 025,11	Q3 085,21	Q3 146,51	Q3 209,04	Q3 272,82	Q3 337,88	Q3 404,23	Q3 471,92	Q3 540,95	Q3 611,37								
0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02								
Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00								
Q24 756,43	Q25 251,56	Q25 756,59	Q26 271,72	Q26 797,16	Q27 333,10	Q27 879,76	Q28 437,36	Q29 006,10	Q29 586,23								
Q27 948,62	Q28 503,85	Q29 070,19	Q29 647,85	Q30 237,06	Q30 838,06	Q31 451,08	Q32 076,36	Q32 714,14	Q33 364,68								
Q26 067,05	Q26 622,28	Q27 188,62	Q27 766,28	Q28 355,49	Q28 956,49	Q29 569,51	Q30 194,79	Q30 832,57	Q31 483,11								

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. Generación eólica frente a generación grupo electrógeno

Bien y servicio	Año 0 inversión inicial	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5			
Aerogenerador	Q97 677,45								
Torre autosoportable	Q21 746,10								
Servicio de instalación (30 % aerogenerador)	Q29 303,23								
Banco de baterías	Q112 627,20								
Gastos de diesel		Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80			
Gastos operación y mantenimiento		Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77			
Precio Q./kWh diesel		Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98			
Precio Q./kWh EEM Jalapa		Q1,38	Q1,41	Q1,44	Q1,46	Q1,49			
Egresos (gastos)		Q1 881,57							
Cargo fijo por usuario, al año		Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00			
IVA anual Q. (12 %)		Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00			
Aumento de precio electricidad (2 % anual)		0,02	0,02	0,02	0,02	0,02			
Ahorro de diesel anual (reflejado en gastos)		Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00			
Valor de la energía generada		Q66 379,76							
Ingresos (beneficios de ahorro)		Q66 379,76							
Flujo de caja (ahorro neto Q/año)	(261 353,98)	Q64 498,19							
VAN (a 20 años)	Q287 755,47								
VAN (a 25 años)	Q324 098,67								
TIR (a 20 años)	24,36 %								
TIR (a 25 años)	24,58 %								
Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15
Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80
Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77
Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98
Q1,52	Q1,55	Q1,59	Q1,62	Q1,65	Q1,68	Q1,72	Q1,75	Q1,79	Q1,82
Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57
Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00
Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00
0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00
Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76
Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76
Q64 498,19	Q64 498,19	Q64 498,19	Q64 498,19	Q64 498,19	Q64 498,19	Q64 498,19	Q64 498,19	Q64 498,19	Q64 498,19
Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24	Año 25
Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80	Q904,80
Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77	Q976,77
Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98	Q4,98
Q1,86	Q1,89	Q1,93	Q1,97	Q2,01	Q2,05	Q2,09	Q2,13	Q2,18	Q2,22
Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57	Q1 881,57
Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00
Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00
0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00	Q0,00
Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76
Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76	Q66 379,76
Q64 498,19	Q64 498,19	Q64 498,19	Q64 498,19	Q64 498,19	Q64 498,19	Q64 498,19	Q64 498,19	Q64 498,19	Q64 498,19

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XXI se puede observar que el VAN es negativo y la TIR es menor que la tasa de descuento:

$VAN_{25\text{años}} \rightarrow - Q57\ 937,00 < 0$, y $TIR_{25\text{años}}$ es 7,26 %, lo cual indica que no es rentable la inversión en un sistema de generación eólico si hubiese que reemplazar la energía eléctrica comercial por este, ya que la energía comercial aun resulta más barata que producirla para esta aplicación.

En la tabla XXII se puede observar que el VAN es positivo y la TIR es mucho mayor que la tasa de descuento:

$VAN_{25\text{años}} \rightarrow Q324\ 098,67 > 0$, y $TIR_{25\text{años}}$ es 24,58 %, lo cual indica que sí es rentable la inversión en un sistema de generación eólico para reemplazar la energía eléctrica a base de diésel, ya que la energía generada por diésel resulta muy cara.

El sistema de generación eólico para la autonomía energética del sitio de celda de telefonía celular resulta ser factible, pero es conveniente que el cambio de tecnología de generación sea un proceso por fases hasta llegar a ser totalmente independiente de otras fuentes.

CONCLUSIONES

1. Se diseñó un sistema de generación de energía eléctrica eólica capaz de brindar la autonomía energética de un sitio de celda para telefonía celular en la aldea Samororo, municipio de Mataquescuintla del departamento de Jalapa.
2. Un sitio de celda de telefonía celular está conformado, básicamente, por una radio base que emite y recibe señales de radio frecuencia hacia los celulares, un LAN switch que colecta los servicios 2G y 3G provenientes de la radio base y un radio enlace que es el enlace de transmisión de la celda hacia una unidad remota o central de telecomunicaciones. La demanda de estos elementos en un sitio rural es de 1 356,1 vatios y en una celda tipo nodo 1 664,1 vatios, con un consumo de 36,94 kWh/d.
3. El estudio de generación eólica para aldea Samororo da como resultado que existe una velocidad promedio del viento de 6,33 m/s, con densidad del aire de 0,983 Kg/m³ a una altura de 1 852 msnm. Esto implica que el potencial eólico sea de 1,6kW, capaz de cubrir la demanda de una celda tipo nodo. Se elige utilizar un aerogenerador de eje horizontal para el diseño, ya que es más eficiente y menos costoso respecto de un aerogenerador de eje vertical.

4. El sistema de generación eólico diseñado emplea un aerogenerador de eje horizontal de 10kW y es capaz de suministrar hasta 56,04 kWh/d, superior a los 36,94 kWh/d que consume la celda tipo nodo. El sistema se ha diseñado con un banco de baterías de 3 000 Ah que proporciona un respaldo de 3 días cuando se presentan condiciones de viento bajo o nulo.
5. Implementar energía eólica en un sitio de celda tiene beneficios ambientales tales como: es renovable, no produce emisiones de CO₂, por lo que conserva el medio ambiente. También tiene beneficios económicos como: ahorro en gastos de operación por disminución de consumo diésel y tiende a ser más barata conforme avanza la tecnología.
6. El equipamiento electrónico de un sitio de celda tipo nodo representa una carga DC que consume 36,94 kWh/d. Este consumo puede ser suministrado por aerogeneradores comerciales en la gama de 7 a 10kW.
7. El requerimiento energético anual de la celda es de 13 482,10 kWh y el sistema de generación eólico propuesto logra generar el 82,42 % de la energía requerida, pero sumando un banco de baterías de 3 000 Ah se aporta 16,44 % más de energía al sistema, por lo que se alcanza aproximadamente el 99 % de autonomía energética con energía renovable, y cerca del 1 % será energía eléctrica generada por un motogenerador existente.

8. La evaluación económica para el proyecto del sistema de energía eólico es rentable para el escenario que sustituye total o parcialmente a un motogenerador que funciona como fuente principal de energía en el sitio de celda, ya que la inversión inicial para implementar un proyecto de este tipo es alta, pero se obtiene un beneficio. Ahora bien, si fuera el escenario de sustituir el suministro de energía eléctrica comercial por eólica no es rentable, debido a que la tarifa del kWh en esta región no es alta como el costo de generación kWh por motogenerador, por lo que en la vida útil del proyecto no se recupera la inversión inicial.

RECOMENDACIONES

1. Debido a que la tecnología cambia día a día, es necesario que al implementar un sitio de celda planeado con energía eólica, se consideren varias opciones de radio bases, ya que pueden existir modelos de diferentes capacidades y consumos de energía. Esto ayudaría a disminuir el consumo de la carga instalada, minimizando la demanda energética y dando opción a hacer un dimensionamiento menor del aerogenerador y banco de baterías, disminuyendo así la inversión inicial, lo cual implicaría que el proyecto sea más rentable.
2. Realizar negociaciones con proveedores de equipamiento electrónico para telecomunicaciones, tipo *partners*, ya que esto ayuda a reducir los precios de equipos en general, tales como el mismo aerogenerador y su regulador controlador de carga de baterías, y las baterías, entre otros. Tomar en cuenta que con un rediseño de banco de baterías podría llegarse a una autonomía total del sistema de energía aislado para un sitio de celda.
3. Realizar estudios de generación eólica en estaciones de telecomunicaciones remotas o en las cuales se busque reducir los costos de operación anual, ya que implementar un proyecto de este tipo en varios sitios podría resultar más rentable, debido a que se hacen pedidos y se adquieren equipos por lotes y servicios asociados que tendrían un precio especial, los resultados serían beneficiosos para la empresa.

4. Realizar un estudio de tipo estructural en la torre de telefonía móvil con el objetivo de comprobar la viabilidad de utilizar esta torre para instalar sobre ella un aerogenerador, ya sea de eje horizontal como el propuesto o de eje vertical en caso sea factible también desde el punto de vista de generación eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALFASOLAR. *Catálogo de productos generadores eólicos*. [en línea]. <<http://www.alfasolar.com.uy/eolica/Catalogo.pdf>> [Consulta: 22 de mayo de 2014].
2. ÁLVAREZ, Clemente. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía. Manuales de energías renovables. *Energía eólica*. 2006. <http://www.energiasrenovables.ciemat.es/adjuntos_documentos/Energia_Eolica.pdf> [Consulta: 13 de octubre 2014].
3. ANDREOTTI, Jorge. *Consultor de telecomunicaciones y electricidad*. [en línea]. <<http://ingenieroandreotti.blogspot.com/2013/08/ley-de-betz.html>> [Consulta: 12 de enero 2016].
4. ARTIINDEX. *Generadores eólicos*. [en línea]. <http://www.artiindex.com/es/generador_eolico.html> [Consulta: 22 de mayo de 2014].
5. Battcompany. *Diferencias entre baterías AGM y GEL*. [en línea]. <<http://www.battcompany.com/es/blog/sobre-baterias/58-diferencias-entre-baterias-agm-y-gel.html>> [Consulta: 8 de septiembre de 2014].

6. Comisión Nacional de Energía Eléctrica, CNEE. *Normas Empresa Eléctrica de Guatemala, S.A. (Acometidas), Resolución CNEE-61-2004*. [en línea]. <<http://www.cnee.gob.gt/estudioselectricos/Normas%20Tecnicas/NORMA%20EEGSA.pdf>> Consulta: agosto 2014.
7. ENAIR ENERGY S.L. *Sistema para telecomunicaciones*. 2010. 21 p. [en línea]. <http://www.enair.es/descargas/minieolica_enair_y_renovables_en_telecomunicaciones.pdf> [Consulta: 21 de noviembre 2016].
8. ENAIR. *Manual de usuario aerogeneradores 30 y 70*. [en línea]. <http://www.enair.es/files_minieolica/descargas/manual_aerogenerador_enair_30_70.pdf> [Consulta: 12 de enero 2016].
9. FAJARDO Juan. IMIQ. Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos. *Revista Tecnología Ciencia y Educación*. Vol. 25 núm. 2, 97 p. 2010 [en línea]. Disponible en web: http://web.imiq.org/attachments/353_95-98%20Eol.pdf. [Consulta: 21 de noviembre de 2016].
10. Infoagro. *Anemómetro*. [en línea]. <http://www.infoagro.com/instrumentos_medida/doc_anemometro_velocidad_viento.asp?k=80> [Consulta: 30 de enero 2015].
11. Ingesco Lightning Solutions. *Pararrayos Ingesco PDC*. [en línea]. <<http://www.ingesco.com/presto/p/pararrayos>> [Consulta: 17 de septiembre de 2014].

12. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. *Velocidad del viento promedio anual dirección predominante del viento modal anual*. [en línea]. <http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas_Climatologico/viento.jpg> [Consulta: 21 de mayo de 2014].
13. LANZAROTE. Minieólica. *Tipos de aerogeneradores*. [en línea]. <http://minieolicadelanzarote.com/tecnologia_tipos.php> [Consulta: 15 de octubre 2014].
14. LARA TAPIA, Juan Carlos. *Conceptos básicos de telefonía celular*. Trabajo de graduación de Ing. Electrónico y Telecomunicaciones, Instituto de ciencias básicas, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2006. 43 p.
15. LOZANO, Luis Romero. *Programación, organización y supervisión del aprovisionamiento y montaje de instalaciones de energía eólica*. s.l. Ediciones Paraninfo, S.A. 2012. 79 p.
16. Ministerio de Energía y Minas. *Energía eólica*. [en línea]. <<https://repository.unm.edu/bitstream/handle/1928/12509/Energia%20Eolica.pdf?sequence=1>> [Consulta: 29 de enero 2015].
17. _____. *Resumen mediciones del viento en Guatemala*. [en línea]. <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2012/04/1._Resumen_Mediciones_del_Viento_en_Guatemala.pdf> [Consulta: 20 de mayo de 2014].

18. Monografía de Mataquesuintla. *Municipalidad de Mataquesuintla*. [en línea]. <<http://www.munimataquesuintla.gob.gt/monografia/monografia.pdf>> [Consulta: 31 de marzo de 2015].
19. *National Electrical Manufacturers Association. NEMA Enclosure Types*, from NEMA 250-2003. [en línea]. <<https://www.nema.org/Products/Documents/nema-enclosure-types.pdf>> [Consulta: agosto 2016].
20. NFPA. *National Fire Protection Association. National Electrical Code*. Edición 2011, 721-731 p.
21. Perkins. *400 Series 403D-11G*. [en línea]. <<http://www.americasgenerators.com/>> [Consulta: 15 de septiembre 2016].
22. PERUSOLAR. *Aplicación de la ecuación de Weibull para determinar potencial eólico en Tunja-Colombia*. [en línea]. <http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2013/12/Alvarez-Casta%C3%B1eda-William_-_Aplicacion-Ecuacion-de-Weibull.pdf> [Consulta: 22 de mayo de 2014].
23. RIVERA CAMAS, Samuel Josué. *Especificaciones técnicas para la construcción de sitios de telefonía celular*. Trabajo de graduación de Ing. Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2007. 23 p.

24. SAN MIGUEL, Pablo. Ediciones Paraninfo S.A. *Electrotecnia*. [en línea]. <<https://books.google.com.gt/books?id=S2vonPd7kHAC&pg=PA102&dq=calculo+de+energia+consumida+por+conductores&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwit5OT2-brQAhUCLyYKHbAEAXMQ6AEISTAG#v=onepage&q=calculo%20de%20energia%20consumida%20por%20conductores&f=false>>. [Consulta: 21 de noviembre de 2016].
25. Selmec. *Plantas eléctricas 10 a 2,500kW*. [en línea]. <<http://www.selmec.com.mx/pdf/plantas-electricas-selmec.pdf>>. [Consulta: 15 de septiembre 2016].
26. Universidad de Valencia. *Funcionamiento de un generador de imanes permanentes aplicando la expresión de Lorentz*. [en línea]. <<http://www.uv.es/~navasqui/aero/Fungenper.pdf>> [Consulta: 26 de mayo de 2014].
27. Universidad Nacional de La Plata. *Máquinas rotantes*. [en línea]. <<http://www.ing.unlp.edu.ar/cys/DI/MaqElec.pdf>>. [Consulta: 15 de octubre 2014].
28. UTE. *Sistemas de generación eléctrica para aerogeneradores*. [en línea]. <http://www.ute.com.uy/empresa/entorno/energias_renovables/eolica/actividad_2002/eolica_generadores.pdf>. [Consulta: 15 de octubre 2014].

