

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Propuesta de diseño de aerogeneradores para iluminación de la
calzada Roosevelt**

Trabajo de graduación presentado por Alfredo José Trigueros Ravanales
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2023

**Propuesta de diseño de aerogeneradores para iluminación de la calzada
Roosevelt**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Propuesta de diseño de aerogeneradores para iluminación de la
calzada Roosevelt**

Trabajo de graduación presentado por Alfredo José Trigueros Ravanales
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2023

Vo. Bo. :

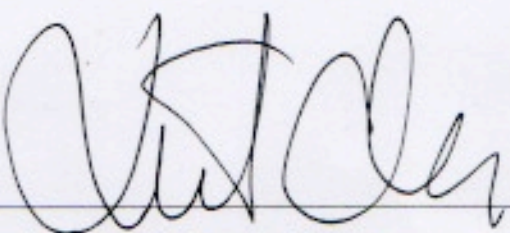
(f) 

(Ing. Jorge Carlos Escobar Polanco)

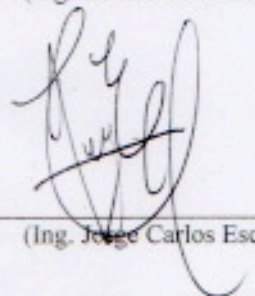
Tribunal Examinador:

(f) 

(Arq. María Alejandra Pacheco)

(f) 

(Ing. Robert Godo Levensen)

(f) 

(Ing. Jorge Carlos Escobar Polanco)

Fecha de aprobación: Guatemala, 6 de enero de 2023.

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	iii
LISTA DE GRÁFICOS	iv
RESUMEN	v
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN	2
III. OBJETIVOS.....	3
A. Objetivo general.....	3
B. Objetivos específicos	3
IV. MARCO TEÓRICO	4
A. Sistema vial	4
1. Subsistema de infraestructura.	4
2. Subsistema medio de traslado.	4
3. Subsistema factor humano.	4
4. Subsistema ambiente.....	4
5. Subsistema administrativo.	4
B. Señalización de calles y carreteras	5
1. Definición.	5
2. Clasificación.	5
C. Aspectos generales sobre accidentes de tránsito	5
1. Factores de orden condicional	5
2. Factores de orden operacional	6
D. Datos estadísticos de accidentes de tránsito a nivel nacional	7
E. Criterios de la Unión Europea aplicables al alumbrado público.....	7
1. Definición y ámbito de aplicación.	7
2. Antecedentes técnicos.....	8
3. Alumbrado vial.	8
4. Clasificación de vías y selección de clases de alumbrado.	8
5. Criterios básicos y generales para el alumbrado público	9
F. Documentos normativos UNE-EN de iluminación de carreteras	10
G. Energías renovables.....	11
H. Energías renovables en Guatemala	12
I. Energía eólica	13
1. Aspectos generales.....	13
2. Tratado de Kyoto.	14
J. Sistema de producción eoelectrica.....	15
1. Sistema aislado	15
2. Parque eólico.....	15
K. Estado de implantación de energía eólica	16
1. Producción de energía eólica en el mundo.....	16

2.	Producción de energía eólica en Guatemala.....	16
L.	Aerogeneradores.....	16
1.	Tipos de aerogeneradores.....	17
2.	Funcionamiento de los aerogeneradores.....	19
3.	Componentes de un aerogenerador.....	21
M.	Implementación de aerogeneradores verticales internacionalmente.....	22
1.	Perú.....	22
2.	Estambul.....	23
N.	Reutilización de piezas de aerogeneradores posterior a su uso.....	24
O.	Factores para el diseño de un aerogenerador.....	25
1.	Densidad de la potencia eólica.....	25
2.	Longitud de rugosidad del terreno.....	25
3.	Potencial de la energía eólica.....	26
4.	Área de captación de aerogeneradores.....	27
5.	Dimensionamiento de un sistema de aerogeneradores.....	27
P.	Mantenimientos esenciales para un óptimo funcionamiento.....	28
1.	Propósitos y alcances.....	28
2.	Tipos de mantenimientos.....	28
a.	Mantenimientos predictivos.....	28
b.	Mantenimientos preventivos.....	29
c.	Mantenimientos proactivos.....	29
d.	Mantenimientos correctivos.....	29
e.	Equipo necesario.....	29
V.	METODOLOGÍA.....	31
A.	Selección de luminaria.....	31
B.	Simulación de iluminación de luminaria.....	32
C.	Potencial eólico del sitio.....	34
1.	Velocidad del viento a la altura del aerogenerador.....	34
2.	Área de captación de viento del aerogenerador.....	35
3.	Potencial de energía eólica en el sitio. Unificando los datos obtenidos anteriormente con los presentados a continuación, se pudo obtener el potencial de energía eólica que presenta la calzada Roosevelt.....	36
D.	Energía consumida por el sistema de luminarias.....	37
E.	Cantidad de aerogeneradores necesitados.....	38
F.	Ahorro económico.....	39
G.	Variables en la cantidad de energía consumida y la cantidad de aerogeneradores.....	40
H.	Variables en el área de captación de las palas de los aerogeneradores.....	40
I.	Contaminación generada.....	41
VI.	CONCLUSIONES.....	43
VII.	RECOMENDACIONES.....	44
VIII.	BIBLIOGRAFÍA.....	46
IX.	ANEXOS.....	47

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Datos estadísticos del aumento de producción de energía renovable en el mundo.....	9
Cuadro 2. Longitud de rugosidad del terreno.....	26
Cuadro 3. Valores obtenidos en simulación de DIALux.	32
Cuadro 4. Velocidad del viento a la altura del aerogenerador.	35
Cuadro 5. Área de captación de viento del aerogenerador.....	36
Cuadro 6. Potencial de la energía eólica.	37
Cuadro 7. Energía consumida por sistema de luminarias.	38
Cuadro 8. Cantidad de aerogeneradores requeridos.....	39
Cuadro 9. Ahorro económico por implementación de aerogeneradores.....	40
Cuadro 10. Energía consumida por luminarias disminuyendo la cantidad de horas a utilizar. ..	40
Cuadro 11. Nueva cantidad de aerogeneradores requerida.	40
Cuadro 12. Nueva cantidad de aerogeneradores requerida.	41
Cuadro 13. Nueva cantidad de aerogeneradores requerida.	41
Cuadro 14. Contaminación generada por el uso de distintas fuentes de energía.	41
Cuadro 15. Cantidad de contaminación generada sin uso de aerogeneradores.....	42
<i>Cuadro 16. Datos estadísticos de accidentes registrados según tipo de accidente.</i>	<i>47</i>
Cuadro 17. Datos estadísticos de víctimas fallecidas en accidentes según tipo de accidente.....	48
Cuadro 18. Datos estadísticos del aumento de producción de energía renovable en el mundo..	50
Cuadro 19. Datos estadísticos del aumento de producción de energía renovable en el mundo según tipo de fuente de generación.....	51
Cuadro 20. Promedio mensual de energía eléctrica generada en Guatemala.....	52
Cuadro 21. Promedio mensual de generación de energía eléctrica por tipo de fuente en Guatemala.	53
Cuadro 22. Contenido de mercurio para cada tipo de tecnología. (Contratación Pública Ecológica, 2016) *VMAP: Vapor de Mercurio a Alta Presión; *VSAP: Vapor de Sodio a Alta Presión; *Hm: Haluro metálico (halógenas).	54

LISTA DE GRÁFICOS

Figura 1. Aerogenerador de eje horizontal (a) y aerogenerador de eje vertical (b).	17
Figura 2. Curva de desempeño de un aerogenerador.	20
Figura 3. Partes de una turbina eólica de eje vertical.	22
Figura 4. Turbina ENLIL funcionando en carretera en Estambul.....	24
Figura 5. Luminaria Unistreet gen2 BGP281 T25 1 XLED22-4S/740 DM12.	31
Figura 6. Curva de distribución luminosa de la luminaria seleccionada.....	32
Figura 7. Curvas de iluminación en carretera obtenidas en DIALux.	33
Figura 8. Simulación de iluminación con DIALux.	33
Figura 9. Velocidad conocida del viento y altura a la que se midió.	34
Figura 10. Longitud de rugosidad del terreno.	35
Figura 11. Dimensiones del aerogenerador.....	36
Figura 12. Temperatura promedio en la calzada Roosevelt.	37
Figura 13. Cantidad de horas de luz natural y crepúsculo de la calzada Roosevelt.	38
Figura 14. Datos estadísticos de accidentes registrados según tipo de accidente.	48
Figura 15. Datos estadísticos de accidentes registrados según tipo de accidente.	49
Figura 16. Datos estadísticos de accidentes registrados según tipo de accidente.	50
Figura 17. Datos estadísticos del aumento de producción de energía renovable en el mundo. ...	51
Figura 18. Datos estadísticos del aumento de producción de energía renovable en el mundo según tipo de fuente de generación.....	52
Figura 19. Promedio mensual de energía eléctrica generada en Guatemala.	52
Figura 20. Promedio mensual de generación de energía eléctrica por tipo de fuente en Guatemala.	53

RESUMEN

El presente trabajo de graduación tiene como objetivo proponer una red de aerogeneradores, los cuales, alimentándose de la corriente de viento generada por el tránsito vehicular sumada a la corriente de viento natural, logren alimentar la red de alumbrado público, para dar mayor visibilidad y claridad a los usuarios de la calzada Roosevelt en horarios nocturnos. Esto contribuiría a la reducción de accidentes vehiculares, así como la disminución de actos de delincuencia por falta de iluminación, problemática que es constante en el país. (Devecitech, 2022)

Guatemala cuenta con un total de 7, 339.82 kilómetros de red vial pavimentados, dichos kilómetros presentan una deficiencia de iluminación considerable, a esto se le suma la falta de señalización, como es el caso de ciertos tramos de la carretera interamericana. Dicha problemática conlleva a una carencia de visibilidad en horarios nocturnos, produciendo problemas relevantes en la conducción, lo cual llega a tener consecuencias trágicas en muchos casos, ya que según datos estadísticas nacionales obtenidas por el Instituto Nacional de Estadística, los accidentes debido a la poca visibilidad se ubican en el quinto lugar de doce según reportes de la PNC (Instituto Nacional de Estadística, 2021). Todo esto sumado a la necesidad actual de la implementación de energías alternativas o renovables, especialmente en campos como la ingeniería civil, colabora en la implementación de aerogeneradores que logren generar energía para alimentar luminarias que a su vez iluminen las carreteras nacionales.

La implementación de dichos aerogeneradores es un tema que se encuentra en auge en regiones como Chile y Turquía, ya que de estos modelos se ha recopilado información que ha sido adaptada a las necesidades de la Ciudad de Guatemala, además de los beneficios ya antes mencionados, por lo cual la utilización de estos elementos sería un paso significativo en la mejora del sistema vial del país. (Universidad Talca de Chile, 2018)

I. INTRODUCCIÓN

Guatemala es un país que cuenta con un gran potencial para producción de energía renovable, esto debido a sus favorables condiciones climáticas, su potencial en ríos y su ubicación geográfica. Dicho potencial no es aprovechado en su totalidad, dejando a un lado beneficios como la reducción de agotamiento de recursos naturales, al igual que la reducción de la incertidumbre económica. Otro beneficio importante que conlleva la implementación de energías renovables es la aseguración de la independencia energética del país, debido a que en ciertas ocasiones del año se le compra energía a México, de igual manera reduciría la importación de combustibles fósiles.

Otro aspecto importante en la elaboración del presente trabajo de graduación es la iluminación del sistema de carreteras con el que cuenta el país, ya que el objetivo es utilizar la energía eólica para alimentar la red de iluminación de carreteras. Guatemala es un país muy transitado debido a su ubicación geográfica, debido a esto cuenta con una cantidad considerable de kilometraje pavimentado de carreteras.

Debido a las condiciones anteriormente expuestas se tomó como muestra la calzada Roosevelt para la implementación de aerogeneradores que alimenten la red de iluminación. Se analizaron datos sobre la potencia y la velocidad del viento para que, de esta manera, se pueda proponer un diseño de implementación de los aerogeneradores, además de brindar un programa de operación y mantenimiento de dichos elementos.

II. JUSTIFICACIÓN

En Guatemala el 30 % de los accidentes en carreteras ocurren en horarios nocturnos o en condiciones climáticas de poca visibilidad. Existe un vacío de información acerca de la iluminación en el sistema vial del país. (Instituto Nacional de Estadística, 2021). Esto se ve reflejado en la ubicación del país dentro del Ranking de Infraestructura Vial en el Mundo elaborado por el Foro Económico Mundial, el cual es 133 de 174 (Schwab, 2020). Por lo tanto, en el trabajo de graduación presente se aporta con el estudio para la implementación de un sistema de iluminación de carreteras alimentado por energía eólica basado en aerogeneradores, con el fin de aumentar el porcentaje de iluminación en las vías principales de tránsito vehicular.

El 66.09% del total de energía eléctrica consumida en el país proviene de fuentes renovables y solamente el 3.68 % es de energía eólica. Tomando en cuenta la capacidad de 51.3 MW que tiene el país para generar energía proveniente del viento, con este proyecto de aerogeneradores en carretera, no solamente se espera aportar con la visibilidad de los caminos, sino que también con la explotación del potencial de generación de energía que se tiene en Guatemala. (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2021)

Por otro lado, un aporte potencial que se tiene con la iluminación de la calzada Roosevelt por medio de la colocación de aerogeneradores es una carretera segura para los conductores debido a la buena iluminación que presenta, ya que que en el territorio nacional el 25 % de los autos robados en carreteras suceden en horarios nocturnos de poca visibilidad. (Instituto Nacional de Estadística, 2021)

Al implementar los aerogeneradores dentro de la calzada Roosevelt se pueden sumar beneficios como la verificación de datos de velocidad de corrientes de aire dentro de ciudades y carreteras principales. Además, con la mejora del aerogenerador puedan llegar a brindar información sobre sismos, huella de carbono y humedad, la cual es relevante para estudios dentro del país. (Devecitech, 2022)

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Proponer una red de aerogeneradores, que, alimentándose de la corriente de viento generada por los automóviles sumada a la corriente natural de aire, suministre energía a la red de alumbrado público y de esta manera ilumine la calzada Roosevelt.

B. Objetivos específicos

- Comprobar la factibilidad de la implementación de aerogeneradores para la alimentación de la red de alumbrado público de la calzada Roosevelt.
- Comparar el ahorro económico que se tendría en la implementación de energías renovables para la iluminación de tramos carreteros.
- Demostrar que la implementación de redes eólicas disminuirá la contaminación generada por la utilización de fuentes no renovables para la generación de energía eléctrica

IV. MARCO TEÓRICO

A. Sistema vial

Se le puede llamar sistema vial al conjunto de elementos que se vean involucrados en la movilización, tanto cómoda, como segura y económica, de personas u objetos, de un destino a otro. Dentro de este conjunto de elementos se considera la iluminación del sistema. Es relevante mencionar que un sistema de infraestructura vial es un eje de vital importancia para que una sociedad pueda desarrollarse ordenada y metódicamente, ya que este influye en toda actividad relacionada con el tema socio-económico de una ciudad, debido a que el tener una movilización eficiente conlleva a una comunicación efectiva, comunicación que debe cumplir con el objetivo de satisfacer las necesidades que pueda poseer una sociedad activa. (ALVA, 2003) Dentro del sistema vial se pueden encontrar subsistemas, dichos sistemas son:

1. Subsistema de infraestructura. Conformado por lo que se pueda considerar como derecho de vía, y complementado por los elementos relacionados con los mismos, entre los cuales se puede mencionar materiales empleados para la construcción de las vías de tránsito vehicular, incluido sistema de mantenimiento. (ALVA, 2003)

2. Subsistema medio de traslado. Constituido por todo lo que esté relacionado con el método de transporte, motorizado o no motorizado, que se movilice utilizando las vías de tránsito, y que tenga intervención directa con los aspectos mecánicos del vehículo. (ALVA, 2003)

3. Subsistema factor humano. Conformado por los pasajeros, peatones y operadores de vehículos, lo cuales deben de disponer de las vías de tránsito. (ALVA, 2003)

4. Subsistema ambiente. Dividido en ambiente modificado y ambiente natural, el primero se refiere a las modificaciones que sean realizados en zonas urbanas, como su contaminación, y el segundo conformado por factores como el clima, topografía, flora y fauna que rodee la vía. (ALVA, 2003)

5. Subsistema administrativo. Constituido por leyes, normas y reglamentos, los cuales rigen tanto dentro de las vías de movilización, calles o carreteras, como aquellos

relacionados con aspectos operacionales e institucionales. (ALVA, 2003)

B. Señalización de calles y carreteras

La deficiencia en temas de iluminación de las carreteras puede llegar a afectar la visibilidad de los conductores, pudiendo esto ocasionar problemas, tales como atropellos, daños vehiculares en túmulos, colisiones, entre otros. (ALVA, 2003) Para un mejor entendimiento del tema se deben de entender los siguientes aspectos.

1. Definición. El dispositivo encargado de controlar el tránsito vehicular es conocido como una señal, generalmente las señales son colocadas a nivel del camino o sobre él. Las señales de tránsito tienen como objetivo primordial transmitir un mensaje al conductor o peatón sobre alguna reglamentación de tránsito vigente o bien alguna sugerencia o alerta, además de indicar rutas y nombres de pueblos o ciudades. (ALVA, 2003)

2. Clasificación. Las señales de tránsito son clasificadas según su funcionalidad:

- Señales de reglamentación: Informan al conductor sobre la prioridad de paso, o sobre alguna limitación que se encuentre en la ruta. Dichas señales son guiadas por las leyes y reglamentos existentes en cada región. (ALVA, 2003)
- Señales de prevención: Encargadas de prever al conductor sobre cualquier condición adversa que se pueda encontrar en cualquier calle o carretera. (ALVA, 2003)
- Señales de información: Encargadas de informar al conductor sobre el nombre de cualquier ubicación, alguna ruta, así como el kilometraje o algún servicio que se encuentre cercano a él. (ALVA, 2003)

C. Aspectos generales sobre accidentes de tránsito

En la mayoría de las situaciones los principales responsables de los accidentes son un conjunto de factores externos, también tienen parte de la responsabilidad elementos considerados como determinantes (ALVA, 2003). Dichos factores se pueden dividir en dos grandes grupos, siendo estos:

1. Factores de orden condicional.

- Lluvia y la nieve: El principal problema que ocasionan estos dos factores es el carácter deslizante que proporcionan a la pista o la poca visibilidad. (ALVA, 2003)
- Pavimentos irregulares: Puede ocasionar muy fácilmente descontrol vehicular, causando que este vuelque o deba de frenar violentamente. (ALVA, 2003)
- La oscuridad: Refiriéndose a la poca iluminación de las vías de tránsito vehicular, viéndose reflejado en poca visibilidad. (ALVA, 2003)
- Velocidad critica en curvas: Exceder dicha velocidad puede llegar a producir un deslizamiento lateral, causando una colisión o vuelco. (ALVA, 2003)
- La niebla y el humo: Parecido al caso de la oscuridad o lluvia intensa, estos dos factores afectan en temas de visibilidad. (ALVA, 2003)
- Curvas: En caso de que el vehículo circule a una velocidad excesiva en una curva, patinará o se deslizará y posiblemente colisionará. (ALVA, 2003)

2. Factores de orden operacional.

- Táctica evasiva inapropiadamente seleccionada: La simple equivocación en la ejecución de una sola decisión comprendida dentro de la cadena de sucesos anteriores a la colisión colabora a que sea imposible de detener. (ALVA, 2003)
- Excesiva velocidad de circulación: La excesiva velocidad, generalmente, tiene como consecuencia la producción de accidentes. (ALVA, 2003)
- Estrategia elegida tardíamente: Hace referencia a escoger una maniobra evasiva acertada en el momento correcto, ya que, si dicha decisión es tomada de manera tardía provoca un accidente inminente. (ALVA, 2003)
- Falla en el diseño de la vía: Una vía trazada correctamente ofrece al usuario un alto nivel de seguridad, tanto en los temas de diseño geométrico, así como en temas de señalización a lo largo de la vía. (ALVA, 2003)
- Falta de educación vial: La falta de formación de conductores responsable genera

complicaciones. (ALVA, 2003)

D. Datos estadísticos de accidentes de tránsito a nivel nacional

El INDE (Instituto Nacional de Estadísticas) es la institución encargada a nivel nacional de recopilar datos estadísticos, entre ellos se encuentran los indicadores de accidentes de tránsito, la cual fue actualizada por en el periodo que abarca los años 2016 y 2020, de dichos indicadores es posible obtener la cantidad de accidentes por tipo, datos que podemos observar en el Cuadro 1. Datos estadísticos de accidentes registrados según tipo de accidente, del cual se puede observar un promedio de 6,727 accidentes por año. Además, se presenta el número de personas fallecidas o lesionadas según en dichos accidentes, separadas por tipo de accidente, esto en el Cuadro 2. Datos estadísticos de víctimas fallecidas en accidentes según tipo de accidente, y el Cuadro 3. Datos estadísticos de víctimas lesionadas en accidentes según tipo de accidente, obteniendo un promedio de 1,653 personas fallecidas y 7,646 lesionadas en los accidentes de tránsito. Dichos cuadros se encuentran en la sección de anexos.

De igual manera, como señala el INDE en Indicadores de Accidentes de Tránsito Período 2016 - 2020, el 30 por ciento de los accidentes en carreteras suceden en horas nocturnas o en condiciones climáticas de lluvia o neblina, es decir, en promedio 2,018 de los accidentes ocurridos anualmente ocurren bajo esas condiciones.

E. Criterios de la Unión Europea aplicables al alumbrado público

1. Definición y ámbito de aplicación. Se refiere a la instalación fija de iluminación, destinada a proporcionar una buena visibilidad a los usuarios de las zonas públicas de tráfico en el exterior durante las horas de oscuridad. (Contratación Pública Ecológica, 2016). Los criterios de eficiencia utilizado se enfocan en dos tipos de lámparas, de sodio a alta presión y en las de haluros metálicos, diferenciándose en el tipo de aplicaciones a las que sean sometidas, tales como que las lámparas de haluro metálicos se utilizan preferentemente en calles del centro de la ciudad, debido a que, por el tipo de luz, se perciben mejor los colores reales de los objetos. En cambio, las lámparas de sodio a alta presión son adecuadas para un alumbrado público general, debido a la reducción de atracción de insectos, requiriendo un mantenimiento y limpieza menor. (Contratación

Pública Ecológica, 2016)

2. Antecedentes técnicos. En el año 2007 se realizó un estudio sobre antecedentes técnicos de alumbrado general en distintas ciudades de la Unión Europea, en el cual se describe detalladamente la razón por la cual los criterios se enfocan en las lámparas de alta intensidad. En este informe se mencionaba lo siguiente:

- Las unidades con una frecuencia mayor utilizadas en alumbrado público son lámparas de alta intensidad (HID).
- Las lámparas fluorescentes compactas son utilizadas únicamente en la categoría de vías de tránsito de velocidad lenta.
- El impacto medioambiental que pueden causar los distintos tipos de lámparas para el mismo tipo de alumbrado es un dato a tomar en cuenta.
- Las lámparas fluorescentes son utilizadas en instalaciones de alumbrado de oficina o doméstico, comprendiendo un grupo distinto al alumbrado público.
- Actualmente el uso de iluminación LED para alumbrado público es mayor, disminuyendo el uso de lámparas de sustitución, debido a su vida útil prolongada.

(Contratación Pública Ecológica, 2016)

3. Alumbrado vial. El grado de iluminación que es requerido por una vía de tránsito depende de factores como el tipo de vía, la complejidad de su trazado, la separación entre carriles, el tipo de usuario de cada carril, la intensidad y el sistema de control del tránsito. Tomando en cuenta estos criterios, se puede clasificar las vías de circulación en situaciones de proyecto, designándole a cada uno de estos grupos los requisitos fotométricos específicos para su funcionalidad, tomando en cuenta las necesidades visuales, así como el impacto ambiental que provoquen.

4. Clasificación de vías y selección de clases de alumbrado. El criterio principal para la clasificación correcta de vías es la velocidad de circulación, las cuales vemos agrupadas en la siguiente tabla:

Clasificación	Tipo de vía	Velocidad del tráfico (km/h)
A	Alta velocidad	>60
B	Moderada velocidad	30 < v < 60
C	Baja velocidad	5 < v < 30

Cuadro 1. Datos estadísticos del aumento de producción de energía renovable en el mundo. (Rodríguez, 2014)

5. Criterios básicos y generales para el alumbrado público. El alumbrado público se define “una instalación fija de iluminación destinada a proporcionar una buena visibilidad a los usuarios de las zonas públicas de tráfico en el exterior durante las horas de oscuridad para contribuir a la seguridad del tráfico, la fluidez de éste y la seguridad pública” (Contratación Pública Ecológica, 2016). Actualmente el alumbrado público en la Unión Europea debe cumplir ciertos criterios, aplicables tanto a las luminarias como a los sistemas de alumbrado, los cuales están dictados por la Contratación Pública Ecológica. Dichos criterios son aplicables a todo tipo de lámparas, CFL, LED y HID. En el caso del diseño del sistema de alumbrado, se ha adoptado un planteamiento sistémico basado en el indicador de eficiencia energética máxima. (Contratación Pública Ecológica, 2016) Dichos criterios se resumen a continuación:

- **Potencia de las lámparas (W):** Al diseñar un sistema de alumbrado en autopistas, se debe de implementar luminarias con una potencia no menor a 150W y no mayor a 600W.
- **Iluminación exigida (lux):** En el caso de la iluminación exigida esta debe de ser mayor a 15 lux.
- **Interdistancia entre luminarias:** Para luminarias con la potencia e iluminación recomendada anteriormente es recomendable una interdistancia de mínimo 6 metros hasta 12 metros a una altura de mínimo 10 metros hasta 15 metros.

(Contratación Pública Ecológica, 2016)

6. Principales impactos medioambientales. Los principales impactos medioambientales de la iluminación artificial, en este caso en tramos viales, se clasifican en tres categorías: contaminación lumínica, emisiones de gases de efecto invernadero y

potencial de generación de contaminación por residuos. Dichos impactos se explican brevemente a continuación:

- **Contaminación lumínica:** Es habitual utilizar lámparas de vapor de mercurio para el alumbrado público, las cuales son particularmente dañinas para el medio ambiente, debido a que afectan, de manera negativa los procesos reproductivos de los insectos, además de causar grandes concentraciones de insectos, lo que facilita la caza de predadores, provocando desequilibrios en las poblaciones. De igual manera, la utilización de este tipo de lámparas contamina el suelo, la atmosfera y el agua debido a los residuos al concluir su ciclo de vida. (Contratación Pública Ecológica, 2016)
- **Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) procedentes de la generación de electricidad:** Debido a la utilización de combustibles fósiles se asocia la generación de energía eléctrica con la emisión de GEI, aunque los niveles de emisión de dichos gases dependen de la infraestructura instalada en el tramo vial. Estudios realizados por el MEM muestran que en Guatemala por cada megavatio-hora de electricidad se genera alrededor de 0.5 toneladas de CO₂e. (Contratación Pública Ecológica, 2016) (Ministerio de Energía y Minas, 2019)
- **Generación de residuos peligrosos:** Como se menciona con anterioridad, es usual utilizar lámparas de vapor de mercurio para alumbrado público, dichas luminarias generan residuos peligrosos que dañan al medio ambiente, el Cuadro 9. Contenido de mercurio por cada tipo de tecnología muestra como las lámparas de vapor de mercurio, vapor de sodio y fluorescentes poseen el mayor potencial de generación de emisiones directas de mercurio al medio ambiente. (Contratación Pública Ecológica, 2016)

F. Documentos normativos UNE-EN de iluminación de carreteras

Los documentos normativos de Una Norma Española (UNE) son un grupo de normas, normas experimentales e informes producidos en los Comités Técnicos de Normalización (CTN) de la antes llamada Asociación Española de Normalización (AENOR), ahora llamada UNE. (Una Norma Española, 2015)

Dichas normas se basan en la normativa ISO (International Organization of Satandardization), ya que, dependiendo del país estas son denominadas de diferente forma, agregándose la denominación que las representa dentro de dicho país (Una Norma Española, 2015). Dicha norma utiliza los siguientes parámetros para medir la calidad de la iluminación de carreteras:

- Luminancia media: Representada por las siglas L_{av} , la cual debe de cumplir con un valor mayor a 0.75 cd/m^2 .
- Uniformidad global: Representada por las siglas U_o , la cual debe de cumplir con un valor mayor a 0.40.
- Uniformidad longitudinal: Representada por las siglas U_l , la cual debe de cumplir con un valor mayor a 0.60.
- Incremento de umbral: Representada por las siglas TI, la cual debe de cumplir con un valor menor a 15%.
- Relación del borde: Representada por las siglas R_{EI} .

(Una Norma Española, 2015)

G. Energías renovables

Como tal, la palabra renovable, envuelve en su totalidad la esencia de tipo de energía, ya que esta proviene de la disponibilidad de la naturaleza, además de su capacidad de regeneración continua, por ende, inagotable y espontánea. (Rodríguez, 2014)

Para generar energía eléctrica a través de métodos renovables es necesario el analizar factores como la fuerza del viento, la radiación solar, la circulación de agua o el calor proveniente de la tierra, elementos que son concurrentes en la naturaleza. Entonces, cuando se compara este tipo de energía con la que actualmente se produce, proveniente de fuentes convencionales, se reducen los niveles de emisiones de gases, que dañan la atmósfera terrestre. (Rodríguez, 2014) La meta actual del mundo es lograr un aumento relevante en la producción de energías renovables. Como podemos notar en el último informe realizado por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés),

realizado en el 2019, se indica que las energías renovables son capaces de representar tres cuartas partes de la capacidad energética global (Rodríguez, 2014). Dicho informe contabiliza el aumento de energía renovable utilizado de manera mundial, el cual podemos notar en el Cuadro 4. Datos estadísticos del aumento de producción de energía renovable en el mundo, ubicado en la sección de anexos.

H. Energías renovables en Guatemala

Actualmente, la generación de energía eléctrica, a nivel mundial, se está centrando en la implementación de fuentes renovables, Guatemala es parte de los países comprometidos con este nuevo enfoque de generación de energía eléctrica con el menor daño posible al planeta. Dentro del país se cuenta con un alto potencial para el aprovechamiento de estos recursos, se estima, gracias a estudios realizados por el Ministerio de Energía y Minas, que actualmente se cuenta con un aproximado de 9000 MW de energía generada por medio de recursos renovables, como hidroeléctricas, parques eólicos, paneles solares, y geotérmicas, aunque, desafortunadamente, únicamente se utiliza un 23 por ciento para consumo público. (Ministerio de Energía y Minas, 2019)

El generar electricidad con estas fuentes renovables podría proporcionar al país, además de beneficios al medio ambiente, un empuje en la economía, debido a que, el explotar todo este potencial que se posee disminuiría, significativamente, el costo de electricidad a la región en un plazo largo, y como consecuencia se brindaría una estabilidad al usuario en temas de tarifas o costos de energía. Además de ahorrarle al país una disminución de costos en temas de energía debido a la reducción en la factura petrolera, logrando así una independencia energética relevante. (Ministerio de Energía y Minas, 2019)

Dentro del país, como principales fuentes de generación de energías renovables contamos con hidroeléctricas, las cuales llegan a un total aproximado de setenta, representando un 15 por ciento de la energía consumida por la población del país, siendo estas las que más aportan a la matriz energética del país. Aunque también se cuenta con centrales geotérmicas, con un total de dos, las cuales llegan a generar 35.23 MW, siendo esto un 0.4 por ciento de lo consumido. En el caso de las centrales solares, el país cuenta con ocho las cuales llegan a producir una 91.5 MW, siendo esto un 1 por ciento de lo que se consume. Por otro lado, el país cuenta con tres parques eólicos, generando un total de

106.5 MW, lo que llega a ser 1.5 por ciento. Por último, se cuenta con una planta de biomasa. (Ministerio de Energía y Minas, 2019)

El llevar a cabo los proyectos de generación de energía con recursos renovables necesitan inversión, debido a la construcción de plantas, pero, al mismo tiempo, brindan desarrollo rural y empleo para las aldeas cercanas a dichas plantas, ayudando así a un desarrollo en estas comunidades, las cuales, por lo general, son las que más necesitan este tipo de ayuda dentro del país. Debido a estas razones mencionadas con anterioridad el gobierno de Guatemala decidió crear la Política Energética 2014-202, en la cual se especifica y se tiene como meta el llegar a un 80 por ciento de producción de energía por medio de recursos renovables para el 2025, y la utilización de esta dentro del sector público del país. (Ministerio de Energía y Minas, 2019)

I. Energía eólica

1. Aspectos generales. Se ha comprobado que la energía eólica es viable tanto técnica como económicamente. (López, 2013) Esto se debe a distintos aspectos, como:

- Necesidad de fuentes alternativas: Lograr una reducción considerable de consumo de combustibles no renovables es una necesidad.
- Independencia energética: El aumentar el nivel de auto abastecimiento en el país ayudará a generar una mayor independencia energética.
- Reducción del impacto ambiental: Disminuyendo el consumo de combustibles no renovables se logra disminuir la emisión de gases, residuos líquidos y sólidos.

A continuación, se enumeran las principales ventajas que posee la energía eólica:

- Posee un periodo de recuperación energética reducido.
- No es requerido ningún proceso de minería para su construcción.
- Genera ahorro en combustibles y reduce dependencia energética
- Su emisión de gases contaminantes, efluentes líquidos y residuos sólidos es nula.

- Disminuye las emisiones de dióxido de carbono.
- No presenta riesgos como derrames, explosiones para su construcción y funcionamiento.

De igual manera, el utilizar este tipo de energía presenta cierto tipo de problemas, los cuales se en listan a continuación:

- El viento es totalmente aleatorio, debido a esto no todos los lugares son convenientes para la explotación de energía eólica.
- Debido a su aleatoriedad las previsiones de producción se deben calcular entre 24 y 48 horas antes para obtener una gestión de la cadena de transporte, generación y distribución de electricidad adecuada.

El utilizar energía eólica presenta cierto tipo de impacto ambiental, siendo esto muy reducido y relevante únicamente a una escala muy local:

- En las proximidades a la colocación de aerogeneradores aumenta el nivel de ruido.
- El rotor del aerogenerador puede causar interferencias en campos electromagnéticos.
- El posible impacto que se genera sobre la fauna, particularmente sobre las aves.
- Al necesitar una distancia considerable entre sí la ocupación del suelo es de consideración.
- El impacto visual o de temas de paisajes generado.

2. Tratado de Kyoto. El acontecimiento clave para el desarrollo de energía eólica mundialmente es el tratado de Kyoto. En 1992, en la Convención Marco de las Naciones Unidas, fue definida la legislación internacional relacionada con los mecanismos de desarrollo limpio, basados en reducir emisiones de carbono. En 1997, fue llevada a cabo la tercera conferencia de la Convención Marco de las Naciones Unidas, en la cual se especificó el marco jurídico que sería aplicable, contemplando planificación,

procedimiento y guías técnicas. El tratado tendría como objetivo principal lograr que entre los años 2008 y 2012 los países participantes disminuyeran sus emisiones de gases de efecto invernadero un 5 por ciento de los niveles emitidos en el año 1990. Si bien en un inicio el tratado de Kyoto carecería de especificaciones, en Marruecos a finales del 2001 se realizarían reuniones negociadoras en las cuales se definirían cinco incisos principales, los cuales serían:

- Compromisos legalmente vinculantes para países desarrollados.
- Los métodos de implementación del protocolo para la reducción de emisiones.
- Reducción del impacto de países que se encuentran en desarrollo.
- Revisiones de los equipos utilizados para la reducción de gases.

La Comunidad Económica Europea inició con un esfuerzo considerable en la reducción de emisiones del gas, principalmente invirtiendo en aerogeneradores. Por otro lado, para Estados Unidos la reducción de emisiones no era un tema de prioridad. Aun así, dicho país continúa siendo uno de los países con mayor importancia en potencia instalada en aerogeneradores.

J. Sistema de producción eolétrica

Cuando se mencionan los sistemas de producción eolétrica se conocen dos sistemas básicos, el sistema aislado, o bien conocido como en isla y el parque eólico.

1. Sistema aislado. Conformado por aerogeneradores pequeños, con producción mayor a 100 kW y es utilizado para alimentar la demanda de energía eléctrica de núcleos aislados, se necesita contar con un sistema auxiliar de almacenamiento para los momentos en donde la intensidad de viento sea baja, debido a que no está interconectado a la red eléctrica. (López, 2013)

2. Parque eólico. Actúa como una central eléctrica, formado por entre 10 y 100 aerogeneradores de gran capacidad nominal, generando de 600 a 3000 kW cada uno. Generalmente, son utilizado aerogeneradores de eje horizontal, de tripala a barlovento, y se utiliza un sistema de orientación activa con una torre tubular. En esto parques de turbinas

eólicas es regular utilizar rotores de velocidad variable. (López, 2013)

K. Estado de implantación de energía eólica

1. Producción de energía eólica en el mundo. La implantación de parques eólicos ha aumentado notablemente en los últimos años, en el 2008 se tenía una capacidad nominal de 120.8 GW producida únicamente por energía eólica. Además, desde su inicio como fuente de producción energética renovable, en 1993, ha mostrado una evolución relevante. (López, 2013)

Una de las causas principales del aumento de producción de energía eólica es el crecimiento de la capacidad nominal de las turbinas eólicas, en 1995 contaban con una potencia media de 350 kW y actualmente, cuentan con una potencia nominal entre 80 y 2000 kW. (López, 2013)

2. Producción de energía eólica en Guatemala. El país ha tenido un crecimiento de parques eólicos significativos, lo cual se ve reflejado en un aumento relevante en producción energética por medio de aerogeneradores, según el Ministerio de Energía y Minas, en el país se encuentran en funcionamiento tres parques de generación eólica. Dichos parques eólicos generan una potencia efectiva instalada total de 106.5 MW. Las ubicaciones de los parques eólicos son, uno en Villa Canales, Guatemala, otro en San Vicente Pacaya, Escuintla y el último en Agua Blanca, Jutiapa. (Ministerio de Energía y Minas, 2019)

L. Aerogeneradores

Uno de los recursos naturales que se utiliza con mayor frecuencia en el mundo para la generación de energía es el viento. Las plantas en lo alto, en el mar o en zonas donde el viento sopla continuamente, han hecho posible mover turbinas que transforman esa energía en electricidad, alimentando así hogares, carreteras o industrias. (Universidad Talca de Chile, 2018)

Este tipo de movimiento de aire, que ocurre de forma natural, de igual manera puede ser provocado por un objeto en movimiento, y esto es lo que han observado muchos académicos alrededor del mundo, y que ha llevado a proponer la iniciativa para la

generación de energía que explotara la masa de aire producida en la carretera. (Universidad Talca de Chile, 2018)

1. Tipos de aerogeneradores. Los aerogeneradores pueden ser clasificados según distintos criterios, a continuación, se enlistan dichos criterios:

A partir de su disposición del eje de giro:

- Eje vertical: Denominados VAWT, Vertical Axis Wind Turbine. Su eje de rotación es perpendicular a la dirección de movimiento del viento. Su uso es escaso, aunque los más conocidos y utilizados son los tipos Savoius y Darrieus, el primero de ellos posee un funcionamiento similar al de un anemómetro de copas, por otro lado, el segundo posee alábes curvados. Entre las ventajas de usar este tipo de aerogeneradores se encuentra que la sujeción de las palas es de diseño y ejecución sencilla, además de no necesitar un sistema de orientación y la facilidad de ubicación del tren de potencia, generador y transformador. (López, 2013)
- Eje horizontal: Denominados HAWT, Horizontal Axis Wind Turbine. Posee un eje de rotación paralelo a la dirección del viento. Es el tipo usado con más frecuencia para producir energía eléctrica. (López, 2013)

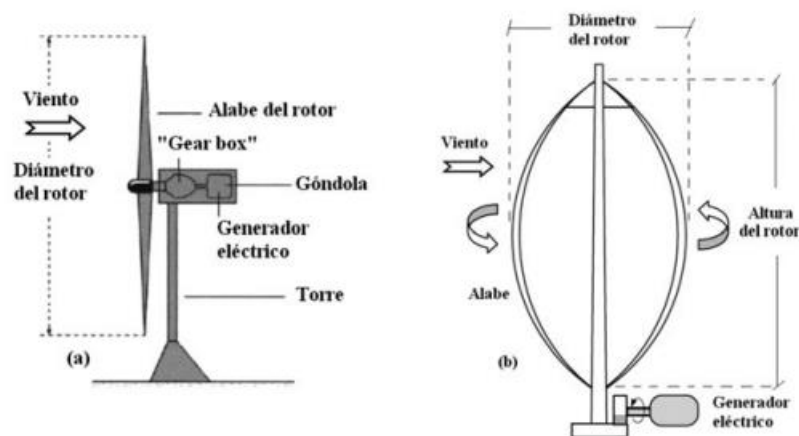


Figura 1. Aerogenerador de eje horizontal (a) y aerogenerador de eje vertical (b).

(Pizano, 2018)

A partir de su número de palas:

- Monopalas y bipalas: Son escasos, pero aun así son utilizados en algunas ocasiones.
- Tripala: En su mayoría, los aerogeneradores utilizan esta cantidad de palas.
- Multipala: Poseen un número variable de palas, entre 16 a 24, usadas para el bombeo de agua.

A partir de su velocidad de rotor que posea la turbina:

- Velocidad constante.
- Velocidad variable.
- Velocidad semi variable.
- Dos velocidades.

A partir del generador eléctrico que posean:

- Generador síncrono multipolo.
- Generador asíncrono con rotor en jaula de ardilla.
- Generador asíncrono con rotor bobina doblemente alimentado.

A partir del lugar donde se ubiquen:

- Aerogeneradores para emplazamientos marinos.
- Aerogeneradores para emplazamientos terrestres.

A partir del tipo de viento:

- Aerogeneradores para viento clase 1.
- Aerogeneradores para viento clase 2.

- Aerogeneradores para viento clase 3.

A partir de la interconexión que posean con la red eléctrica:

- Sistemas eólicos aislados, con o sin energía auxiliar.
- Sistemas eólicos interconectados con la red eléctrica.

A partir de la potencia nominal que posean:

- Microturbinas eólicas, con potencia nominal menor a 5kW.
- Miniturbinas eólicas, con potencia nominal entre 5 y 100 kW.
- Turbinas de media y gran potencia, con potencia nominal entre 100 y 1000 kW.
- Turbinas multimegavat, con potencia nominal entre 1000 y 5000 kW.

2. Funcionamiento de los aerogeneradores. Dichos elementos obtienen su potencia de entrada convirtiendo la fuerza proveniente del viento en una fuerza de giro, la cual actúa sobre las palas del rotor. La cantidad de energía que es transferida al rotor depende de distintos aspectos, enlistados a continuación:

- Densidad del aire.
- Área de barrido del rotor.
- Velocidad del viento.

Además, cada turbina eólica posee una curva de desempeño característica, que muestra datos como velocidad nominal, de conexión y de corte. Dicha curva se ve de la siguiente manera.

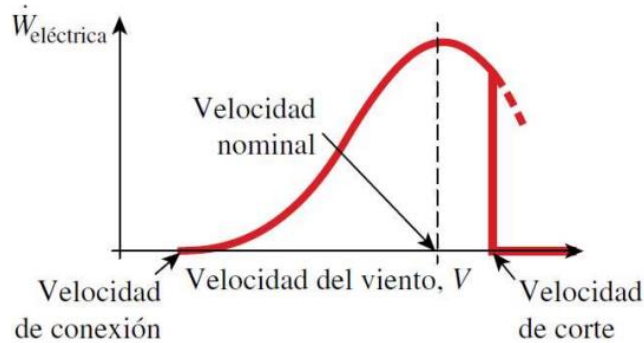


Figura 2. Curva de desempeño de un aerogenerador.

(López, 2013)

En sí, los aerogeneradores funcionan de una manera básica y simple, transformando la energía cinética en energía mecánica, el cual es provocado por el giro de las aspas y el rotor, dicho movimiento transforma la energía mecánica en energía eléctrica. El funcionamiento de los aerogeneradores se explica en seis simples características:

- Orientación automática: El aerogenerador es orientado de manera automática, para tener un mayor aprovechamiento de la energía cinética del viento, con base en los datos que son registrados por la veleta y el anemómetro.
- Giro de palas: El viento hace que las palas giren, en sí, que estas inicien su movimiento con velocidades de viento de aproximadamente 3,5 m/s y así proporcionar la máxima potencia posible del aerogenerador, siendo esta de unos 11 m/s. Es importante mencionar que, con vientos muy fuertes, refiriéndose a un rango de 25 m/s, las palas son situadas en forma de bandera y el aerogenerador se detiene de manera inmediata para evitar tensiones excesivas.
- Multiplicación: El rotor, el cual está conectado a una multiplicadora, elevan la velocidad de giro, iniciando desde unas 13 revoluciones por minuto llegando hasta unas 1.500 revoluciones por minuto.
- Generación: La multiplicadora, por medio del eje rápido, envía su energía al generador acoplado, el cual produce electricidad.
- Evacuación: La energía que es generada se conduce por el todo el interior de la torre llegando hasta la base, y por medio de una línea subterránea es transportada

hasta la subestación, donde es elevada su tensión, y entonces se le inyecta a la red eléctrica, para poder distribuirla a los puntos donde se necesite.

- **Motorización:** Cada una de las funciones críticas del aerogenerador se encuentran totalmente monitorizadas, y son supervisadas desde la subestación y el centro de control, para poder detectar y resolver cualquier incidencia.

3. Componentes de un aerogenerador. Un aerogenerador está compuesto por distintos elementos, los cuales trabajando en conjunto logran generar la energía eléctrica, dichos elementos se enlistan a continuación:

- Palas.
- Caja de engranajes.
- Generador.
- Baterías.

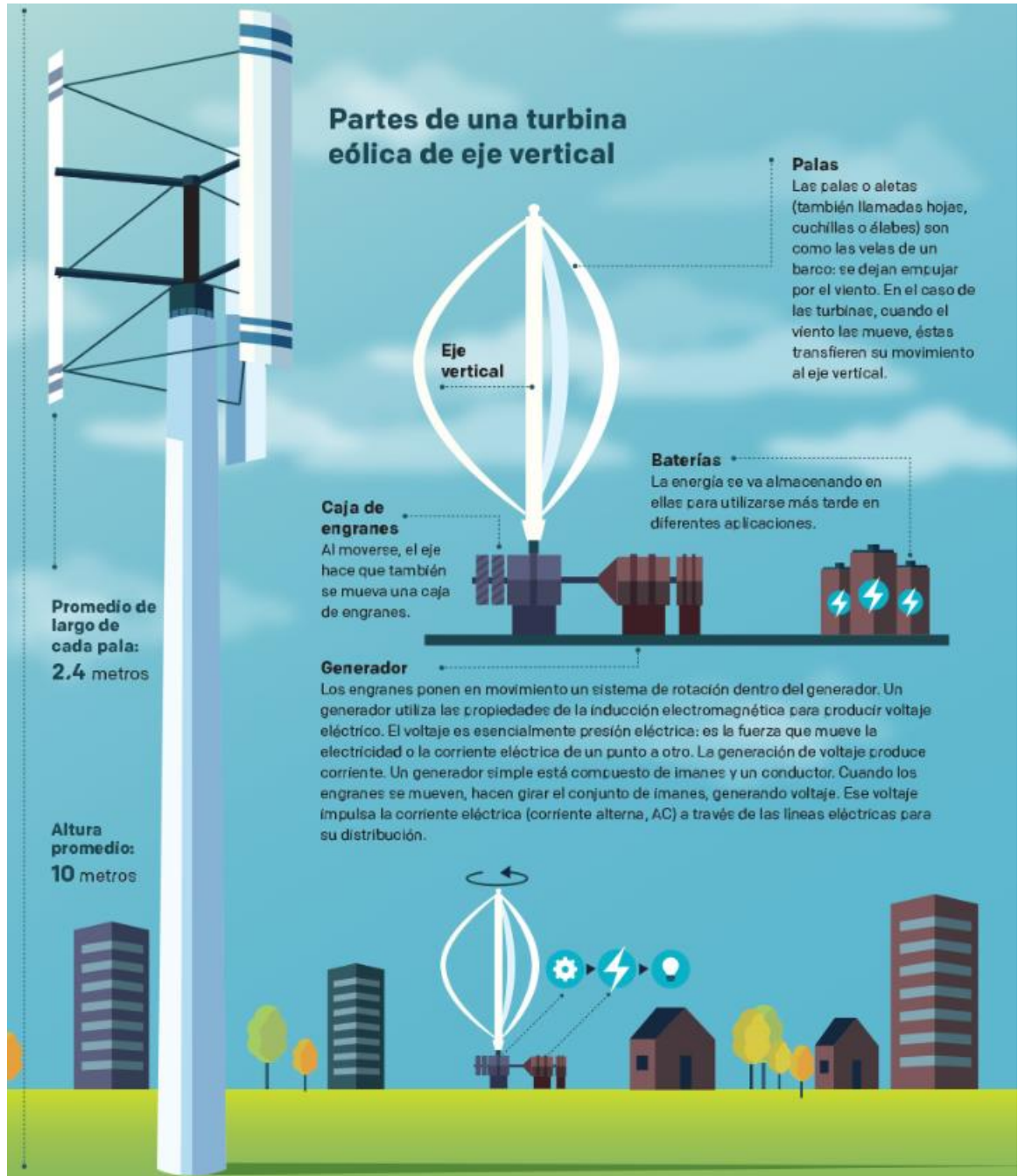


Figura 3. Partes de una turbina eólica de eje vertical.

(Pizano, 2018)

M. Implementación de aerogeneradores verticales internacionalmente

1. **Perú.** En su fase inicial, el proyecto piloto contemplaba la instalación de un aerogenerador que rota debido al flujo de aire generado por los vehículos que pasan por la vía y está ubicado en la tina central de la salida sur de Curicó. Esta ubicación fue elegida

por los expertos de la ruta porque se encuentra en una línea recta de un ancho razonable para su trazado, sin obstruir la vista de los conductores que viajan en cualquier dirección. (Universidad Talca de Chile, 2018)

La turbina utiliza las corrientes de aire generadas por los vehículos que viajan en ambas direcciones de la carretera. La cantidad de energía generada es controlada por un sensor que registra las revoluciones por minuto de las palas rotativas del generador, así como el voltaje generado. La energía eólica se convierte en electricidad que se almacena en baterías especiales.

2. Estambul. El proyecto utiliza una turbina eólica, la cual genera energía eléctrica con las corrientes de viento que generan los autos al transportarse por las carreteras de la ciudad. Dicha turbina es llamada ENLIL, el cual es un aerogenerador inteligente de eje vertical que transforma las carreteras en fuentes de energía renovable utilizando el aire movido por los vehículos durante la conducción. El enfoque innovador de ENLIL para la energía renovable y las carreteras tiene como objetivo crear fuentes de energía sostenibles sin precedentes, minimizar la huella de carbono y contribuir a la economía nacional. Puede generar hasta 2 kWh. También brinda comodidad y seguridad a las ciudades gracias a sensores integrados y una plataforma inteligente. (Devecitech, 2022)

Con la implementación de este aerogenerador híbrido de eje vertical, el cual cuenta con un panel solar integrado, en carreteras, líneas de bus y en otras líneas de transporte, así como en edificios o casas de alto rendimiento, ENLIL logra generar energía eléctrica utilizando tanto el viento generado por los vehículos que se transportan como las corrientes de viento natural que recorren las ciudades y la radiación obtenida por medio de los paneles solares instalados en su parte superior. Además, esta turbina logra medir la temperatura, la humedad, el viento y el CO₂ de la ciudad con los sensores que tiene integrados. (Devecitech, 2022)

Las mediciones realizadas por ENLIL son utilizadas actualmente en un mapa de huella de carbono de la ciudad y, además, colabora con la seguridad de la ciudad, ya que proporciona información sobre posibles terremotos en Estambul con la estación de monitoreo sísmico.

ENLIL proporciona energía renovable tanto a los postes de luz como a las señales electrónicas de las carreteras, permitiendo que se instalen sistemas de iluminación inteligente en estas, donde la iluminación se atenuará si la carretera no está en uso para minimizar el desperdicio de energía, además de reducir el impacto humano en la vida silvestre al prevenir que los animales sean afectados por luces. ENLIL satisface las necesidades energéticas de las carreteras en donde se coloca, lo que permite que se formen redes locales para reducir las pérdidas de energía que se producen en las largas líneas de transmisión.



Figura 4. Turbina ENLIL funcionando en carretera en Estambul.

N. Reutilización de piezas de aerogeneradores posterior a su uso

Life Refibre es un proyecto, con más de cuatro años de trayectoria, el cual impulsa la gestión integral de los residuos de plásticos reforzados con fibra de vidrio que componen las palas de los aerogeneradores, una vez acabada su vida útil. Dichos residuos acaban en el asfalto de las calles. (Renewable Energy Magazine, 2021)

La presente iniciativa ha conseguido la recuperación de la fibra de vidrio presente en los aerogeneradores al final de su vida útil. Con lo cual lograron reducir su presencia en

vertederos, y dotar a estos compuestos de un segundo ciclo de vida, para su incorporación al aglomerado asfáltico.

El proyecto concluyó luego de más de cuatro años de trabajo, permitiendo proporcionar una visión global del proceso de recuperación de los residuos plásticos reforzados con fibra de vidrio, que forman las palas de los aerogeneradores. (Renewable Energy Magazine, 2021)

O. Factores para el diseño de un aerogenerador

1. Densidad de la potencia eólica. Es la potencia suministrada por el viento por unidad de superficie barrida. En Guatemala existen tres límites para la determinación de la colocación de aerogeneradores:

- Menor a 100 W/m^2 no es aconsejable la instalación.
- Cercano a los 400 W/m^2 es considerado como buen sitio para instalación.
- Mayor a 700 W/m^2 es magnífico para la instalación.

2. Longitud de rugosidad del terreno. Se define como un indicador aproximado de la forma en la que varía la velocidad del viento con respecto a la altura de la medición, las turbulencias y los obstáculos que existan en la zona que impiden un flujo uniforme del viento. Dicho dato es representado por la variable “ L_0 ” y es determinado por el Cuadro 2. Longitud de rugosidad del terreno, el cual se presenta a continuación:

Tipo de terreno o superficie con sus respectivas características	Tipo de rugosidad	Longitud de rugosidad (m)
Superficie completamente plana	0	0.0002
Terreno abierto con superficie lisa	0.5	0.0024
Terreno agrícola sin cercos, pocas casas o almacenes y pocas colinas no pronunciadas	1	0.03
Terreno agrícola con algunas casas y almacenes de hasta 8m altura a una distancia aprox de 1250m	1.5	0.055

Terreno agrícola con algunas casas y almacenes de hasta 8m altura a una distancia aprox de 500m	2	0.1
Terreno agrícola con algunas casas y almacenes de hasta 8m altura a una distancia aprox de 250m	2.5	0.2
Pueblos pequeños con edificaciones no muy altas	3	0.4
Ciudades grandes con edificaciones altas	3.5	0.8
Ciudades muy grandes con edificios muy altos y rascacielos	4	0.16

Cuadro 2. Longitud de rugosidad del terreno.

El factor de longitud de rugosidad del terreno se utiliza para obtener la velocidad del viento a la altura del aerogenerador, el cual se obtiene con la siguiente fórmula:

$$V_{ag} = \frac{V_0 \times \ln\left(\frac{h_{ag}}{L_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_0}{L_0}\right)} \text{ (m/s)}$$

Donde:

- V_{ag} : Velocidad del viento a la altura del aerogenerador. (m/s)
- V_0 : Velocidad conocida del viento. (m/s)
- h_{ag} : Altura del aerogenerador. (m)
- h_0 : Altura a la que se midió la velocidad conocida del viento. (m)

3. Potencial de la energía eólica. Dicho factor se determina por la velocidad a la que circula el viento en el sector en el que se coloque el aerogenerador y se expresa de la siguiente manera:

$$W_{disponible} = \frac{1}{2} \rho A V_{ag}^3 \text{ (kW)}$$

Donde:

- V_{ag} : Velocidad del viento a la altura del aerogenerador. (m/s)
- ρ : Densidad del viento. (k/m^3)
- A : Área del disco de la turbina eólica. (m^2)

4. Área de captación de aerogeneradores. Para lograr determinar el área en la que los aerogeneradores captan el viento es necesario determinar la forma que se obtiene en su movimiento de palas, en el caso de los aerogeneradores de eje vertical sería un área rectangular, para la cual se utiliza la siguiente fórmula:

$$A_{captación} = b \times h$$

Donde:

- h : Altura de las palas de aerogenerador. (m)
- b : Base que genera el movimiento lateral de las palas del aerogenerador. (m)

5. Dimensionamiento de un sistema de aerogeneradores. Para lograr determinar la cantidad de aerogeneradores que se necesitan para alimentar una red de energía es necesario saber cuánto consume, para poder utilizar la siguiente fórmula:

$$No. de aerogeneradores = \frac{E \times Fs}{W_{disponible} \times t}$$

Donde:

- $W_{disponible}$: Potencia eólica disponible. (kW)
- Fs : Factor de seguridad. (1.2-1.3)
- E : Consumo energético diario. (kWh)
- t : Tiempo en el que la velocidad del viento se mantiene constante. (h)

Otro factor a tomar en cuenta es la distancia entre columnas y filas de los

aerogeneradores, las cuales se determinan de la siguiente manera:

- En columnas:
 - Mínima 2D
 - Máxima 4D
- En filas:
 - Mínima 8D
 - Máxima 12D

Donde:

- D: Diámetro del disco del aerogenerador. (m)

P. Mantenimientos esenciales para un óptimo funcionamiento

1. Propósitos y alcances. La finalidad de un mantenimiento a los equipos es de conservar este en un estado óptimo, asegurando que sus componentes se encuentren en las mejores condiciones posibles, para lograr un funcionamiento eficiente y buena durabilidad.

2. Tipos de mantenimientos. Son cuatro los tipos de mantenimiento frecuentemente realizados para los sistemas de generación de electricidad utilizando medio eólicos, diferenciados por los tiempos en los que se realizan. A continuación, se desglosa cada uno de ellos:

a. Mantenimientos predictivos. Es tipo de mantenimiento establece la condición técnica, mecánica y eléctrica, real de los aerogeneradores examinados. Para este tipo de mantenimiento se utiliza un programa sistemático de mediciones de parámetros, en los cuales se miden los parámetros más importantes del sistema, dichos parámetros son brindados por el proveedor, al igual que las indicaciones para el monitoreo de los aerogeneradores. En sí, el monitoreo del equipo se basa en aplicaciones de algoritmos matemáticos que se unifican con las operaciones de diagnóstico, y poseen la finalidad de

disminuir las detenciones debido a mantenimientos preventivos, minimizando costos por cambio de piezas y tiempos de improductividad.

b. Mantenimientos preventivos. Son aquellos mantenimientos que se realizan antes de que ocurra una falla, es efectuado bajo condiciones controladas, sin que exista error alguno en el equipo, sino realizado en determinados ciclos de tiempo. Dicho ciclo de tiempo es, generalmente, el recomendado por el fabricante. El mantenimiento preventivo se realiza cuando:

- Existan momentos de disminución de producción o tiempos de vientos pausados o poco convenientes para la producción de energía.
- Existan detenciones planificadas siguiente un ciclo o programa elaborado con anterioridad.

Para realizar este tipo de mantenimiento es necesario contar con personal calificado y equipo adecuado para realizar la conservación de cada uno de los componentes del sistema.

c. Mantenimientos proactivos. Son mantenimientos por iniciativa propia, en los cuales los técnicos encargados de la revisión de los equipos distingan alguna falla o algún dato poco frecuente que indique la posible falla del equipo o de alguna pieza de este. Este tipo de mantenimiento requiere compromiso por parte del equipo de trabajo, al igual que colaboración por cada una de las áreas.

d. Mantenimientos correctivos. Dicho mantenimiento ocurre en el momento que ocurre una falla en el equipo, es decir, de no existir falla momentánea este tipo de mantenimiento es nulo. Es la menos recomendada debido a que influye en temas de producción, ya que el equipo se debe de detener repentinamente.

e. Equipo necesario. Para lograr un óptimo mantenimiento del sistema de generación eléctrica se debe contar con recursos como:

- Mano de obra calificada, capacitada y actualizada.
- Herramientas y equipo adecuado.

- Equipos de repuesto para cada una de las partes del equipo.
- Aceites, grasas, líquido hidráulico y demás materias secundarias para el mantenimiento del equipo.

V. METODOLOGÍA

En la presente sección se exponen la aplicación de los principios aprendidos sobre las energías renovables en el tema eólico con relación a los elementos con los que se construye un aerogenerador de ejes verticales, se toma en cuenta temas de eficiencia del recurso, así como la mejor combinación en los elementos elegidos para su elaboración.

A. Selección de luminaria

Para la selección de la luminaria se utilizaron los requisitos mencionados en la sección E del marco teórico. Cumpliendo dichos parámetros se eligió la luminaria Unistreet gen2 BGP281 T25 1 XLED22-4S/740 DM12 de la marca Philips. En su ficha técnica presenta datos como:

- Eficiencia de luminaria: 134 lm/W
- Temperatura de color: 3000 k
- Índice de reproducción cromática: 99
- Potencia total: 42 W



Figura 5. Luminaria Unistreet gen2 BGP281 T25 1 XLED22-4S/740 DM12.

Además, en la curva de distribución de la luminaria podemos notar, en los radios, el ángulo de iluminación que presentan y, en las circunferencias concéntricas, el valor de la intensidad en candelas de la luminaria seleccionada para $C=0^\circ$, color rojo, y para $C=90^\circ$, en color azul. Como podemos notar en la Figura 5.

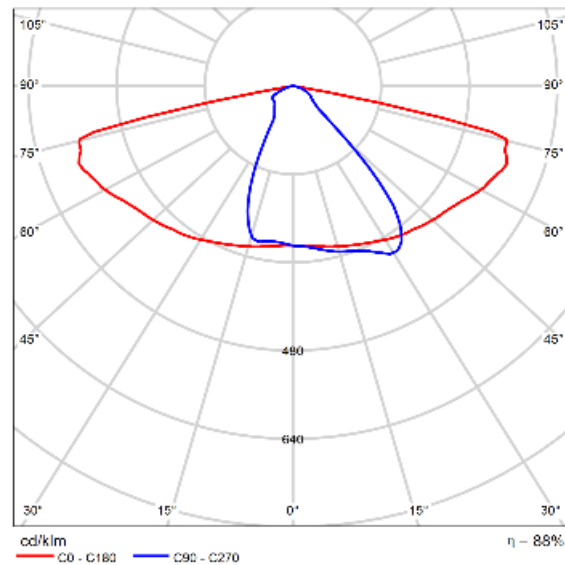


Figura 6. Curva de distribución luminosa de la luminaria seleccionada.

B. Simulación de iluminación de luminaria

Para verificar la correcta y eficiente iluminación de las luminarias seleccionadas se utilizó el programa DIALux Evo, el cual utiliza la normativa UNE-EN 13201, especificadas en la sección F del marco teórico, para verificar el cumplimiento de una correcta iluminación. Con dicho software se obtuvieron los siguientes resultados:

Parámetro	Valor obtenido	Dimensional
Lav	0.98	cd/m ²
Uo	0.46	
UI	0.85	
TI	9	%
REI	0.41	

Cuadro 3. Valores obtenidos en simulación de DIALux.

A partir de dichos valores el programa brinda los gráficos de curvas de iluminación en el área de la carretera. Dichos gráficos son bastante útiles, debido a que brindan información sobre la cantidad de luz recibida en cada punto de la superficie de trabajo, en este caso en el alumbrado público para la carretera, donde se puede notar como iluminan las luminarias seleccionadas la carretera.

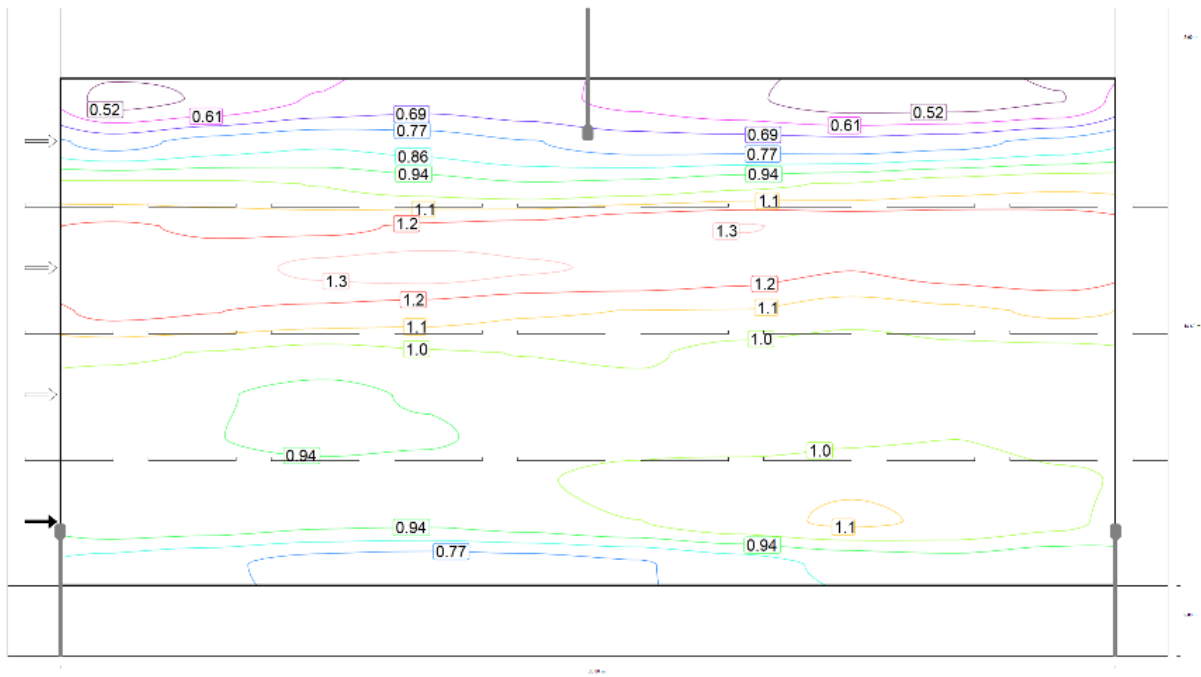


Figura 7. Curvas de iluminación en carretera obtenidas en DIALux.
(DIAL, 2021)

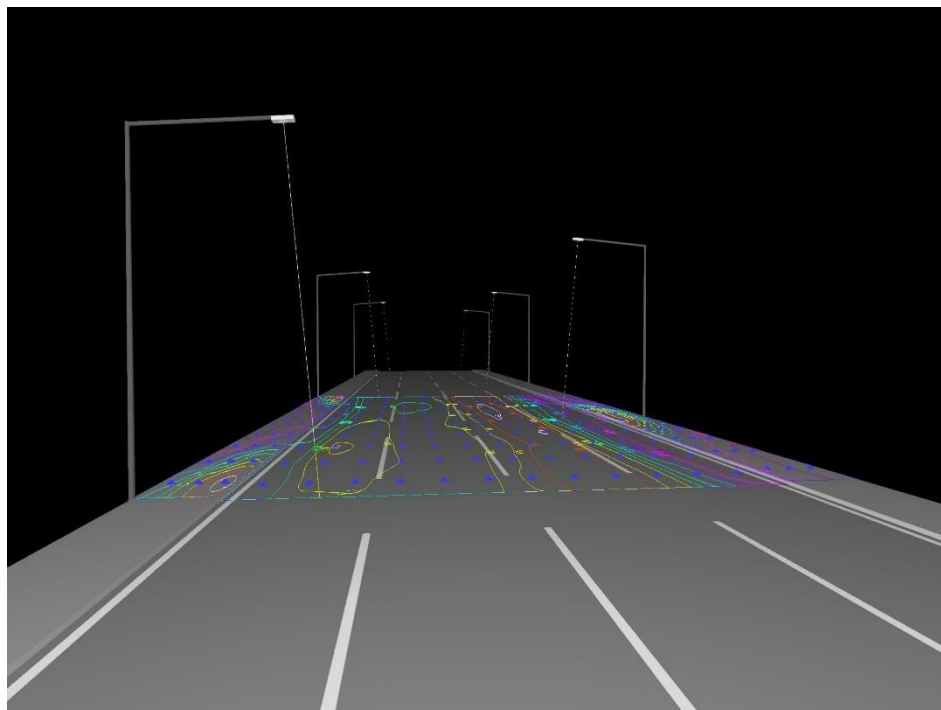


Figura 8. Simulación de iluminación con DIALux.
(DIAL, 2021)

C. Potencial eólico del sitio

1. **Velocidad del viento a la altura del aerogenerador.** Se utilizaron los datos obtenidos en el software Global Wind Atlas para calcular dicho factor. Los valores obtenidos fueron los siguientes:

- Velocidad conocida del viento (V_0): Con un valor de 2.76 m/s visible en la Figura 8 Velocidad conocida del viento y altura a la que se midió.
- Altura del aerogenerador (h_{ag}): Con un valor de 8m.
- Altura a la que se midió la velocidad conocida del viento (h_0): Con un valor de 10 m visible en la Figura 8 Velocidad conocida del viento y altura a la que se midió.
- Longitud de rugosidad (L_0): Con un valor de 1m visible en la Figura 9 Longitud de rugosidad del terreno.

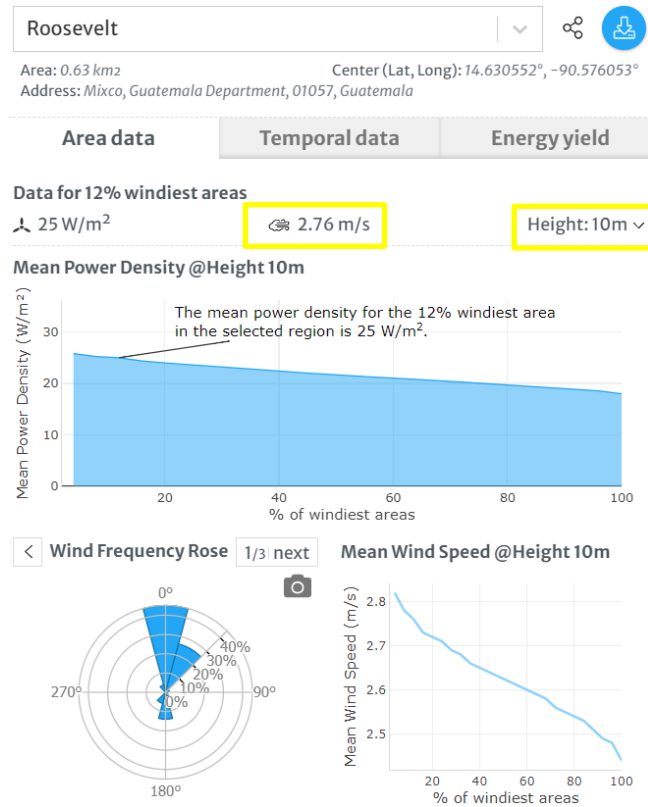


Figura 9. Velocidad conocida del viento y altura a la que se midió.
(Energy Data Info, 2022)

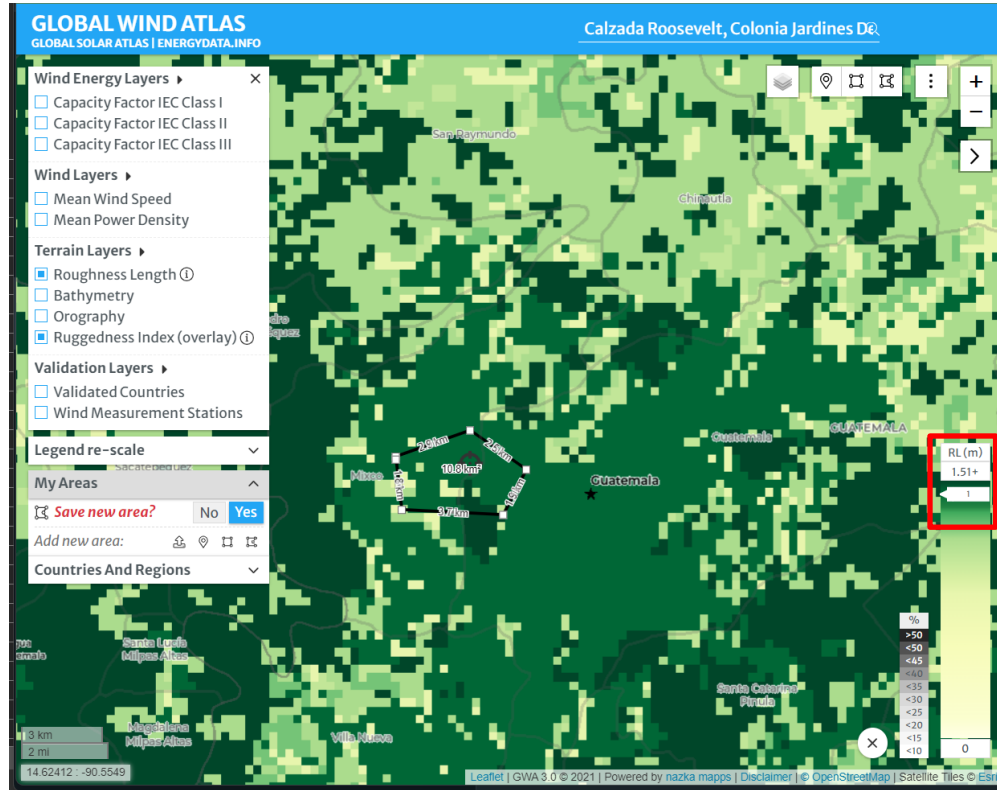


Figura 10. Longitud de rugosidad del terreno.
(Energy Data Info, 2022)

A partir de dichos valores se obtuvo el resultado presentado en el Cuadro 4.

Velocidad del viento a la altura del aerogenerador		
V0	2.76	m/s
hag	8	m
h0	10	m
Lo	1	
Vag	2.49	m/s

Cuadro 4. Velocidad del viento a la altura del aerogenerador.

2. Área de captación de viento del aerogenerador. A partir de especificaciones preestablecidas en distintos proyectos de aerogeneradores de ejes verticales se dimensionó un aerogenerador de las dimensiones siguientes:

- Altura de las palas de aerogenerador (h): Con un valor de 2.4 m visible en la Figura 10 Dimensiones del aerogenerador.
- Base que genera el movimiento lateral de las palas del aerogenerador (b): Con un valor de 2 m visible en la Figura 10 Dimensiones del aerogenerador.

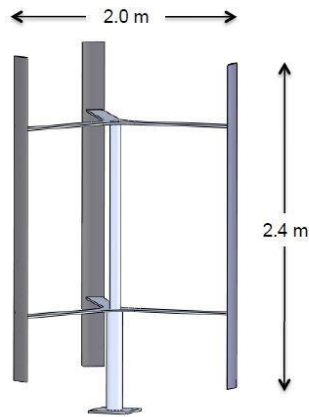


Figura 11. Dimensiones del aerogenerador.

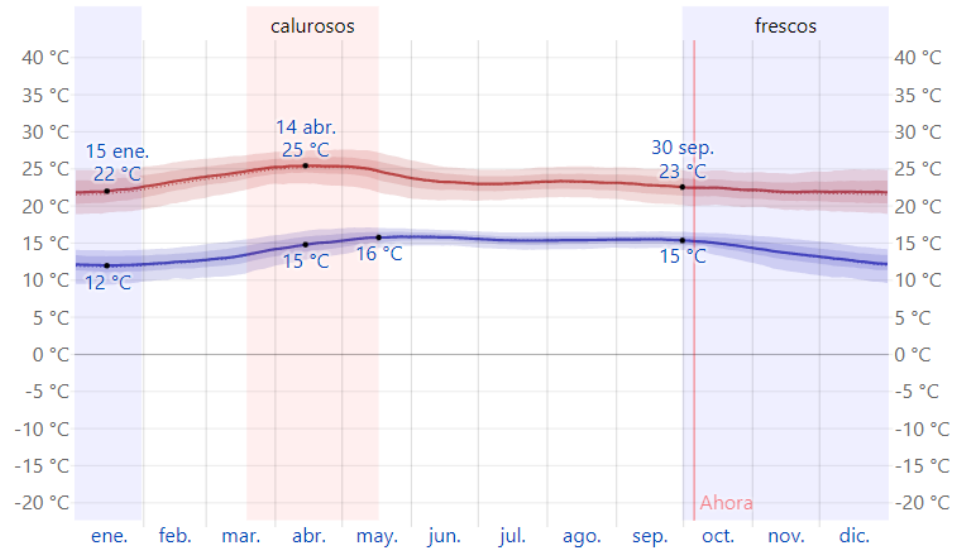
A partir de dichos valores se obtuvo el resultado presentado en el cuadro 5.

Área de captación de viento del aerogenerador		
h	2.4	m
b	2	m
A	4.8	m ²

Cuadro 5. Área de captación de viento del aerogenerador.

3. Potencial de energía eólica en el sitio. Unificando los datos obtenidos anteriormente con los presentados a continuación, se pudo obtener el potencial de energía eólica que presenta la calzada Roosevelt.

- Temperatura del sitio (T): Con un valor de 25 °C visible en la Figura 11 Temperatura promedio en la calzada Roosevelt.
- Constante del gas (R): Con un valor de 0.287 kPa × m³/kg × K
- Presión (P): Con un valor de 101.325 kPa.



La temperatura máxima (línea roja) y la temperatura mínima (línea azul) promedio diaria con las bandas de los percentiles 25° a 75°, y 10° a 90°. Las líneas delgadas punteadas son las temperaturas promedio percibidas correspondientes.

Promedio	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.
Máxima	22 °C	23 °C	25 °C	25 °C	25 °C	23 °C	23 °C	23 °C	23 °C	22 °C	22 °C	22 °C
Temp.	16 °C	17 °C	18 °C	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C	18 °C	18 °C	17 °C	16 °C
Mínima	12 °C	12 °C	13 °C	15 °C	16 °C	16 °C	15 °C	15 °C	15 °C	15 °C	14 °C	13 °C

Figura 12. Temperatura promedio en la calzada Roosevelt. (Weather Spark, 2022)

A partir de dichos valores se obtuvo el resultado presentado en el Cuadro 6.

Potencial de la energía eólica		
P	101.325	kPa
R	0.287	kPa × m ³ /kg × K
T	25	°C
A	4.8	m ²
V _{ag}	2.49	m/s
W _{disp}	0.044	kW

Cuadro 6. Potencial de la energía eólica.

D. Energía consumida por el sistema de luminarias

Previo a calcular la cantidad de aerogeneradores que serían necesarios para suplir la necesidad energética para el sistema de luminarias es necesario calcular dicha cantidad de energía. Para lo cual se obtuvieron los siguientes datos:

- Energía consumida por luminaria: Con un valor de 0.042 kW obtenido de la ficha técnica de la luminaria seleccionada.
- Cantidad de horas a utilizar las luminarias: Con un valor de 12h debido a la cantidad de horas de luz natural y crepúsculo de la calzada Roosevelt visible en la Figura 12.
- Distancia total en Km: Con un valor de 4 Km visible en la Figura 13.

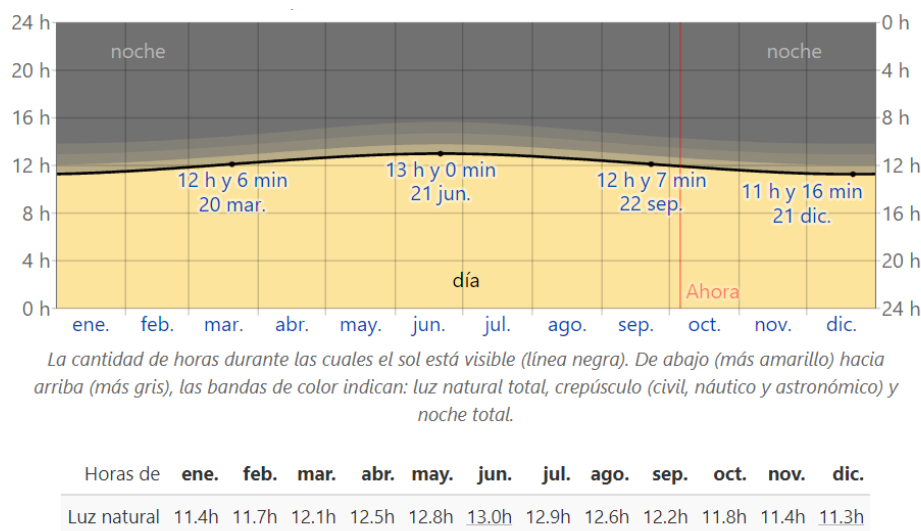


Figura 13. Cantidad de horas de luz natural y crepúsculo de la calzada Roosevelt. (Weather Spark, 2022)

A partir de dichos valores se obtuvo el resultado presentado en el cuadro 7

Energía consumida por sistema de luminarias		
Energía consumida por luminaria	0.042	kW
Cantidad de horas a utilizar luminarias	12	h
Total de energía consumida por luminaria	0.504	kWh
Distancia total en Km	4	km
Distancia total en m	4000	
Luminarias por km	267	
Total energía consumida	134.568	kWh
Total energía consumida en el proyecto	538.272	kWh

Cuadro 7. Energía consumida por sistema de luminarias.

E. Cantidad de aerogeneradores necesarios

Con los datos obtenidos de los cálculos realizados anteriormente se logró calcular la

cantidad de aerogeneradores necesarios para suplir el 100% de energía necesaria para la iluminación de los 4 kilómetros seleccionados de la calzada Roosevelt, dicho resultados se presentan en el Cuadro 8.

Cantidad de aerogeneradores		
E	538.272	kWh
FS	1.25	
Wdisp	0.04	kW
t	10.8	h
No. Aerogeneradores	1416	

Cuadro 8. Cantidad de aerogeneradores requeridos.

F. Ahorro económico

Al implementar aerogeneradores el costo por energía eléctrica utilizada se vuelve nulo, es decir, un valor de Q 0.00, esto se debe a la utilización de energía eólica para suplir la energía que se utiliza para la alimentación de luminarias.

Para demostrar el ahorro económico que se tendría con la implementación de aerogeneradores se comparó el gasto que se tiene por consumo de energía en un periodo de 25 años, tiempo promedio de vida de un aerogenerador, por ende, tiempo de vida del proyecto, con el gasto que se tendría por la implementación de la cantidad de aerogeneradores necesaria para la alimentación de las luminarias. Dicha comparación se muestra en el Cuadro 9.

Ahorro económico		
kW consumido por luminaria	0.042	kW
Horas de utilización	12	h
Precio de energía	1.38	Q/kWh
Gasto por consumo energético en 12h	0.69552	Q
Cantidad de luminarias	1068	
Gasto total por iluminación en 12h de uso	742.82	Q
Gasto por iluminación en 1 año	271,127.61	Q
Cantidad de años de vigencia	25	
Gasto total por iluminación	6,778,190.16	Q
Costo promedio de instalación	4,500.00	Q
Cantidad de aerogeneradores	1416	
Gasto del proyecto	6,372,000.00	Q

Cuadro 9. Ahorro económico por implementación de aerogeneradores.

G. Variables en la cantidad de energía consumida y la cantidad de aerogeneradores

Como podemos notar en la sección E, la cantidad de aerogeneradores para generar energía y alimentar las luminarias necesarias es alta. Con la finalidad de ahorrar en el consumo de energía se decidió calcular para cierta cantidad de horas nocturnas, como lo podemos notar en los cuadros 10 y 11.

Energía consumida por sistema de luminarias		
Energía consumida por luminaria	0.042	kW
Cantidad de horas a utilizar luminarias	4	h
Total de energía consumida por luminaria	0.168	kWh
Distancia total en Km	4	km
Distancia total en m	4000	
Luminarias por km	267	
Total energía consumida	44.856	kWh
Total energía consumida en el proyecto	179.424	kWh

Cuadro 10. Energía consumida por luminarias disminuyendo la cantidad de horas a utilizar.

Cantidad de aerogeneradores		
E	179.424	kWh
FS	1.25	
Wdisp	0.04	kW
t	10.8	h
No. Aerogeneradores	472	

Cuadro 11. Nueva cantidad de aerogeneradores requerida.

Al disminuir un 66% la cantidad de horas, es decir 8 horas menos de las que se estaban calculando con anterioridad, para la que los aerogeneradores deben de suministrar energía la cantidad de estos disminuye, llegando a necesitar únicamente 472 de estos, aproximadamente uno cada 9 metros, cantidad que es más factible de colocar.

H. Variables en el área de captación de las palas de los aerogeneradores

De igual manera, existe la posibilidad de ampliar el área de captación de viento en las palas del aerogenerador, que de ser más grande podría generar mucha más energía, reduciendo la cantidad de turbinas necesarias para la alimentación de la red vía, como lo podemos notar en los cuadros 12 y 13.

Área de captación de viento del aerogenerador		
h	5	m
b	4	m
A	20	m ²

Cuadro 12. Nueva cantidad de aerogeneradores requerida.

Cantidad de aerogeneradores		
E	179.42	kWh
FS	1.25	
Wdisp	0.04	kW
t	10.8	h
No. Aerogeneradores	114	

Cuadro 13. Nueva cantidad de aerogeneradores requerida.

I. Contaminación generada

Al implementar una red de aerogeneradores que generen energía eléctrica a partir de la circulación del viento, la emisión de gases de efecto invernadero se vuelve nula, en cambio, con la utilización de fuentes convencionales para la generación de energía, situación actual, la contaminación generada en periodos largos de utilización de luminarias es considerable. Para determinar la contaminación que genera el actual sistema de iluminación es necesario saber los kilogramos de dióxido de carbono que genera la energía eléctrica, representado en el Cuadro 14. A partir de dichos datos se puede calcular los kilogramos de contaminación generados en un periodo de 25 años, durabilidad promedio de los aerogeneradores, determinando así la cantidad de dióxido de carbono que se dejaría de emitir. (Juárez Calderón, Castellanos, & Fuentes Braeuner, 2019)

Por uso de	Emisiones de kgCO ₂ equivalente	Dimensional
Energía eléctrica	0.181	kgCO ₂ /kWh
Carbón	2.53	kgCO ₂ /kg
Gasolina	2.38	kgCO ₂ /L
Diésel	2.61	kgCO ₂ /L
Biotelano	2.26	kgCO ₂ /L
Biodiésel	1.83	kgCO ₂ /L
Gas natural	2.15	kgCO ₂ /L

Cuadro 14. Contaminación generada por el uso de distintas fuentes de energía. (Juárez Calderón, Castellanos, & Fuentes Braeuner, 2019)

Contaminación generada		
Portencia de luminaria	0.042	kW
Horas de utilización	12	h
Consumo de luminaria	0.504	kWh
Emisión de energía eléctrica	0.181	kgCO2/kWh
Emisión por luminaria	0.091224	kgCO2
Cantidad de luminarias	1068	
Emisión del sistema de luminarias	97.427232	kgCO2
Emisión en 25 años	2435.6808	kgCO3

Cuadro 15. Cantidad de contaminación generada sin uso de aerogeneradores.
(Juárez Calderón, Castellanos, & Fuentes Braeuner, 2019)

VI. CONCLUSIONES

- 1) La construcción de una red de aerogeneradores en la calzada Roosevelt para la generación de energía eléctrica, la cual alimente luminarias para la iluminación de esta no son posible, a pesar de que por temas técnicos el sistema si pudiera ser instalado, debido a la cantidad de aerogeneradores necesarios no sería posible, ya que se necesita más espacio del que se tiene en el camellón central del tramo vial. Sin embargo, la implementación de aerogeneradores sería un tema de mucha ayuda para la disminución de contaminación y la iluminación en horarios nocturnos, por lo cual, es posible la disminución de la cantidad de estos para hacer viable la construcción del sistema tomando en cuenta que disminuiría la cantidad de horas de sustento energético que brindarían, demostrado en los cuadros 10 y 11.
- 2) Se planteó un proyecto de vida útil de 25 años, siendo esta la vida útil de los aerogeneradores llevando a cabo el mantenimiento necesario, para lograr establecer el ahorro económico que se tendría en la implementación de los aerogeneradores, contando con una economización de Q 406,190.16. Aunque dicho ahorro sea mínimo es existente, asegurando un gasto menor en temas económicos. El punto a tomar en cuenta en este caso es la imposibilidad de aprovechar el viento emitido por el tránsito vehicular, esto se debe a que el flujo de viento que generan es turbulento y nada aprovechable.
- 3) Al implementar una red de aerogeneradores que generen energía eléctrica para la iluminación de la calzada Roosevelt se tendría una contaminación nula debido a la generación de energía por fuentes eólicas, dejando de emitir un total de 2435.6808 kilogramos de dióxido de carbono en un periodo de 25 años, la cual sería la durabilidad del proyecto de generación de energía eoelectrica.

VII. RECOMENDACIONES

- 1) Generar políticas de descentralización y diversificación sobre las producciones de energía eléctrica en Guatemala, en caso de no poder ser utilizada por la totalidad de los que la necesitan, se vuelve una alternativa ideal para lugares donde no se posea alguna otra fuente de generación, además de poder ser complemento de otras alternativas de energía. La utilización de tecnologías descentralizadas para actualizar y minimizar el impacto en el suministro de energía es un paso clave para la mejoría en temas de iluminación en el país, principalmente en zonas rurales.
- 2) Para cumplir con los trabajos de mantenimiento necesarios es recomendable contar con existencia de repuestos, ya que la mayoría de fábricas de dichos repuestos se encuentran a una distancia considerable de nuestro país. Es recomendable contar con los siguientes repuestos:
 - a. Aspas.
 - b. Filtros de aceite y fluido hidráulico.
 - c. Sistemas de control completo lo que incluye PLC y software.
 - d. Embragues.
 - e. Generador.
 - f. Caja multiplicadora.
 - g. Motor de sistemas de alineación.
 - h. Anemómetros y sensores.
 - i. Fricciones de freno.
 - j. Transformadores de tensión eléctrica.
 - k. Capacitores eléctricos.
- 3) Existen ciertos criterios críticos para la determinación de las decisiones económicas a tomar en la implantación de un proyecto eólico, los cuales serán la capacidad de producción que se tendrá, al igual que el costo inicial de instalación. Además, tendrá gran interés el valor de la unidad de energía disponible en tecnologías competitivas y el precio actual al cual se puede vender la energía eléctrica.

- 4) La falta de normativas que rijan la iluminación de carreteras en Guatemala es un tema a considerar. El obligar a las empresas constructoras y ejecutoras a instalar un sistema de alumbrado vial en cada una de las carreteras a nivel nacional sería un gran paso para reducir la cantidad de hechos viales que suceden anualmente, ya que, como se presentó con anterioridad, la principal razón de dichos hechos viales es la poca visibilidad que existe. Además, generando una red de alumbrado se genera la sensación de seguridad, lo cual ayudaría a la disminución de delincuencia. Por lo cual, generar una normativa para la iluminación de carreteras es muy recomendable.

- 5) Para lograr una mayor eficiencia en la generación de energía eléctrica que alimente el sistema de luminarias es recomendable utilizar 2 tipos de tecnologías de generación por medio de fuentes renovables, en el caso del presente proyecto, sería ideal utilizar energía eólica junto con energía solar para una mayor generación de energía eléctrica, colocando el panel solar en la parte superior de la turbina eólica.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- ALVA, J. W. (2003). *Análisis de Accidentes Viales Aplicando la Ingeniería de Tránsito*. Guatemala.
- Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (2021). *Monitor Mensual del Mercado Eléctrico Nacional*. Retrieved from Monitor Mensual 2021: <https://www.cnee.gob.gt/wp/monitor-mensual-2021/>
- Contratación Pública Ecológica. (2016). *Criterios de la CPE de la UE aplicables al alumbrado público y los semáforos*. Unión Europea: CPE.
- Devecitech. (2022). *ENLIL*. Retrieved from ENLIL: <https://devecitech.com/>
- DIAL. (2021). *DIALux Evo (Versión 10) [Software]*. Retrieved from <https://www.dialux.com/en-GB/news-detail/now-available-for-download-dialux-evo-10>
- Energy Data Info. (2022). *Global Wind Atlas*. Retrieved from Global Wind Atlas: <https://globalwindatlas.info/en>
- Instituto Nacional de Estadística. (2021). *Indicadores de Accidentes de Tránsito Período 2016 - 2020*. Guatemala.
- Juárez Calderón, M. A., Castellanos, E., & Fuentes Braeuner, G. (2019). *Emisiones históricas de gases de efecto invernadero y sus tendencias*. Guatemala: Editorial Universitaria UVG.
- López, M. V. (2013). *Ingeniería de la Energía Eólica*. México : Alfaomega Grupo Editor.
- Ministerio de Energía y Minas. (2019). *Las energías renovables en la generación eléctrica en Guatemala*. Guatemala.
- Pizano, R. (2018). *Funcionalidad de una turbina eólica de eje vertical*. Retrieved from <http://www.proyectoefse.mx/2018/06/28/turbina-eolica-de-eje-vertical/>
- Renewable Energy Magazine. (2021). *Energías renovables*. Retrieved from Life Refibre, de las palas de los aerogeneradores al asfalto de las carreteras: <https://www.energias-renovables.com/eolica/life-refibre-de-las-palas-de-los-20210105>
- Rodríguez, L. (2014). *Las Energías Renovables*. Monterrey.
- Santos Ruano, M. (2005). *Análisis para la instalación y mantenimiento de aerogeneradores*. Guatemala: Editorial Universitaria USAC.
- Schwab, K. (2020). *Quality of Roads. The Global Competitiveness Report 2019*. Geneva: World Economic Forum.
- Una Norma Española. (2015). *Documentos normativos UNE-EN*. Madrid.
- Universidad Talca de Chile. (2018). *Generador eólico aprovecha energía producida por vehículos en carretera*. Retrieved from Generador eólico aprovecha energía producida por vehículos en carretera: utalca.cl/noticias/generador-eolico-aprovecha-energia-producida-por-vehiculos-en-carretera/
- Weather Spark. (2022). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Mixco Guatemala*. Retrieved from <https://es.weatherspark.com/y/11673/Clima-promedio-en-Mixco-Guatemala-durante-todo-el-a%C3%B1o>

IX. ANEXOS

	2018		2019		2020	
	Datos	Porcentaje (%)	Datos	Porcentaje (%)	Datos	Porcentaje (%)
Total	6395	100	7047	100	6350	100
Colisión	3059	47.8	3631	51.5	3614	56.9
Atropello	2060	32.2	2102	29.8	1608	25.3
Choque	705	11.0	593	8.4	418	6.6
Vuelco	197	3.1	188	2.7	140	2.2
Caída	168	2.6	58	0.8	28	0.4
Derrape	143	2.2	402	5.7	491	7.7
Embarranco	59	0.9	73	1.0	45	0.7
Encunetó	4	0.1	-	-	6	0.1
Ignorado	-	-	-	-	-	-

	2018		2019		2020	
	Datos	Porcentaje (%)	Datos	Porcentaje (%)	Datos	Porcentaje (%)
Total	6395	100	7047	100	6350	100
Colisión	3059	47.8	3631	51.5	3614	56.9
Atropello	2060	32.2	2102	29.8	1608	25.3
Choque	705	11.0	593	8.4	418	6.6
Vuelco	197	3.1	188	2.7	140	2.2
Caída	168	2.6	58	0.8	28	0.4
Derrape	143	2.2	402	5.7	491	7.7
Embarranco	59	0.9	73	1.0	45	0.7
Encunetó	4	0.1	-	-	6	0.1
Ignorado	-	-	-	-	-	-

Cuadro 16. Datos estadísticos de accidentes registrados según tipo de accidente.
(Instituto Nacional de Estadística, 2021)

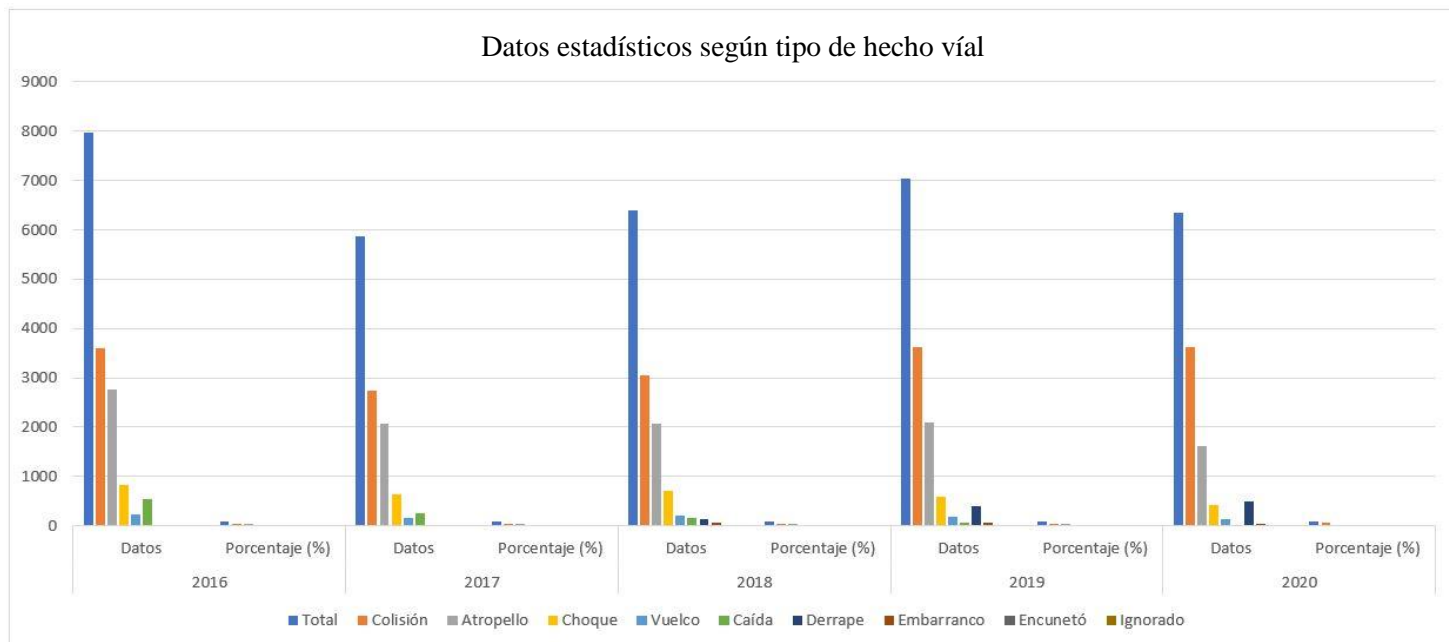


Figura 14. Datos estadísticos de accidentes registrados según tipo de accidente. (Instituto Nacional de Estadística, 2021)

	2017		2018		2019		2020	
	Datos	Porcentaje (%)	Datos	Porcentaje (%)	Datos	Porcentaje (%)	Datos	Porcentaje (%)
Total	1480	100	1469	100	1757	100	1549	100
Colisión	509	34.4	543	37.0	645	36.7	651	42.0
Atropello	557	37.6	496	33.8	557	31.7	469	30.3
Choque	249	16.8	213	14.5	196	11.2	141	9.1
Vuelco	77	5.2	79	5.4	111	6.3	63	4.1
Caída	88	5.9	53	3.6	27	1.5	10	0.6
Derrape	-	-	44	3.0	148	8.4	179	11.6
Embarranco	-	-	41	2.8	71	4.0	35	2.3
Encunetó	-	-	-	-	-	-	1	0.1
Ignorado	-	-	-	-	-	-	-	-

Cuadro 17. Datos estadísticos de víctimas fallecidas en accidentes según tipo de accidente. (Instituto Nacional de Estadística, 2021)

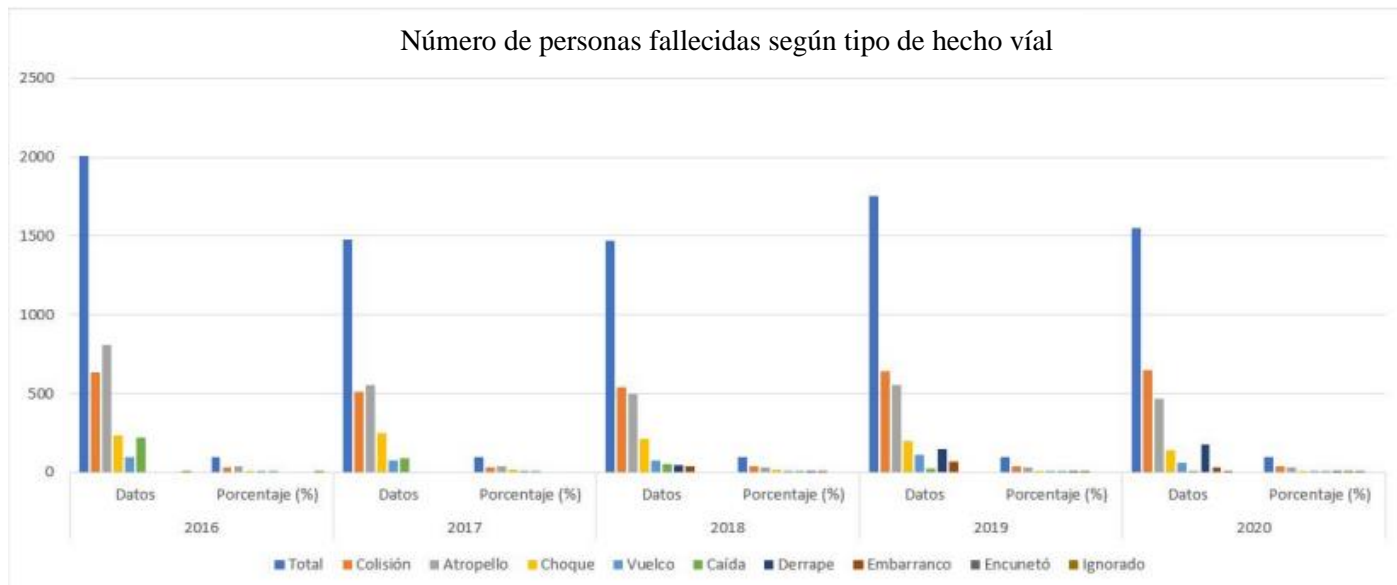


Figura 15. Datos estadísticos de accidentes registrados según tipo de accidente. (Instituto Nacional de Estadística, 2021)

	2017		2018		2019		2020	
	Datos	Porcentaje (%)	Datos	Porcentaje (%)	Datos	Porcentaje (%)	Datos	Porcentaje (%)
Total	7145	100	7938	100	8907	100	6593	100
Colisión	3564	49.9	4084	51.4	4777	53.6	3976	60.3
Atropello	1758	24.6	1850	23.3	1865	20.9	1338	20.3
Choque	823	11.5	645	8.1	896	10.1	360	5.5
Vuelco	587	8.2	848	10.7	713	8.0	385	5.8
Caída	413	5.8	165	2.1	61	0.7	34	0.5
Derrape	-	-	139	1.8	323	3.6	403	6.1
Embarranco	-	-	202	2.5	270	3.0	94	1.4
Encunetó	-	-	5	0.1	-	-	3	0.05
Ignorado	-	-	-	-	-	-	-	-



Figura 16. Datos estadísticos de accidentes registrados según tipo de accidente. (Instituto Nacional de Estadística, 2021)

Energía renovable generada en el mundo			
Año	Potencia (EJ)	Año	Potencia (EJ)
2000	2.64	2011	11.12
2001	2.75	2012	12.6
2002	3.1	2013	14.36
2003	3.37	2014	13.03
2004	3.87	2015	18.08
2005	4.37	2016	20.06
2006	5.03	2017	23.04
2007	5.94	2018	25.83
2008	7.16	2019	28.82
2009	8.24	2020	31.71
2010	9.7	2021	35.08

Cuadro 18. Datos estadísticos del aumento de producción de energía renovable en el mundo. (Rodríguez, 2014)

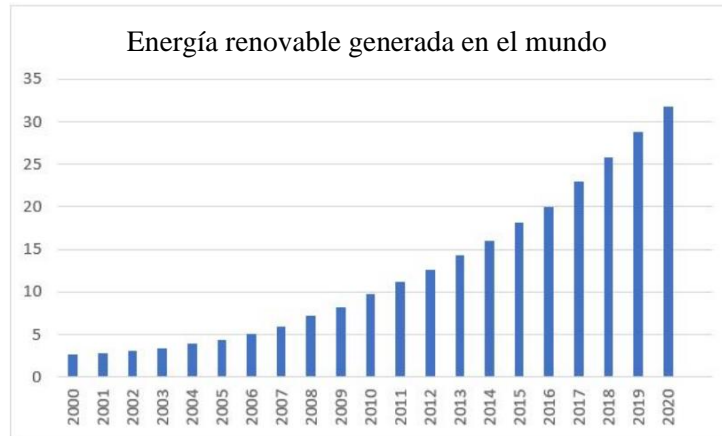


Figura 17. Datos estadísticos del aumento de producción de energía renovable en el mundo. (Rodríguez, 2014)

Energía renovable generada en el mundo por tipo de fuente					
Año	Hidroeléctricidad consumida (EJ)	Energía nuclear consumida (EJ)	Gas natural consumida (EJ)	Electricidad consumida (EJ)	Energía solar consumida (EJ)
2000	99	26	86	27	155
2005	115	27	99	28	169
2010	123	26	114	32	172
2015	130	23	125	35	173
2020	131	24	138	38	177
2025	138	26	154	43	182
2030	145	27	166	46	184
2035	149	28	175	47	187
2040	151	29	180	49	190
2045	158	30	184	50	190
2050	163	31	187	51	191

Cuadro 19. Datos estadísticos del aumento de producción de energía renovable en el mundo según tipo de fuente de generación.

(Rodríguez, 2014)

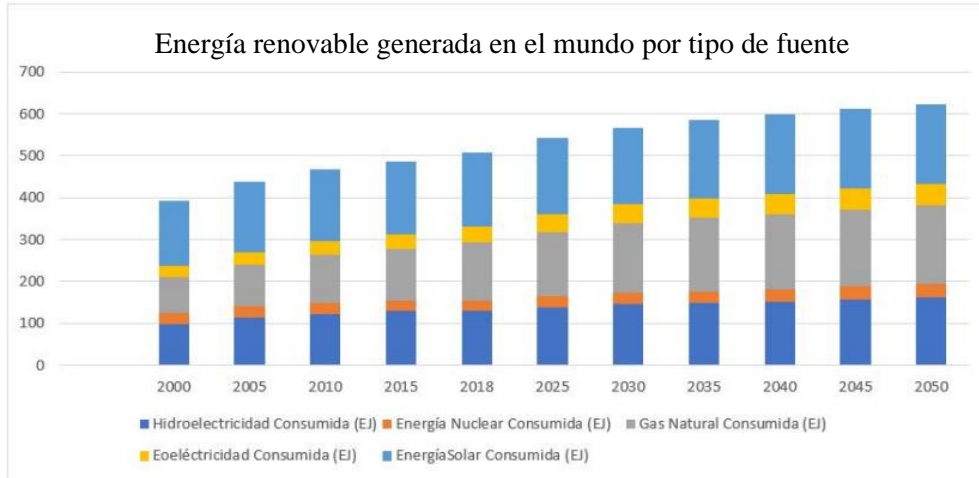


Figura 18. Datos estadísticos del aumento de producción de energía renovable en el mundo según tipo de fuente de generación.

(Rodríguez, 2014)

Promedio mensual de energía generada	
Renovable	744.70
No Renovable	382.10
Total	1126.80

Cuadro 20. Promedio mensual de energía eléctrica generada en Guatemala.

(Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2021)

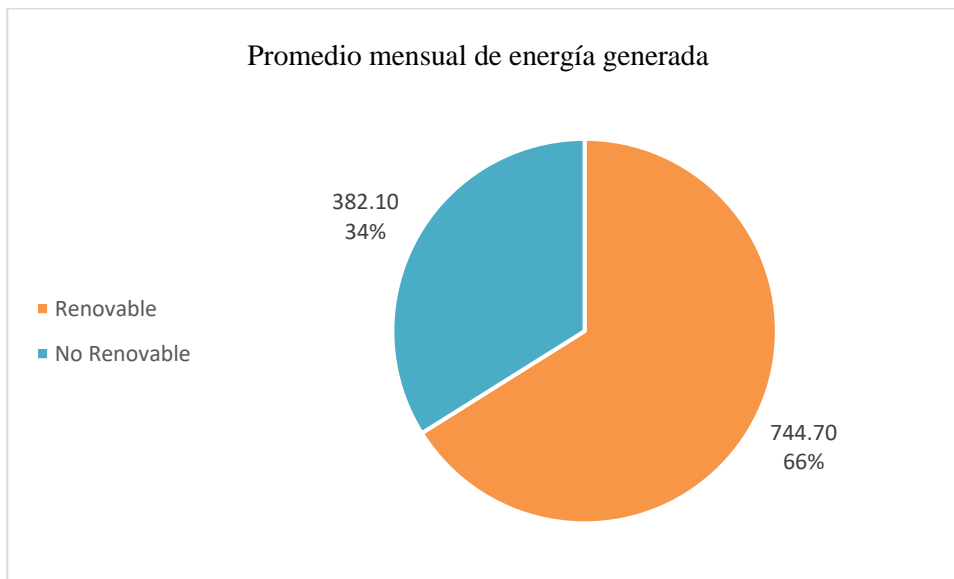


Figura 19. Promedio mensual de energía eléctrica generada en Guatemala.

(Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2021)

Promedio mensual de generación de energía por tipo de fuente	
Fuente	Energía generada (GW)
Hidroeléctrica	389.3
Cogeneración	272.8
Carbón	268.2
Comprada a México	102.9
Eólica	42.5
Geotérmica	23.6
Solar	18.6
Bunker	8.2
Gas Natural	0.7
Total	1126.8

Cuadro 21. Promedio mensual de generación de energía eléctrica por tipo de fuente en Guatemala.
(Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2021)

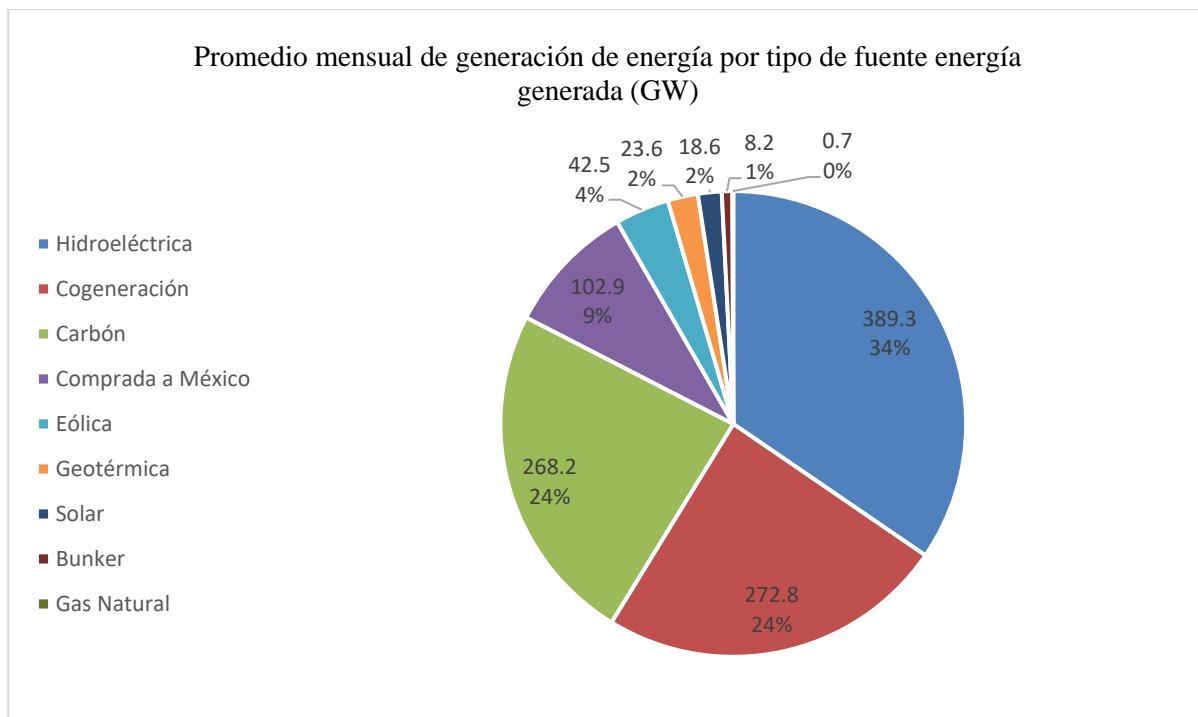


Figura 20. Promedio mensual de generación de energía eléctrica por tipo de fuente en Guatemala.
(Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2021)

Elemento	Fluorescentes (mg)	VMAP (mg)	VSAP (mg)	Hm (mg)
Mercurio	0.0175	0.02	0.02	0.03
Plomo	0.0052	0.5	0.3	0.3
Estroncio	0.14	0.05	0.03	0.001
Itrio	0.063	0.12	0.004	0.07

Cuadro 22. Contenido de mercurio para cada tipo de tecnología. (Contratación Pública Ecológica, 2016) *VMAP: Vapor de Mercurio a Alta Presión; *VSAP: Vapor de Sodio a Alta Presión; *Hm: Haluro metálico (halógenas).