



U

P

T

Universidad Politécnica de Tulancingo

Diseño de instalación del aerogenerador eólico Skystream 3.7

Por:

Ing. Guillermo Sosa Narváez

Tesis sometida como requisito parcial para obtener el grado de
Maestría en Energías Renovables

Supervisada por:

Dr. Felipe Coyotl Mixcoatl

Tulancingo de Bravo, Hidalgo

Diciembre 2017

©UPT 2017

Derechos reservados

El autor otorga a UPT el permiso de reproducir
y distribuir copias de este reporte en su totalidad
o en partes.



Resumen

Una alternativa de solución a la problemática, de generación de energía eléctrica usando combustibles fósiles, es la integración de unidades de generación cerca de los centros de consumo que permitan cubrir parte de la demanda eléctrica, disminuir la emisión de gases de efecto invernadero y por lo tanto reducir los costos de transmisión y producción de energía eléctrica. Como alternativa ante el uso de combustibles fósiles se emplean energías renovables, en particular, la energía eólica ha sido considerada una de las fuentes renovables más prometedoras debido al progreso que ha tenido en las últimas décadas, sin embargo, su integración en sistemas eléctricos tienen un número de desafíos técnicos relativos a la seguridad del suministro en términos de confiabilidad, disponibilidad y calidad de potencia. El presente proyecto se refiere a la instalación de un aerogenerador Skystream 3.7. El cual es propiedad de la Universidad Politécnica de Tulancingo.

La principal característica de este aerogenerador es que produce corriente alterna (CA), por lo tanto puede ser utilizado para interconectarse a la red eléctrica.

La instalación se llevará a cabo en la Universidad Politécnica de Tulancingo, teniendo en cuenta para su instalación las normas de construcción y la Norma Oficial Mexicana de Instalaciones Eléctricas, de acuerdo al manual de instalación del aerogenerador Skystream 3.7, guiándose en la NOM-001-SEDE-2012 para la correcta instalación del sistema eléctrico. Es de mi interés documentar el sistema eléctrico y la instalación del generador eólico Skystream para que los alumnos de la Universidad Politécnica de Tulancingo cuenten con un sistema real en la observación de generación eólica.

La propuesta de instalación de dicho generador se basa inicialmente en el análisis de velocidades de viento, empleando una estación meteorológica ubicada en una zona cercana a donde se pretende instalar el aerogenerador Skystream. El trabajo se muestra en diferentes secciones de acuerdo al desarrollo del mismo:

El capítulo 1 presenta el estado del arte. En este apartado se tratarán los trabajos de investigación relacionados este proyecto de tesis.

El capítulo 2 aborda los aspectos teóricos de la generación de energía eléctrica, así como su ventaja y desventaja, y se inicia con las características técnicas del aerogenerador, argumentando su ubicación.

El capítulo 3 comprende el tema de la generación eólica así como los tipos de torres, y los tipos de generadores tomando en consideración el análisis de un histograma de viento.

El capítulo 4 engloba la ubicación y parámetros de instalación del aerogenerador Skystream 3.7.

El capítulo 5 contiene el resultado de instalar el aerogenerador y la factibilidad de su inversión basado en el tiempo de amortización.

El capítulo 6 cierra el trabajo con la presentación de la conclusión a través del análisis que se generó en todo el proyecto, así como trabajo futuro.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Epitacio Sosa Hernández, y Ma. Del Rosario Narváez Rincón

Motor de mi vida y apoyo incondicional

A mi esposa Yanet Degabriel Morales

Por su ayuda y comprensión

A mis hijos Cesar, Melanie, Hannah

Mi inspiración para lograr el éxito

Índice

	Pág.
<i>Resumen</i> -----	IV
<i>Índice</i> -----	VII
<i>Lista de figuras</i> -----	IX
<i>Lista de gráficas</i> -----	XI
<i>Lista de tablas</i> -----	XI
Objetivo general-----	XII
Objetivos Específicos-----	XII
Justificación-----	XIII
Alcance-----	XIV
CAPÍTULO 1. Estado de arte -----	1
1.1. Microturbina -----	1
CAPÍTULO 2. Marco teórico -----	5
Introducción -----	5
2.1. Aerogeneradores para aplicaciones interconectadas a red y centrales eolieléctricas-----	5
2.2. Pequeños aerogeneradores -----	6
2.3. Penetración de nuevas tecnologías de aerogeneradores interconectados a red-----	6
2.4. Instalaciones eólicas en el mundo-----	7
2.5. El potencial eólico en México.-----	10
2.6. Suministro eléctrico en México.-----	11
2.7. Sistema Eólico propuesto en esta tesis.-----	12
2.8. Curvas potencia – Velocidad del aerogenerador Skystream modelo 3.7.-----	13
2.9. Especificaciones técnicas del Skystream 3.7-----	14
2.10. Antecedentes-----	15
2.10.1. Universidad Politécnica de Tulancingo-----	15
2.10.2. Ubicación-----	15
2.10.3. Relieve-----	15
2.10.4. Clima-----	15
CAPÍTULO 3. Generación eólica -----	17
3.1. Potencia disponible del viento-----	17
3.2. Aerogeneradores-----	22
3.3. Tipos de aerogeneradores-----	23
3.3.1. Turbina de viento de eje horizontal -----	24
3.3.2. Turbina de viento de eje vertical-----	24
3.3.3. Ventajas de las turbinas HAWT y VAWT-----	24

3.4. Clasificación eléctrica de aerogeneradores-----	25
3.4.1. Generadores síncronos-----	25
3.4.2. El generador asíncrono o de inducción.-----	26
3.5. Importancia del rotor variable-----	28
3.6. Rosa de viento-----	29
3.7. Histograma del viento-----	29

CAPÍTULO 4. Ubicación y parámetros de instalación del aerogenerador Skystream 3.7 31

Introducción-----	31
4.1. Ubicación del aerogenerador Skystream 3.7 en la UPT-----	31
4.2. Tipos de torre que puede ser utilizadas para el aerogenerador Skystream 3.7-----	34
4.3. Obra civil-----	34
4.3.1. Introducción-----	34
4.3.2. Enmallado-----	35
4.3.3. Kits de pernos de cimentación-----	37
4.4. Cuchillas cono de nariz y montaje de la antena-----	38
4.5. Instalación de la torre-----	42
4.5.1. Instrucciones de seguridad importantes-----	42
4.5.2. Nivelación de la torre-----	42
4.6. Consideraciones eléctricas-----	43
4.6.1. Conexiones-----	44
4.6.2. Cableado-----	44
4.6.3. Dimensionamiento del cable-----	45
4.6.4. Prueba eléctrica-----	47
4.6.5. Regulación de la parada electrónica-----	47
4.6.6. Control del interruptor de relé redundante -----	47
4.6.7. Sincronización automática-----	47
4.6.8. Comparación del funcionamiento del controlador lógico programable contra el esquema de sincronización tradicional-----	48
4.7. Requerimientos técnicos de interconexión al sistema eléctrico nacional-----	49
4.8. Interconexión a red-----	52
4.8.1. Requisitos para interconexión a red-----	52
4.8.2. Modelo de contrato de interconexión para fuente de energía renovable o sistema de cogeneración en pequeña escala-----	52
4.9. Modelo de contrato de interconexión para fuente de energía renovable o sistema de cogeneración en mediana escala-----	53
4.10. Características de los equipos de medición y comunicación-----	53
4.11. Mantenimiento e inspección-----	53

CAPÍTULO 5. Resultados. -----	55
5.1. Estación meteorológica y datos del viento de la UPT-----	55
5.2. Costo de energía utilizando el aerogenerador-----	60
5.3. Aspectos económicos-----	60
5.3.1. Costos de energía utilizando el aerogenerador-----	60
5.4. Periodo de recuperación de la inversión-----	61

CAPÍTULO 6. Conclusiones -----	62
Glosario-----	63
Bibliografía-----	65

Anexos

Anexo A-----	67
A.1. Conexión a la red 120/240 V. 60 Hz. Divisor de fases, la caja de conexiones en la torre base-----	67
Anexo B-----	68
B.1. Requisitos para la contratación de servicios fotovoltaicos-----	68
Anexo C-----	69
C.1. Modelo de contrato de interconexión para fuente de energía renovable o sistema de cogeneración en pequeña escala-----	69
Anexo D-----	73
D.1. NOM-001-SEDE-2012-----	73

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1. Curvas de potencia para tres microgeneradores disponibles en el mercado Irlandés-----	2
---	---

Capítulo 2

Figura 2. Capacidad eólica mundial total instalada y previsiones 2005- 2015-----	8
Figura 3. Capacidad y adiciones de energía eólica de los principales países-----	8
Figura 4. Capacidad eólica instalada en México en MW al cierre del 2011-----	9
Figura 5. Capacidad eólica instalada en México en MW al cierre del 2011-----	9
Figura 6. Capacidad eólica instalada por estado-----	10
Figura 7. Capacidad de energía eólica instalada en México 2018-----	11
Figura 8. Velocidad de viento -----	13
Figura 9. Velocidad normalizada del viento -----	14

Capítulo 3

Figura 10. Energía disponible en el viento-----	17
Figura 11. Tubo de corriente de aire que se forma en el caudal de masa m -----	18
Figura 12. La eficiencia del rotor alcanza un máximo cuando el viento se desacelera a un tercio	20

Figura 13. Rotores con un menor número de cuchillas alcanza su máxima eficacia a mayores velocidades -----	21
Figura 14. Rotores con un menor número de cuchillas alcanza su máxima eficacia a mayores velocidades -----	23
Figura 15. Tipos de aerogeneradores, a) Savonius, b) Americano de eje horizontal, c) -----	23
Figura 16. Un generador síncrono trifásico -----	26
Figura 17. La curva de par- deslizamiento para un motor de inducción -----	27
Figura 18. Tres velocidades discretas para un rotor hipotético -----	28
Figura 19. Impacto de un ajuste de la velocidad de rotación de tres pasos sobre la -----	29
Figura 20. Datos de sitio e histograma de viento resultante -----	30
Figura 21. Función de densidad de probabilidad de la velocidad del viento-----	30
Capítulo 4	
Figura 22. Impacto de separación entre torres y tamaño de la matriz en el rendimiento de los aerogeneradores -----	32
Figura 23. Espaciamiento óptimo de las torres -----	32
Figura 24. Localización óptima -----	33
Figura 25. Ubicación del aerogenerador Skystream 3.7-----	33
Figura 26. Tipos de torres -----	34
Figura 27. Dibujos técnicos para la especificación de la losa de construcción -----	35
Figura 28. Profundidad del muelle -----	36
Figura 29. Plantilla de pernos -----	37
Figura 30. Cimentación para la altura de la torre a 10.05m y 13.5m -----	37
Figura 31. Guiñada y el montaje de la antena -----	39
Figura 32. Conjunto de cuchilla y ojiva -----	39
Figura 33. Ensamblé terminado-----	39
Figura 34. Colocación de aisladores de vibración -----	41
Figura 35. Adaptador para la torre -----	41
Figura 36. Bisagra de montaje y colocación de las tuercas -----	42
Figura 37. Conexión a tierra -----	44
Figura 38. Cédula de cableado 220V, 60 Hz -----	45
Figura 39. Cédula de cableado 120/220 V -----	46
Figura 40. Cédula de cableado (120v, 60 Hz, monofásica)-----	46
Figura 41. Esquema típico de una sincronización automática, incluye un relé de sincronización automática y un relé de supervisión de sincronización -----	48
Figura 42. Tipos de fallas y tiempos de duración -----	51
Figura 43. Operación del parque de generación -----	51

LISTA DE GRÁFICAS

Capítulo 4

Gráfica 1. Velocidad promedio del viento a 14 y 15m de altura-----	57
Gráfica 2. Tendencia del comportamiento en kWh por día del aerogenerador Skystream 3.7--	58
Gráfica 3. Muestra la tendencia del comportamiento de kWh generados por la turbina Skystream 3.7-----	59

LISTA DE TABLAS

Capítulo 2

Tabla 1. Especificaciones técnicas del aerogenerador Skystream 3.7-----	14
Tabla 2. Datos históricos del tiempo Tulancingo -----	16

Capítulo 4

Tabla 3. Da a conocer los tipos de suelo para su correcta cimentación -----	35
Tabla 4. Componentes de la cuchilla cono de nariz y montaje de la antena -----	40
Tabla 5. Ajustes para las protecciones -----	50
Tabla 6. Límites de emisiones permisibles-----	50

Capítulo 5

Tabla 7. Velocidades de viento promedio mensual a 14 m de altura en 2014 en m/s-----	55
Tabla 8. Clasificación de rugosidades-----	56
Tabla 9. Velocidades de viento promedio mensual a 15 m de altura en 2014 en m/s -----	57
Tabla 10. Energía promedio producida por día (kWh/día)-----	58
Tabla 11. Energía promedio producida por mes (kWh/mes)-----	59
Tabla.12. Ahorro de energía al año en kWh -----	60
Tabla 13. Datos generales del servicio -----	60
Tabla 14. Historial de consumo de la Universidad Politécnica de Tulancingo a 10 meses ----	61
Tabla 15. Costos de inversión -----	61

Objetivo general

Establecer los parámetros y requisitos necesarios para la instalación del aerogenerador Skystream 3.7, que será instalado en la Universidad Politécnica de Tulancingo, aplicando las Normas de Construcción y de Instalaciones eléctricas vigentes.

Objetivos específicos

- Analizar el manual técnico propio del fabricante para obtener los detalles relevantes en la instalación del aerogenerador.
- Considerar cada uno de los elementos que componen el aerogenerador con el fin de documentar los detalles técnicos para su instalación.

Justificación.

La Universidad Politécnica de Tulancingo (UPT) ha iniciado el desarrollo de proyectos en Energías Renovables desde el año 2008 con aplicaciones solares fotovoltaicas tales como lámparas de LED suministradas con energía solar. En 2013 se inicia el equipamiento del Laboratorio de Energías Renovables con sistemas didácticos, controladores de carga, inversores, baterías, módulos fotovoltaicos y generadores eólicos; uno de ellos para interconexión a red. En los distintos proyectos desarrollados en la UPT no se había considerado la instalación del aerogenerador Skystream 3.7 por lo se definió un lugar para su instalación de acuerdo con el área académica y la dirección de planeación.

La puesta en marcha de la instalación de dicho aerogenerador traerá los siguientes beneficios:

- Ahorro de energía eléctrica para la institución.
- Detalles prácticos adquiridos de la instalación y puesta en servicio con el fin de aplicar los conocimientos adquiridos en las aulas.

Para la propuesta de instalación se toma en cuenta la Norma Oficial Mexicana de Instalaciones Eléctricas vigente a la fecha, además de las indicaciones del propio manual del aerogenerador. El interés en este tema surge por la necesidad de utilizar los recursos renovables para la producción de energía eléctrica sin deteriorar el medio ambiente, la energía eólica es una de las fuentes más baratas, pudiendo competir en rentabilidad aún con fuentes fósiles.

Alcance

En el presente proyecto se hace una descripción de la ubicación del Skystream modelo 3.7, además se presenta el diseño de la instalación eléctrica, se hace una propuesta para suministrar la energía generada a la Universidad Politécnica de Tulancingo específicamente en el área designada como espacios deportivos y por último se plantea la interconexión a la red interna.

Capítulo 1. Estado de arte

En este apartado se tratarán los trabajos de investigación relacionados este proyecto de tesis.

La metodología para el análisis de la viabilidad económica de turbinas eólicas se compone de cuatro pasos ya que es importante tomar en consideración la posibilidad de instalar un aerogenerador tomando datos básicos de viento del área donde será instalado. En los cuales se considera lo siguiente:

1. Determinación de la carga eléctrica a alimentar. Es importante conocer la demanda de potencia eléctrica en donde será instalado el aerogenerador con la finalidad de establecer un correcto análisis de su consumo.
2. Medición de la velocidad del viento en diferentes horarios, este punto es elemental ya que la generación de la turbina depende de la velocidad de viento.
3. Determinación de la potencia de salida por hora de la micro turbina. Este punto es de suma importancia e indispensable para conocer la potencia generada por la turbina en diferentes horarios.
- 4.-Cálculo del periodo de amortización. Es importante conocer en qué tiempo se recupera la inversión [1].

Además es importante considerar el factor de autocorrelación (herramienta estadística utilizada frecuentemente en el proceso de señales), ya que es el grado de dependencia de valores anteriores y es una medida de la que obedece la velocidad del viento en horas [1]. En mi investigación se basa en evaluar diferentes muestras de medición del viento con la estación meteorológica ubicada en la UPT finalmente, con este factor se determinó la velocidad promedio por día y mes.

1.1. Microturbina

Una micro turbina eólica se caracteriza principalmente por su curva de potencia en kW relacionada con la velocidad de viento en m/s, en la figura 1, se muestran tres tipos de micro turbinas [1].

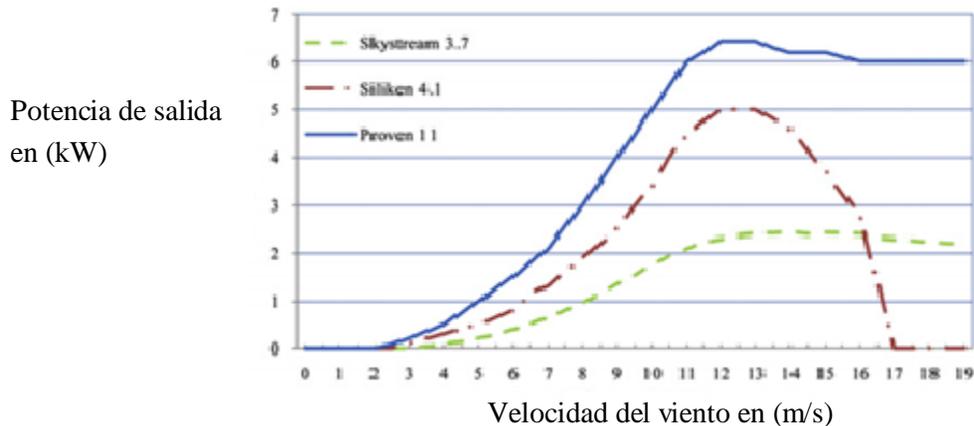


Figura 1. Curvas de potencia para tres microgeneradores disponibles en el mercado Irlandés

Las micro turbinas eólicas están diseñadas para que la velocidad de corte o velocidad de frenado sea de 17 m/s para evitar daño así misma [1]. Una micro turbina eólica puede considerarse no económicamente viables en lugares de baja velocidad, menores a 5 m/s. Es competente con velocidades anuales de viento mayores a 6 m/s, de hecho, el periodo de amortización puede ser más corto que la vida útil de la turbina ya que no son reembolsables [1].

Una micro turbina está definida por su diámetro de rotor aproximadamente de 5 m, o que corresponde a un área de captación de energía incidente frente al viento aproximadamente de 20m² cerca de 5 kW de potencia nominal máxima [2]. Por lo tanto el aerogenerador Skystream 3.7 es una de ellas. Las micro turbinas, son las más pequeñas y son adecuadas para aplicaciones de carga de baterías de muy baja potencia, una mini turbina eólica captura de 2 a 10 veces más energía que las micro turbinas, haciéndolas adecuadas para pequeñas cabinas en sitios remotos. Si la brisa del aire produce cerca de 400 kWh por año en un sitio de 5.5 m/s, entonces las mini turbinas pueden producir de 800 a 4000 kWh por año [2]. Para acoplar un inversor a una micro turbina interconectada a la red es importante conocer las pérdidas del inversor. El aerogenerador Skystream cuenta con una ventaja para interconexión a red ya que la salida de voltaje es alterna, por lo tanto no es necesario instalar un inversor.

Empleo de turbinas para el bombeo de agua

En los últimos años se ha optado por instalar turbinas eólicas, aprovechando el poder del viento, para bombear agua en Arabia Saudita. [2]

La Norma IEC

La Norma IEC especifica los requisitos para la seguridad de las turbinas pequeñas en entornos urbanos, diseño, instalación, mantenimiento y operación además con apoyo del departamento de planeación de la UPT se determinó el lugar idóneo para la instalación del aerogenerador Skystream 3.7 [2].

Turbinas eólicas con tecnología avanzada.

Las turbinas eólicas con tecnología avanzada incluyen nuevas formas de operación en su control. Esto hace que las turbinas nuevas operen con parámetros digitales por medio de sensores, como es el caso del Skystream 3.7 [2].

Capítulo 2. Marco Teórico

Introducción

En la actualidad la principal fuente de generación de energía eléctrica son los combustibles fósiles, pero sabiendo que es la mayor causa de problemas ambientales hace pensar en buscar mejores alternativas para su sustitución. Así mismo, la demanda de energía crece constantemente y para cubrirla es necesario sobrecargar las centrales de generación y operarlas a su máxima capacidad ocasionando desgaste en los equipos.

Una alternativa de solución a esta problemática es la integración de unidades de generación cerca de los centros de consumo que permitan cubrir parte de la demanda, disminuir la emisión de gases al medio ambiente y reducir costos en transmisión y producción de energía eléctrica. Algunas fuentes de energía renovables que son amigables con el medio ambiente son: turbinas eólicas y arreglos fotovoltaicos.

En particular, la energía eólica ha sido considerada una de las fuentes renovables más prometedoras debido al progreso que ha tenido en las últimas décadas, sin embargo, su integración en sistemas eléctricos tienen un número de desafíos técnicos relativos a la seguridad del suministro en términos de confiabilidad, disponibilidad y calidad de la potencia [3].

2.1. Aerogeneradores para aplicaciones interconectadas a red y centrales eoloelectricas.

En términos generales, un aerogenerador es un sistema que transforma la energía cinética del viento en energía eléctrica. Los aerogeneradores que se usan para generar electricidad en gran escala son máquinas de tamaño considerable que se conectan a las redes eléctricas convencionales. Por ejemplo, un aerogenerador de 1,500 kW de capacidad nominal puede tener un rotor de 77 metros de diámetro y se puede instalar en una torre de 60 metros de altura. En materia de configuración de aerogeneradores, la versión de eje horizontal con rotor de tres aspas es prácticamente la que domina la totalidad del mercado actual.

Con base en esta configuración existen aerogeneradores de diferentes tipos que se pueden clasificar en sistemas de velocidad constante y sistemas de velocidad variable. Para ambas versiones existen sistemas cuya potencia de salida se controla por dos métodos: control activo por cambio del ángulo de paso de las aspas (pitch regulation) o control pasivo por abatimiento de flujo (stall regulation) [3].

Los sistemas de velocidad variable usan generadores eléctricos síncronos. Generan voltaje en corriente alterna a frecuencia variable que se transforma a voltaje en corriente directa (rectificación) y después se transforma a voltaje en corriente alterna a frecuencia constante, mediante inversores de potencia conectados a una línea eléctrica convencional. Los sistemas de velocidad constante usan generadores eléctricos asíncronos (típicamente de inducción) y generan voltaje a frecuencia constante.

2.2. Pequeños aerogeneradores

La tecnología de pequeños aerogeneradores para aplicaciones aisladas no ha cambiado mucho en los últimos años. Los aerogeneradores de imanes permanentes con capacidades de 1 a 20 kW se siguen usando de manera aislada o combinados con sistemas fotovoltaicos para conformar sistemas híbridos. Típicamente, estos sistemas no se interconectan a la red y usan baterías para almacenar la electricidad que producen. Con frecuencia, se usan para electrificar comunidades o viviendas aisladas que están alejadas de la red eléctrica convencional [3].

En México y en otros países en vías de desarrollo se ha intentado introducir estos sistemas como parte de programas sociales de electrificación a comunidades de escasos recursos económicos. En la mayoría de los casos, estos proyectos no han funcionado cuando se ha dejado la responsabilidad de operación y mantenimiento a la comunidad.

En México existen dos proyectos de sistemas híbridos que están funcionando actualmente; los dos están instalados en Baja California Sur, San Juanico e Isla Santa Margarita y, para su mantenimiento, los usuarios han contado con apoyo de la Comisión Federal de Electricidad [3].

2.3. Penetración de nuevas tecnologías de aerogeneradores interconectados a red

Desde hace más de 10 años, el aerogenerador de tres aspas, eje horizontal (concepto danés) es el que ha dominado el mercado. A pesar de que se ha intentado desarrollar nuevas configuraciones con elementos de innovación tecnológica, la relación entre la eficiencia técnica y la competitividad comercial de estas máquinas no se ha podido superar.

Mientras no emerjan conceptos que puedan revolucionar la industria eoloelectrónica establecida (lo cual se ha intentado en innumerables ocasiones en diferentes países), la tendencia tecnológica estará basada en lo siguiente [3]:

- Incrementar el tamaño y potencia nominal del concepto danés de aerogeneradores.
- Integrar elementos que los hagan más resistentes y confiables en condiciones adversas o extremas de operación (fuera de costa, climas fríos, etc.)
- Integrar elementos que incrementen su eficiencia y su relación beneficio-costo (sistemas de control inteligente).
- Integrar elementos que alarguen su vida útil y/o su factor de disponibilidad (aspas con fibra de carbón).
- Desarrollar elementos que faciliten y reduzcan sus costos de operación y mantenimiento.
- Desarrollar elementos que amplíen su ámbito de aplicación, por ejemplo:
 - ✓ Plataformas flotantes para instalación de centrales eoloeléctricas en aguas profundas.
 - ✓ Aerogeneradores clase especial para aplicaciones en sitios con excelente recurso eólico.
 - ✓ Aerogeneradores de Clase IV, según norma IEC-61400-12, para aplicaciones en sitios con recurso eólico marginal.
 - ✓ Desarrollar elementos, sistemas o métodos que amplíen el valor de la generación eoloeléctrica (pronóstico a corto plazo, sistemas combinados para ofrecer potencia firme).

Los retos y oportunidades de la investigación y el desarrollo tecnológico son muy amplios, en la medida en que su objetivo sea lograr que la generación eoloeléctrica logre superar las ventajas económicas de tecnologías convencionales para generación de electricidad (aún sin considerar costos externos). Para ello, no sólo son importantes los aspectos puramente técnicos (hardware y software); sino también, los aspectos de: desarrollo de mercados energéticos; impacto ambiental; impacto social; métodos, planes y programas de integración a los sistemas eléctricos; desarrollo o mejora de normas; desarrollo o mejora de sistemas de certificación; efectividad de incentivos, entre otros [3].

2.4. Instalaciones eólicas en el mundo

Alemania, España, Estados Unidos, India y Dinamarca han realizado las mayores inversiones en generación de energía eólica. Dinamarca es, en términos relativos, la más destacada en cuanto a fabricación y utilización de turbinas eólicas, con el compromiso realizado en los años 1970 de llegar a obtener la mitad de la producción de energía del país mediante el viento. Actualmente genera más del 20% de su electricidad mediante aerogeneradores a mayor porcentaje, que cualquier otro país, y es el quinto en producción total de energía eólica, a pesar de ser el país número 56 en cuanto a consumo eléctrico. En las siguientes figuras, 2 y 3 se muestran la evolución de la generación de energía eólica por

países [6]. Por ejemplo, en la figura 2 se muestra la capacidad eólica mundial, mientras que en la figura 3 podemos observar la capacidad de los 10 países líderes.

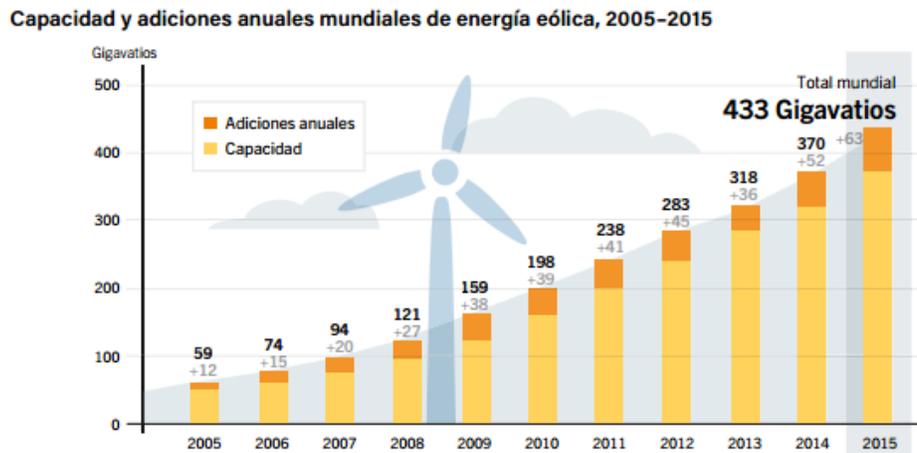


Figura 2. Capacidad eólica mundial total instalada y previsiones 2005-2015 [6].

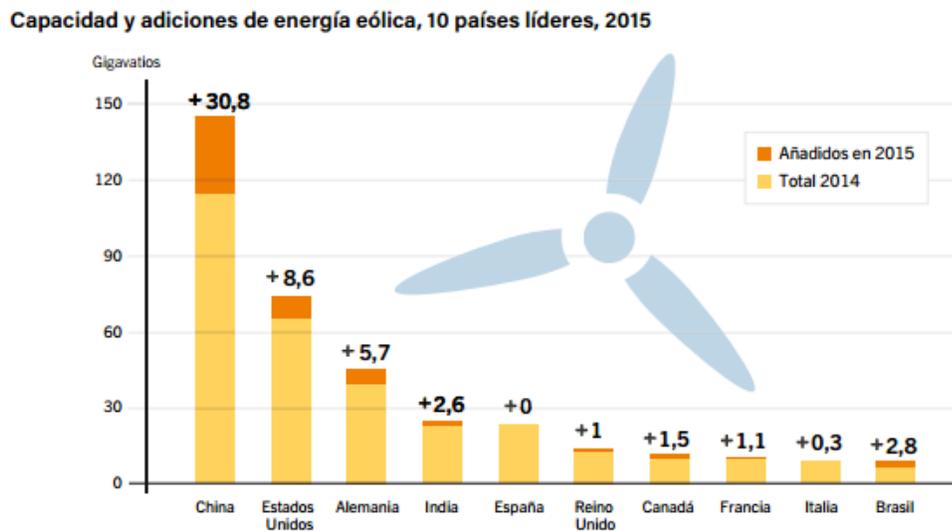


Figura 3. Capacidad y adiciones de energía eólica de los principales países [6].

Según la WWEA (World Wind Energy Association) la demanda de la energía eólica ha aumentado considerablemente en los últimos 40 años debido a los beneficios obtenidos.

En la figura 4 se muestra la capacidad eólica en México al cierre del 2011.

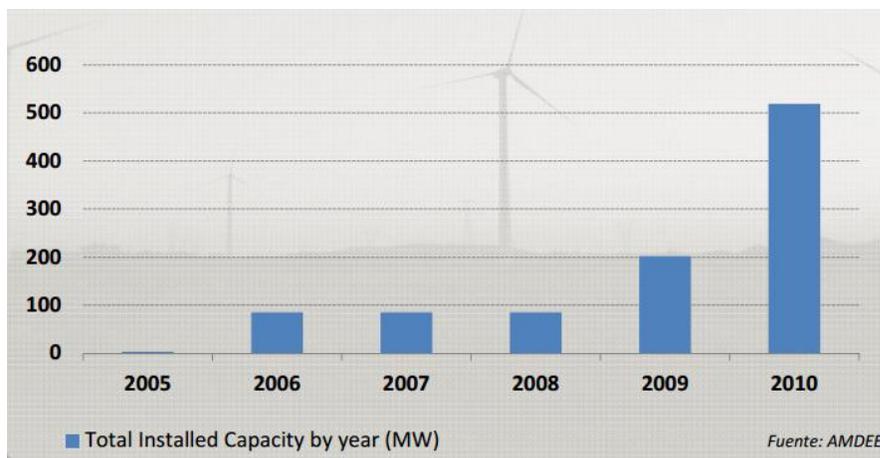


Figura 4. Capacidad eólica instalada en México en MW al cierre del 2011 [6].

Otro punto interesante es que países que actualmente tienen un crecimiento elevado en sus economías y que se encuentran en vías de desarrollo están impulsando estas alternativas para la generación de su energía. Países como China, India y Brasil son un ejemplo de esto. En los últimos años México ha permitido la inversión en este rubro. Como puede verse, ha tenido un gran crecimiento, sin embargo toda la energía generada es con tecnología extranjera he aquí la importancia de no permitir que pase el tiempo sin empezar a desarrollar tecnología en este campo. Después de que el primer proyecto eólico mayor se materializó en México en 2006, la industria eólica mexicana realmente despegó en 2009. En la figura 5 se observa, al cierre de 2011, la capacidad eólica en México que alcanzó los 569 MW.

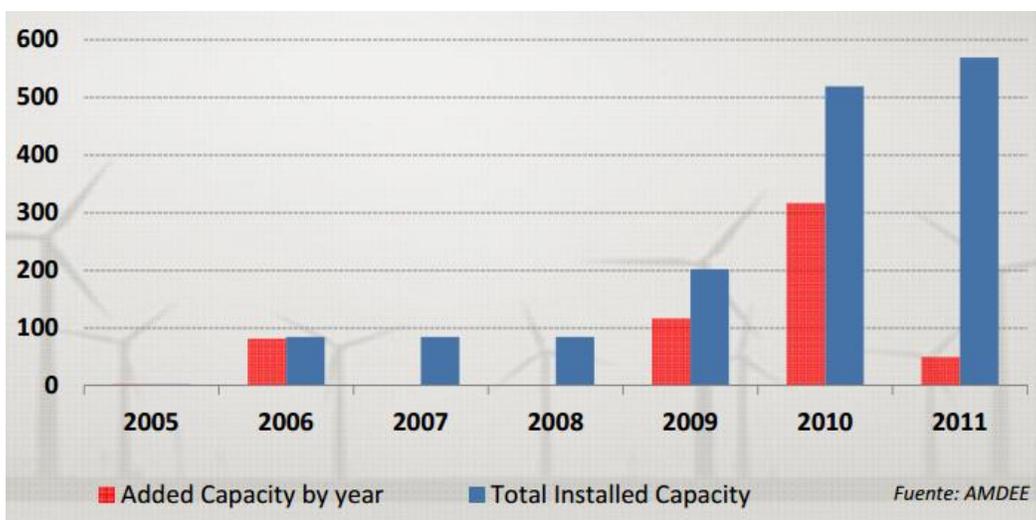


Figura 5. Capacidad eólica instalada en México en MW al cierre del 2011 [6].

2.5. El potencial eólico en México.

El recurso eólico en México es competitivo, como lo demuestran los numerosos proyectos llevados a cabo por el sector privado en la modalidad de autoabastecimiento, así como por la CFE bajo la modalidad de Productor Independiente de Energía a través del contraste de múltiples metodologías. Se ha cuantificado el potencial eólico técnico y económicamente competitivo, definiendo un objetivo de instalación de 12,823MW para el año 2020 (si bien el potencial puede ser mayor). El alto volumen de recurso aprovechable indica que México es un país dotado con un gran potencial para el uso de energía eólica [5].

En la figura 6 se exhibe la capacidad en MW generados por estado y donde se aprecia que Oaxaca se encuentra en primer lugar.

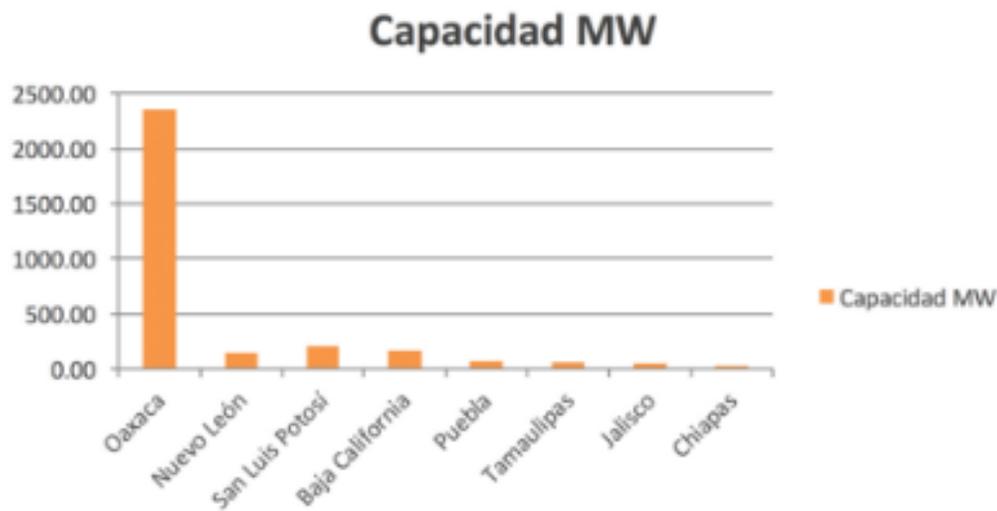


Figura 6. Capacidad eólica instalada por estado [6].

México cuenta con un recurso eólico privilegiado como pocos países en el mundo, que permiten niveles de productividad excepcionalmente altos, en diferentes regiones del país. En la figura 7 se representa el total previsto al año 2018 con un total de 6,099 MW.



Figura 7. Capacidad de energía eólica instalada en México 2018 [5].

2.6. Suministro eléctrico en México.

El suministro eléctrico que proporciona la Comisión Federal de Electricidad a nivel nacional es altamente fiable y en cualquier punto donde se encuentren los postes eléctricos puede un usuario solicitar el servicio a la CFE, es barata, muy eficiente, hay diferentes tarifas según el consumo eléctrico ó el tipo de uso eléctrico. El principal problema de la CFE es que para las regiones donde los postes eléctricos no lleguen el precio de suministro eléctrico por este medio se eleva exponencialmente por requerir instalar el número de postes necesarios.

Ventajas:

- La energía eléctrica está subsidiada por el gobierno mexicano cuando el consumo es bajo.
- Se pagan únicamente los kWh que se consume.
- Si el lugar sin electrificar está cerca de postes eléctricos la instalación y puesta en marcha resulta muy barata.

- El mantenimiento es casi nulo.

Desventajas:

- Se contrata el servicio, lo que implica pagar por el resto del tiempo que se contrate el servicio.
- Al rebasar el consumo eléctrico establecido en el contrato la tarifa de kWh aumenta considerablemente.
- No es propio el sistema del solicitante.
- Cuando el lugar no está cerca de un poste eléctrico el costo de la instalación es muy elevada.

2.7. Sistema Eólico propuesto en esta tesis.

El mecanismo empleado en este trabajo es un sistema eólico basado en la tecnología innovadora de Skystream que convierte el viento en energía limpia de bajo costo, reduciendo las emisiones de CO₂, permitiendo disfrutar de los beneficios de la energía eólica en cualquier emplazamiento. Dispone de Certificado de Tipo emitido por Germanischer Lloyd (Clase IIA según IEC 61.400-2) y está garantizado contra todo tipo de defectos por 5 años. El Skystream 3.7 abrió el camino como el primer generador de viento personal compacto, diseñado para trabajar en vientos muy bajos. Produce hasta 400 kilovatios / hora por día, mes y año de electricidad limpia [8].

Su rotor de 3.7 metros y la potencia nominal de 2.4 kW, está especialmente indicado para conexión directa a la red eléctrica, incorporando el inversor en la propia góndola del aerogenerador; siendo también posible su integración y funcionamiento en sistemas aislados de la red, formando parte de instalaciones mixtas eólico-fotovoltaicas [8].

El sistema de suministro eléctrico por viento, viene desarrollándose con mucho ahínco desde los ochentas y actualmente las grandes plantas eoloelectricas generan kWh de energía eléctrica a precio equivalentes algunas de combustibles fósiles; es un sistema autónomo ya que no genera residuos por producir electricidad, y puede reducir a largo plazo el calentamiento global por este motivo [5].

Ventajas:

- El equipo es propio.
- Sistema autónomo, no necesita combustibles para funcionar.
- Genera y almacena energía eléctrica.
- Nula consecuencia al medio ambiente.
- El mantenimiento es sencillo y barato, solo debe cambiarse la tornillería.

Desventajas:

- Preferentemente debe instalarse en lugares donde el viento sea de moderado intenso.
- Las refacciones se consiguen con proveedores especializados.
- De los tres sistemas es el de inversión inicial más grande.
- Requiere el usuario capacitación para el mantenimiento y operación eficiente.

El Skystream 3.7, es una turbina de viento que está dirigida al mercado residencial de conexión a la red, ya que contiene elementos electrónicos que rectifican e invierten el voltaje. La energía que fluye fuera de la turbina es electricidad apropiada para de la calidad del hogar, su salida es de 120 ó 240 voltios AC. Para que funcione en un sistema basado baterías, requiere equipo adicional y es menos factible que otras máquinas que se diseñan para sistemas con baterías. Si desea realizar este tipo de conexión, habrá gastos adicionales involucrados en una red típica de conexión al sistema Skystream. Cuando el Skystream está produciendo energía, está compensando su demanda de energía actual o devolviendo el excedente de alimentación a la red. No tiene sistema de frenado aerodinámico o pasivo, se basa únicamente en el frenado dinámico como medio para mantener el rotor funcionando a una velocidad segura [8].

2.8. Curvas potencia – Velocidad del aerogenerador Skystream modelo 3.7.

Las curvas de potencia de un aerogenerador nos muestran cual será la potencia eléctrica disponible de un aerogenerador a distintas velocidades del viento. Esta información es útil para estimar la potencia que entrega el Skystream. La figura 8 nos indica la relación de la energía en función de la velocidad del viento [8].

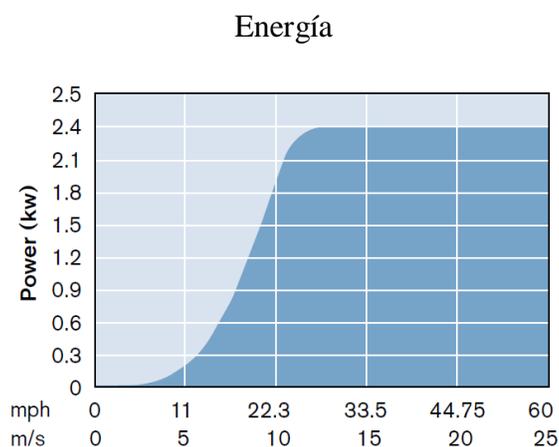


Figura 8. Velocidad del viento [8].

En la figura 9, modela la relación de kWh mensual con respecto a la velocidad en m/s.

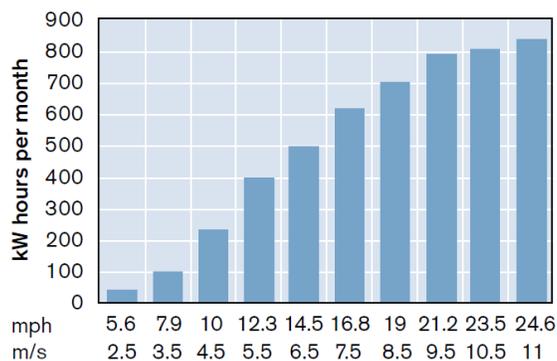


Figura 9. Velocidad del viento normalizada [8]

2.9. Especificaciones técnicas del Skystream 3.7

Tabla 1. Especificaciones técnicas del aerogenerador Skystream 3.7 [8].

Marca	Skystream
Modelo	3.7
Potencia nominal	1.8 kW, Tasa pico 2.4 kW
Peso	77 kg
Diámetro de rotor	3.72 m
Área de barrido	10.87 m ²
Sentido de giro	A la derecha mirando a barlovento
Cuchillas	3 cuchillas de fibra de vidrio
Velocidad nominal	50-325 rpm
Velocidad máxima	9.7 - 63 m/s
Alternador	Sin escobillas de imán permanente
Guiñada de control	Pasivo
Rejilla de alimentación	Southwest Wind power utilidad interactiva 120/240 VAC 50-60 Hz y 120/208 VAC, 60 Hz, 3 Polos.
Frenado de relé	Regulación de frenado del sistema electrónico control de interruptor.
Velocidad del viento	3.5 m/s
Velocidad nominal del viento	9 m/s
Velocidad máxima del viento	63 m/s
Distorsión armónica total	2.7% a 2400 W
Precisión de Frecuencia	+/- 0,02 Hz
Precisión de Tensión	+/- 2,0 V (línea a neutro)

2.10. Antecedentes

2.10.1. Universidad Politécnica de Tulancingo

La Universidad Politécnica de Tulancingo es una institución pública de enseñanza superior ubicada en la Zona Metropolitana de Tulancingo, en el Estado de Hidalgo. Fue fundada en el año 2002, iniciando actividades formales en unas oficinas provisionales hasta Agosto 2007. Al día de hoy cuenta con una infraestructura consolidada y en crecimiento [9].

2.10.2. Ubicación

La ubicación es parte determinante para el emplazamiento de aerogeneradores por las características que se consideran para el estudio de los vientos. La ciudad de Tulancingo se encuentra entre los paralelos 20°03' y 20° 13' de latitud norte; los meridianos 98° 14' y 98° 31' de longitud oeste, a 2180 msnm, cuenta con una superficie de 217.16 km². Ocupa el 1.04% de la superficie del estado. Tulancingo se encuentra en una de las regiones geográficas del Estado de Hidalgo llamada Valle de Tulancingo, ubicada en la parte sur oriente de la entidad [9].

2.10.3. Relieve

El relieve es importante al considerar la cimentación de la torre del aerogenerador, así como los efectos de turbulencias en el viento que se puedan generar en función al mismo. La región está ubicada en el Eje Neo volcánico formado por llanuras principalmente, y por sierra en menor proporción. Su topografía presenta una superficie semi-plana, cortada por cañadas, barrancas, cerros y volcanes. El suelo es de tipo semi- desértico, rico en materia orgánica y nutriente [15].

2.10.4. Clima

El clima en Jaltepec población cercana a Tulancingo se conoce como un clima de estepa local. A lo largo del año llueve poco en Tulancingo. El clima aquí se clasifica como BSk por el sistema Köppen Geiger. En Tulancingo, la temperatura media anual es de 15.2 °C. En la Tabla 2, se observan datos históricos del tiempo en Tulancingo.

Tabla 2. Datos históricos del tiempo Tulancingo [15].

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
mm	11	8	14	36	61	93	79	73	105	51	14	8
°C	12.1	13.6	16	17.4	17.7	17.3	16.1	16.1	15.6	14.4	13.3	12.5
°C (min)	4	5	7.1	8.8	9.8	10.6	9.7	9.5	9.8	7.8	5.9	4.8
°C (max)	20.3	22.3	24.9	26.1	25.7	24	22.5	22.8	21.5	21	20.8	20.3
°F	53.8	56.5	60.8	63.3	63.9	63.1	61	61	60.1	57.9	55.9	54.5
°F (min)	39.2	41	44.8	47.8	49.6	51.1	49.5	49.1	49.6	46	42.6	40.6
°F (max)	68.5	72.1	76.8	79	78.3	75.2	72.5	73	70.7	69.8	69.4	68.5

Capítulo 3. Generación eólica

Un aerogenerador es un mecanismo capaz de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica a través de sus hélices o palas, encargadas de aprovechar las fuerzas aerodinámicas generadas en ellas, debido a su geometría, transmitiendo un par a una flecha, y esta energía puede aprovecharse para mover un generador de corriente eléctrica [10].

3.1. Potencia disponible del viento.

La energía disponible del viento es básicamente la energía cinética debido al movimiento de la masa de aire sobre la tierra. Las palas de la turbina de viento reciben la energía cinética y la transforman en energía mecánica y más tarde en energía eléctrica. La eficiencia para convertir la energía eólica en eléctrica depende de la eficiencia con la cual el rotor interactúa con el viento. Considerando un viento que cruza un volumen de control, con una sección A (área) como el que se muestra en la figura 10 [10].

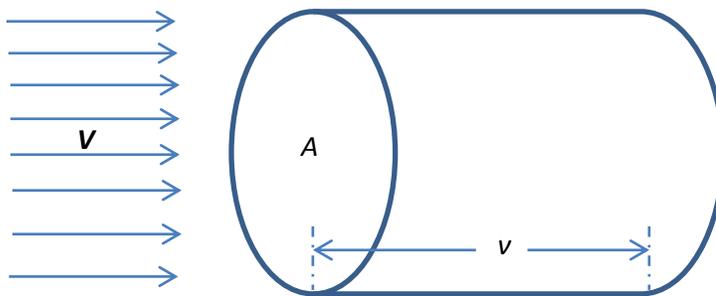


Figura 10. Energía disponible en el viento [10].

La energía cinética de una corriente de aire con masa m y moviéndose con una velocidad v está dada por la ecuación 2.1:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

La energía cinética disponible en una corriente de aire para la turbina puede ser expresada como se muestra en la ecuación 2.2:

$$E_c = \frac{1}{2}v\rho V^2 \quad (2.2)$$

Donde V es el volumen de la sección por donde cruza el aire (tubo) y ρ es la densidad del aire. Si ahora se considera, que el aire que cruza por la sección A por unidad de tiempo, se obtendrá la potencia que, como indica su definición: es la energía por unidad de tiempo, puede ser expresada como en la ecuación 2.3:

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.3)$$

Obteniendo así la potencia, se puede conocer la energía que se puede extraer del viento por una turbina (aerogenerador). Cuando el viento supera la velocidad mínima de arranque el rotor comienza a generar potencia aumentando ésta a medida que aumenta la velocidad del viento, hasta que éste alcanza una velocidad nominal que corresponde a una potencia nominal del generador [10].

La derivación original para la potencia máxima que una turbina puede extraer del viento se le atribuye a Albert Betz, el primero que formuló la relación en 1919. Como se muestra en la figura 11 se analiza este estudio donde el viento se acerca desde la izquierda se ralentiza cuando una parte de su energía cinética se extrae por la turbina. El viento que abandona la turbina tiene una velocidad más baja y la presión se reduce, haciendo que el aire se expanda a favor del viento de la máquina, la velocidad del viento sin perturbación es v , y la velocidad del viento a través del plano de las palas del rotor es v_b . La tasa de flujo de masa de aire dentro del tubo de corriente es igual en todas partes m . La potencia extraída por las cuchillas P_b es igual a la diferencia de energía cinética entre el barlovento y sotavento, en consecuencia la relación matemática de estas afirmaciones se muestra en la ecuación 2.4 [10].

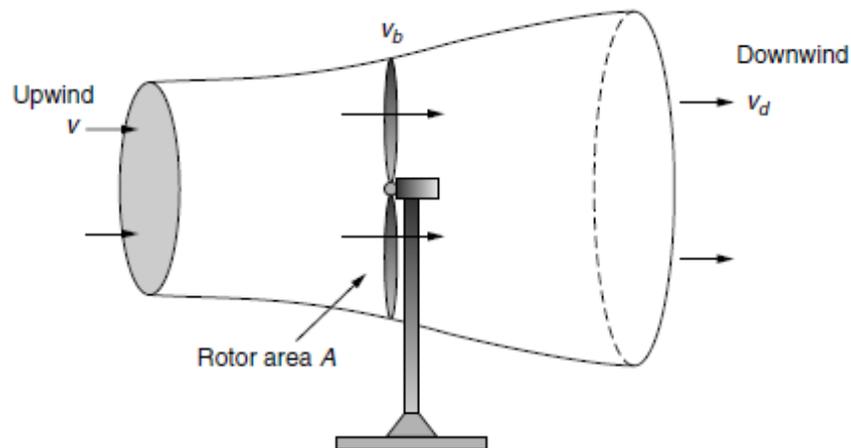


Figura 11. Tubo de corriente de aire que se forma en el caudal de masa m [10].

$$P_b = \frac{1}{2} \dot{m} (v^2 - v_d^2) \quad (2.4)$$

En el plano del rotor es más fácil determinar la masa (m) del caudal, sabiendo que la sección transversal es sólo el área de barrido del rotor (a), la masa de flujo es, por lo tanto;

$$\dot{m} = \rho A v_b \quad (2.5)$$

La relación de velocidades de viento saliente y el viento entrante es λ ecuación 2.6:

$$\lambda = \left(\frac{v_d}{v} \right) \quad (2.6)$$

Por lo tanto, la potencia P_b es:

$$P_b = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{v + \lambda v}{2} \right) \left(v^2 - \lambda^2 v^2 \right) = \frac{1}{2} \rho A v^3 \cdot \left[\frac{1}{2} (1 + \lambda) (1 - \lambda^2) \right] \quad (2.7)$$

La ecuación (2.8) nos muestra que la potencia extraída del viento es igual a la potencia del viento entrante multiplicada por la fracción de la energía del viento que se extrae de las cuchillas. Por lo tanto la eficiencia del rotor (C_p) es expresada en la ecuación 2.8.

$$C_p = \left[\frac{1}{2} (1 + \lambda) (1 - \lambda^2) \right] \quad (2.8)$$

La relación fundamental para la potencia entregada por el rotor se convierte la ecuación 2.9

$$P_b = \frac{1}{2} \rho A v^3 \cdot C_p \quad (2.9)$$

Para encontrar la máxima eficiencia del rotor tomamos la derivada de la ecuación 2.8, con respecto a λ e igualamos a cero:

$$\begin{aligned} \frac{dC_p}{d\lambda} &= \frac{1}{2} \left[(1 + \lambda)(-2\lambda) + (1 - \lambda^2) \right] = 0 \\ &= \frac{1}{2} \left[(1 + \lambda)(-2\lambda) + (1 - \lambda)(1 - \lambda) \right] = \frac{1}{2} (1 + \lambda)(1 - 3\lambda) = 0 \quad (2.10) \end{aligned}$$

Lo cual tiene la solución:

$$\lambda = \frac{v_d}{v} = \frac{1}{3} \quad (2.11)$$

Concluyendo que la eficiencia máxima de la cuchilla se obtendrá si se retarda el viento v_d a un tercio de la velocidad v de entrada. Si ahora sustituimos $\lambda = 1/3$ en la ecuación para la eficiencia del rotor (2.12), la eficiencia máxima teórica de la cuchilla es:

$$C_{P_{\max}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{3} \right) \left(1 - \frac{1}{3^2} \right) = \frac{16}{27} = .593 = 59.3\% \quad (2.12)$$

Esta conclusión define, que la eficiencia máxima teórica de un rotor es de 59.3%, llamada eficiencia de Betz. En la figura 12 se demuestra la eficiencia del rotor [10].

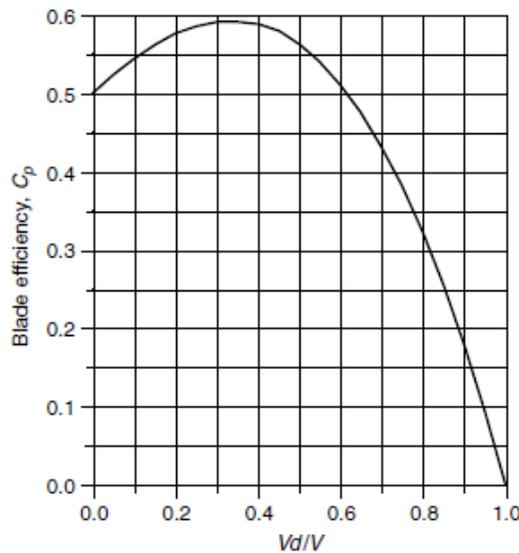


Figura 12. La eficiencia del rotor alcanza un máximo cuando el viento se desacelera a un tercio de su valor de entrada [10].

Para una velocidad de viento dada, la eficiencia del rotor es una función de la velocidad a la que el rotor gira. Si el rotor gira lentamente, la eficiencia decrece dejando pasar demasiado viento sin afectarlo. Si el rotor gira demasiado rápido, la eficiencia se reduce a medida que la turbulencia causada por una pala afecta cada vez más la pala que sigue. Para ilustrar la eficiencia del rotor se presenta la velocidad punta de relación (Tip Speed Ratio). La cuál es la velocidad a la que la punta exterior de la pala se mueve, dividida por la velocidad del viento como se muestra en la ecuación 2.13.

$$TSR = \frac{\text{Rotor tip speed}}{\text{Wind speed}} = \frac{rpm \times \pi D}{60 v} \quad (2.13)$$

Donde rpm es la velocidad del rotor en revoluciones por minuto; D es el diámetro del rotor (m); y v es la velocidad del viento (m/s) en contra del viento de la turbina, la gráfica de eficiencia típica de varios tipos de rotores contra TSR se indica en figura 13. Donde el modelo estadounidense multipala gira de forma relativamente lenta, con un óptimo TSR de menos de 1 y eficiencia máxima de un poco más de 30%. Los rotores de dos y tres palas giran mucho más rápido, con TSR óptima en el rango de 4-6 y eficiencias máximas de aproximadamente 40 a 50%. También se muestra una línea que corresponde a una "eficiencia ideal", que se acerca al límite de Betz a medida que aumenta la velocidad del rotor. La curvatura en la línea de máxima eficiencia refleja el hecho de que un rotor girando lentamente intercepta todo el viento, lo que reduce su eficiencia máxima.

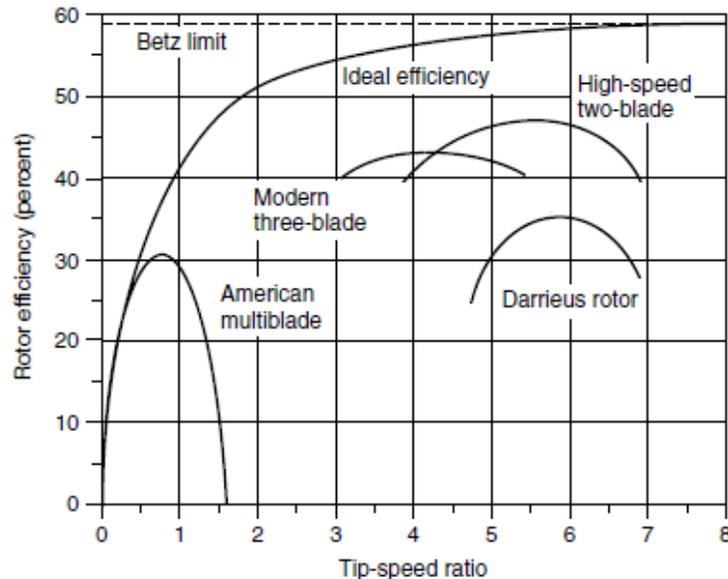


Figura 13. Rotores con un menor número de cuchillas alcanzan su máxima eficacia a mayores velocidades de rotación [10].

Gran parte de la literatura dice que un aerogenerador con pocas palas (entre 1 y 5) son óptimas para su uso en aerogeneradores, debido a que estos alcanzan mayor velocidad de rotación, mientras que los rotores con una mayor cantidad de palas (entre 9 y 15) son útiles en la implantación de aerobombas, debido a que su velocidad de rotación es más lenta sin embargo estos generan un par mayor. Otro aspecto en el que influye el número de palas es en el equilibrado dinámico.

Para aerogeneradores se ha observado que trabajan de forma más eficiente con tres palas y con una relación de velocidades que puede oscilar entre 7 y 10 esto dependerá por

supuesto del diámetro del aerogenerador ya que para aerogeneradores pequeños los valores de λ serán siempre mayores [10].

3.2. Aerogeneradores

El aerogenerador es un dispositivo consistente en un sistema mecánico de rotación o rotor provisto de palas que con la energía cinética del viento mueven un generador eléctrico conectado al sistema motriz. La potencia obtenida en este proceso es directamente proporcional al cubo de la velocidad del viento, lo que conlleva que ligeras variaciones de velocidad, originen grandes variaciones de potencia.

La potencia del viento depende principalmente de 3 factores:

- Área por donde pasa el viento (rotor)
- Densidad del aire
- Velocidad del viento

El aerogenerador se compone de un soporte rígido y de gran altura para resistir la fuerza del viento y evitar turbulencias de su base. El rotor dispone también de sistemas de orientación y regulación para el control de la posición respecto al viento y de la velocidad de rotación del mismo.

El sistema de generación es el encargado de producir la energía eléctrica mediante la conexión al rotor por un sistema de transmisión. Esta estructura es referida a las principales partes que componen el aerogenerador, como se observa en la figura 14 [12].



Figura 14. Partes del aerogenerador [12].

3.3. Tipos de aerogeneradores

En la actualidad existe una enorme variedad de modelos de aerogeneradores diferentes entre sí tanto por la potencia proporcionada, como por el número de palas, la configuración del eje o incluso por la manera de producir energía eléctrica.

Los aerogeneradores pueden clasificarse según la posición en que se encuentra el eje de giro en: Turbinas de viento de eje horizontal y Turbinas de viento de eje vertical y según el número de palas: esta puede ser muy variada, como puede verse en la figura 15 y depende en gran medida de la velocidad de rotación o mejor dicho de la relación de velocidades λ [10].

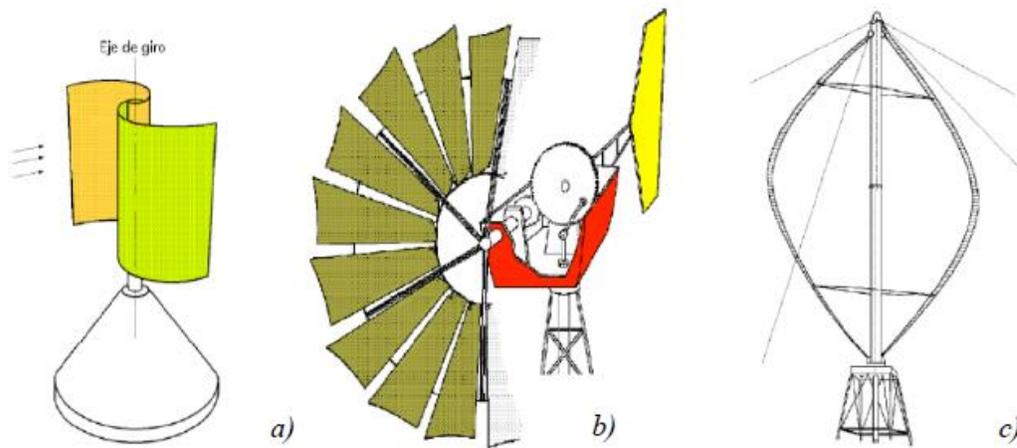


Figura 15. Tipos de aerogeneradores, a) Savonius, b) Americano de eje horizontal, c) Darrieus [10].

3.3.1. Turbina de viento de eje horizontal

Son las más habituales y en ellas se ha centrado el mayor esfuerzo de diseño en los últimos años. Se les denomina también “HAWT”, que corresponde a las siglas en inglés “Horizontal Axis Wind Turbines”. Los principales tipos de máquinas eólicas de eje horizontal, son:

- a) Máquinas monopala, bipala, tripala, etc.
- b) Máquinas multipala.
- c) Hélices con palas de ángulo de ataque variable.

Los aerogeneradores de eje horizontal constan de un rotor, de una góndola que contiene al generador eléctrico, dínamo o alternador, el sistema de acoplamiento que puede ser a su vez multiplicador del número de revoluciones proporcionadas por la hélice y al sistema de control y orientación; todo esto va montado sobre una torre en la que hay que vigilar con sumo cuidado sus modos de vibración. La hélice puede presentar dos tipos de posiciones frente al viento, como son: Barlovento (*upwind*), en la que el viento viene de frente hacia las palas, teniendo el sistema de orientación detrás y Sotavento (*downwind*), en la que el viento incide sobre las palas de forma que éste pasa primero por el mecanismo de orientación y después actúa sobre la hélice [10].

3.3.2. Turbina de viento de eje vertical

Su característica principal es que el eje de rotación se encuentra en posición perpendicular al suelo. Son también llamados “VAWT”, del inglés “Vertical Axis Wind Turbines”, algunos ejemplos de estos aerogeneradores son:

- a) Savonius. Dos o más filas de semicilindros colocados opuestamente.
- b) Darrieus. Consisten en dos o tres arcos que giran alrededor del eje.
- c) Panemonas. Cuatro o más semicírculos unidos al eje central, su rendimiento es bajo.

El modelo Darrieus arranca mal, mientras que el Savonius se puede poner en funcionamiento con una pequeña brisa; en algunos casos se hace una combinación sobre un mismo eje de ambas máquinas de forma que un rotor Savonius actúe durante el arranque y un rotor Darrieus sea el que genere la energía para mayores velocidades del viento [10].

3.3.3. Ventajas de las turbinas HAWT Y VAWT

Las ventajas de los aerogeneradores de eje vertical son:

- a) No necesitan sistemas de orientación.
- b) Los elementos que requieren un cierto mantenimiento pueden ir situados a nivel del suelo.
- c) No requieren mecanismos de cambio de revoluciones, por lo tanto no suelen emplearse en aplicaciones que precisen una velocidad angular constante.

Las ventajas de los aerogeneradores de eje horizontal son:

- a) Mayor rendimiento.
- b) Mayor velocidad de giro (multiplicadores más sencillos).
- c) Menor superficie de pala S a igualdad de área barrida A .
- d) Se pueden instalar a mayor altura, donde la velocidad del viento es más intensa.

3.4. Clasificación eléctrica de aerogeneradores

La función de las palas es convertir la energía cinética del viento en potencia de rotación del eje para hacer girar un generador que produce energía eléctrica. Los generadores consisten de un rotor que gira en el interior de un alojamiento estacionario llamado estator. La electricidad se crea cuando los conductores se mueven a través de un campo magnético, cortando líneas de flujo y se genera voltaje. Mientras, las turbinas de viento pequeñas para carga de baterías utilizan generadores de corriente continua, las máquinas conectadas a la red utilizan generadores de corriente alterna [10].

3.4.1. Generadores síncronos

El funcionamiento de los generadores síncronos, que producen casi la totalidad de la energía eléctrica en el mundo, se ven obligados a girar a una velocidad rotacional precisa determinada por el número de palas y la frecuencia necesaria para las líneas de alta tensión. Sus campos magnéticos son creados en sus rotores; aunque los generadores síncronos son muy pequeños pueden crear el campo magnético necesario con un rotor de imán permanente en casi todas las turbinas eólicas, y el uso de generadores síncronos crea el campo mediante la ejecución de corriente continua a través de arrollamientos alrededor del núcleo del rotor. El hecho de que los rotores de generadores síncronos necesiten corriente continua de su devanado crea dos complicaciones, en primer lugar, la CC tiene que ser proporcionada, por lo general por un circuito de rectificación llamado excitador, el cual es necesario para convertir corriente continua desde la red para el rotor.

En segundo lugar, esta CC tiene que hacer girar el rotor, lo que significa que se necesitan anillos de deslizamiento sobre el eje del rotor, junto con pinceles que presionan contra ellos. La sustitución de los cepillos y la limpieza de los anillos colectores se suman a la necesidad de mantenimiento por estos generadores síncronos. En la figura 16 se muestra el sistema básico para una turbina eólica con un generador síncrono [10].

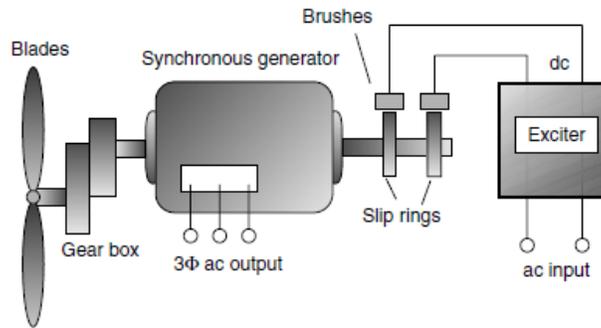


Figura 16. Un generador síncrono trifásico [10].

Un generador síncrono necesita corriente continua para los devanados del rotor, que por lo general significa que se necesitan anillos colectores y escobillas para transferir esa corriente al rotor desde el excitador.

3.4.2. El generador asíncrono o de inducción

La mayoría de las turbinas eólicas del mundo utilizan generadores de inducción en lugar de la máquina sincrónica que acabamos de describir. Un generador asíncrono es una máquina de inducción que no gira a una velocidad fija. Mientras que los generadores de inducción son poco comunes en sistemas de energía, distintos de las turbinas de viento, su contraparte, es la inducción del motor, son los de mayor prevalencia utilizando casi un tercio de toda la electricidad generada en todo el mundo. De hecho, una máquina de inducción puede actuar como un motor o generador. Como un motor durante puesta en marcha y como generador cuando el viento desputa en las turbinas de viento con generadores de inducción. Como un motor, el rotor gira un poco más lento que la velocidad de sincronismo establecido por sus devanados de campo, y en sus intentos de "emparejarse" entrega potencia a su eje de rotación. Como un generador, las aspas de la turbina giran el rotor un poco más rápido que la velocidad síncrona y la energía se entrega en sus devanados de campos estacionarios [10].

La principal ventaja de los generadores de inducción asíncronos es que sus rotores no requieren de excitadores, escobillas, y anillos colectores que son necesarios por la mayoría de generadores síncronos. Lo hacen mediante la creación del campo magnético necesario en el estator en lugar del rotor. Esto significa que son menos complicados, menos costosos y requieren menos mantenimiento. Los generadores de inducción también son un poco más indulgentes en términos de tensiones a los componentes mecánicos de la turbina de viento durante condiciones de viento racheado [10].

La máquina asíncrona o de inducción es el convertidor electromecánico más utilizado en la industria. Fue investigado por Tesla a finales del siglo XIX y nace como solución al problema de utilizar la corriente alterna. Tesla había entendido las ventajas que poseía la corriente alterna, cuyos niveles de tensión pueden ser variados mediante transformadores, sobre la corriente continua cuyas dificultades de transmisión para la época

ya comenzaban a ser evidentes. La defensa de la corriente continua era realizada por Edison, famoso inventor norteamericano que contaba con un inmenso prestigio.

Sin embargo, la visión comercial de Whestinghouse impulsa las ideas de Tesla para la construcción de la primera gran central hidroeléctrica que se construye en las Cataratas del Niágara utilizando generadores de corriente alterna, que utilizan transformadores para elevar la tensión, transmiten mediante líneas en alta tensión y la reducen para alimentar los motores de inducción que accionan la creciente carga industrial. Desde ese crucial momento y hasta la actualidad, la máquina de inducción ha ido copando la inmensa mayoría de aplicaciones en la industria, el comercio y en el hogar.

La máquina de inducción que opera como un motor hace girar a una velocidad algo más lenta que la velocidad de sincronismo determinada por el estator.

Esta diferencia en la velocidad se denomina deslizamiento, que se define matemáticamente como.

$$s = \frac{N_S - N_R}{N_S} = 1 - \frac{N_R}{N_S} \quad (2.14)$$

Donde s es el deslizamiento del rotor, N_s es la velocidad = $120f / p$ rpm síncrona sin carga, donde f es la frecuencia y p es el número de polos, y N_R es la velocidad del rotor. Como carga en el motor aumenta, el rotor se ralentiza, aumentando el deslizamiento, hasta que se genera un par suficiente para satisfacer la demanda. De hecho, para la mayoría de los motores de inducción, el deslizamiento aumenta linealmente con el torque dentro del rango normal de deslizamiento permitido. Llega un punto, sin embargo, cuando la carga es superior a lo que es llamado el "par máximo" y al aumentar el deslizamiento ya no se satisface la carga y el rotor se detendrá ver figura 17 [10].

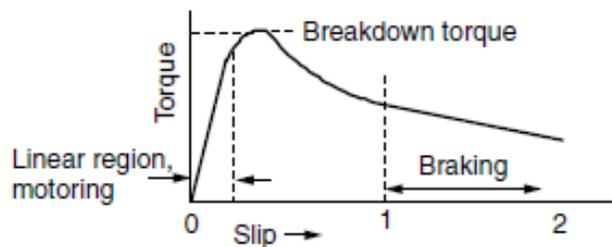


Figura 17. La curva de par-deslizamiento para un motor de inducción [10].

Si el rotor se ve obligado a girar en la dirección opuesta del campo del estator, la máquina de inducción funciona como un freno.

3.5. Importancia del rotor variable

Hay otras razones, además de la alta velocidad del viento para que el control de velocidad del rotor sea una tarea importante del diseño. Recordemos la figura. 13, en la que C_p , eficiencia rotor, dependerá de la relación punta de velocidad, TSR. Los aerogeneradores modernos operan mejor cuando su TSR está en el intervalo de alrededor de 4-6, lo que significa que la punta de una hoja se mueve a 4-6 veces la velocidad del viento. Idealmente, entonces, para la máxima eficiencia de los álabes de la turbina su velocidad debe cambiar a medida que cambia la velocidad del viento. La figura 18 ilustra este punto al mostrar un ejemplo de eficiencia de las palas frente a la velocidad del viento con tres pasos discretos en rpm del rotor como un parámetro. A menos que la velocidad del rotor pueda ajustarse, la eficiencia de la pala C_p cambia a medida que cambia la velocidad del viento [10].

Es interesante notar, sin embargo, que C_p es relativamente plana cerca de sus picos, de manera que ajuste continuo de rpm es sólo modestamente mejor que tener sólo algunos rpm discretos disponibles. Mientras que la figura. 18 muestra el impacto de la velocidad del rotor sobre la eficiencia de la cuchilla, lo más importante es la energía eléctrica entregada por la turbina eólica. La variación de la velocidad del rotor de 20 a 30 a 40 rpm para un rotor con rendimiento se indica en la figura 18, junto con un engranaje asumido y eficiencia del generador del 70% [10].

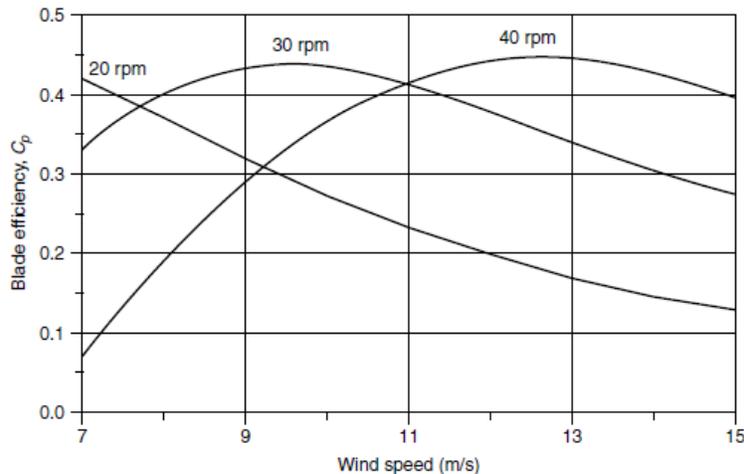


Figura 18. Tres velocidades discretas para un rotor hipotético [10].

Mientras que los beneficios de la eficiencia de alabe o palas son los ajustes de la velocidad se ilustra en figura 19, el generador puede necesitar girar a una tasa fija con el fin de suministrar corriente y voltaje en fase con la red que se está alimentando. Así, para las turbinas conectadas a la red, el desafío consiste en diseñar máquinas que puedan de alguna manera acomodar la velocidad variable del rotor y el generador, o al menos intenta hacerlo.

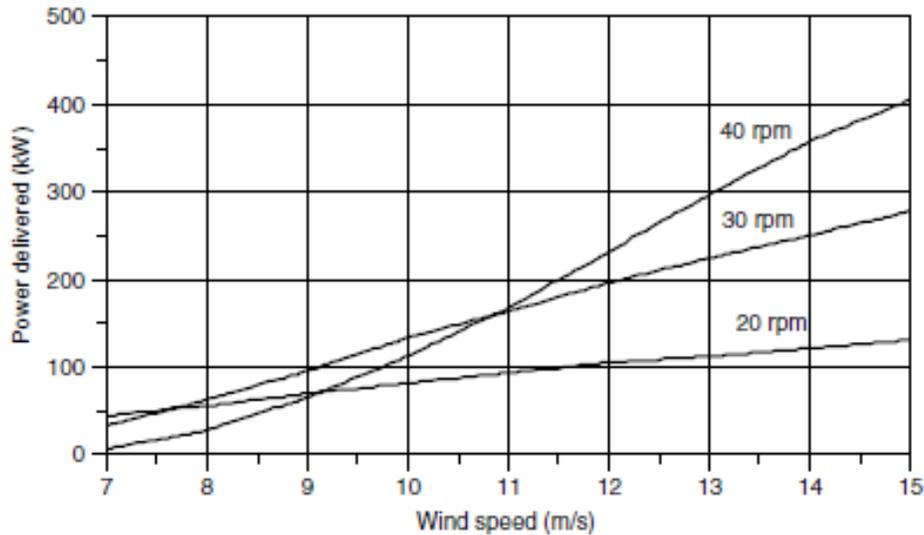


Figura 19. Impacto de un ajuste de la velocidad de rotación de tres pasos sobre la potencia entregada [10].

Para vientos por debajo de 7.5 m/s, 20 rpm es mejor; entre 7.5 y 11 m/s, 30 rpm es mejor; y por encima de 11 m/s, 40 rpm es el mejor.

3.6. Rosa de viento.

Una rosa de viento proporciona información sobre las velocidades relativas del viento en diferentes direcciones, las rosas de los vientos varían de un lugar a otro, son en realidad una especie de huella meteorológica. Un vistazo a la rosa de los vientos es extremadamente útil para situar aerogeneradores, si una gran parte de la energía del viento viene de una dirección particular, lo que deseará, cuando coloque una turbina eólica en el paisaje, será tener la menor cantidad de obstáculos posibles en esa dirección, así como un terreno lo más liso posible [9].

3.7. Histograma del viento

La velocidad media del viento se puede considerar como el número total de, metros, kilómetros o millas de viento que han soplado más allá del sitio, dividido por el tiempo total que se tardó en hacerlo. Supongamos, por ejemplo, que durante un período de 10 h, había 3 h sin viento, 3 h a 8.04672 km/h, y 4 h a 16.0934 km/h. La velocidad del viento promedio sería como se observa en la ecuación 2.16 [10].

$$v_{avg} = \frac{\text{millas de viento}}{\text{horas totales}} = \frac{3 \text{ h} \cdot \text{km/hr} + 3\text{h} \cdot 8.04672\text{km/h} + 4\text{h} \cdot 16 \text{ km/h}}{3+3+4 \text{ h}}$$

$$v_{avg} = \frac{91.14 km}{10 h} = 1.38 m/s \quad (2.16)$$

El anemómetro es un instrumento que se usa principalmente para medir la velocidad del viento, estos datos del sitio de horas anuales de viento que soplan a 1 m/s (0.5 a 1.5 m/s), a 2 m/s (1.5 a 2.5 m/s), y así sucesivamente puedan asegurarse. Una tabla de ejemplo de datos, junto con un histograma, se muestra en la figura 20 [10].

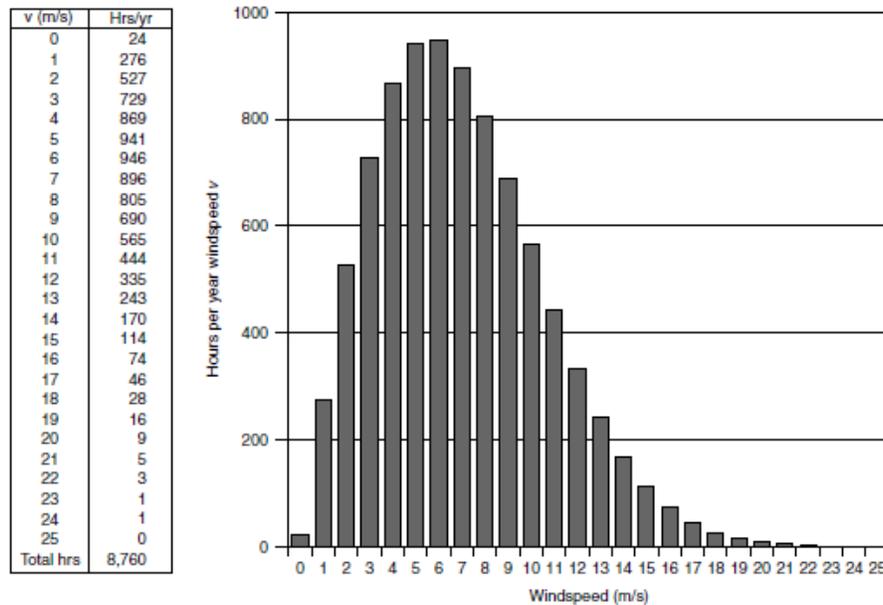


Figura 20. Datos de sitio e histograma de viento resultante [10].

Función de la potencia del viento, es el tipo de información que se muestra en el histograma de velocidad del viento discreta en la figura 20 es muy a menudo presentada como una función continua, llamada una función de densidad de probabilidad, como la que se presenta en la figura 21, el área bajo la curva es igual a la unidad. [10].

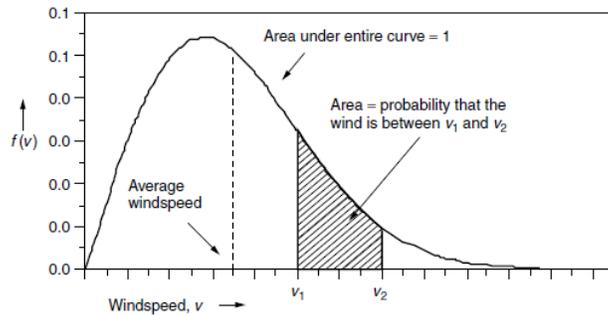


Figura 21. Función de densidad de probabilidad de la velocidad del viento [10].

El punto de partida para la prospección eólica es reunir suficientes datos del sitio de la velocidad promedio del viento.

Capítulo 4. Ubicación y parámetros de instalación del aerogenerador Skystream 3.7

Introducción

En función al diseño para la instalación del aerogenerador Skystream modelo 3.7, en este capítulo se describen características técnicas, eléctricas y civiles así como equipos adicionales a utilizar.

4.1. Ubicación del aerogenerador Skystream 3.7 en la UPT

El viento se hace más lento ya que su energía es extraída por un rotor del aerogenerador, lo que reduce la potencia disponible en la dirección del viento hacia los aerogeneradores, eventualmente a cierta distancia, la velocidad del viento se recuperará. Los estudios teóricos de las matrices cuadradas con espaciamiento uniforme, ilustrara la degradación de rendimiento cuando los aerogeneradores están demasiado juntos. La figura 22 muestra la eficiencia de arreglos (salida prevista dividido por la potencia que resultaría si no hubiera interferencia) como una función del espaciamiento entre torre se expresa en diámetros de rotor. El parámetro es el número de turbinas en una serie igualmente espaciados. Por ejemplo, una matriz de 2×2 consta de cuatro aerogeneradores equidistantes dentro de un área cuadrada, mientras que una matriz 8×8 es 64 turbinas en un área cuadrada. Cuanto mayor sea la matriz, mayor será la interferencia, así que la eficiencia de la matriz cae [10].

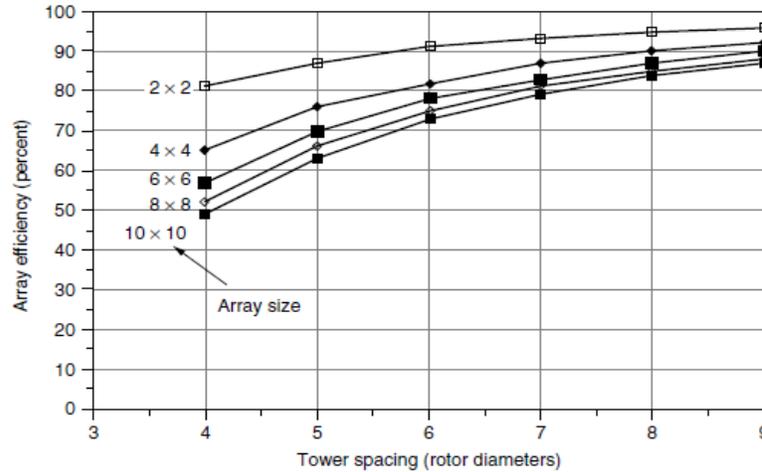


Figura 22. Impacto de separación entre torres y tamaño de la matriz en el rendimiento de los aerogeneradores. [Datos de Milborrow y Surman (1987), presentan en Grubb y Meyer (1993) [10].

La figura 23 muestra que la interferencia debería ser de al menos 9 diámetros de rotor para todos estos tamaños de matriz cuadrada, pero para una pequeña degradación de rendimiento de menos de aproximadamente 20% para el espaciado de 6 diámetros con 16 turbinas. Intuitivamente, un área de matriz no debe ser cuadrada, si no rectangular con sólo unas pocas filas largas perpendiculares a los vientos dominantes, con cada fila con muchas turbinas. La experiencia ha arrojado algunas reglas de dedo para la separación de la torre para tener matrices rectangulares. El espacio recomendado es 3-5 el diámetro del rotor que separan torres dentro de una fila y 5-9 diámetros entre filas [10].

La compensación o escalonamiento, de una hilera de torres detrás de los otros, como se ilustra en la figura 23, También es común. Ahora podemos hacer algunas estimaciones preliminares del potencial de energía eólica por unidad de área de la tierra como el siguiente ejemplo.

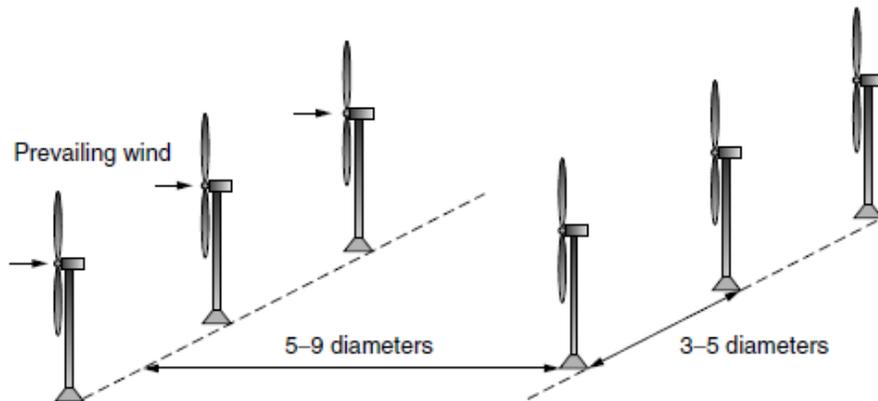


Figura 23. Espaciamiento óptimo de las torres [10].

Como regla general, la turbina debe ser montada lo más alta en el aire y tan lejos de obstrucciones como sea posible [10].

Para encontrar la mejor ubicación es necesario verificar si existen, árboles, edificios, colinas u otras obstrucciones, tomando nota de lo alto que son y dónde prevalece la dirección del viento.

El mejor sitio para la torre y la turbina será contra el viento y por encima de cualquier obstáculo que puede existir. Si hay casas, edificios o árboles en los alrededores una buena regla para montar la turbina es considerar, al menos 15 metros por encima de cualquier obstáculo menos de 100 a 150 m. de la misma como se ilustra en la figura 24 [10].

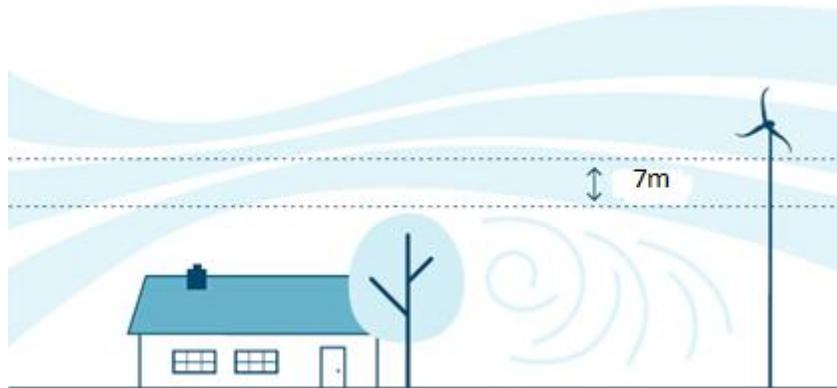


Figura 24. Localización óptima [8].

Tomando en consideración la especificación del manual para la cimentación del aerogenerador Skystream 3.7, se determinó la distancia entre filas así como las interpostales para la correcta operación del mismo sabiendo que existen tres aerogeneradores Whisper [8].

Ubicación del aerogenerador Skystream 3.7

En la figura 25 se confirma la ubicación donde será instalado el aerogenerador Skystream 3.7 en la Universidad Politécnica de Tulancingo.



Ubicación del aerogenerador Skystream 3.7

Figura 25. Ubicación del aerogenerador Skystream 3.7.

4.2. Tipos de torre que puede ser utilizadas para el aerogenerador Skystream 3.7

Los tipos de torres donde puede ser instalado el Skystream, siempre y cuando se cumplan con las especificaciones de carga para la torre. Una torre monopolo, es el tipo de torre más deseado, pero puede ser más cara que algunas otras opciones como serian la torre venteada o torre de celosía [10].

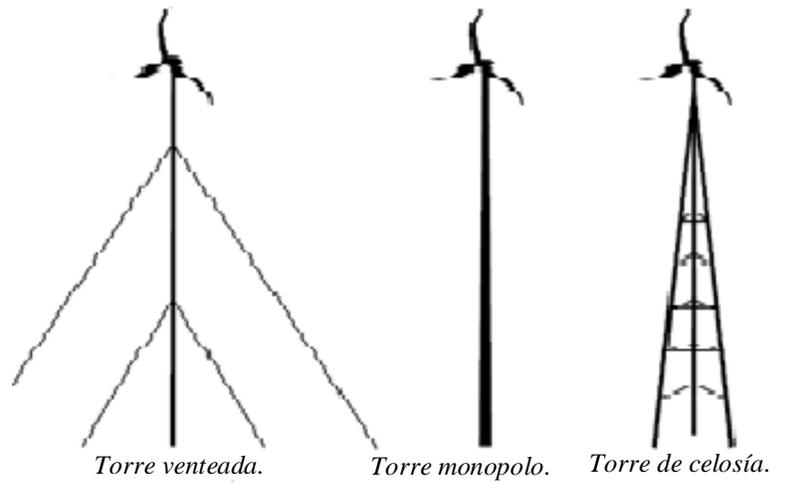


Figura 26. Tipos de torres [10].

Determinar cuál es el tipo de torre, así como su altura, es determinante y deberá estar basado en tener datos y estadísticas apropiadas de acuerdo a la ubicación del aerogenerador. Con base en los datos estadísticos en el sitio de instalación la torre propuesta es la monopolo con una altura de 13.7m.

4.3. Obra civil

4.3.1. Introducción

Es importante leer y comprender toda la guía de instalación antes del procedimiento si se va a instalar el aerogenerador sobre una torre de 13.7m, como medida de mejora para solventar la torre propuesta y la importancia de conocer los tipos de suelo como se indica en la tabla 3 [8].

Tabla 3. Tipos de suelo para la correcta cimentación del Skystream 3.7 [8].

Soil Classification		Allowable Soil Pressure		Design Loads at Tower Base*			Minimum Pier Dimensions**			Reinforcement	
		Lateral psf	Vertical psf	Shear (V) lbs.	Moment (M) ft-lbs	Vertical (P) lbs	Depth (A) feet	Diameter (B) Inches	Projection (C) Inches	Vertical	Ties
Class 1	Crystalline bedrock	1200	12,000	867	26,290	760	6	24	6	(8)-#6	#4 @ 9"
							5			(12)-#6	O.C. max
Class 2	Sedimentary and foliated rock	400	4000	867	26,290	760	8	24	6	(8)-#6	#4 @ 9"
							7			(12)-#6	O.C. max
Class 3	Sandy gravel and/or gravel (GW and GP)	200	3000	867	26,290	760	10	24	6	(8)-#6	#4 @ 9"
							9			(12)-#6	O.C. max
Class 4	Sand, silty sand, clayey sand, silty gravel and clayey gravel (SW, SP, SM, SC, GM and GC)	150	2000	867	26,290	760	10	24	6	(12)-#6	#4 @ 9"
											O.C. max
Class 5	Clay, sand clay, silty clay, clayey silt, silt, and sandy silt (CL, ML, MH and CH)	100	1500	867	26,290	760	11	24	6	(12)-#6	#4 @ 9"
							10			30	O.C. max

La cimentación de la torre, y la colocación de los tornillos "J" deberán cumplir con la especificación como se muestra en la figura 27.

4.3.2. Enmallado [10].

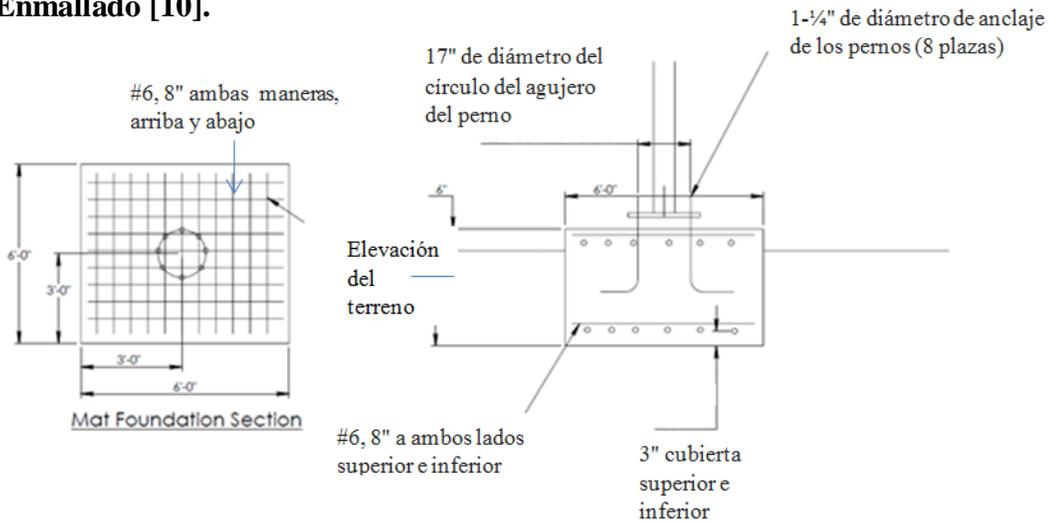


Figura 27. Dibujos técnicos para la especificación de la losa de construcción [8].

Para el enmallado se deben seguir las siguientes indicaciones.

1. El acero de refuerzo debe cumplir con la resistencia que se necesita para su cimentación, esto se logra con varillas y debe cumplir con los requisitos de 60 grados.
2. La soldadura está prohibida con acero de refuerzo.
3. Las jaulas reforzadas se preparan para retener dimensiones apropiadas durante la manipulación y durante la colocación del hormigón.

4. El recubrimiento de hormigón mínimo de refuerzo será de 3" a menos que se indique lo contrario. Los espaciadores aprobados serán utilizados para asegurar una "cobertura mínima [8].

5.- El concreto debe desarrollar una resistencia a la compresión mínima de 3000 PSI en 28- días.

6.- Las proporciones de los materiales de concreto deben ser adecuados para el método de instalación utilizado.

7.- El hormigón se colocará de manera que evite la segregación de materiales de concretos, la infiltración del agua o del suelo y otros sucesos que pueden disminuir la resistencia o durabilidad de la cimentación.

El dibujo técnico para la cimentación se presenta en la figura 28. El diámetro de muelle es de 61 cm y su profundidad puede variar de 1.5 m a 3.35m) en función de la clasificación del suelo. Consulte la tabla 3, para determinar la clasificación del suelo [8].

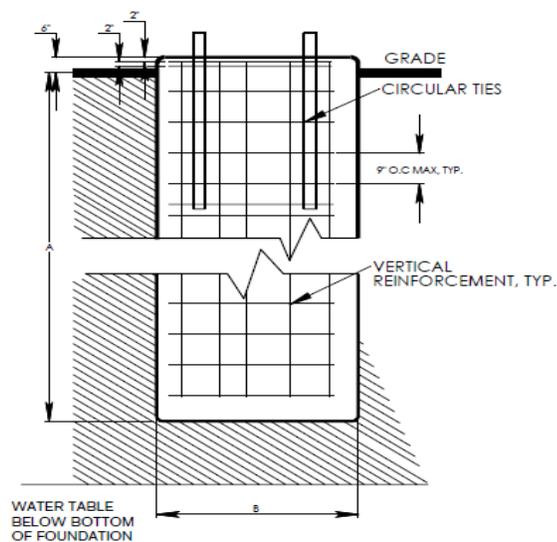


Figura 28. Profundidad del muelle [8].

4.3.3. Kits de pernos de cimentación.

En los párrafos siguientes se describirá el proceso de cimentación y el uso de elementos propios del aerogenerador. Cada kit incluye tornillos galvanizados, tuercas y arandelas construidas de las aleaciones apropiadas de acero para la instalación [8].

Una plantilla del patrón de pernos para ayudar en el posicionamiento de los pernos correctamente en la base de la torre se ilustra en la figura 29. La misma plantilla se utiliza para una altura de la torre de 10.05m y 13.7m.

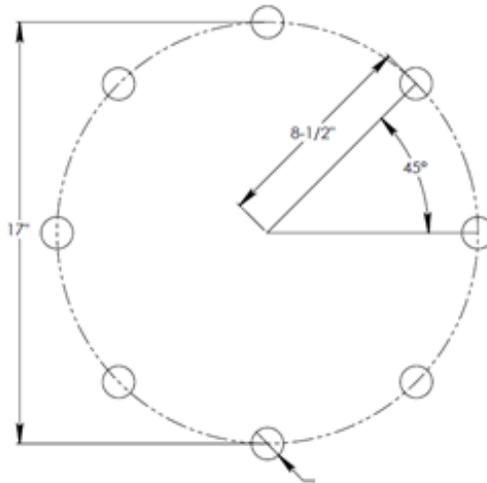


Figura 29. Plantilla de pernos [8].

En la figura 30 se determina la forma correcta una vez ocupada la plantilla de los pernos de la base.

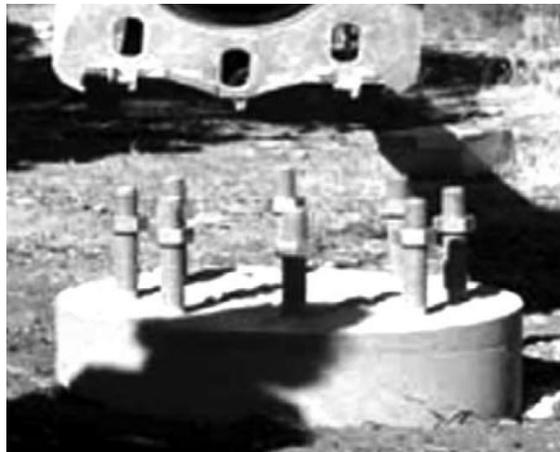


Figura 30. Cimentación para la altura de la torre a 10.05m y 13.5 [8].

Montaje de la torre y aerogenerador

Las instrucciones para izar el *Skystream* se dan a continuación como se muestra en la figura 31, 32, 33, los materiales se indican en la tabla 4.

4.4. Cuchillas cono de nariz y montaje de la antena.

Las cuchillas pueden ser atornilladas al cubo de la cuchilla y montadas en un conjunto completo realizando los siguientes pasos.

- Retire el cubo de montaje de la cuchilla y la placa "aflojando" el cubo mientras sostiene el eje del rotor.

Coloque una hoja entre el cubo de la cuchilla y la placa de montaje, consulte la figura 31, 32, 33, para la orientación adecuada [8].

Nota: Las hojas sólo pueden ser instaladas en una posición debido a que el eje es "triangular"

- Instale sin apretar los pernos, arandelas planas y de presión de una cuchilla dejando suficiente juego.

Nota: El conjunto de cuchillas es auto-ajustable en la operación; sin embargo, debe apretarse con seguridad durante el montaje.

- Instale la nariz del aerogenerador con tres tornillos de cabeza hueca M6-1.0 × 12mm.

Importante: Lubricar abundantemente con aceite las tuercas de las cuchillas y de la vibración de montaje así como tornillos. Los sujetadores tienen chapado extra para evitar la corrosión y lubricación esto facilitará el montaje y desmontaje. Así como la guiñada (Rotación del eje del rotor alrededor de su eje vertical, solo para máquinas de eje horizontal) [8].

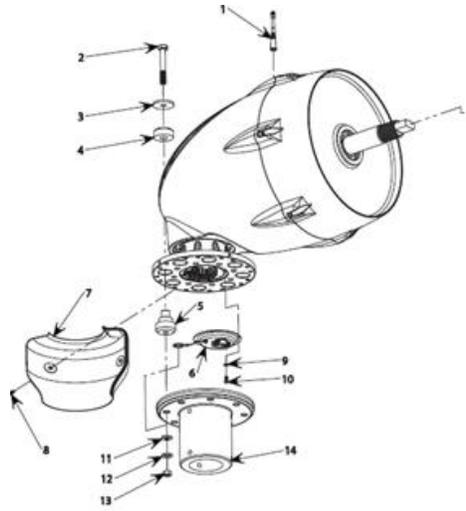


Figura 31. *Guiñada y el montaje de la antena [8].*

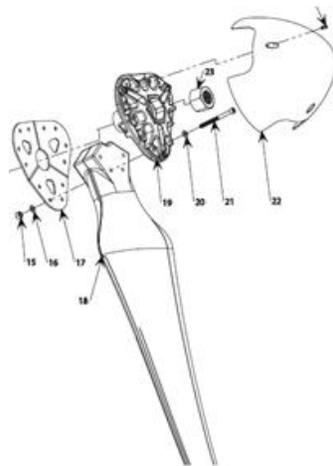


Figura 32. *Conjunto de cuchilla y ojiva [8].*

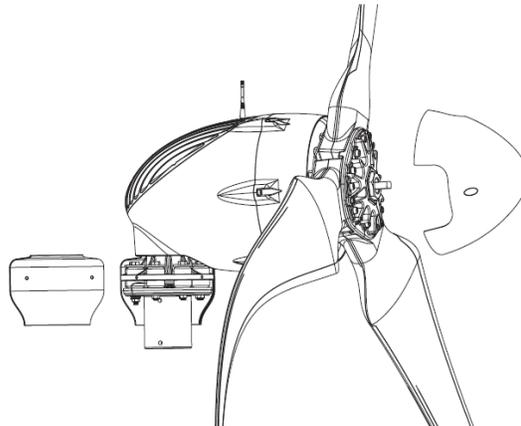


Figura 33. *Ensamble terminado [8].*

Tabla 4. Componentes de la cuchilla cono de nariz y montaje de la antena [8].

N°	Descripción	Cantidad
1	RF Antenna	1
2	Perno M12x1.75x90mm Hex de grado 10.9	8
3	Lavadora desaire	8
4.5	Anillo de aislamiento de vibraciones (4) y el buje (5)	8
6	Conjunto de la cubierta de protección contra impulsos	1
8	Perno M5x8x12mm de grado 8.8	4
9	Arandela de seguridad de acero inoxidable M5	4
10	Perno M5x8x12mm de grado 8.8	4
11	Arandela plana de acero inoxidable (M12)	8
12	Arandela de seguridad de acero inoxidable (M12)	8
13	Perno M12x1.75 de grado 10.9	8
14	Torre de inserción (opcional)	1
15	Tuerca M10x1.5 de grado 12.9	12
16	Arandela de seguridad de acero inoxidable (M10)	12
17	Clavo-placa	1
18	Hoja plato	3
19	Cubo de aspas	1
20	Arandela plana de acero inoxidable (M10)	12
21	Pernos M10x1.3x120mm grado 12.9	12
22	Cono de la nariz	1
23	Retención concentrador tuerca de grado 10.9	1
24	Perno M6x1x12mm de grado 8.8	3

- Instale los aisladores de vibración en la brida como se muestra en la figura 34, así como arandelas y pernos.



Figura 34. Colocación de aisladores de vibración [8].

Monte mitades de blindaje utilizando cuatro tornillos de cabeza M5.

- Usted necesitará una grúa, capaz de izar 77 kg, y ser capaz de llegar a la torre.
- El *Skystream* ensamblado puede ser izado hasta la cima de la torre usando una correa de nylon ancho grande, debe ser asegurado alrededor de la góndola, ceñido y apretado antes de la elevación.
- El *Skystream* puede ser izada con las palas del rotor y buje ya conectados.

El adaptador de la torre sirve para sujetar el aerogenerador, es un soporte que sirve para darle fijación al rotor y al propio tubo, se muestra en la figura 35. Se adjunta a la torre construida, su diámetro nominal es de 12.7 cm [8].



Figura 35. Adaptador para torre [8].

4.5. Instalación de la torre.

En la figura 36, se muestra la forma correcta de fijar la torre tomando en cuenta las bisagras para una adecuada fijación de los tornillos. Al ajustar las tuercas "A" y "B" estas deben ajustarse de tal manera que 5.7cm del perno se extiendan por encima de la placa. Las tres tuercas restantes deben ajustarse más bajas que las tuercas "A" y "B" [8].

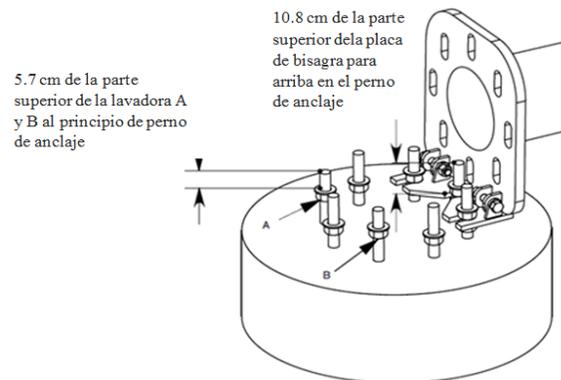


Figura 36. Bisagra de montaje y colocación de las tuercas [8].

4.5.1. Instrucciones de seguridad importantes.

- 1) Este proyecto contiene instrucciones importantes que se deben seguir para bajar, subir y/o nivelar la torre.
- 2) Leer estas instrucciones en su totalidad antes de comenzar la instalación.
- 3) Tener mucho cuidado de las líneas eléctricas aéreas si existieran.
- 4) No comenzar la instalación a menos que todos los equipos y herramientas necesarias estén en el sitio.
- 5) Instalar la torre de acuerdo con los códigos de zonificación y construcción locales. Obtener todos los permisos de construcción necesarios antes de la instalación.
- 6) Permanecer en una distancia de seguridad al subir y bajar de la torre. No caminar o estar de pie bajo la torre y mantenerse separado de los cables.

4.5.2. Nivelación de la torre.

La nivelación de la torre se logra más fácilmente utilizando sólo cuatro de los ocho pernos. Una vez que la torre se nivela los pernos restantes pueden ser bien apretados para asegurar la torre [8].

Tener en cuenta que la nivelación de la torre puede requerir algunos ajustes de prueba y error a pesar de que la base está nivelada, la brida superior de la torre puede estar fuera del nivel debido a las tolerancias de fabricación.

Para nivelar la torre se necesita:

- Nivelar la torre en un día tranquilo para minimizar el movimiento del Skystream. Comience por aflojar todas las tuercas de cimentación superiores cerca de una vuelta completa.
- Aflojar y bajar las cuatro tuercas de la base de la placa de cimentación. En otras palabras, la torre debe ser apoyado por las cuatro tuercas de la base de la placa "esquinas" de la torre.
- Se usan dos niveles perpendiculares entre sí sobre la base de la placa ajustando las tuercas de cimentación hasta que la torre esté nivelada. Niveles de burbuja magnética pueden hacer este proceso más fácil.
- Una vez que la torre este a nivel deberá apretar todas las tuercas y vuelva a comprobar el nivel.

Observar la posición del Skystream en días de calma. Si la turbina eólica parece favorecer una sola posición sin viento, la torre puede requerir ajuste fino incluso si parece estar nivelado utilizando, la técnica de nivelación por burbuja [8].

Para afinar la torre deberá tomar en cuenta que el cono de la nariz de la turbina eólica va a apuntar en la dirección de la parte baja de la torre. Por lo tanto, para nivelar la torre es necesario elevar ligeramente el lado de la torre bajo el cono de la nariz o bajar el lado de la torre opuesto del cono de nariz [8].

4.6. Consideraciones eléctricas.

Este proyecto ha diseñado el proceso de instalación del *Skystream* para ser tan fácil como sea posible, reduciendo al mínimo el número de conexiones entre la máquina y el disyuntor.

El eje del rotor es extremadamente difícil de girar. Esto es normal como medida de seguridad, la posición predeterminada está en modo de freno cuando el inversor se desconecta de la red eléctrica de suministro. La razón es que si hay una falla en la línea de servicio, *Skystream* debe cerrar para evitar volver la alimentación de energía eléctrica en la línea mientras está siendo reparado [8].

4.6.1. Conexiones.

Una de las causas más comunes de fallas de aerogeneradores es una mala conexión eléctrica. Dichas conexiones deberán estar basadas en la NORMA OFICIAL DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS VIGENTE. Ver artículo 694, sistemas eléctricos eólicos pequeños (ver anexo G) [8].

En la figura 37 se muestra el correcto aterrizamiento de la estructura de la torre.

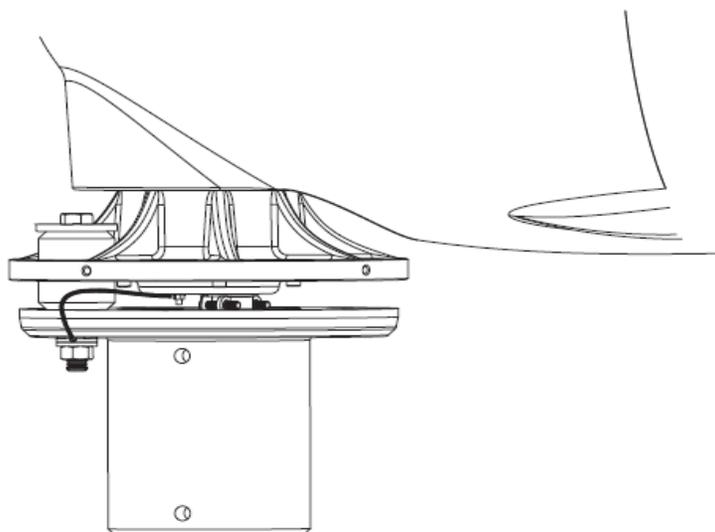


Figura 37. *Conexión a tierra* [8]

4) Sistemas de protección contra rayos. Se permitirá que actúen como componentes del sistema de protección contra rayos, los electrodos auxiliares y los conductores de puesta a tierra de electrodos cuando cumplan los requisitos aplicables. Si están separados, los electrodos de puesta a tierra del sistema de protección contra rayos de la torre deberán estar unidos a los electrodos del sistema auxiliar de puesta a tierra de la torre. Los cables de retenida utilizados como electrodos de puesta del sistema de protección contra rayos no se requerirá que sean unidos a los electrodos del sistema auxiliar de puesta a tierra de la torre.

4.6.2 Cableado.

Deberá cumplir con la NOM-001-SEDE-2012. Artículo 694 en el punto F Marcado que indica (ver anexo G) [8].

En la figura 38 se muestra el cableado del sistema eléctrico aplicando la Norma oficial de instalaciones eléctricas.

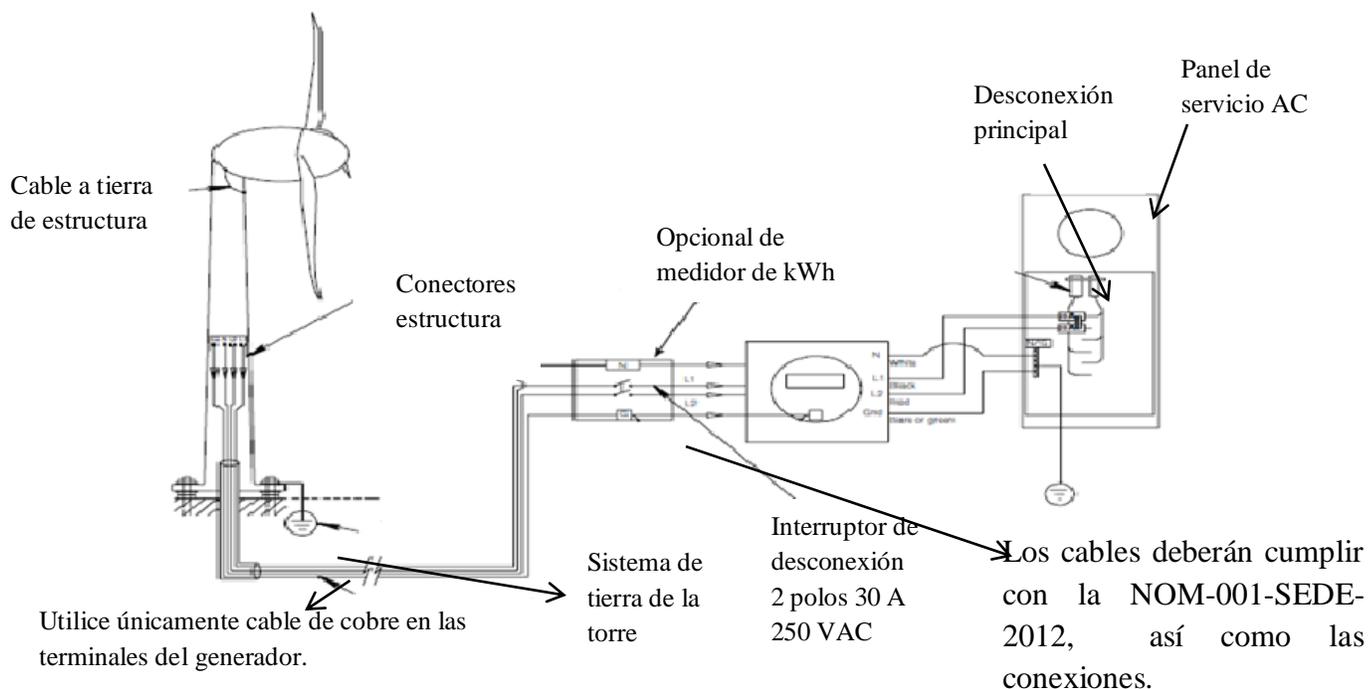


Figura 38. Cédula de cableado 220 V, 60 Hz [8].

Conexiones [8].

Precaución. Asegúrate de apagar el *Skystream* a la hora de hacer las conexiones eléctricas.

- Retirar aproximadamente 5 cm de envoltura protectora del cable y la tira de aproximadamente 1 cm de aislamiento de los cables con una pinza para cables.
- Tener en cuenta que el tamaño máximo de cable que se puede conectar directamente al *Skystream* es # 8 AWG marca condumex.
- El cable debe pasar por la cubierta de alivio de tensión aproximadamente 2.5 cm de la cubierta del cable, sobresalir a través de él.
- Para obtener los voltajes de fase y de línea, a 120/220 V, 60 Hz, en un sistema trifásico, los cables deben conectarse de la siguiente forma: Conecte los cables rojo, blanco y negro a las terminales de códigos de colores correspondientes y cumpliendo con la NOM-001-SEDE-2012, artículo 400 y 225 (ver anexo D). Conecte el cable verde o cable desnudo a los tornillos de las terminales del sistema de tierras, tomando en consideración que deberá realizarse un estudio de tierras con la finalidad de tener un sistema de tierras bien seguro.
- Para obtener el voltaje de fase 120 V a 60 Hz: Conecte los cables blanco y negro a las terminales correspondientes al código de colores. Conecte la terminal con cable verde o sin aislante, como se muestra en la figura 39 para su sistema de tierras. Es

importante que las terminales de conexión deben ser de cobre para evitar falso contacto.

Antes de colocar la tapa de voltajes, comprobar el nivel de voltaje deseado en las terminales. Al conectar la alimentación de CA, deberá esperar de 5 a 7 min el primer intento de girar el eje de la hoja. El eje debe ser notablemente más fácil de girar. Apague la alimentación y *Skystream* debería volver al modo de "freno". Si no pasa esta prueba, compruebe todas las conexiones y repita la prueba [8].

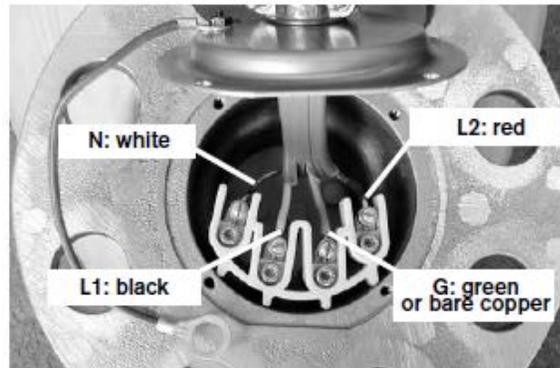


Figura 39. Cédula de cableado 120/220 V [8].

La cédula de cableado para el sistema 120/220 V a 60 Hz. Utilizando el código de colores de instalaciones eléctricas deberá cumplir con: NOM-001-SEDE-2012, artículo 400 y 225 (ver anexo G) como se muestra en la figura 40.

L1 = Línea de CA , cable negro (El sistema es 220V, 60Hz)

L2 = Línea de CA, cable rojo (El sistema es 220V, 60Hz)

N = Neutro CA, cable blanco.

G = Gnd = AC tierra, verde o cable desnudo a tierra.

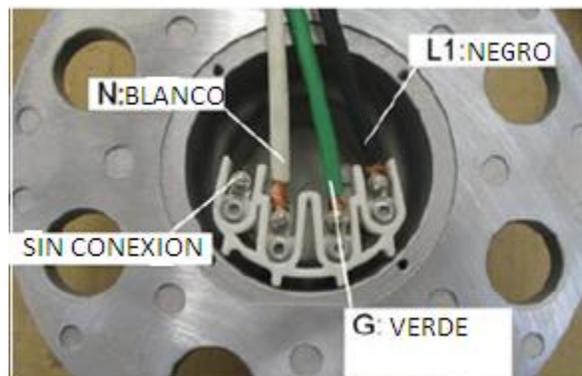


Figura 40. Cédula de cableado (120v, 60 Hz, monofásica) [8].

4.6.3. Dimensionamiento del cable

Para diseñar correctamente el calibre del cable, es necesario medir la distancia desde el panel de servicio de CA, incluyendo la altura de la torre. Consulte el calibre del cable en base al voltaje del sistema y la distancia para calcular la caída de tensión, en la Norma de Instalaciones Eléctricas vigente, artículo 400 y 225 (ver anexo G)

El calibre máximo del cable que se puede conectar al *Skystream* es del 8 AWG, marca Condumex (sugerido) por lo tanto, se recomienda instalar un gabinete para un interruptor termo magnético de desconexión de energía cerca de la base de la torre [8].

4.6.4. Prueba eléctrica.

- Tratar de girar el eje del rotor, cuando el aerogenerador esté apagado, debe ser difícil de girar.
- Ahora active todos los interruptores y espere de 5 a 7 minutos.
- Nuevamente trate de girar el eje del rotor, si está ensamblado correctamente, debe girar fácilmente.

4.6.5. Regulación de la parada electrónica.

El *Skystream* 3.7 tiene la capacidad de ajustar la velocidad de rotación de sus cuchillas o incluso detenerlas si es requerido por las condiciones ambientales. Esto se refiere al puesto de control y se logra ajustando el consumo de corriente del alternador. Cuanto mayor sea el consumo de corriente, mayor será el par electromagnético aplicado al rotor y si se aplica suficiente corrientes las cuchillas se ralentizarán o incluso se detendrán [8].

El alternador es capaz de producir aproximadamente cinco veces el par necesario para el control de la turbina. Incluso si los segmentos de los bobinados del alternador están dañados, todavía hay par suficiente para detener la turbina.

4.6.6. Control del interruptor de relé redundante.

Hay siete conexiones en los bobinados del alternador, pero sólo tres son necesarios para controlar o detener la turbina. Y como una medida final de seguridad, si el inversor es incapaz de controlar la velocidad de rotación y el *Skystream* excede aproximadamente 400 rpm, la tensión rectificadora excederá la (Z) tensión zener en la placa de relés, haciendo que el relé de enclavamiento (RL4) se abra. Esto hará que los relés RL1, 2 y 3 se cierren y apliquen todo el par electromecánico a disposición del rotor, parando el *Skystream* completamente. El circuito de alimentación del inversor también se desconecta de la red por medio del relé RL-G.

RL4 sólo puede restablecerse mediante la obtención de acceso interno a *Skystream* - no se puede restablecer a través de la pantalla remota.

4.6.7. Sincronización automática

Una aproximación al circuito básico de sincronización automática se muestra en la figura 41.

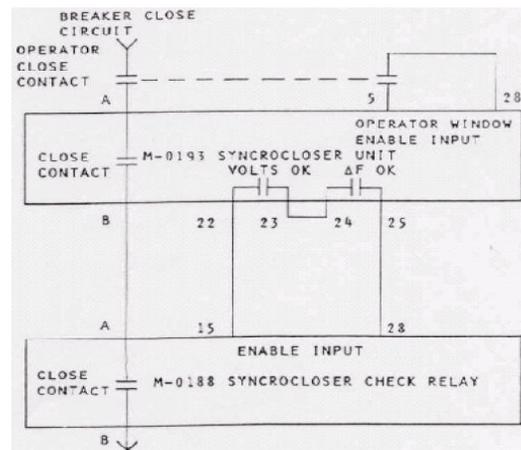


Figura 41. Esquema típico de una sincronización automática, incluye un relé de sincronización automática y un relé de supervisión de sincronización [12].

Como la frecuencia de deslizamiento varía durante el tiempo de cierre del interruptor que es prácticamente constante, un relé de supervisión de sincronización puede ser adicionado en serie al relé de sincronización automática para evitar el cierre del interruptor si el generador gira con una velocidad, una desventaja puede ser que el operador presione la manija para el cierre del interruptor manteniendo cerrada cuando el generador entrante gira a una velocidad mayor a la barra y cerrar así el interruptor cuando está lejos del ángulo correcto de sincronización, eventualmente el generador entrante girará en ángulo y el interruptor cerrará en el ángulo correcto. Para evitar la falla, el operador debería presionar el interruptor cuando el ángulo es aceptable, lo que no causaría ningún daño catastrófico, el relé de sincronización evita el cierre del interruptor aún cuando el operador presione la manija muy temprana o tardíamente, el relé cierra solamente dentro de la ventana de ángulos ajustada. Este es un sistema redundante, donde se adiciona en serie un relé supervisión de sincronización a un relé de sincronización automática. Como observación, la ventana de cierre del relé de supervisión de sincronización debe ser mayor a la del relé de sincronización automática.

4.6.8. Comparación del funcionamiento del controlador lógico programable contra el esquema de sincronización tradicional.

A primera impresión se pensaría que un PLC puede controlar tanto la velocidad de los generadores, sincronizarlos, y además controlar el flujo de carga, lo anterior supone una

integración total del funcionamiento en la transferencia pero conlleva también riesgos que no se pueden dejar de analizar, como se verá esta es una opción poco viable.

En la actualidad se hace común el empleo de controladores lógicos programables también llamados PLC para el control de un sin número de procesos, sin embargo, la sincronización de generadores conlleva ciertas predisposiciones que dejan fuera de esta aplicación a muchos PLC. Por ejemplo: todos los módulos de salidas y de entradas deben ejecutar de forma rápida su objetivo, en particular los módulos de entradas analógicas, deben de trabajar en tiempo real y no de forma multiplexada. Los módulos convencionales multiplexados tienen tiempos indeterminados de barrido que están en el orden de los 100 a los 1000ms. La falta de constancia en estos tiempos implica tiempos de cierre no exactos lo cual estiba en el detrimento de la vida de los equipos, por tanto se prefiere el uso de transductores en tiempo real, además los módulos de entradas digitales usualmente no son sensibles a frecuencias mayores de 400Hz que los descarta para medir el pico magnético de los generadores, de tal forma que no pueden censar la frecuencia del generador. Por tanto el PLC requiere de módulos especializados llamados contadores rápidos, cuya mayor desventaja reside en su forma de funcionamiento; los PLC toman una instantánea de las señales de entrada al inicio de la ejecución del programa, esta imagen de las señales de entrada se guarda en un registro (unidad de memoria) de donde es consultado durante la ejecución del programa. Cuando el programa termina, se genera un registro con el resultado de las evaluaciones del programa y se envía a las salidas, a este registro se le llama imagen de salidas, sin embargo esto ocurre mientras uno de los dispositivos de periferia conectados a las entradas envía una señal mientras el programa está en ejecución. Simplemente el PLC no lo ve, si bien es cierto los controladores lógicos programables cuentan con módulos especializados para conteo rápido y pueden ser programados por interrupciones, dicha configuración disminuye considerablemente la capacidad del controlador, por ello, se prefiere dispositivos especializados que trabajen en tiempo real tanto para la sincronización como para el compartidor de carga [12].

4.7. Requerimientos técnicos de interconexión al sistema eléctrico nacional Tensión.

En estado permanente, el parque de generación eólica debe operar y mantenerse conectado ante fluctuaciones que no excedan un rango de $\pm 5\%$ de tensión nominal y hasta un $\pm 10\%$ en condiciones de Emergencia.

Capacidad de generación

Dependerá de los estudios técnicos y de seguridad operativa realizados por el suministrador, de la ubicación del punto de interconexión y de la disponibilidad de la infraestructura del sistema en la región correspondiente.

Frecuencia de Corte

En la tabla 5, se presentan los requerimientos de ajuste para las protecciones del Aerogenerador en condiciones de alta y baja frecuencia del sistema y el tiempo para su desconexión. Las protecciones de frecuencia se aplican por unidad [12].

Tabla 5. Ajustes para las protecciones

Rango de Frecuencia	Tiempo de Ajuste de la Protección
> 62 Hz	Instantáneo
$57.5 \geq \text{Operación Normal} \leq 62$	Operación Continua
< 57.5 Hz	Instantáneo

Calidad de energía

En caso de existir variaciones cíclicas de tensión o repercusiones indeseables como desbalance de fases y corrientes armónicas los cuales demeriten la calidad del servicio que el Suministrador le otorga al resto de sus usuarios, el Solicitante deberá instalar los sistemas de compensación requeridos [12].

Niveles de armónicos

El nivel de distorsión de armónica se medirá en el **Punto de Interconexión**. El nivel de distorsión armónica total permitido es $\text{THDAT} = 3.0 \%$

La distorsión armónica total será medida en forma continua y las armónicas individuales sólo cuando se exceda la distorsión total [12].

Variaciones periódicas de amplitud de la tensión (Flicker).

Para evaluar la severidad de las variaciones periódicas de amplitud de la tensión se utilizan los siguientes indicadores:

- Indicador de variación de tensión a corto plazo (P_{st} , con intervalos de observación de 10 minutos. El valor del P_{st} se expresa en unidades de perceptibilidad en (p.u.).

- Indicador de variaciones de tensión a largo plazo (P_{lt}); con intervalos de observación de 2 horas. Se calcula a partir de valores sucesivos de P_{st} . La interconexión de una planta de generación en un alimentador de AT (Alta tensión) no debe causar niveles de emisión individuales que se encuentren fuera de los límites establecidos permisibles en la tabla No. 6 [12].

Tabla 6. Límites de emisiones permisibles [12].

Indicador	Límite
$E_{P_{sti}}$	0.35
$E_{P_{lti}}$	0.25

Operación de la Fuente de Energía ante fallas externas o en el Punto de Interconexión Eólicas ó Fotovoltaicas.

Deberá tener la capacidad de permanecer conectada al Sistema sin perder estabilidad, ante fallas transitorias externas, durante el tiempo máximo de liberación de la falla; soportando el abatimiento de la tensión ocasionado por la misma (hueco de tensión). Durante este periodo deberá aportar la potencia reactiva necesaria. Posterior a la liberación de la falla transitoria la planta deberá aportar la potencia activa y mantener el flujo de reactivos que se tenía previo a la falla. Los tipos de falla y tiempos de duración de falla en el punto de interconexión se describen en la siguiente figura 42 [12].

Figura 42. Tipos de fallas y tiempos de duración [12].

Fallas Transitorias Tipo de Falla	Tiempo máximo de duración de Falla (milisegundos)		
	Nivel de Tensión kV		
	69 -161 kV	230 kV	400 kV
Falla Trifásica a tierra	150	100	80
Bifásica con o sin conexión a tierra	150	100	80
Monofásica a tierra	150	100	80

Operación del Parque de Generación ante Fallas Externas y en el Punto de Interconexión como se muestra en la figura 43.

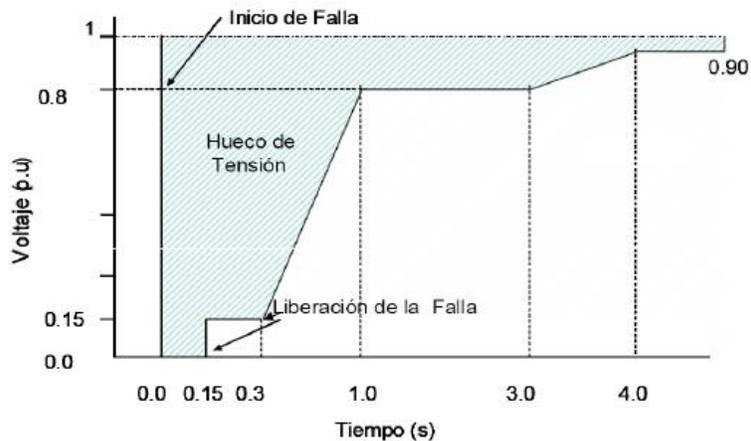


Figura 43. Operación del parque de generación [12].

En la figura anterior muestra el hueco de tensión que incluye efectos de fallas en el punto de interconexión y externas que debe soportar el parque de generación eólico sin desconectarse de la red eléctrica.

Una vez liberada la falla, el sistema eléctrico se recuperara al 80% de la Tensión en un tiempo de 1000 ms. del inicio de Falla, con la participación de todos los elementos conectados al sistema eléctrico, ante esto el parque Aerogenerador no deberá dispararse.

Operación del parque de generación ante fallas externas y en el punto de interconexión.

El parque de generación deberá permanecer conectado al sistema en las siguientes condiciones:

- Dos fallas trifásicas en el intervalo de dos minutos
- Dos fallas bifásicas en el intervalo de dos minutos
- Dos fallas monofásicas en el intervalo de dos minutos

En condiciones de falla en el punto de interconexión y mientras se mantenga sin liberarse, los consumos de potencia activa por los aerogeneradores deberán ser mínimos, asimismo ser congruentes con la tecnología aplicada de aerogeneradores; los valores permitidos máximos se definirán para cada caso [13].

Equipo de medición

Los medidores y los transformadores de instrumento destinados a la facturación deben ser instalados en el Punto de Interconexión.

- Cumplir con la especificación CFE G0000-48 “Medidores Multifunción para Sistemas Eléctricos”.
- Medición bidireccional redundante para facturación [13].

4.8. Interconexión a red.

4.8.1. Requisitos para interconexión a red.

Los requisitos para realizar un contrato de interconexión en pequeña escala con CFE, son: Tener un contrato de suministro normal en baja tensión, que las instalaciones cumplan con las Normas Oficiales Mexicanas y con las especificaciones de CFE, y que la potencia de tu fuente no sea mayor de 10 kW si la instalaste en tu domicilio ó de 30 kW si la instalaste en tu negocio. (Ver anexo A)

4.8.2. Modelo de contrato de interconexión para fuente de energía renovable o sistema de cogeneración en pequeña escala.

Son instrumentos regulatorios elaborados por la Comisión Reguladora de Energía (CRE) para promover e impulsar el desarrollo de proyectos con fuentes de energía renovable o sistemas de cogeneración. Estos instrumentos permiten realizar y mantener la interconexión entre el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) propiedad de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la fuente de energía renovable o el sistema de cogeneración en pequeña o mediana escala. Para los proyectos a pequeña escala la capacidad de éstos será de un máximo de 30 kW y de 500 kW para los de mediana escala. En ambos casos no se requiere de un permiso de generación eléctrica, siempre y cuando los proyectos no tengan una capacidad mayor a los 500 kW. Cabe mencionar que en estos modelos de contratos no

se contempla la transmisión de energía eléctrica (porteo) a un lugar distinto de donde se encuentra la central de generación. (Ver anexo B) [13].

4.9. Modelo de contrato de interconexión para fuente de energía renovable o sistema de cogeneración en mediana escala.

Para interconectarse a la red eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) es necesario firmar el contrato de interconexión a pequeña escala que es un contrato anexo al contrato de suministro normal, por lo que tendrá que acudir a las oficinas de atención de la CFE que le corresponda. Para mayor detalle consultar en el centro telefónico de atención de la CFE marcando al 071 o en la sección de trámites de la siguiente dirección electrónica: www.cfe.gob.mx. (Ver anexo C) [14].

4.10. Características de los equipos de medición y comunicación.

Aplica a medidores multifunción para sistemas eléctricos, tipo exterior o tipo interior que se adquieren por Comisión Federal de Electricidad (CFE), para su utilización en procesos de generación, transmisión, distribución y comercialización; para medir la energía eléctrica con fines de facturación, estadística y calidad de energía. Especificación CFE G0000-48 [13].

4.11. Mantenimiento e inspección.

Inspección anual.

Aunque el *Skystream* está diseñado para ser libre de mantenimiento durante 20 años, el propietario debe realizar siguiendo la inspección anual. La inspección anual puede realizarse sin bajar la torre, o de otro modo obtener acceso a la turbina. Los resultados de esta inspección anual deben ser escritos en un cuaderno de bitácora.

Mientras que las turbinas están operando con vientos moderados, es importante escuchar ruidos anormales. Después de la operación, usted debe ser consciente de los tipos de sonidos de funcionamiento normal. Los ruidos normales incluyen silbante aerodinámica, y el zumbido de los sistemas electrónicos de potencia. Si nota cualquier ruido anormal, es importante anotar en la bitácora y realizar una inspección de inmediato para evitar una falla del equipo.

La segunda parte de la inspección anual es hacer observaciones detalladas. Desde el suelo, apagar por desconexión y posteriormente de la red, poner el interruptor en "off", en el panel eléctrico principal (consulte "Procedimiento para iniciar y detener *Skystream*"). Cuando hay un tornado hará que las cuchillas paren o girar muy lentamente en todas las velocidades del viento. Con unos binoculares verificar de manera visual el estado del *Skystream*. Busque algún problema de las cuchillas, como grietas o daños a los ejes de la pala del rotor. Mira la cara y la góndola del *Skystream* y tenga en cuenta cualquier daño

potencial. Si observa algún daño durante su inspección anual, a continuación, anote sus observaciones en su cuaderno de bitácora *Skystream*. Y programar su mantenimiento correctivo y o preventivo.

Encienda el *Skystream* conmutando el interruptor a ON, en el panel eléctrico principal (consulte procedimiento de arranque y parada *Skystream*). Después de un retraso de cinco minutos, el freno interno *Skystream* se activará, y luego las cuchillas estarán libres para girar. El *Skystream* estará entonces de nuevo en línea y listo para producir electricidad a partir del viento [13].

Capítulo 5. Resultados

5.1. Estación meteorológica y datos del viento de la UPT.

La estación meteorológica de la UPT, cuenta con una consola meteorológica Vantage Pro2 la cual muestra registra los datos meteorológicos, esta tiene cinco modos básicos de operación:

- 1.- Configuración: se utiliza para introducir la hora, fecha y otros datos necesarios para calcular y visualizar los datos meteorológicos.
- 2.- Tiempo actual: Se usa para leer la información meteorológica actual, cambiar las unidades de medida y ajustar, borrar o calibrar las lecturas meteorológicas.
- 3.- Muestra las máximas y mínimas de muchas condiciones meteorológicas en el transcurso de tres periodos diferentes: días, meses y años.
- 4.- Alarma: Permite establecer, borrar y revisar las alarmas, está provista de más de 70 de ellas que pueden programarse para que suenen cada vez que una lectura sobrepasa un valor fijado, exceptuando la presión atmosférica y la hora.
- 5.- Gráfico: Exhibe los datos meteorológicos utilizando más de 80 gráficos diferentes, sin necesidad de conectarse a un ordenador.

La consola se interconecta a la computadora utilizando el software *WeatherlinkV. 6.0*, proporcionado mejores capacidades de monitorización del tiempo y potentes características de internet. La estación inalámbrica transmite los datos de los sensores exteriores desde el ISS (Integrated Sensor Suite) a la consola mediante un sistema de radiofrecuencia de baja potencia. En el presente proyecto se han analizado un total de 94,743 mediciones de viento obtenidas cada 5 minutos durante el año 2014 en la estación meteorológica situada en las instalaciones de la UPT, en tabla 8 se muestran la información obtenida, los datos se tomaron a 14 metros de altura [15].

Tabla 7. Velocidades de viento promedio mensual a 14 m de altura en 2014 en m/s

Velocidades medias mensuales de viento a 14 metros de altura en el año 2014, (m/s).					
Mes	Velocidad promedio (m/s)	Mes	Velocidad promedio (m/s)	Mes	Velocidad promedio (m/s)
Enero	5.33	Mayo	5.83	Septiembre	5.46
Febrero	5.19	Junio	5.88	Octubre	5.21
Marzo	5.66	Julio	5.86	Noviembre	5.02
Abril	5.63	Agosto	5.89	Diciembre	5
Media	5.50				

La estación meteorológica, con la que se efectuaron las mediciones se encuentra a 14 metros de altura, mientras que el eje del aerogenerador se encontrará a 15 metros de altura. Dado que el viento aumenta con la altura se realiza una corrección en altura de los datos obtenidos para una correcta estimación del potencial eólico.

Para lo cual utilizaremos la ley de potencia basada en la formulación logarítmica. Viene dado por que se muestra en la ecuación 2.17.

$$\left(\frac{v}{v_0} \right) = \frac{\ln(H/z)}{\ln(H_0/z)} \quad (2.17)$$

Donde:

V, es la velocidad del viento a la altura H.

V₀, es la velocidad del viento a la altura H₀.

Z, es la longitud de rugosidad.

La tabla 9, muestra las clases y longitudes de rugosidad para distintas superficies.

Tabla 8. Clasificación de rugosidades

Clase de rugosidad	Descripción	Longitud de rugosidad Z (m)
0	Superficie del agua	0.0002
1	Áreas abiertas con algunos cortavientos	0.03
2	Tierras de cultivo con algunos cortavientos a más de 1km de distancia	0.1
3	Distritos urbanos y tierras agrícolas con muchas barreras contra el viento	0.4
4	Densidad urbana o bosques	1.6

Aplicando la fórmula tenemos que la ecuación 2.18

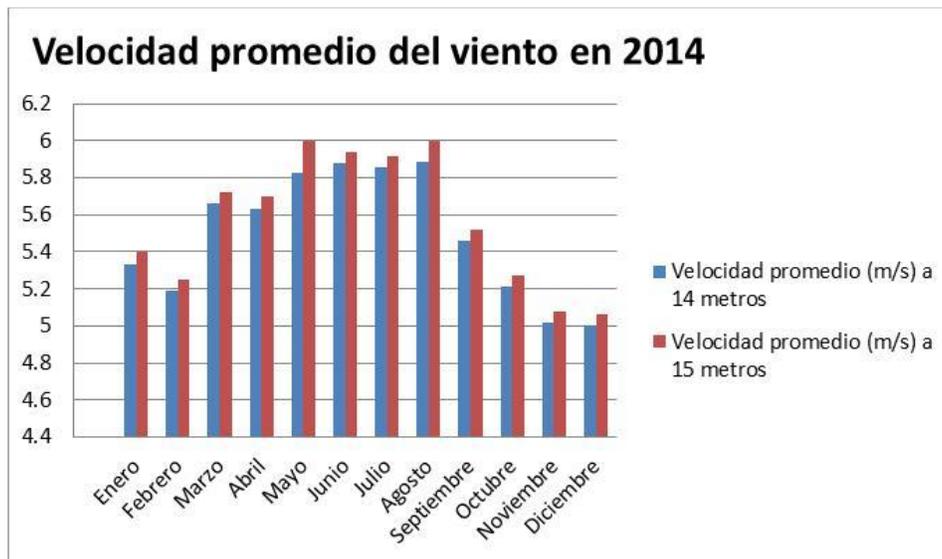
$$v = v_0 \frac{\ln(H/z)}{\ln(H_0/z)} \quad (2.18)$$

Considerando una clase de rugosidad de 1, tenemos una longitud de rugosidad, z=0.03. Los valores corregidos a 15 metros se muestran en la siguiente tabla 10.

Tabla 9. Velocidades medias mensuales de viento a 15 m de altura en el año 2014, en m/s.

Velocidades medias mensuales de viento a 15 metros de altura en el año 2014, en (m/s).					
Mes	Velocidad promedio (m/s)	Mes	Velocidad promedio (m/s)	Mes	Velocidad promedio (m/s)
Enero	5.4	Mayo	6	Septiembre	5.52
Febrero	5.25	Junio	5.94	Octubre	5.27
Marzo	5.72	Julio	5.92	Noviembre	5.08
Abril	5.7	Agosto	6	Diciembre	5.06
Media	5.57				

La gráfica 1, muestra un análisis comparativo de las velocidades promedio del viento a dos alturas diferentes obteniendo que entre mas alta sea la torre mayor velocidad de viento se obtendrá.



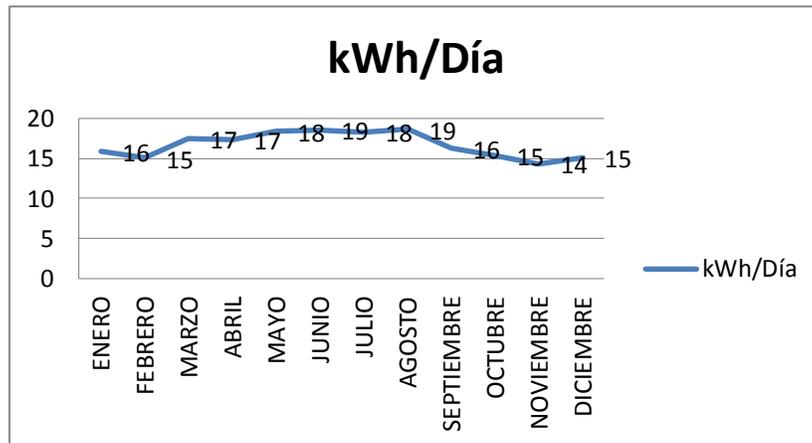
Grafica 1. Velocidad promedio del viento a 14 y 15 m de altura

Empleando el aerogenerador Skystream 3.7, considerando las curvas de potencia a 2.4 kW y tomando en consideración las 500 muestras la potencia media del viento diariamente por la estación meteorológica, determinando el análisis de velocidades promedio se determina que la energía generada diariamente por la turbina es la que se muestra en la tabla 11.

Tabla 10. Energía promedio producida por día (kWh/día).

MES	Kwh/día
ENERO	16
FEBRERO	15
MARZO	17
ABRIL	17
MAYO	18
JUNIO	19
JULIO	18
AGOSTO	19
SEPTIEMBRE	16
OCTUBRE	15
NOVIEMBRE	14
DICIEMBRE	15

En la siguiente gráfica 2, establece el comportamiento del consumo que puede generar la turbina Skystream 3.7, expresada en kWh promedio por día, tomando en consideración datos diarios de velocidades de viento.



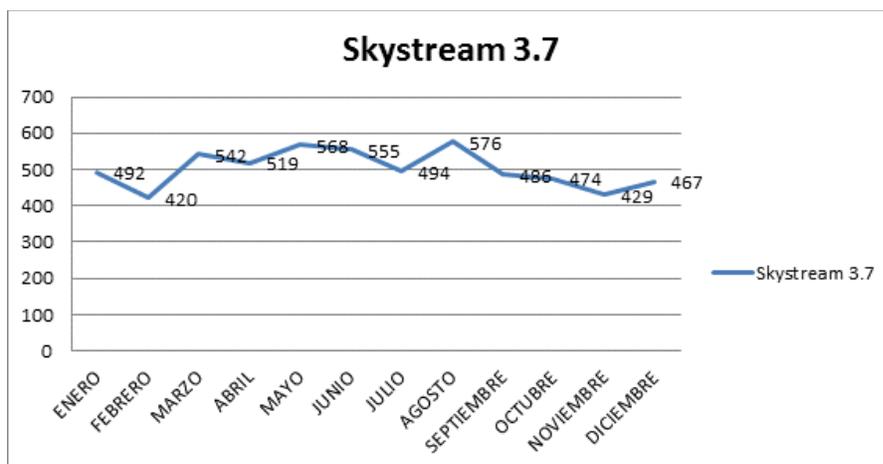
Grafica 2. Tendencia del comportamiento en kWh por día del aerogenerador Skystream 3.7

La tabla 12 muestra el consumo promedio por mes que puede generar el aerogenerador Skystream 3.7.

Tabla 11. Energía promedio producida por mes (kWh/mes)

MES	Skystream 3.7
ENERO	491.7862727
FEBRERO	420.4704332
MARZO	541.7499018
ABRIL	518.6612717
MAYO	567.8147448
JUNIO	555.1301125
JULIO	493.8465727
AGOSTO	576.3130942
SEPTIEMBRE	485.9081751
OCTUBRE	474.1907647
NOVIEMBRE	429.2972055
DICIEMBRE	467.185457

En la gráfica 3, se observa la tendencia del comportamiento en kWh generados por la turbina, promedio por mes tomando en consideración datos diarios de velocidades de viento.



Grafica 3. Muestra la tendencia del comportamiento de kWh generados por la turbina Skystream

5.2. Costo de energía utilizando el aerogenerador

No está por demás aclarar que la energía eólica es parte del grupo de las renovables, y de acuerdo con un estudio de velocidad de viento en la Universidad Politécnica de Tulancingo, se espera que el costo de este tipo de generación sea rentable.

Según el estudio en mención se determina por mes la energía generada por el aerogenerador Skystream multiplicada por el costo de energía por mes publicada en la página de internet www.cfe.gob.mx ya que hay cambios cada mes y en este ejemplo se tomó el costo de la energía promedio, determinando de energía en pesos de generación al año como se muestra en la siguiente Tabla 13

Tabla 12. Ahorro de energía al año en kWh.

MES	DIA	MES	COSTO	AHORRO
1	16	496	2.2285	1105.336
2	15	420	2.3310	979.02
3	17	527	2.5536	1345.7472
4	17	510	2.5002	1275.102
5	18	558	2.3467	1309.4586
6	19	570	2.2285	1270.245
7	18	558	2.3310	1300.698
8	19	589	2.5536	1504.0704
9	16	480	2.5002	1200.096
10	15	465	2.3467	1091.2155
11	14	420	2.5002	1050.084
12	15	465	2.3467	1091.2155
				14522.2882

5.3. Aspectos económicos

5.3. 1. Costo de energía sin generación eólica.

Para conocer cuánto se pagaría de electricidad en la Universidad Politécnica de Tulancingo en un año promedio tomando en consideración el consumo. Se observa en la tabla 14 que determina los datos del servicio.

Tabla 13. Datos generales del servicio

NOMBRE:	UNIVERSIDAD POLITECNICA DE TULANCINGO
DIRECCIÓN	INGENIERIAS 100
CARGA INSTALADA	162
DEMANDA CONTRATADA	162
TIPO SE SUMINISTRO	ALTA-ALTA
TARIFA	78
MEDIDOR	51H91X

En la tabla 15 se comprueba su historial de consumo del servicio desde el año 2016 hasta 30 de Abril del 2017.

Tabla 74. *Historial de consumo de la Universidad Politécnica de Tulancingo a 10 meses.*

PERIODO	DESDE	HASTA	CONSUMO kWh	DEMANDA PUNTA	DEMANDA INTERMEDIA	DEMANDA BASE
1607	160630	160731	28008	64	93	49
1608	160731	160831	36552	64	96	52
1609	160831	160930	37728	68	106	49
1610	160930	161031	38304	36	37	39
1611	161031	161130	38160	98	114	51
1612	161130	161231	31224	94	108	47
1701	161231	170131	37008	81	106	44
1702	170131	170228	36336	84	98	96
1703	170228	170331	40944	83	103	86
1704	170331	170430	25200	65	102	47

5.4. Periodo de recuperación de la inversión.

El periodo de recuperación se determina tomando en consideración el costo de puesta en servicio, esto significa que la turbina ya este puesta en marcha, así como los gastos de mano de obra y de materiales, como se indica en la tabla 16. Y así posteriormente realizar la amortización de la inversión.

Tabla 85. *Costos de inversión.*

DESCRIPCION	COTIZACIÓN
COSTO DE LA TURBINA Y TORRE	\$ 131,809.64
COSTO DE IZAR LA TORRE	\$ 5,800.00
COSTO DE MANO DE OBRA CIVIL	\$ 600.00
COSTO DE MANO DE OBRA ELÉCTRICA	\$ 10,000.00
COSTO DE MATERIALES DE OBRA CIVIL	\$ 5,000.00
COSTO DE MATERIALES DE ELÉCTRICA	\$ 7,500.00
TOTAL DE LA INSTALACIÓN Y PUESTA EN SERVICIO	\$ 166,109.64

La amortización se define como el costo total de la inversión entre el costo de la energía generada por año. Como se muestra en la siguiente formula.

$$Amortización = \frac{Costo\ de\ la\ inversión}{Costo\ de\ energía\ generada\ al\ año} = \frac{\$166,109.64}{\$14,522.2882}$$

$$Amortización = 11\ años$$

Esto significa que aproximadamente en 11 años se recupera la inversión tomando en consideración que a partir de puesta en servicio ya es ganancia.

Capítulo 6. Conclusiones

La presente tesis tuvo como objetivo la instalación del aerogenerador Skystream3.7 en la Universidad Politécnica de Tulancingo. Se expuso el procedimiento completo y necesario para la realización de la instalación del aerogenerador, acompañado de las consideraciones necesarias para su utilización en un parque eólico ubicado en la Universidad Politécnica de Tulancingo.

Para demostrar esto, primero se realizó un análisis de las velocidades de viento en la zona de la Universidad Politécnica de Tulancingo con la estación meteorológica. Vantage Pro 2 Plus al haber concluido el análisis definitivamente se pudo observar que es factible la instalación del aerogenerador en zona.

Posteriormente se analiza el instructivo de instalación del aerogenerador tomando en consideración que dicha instalación debe cumplir con la NOM-001-SEDE-2012. La importancia de aplicar la norma de conexión de la instalación eléctrica es para que la generación de energía eléctrica del aerogenerador sea óptima y sobre todo segura, para lo cual debe seguirse la Norma de construcción de la obra civil.

Al estudiar las velocidades de viento de la zona se analiza la energía que puede generar por mes y por año, así como la amortización de la inversión. Se tomó en cuenta que la generación de energía eléctrica del aerogenerador cumpla con la sincronización del sistema eléctrico, en caso de interconexión a red. En cuanto a las acciones que se tomen, el aerogenerador puede suministrar a las diferentes áreas de la Universidad.

La conclusión final es que la generación de energía eléctrica eólica es de suma importancia para disminuir el calentamiento global, esto hace que sea de particular interés este sistema de generación de energía renovable, ya que es una de las energías limpias, que más impulso tiene y que sobre todo es inagotable. El aerogenerador Skystream 3.7, entrega corriente alterna, puede ser utilizado para interconexión a red, por lo tanto se anexan los requisitos necesarios para dicho uso así como las características que debe de cumplir hacia la empresa suministradora CFE.

GLOSARIO

Área de barrido: El área que cubre al girar el rotor de la turbina eólica, calculada con la fórmula $A = \pi r^2$ donde r es el radio del rotor.

Buje: Elemento de la Aero turbina en el que van fijadas las palas y que conecta con el sistema de transmisión.

Carga: La cantidad de energía almacenada en un momento determinado en un sistema eléctrico, o la energía total almacenada por el sistema.

Fuerzas de fatiga: Fuerzas fluctuantes a las que está sujeto un aerogenerador, sobre todo en emplazamientos turbulentos.

Cimentación: Fundamento para instalar un aerogenerador, normalmente hecho de hormigón armado.

Potencia: La potencia de salida de una turbina eólica operando a la velocidad de viento clasificada.

Coefficiente de potencia del rotor: La razón de la potencia extraída del viento por una turbina eólica y la potencia disponible en la corriente de viento. Se divide la potencia eléctrica disponible por la potencia eólica de entrada, para medir como de técnicamente eficiente es un aerogenerador.

Corriente Alterna (CA): Donde esta alterna continuamente su dirección en un patrón cíclico, en forma sinusoidal. Es causado por el ciclo sinusoidal del voltaje, con un pico positivo y uno negativo. Al número de ciclos por segundo se le llama frecuencia, expresada en Hertz (Hz). En la red eléctrica, es de 60 Hz.

Corriente Directa (CD): Donde la energía circula siempre en una única dirección, del punto positivo al negativo y viceversa.

Demanda: se mide por medio de su medidor eléctrico como el promedio más alto de la demanda durante un período de 15 minutos del mes.

Densidad de aire: La cantidad de masa contenida en una unidad de volumen.

Diámetro del rotor: El diámetro del círculo barrido por el rotor.

Energía: Es igual a la potencia x tiempo, por ejemplo, si un generador produce 1kW de potencia nominal entonces la energía generada en un año sería 1kW X 24 hrs/día X 1 año=8760 kwh/año.

Frenos: Varios sistemas usados para frenar la rotación del rotor.

Fuentes no-renovables: Están disponibles en cantidades limitadas y se agotan por su uso, como los combustibles fósiles (carbón mineral, petróleo, gas natural). Estas tienen la característica de que, una vez utilizadas para la generación de energía, no se pueden volver a usar.

Fuentes renovables: No se agotan por su uso, como la energía del viento y del sol. El agua y la biomasa también se incluyen en esta categoría.

Góndola: El cuerpo de una turbina eólica tipo- hélice, conteniendo la caja de engranajes, el generador, el núcleo del rodete, y otras partes. En aerogeneradores de imanes permanentes, ya no es necesaria la caja de engranajes.

Guiñada: Rotación del eje del rotor alrededor de su eje vertical (solo para máquinas de eje vertical).

Inversor: Un dispositivo que convierte a la corriente directa a corriente alterna.

Rosa de los vientos: Sirve para mostrar la información sobre las distribuciones de velocidades del viento y la frecuencia de variación de las direcciones del viento. Se basa en observaciones meteorológicas.

Rotor a barlovento: Se dice que el rotor se encuentra a barlovento (de la torre) si el viento pasa primero por el rotor y luego por la torre, (cara al viento).

Rotor a sotavento: Se dice que el rotor se encuentra si el viento pasa primero por la torre y después al rotor.

Velocidad de arranque: la velocidad del viento a la cual la turbina empieza a generar electricidad.

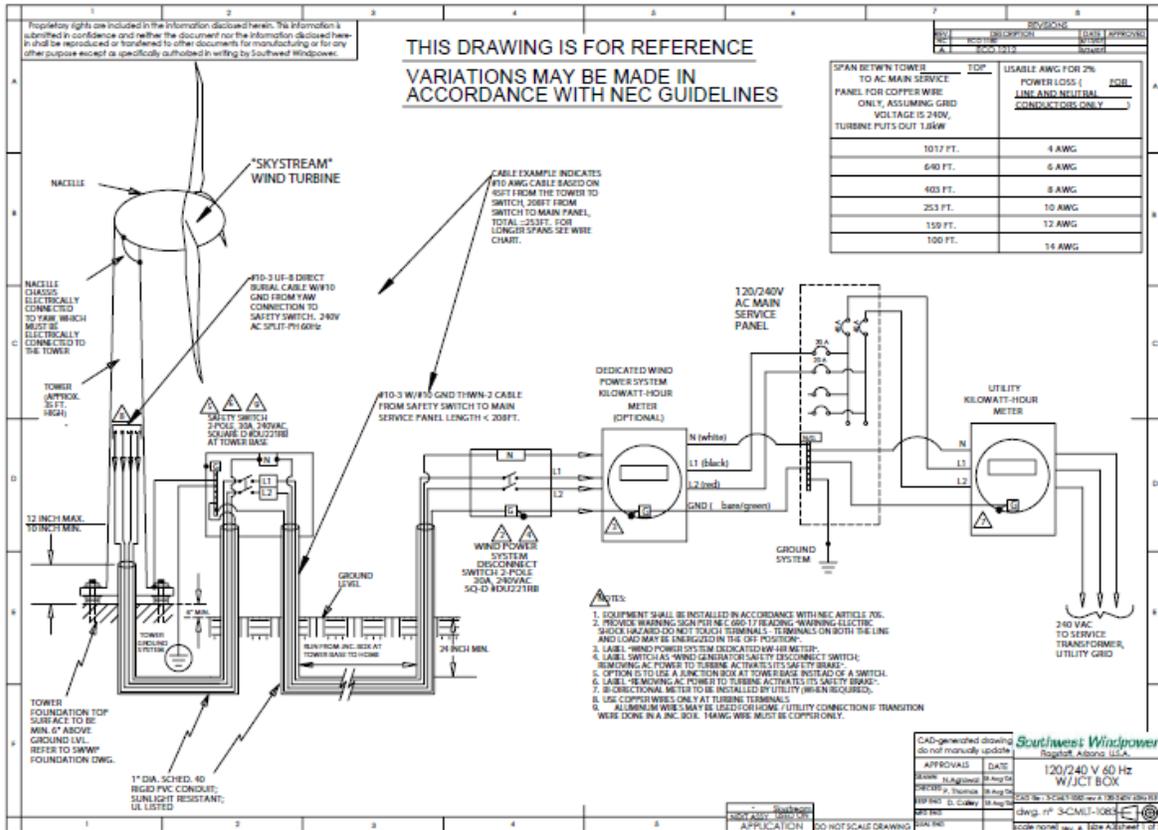
Bibliografía

- [1] Peacock, A. D., Jenkins, D., Ahadzi, M., Berry, A., & Turan, S. (2008). Micro wind turbines in the UK domestic sector. *Energy and Buildings*, 40(7), 1324-1333.
- [2] Sunderland, K., Woolmington, T., Blackledge, J., & Conlon, M. (2013). Small wind turbines in turbulent (urban) environments: A consideration of normal and Weibull distributions for power prediction. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 121, 70-81.
- [3] SE, Secretaría de Economía, Energías Renovables, Unidad de Inteligencia de Negocios, Ciudad de México, Mayo 2013, Pro México.
- [4] SENER, Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026.
- [5] <http://www.cfe.gob.mx>
- [6] REN21, Renewable Energy Policy Network for the Zist Century. *Renewables 2015, Global Status Report*.
- [5] SE, Secretaría de Economía, Energías Renovables, Unidad de Inteligencia de Negocios, Ciudad de México, Mayo 2013, Pro México.
- [7] <http://www.windenergy.com/about/news/wind-power-now-lucrative-energy-option-uk-consumers>
- [8] Skystream 3.7-europe _owners-manual- june -2007
- [9] Tesis Marco Antonio
- [10] M.MASTER, G. (Copyright □ 2004 by John Wiley & Sons). *RENEWABLE AND EFFICIENT ELECTRIC POWER SYSTEMS*. Inc., Hoboken, New Jersey. All rights reserved: WILEY-INTERSCIENCE A JOHON.
- [11] NOM-001-SEDE-2012
- [12] Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica. *Transferencia y Sincronización Automática de Generadores de Emergencia en Instalaciones Industriales*. Christan Alexander Luna Taltique.
- [13] Especificación G0100-04

[14] Medidores multifunction para sistemas eléctricos especificación CFE G0000-48

[15] Servicio Meteorológico Nacional.

ANEXO A



A.I. Conexión a la red 120/240 V, 60 Hz. Divisor de fases, la caja de conexiones en la torre base.[15]

ANEXO B

REQUISITOS PARA LA CONTRATACION DE SERVICIOS FOTOVOLTAICOS

NOMBRE: _____

N° DE SERVICIO: _____

- | | |
|---|--------------------------|
| 1.- COPIA DE AVISO-RECIBO CFE | <input type="checkbox"/> |
| 2.- SOLICITUD PARA LA CONEXIÓN (FORMATO 1) | <input type="checkbox"/> |
| 3.- IDENTIFICACION OFICIAL DEL TITULAR | <input type="checkbox"/> |
| 4.- CARTA PODER EN CASO DE SE UN GESTOR | <input type="checkbox"/> |
| 5.- IDENTIFICACION OFICIAL DE GESTOR | <input type="checkbox"/> |
| 6.- MANUALES DEL INVERSOR | <input type="checkbox"/> |
| 7.- MANUALES DE LOS PANELES | <input type="checkbox"/> |
| 8.- CROQUIS DE UBICACIÓN DEL SERVICIO (CON GEOREFERENCIA) | <input type="checkbox"/> |
| 9.- ESTUDIO TECNICO SISTEMA DE GENERACION (PROYECCION AHORRROS) | <input type="checkbox"/> |
| 10.- CONVENIO/CONTRATO FOTOVOLTAICO | <input type="checkbox"/> |

B.I. Requisitos para la contratación de servicios fotovoltaicos

ANEXO C

MODELO DE CONTRATO DE INTERCONEXION PARA FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE O SISTEMA DE COGENERACION EN PEQUEÑA ESCALA.

CONTRATO DE INTERCONEXION PARA FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE O SISTEMA DE COGENERACION EN PEQUEÑA ESCALA QUE CELEBRAN, POR UNA PARTE LA COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD, DENOMINADA EN LO SUCESIVO EL SUMINISTRADOR, Y POR LA OTRA _____, A QUIEN EN LO SUCESIVO SE DENOMINARA EL GENERADOR, REPRESENTADO POR _____ EN SU CARACTER DE _____, AL TENOR DE LAS SIGUIENTES DECLARACIONES Y CLAUSULAS.

DECLARACIONES

I. Declara el **Suministrador** que:

(a) Es un organismo público descentralizado con personalidad jurídica y patrimonio propios, que se rige por la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica y su Reglamento, y acredita tal carácter en los términos del artículo 8 de la citada **Ley**.

(b) Su representante, el señor _____ cuenta con todas las facultades necesarias para comparecer a la celebración del presente contrato, según consta en la Escritura Pública número _____ de fecha _____, pasada ante la fe del señor licenciado _____, Notario Público número _____ de la ciudad de _____.

(c) Tiene su domicilio en _____, mismo que señala para todos los fines y efectos legales del presente **Contrato**.

(d) El presente **Contrato** es aplicable a todos los **Generadores con Fuente de Energía Renovable** y **Generadores con Sistema de Cogeneración** en Pequeña Escala con capacidad hasta de 30 kW, que se interconecten a la red eléctrica del suministrador en tensiones inferiores a 1 kV, y que no requieren hacer uso del **Sistema del Suministrador** para portear energía a sus cargas.

II. Declara el **Generador** que:

(a) (Opción 1. persona física): Es una persona física que comparece por su propio derecho con capacidad jurídica para contratar y obligarse en términos del presente Contrato y se identifica con _____, expedida por _____, de fecha _____.

(Opción 2. persona moral): Es una sociedad mexicana, constituida de acuerdo con la Escritura Pública número _____ de fecha _____, pasada ante la fe del licenciado _____, Notario Público No. _____ de la ciudad de _____, e inscrita en el Registro Público de Comercio de _____ bajo el número _____.]

Su representante _____, quien actúa con el carácter de _____, cuenta con todas las facultades necesarias para la celebración del presente contrato, según se desprende de la Escritura Pública No. _____ de fecha _____, pasada ante la fe del señor licenciado _____ Notario Público No. _____ de la ciudad de _____ e inscrita en el Registro Público de Comercio de _____ bajo el número _____.]

(b) Tiene su domicilio en _____, mismo que señala para todos los fines y efectos legales de este **Contrato**.

(c) Se obliga a proporcionar al Suministrador, y según sea el caso, acreditar documentalmente con **Información Técnica**, que cuenta con equipo de cogeneración que cumple con los términos del artículo 36, fracción II, de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica.

CLAUSULAS

PRIMERA. Objeto del **Contrato**. El objeto de este **Contrato** es realizar y mantener durante la vigencia del mismo, la interconexión entre el Sistema Eléctrico Nacional propiedad del **Suministrador** y la **Fuente de Energía Renovable** o el **Sistema de Cogeneración** en pequeña escala del **Generador**;

SEGUNDA. Definiciones. Los términos que aparecen en este **Contrato**, ya sea en el propio cuerpo o en cualquiera de sus anexos, con inicial mayúscula y negrillas tendrán el significado que se les asigna en esta cláusula segunda. Dicho significado se aplicará al término tanto en singular como en plural.

Cogeneración. Conforme a lo dispuesto en el artículo 36, fracción II, de la Ley de Servicio Público de Energía Eléctrica.

Contrato. El presente **Contrato** para **Fuente de Energía Renovable** o **Sistema de Cogeneración** en pequeña escala incluyendo todos y cada uno de sus anexos.

Generador. La persona física o moral que cuente con un equipo de generación eléctrica con **Fuente de Energía Renovable** o aquellas personas físicas o morales que cuenten con un **Sistema de Cogeneración** en Pequeña Escala.

OCTAVA. **Contrato de Suministro.** **El Generador se obliga a mantener vigente un contrato de suministro de energía eléctrica en la tarifa aplicable durante todo el tiempo que dure la interconexión de su fuente con la red del Suministrador.**

Fuente de Energía Renovable: Generadores de energía renovable como se define en el artículo 3, fracción II, de la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética.

Kilowatt hora (kWh). Unidad convencional de medida de energía eléctrica.

Ley. La Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica.

Parte. El Suministrador de acuerdo a la **Ley** y la persona física o moral que suscribe el **Contrato**.

Sistema. El Sistema Eléctrico Nacional propiedad del **Suministrador**.

Sistema de Cogeneración. Dispositivos que en su conjunto producen energía eléctrica mediante **Cogeneración**.

TERCERA. Vigencia del **Contrato**. El presente **Contrato** surtirá sus efectos a partir de la fecha en que sea firmado por ambas **Partes** y tendrá una duración indefinida.

CUARTA. Terminación anticipada y rescisión. El presente **Contrato** podrá darse por terminado anticipadamente por cualquiera de las causas siguientes:

a) Por voluntad del **Generador**, siendo requisito previo la notificación por escrito del **Generador** al **Suministrador** con anticipación no menor a treinta (30) días hábiles.

b) Por necesidades del servicio, siendo requisito previo la notificación por escrito del **Suministrador** al **Generador** con anticipación no menor a treinta (30) días hábiles.

c) Por acuerdo de las **Partes**.

El presente **Contrato** podrá rescindirse por contravención a las disposiciones que establece la **Ley**, su Reglamento y las demás disposiciones aplicables al **Contrato**, siempre y cuando dicha contravención afecte sustancialmente lo establecido en este **Contrato**.

Mientras no se rescinda el **Contrato**, cada **Parte** seguirá cumpliendo con sus obligaciones respectivas al amparo del mismo.

QUINTA. Entrega de energía por el **Generador**. El **Generador** se compromete a poner a disposición del **Suministrador** la energía producida por la **Fuente de Energía Renovable** o por el **Sistema de Cogeneración** en pequeña escala, y el **Suministrador** se compromete a recibirla hasta por un total igual a la energía asociada a la potencia de _____ kW.

La potencia máxima a instalar dependerá del tipo de servicio, y no podrá ser mayor a lo siguiente:

Para usuarios con servicio de uso residencial: hasta 10 kW.

Para usuarios con servicio de uso general en baja tensión: hasta 30 kW.

SEXTA. Interconexión. Las inversiones necesarias para la construcción de las instalaciones o equipos que técnicamente sean necesarios serán a cargo del **Generador**.

Asimismo, estará a cargo del **Generador** cualquier modificación que sea necesario realizar a las instalaciones existentes para lograr la interconexión, mismas que, en su caso, realizará bajo la supervisión del **Suministrador** y previa autorización de éste.

Las instalaciones y equipos necesarios en el Punto de Interconexión así como los elementos de protección, requeridos para la conexión con el **Sistema** deberán cumplir con las especificaciones conducentes del **Suministrador** y las Normas Oficiales Mexicanas (NOM). Las características de estas instalaciones y equipos serán las establecidas por el **Suministrador**.

SEPTIMA. Medición. Los medidores y los equipos de medición a ser usados para medir la energía entregada por el **Generador** al **Suministrador** y la que entregue el **Suministrador** al **Generador** serán instalados por el **Suministrador** a costa del **Generador**. Los medidores a instalar tendrán la capacidad de efectuar la medición neta (Net Metering) entre la energía eléctrica entregada por el **Suministrador** y la energía eléctrica entregada por el **Generador** al **Suministrador**. En razón de ello, el **Generador** únicamente pagará la diferencia entre el costo del equipo necesario para realizar la medición neta y el costo del equipo convencional que instalaría el **Suministrador** para la entrega de energía eléctrica que corresponda.

El **Generador** puede instalar y mantener a su propia costa, medidores y equipo de medición de reserva en el Punto de Interconexión adicionales a los mencionados en el párrafo anterior de esta cláusula, siempre y cuando cumplan con las normas y prácticas que tiene establecidas el **Suministrador** para ese propósito.

OCTAVA. Contrato de Suministro. El **Generador** se obliga a mantener vigente un contrato de suministro de energía eléctrica en la tarifa aplicable durante todo el tiempo que dure la interconexión de su fuente con la red del **Suministrador**.

NOVENA. Facturación y pagos. Para fines de facturación, el consumo de kWh del **Generador**, se determinará como la diferencia entre la energía eléctrica entregada por el **Suministrador** y la entregada por el **Generador** al **Suministrador**.

Cuando la diferencia sea negativa, se considerará como un crédito a favor del **Generador** que podrá ser compensado dentro del periodo de 12 meses siguientes. De no efectuarse la compensación en ese periodo, el crédito será cancelado y el **Generador** renuncia a cualquier pago por este concepto.

Cuando la diferencia sea positiva, se considerará como un crédito a favor del **Suministrador** y se facturará en la tarifa aplicable según el contrato mencionado en la cláusula octava.

DECIMA. El **Generador** se obliga a no intervenir ni modificar los equipos en sus instalaciones que están asociados a la desconexión de su fuente de energía, ni a los asociados a

la desconexión de sus instalaciones de las instalaciones del **Suministrador**. En caso contrario, el **Generador** deberá responder de los daños y perjuicios que cause el **Suministrador**.

DECIMA PRIMERA. Lugar de pago. Todos los pagos se harán en moneda de curso legal en los Estados Unidos Mexicanos en las oficinas de atención al público del **Suministrador** o en las instituciones o medios que éste establezca.

DECIMA SEGUNDA. Supletoriedad. Para lo no establecido en el presente Contrato, se aplicarán las disposiciones del contrato de suministro de energía eléctrica mencionado en la cláusula octava así como lo dispuesto en las disposiciones jurídicas aplicables.

DECIMA TERCERA. Modificaciones. Cualquier modificación al presente **Contrato** deberá formalizarse por escrito y ambas **Partes** deberán suscribir el convenio correspondiente.

DECIMA CUARTA. Caso fortuito y fuerza mayor. Las **Partes** no serán responsables por el incumplimiento de sus obligaciones cuando el mismo resulte de caso fortuito o fuerza mayor.

DECIMA QUINTA. Cesión de derechos. El **Generador** tiene prohibida la cesión parcial o total de los derechos y obligaciones derivadas del presente **Contrato**, sin la previa autorización por escrito del **Suministrador**.

DECIMA SEXTA. Legislación y tribunales. El presente **Contrato** se rige e interpreta por las leyes federales de los Estados Unidos Mexicanos y, en particular, por la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica y su Reglamento. Las controversias que surjan del presente contrato serán competencia de los tribunales federales en la ciudad _____ y al efecto las partes renuncian al diverso fuero que pudiere corresponderles por razón de su domicilio u otras causas.

Este **Contrato** se firma en ___ ejemplares en la Ciudad de _____, el de _____ de _____.

EL SUMINISTRADOR

EL GENERADOR

Las firmas y antefirmas que anteceden corresponden al Contrato celebrado entre _____(el suministrador) y _____(el generador).

C.I. MODELO DE CONTRATO DE INTERCONEXION PARA FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE O SISTEMA DE COGENERACION EN PEQUEÑA ESCALA.

ANEXO D

NOM-001-SEDE-2012 [11]

3.11.1. ARTICULO 694 SISTEMAS ELECTRICOSEOLICOS PEQUEÑOS

694-1. Alcance. Las disposiciones de este Artículo aplica a sistemas eléctricos eólicos pequeños (turbina) que consisten de uno o más generadores eléctricos de viento, con generadores individuales que tienen una potencia nominal hasta e incluyendo 100 kilowatts. Estos sistemas pueden incluir generadores, alternadores, inversores y controladores.

NOTA: Los sistemas eléctricos eólicos pequeños pueden ser interactivos con otras fuentes de generación de energía o pueden ser sistemas autónomos. Los pequeños sistemas eléctricos eólicos pueden tener salida de corriente alterna o corriente continua, con o sin energía eléctrica de almacenamiento, tales como baterías. Ver las Figuras 694-1 y 694-2.

694-2. Definiciones

Circuito de salida de la turbina eólica: Conductores del circuito entre los componentes internos de una turbina eólica pequeña (la cual puede incluir un alternador, rectificador integrado, controlador y/o inversor) y otros equipos.

Circuito de salida del inversor: Los conductores entre un inversor y un tablero de alumbrado y control de corriente alterna para sistemas autónomos, o los conductores entre un inversor y equipo de acometida u otra fuente de generación de energía eléctrica, tales como el suministrador del servicio público para una red de generación y distribución eléctrica. **Carga de desvío:** Una carga conectada a un controlador de desvío de carga o controlador por desvío de carga, también conocido como vertedero de carga.

Controlador de desvío de carga: Equipo que regula la salida de un generador de viento desviando la potencia del generador a cargas de corriente continua y corriente alterna o a una acometida interconectada con el suministrador.

Controlador de desvío de carga de baterías: Equipo que regula el proceso de carga de una batería u otro dispositivo de almacenamiento de energía, mediante la desviación de potencia desde el almacenamiento de energía hacia cargas de corriente alterna o corriente continua o a una acometida interconectada del suministrador.

Góndola: Envolvente que alberga al alternador y otras partes de una turbina eólica.

Potencia máxima de salida: Promedio máximo, de un minuto, de potencia de salida producida por la operación de una turbina eólica en estado estable normal (la potencia de salida instantánea puede ser más alta).

Potencia nominal: Potencia de salida de la turbina eólica a una velocidad de viento de 11 metros/segundo. Si una turbina produce más potencia a menor velocidad del viento, la potencia nominal es la potencia de salida de la turbina eólica a una velocidad del viento menor que 11 metros/segundo que produce la mayor potencia de salida. Como se muestra en la siguiente figura 3.29 [11].

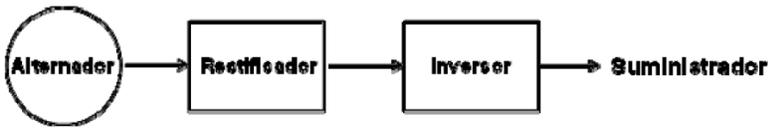


Figura 3.29. Identificación de componentes de un sistema eólicos pequeños - sistema interactivo [11]

3.11.2. Sistemas eléctricos eólicos pequeños.

PELIGRO DE DESCARGA ELECTRICA

NO TOQUE LAS TERMINALES DEL LADO LINEA NI DEL LADO CARGA
PUEDEN ESTAR ENERGIZADAS EN LA POSICION ABIERTO.

b) Equipos. En el medio de desconexión, del lado de la turbina eólica, se permitirán equipos tales como rectificadores, controladores, desconectores de aislamiento o para conectar en cortocircuito, y dispositivos de sobrecorriente.

c) Requisitos para los medios de desconexión.

1) Ubicación. Los medios de desconexión de sistemas eléctricos eólicos pequeños se instalarán en un lugar fácilmente accesible ya sea en, o adyacente a, la torre de la turbina, en el exterior de un edificio o estructura o en el interior, en el punto de entrada de los conductores del sistema eólico. **Excepción:** En las instalaciones que cumplen con 694-30(c) se permitirá que tengan los medios de desconexión ubicados a distancia desde el punto de entrada de los conductores del sistema eólico. El medio de desconexión una turbina eólica no se requerirá que se ubique en la góndola o en la torre. El medio de desconexión no se instalará en cuartos de baño.

2) Marcado. Cada medio de desconexión del sistema de turbina deberá estar marcado permanentemente para identificarlo como un medio de desconexión de un pequeño sistema eléctrico de aerogenerador. Se instalará una placa de acuerdo con 705-10 [11].

694-2. Definiciones

Circuito de salida de la turbina eólica: Conductores del circuito entre los componentes internos de una turbina eólica pequeña (la cual puede incluir un alternador, rectificador integrado, controlador y/o inversor) y otros equipos [11].

Circuito de salida del inversor: Los conductores entre un inversor y un tablero de alumbrado y control de Corriente Alterna para sistemas autónomos, o los conductores entre un inversor y equipo de acometida u otra fuente de generación de energía eléctrica, tales como el suministrador del servicio público para una red de Generación y distribución eléctrica.

Carga de desvío: Una carga conectada a un controlador de desvío de carga o controlador por desvío de carga, también conocido como vertedero de carga [11].

Es muy importante que la instalación se realice de acuerdo con los códigos de colores que se indican en la NOM-001-SEDE-2012. Artículo 694- 20.

Los circuitos de entrada de CA y salida de CA son aislados de la carcasa. El sistema de puesta a tierra es importante para su sistema eléctrico y deberá estar sujeto a NOM-001-SEDE-2012. Artículo 694-40, que indica:

- a) **Generalidades.** Las partes metálicas expuestas no conductoras de corriente de torres, góndolas de turbinas, otros equipos y envolventes de conductores, se deben conectar a un conductor de puesta a tierra.
- b) **Cables de retenida.** Los cables de retenida utilizados para soportar torres de las turbinas no se requerirán estar conectados a un conductor de puesta a tierra de equipo o que cumplan con los requisitos de 250-110.
- c) **Puesta a tierra de la torre.**
 - 1) Electrodo auxiliares. Una torre de un aerogenerador debe ser conectada a uno o más electrodos auxiliares para limitar las tensiones impuestas por rayos. Se permitirá que los electrodos auxiliares sean instalados de acuerdo con 250-54. Serán aceptables los electrodos que son parte de la base de la torre y cumplen los requisitos de electrodos recubiertos con concreto de acuerdo con 250-52(a)(3). Un soporte de torre de metal puesto a tierra se considerará aceptable en cumplimiento de los requisitos de 250-136(a). Cuando están instalados en las proximidades de la cimentación galvanizada o de los componentes del anclaje de la torre, se deben utilizar electrodos de puesta a tierra galvanizados.

NOTA: Los electrodos de puesta a tierra de cobre y cobre-revestido, cuando son utilizados en suelos de alta conductividad, puede causar corrosión electrolítica de la cimentación galvanizada y de los componentes del anclaje de la torre.

2) Conductor de puesta a tierra del equipo. Un conductor de puesta a tierra de equipo se requiere entre una turbina y el sistema de puesta a tierra del inmueble, de acuerdo con 250-110.

3) Conexiones de puesta a tierra de la torre. Los conductores de puesta a tierra de equipo y los conductores de puesta a tierra de electrodos, cuando se utilicen, se conectarán a la torre metálica por soldadura exotérmica, terminales, conectores de presión, abrazaderas u otros medios aprobados. Los dispositivos, tales como conectores y terminales, deben ser adecuados para el conductor y la estructura a la que los dispositivos están conectados. Siempre que sea posible, se evitará el contacto de metales distintos en cualquier parte del sistema, para eliminar la posibilidad de acción galvánica y corrosión. Todos los elementos mecánicos utilizados para terminar estos conductores deberán ser accesibles[11].

Electrodos artificiales.

a) General. Cuando se usen electrodos artificiales, éstos deben penetrar, tanto como sea posible, dentro del nivel de humedad permanente. Los electrodos deben ser de un metal o aleación que no se corroa excesivamente. Toda la superficie externa de los electrodos debe ser conductora, bajo las condiciones existentes y durante la vida útil de los mismos, esto indica, que no tenga pintura, esmalte u otra cubierta aislante. Esto proporcionará cierta protección contra sobretensiones y cargas estáticas acumuladas. Se recomienda realizar un sistema delta con la finalidad de tener un valor deseado menor a 10Ω [11].

Nota: El neutro y el sistema de tierras no se deberán unir dentro del *Skystream*.

Las instrucciones son sólo de referencia como los requisitos en su área, pueden ser diferentes. Para un buen sistema de tierras se recomienda utilizar conductor de cobre solamente. Distancias y calibres de conductores se basan en la producción de energía W y una máxima pérdida de línea de voltaje del 2% [11].

694-50. Punto de interconexión del sistema interactivo. Se deberán marcar todos los puntos de interconexión del sistema interactivo con otras fuentes, en un lugar accesible, en los medios de desconexión y con el valor nominal de corriente alterna de salida y la tensión de operación nominal de corriente alterna.

694-54. Identificación de fuentes de energía.

a) **Instalaciones con sistemas autónomos.** Cualquier estructura o edificio con un sistema autónomo y no conectado a una fuente del suministrador, deberá tener una placa permanente o directorio instalado en el exterior del edificio o estructura en un lugar fácilmente visible. La placa o directorio deberá indicar la ubicación de los medios de desconexión del sistema y deberá indicar que la estructura contiene un sistema de energía eléctrico autónomo.

694-56. Instrucciones para desactivar la turbina.

Se instalará una placa en, o adyacente a, la ubicación de la turbina proporcionando instrucciones básicas para la desactivación de la turbina.

G. Conexión a otras fuentes

694-60. Identificado de equipo interactivo. Sólo los inversores aprobados e identificados como interactivos se permitirán en sistemas interactivos.

94-62. Instalación. Los sistemas eléctricos eólicos pequeños, cuando se conectan a las fuentes de la red pública, deberán cumplir con los requisitos del Artículo 705.

694-66. Rango de tensión de operación.

Se permitirá que los sistemas eléctricos eólicos pequeños conectados a circuitos derivados o alimentadores dedicados, puedan exceder el rango de tensión de operación normal en estos circuitos, siempre que el suministro de tensión a cualquier equipo de distribución que alimenta otras cargas, permanezca dentro de los rangos normales.

NOTA: Las turbinas eólicas pueden usar la red eléctrica pública para descargar la energía eléctrica durante las rachas de viento de corta duración.

694-68. Punto de conexión. Los puntos de conexión para interconectar fuentes de energía eléctrica deberán cumplir con 705-12 [11].

Esto significa que se conecta directamente a su sistema eléctrico existente. Apéndice A incluye dibujos de referencia de interconexión de la red pública de su generador. Estos dibujos son para referencia y pueden ser modificados para presentación y aprobación. Se puede observar mediante la figura 3.7.

Advertencia: Por seguridad, se tiene que asegurar de haber apagado la unidad antes de trabajar en cualquiera y todas las conexiones eléctricas [**¡Error! Marcador no definido.**].
